

博士論文（要約）

カンブリア紀初頭における最初期動物多様化の研究：南中国のカン
ブリア系最下部の層序および SSF 群集変遷

(Study on the first animal diversification during the earliest Cambrian:
Stratigraphy of the lowermost Cambrian in South China, and faunal
change in SSF assemblages)

河野 聖那

目次

要旨

第1章：序論	1
1.カンブリア紀	1
2. SSF の多様化	2
3. カンブリア系基底の定義	3
4. 急速な多様化の原因	4
5.研究目的	6
図	8
第2章：岩相層序	12
1. 南中国, 雲南省	12
2. 澄江地域の検討セクションのカンブリア系下部の層序	13
2.1. 小濫田セクション	13
2.2. 洪家冲セクション	14
3. その他の地域	15
3.1. 梅樹村セクション	15
3.2. 王家湾セクション	15
3.3. 小黄草嶺セクション	16
3.4. 朱家青セクション	16
4. 岩相層序の結果	16
4.1. 小濫田セクション	16

4.2. 洪家冲セクション	22
4.3. 小濫田セクションと洪家冲セクションの対比	23
4.4. 小黄草嶺セクション	24
4.5. 朱家青セクション	25
5. 中誼村部層中位に産する特異な碎屑岩層による広域対比	27
5.1. 7つのセクションにみられる碎屑岩層について	27
5.2. 鍵層の年代制約	30
6. まとめ	30
図	32
第3章：ジルコンによる U-Pb 年代測定 (除外)	71
第4章：SSF 層序 (除外)	72
第5章：考察 (除外)	73
第6章：結論 (除外)	74
謝辞	75
引用文献	76

第1章 序論

カンブリア紀初期の動物の多様化の歴史の概説を述べ、最後に本研究の目的を述べる。原生代と顕生代との境界は、地球生命史の中で最も重要な地質年代境界の一つである (図 1)。エディアカラ紀末からカンブリア紀最初期にかけての短期間に硬骨格をもつ動物が初めて出現した。とくにカンブリア紀の前半は、海生動物の急激な多様化によって特徴付けられ、現世に生息する動物の門のほとんどが一気に出そろったことが化石記録に残されている。この動物多様化事変は、その急激さを強調する意味でしばしばカンブリア紀の爆発的進化 (Cambrian explosion, Cambrian radiation event) と呼ばれている (Brasier, 1979; Gould, 1989; Marshall, 2006; Erwin and Valentine, 2013; Shu et al., 2014; Landing and Kouchinsky, 2016; Zhu and Li, 2017; Zhuravlev and Wood, 2018 など)。

ただし、この動物多様化が急速であったことは、主に希少な Lagerstätten から産する軟体部組織を保存した極端な化石動物群の多様性の研究に基づいて強調されたことに注意が必要である。例えば、中国雲南省の澄江 (Chengjiang) 群集 (Zhang and Hou, 1985; Hou et al., 1995; Shu et al., 1999; Hu, 2005 など)、清江 (Qingjiang) 群集 (Fu et al., 2019)、そしてカナダのバージェス頁岩 (Burgess Shale) 群集 (Walcott, 1911; Conway Morris et al., 1987; Caron et al., 2013 など) が著名な Lagerstätten が知られており、細部まで極めて保存状態の良い多種類の化石が記載されている。それらはいずれもカンブリア紀前期の後半以降 (澄江群集; 約 520 Ma, 清江群集; 約 518 Ma, バージェス頁岩群集; 約 505 Ma) の化石群集であり、カンブリア紀最前期の Lagerstätten は Zhangjiagou Lagerstätte (kuanchuanpu fauna; Shao et al., 2018; 2020 a, b; Liu et al., 2019) に限られる (図 2)。したがって、カンブリア紀最初期の軟体部化石の産出はきわめて少なく、生痕化石を除けば、これまでに雲南省産の最大体長 30 cm に及ぶミミズ型

の *Vittatusivermis annularius* (Zhang et al., 2017 ; 詳細な帰属不明) が報告されたのみである。そのため、カンブリア紀最初期における大型動物の急速な多様化を示す直接的な証拠はない。

SSF の多様化

エディアカラ紀最末期からごく一部の生物 (*Cloudina*, *Namacalathus*, *Namapoikia* そして *Sinotubulites* ; Germs, 1972; Grant, 1990; Hoffman and Mountjoy, 2001; Amthor et al., 2003; Hua et al., 2005; Chen et al., 2008; Cortijo et al., 2010; Cai et al., 2014; 2015; Wood et al., 2017) を除くと、エディアカラ紀の生物のほとんどは軟体部のみから構成されていた。これらのほとんどは絶滅し (Yang et al., 2016; Han et al., 2017; Zhu et al., 2017), それに代わってカンブリア紀最初期に小型の有殻化石 (small shelly fossils; SSF) が出現した (Zhuravlev and Wood, 2008; 2018; Cai et al., 2019)。SSF は、上述の澄江群集大型動物の出現以前のカンブリア紀最初期の地層 (Fortunian からステージ 2 ; 図 3) から多産する (Qian and Bengtson, 1989; Bengtson et al., 1990; Steiner et al., 2007; Yang et al., 2014; 2016 など)。

SSF は硬骨格を有する様々な分類群の化石の総称であり (Matthews and Missarzhevsky, 1975) , その中に動物の刺 (spicule), 硬皮 (sclerite), 骨片 (ossicle) などを含む。これまでに少なくとも海綿動物, 刺胞動物, 軟体動物, 腕足動物, 毛顎動物などが確認されているが, 帰属不明のものも多く, 詳細はいまだ未解明である。

これまで SSF は南中国, シベリア, モンゴル (Demidenko et al., 2003; Dorjnamjaa and Altanshagai, 2015; Pruss et al., 2019), 南オーストラリア (Bengtson et al., 1990; Gravestock et al., 2001, Topper et al., 2009; Skovsted et al., 2015; Betts et al., 2016; 2018), 北中国 (Li et al., 2014; Moore et al., 2014; Yun

et al., 2016), カザフスタン (Dzik, 2003; Yang et al., 2016), モロッコ (Streng and Skovsted, 2006), ドイツ (Elicki, 1994) など世界中のカンブリア系最下部から産出が報告されており, なかでも南中国とシベリアにおいて最も詳しい研究がなされている (Rozanov et al., 1969; Luo et al., 1982, 1984; Khomentovsky, 1986; Qian and Bengtson, 1989; Missarzhevsky, 1989; Rozanov and Zhuravlev, 1992; Khomentovsky and Karlove, 1992, 1993; Steiner et al., 2007; Yang et al., 2014; 2016). 南中国において SSF は 5 つの群集帯が識別されており (Steiner et al., 2007), なかでも第一群集から第二群集にかけて 11 から 140 属へと急増し (図 4; Li et al., 2007), その形態も単純なものから複雑なものへと変化したことがわかっている. SSF の急速な多様化は, SSF をもった動物, およびその後に見られた各種の動物の祖先動物の多様化を暗示する. しかし, 前述のように SSF は動物の部品の一部である場合もあり, しばしば同じ動物の一部が別の動物化石と誤ってみなされたりしたことから, それらの分類学上の位置付けや生態などの解明は難しい. また, 岩相による化石産出の制限, 地層の欠損などにより, 化石産出の豊富さは地点により大きく異なり, さらに化石の産出区間の長さなど様々な問題により, より若い時代の地層で試みられる高精度な層序の解明や対比は極めて難しい.

カンブリア系基底の定義

エディアカラ紀とカンブリア紀との境界認定基準の一つに生痕化石 *Treptichnus pedum* の初出層序が挙げられる (Geyer and Landing, 2016; Peng et al., 2020). エディアカラ紀までの海底面のみでの二次元的な生痕化石と異なり, 堆積物内に広がる三次元的な生痕化石のなかで最古例となる *T. pedum* の初出層準をもってカンブリア紀の基底と定義することが採用された (Landing, 1994; Peng et al., 2012). 現在はカンブリア紀の基底の Global Stratotype Sections and Points

(GSSP)はカナダのニューファンドランド島の、Fortune Head に露出する Chapel Island 層の第二部層の基底から 2.4 m 上位 (Narbonne et al., 1987; Landing, 1991, 1994; Gehling et al., 2001; Landing et al., 2007) に定められている。一方で、エディアカラ-カンブリア境界の年代については、近年ナミビア南部の Swartpunt および Swartklooferg セクションから得られたジルコン U-Pb 年代に基づき 538.8 Ma (Linnemann et al., 2019)とされている。しかし一般に *T. pedum* の初出は珪質な岩に限られ、炭酸塩岩中では *T. pedum* の識別は困難なことが多い (Brasier et al., 1992) ため、炭酸塩岩が卓越する南中国で *T. pedum* の初出層準を限定することは難しい (Zhu et al., 2001; Steiner et al., 2007)。例えば南中国のエディアカラ-カンブリア紀の模式地である梅樹村セクションでは marker A (SSF の初出) 層準よりかなり上位に *T. pedum* の初出が確認されるのみである。このように生痕化石の初出を用いたカンブリア紀基底の識別が全ての地域で有効ではないため、炭素同位体比変動を利用した識別が提案された (Zhu et al., 2006)。これまで、北米西南部デスバレーにおける *T. pedum* の出現と炭素同位体比変動のピークの一つ (BACE; 図) が一致すること (Corsetti and Hagadorn, 2000)、また、*Cloudina* や *Namacathus* の絶滅と炭素同位体比変動 (Basal Cambrian Carbon isotope Excursion; BACE) とが一致すること (Knoll and Carroll, 1999; Amthor et al., 2003) が確認されており、南中国においても炭素同位体比 (BACE) をカンブリア紀の基底の指標として用いることがある (Zhu et al., 2006; Babcock et al., 2011; Zhu et al., 2019)。

急速な多様化の原因

カンブリア紀が始まる直前にエディアカラ動物群が絶滅した (Laflamme et al., 2013; Darroch et al., 2018)。Shu et al. (2014) が指摘した通り、化石記録が示す「カンブリア爆発」はエディアカラ紀末から始まっており、エディアカラ紀

/カンブリア紀境界前後の浅海で大きな環境変化がおきたと推定されている (Amthor et al., 2003; Schröder and Grotzinger, 2007 ; Laflamme et al., 2013; Smith et al., 2016; 2017). この時期におきたエディアカラ型生物の絶滅と新規の動物群の急速な出現を促した原因についてこれまでに提案された解釈を以下に概説する.

(1)環境変動：海洋条件の変化： Gondwana 超大陸の形成に伴うテクトニック的変動に伴い、酸素濃度の増加 (Canfield et al., 2007; Campbell and Squire, 2010; Chen et al., 2015; Dong et al., 2019; He et al., 2019; Wei et al., 2020 など), カルシウムの増加 (Brennan et al., 2004; Berner, 2004), 海水温の上昇, 塩濃度の低下 (Knauth, 2005) . リンなどの増加 (Brasier, 1992), 地殻のリフト化でできた地溝帯内の盆地でのリン酸の局地濃集 (Sato et al., 2014) など.

(2)遺伝子的な進化：動物のボディープランを制御する遺伝子の急速な拡大によって左右相称システムの発達 (Valentine et al., 1996; Peterson and Davidson, 2000; Valentine, 2001; Erwin and Davidson, 2002 ; Peterson et al., 2005 ; Davidson and Erwin, 2006; Davidson, 2010). しかし, 左右相称動物の共通祖先のゲノムの複雑性は全ての後生動物の共通祖先にすでに存在していた (Harcet et al., 2010; Adamska et al., 2011) ことが指摘されている.

(3)生態的環境, 進化：酸化還元勾配の変化 (Bottjer et al., 2000; Meysman et al., 2006), エディアカラ動物群の大量絶滅による生態的ニッチ拡大, 眼の獲得 (光スイッチ説 ; Parker, 2003), 捕食-被食の始まり (Evans, 1912; Hutchinson, 1961; Vermeij, 1990; Bengtson, 2002; Peterson et al., 2005; Erwin et al., 2011; Porter, 2011)などが同時におきてボディーサイズの増加, 硬組織による防御の発達などの助長 (Levinton, 2001; Erwin et al., 2011).

以上のように動物の急速な多様化の原因やその過程について, 様々な地球環境の変化や生態的な変化などが提唱されてきたものの, 研究者間での統一した

見解はいまだに得られていない (Marshall et al., 2006; Zhang et al., 2014 など). エディアカラ動物群の絶滅およびカンブリア紀の動物の爆発的多様化は密接に関係していると考えられるが, その解明にはエディアカラおよびカンブリア紀ともに岩層層序, 化石記録(とくにその初出や産出期間, 地理的分布, 多様性, 分類学上の位置, そして生態など), 高精度の放射性年代の制約および化学層序など様々な観点からの情報が不可欠である. しかし, これまでエディアカラ-カンブリア系が長く連続的に露出し, 化石の産出, 放射性年代測定が可能な凝灰岩層を挟み炭素同位体比測定可能であるなどの条件が全て揃った地点はないことが大きな障害となってきた.

研究目的

本研究では, 広義の「カンブリア爆発事件」のなかでも第2ステージ (Shu et al., 2014) にあたるとされるカンブリア紀最初期のSSFの多様化の詳細なパターンを再検討し, SSFの多様化の開始時期とその詳細なパターンの解明を目指す.

とくに, 従来識別された5つのSSF群集の中で, SSFの属数が急増し, その形態的特徴が一気に複雑化したSSF第1群集から第2群集 (Steiner et al., 2007) への変遷の詳細を明らかにすることは初期SSFならびに無脊椎動物の多様化の解明において非常に重要である.

そのために, 連続層序をもつ単一のセクションにおいてSSFによる生層序に加え, 詳細な岩層層序および放射性年代測定による高精度の年代決定を行うことで, 高精度の対比に有効なデータを得ることを目指す. 具体的には, 中国南部の雲南省東部における野外地質調査と試料採取を行い, 室内では岩石研磨スラブ, 岩石薄片の作成と観察, 岩石試料の全岩化学組成分析, 砂岩および凝灰岩から抽出したジルコンのU-Pb年代測定分析, SSF化石の抽出を試みる. 最

後にそれらの個々のデータの解釈に基づき、それらを総合的に考察する。

本論文は全 5 章から構成され、第 1 章では序論としてエディアカラ紀からカンブリア紀にかけて動物の絶滅および急激な多様化についての研究史および、本研究目的を述べる。第 2 章は研究地域の岩相層序について述べ、それらの結果に基づき堆積環境の推定および、雲南省内の広域対比に有効な鍵層について述べる。第 3 章は主として凝灰岩層から抽出したジルコンの放射性年代測定の結果から得られた年代制約について述べる。第 4 章は SSF 層序の結果から、新しい群集帯の提案および最古の節足動物化石について述べる。また、本研究により新たに発見された節足動物化石（節足動物の中の貝形虫に属する可能性が高い）について記述する。第 5 章は、2~4 章で得られた結果に基づく全体の考察を述べる。最後に、第 6 章で全体のまとめを試みる。

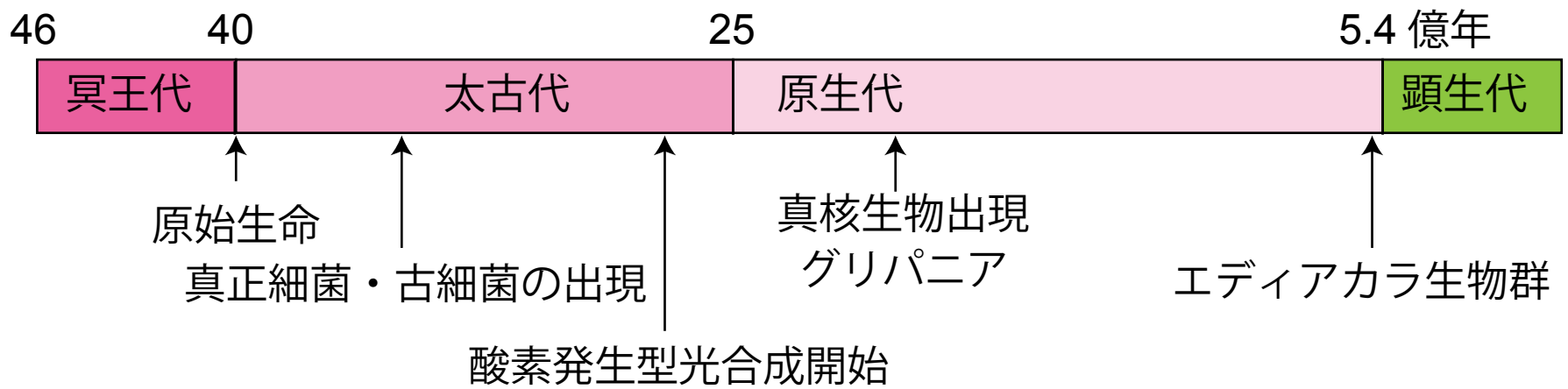


図 1. 地球史における生命の歴史

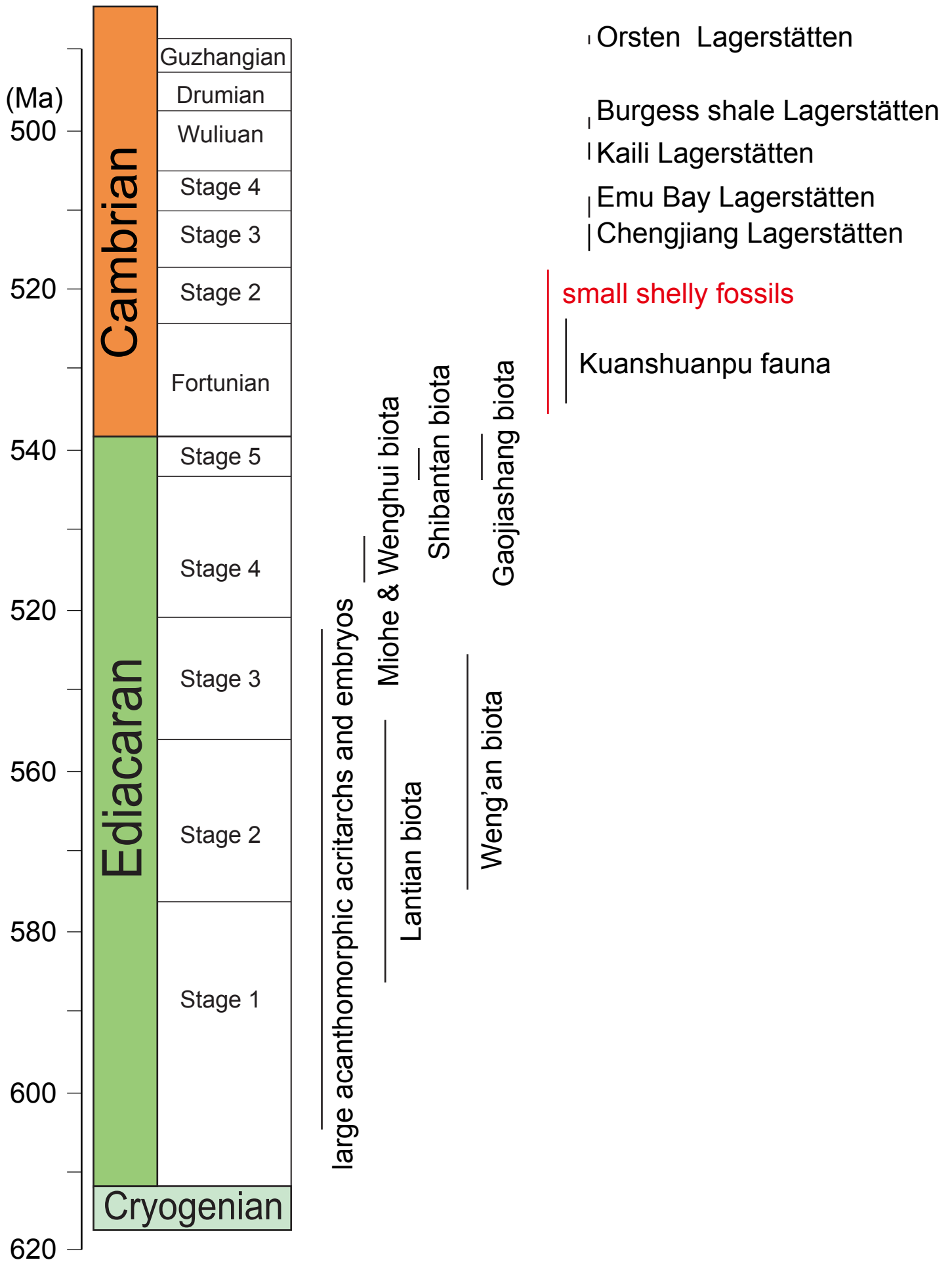


図 2. エディアカラ - カンブリア紀の主要な動物群
 modified from Zhu et al., 2017, Peng et al., 2020

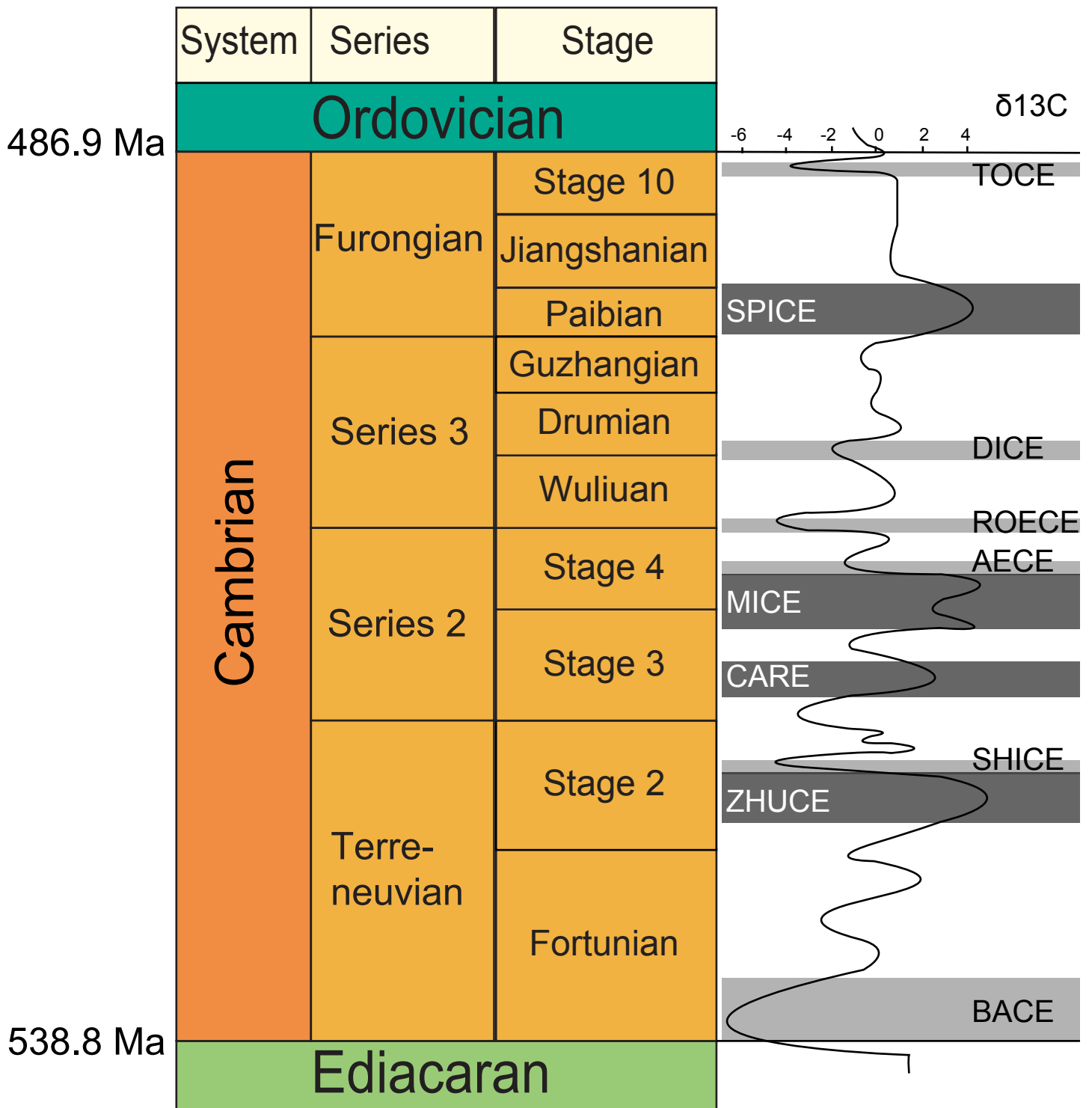


図 3. カンブリア紀の区分と炭素同位体比変動

modified from Zhu et al., 2007, Peng et al., 2020

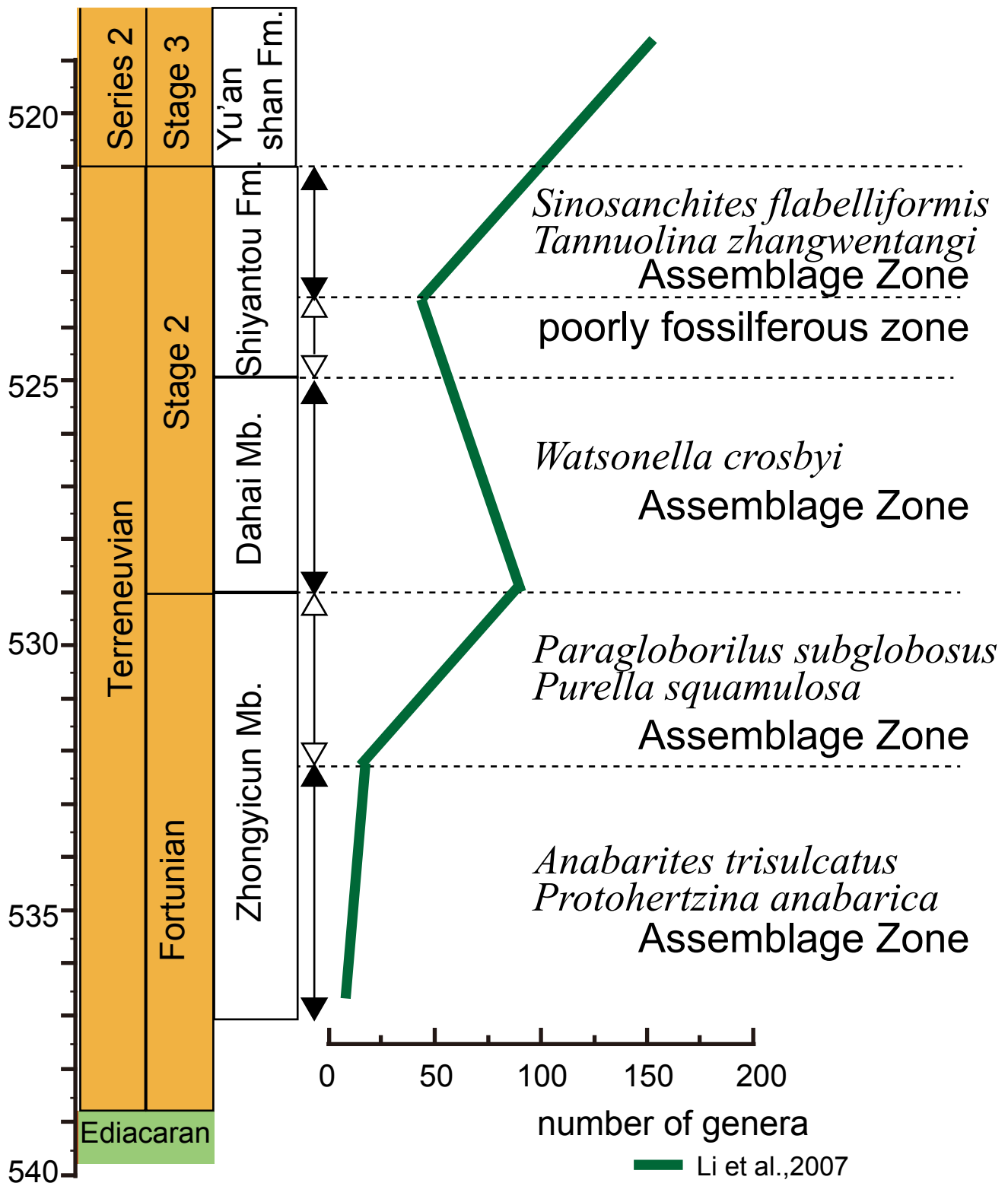


図 4. カンブリア紀の区分と炭素同位体比変動

modified from Li et al., 2007

第 2 章 雲南省のカンブリア系の地質概説と検討セクションの岩相層序

1. 南中国, 雲南省

南中国 (Yangtze) 地塊の古地理上の位置については主に古地磁気のデータに基づき, 超大陸ロディニアから約 7 億年前頃に分裂した後, エディアカラ紀後期からカンブリア紀初期には低緯度海洋域中の孤立した島大陸として存在したとされる (Li et al., 2008; Torsvik and Cocks, 2017; 図 5) . 同地塊に産するカンブリア紀堆積岩類の岩相および層厚分布に基づき, 当時の地塊西北側には陸域が, また東南側には陸棚, 大陸斜面および深海盆が発達したとされている (Zhu et al., 2003 ; Steiner et al., 2007; Jiang et al., 2012; Wang et al., 2015) . 原生累代末から古生代前期の浅海相の地層が, 同地塊の基盤岩である中・後期原生累代の花崗岩類や変成岩類を不整合に覆って厚く堆積した (Fan and Zhang, 1994; Zheng and Zhang, 2007) . とくに同地塊西部にあたる雲南省や四川省では, 原生累代後期に南北方向に延びる康滇 (Kangdian) リフト帯が形成され, それに伴って大陸棚上に出現した南北約 300 km, 東西幅約 80 km の南北方向に延びた康滇盆地が出現した (図 5, 6) . 浅海相の厚い上部原生累界および下部古生界がこの盆地を埋積して厚く堆積した (Fan, 1978; 図) . その中で下部古生界の中に, 特徴的なカンブリア紀前期のリン酸塩岩が堆積した.

雲南省東部には上部エディアカラ系から下部カンブリア系が広く露出する. 最上部エディアカラ系は灯影 (Dengying) 層, 下部カンブリア系は下位から順に, 朱家青 (Zhujiqing) 層, 石岩頭 (Shiyantou) 層, そして玉案山 (Yu'anshan) 層から構成される (Hou et al., 1995, 1997, 2002; Hu, 2005; Zhu et al., 2001) . 朱家青層はさらに, 下位から順に待補 (Daibu) 部層, 中誼村 (Zhongyicun) 部層, および大海 (Dahai) 部層に区分される (Zhu et al., 2001 ; 図 4) . 上述のとおり, 同省は SSF を多産するリン酸塩岩が広くするため, 農業肥料の原料と

して多数の地点で採掘されていたため、それらの採掘跡露頭において下部カンブリア系についての詳しい岩相層序および SSF 層序の研究がなされてきた (Luo et al., 1982, 1984; Jiang and Chen, 2008 など) . 南中国におけるエディアカラカンブリア境界の模式地とされてきた梅樹村 (Meishucun) セクションをはじめとし、王家湾 (Wangjiawan) , 朱家青 (Zhujiqing) , 老林 (Laolin) , 肖灘 (Xiaotan) セクションなどである. 同省は大陸棚の比較的浅海の地層が堆積しているものの、50 m 以浅から 300 m 以深まで様々な深度の堆積相がみられる (Wu and Li, 2002 ; 図 6) . 梅樹村セクションのように極めて浅い堆積相の地層では SSF を多産するものの、複数の堆積間隙を内在するため、不完全な SSF 層序しか得られない. 一方で、深い堆積相のセクションには層序学的欠損は少ないものの、SSF の産出はきわめて稀である. そのためこれまで層序的連続性の高いセクションでの高分解能 SSF 層序の確立が困難であった. そこで、本研究では層序学的連続性が高く、かつ SSF を比較的多く産する中間的深度で堆積した下部カンブリア系に注目し、澄江地域の小濫田および洪家冲セクションについて重点的に研究を行った.

2. 澄江地域の検討セクションのカンブリア系下部の層序

澄江地域には上部エディアカラ系から下部カンブリア系が南北約 10 km にわたり露出しており、とくに澄江化石群の発見地である帽天山 (Maotianshan) セクションなどを中心に澄江化石群を有する玉案山層の研究が重点的になされた (Hou and Bergström, 1997; Jiang and Chen, 2008 など). 帽天山セクションの南北には小濫田および洪家冲セクションが隣接する (図 7).

2.1. 小濫田セクション

小濫田セクション (北緯 24 度 40 分 49 秒, 東経 102 度 58 分 45 秒) は、撫仙

(Fuxian)湖北岸に位置する澄江地域, 小濫田村南方の小さな谷間に露出する. 帽天山セクションの北方約 3 km に位置する. 本セクションは, 全層厚が約 100 m におよぶ最上部エディアカラ系から下部カンブリア系が露出する (図 5; Ministry of Housing and Urban–Rural Development of the People’s Republic of China, 2011). 玉案山層から保存良好な澄江生物群化石が産することで知られており (Hou et al., 1995, 2004; Hou and Bergström, 1997; Hu, 2005), それらに関連する研究の報告はあるものの (Mackenzie et al., 2015; Yang et al., 2018), 最下部カンブリア系層序の詳細は不明であった.

本研究では小濫田セクションにおいて, 主に SSF を多産する中誼村部層および大海部層を中心に野外調査と試料採取を行った. 中誼村部層および大海部層は主に谷の西側に連続的に露出し (図 8), また東側の採石場跡にも中誼村部層下部が良好に露出する. 露頭から 83 試料を採取し, さらに, 谷の約 10 m 西側の尾根(北緯 24 度 40 分 52 秒, 東経 102 度 58 分 45 秒, 標高 1977 m)から掘削されたボーリング・コア (ZK2A) 試料をあわせて検討した. このボーリング・コアは 2010 年に東京大学と中国の西北大学の共同研究により掘削されたものであり, コア径は 75 mm, また全長約 87 m の連続試料で, 上部エディアカラ系の白岩哨 (Baiyanshao) 部層から下部カンブリア系の石岩頭層を貫く. 露頭試料 25 層準およびボーリング・コア試料の 18 層準の試料について合計 43 枚の岩石薄片を作成し, 偏光顕微鏡による観察・記載を行った.

2.2. 洪家冲セクション

小濫田セクションの南方約 7 km に位置しこれまで下部カンブリア系の岩相層序および SSF 層序, 炭素同位体比層序などが報告されている (Luo et al., 1982; Sato et al., 2014). しかし先行研究では, 中誼村部層底部から中部の約 25 m の区間からの化石の産出はなく (Sato et al., 2014), 第一群集から第二群集へ

の入れ替わりの詳細は不明である。したがって本研究ではとくに中誼村部層最下部について野外調査，岩石試料採取を行い，岩石薄片の作成，SSF の抽出，および砂岩層から抽出した碎屑性ジルコンによる U-Pb 年代決定を行った。また，本セクションも小濫田セクションと同様に中間的深度で堆積した地点であり，小濫田セクションとの詳しい比較，検討を行った。

3. その他の地域

3.1. 梅樹村セクション

梅樹村セクションは雲南省中央部の滇池 (Dianqi) 南西，晋寧 (Jinning) 地域位置し，これまで詳細な SSF 層序 (Qian and Bengtson, 1989; Brasier et al., 1990; Perkhayev and Demidenko, 2010; Yang et al., 2014) に加え，炭素同位体層序 (Brasier et al., 1990)，海水化学組成の変化 (Xing et al., 2015; Liu and Zhou, 2017)，凝灰岩層の放射性年代 (Sawaki *et al.*, 2008; Compton et al., 2008)，堆積環境の推定 (Sun et al., 2020) などの多彩な研究がなされた。本研究では予察的に野外調査を行い，岩石試料の採取および SSF の抽出，ジルコンによる U-Pb 年代決定を行った。

3.2. 王家湾セクション

王家湾セクションは撫仙湖の西約 20 km の六街 (Liujie) 北方に位置する。リン酸塩岩鉱山に層厚約 70 m の下部カンブリア系中誼村部層およびその上位の大海部層が露出する。本セクションに関しては Luo et al. (1984) による予察的報告があり，日達 (2011) らによる岩相および SSF の詳細な調査がなされた。本研究では追加の SSF 抽出を行ったほか，凝灰岩層からジルコン粒子の抽出を行い U-Pb 年代測定を行った。

3.3. 小黄草嶺セクション

小黄草嶺セクションは、撫仙湖の南端から東方に約 20 km の華寧 (Huaning) 地域のリン酸塩岩鉱山脇の道路沿いに露出する。同地域内では本セクションのおよそ 3 km 南方に産する火特 (Huote) セクションの下部カンブリア系について岩相および SSF 層序の報告 (Luo et al., 1982) はあるが、SSF の抽出を含めて本セクションの詳細な研究はなされていない。小黄草嶺セクションでの下部カンブリア系の全層厚は 120 m 以上に及び、下位から順に中誼村部層、大海部層、および石岩頭層が累重する。本研究では野外調査および岩石試料採取を行い、岩石薄片の作成、SSF 抽出、凝灰岩層からジルコン粒子の抽出を行い U-Pb 年代測定を行った。

3.4. 朱家青セクション

昆明市から約 200 km 北方の曲靖地域に位置する朱家青セクションは、朱家青層の模式地である。リン酸塩岩鉱山内において、全層厚が約 148 m に及ぶ層序がたてられた (Zhu et al., 2001; Qian et al., 2002)。岩相層序に加え、これまで SSF 層序、炭素同位体比層序などの研究がなされてきた (Luo et al., 1982, 1991; Li et al., 2009; Sun et al., 2020)。本研究では野外調査および岩石試料採取を行い、岩石薄片の作成、SSF 抽出を行ったほか、凝灰岩層からジルコン粒子の抽出を行い U-Pb 年代測定を行った。

4. 岩相層序の結果

4.1. 小濫田セクション

露頭およびボーリング・コアから採取した試料の観察に基づいた待補部層の上部、中誼村部層、および大海部層の岩相層序を記述する。露頭試料 25 層準およびボーリング・コア試料の 18 層準の試料について合計 43 枚の岩石薄片を作成

し、偏光顕微鏡による観察・記載を行った。本セクションの待補部層最上部，中誼村部層，および大海部層の柱状図を図 9, 10 に示す。

待補部層

待補部層の上部は主として成層した灰色または褐色の苦灰岩およびリン酸塩質苦灰岩からなり，数 cm 厚のチャート薄層（しばしばレンズ状）を挟在する（図 11）。細粒の苦灰石や 0.1–0.5 mm 程度のリン酸塩粒子を含む。陸源粗粒砕屑物粒子はきわめて少ないが，稀に 0.1 mm 以下の石英および少量の白雲母を含む。

中誼村部層

中誼村部層は，露頭では約 30 m，またコア試料では約 35 m の層厚を有し，主として層状リン酸塩岩からなり，層状苦灰岩を伴う。SSF はとくに上部から多産する。本部層は岩相の異なる 6 つのユニット（図 8），すなわち下位より順にユニット 1 から 6 へ区分される。

ユニット 1（層厚：露頭で 4.5 m，コア試料で 5.9 m）：単層厚が約 30 cm におよぶ厚層の明灰色リン酸塩岩質苦灰岩と 2–3 cm 厚の葉理の発達した脆いリン酸塩岩またはチャートが互層する。薄片観察から，基質は苦灰石およびリン酸塩からなり，100 μm 以下のリン酸塩粒子と黒色有機物，および少量の白雲母を含むこと，また 100 μm 程度の苦灰石や 100 μm 以下の砕屑性石英が卓越することが確認された。本ユニットは主として苦灰岩からなる待補部層から主にリン酸塩岩からなる中誼村部層への遷移帯であり，下部から上部に向かい苦灰岩からリン酸塩岩質苦灰岩へと遷移していく。

17XL107: リン酸塩岩（図 12 の黒色部）中に多数の 100 μm 以下の苦灰石（図 12 の虹色部）および少量の白雲母がみられる。

17XL112: リン酸塩岩 (図 12 の茶色) , 苦灰岩, 苦灰石主体の互層である。苦灰岩部分 (図 12 中の矢印の範囲) ではその他でみられるリン酸塩粒子や苦灰石などを欠く。リン酸塩粒子は約 200 μm , 苦灰石は 100 μm 以下である。

17XL117: 苦灰石基質中に 100 μm 以下から 200 μm 程度のリン酸塩粒子および生砕物を含む。

ユニット 2 (層厚: 露頭で 7 m, コア試料で 6.5 m) : 20–30 cm の厚く成層するリン酸塩岩を主とし, 層厚 10–30 cm の風化した苦灰岩を挟在する (図 8)。薄片では, 円磨されたリン酸塩粒子や生砕物, 黒色有機物を主体とし, 最大 500 μm 程度のやや円磨された石英が少量みられる。さらに, リン酸塩粒子や黒色有機物等が密集したリン酸塩のノジュールを含む。

17XL118: 100 μm 程度のリン酸塩粒子および生砕物を含みリン酸塩を主体とし, 時に 300 μm 程度のリン酸塩粒子, 100 μm 程度の苦灰石がみられる (図 13) 。

17XL3.2: リン酸塩粒子および生砕物を含みリン酸塩を主体とする。100 μm 以下の少量の苦灰石を含む (図 13) 。

17XL04: リン酸塩を主体とし, 100 μm 以下の苦灰石を多く含み, 少量の白雲母がみられる (図 13) 。

17XL06: リン酸塩を主体とし, リン酸塩粒子および黒色有機物を多く含み, 少量の 100 μm 以下の苦灰石がみられる (図 13) 。

17XL07: 16XL06 と同様に, リン酸塩を主体とし, リン酸塩粒子および黒色有機物を多く含み, 少量の 100 μm 以下の苦灰石がみられる (図 13) 。

17XL08: 16XL06, 16XL07 と類似しているが, 下位に比べ, リン酸塩は粒子としてではなく基質として存在し, 100 μm 程度の苦灰石を含む (図 13) 。

17XL10.4: リン酸塩を主体とし, 500 μm 程度の SSF および生砕物を含み, 100 μm 以下の苦灰石がみられる (図 13) 。

16XL 12: 円磨されたリン酸塩粒子が多くみられ, 200 μm 程度の苦灰石をし
ばしば含む (図 13) .

ユニット 2 とユニット 3 との境界は露頭では観察されないが, 両ユニットの
層理は互いに斜交しており, ユニット 2 の最上部に地層の欠損がある. おそら
く軽微な不整合とみなされる (図 14) .

ユニット 3 (層厚: 露頭で 1.1 m, コア試料で 1.2 m) : リン酸塩岩を主体と
し, 黒色泥岩層を二層準挟むことが特徴である. 苦灰岩を含む. 本セクション
の中でこのユニットのみが黒色泥岩層を含む (図 15) . 以下, 二層の黒色泥岩
を XL201 (下位) および XL203 (上位) と, また間に挟まれるリン酸塩岩を
XL202 と呼ぶ.

XL201 (層厚 30 cm) : 剥離性が高く, 非常に脆い黒色泥岩からなる. 薄片
観察から, 細粒の泥質苦灰石中に長径 30 μm から最大 100 μm 程度のリン酸塩
および黒色有機物粒子を多く含むこと, また同サイズの石英および白雲母を少
量含むことが観察される. XL202 (層厚 75 cm) : 本層準は硬い暗灰色の苦灰岩
質リン酸塩岩からなる. 長径 4–5 mm 程度の黒色のリン酸塩岩ノジュールがパ
ッチ状に含まれる. 主にリン酸塩からなり, 黒色有機物, リン酸塩粒子, やや
円磨された苦灰石, および少量の白雲母を伴う. 苦灰石は下部に多く, 最大長
径 1 mm 径の粒子が含まれるが, ほとんどは 0.1 mm 以下の細粒のものが多
い. 上部ほどサイズが小さい傾向がある. 苦灰石が少ない上部において, 約
300 μm の SSF が確認できる. 黒色リン酸塩岩ノジュールがパッチ状に含まれ
る部分は苦灰石を欠く. XL203 (層厚 15 cm) : 剥離性が高い非常に脆い黒色
泥岩からなる. 薄片では, リン酸塩粒子, 黒色有機物, さらに 50 μm 程度の細
粒苦灰石が少量認められる (図 15) .

ユニット 4 (層厚: 露頭で 3.4 m, コア試料で 7.3 m) : 主として単層約 10–
20 cm のリン酸塩岩からなり, 薄成層の苦灰岩質リン酸塩岩および苦灰岩を挟

む。また長径約 10 cm，厚さ 2–6 cm の苦灰岩が塊状またはレンズ状に挟まれる。苦灰岩とリン酸塩岩の境界は波状を呈す。風化面では本ユニット中部の苦灰岩は長径約 10 cm の特徴的な玉ねぎ状風化組織をもつ。リン酸塩岩および苦灰岩には，粒径の小さなリン酸塩粒子が作る羽状の模様が観察される。薄片では，主たるリン酸塩の他に 50 μm 程度の細粒の黒色有機物，50–100 μm の苦灰石，そして少量の白雲母が認められる。

17XL204: リン酸塩を主体とし，100 μm 以下の苦灰石および少量の白雲母がみられる (図 16) 。

17XL22: リン酸塩を主体とし，50 μm 以下から 200 μm のリン酸塩粒子を含み，50 μm 以下の細粒の苦灰石が多く，また少量の白雲母がみられる (図 17) 。

17XL25: リン酸塩を主体とし，100 μm 程度の苦灰石が多く，また少量の白雲母がみられる (図 16) 。

ユニット 5 (層厚: 露頭で 5.6 m，コア試料で 6.4 m) : リン酸塩岩と薄成層の苦灰岩質リン酸塩岩が互層する。リン酸塩岩質あるいは苦灰岩質のレンズ状ノジュールが認められる。鏡下では主たるリン酸塩の他に，100 μm 程度の苦灰石，黒色有機物，また少量の白雲母が認められる。

17XL33: リン酸塩を主体とし，100 μm 以下の苦灰石および少量の白雲母がみられる (図 16) 。

ユニット 6 (層厚: 露頭で 4.8 m，コア試料で 5.9 m) : 単層約 2–3 cm の薄い層理をもち，葉理が発達した暗灰色のリン酸塩岩および苦灰岩質リン酸塩岩からなる。上部はスランプ構造をもつ。鏡下では，主たるリン酸塩および生砕物の他に，200 μm を超える少量の石英や数百 μm から 1 mm 大の SSF が認められる。本ユニット上部のリン酸塩岩については裸眼観察でも SSF が確認できる。

17XL40: リン酸塩を主体とし、500 μm を超える SSF およびリン酸塩粒子や生砕物がみられる (図 17) .

大海部層

大海部層は約 1.5 m の層厚をもち、緑色を帯びた淡褐色のリン酸塩岩質/苦灰岩質泥岩からなる。径 0.2–0.5 mm 程度の海緑石粒を多く含む特徴的な層をなす。大海部層と石岩頭層との境界には約 15 cm の凝灰岩層が挟まれる。

以上、本セクションの各ユニットの代表的な薄片写真と柱状図を図 18 に、露頭とコアの対比柱状図を図 19 に示す。

元素分析

中誼村部層の代表的な層準について主要元素および微量元素の測定を行なった。各試料は風化などの影響を受けていないもののみを選別し、純水で洗浄し、乾燥させた後、アルミスタンプミルを用いて粉碎し、安井器械社製マルチビーズショッカーを用いてさらに細かく粉碎したものをめのう乳鉢により粉末状にした。950°C で 24 時間マッフル炉に入れ、灼熱減量 (Loss on Ignition; LOI) を測定した。その後、フラックス 2 g, 試料 0.2 g を秤量し、ガラスビードを作成した。ガラスビード 0.03 g, In 100 μl , Bi 100 μl , 硝酸 30 ml を秤量した溶液を東京大学の Thermo Fisher Scientific 製 ELEMENT XR ICP-MS を用いて測定を行なった。なお、試料のほかにスタンダードとして NSCDC79001P, NSCDC79002P, JB-3, Jdo-1, JCP-1, Jls-1, NIST694, Jch-1, JG-1a, JG-2, JG-3 の測定も行なった。

主要元素測定の結果を表 1 に示す。また、縦軸に深度をとった各元素のプロファイルを図 20 に示す。主要な傾向として以下のことがわかった。P₂O₅ と SiO₂ は相関する、SiO₂ と K₂O, Al₂O₃ は相関する (ただし、ユニット 4 および 5 につ

いては SiO_2 と K_2O , Al_2O_3 は逆相関する), SiO_2 と P_2O_5 は逆相関する, ユニット 1 では MgO の寄与が大きくそれ以降ではほとんどない. リン酸塩岩の成分は $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$, 苦灰岩の成分は $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ のため, ユニット 2-6 の主としてリン酸塩岩からなる層準については P_2O_5 と CaO が相関している. それに対し主として苦灰岩が卓越するユニット 1 については P_2O_5 をあまり含まず, MgO を含む. また, 鍵層を含むユニット 3 については P_2O_5 や CaO はあまり含まず, SiO_2 や Al_2O_3 を多く含む. これは陸源性砕屑物であるからだと考えられる.

微量元素の結果を図 21 に示す. 基本的に右肩下がり, セリウムとユーロピウムに負の異常をもつ. これは先行研究による南中国下部カンブリア系のレアアースパターンと類似する (Shields and Stille, 2001). ただし, 鍵層層準のみセリウムの負異常が見られず平坦である. これは先行研究の梅樹村セクション層 5 にみられるベントナイト層のレアアースパターンと類似する (Xing et al., 2015).

4.2 洪家沖セクション

本セクションは下部カンブリア系が連続的に露出しており, 下位から順に朱家青層, 石岩頭層, 玉案山層が累重する. 朱家青層は全層厚約 80 m を有し, それぞれ待補部層は層厚約 40 m, 中誼村部層は層厚約 40 m, 大海部層は層厚約 2 m である (図 22). 先行研究によって中誼村部層はさらに 5 つのユニット (ユニット A~E) に細分される (Sato et al., 2014).

本研究では, とくに中誼村部層最下部に関して重点的に調査を行い, 27 層準について追加試料を採取し (図 23 黒丸で示した層準), そのうち 3 層準の試料について岩石薄片を作成し, 偏光顕微鏡による観察・記載を行った. 先行研究による野外調査では確認できていない露頭で確認可能なユニット A の最下部約 1 m の区間 (Hj0~Hj-8; 図 24) を含めた中誼村部層下部 (図 25) の詳細な柱状図 (約 7 m) を図 26 に示す.

洪家沖セクションの岩相層序の結果

中誼村部層ユニット A は主として 5-20 cm 厚の層理をもつリン酸塩岩からなり、約 1-3 cm 厚の苦灰岩質砂岩層を挟在する。また、リン酸塩岩中にはしばしばリン酸塩岩質泥岩の薄層およびリン酸塩岩質ノジュールを伴う。ユニット B は苦灰岩質リン酸塩岩と 5-20 cm 厚の苦灰岩質砂岩の互層であり、しばしば 2-3 cm 厚のリン酸塩岩質頁岩、2-3 cm 厚のリン酸塩岩、ないし 1-2 cm 厚リン酸塩岩質泥岩を挟在する。また、苦灰岩質リン酸塩岩中にはしばしばリン酸塩岩質泥岩の薄層およびリン酸塩岩質ノジュールを伴う。

特異な化石を産する層準(ユニット A ; Hj 2.5)についての薄片観察では約 100 μm 程度のリン酸塩粒子が多数存在することが確認され、またその上下の層準についても同様に約 100 μm 程度のリン酸塩粒子が多数確認でき (図 27)、類似した岩相であるといえる。

4.3. 小濫田セクションと洪家沖セクションの対比

両セクションは帽天山セクションを挟み、南北約 7 km と隣接している。洪家沖セクションの中誼村部層の 5 つのユニットのうち、ユニット A (22 m 厚のリン酸塩岩)、ユニット C (4.5 m 厚のリン酸塩岩/石灰岩交互層)、ユニット D (8 m 厚のリン酸塩岩/石灰岩交互層)、およびユニット E (3 m 厚の層状リン酸塩岩) は層相、および岩相において小濫田セクションのユニット 2, 4, 5, そして 6 に各々よく対応する (図 28)。とくに、中誼村部層の最上部を占める小濫田セクションのユニット 6 のリン酸塩岩と洪家沖セクションのユニット E の暗灰色のリン酸塩岩は、薄く成層すること、SSF などのリン酸塩粒子および生砕物に富むこと、またスランプ構造をもつことなどの点において互いに酷似する。ただし、小濫田セクションはユニット 3 直下の地層欠損、大海部層/石岩頭層境

界での凝灰岩層の挟在，ウーイドの欠如，またユニット 4 および 5 からの化石欠如などの点で，洪家沖セクションと異なる。

洪家沖セクションのユニット C 底部に挟在する 20 cm 厚の砂質泥岩は，中誼村部層中で唯一となる粗粒碎屑岩層をなし，小濫田セクションのユニット 3 の黒色泥岩層のみと対比が可能である。ただし，両セクションの間には碎屑岩層の枚数および層厚において明瞭な違いがある。このように両セクションは岩相や層厚などについて互いによく似た特徴をもつ。

4.4. 小黃草嶺セクション

本セクションは下部カンブリア系が連続的に露出しており（図 29），中誼村部層は層厚約 110 m を有し，主として苦灰岩および苦灰岩質リン酸塩岩，そしてリン酸塩岩から構成される。大海部層は層厚約 1 m で，苦灰岩から構成される。続く石岩頭層は頁岩からなり，露頭では約 9 m 観察でき，それより上位におよそ 30 m 以上続く。石岩頭層上位の玉案山層からは三葉虫化石が産する（図 29）。中誼村部層から石岩頭層にかけて全層厚 120 m におよぶ柱状図を作成し（図 30），60 試料を採取した。

中誼村部層下部の約 37 m 区間は主として塊状の苦灰岩からなり，苦灰岩は露頭では明褐色から明灰色を呈し，約 5-10 cm 程度のリン酸塩岩を挟在する。また，約 40 cm- 100 cm 厚のリン酸塩岩がみられ，露頭では暗灰色を呈する（図 29）。薄片観察から，塊状の苦灰岩（例えば XC16）は細粒の苦灰石から構成され，これらの苦灰岩に薄く挟在されるリン酸塩岩（例えば 17XC10）は主としてリン酸塩から構成されるものの 50 μm 以下の細粒の苦灰石を多数伴い，少量の白雲母がみられる（図 31）。また，しばしば長径 500 μm を超える楕円形のリン酸塩粒子が，層理と平行にみられる（図 31）。そして，下位から約 4 m に約 2-3 cm 厚の凝灰岩層が確認された（図 33；17XC9）。

その上位約 10 m 区間は下位と同様に主として苦灰岩からなるものの、底部に約 10 cm 厚のシルト最上部に約 10 cm 厚のチャートがあり、特徴的な黑色頁岩層が二層確認される（下位（17XC52）：層厚約 20 cm 上位（17XC55）：層厚約 20 cm）。またその二層の黑色頁岩層の中位には層厚約 3-10 cm の凝灰岩層がみられる（17XC 53.5; 図 34）。薄片観察から上位の黑色頁岩層（17XC55）は 50 μm 以下の細粒の苦灰石および黑色有機物、リン酸塩粒子が層理と平行にみられる（図 31）。

その上位約 23 m 区間は主としてリン酸塩岩質苦灰岩およびリン酸塩岩、苦灰岩質リン酸塩岩からなる。下部は下位から順に約 10 cm の層理をもつリン酸塩岩質苦灰岩（約 2.5 m）、約 2-5 cm の層理をもつリン酸塩岩（約 3 m）、そしてリン酸塩岩質苦灰岩とリン酸塩岩の互層（約 4 m）であり、上部は約 20-30 cm の層理をもつリン酸塩岩、10 cm 程度の層理をもつ苦灰岩質リン酸塩岩、約 20-30 cm の層理をもつリン酸塩岩質苦灰岩そして塊状の苦灰岩へと上方に行くにつれ、リン酸塩岩質から苦灰岩質へと遷移する。薄片観察から、最上部の苦灰岩（17XC59）は主として苦灰石からなるものの、本部層下位の苦灰岩と比べ大きな苦灰石を含みその大きさはときに 500 μm を超える。また、500 μm を超えるリン酸塩も含まれ、基質部分にもリン酸塩がみられる（図 31）。

その上位約 25 m 区間は主として塊状の苦灰岩と 5-10 cm 程度のチャート層が 50-100 cm おき程度にリズムカルな互層がみられ、上部約 4 m 区間はチャートを挟まない塊状の苦灰岩である。

そして、中誼村部層最上部の約 6 m 区間はリン酸塩岩から構成される。

4.5. 朱家青セクション

本セクションでは林道および鉱山跡地の 2 地点において野外調査を行い、柱状図作成および計 39 の岩石試料を採取した。

林道地点

林道地点では中誼村部層から大海部層にかけて全層厚約 50 m の柱状図を作成した (図 35, 36)。中誼村部層は層厚約 28 m を有し、主として苦灰岩質リン酸塩岩およびリン酸塩岩質苦灰岩から構成される。最下部の約 6 m の区間は 5-10 cm 厚のリン酸塩岩および 5-20 cm 厚のリン酸塩岩質苦灰岩の互層であり、上部にいくにつれてリン酸塩岩質苦灰岩の層厚は大きくなり、約 1 m ほどのリン酸塩岩質苦灰岩がみられる。その上位には約 6.5 m の区間、5-10 cm 厚の層理をもつ苦灰岩質リン酸塩岩が累重する。露頭では白色を呈する。続いて、約 1.5 m ほどともに 5-10 cm 厚のリン酸塩岩質苦灰岩および頁岩の互層、約 7 m の区間リン酸塩岩質苦灰岩がみられる。このうち最上部の約 1 m の区間は約 10 cm 厚のリン酸塩岩質苦灰岩とリン酸塩岩の互層である。このリン酸塩岩質苦灰岩は露頭では濃褐色を呈し、強く風化を受けている。続く約 4 m の区間は主としてリン酸塩岩で構成され、下部は約 15 cm 厚の層理をもつリン酸塩岩、上部は 60-100 cm の塊状のリン酸塩岩がみられ、塊状のリン酸塩岩の間に薄い泥岩層および約 2-7 cm 厚凝灰岩層 (図 37 ; 16 朱 7) が確認された。同部層最上位は、リン酸塩岩質苦灰岩から構成され、露頭では紫色を帯びた茶色を呈し、強く風化している。

大海部層は層厚約 24 m を有し、下部は主に苦灰岩、最上部は石灰岩から構成される。大海部層底部には約 6 cm 厚の凝灰岩層 (図 37 ; 16 朱 6) がみられる。その上位には約 1.5 m の区間泥岩層がみられ、続く約 9 m の区間苦灰岩が露出する。このうち下位の約 7 m は塊状の苦灰岩からなり、上位は風化した苦灰岩がみられる。この風化した苦灰岩の間に約 2-5 cm 厚の凝灰岩層 (図 37 ; 16 朱 9) が確認された。風化した苦灰岩の上位は苦灰岩および黒色泥岩互層が約 10 m 露出し、その上部に凝灰岩層を挟在する。その上位の大海部層最上部では約 2 m

の区間黒色泥岩と石灰岩の互層がみられる。

鉦山跡地点

鉦山跡地地点では中誼村部層から大海部層にかけて全層厚約 100 m の柱状図を作成した (図 38, 39)。中誼村部層は層厚約 71 m を有し、主としてリン酸塩岩、リン酸塩岩質苦灰岩、および苦灰岩質リン酸塩岩構成される。

大海部層は層厚約 34 m を有し、下部は主に苦灰岩、上部は石灰岩から構成される。大海部層下部は苦灰岩および黒色頁岩の互層が約 23 m 露出し、しばしばリン酸塩岩が挟在する。下位の苦灰岩は露頭では白色、上部は灰色を呈し、黒色頁岩中にリン酸塩岩質のジュールがみられる。また 4 層の凝灰岩層を挟在し、それぞれ層厚は、約 1-2 cm (図 40 ; 16 朱 2)、約 3-6 cm (図 40 ; 16 朱 3)、約 2-5 cm (図 40 ; 16 朱 4)、約 2-3 cm (図 40 ; 16 朱 5)、である。同部層上部の約 11 m は明灰色の石灰岩からなり、上部約 5 m の区間は薄い黒色頁岩と石灰岩の互層になる。

本セクション 2 地点の対比柱状図を図 41 に示す。

5. 中誼村部層中位に産する特異な碎屑岩層による広域対比

本研究で詳細な岩相層序を記載した前述の小濫田、洪家沖、小黄草嶺、そして朱家青セクションに加え、先行研究による記載から、梅樹村、王家湾、そして老林セクションを含めた計 7 地点において、主としてリン酸塩岩および苦灰岩からなる中誼村部層中位に特異な陸源性碎屑岩層がみられる。それらについて詳しく述べる。

5.1. 7つのセクションにみられる碎屑岩層について

小濫田セクション：中村部層約 30 m のうち中位に二層の黒色泥岩層(各々層厚

約 30 cm, および 15 cm)がみられる.

洪家冲セクション：中村部層約 40m のうち中位に約 30 cm の砂岩層がみられる(図 42).

梅樹村セクション：先行研究から、梅樹村セクションの下部カンブリア系の層厚は 19.8 m であり, 下位から順に累重する小歪頭山(Xiaowaitoushan)部層(Zhu et al., 2001 による待補部層), 中誼村部層, および大海部層は, 層 1 から層 8 に細分されている (Luo et al., 1982, 1984). 小歪頭山部層 (層 1 および 2; 層厚約 8.2 m) は主に苦灰岩からなる. 中誼村部層 (層 3 から 7; 層厚約 11.6 m) は主として灰色のリン酸塩岩からなり, 一部にウーライト様の組織をもつ. 中誼村部層中部の層 5 (約 1.6 m) に挟在される凝灰岩層中のジルコンから 536.5 ± 2.5 Ma という U-Pb 年代が報告された (Sawaki et al., 2008). 最上位の層 8 (層厚 1.1 m) は苦灰岩からなり, 大海部層に対比されている. 同セクションの中誼村部層には, ウーライト様組織やストロマトライト様構造をもつこと (Luo et al., 1984 ; Yang et al., 2014) から, 光合成バクテリアが活動するきわめて浅い場で堆積したと考えられる.

中誼村部層上半の層 7 の底部に約 15 cm の不均質なリン酸塩岩質礫質泥岩層が産し, 詳細は示されていないが, 土石流堆積物と記載されている (Yang et al., 2014). この層は梅樹村セクションにおける中誼村部層の中で唯一の粗粒碎屑岩である. その下位の層 3-6 のリン酸塩岩は澄江地域の中誼村部層下半のものに酷似することから, 層 7 は中誼村部層中位の碎屑岩層に相当する可能性が高い. この礫質泥岩層と他セクションで認められる碎屑岩層とは一見岩相が大きく異なるが, 中誼村部層中で碎屑岩層はきわめて稀であることから, 対比を考える上で有効である.

王家湾セクション：リン酸塩岩鉞山に層厚約 70 m の下部カンブリア系中誼村部層およびその上位の大海部層が露出する. 大海部層は約 30 m に達し, 他セク

ションに比べて極めて厚いことが特徴である。下部は苦灰岩，そして上部は黒色泥岩からなり，数枚の凝灰岩層を挟在する。また，本部層にはストロマトライト様構造が確認されることから，局部的に浅い場で堆積した部分を含むことが示唆される。本セクションに関しては Luo et al. (1984) による予察的報告があり，日達 (2011) らによる岩相および SSF の詳細な調査がなされた。本セクションの中誼村部層は，その岩相層序の詳細に及んで小濫田および洪家沖 セクションとよく対比される。とくに下半と上半の厚いリン酸塩岩層および両者の間に唯一挟在される特徴的なリン酸塩岩質砂岩層 (層厚約 1 m) は，小濫田セクションの中誼村部層中位のユニット 3 によく対応する。

小黄草嶺セクション：小黄草嶺セクションの中誼村部層中位の約 6 m の区間には 2 層の黒色泥岩層 (各々の層厚は約 40 cm と 50 cm) が挟在される。苦灰岩が卓越するこのセクションには，他層準に陸源碎屑岩は全く産しないことから，同部層中部の 2 層の黒色泥岩層で挟まれた区間は，小濫田セクションのユニット 3 に対比可能である。

朱家青セクション：中誼村部層上部の約 1.5 m の区間には層厚約 20 cm の 2 層の黒色泥岩層が挟まれる。

老林セクション：朱家青セクションの約 4 km 南方に位置する老林セクションは，朱家青セクションとほぼ同じ層序をもつ中誼村部層が露出し，これまでにその岩相層序，SSF 層序，および炭素同位体層序が解明されている (Li et al., 2009; Yang et al., 2014 など)。中誼村部層中位に黒色泥岩層が挟在され (Li et al., 2009, 約 3 m の区間に 5 層の黒色泥岩層が挟まれる。最下位の黒色泥岩層が最も厚く (層厚約 40 cm ; 図 43)，その上位に累重する苦灰岩およびリン酸塩岩中に厚さ約 2-8 cm の薄い黒色泥岩層が 4 層挟まれる。

このように，現在観察できるすべてのセクションにおいて，特異な陸源碎屑岩層が中誼村部層の標準層序の中位に限定して挟在されることが確認された。

この碎屑岩層は雲南省内の南北約 200 km 以上の領域にわたって追跡される有効な鍵層として利用できると判断される。ただし、上述の通りその層厚や粗粒碎屑粒子の粒径などは一定ではない（図 44）。例えば梅樹村，洪家冲，および王家湾セクションでは陸源碎屑岩層はいずれも単層のみであるが，その厚さは数センチメートルから約 1m まで大きく変化する。また洪家冲と王家湾セクションでは，陸源碎屑岩層が比較的粗粒な碎屑物粒子を含むのに対し，小濫田，小黄草嶺，朱家青，および老林セクションでは，より細粒の黒色泥岩層のみが挟まれる。このような岩相の多様性をもつものの，同層中位に限定される碎屑岩層準は，少なくとも堆積盆地内の対比にきわめて有効である。

5.2. 鍵層の年代制約

この鍵層の年代については，2 例の既報の放射性年代値から，制限が可能である。すなわち，梅樹村セクションにおける鍵層（層 7 底部のリン酸塩岩質泥岩層）の約 5 m 下位に産する層 5（凝灰岩層）から， 536.5 ± 2.5 Ma (Sawaki et al., 2008) というジルコン U-Pb 年代が報告されている。また，帽天山セクションでの，鍵層より上位の大海部層底部から， 523.9 ± 6.7 Ma (Okada et al., 2014) というジルコン U-Pb 年代が報告されている。したがってこの鍵層の年代は 536.5 ± 2.5 Ma と 523.9 ± 6.7 Ma の間すなわちカンブリア紀，フォーチュン期から第二期最初期に制約される。

6. まとめ

雲南省内 4 セクションの最下部カンブリア系の岩層層序を明らかにし，その 4 地点全てから中誼村部層中位に陸源性碎屑物層が確認された。さらに先行研究で報告されている 3 地点を含め，現時点で 7 地点において陸源性碎屑物層が確認されている。ただし，その層厚や枚数，その層相は各地点で異なるものの，雲

南省内南北 200 km 以上にわたり追跡可能な広域対比に有効な鍵層である。また、ジルコンの U-Pb 年代の制約からこの鍵層は 536.5 ± 2.5 から 523.9 ± 6.7 Ma である。

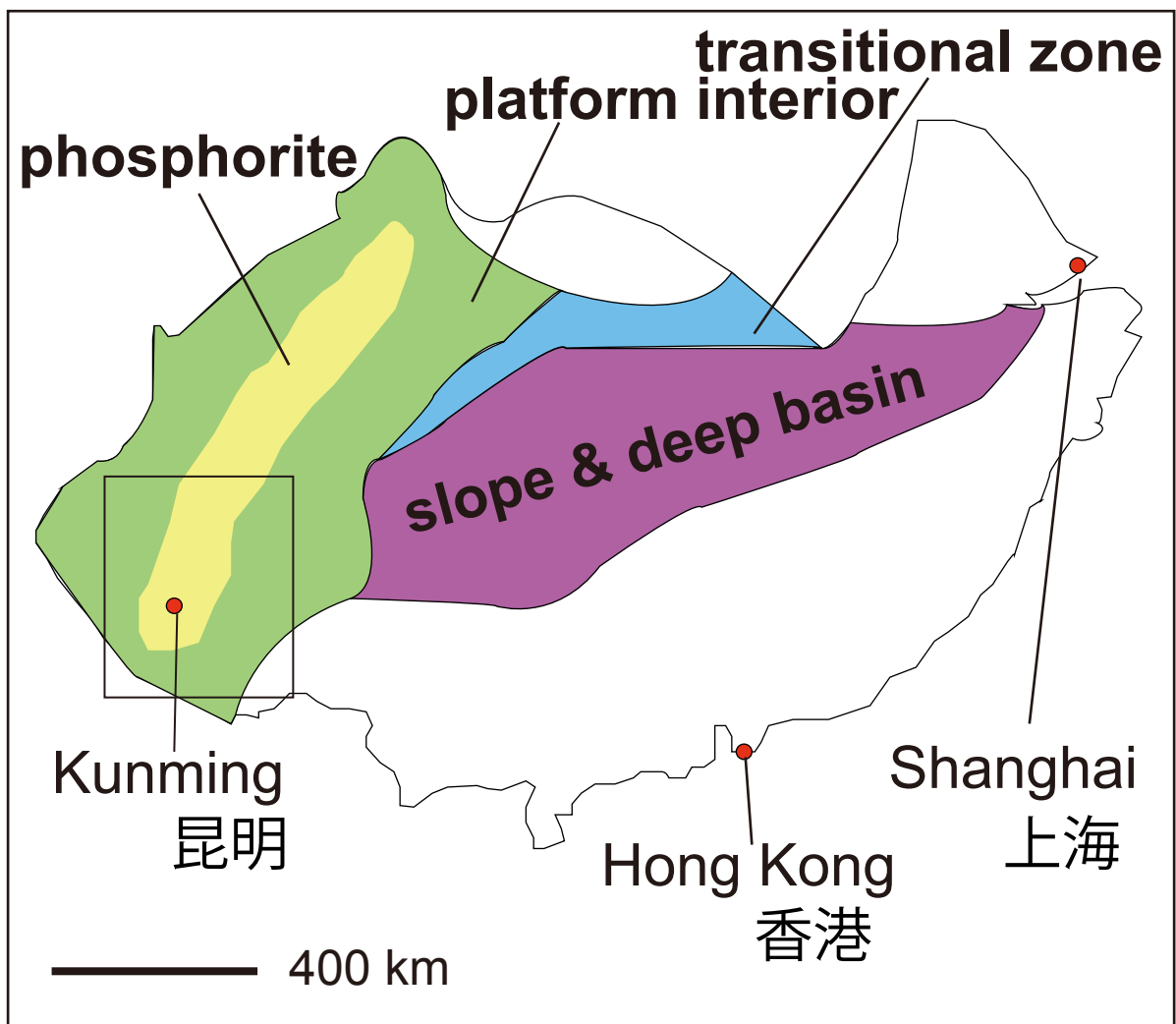


図 5. 南中国のカンブリア紀初期の古地理図および

modified from Luo et al., 1984; Zhu et al., 2003

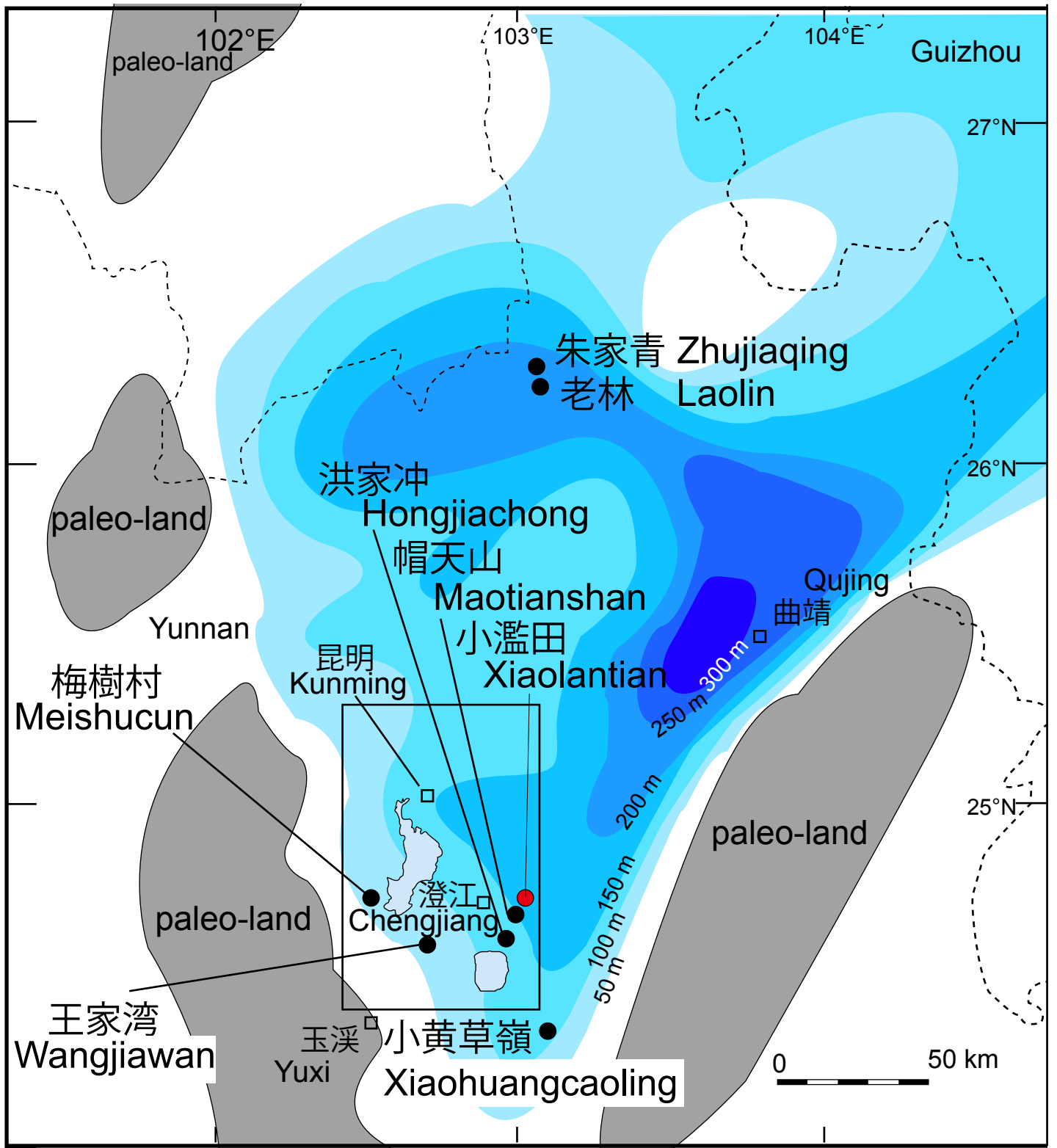


図 6. 南中国全体と雲南省東部のカンブリア紀初期の古地理図および
 代表的セクションの位置 modified from Luo et al., 1984; Zhu et al., 2003

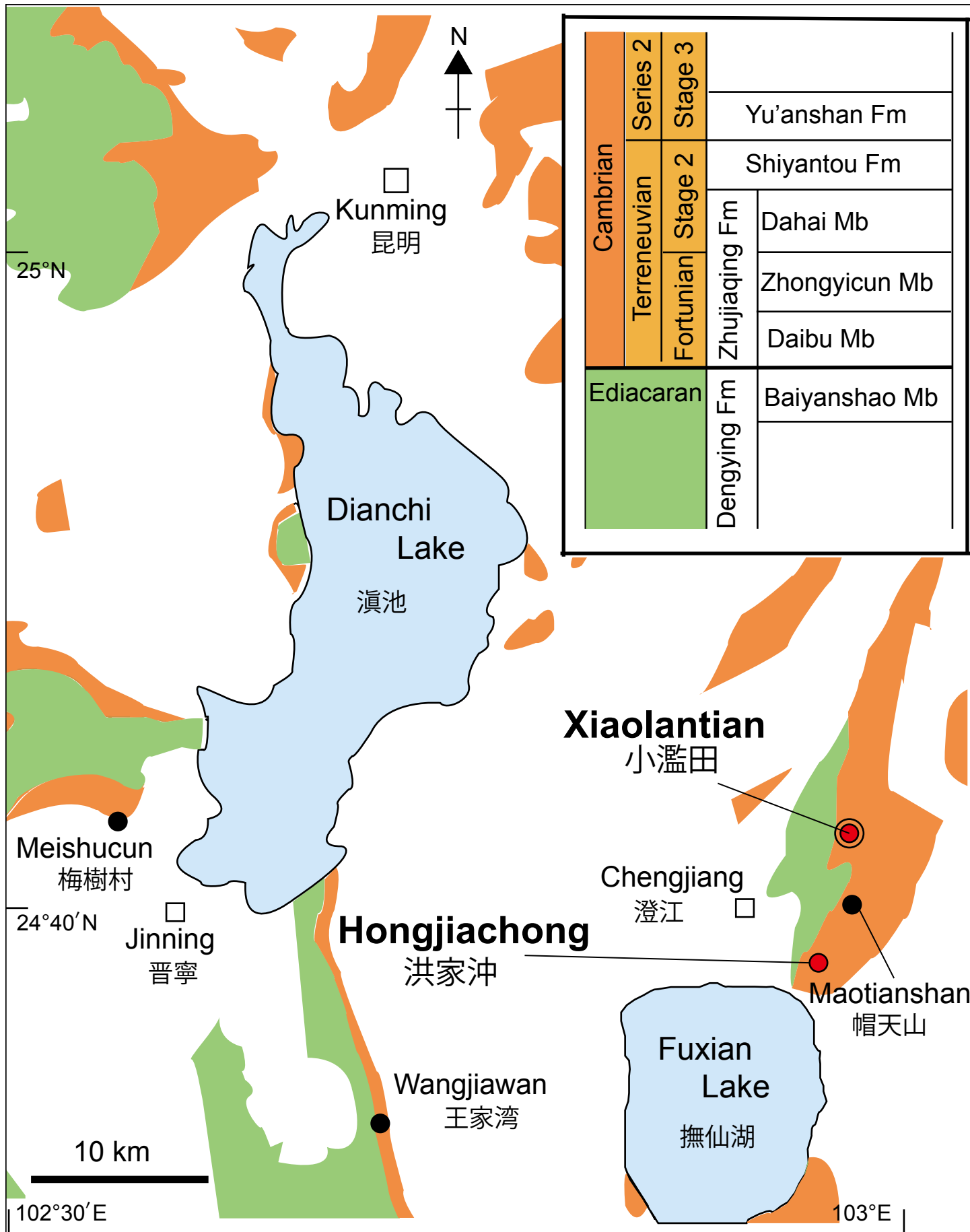


図 7. 雲南省東部のエディアカラークンブリア系の分布および雲南省のカンブリア系標準層序区分 modified from Luo et al., 1984

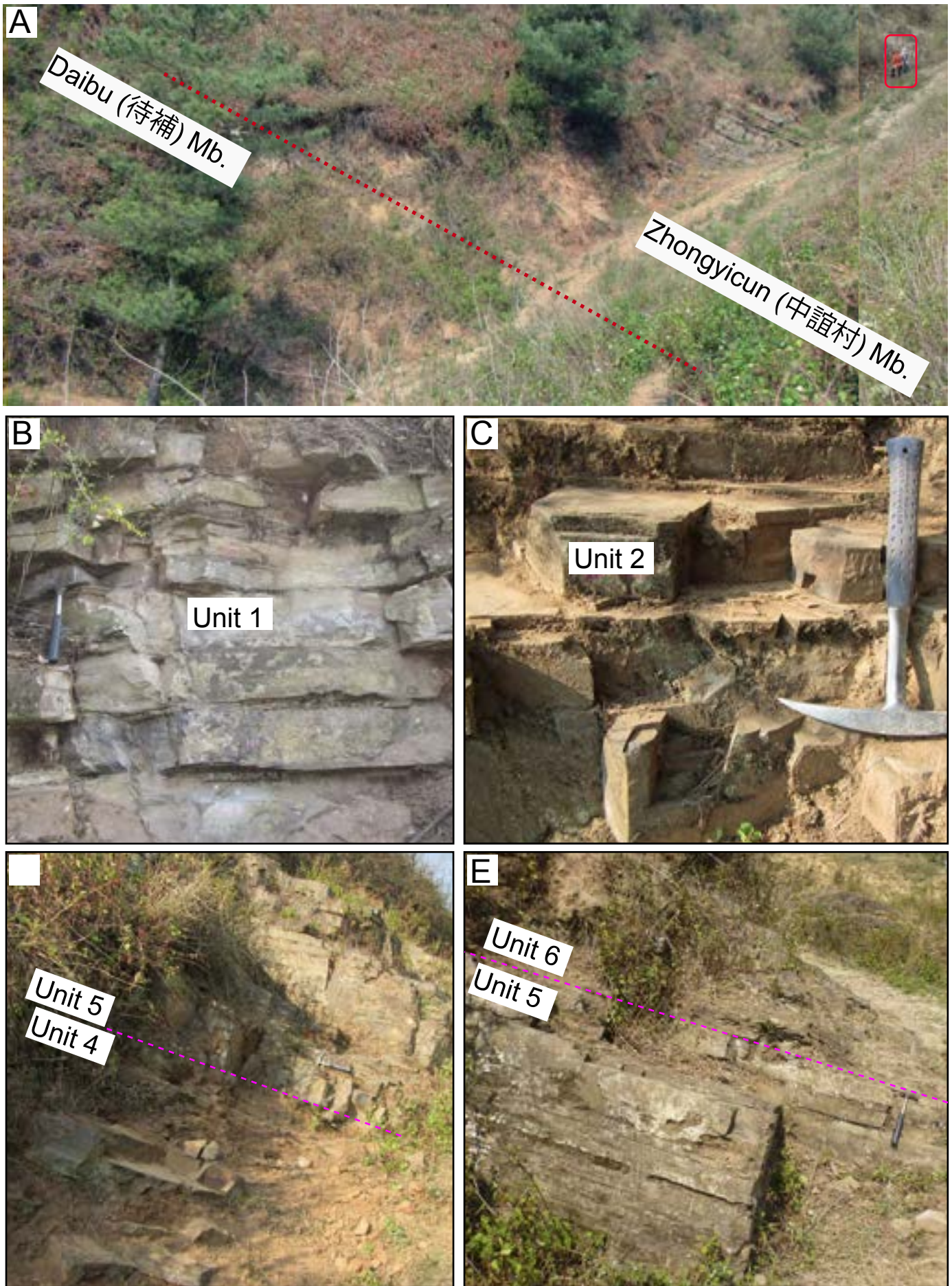
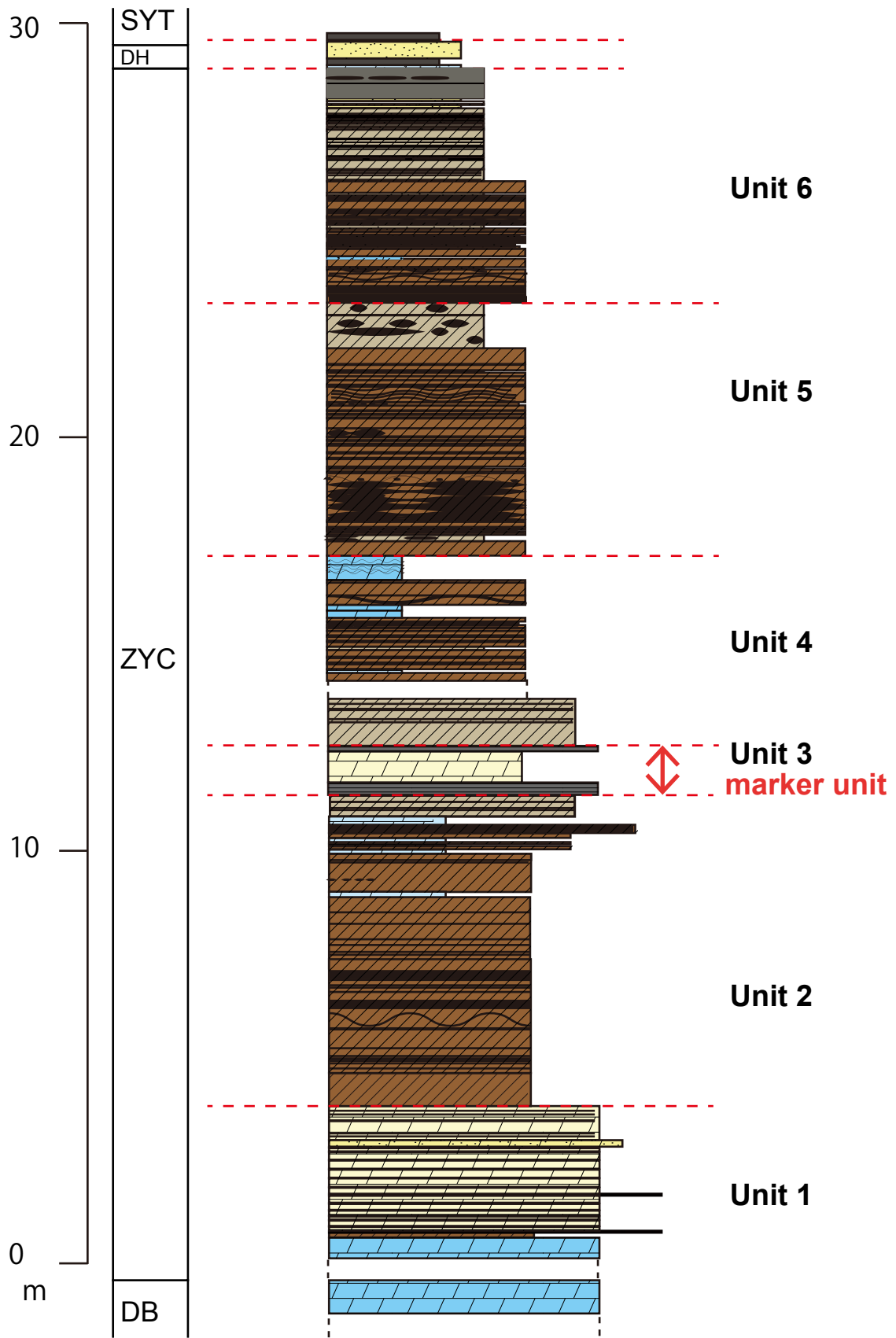


図 8. 小濫田セクション露頭における中誼村部層

Xiaolantian(小濫田) section



DB: Daibu(待補) Mb ZYC: Zyongicun(中誼村) Mb DH(大海) Mb SYT: Siyantou(石岩頭) Fm

- | | | | | | | | |
|---|---------------------|---|-----------------------|---|-------------|---|----------------------|
|  | phosphatic dolomite |  | dolomitic phosphorite |  | phosphorite |  | phosphatic mudstone |
|  | dolomite |  | black mudstone |  | tuff |  | phosphatic sandstone |

図 9. 小濫田セクション露頭の柱状図

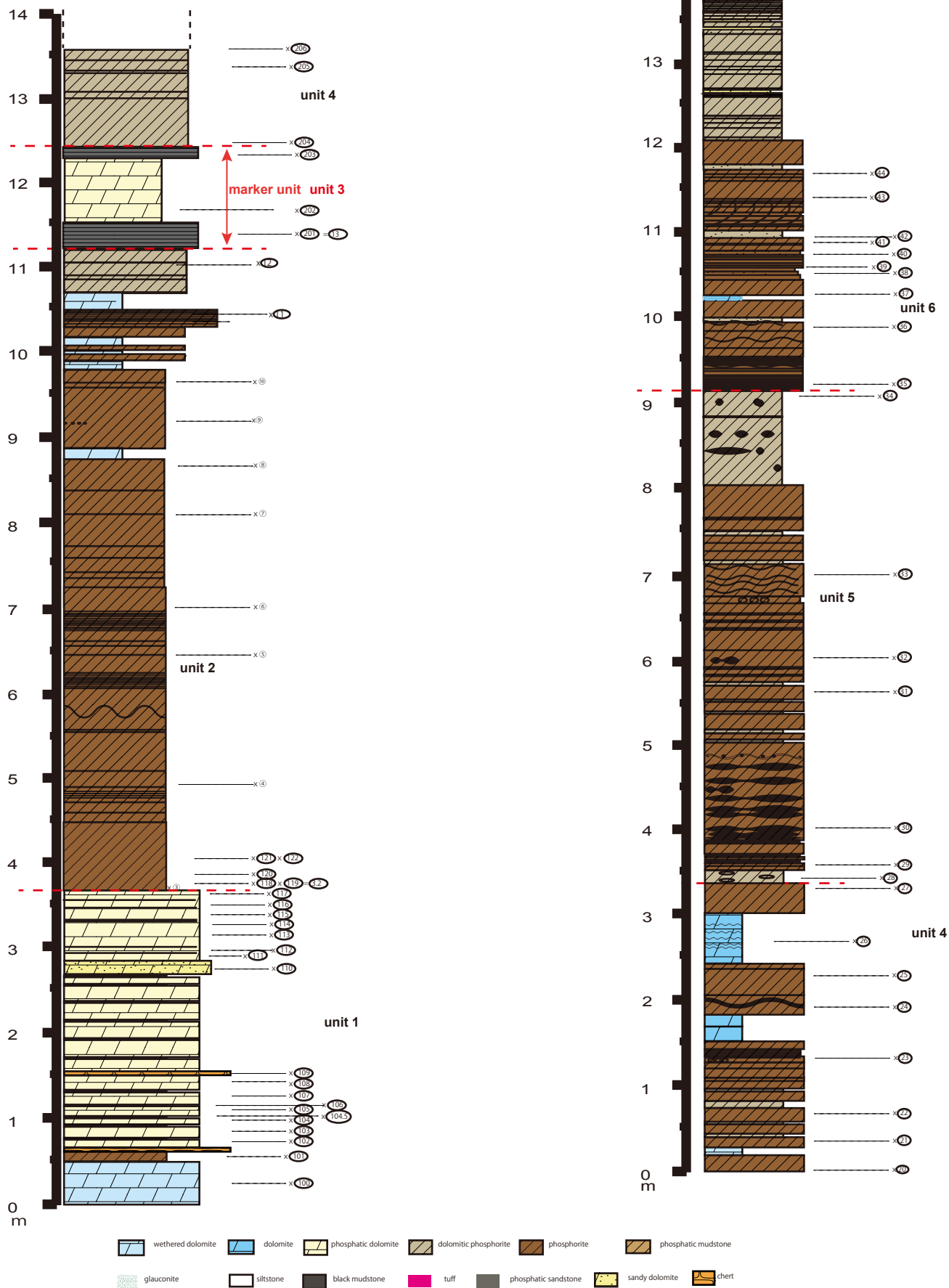


図 10. 小濫田セクション岩石試料番号



図 11. 小濫田セクションにおける露頭写真

Unit 1

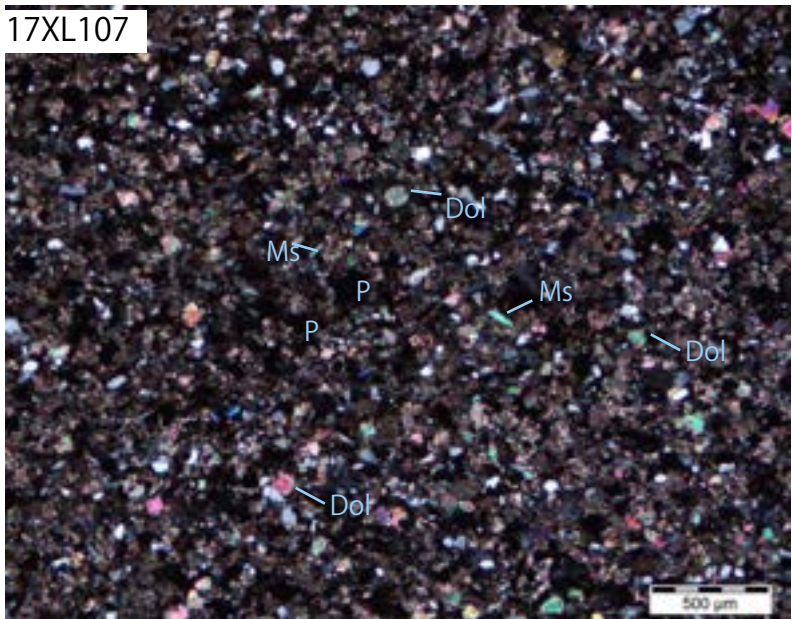
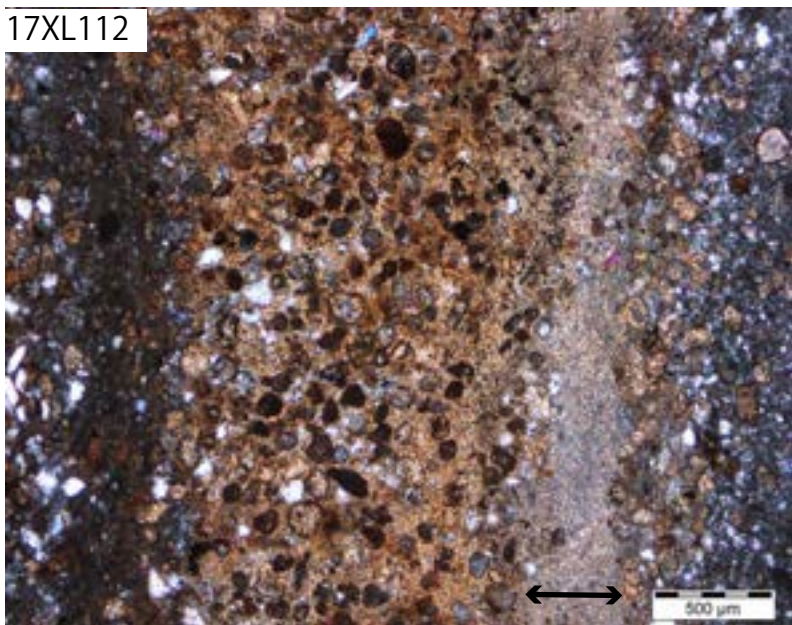
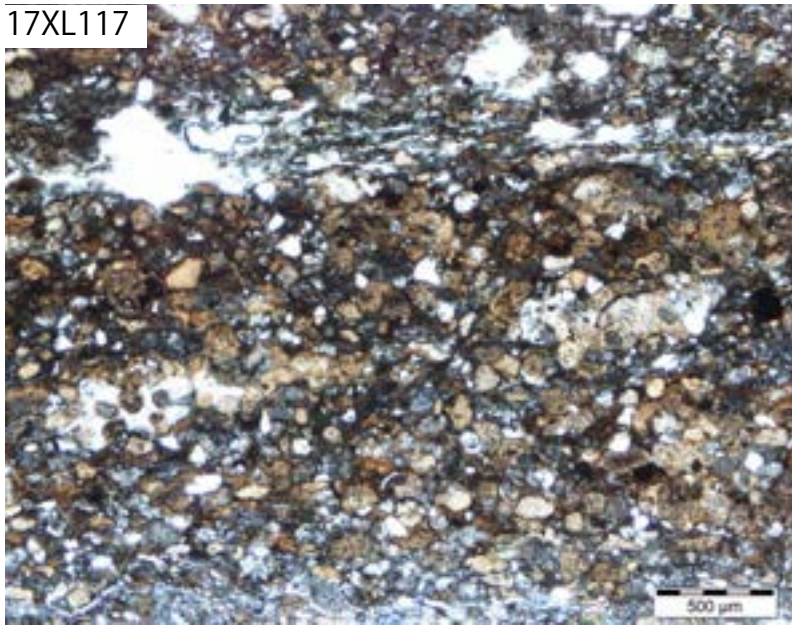


図 12. 小濫田セクション中誼村部層ユニット 1 の薄片写真

Unit 2

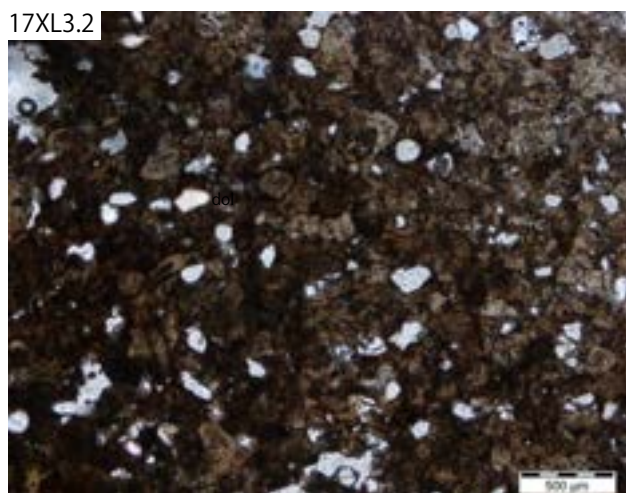
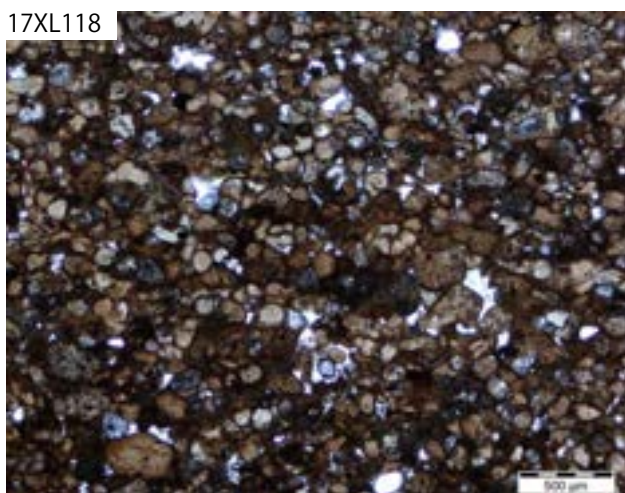
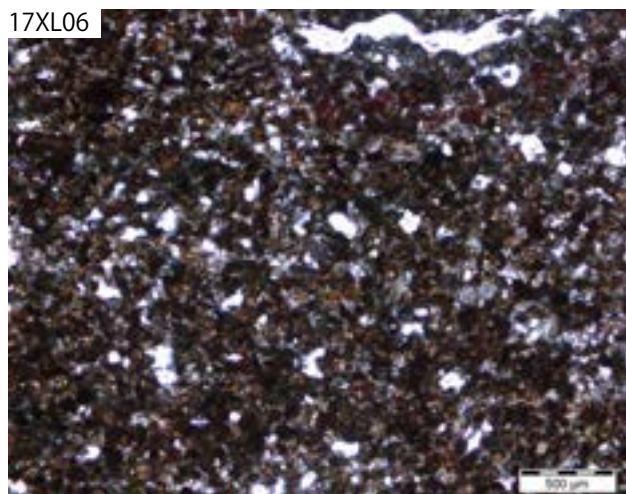
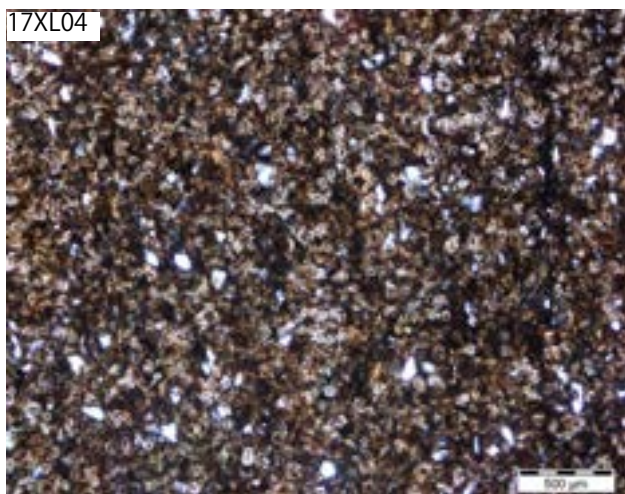
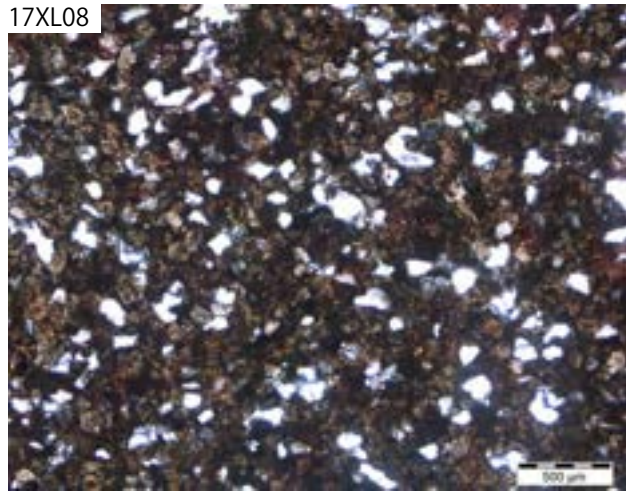
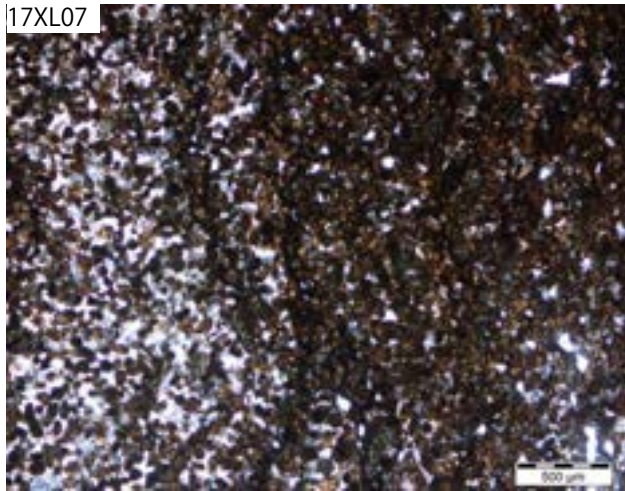
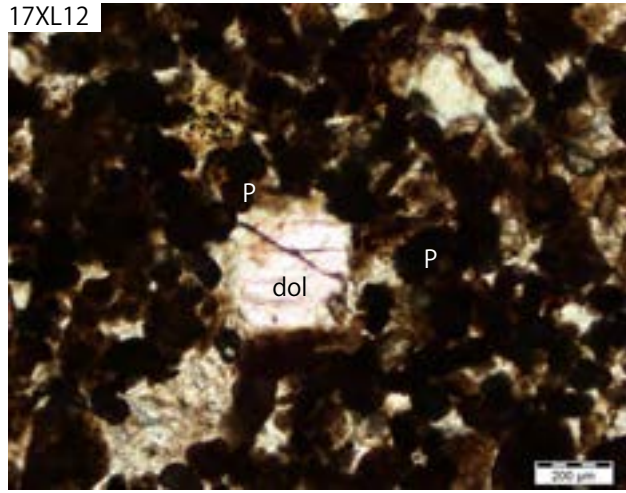
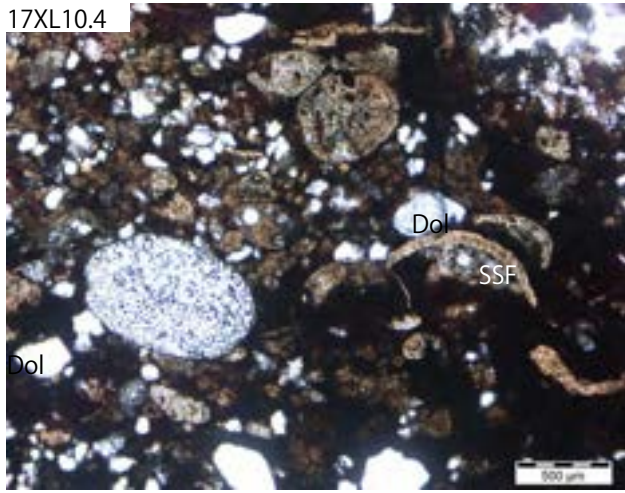


図 13. 小濫田セクション中誼村部層ユニット 2 の薄片写真

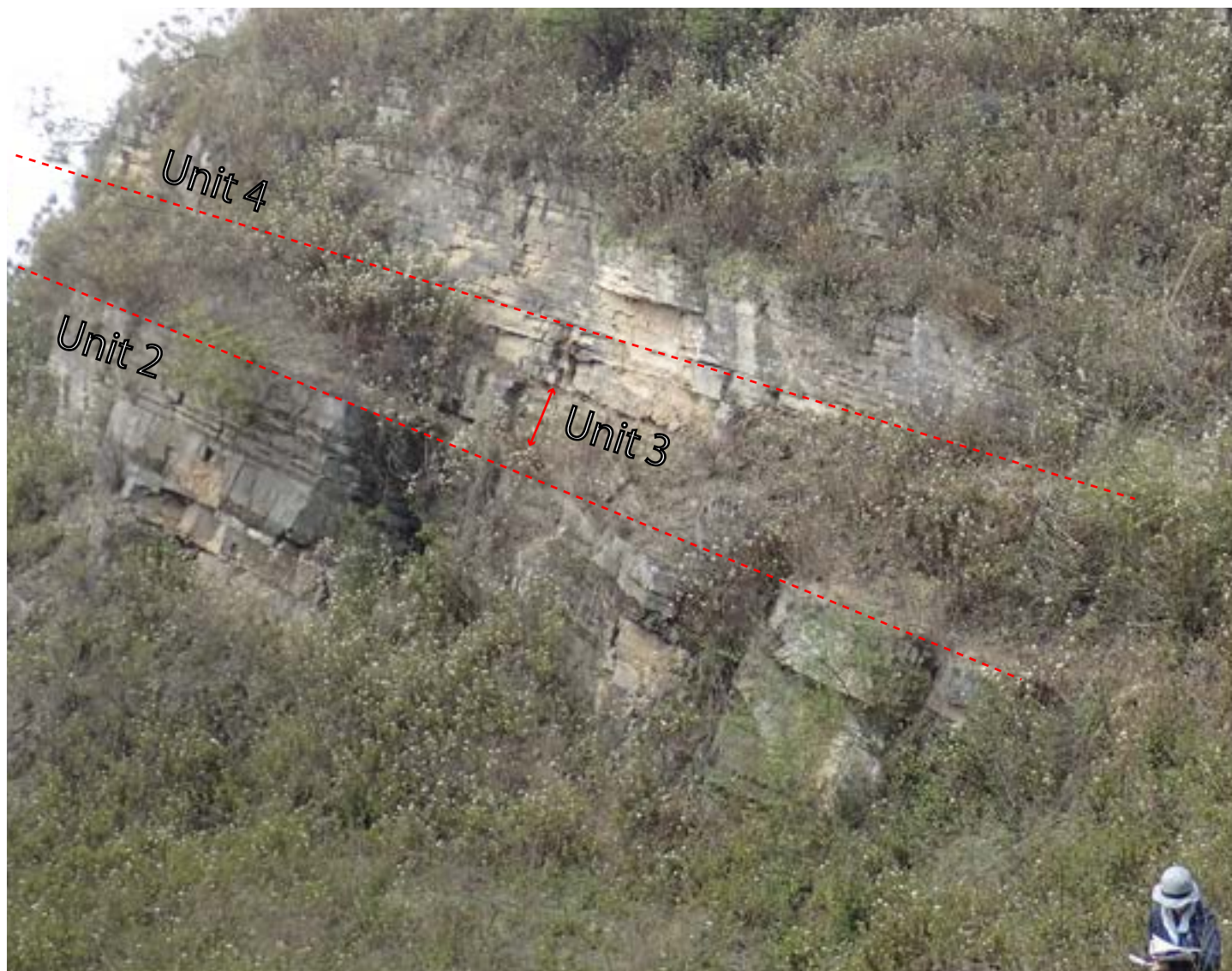


図 14. 小濫田セクション露頭における中誼村部層ユニット 2 とユニット 3

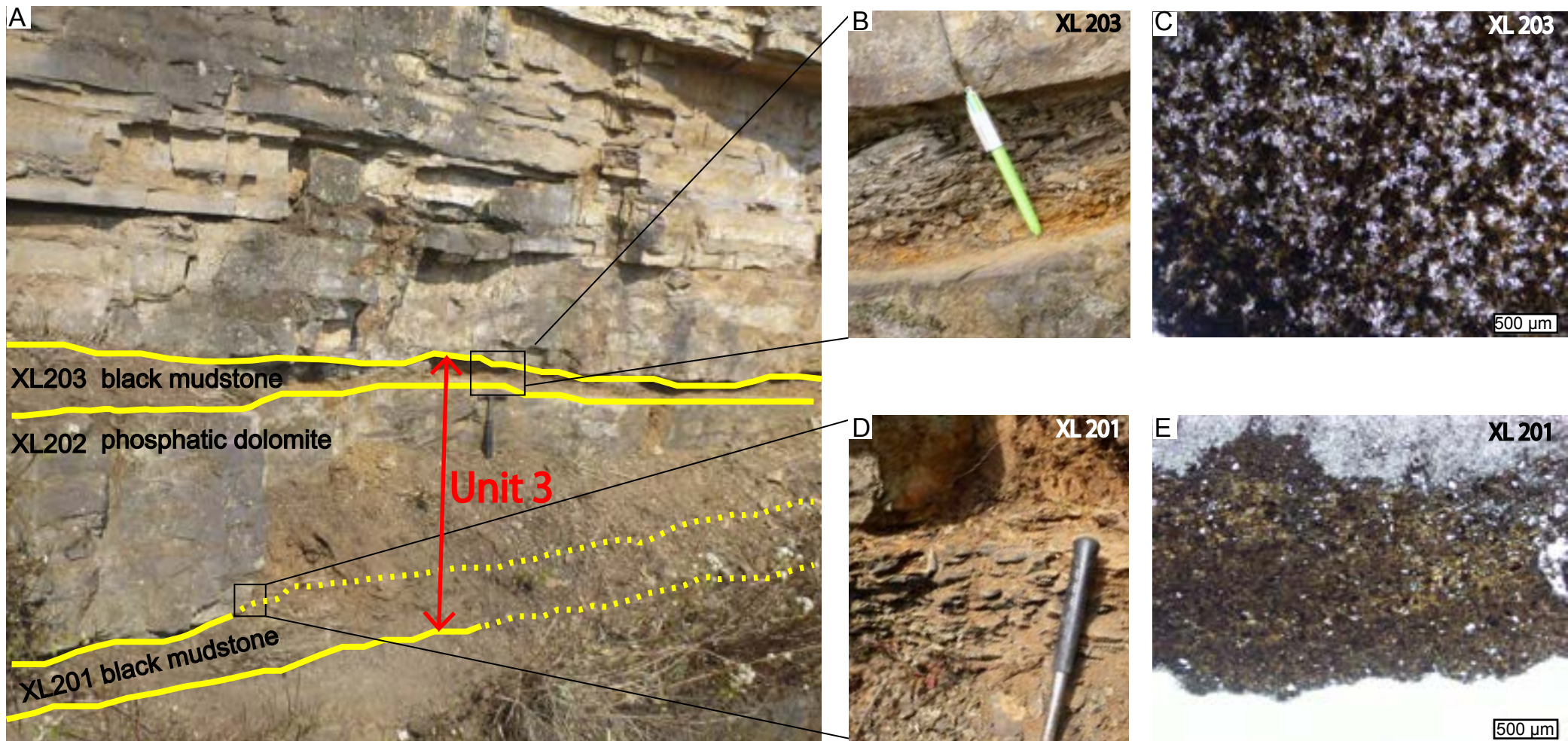


図 15. 小濫田セクション中誼村部層ユニット 3 の露頭写真および薄片写真

Unit 4

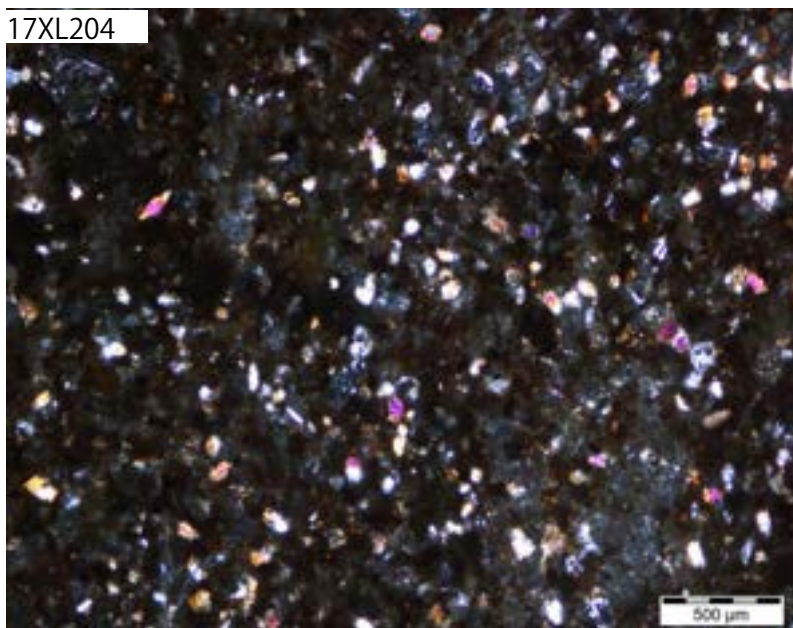
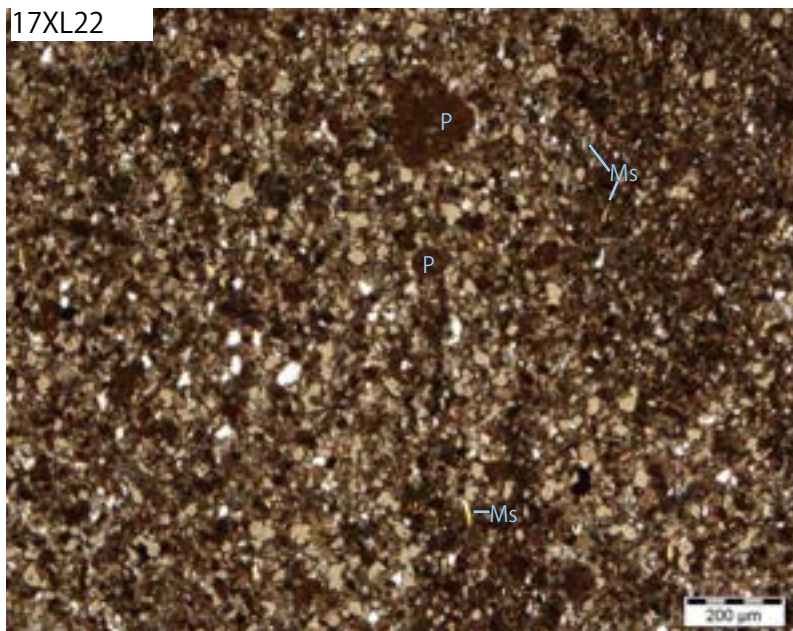
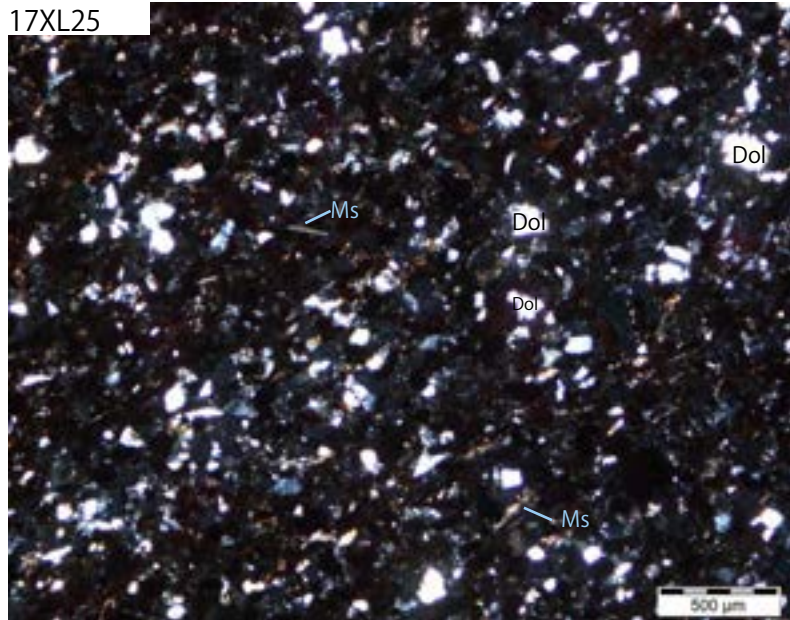
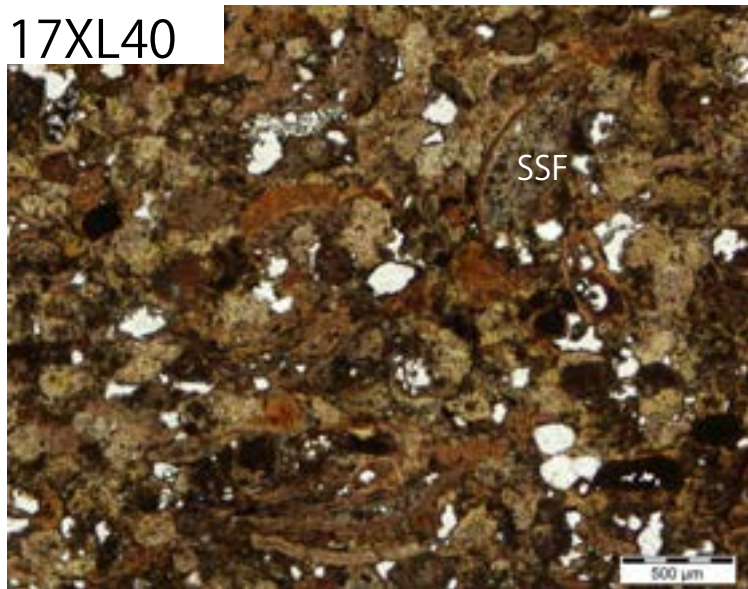


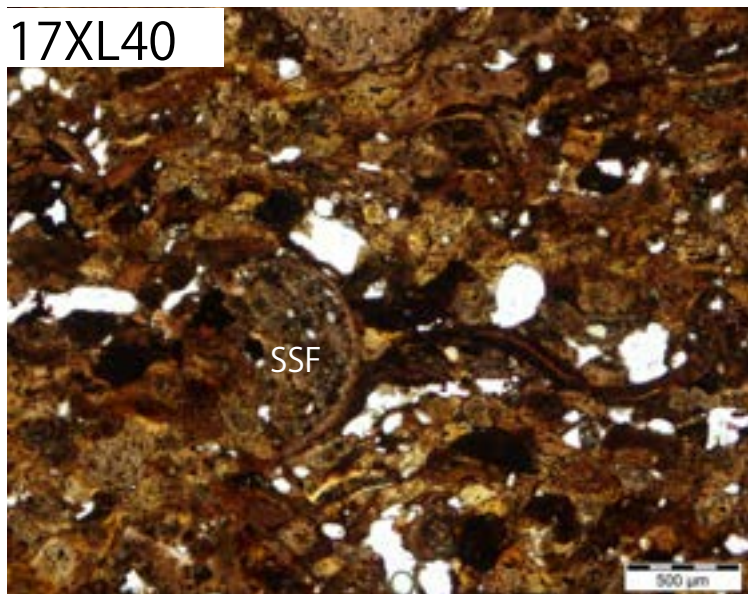
図 16. 小濫田セクション中誼村部層ユニット 4 の薄片写真

Unit 6

17XL40



17XL40



Unit 5

17XL33

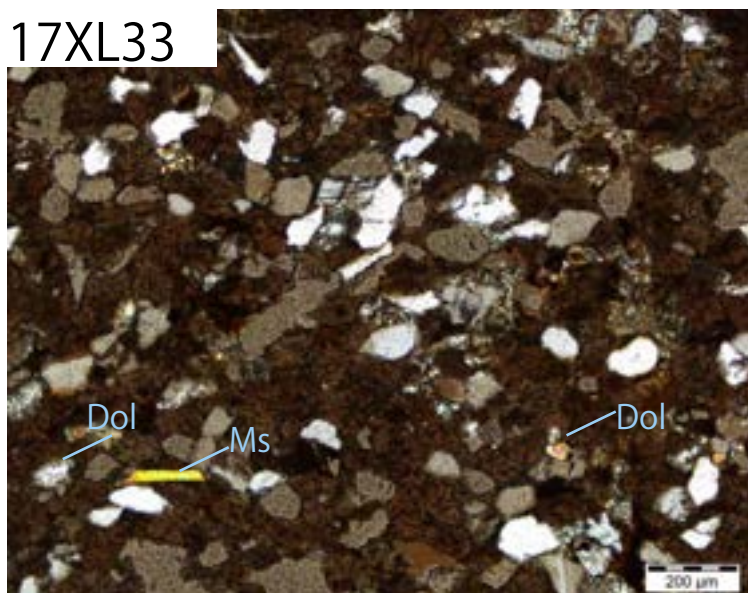


図 17. 小濫田セクション中誼村部層ユニット 5 および 6 の薄片写真

Xiaolantian section

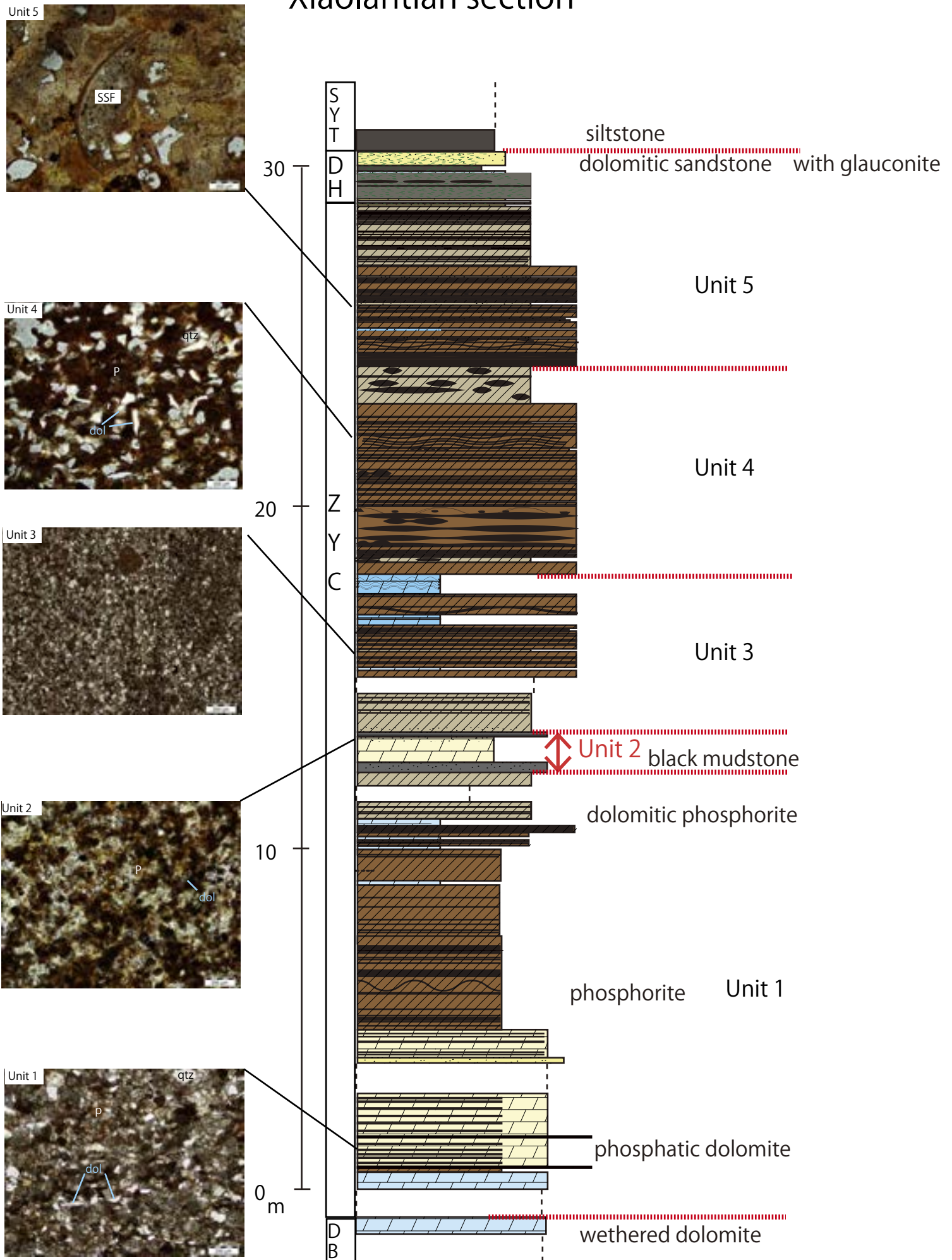


図 18. 小濫田セクション中誼村部層柱状図および薄片写真

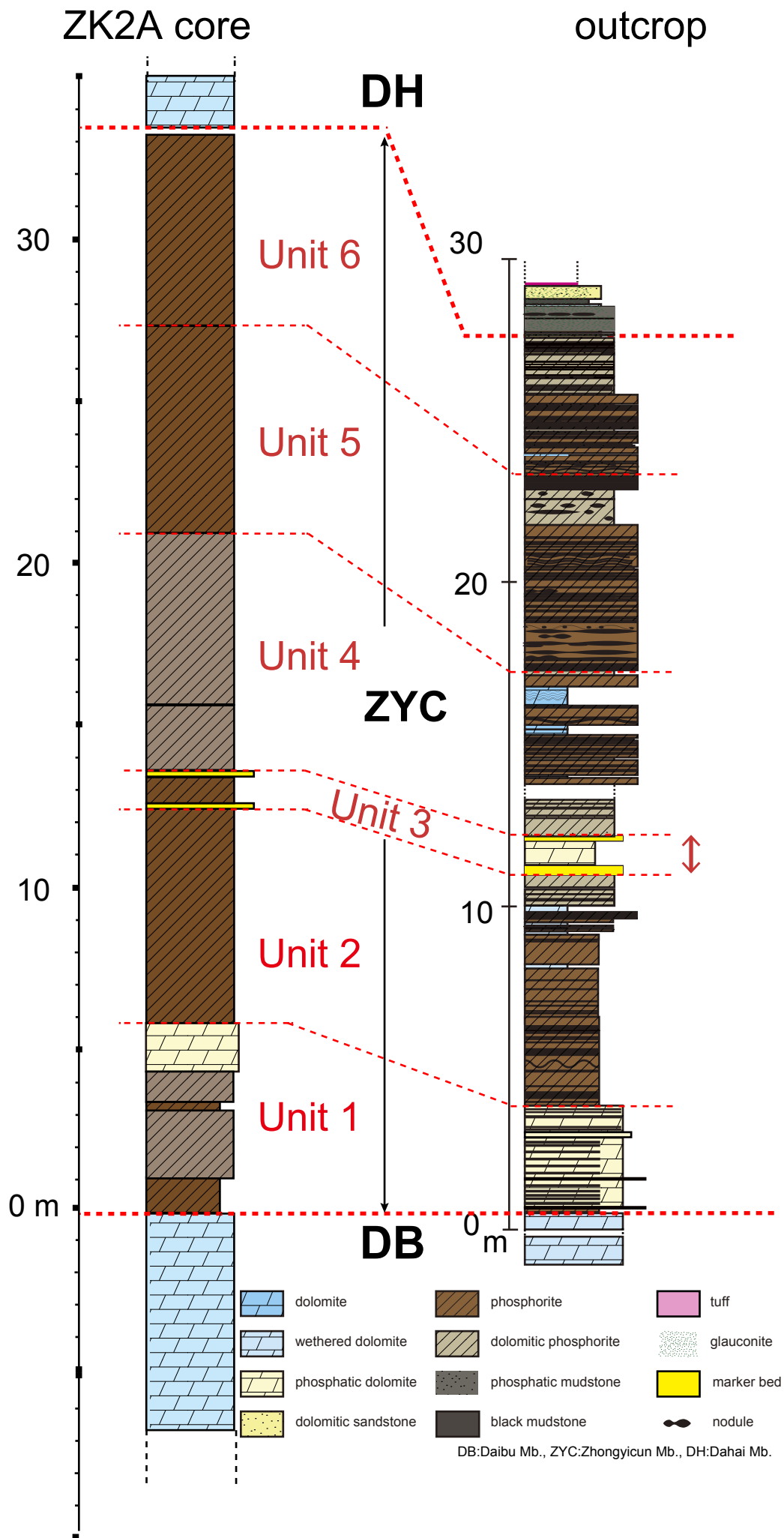


図 19. 小濫田セクション露頭および掘削コア試料柱状図対比

表 1 小濫田セクションにおける主要元素組成

sample	深 さ	Na23	Mg25	Al27	Si29	P31	K39	Ca43	Mn55	Fe57	total
	(cm)										
17xI100	25.02	0.12	8.52	3.44	56.34	1.99	0.93	24.52	0.16	1.70	97.72
17xI102	73.22	0.11	13.49	4.23	40.91	3.02	1.15	30.28	0.20	2.11	95.50
17xI104.5	103.64	0.08	0.96	2.62	39.19	19.49	0.81	29.58	0.11	1.35	94.20
17xI109	153.54	0.02	2.49	1.18	68.32	6.36	0.34	17.02	0.07	0.93	96.73
17xI110	275.5	0.10	6.52	1.95	23.19	15.20	0.42	46.13	0.19	1.75	95.45
17xI112	297.4	0.08	10.34	2.21	32.79	11.94	0.62	40.36	0.25	1.31	99.91
(16xI3)	367.66	0.08	0.32	2.16	17.58	24.85	0.66	45.57	0.13	1.16	92.52
17xI119	375.62	0.10	0.17	0.82	10.33	33.10	0.13	47.64	0.05	0.75	93.08
16xI8	864.2	0.13	0.19	0.61	11.44	36.84	0.22	50.52	0.06	0.59	100.60
17XL10.4	1004	0.08	0.36	2.26	31.49	25.49	0.90	35.44	0.12	1.05	97.20
17xI201	1135.6	0.10	2.17	14.76	67.32	3.88	2.65	5.46	0.00	2.22	98.55
17xI202	1164.4	0.08	0.62	3.60	53.51	17.27	1.16	24.08	0.02	0.78	101.11
17xI203	1228.6	0.19	1.87	14.31	50.12	7.19	1.98	10.89	0.12	2.72	89.38
17xI205	1332	0.18	0.46	8.22	68.72	5.77	1.01	8.88	0.14	1.37	94.74
17xI206	1353	0.35	0.46	8.02	73.87	4.78	1.18	7.22	0.10	1.32	97.29
	崖錐										
17xI23	1586.7	0.12	0.70	11.37	64.42	8.75	1.35	12.89	0.16	1.82	101.59
17xI26	1723.4	0.10	0.57	9.32	61.91	10.85	1.10	15.91	0.31	1.82	101.89
17xI29	1813	0.15	0.98	12.53	44.99	15.78	1.59	23.62	0.20	2.60	102.44
17xI33	2152.6	0.17	0.67	11.38	31.45	20.94	1.55	31.04	0.07	2.03	99.30
17xI34	2361.6	0.14	1.65	17.71	54.45	7.02	2.20	10.72	0.51	3.73	98.13
17xI35	2375.4	0.12	1.75	18.88	55.34	6.80	2.27	10.19	0.31	3.81	99.47
17xI36	2442.4	0.14	0.89	14.60	41.20	12.52	2.21	19.08	0.09	3.16	93.89
17xI38	2505.6	0.16	0.52	9.43	26.62	22.27	0.95	31.88	0.41	2.47	94.70
17xI42	2548	0.17	0.16	1.84	3.58	38.19	0.10	55.14	0.15	0.40	99.74
17xI43	2594.4	0.23	0.17	2.11	3.82	38.31	0.19	54.87	0.10	0.37	100.16
17xI45	2921	0.21	1.51	14.02	17.47	25.95	2.18	37.04	0.02	4.69	103.09

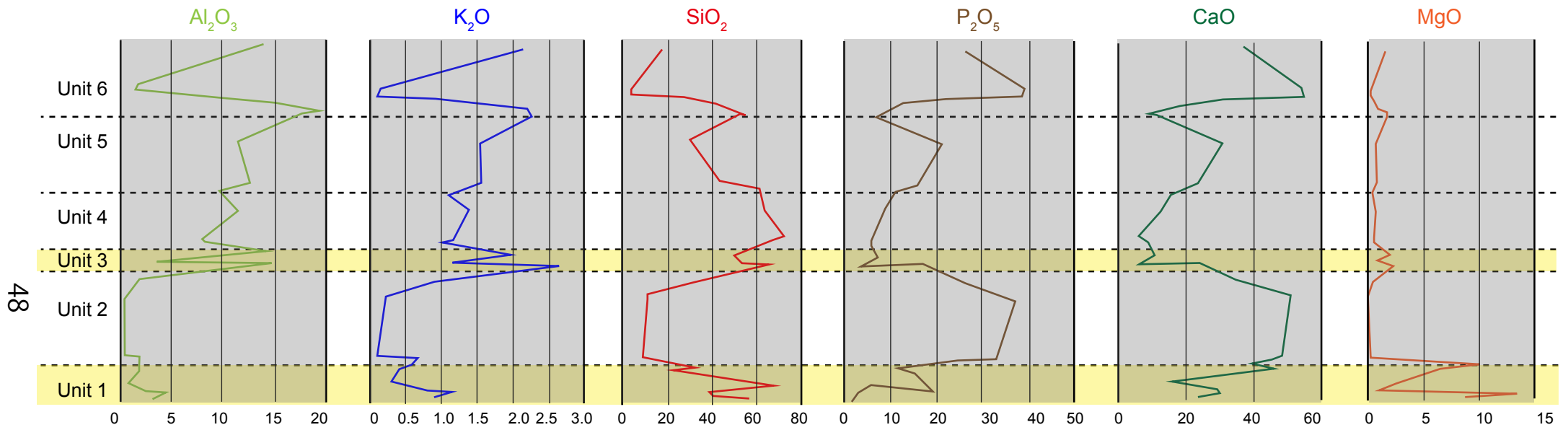


図 20. 小濫田セクション中誼村部層における主要元素組成変化

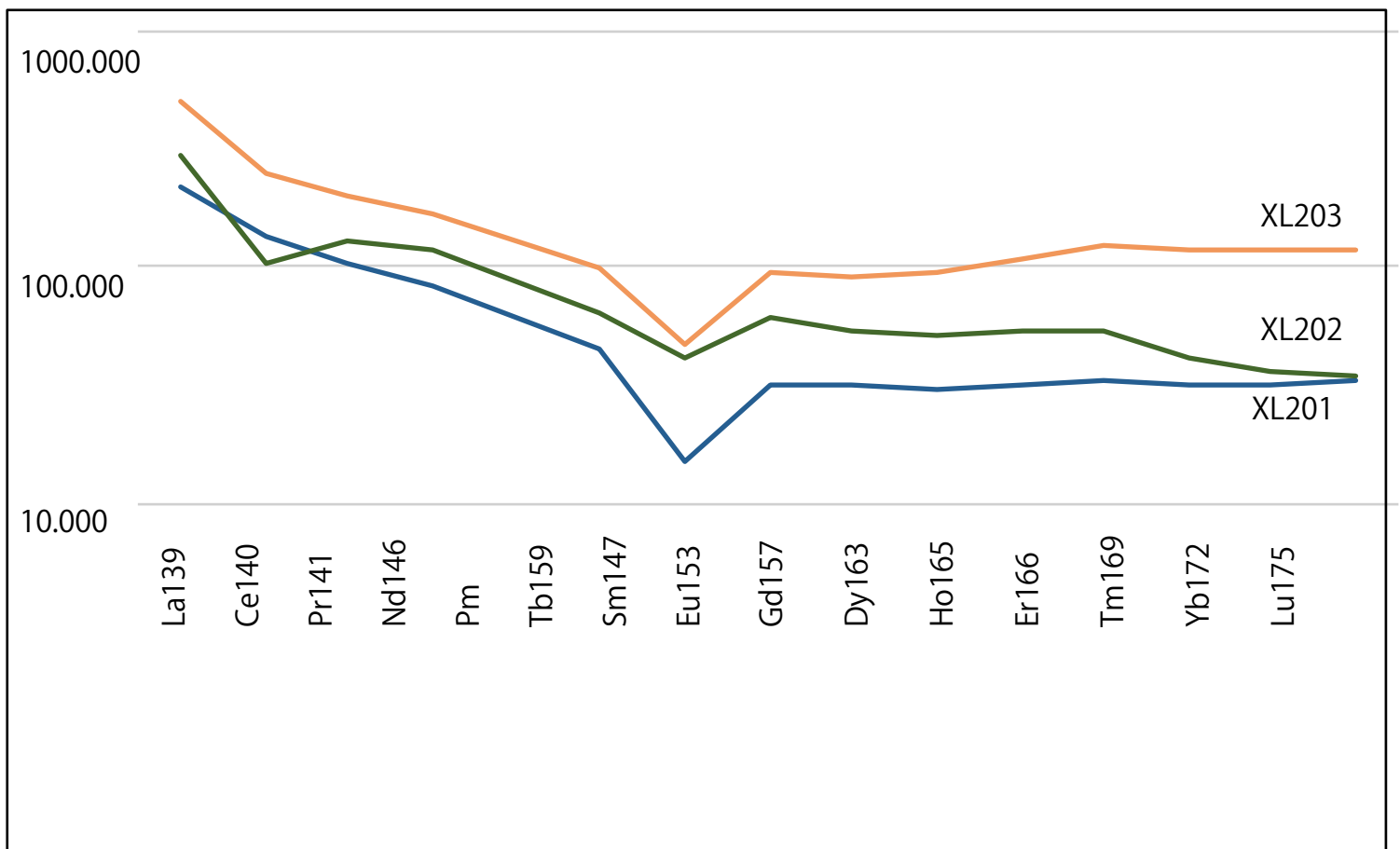
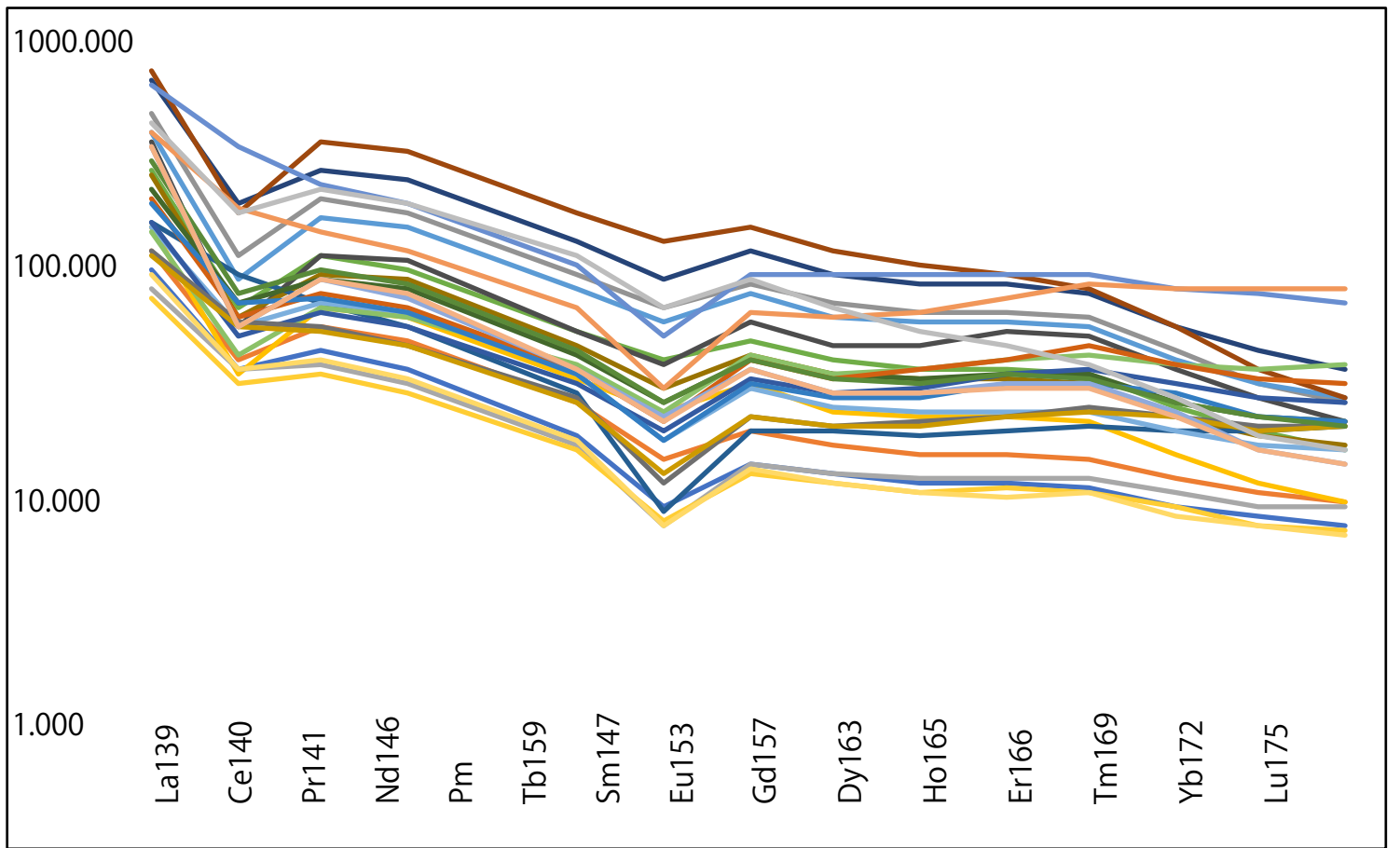


図 21. 小濫田セクションにおける微量元素濃度変化

上図はスタンダードを除く全試料, 下図はユニット 3 のみの結果.

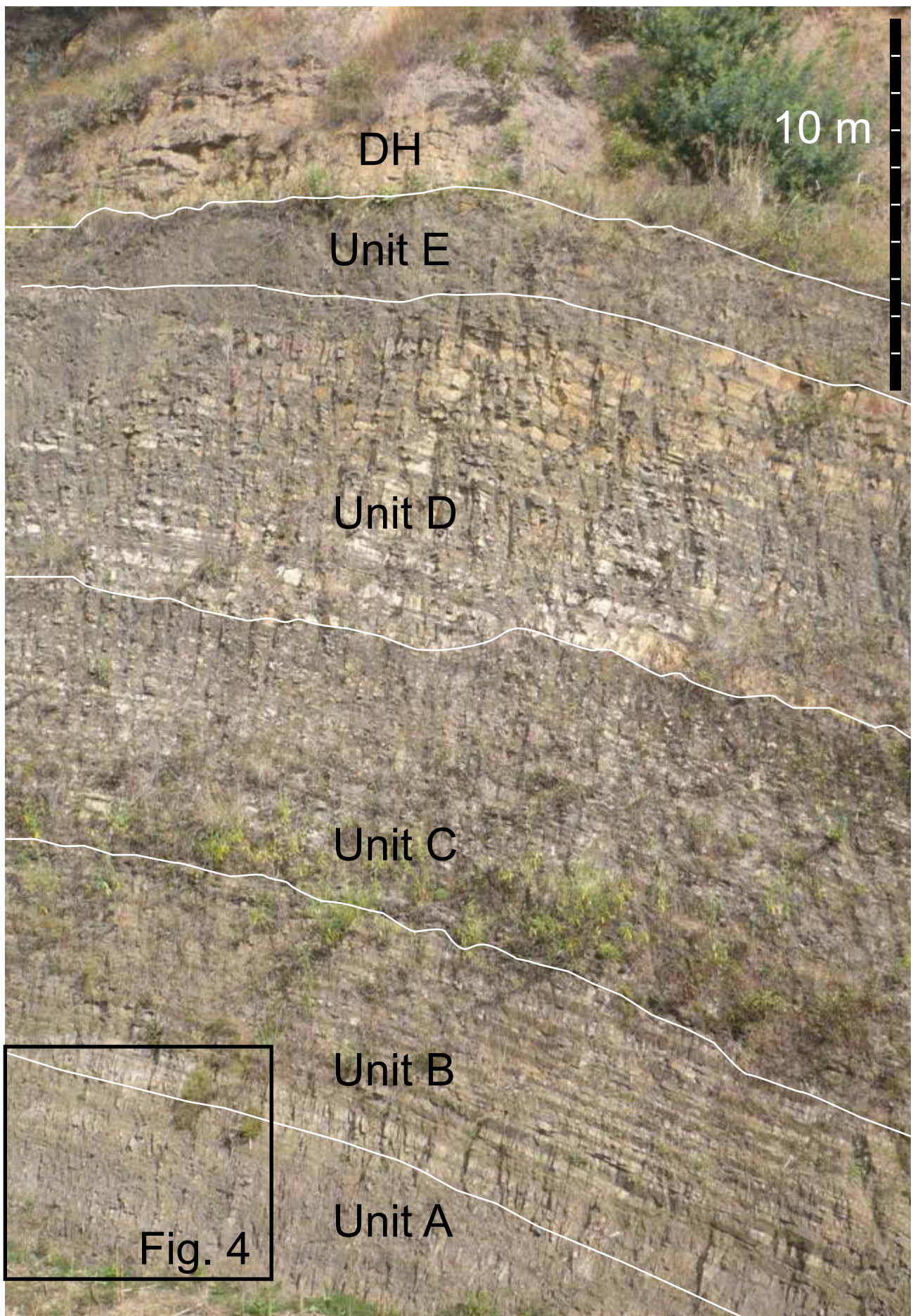


図 22. 洪家沖セクション露頭写真

Hongjiachong section

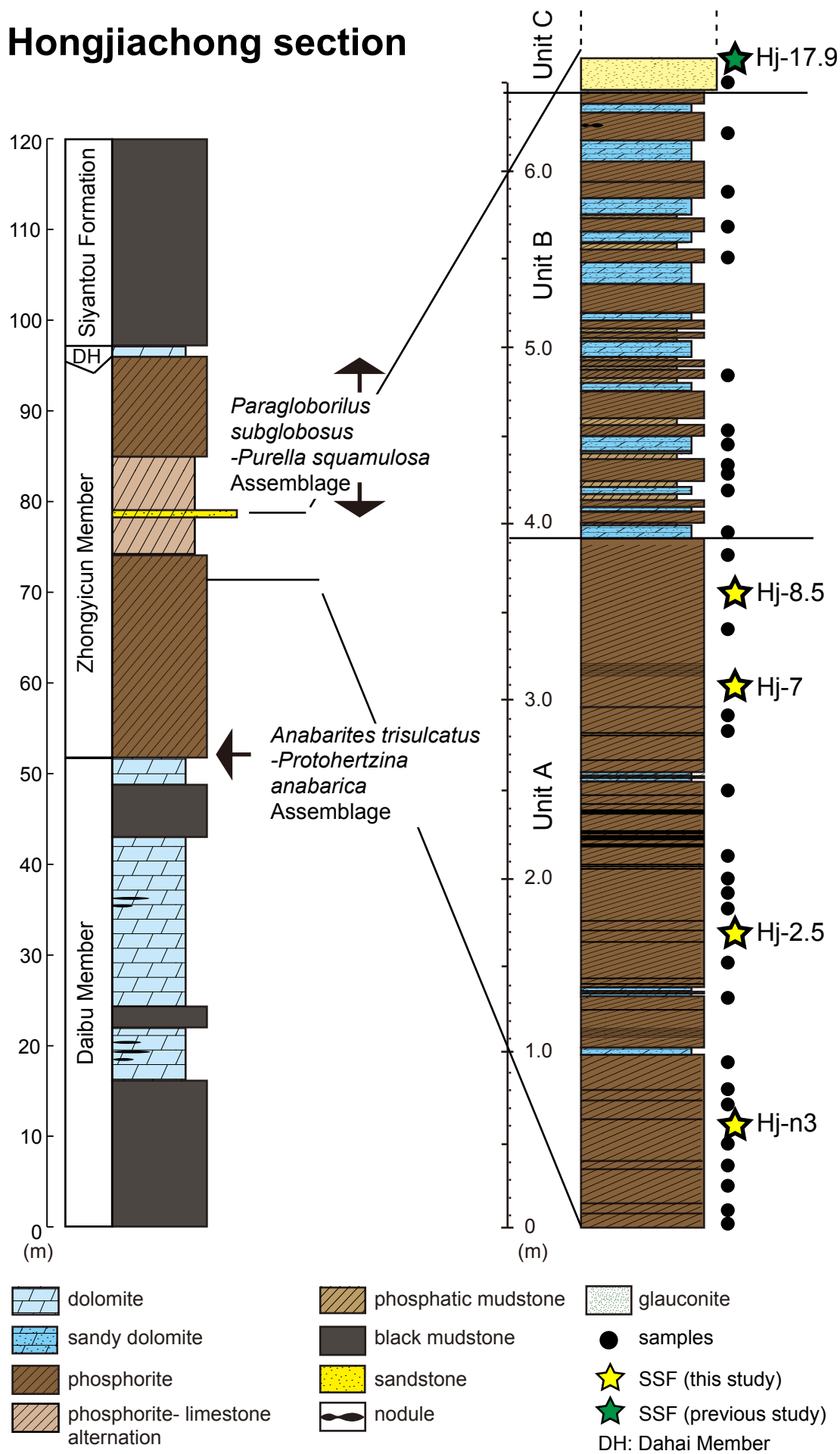


図 23. 洪家冲セクション柱状図および検討層準

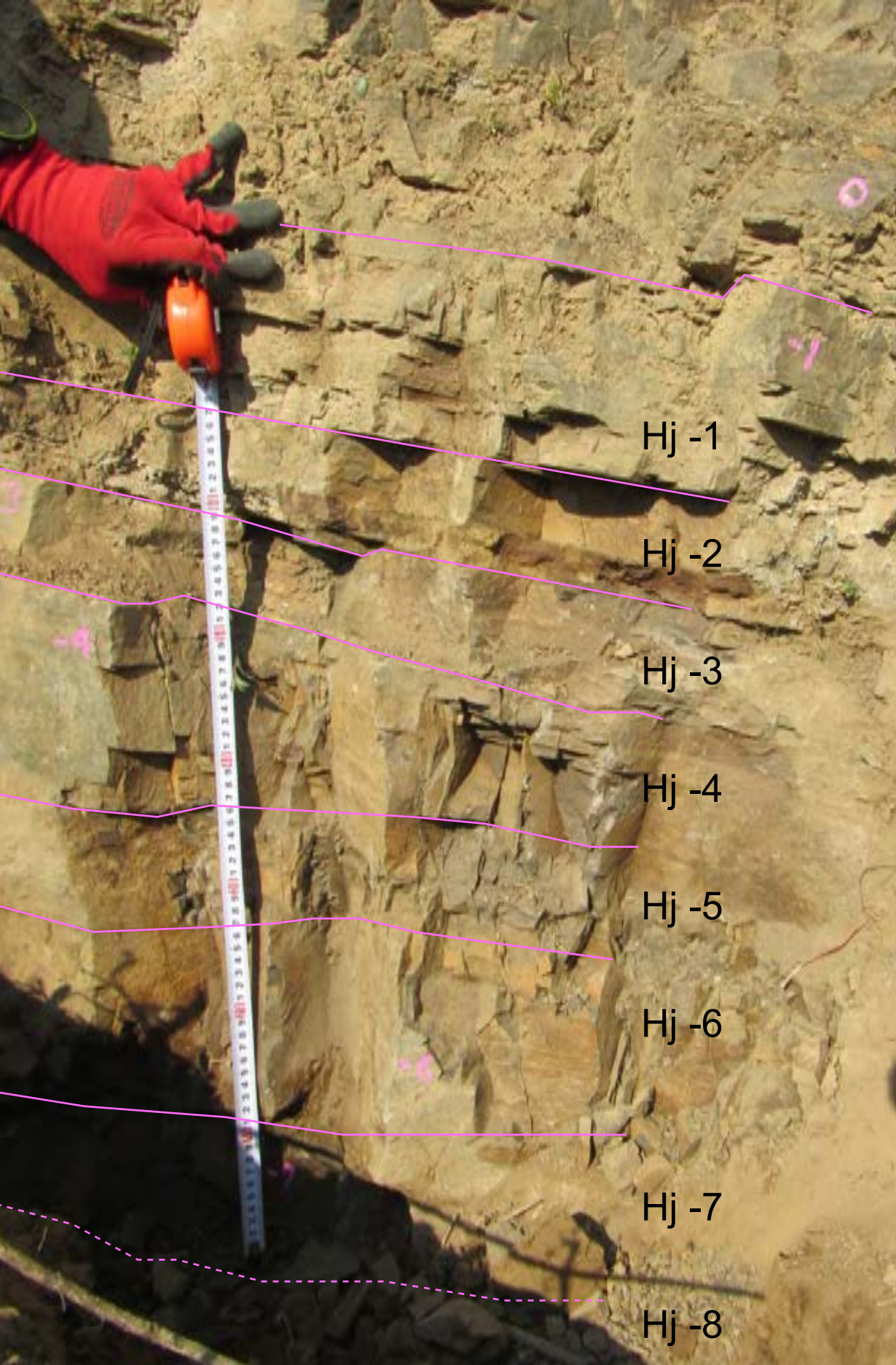


図 24. 洪家沖セクション追加検討層準露頭写真

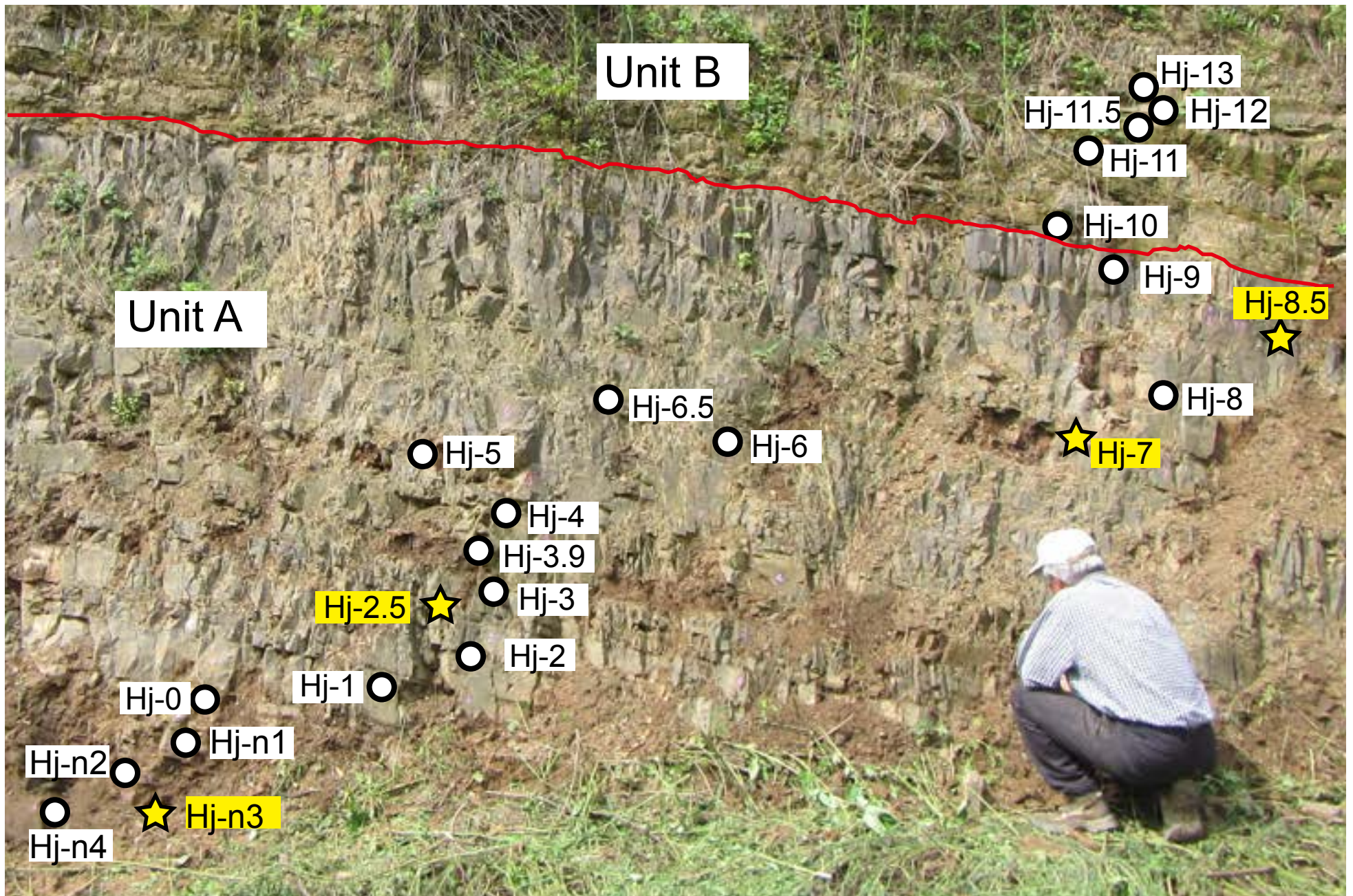


図 25. 洪家沖セクション中誼村部層下部露頭写真
丸印は SSF を産しない層，星印は SSF を産する層

洪家冲 中議村部層下部露頭柱状図

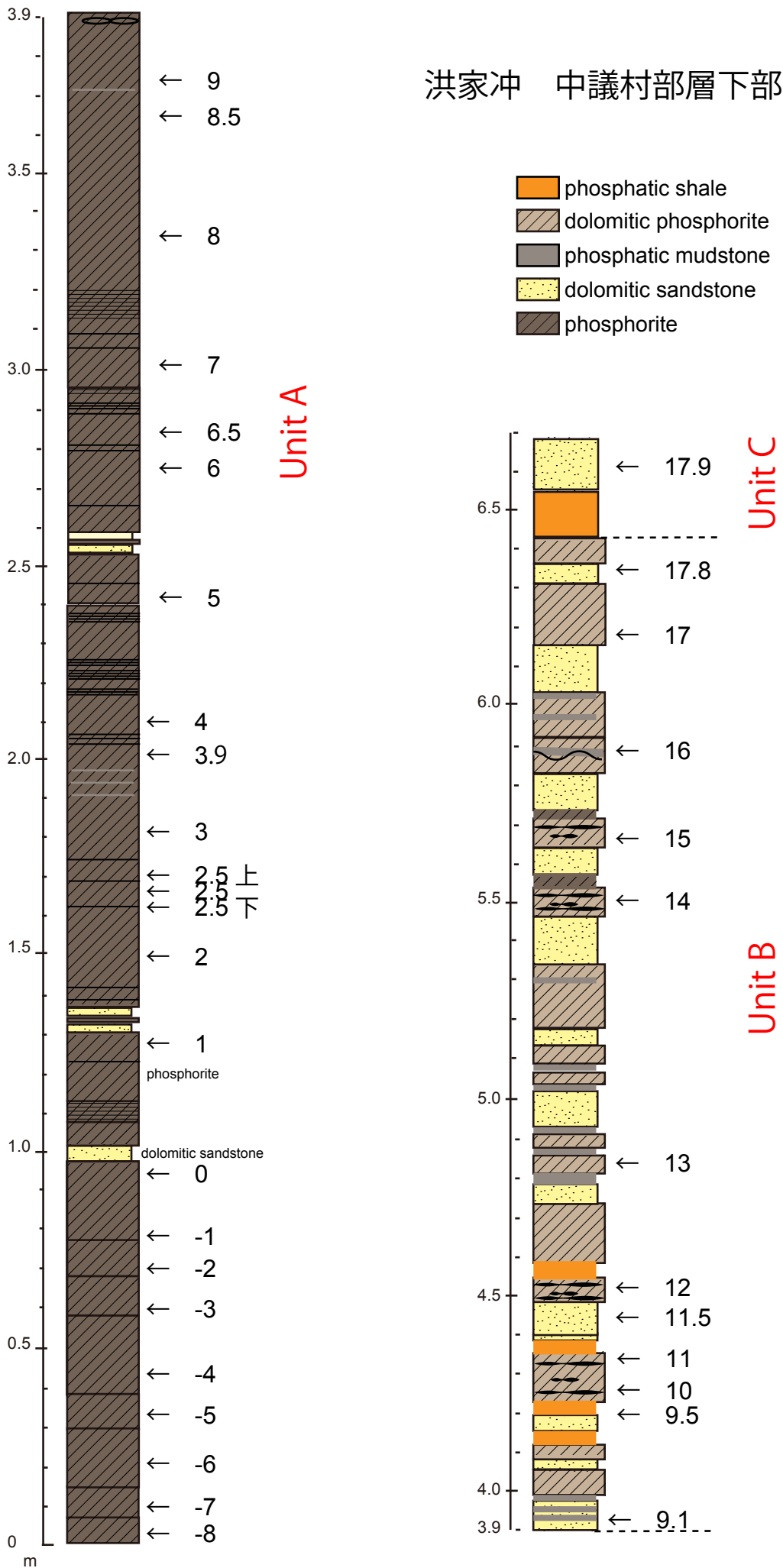
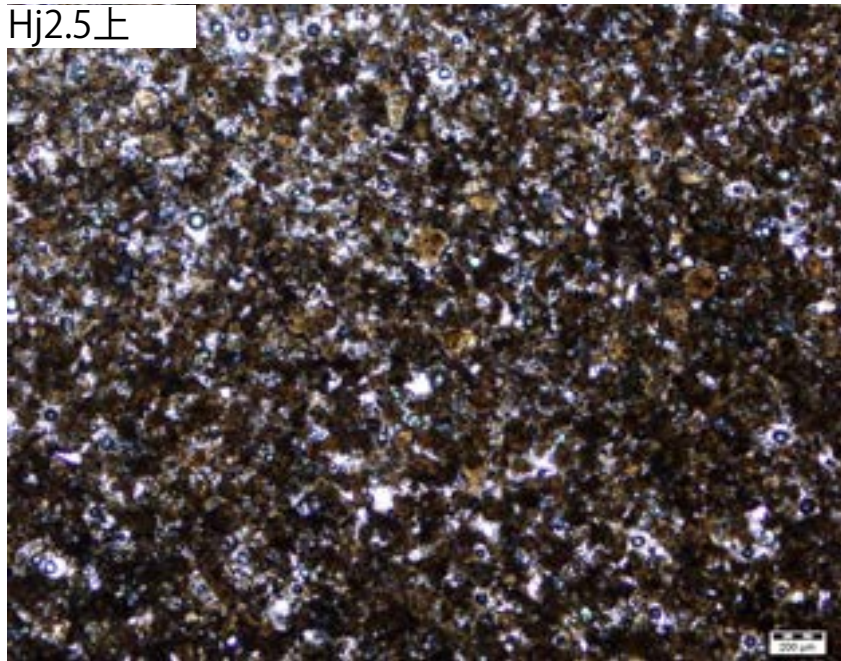
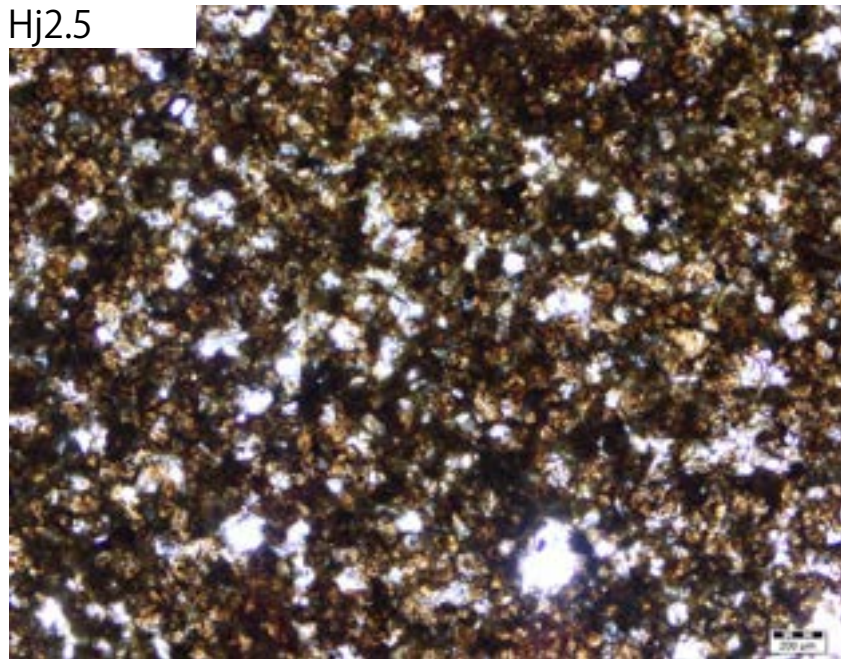


図 26. 洪家冲セクション追加検討柱状図とサンプル番号

Hj2.5上



Hj2.5



Hj2.5下

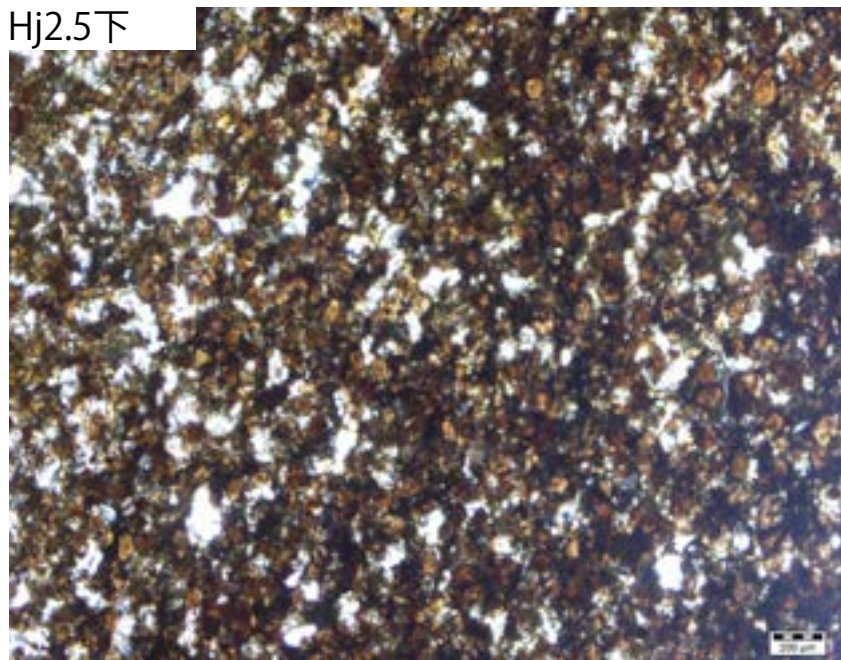


図 27. 洪家沖セクション薄片写真

Xiaolantian

Hongjiachong

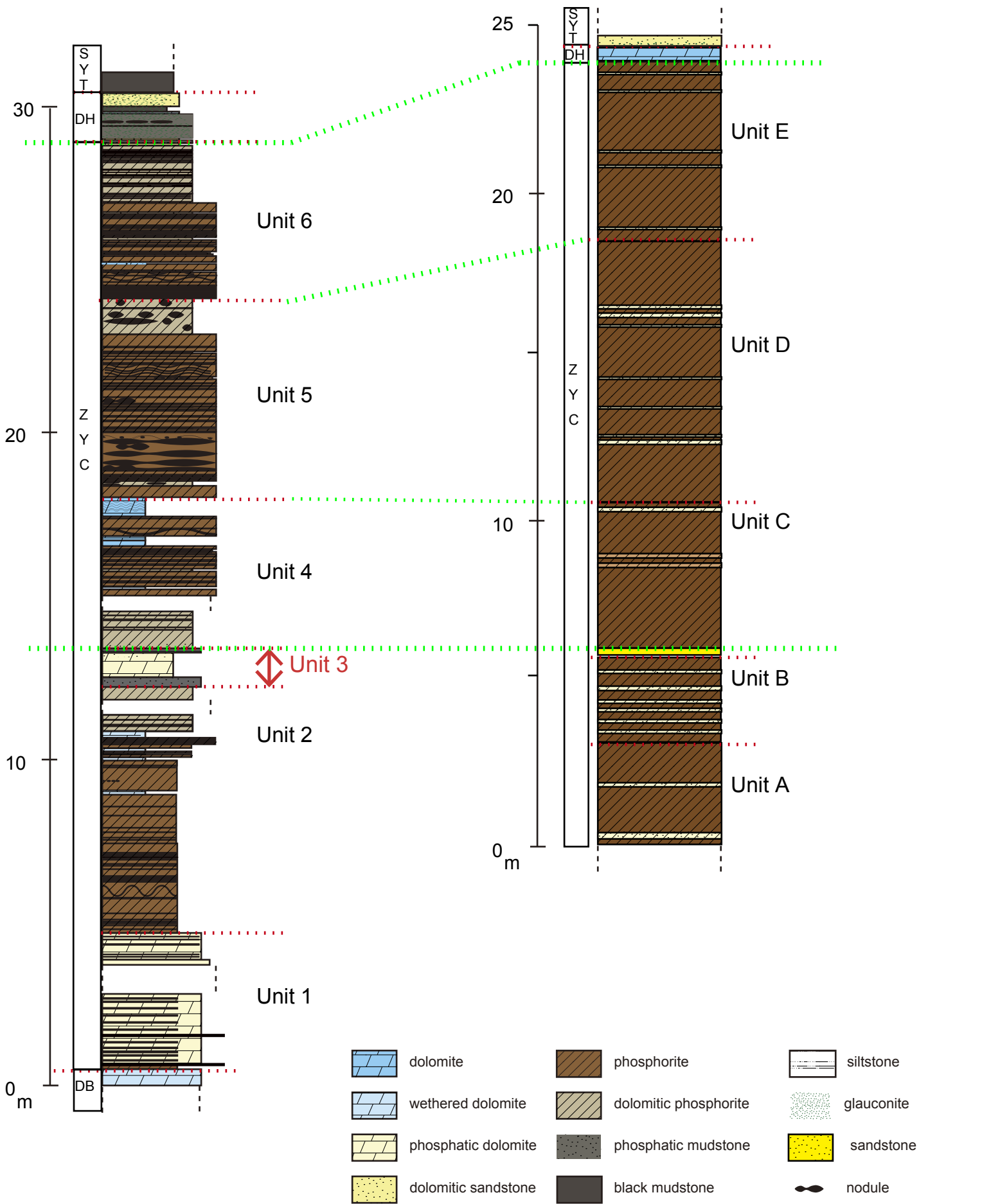


図 28. 小濫田と洪家沖セクション対比柱状図



Zhongyicun Member



図 29. 小黄草嶺セクションにおける露頭遠景，三葉虫化石，中誼村部層の産状

小黄草嶺セクション柱状図

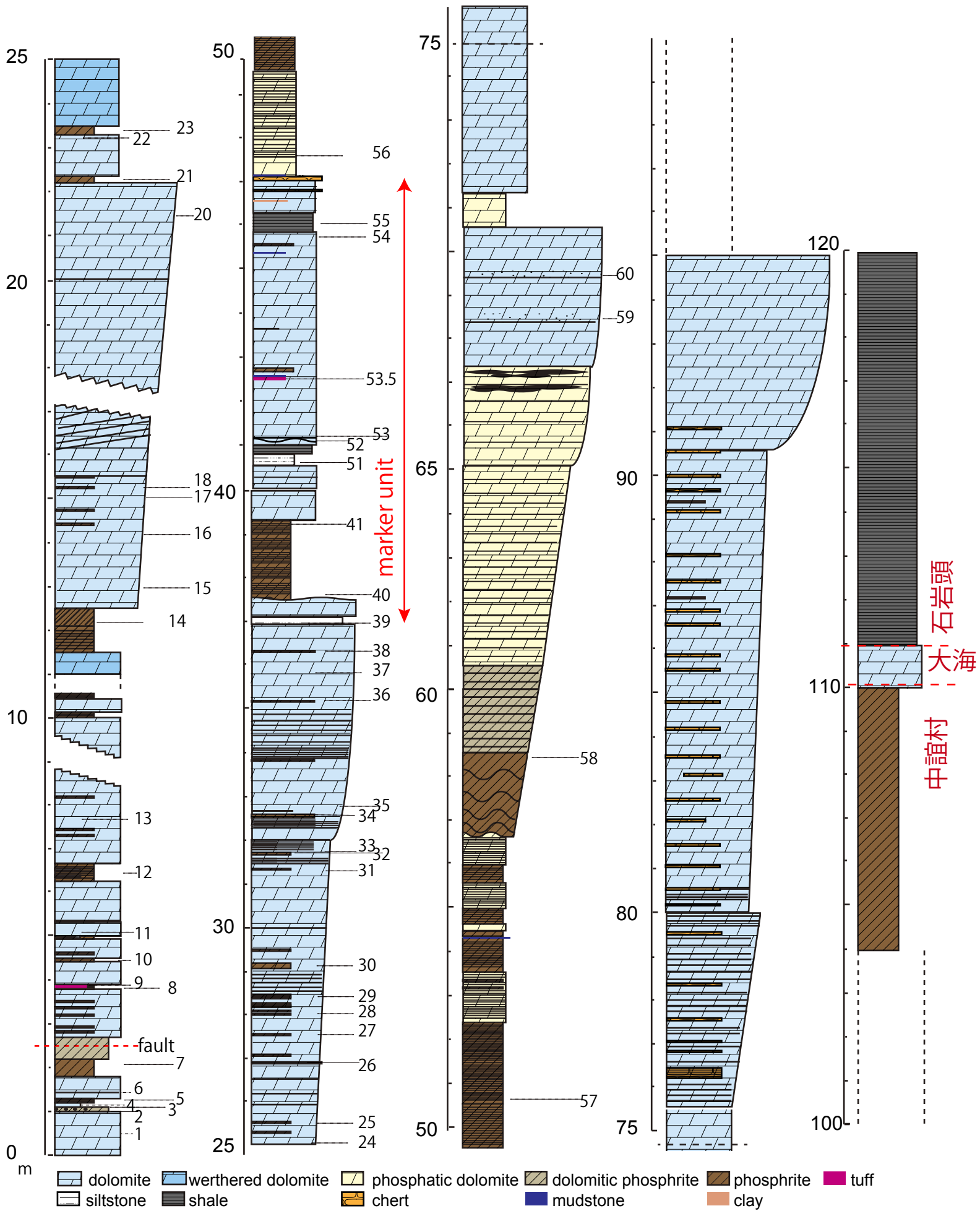


図 30. 小黄草嶺セクション柱状図

Xiaofuangcaoling

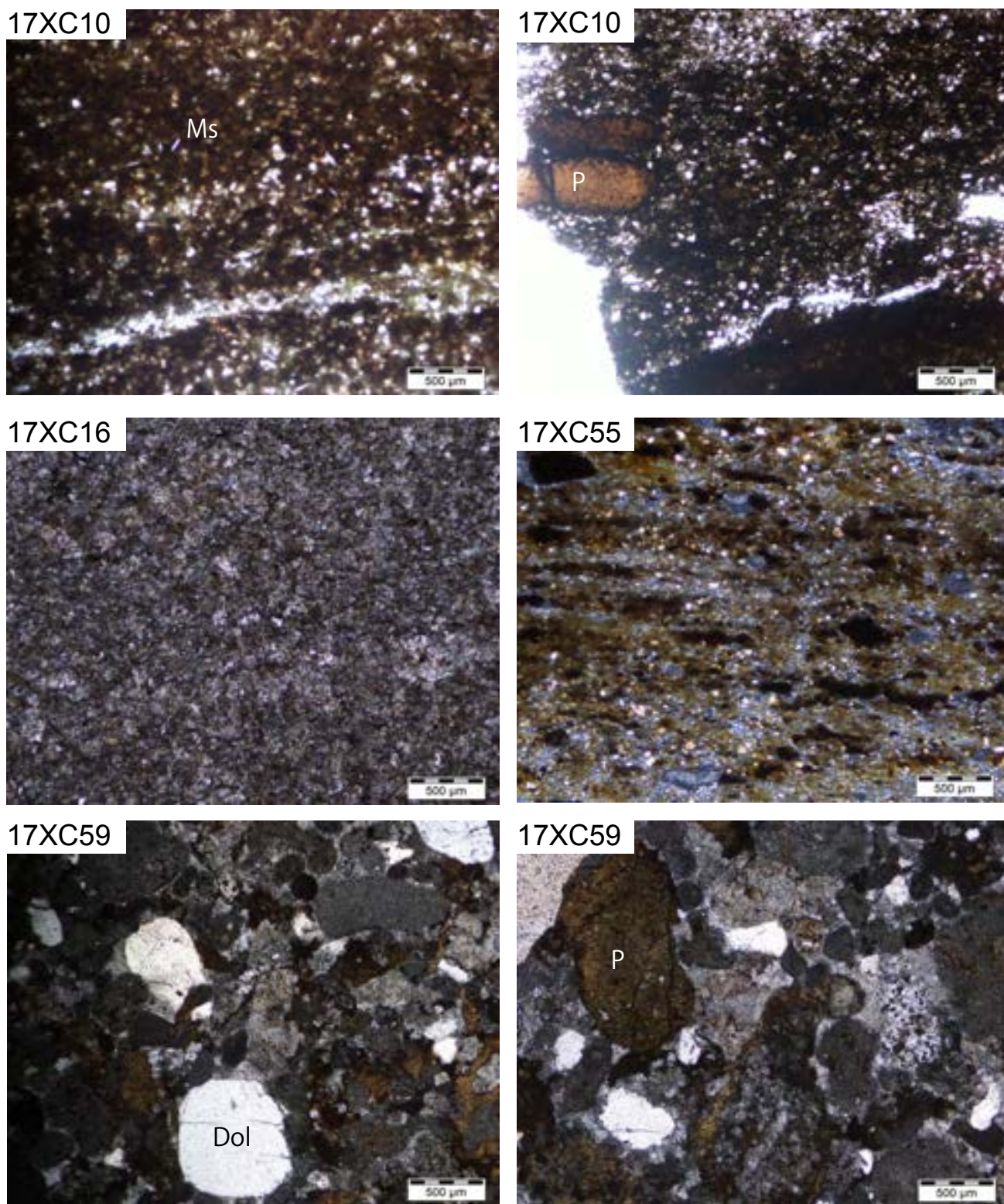


図 31. 小黄草嶺セクション柱状図

Ms: muscovite, P: phosphorite, Dol: dolomite



図 32. 小黄草嶺セクションにおける鍵層

2層の間に赤丸で示したハンマーがスケールとしておいてある



図 33. 小黄草嶺セクションにみられる凝灰岩層



図 34. 小黄草嶺セクションにみられる凝灰岩層 (XC53.5)

林道地点



Zhongyicun Member



図 35. 朱家青セクション林道地点露頭遠景および産状

Zhujiqing Section (Forest Road)

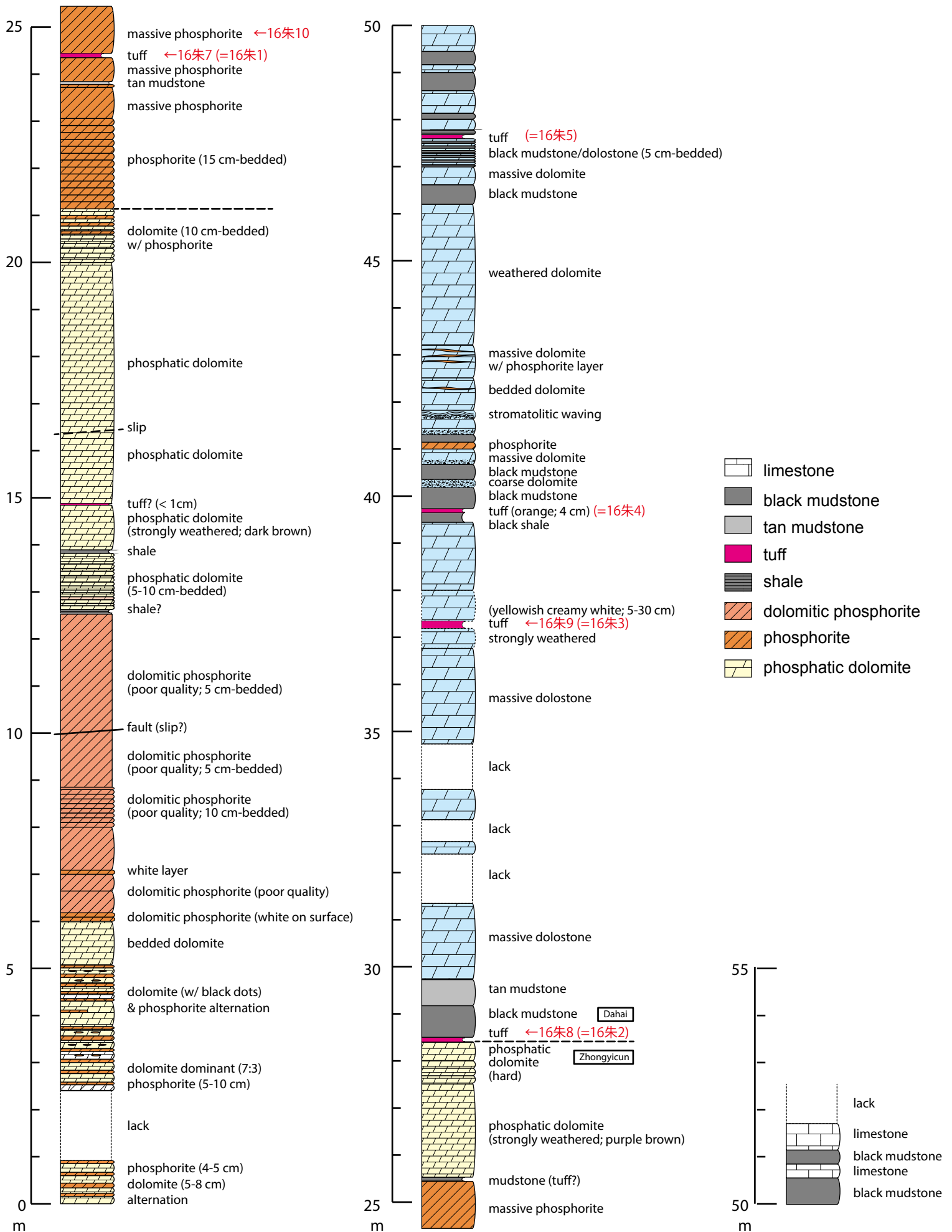


図 36. 朱家青セクション林道地点柱状図

Zhujiqing Section (Forest Road)

16朱9



16朱9



16朱8

16朱7



16朱8



16朱7



図 37. 朱家青セクション林道地点凝灰岩層

鉞山跡地点



←Dahai Member



Dahai Member
Zhongyicun Member

Zhongyicun Member



図 38. 朱家青セクション鉞山跡地点露頭遠景，産状

Zhujiqing section

鉍山跡地

- dolomitic phosphorite
- black mudstone
- phosphorite
- tuff
- phosphatic dolomite
- shale
- limestone

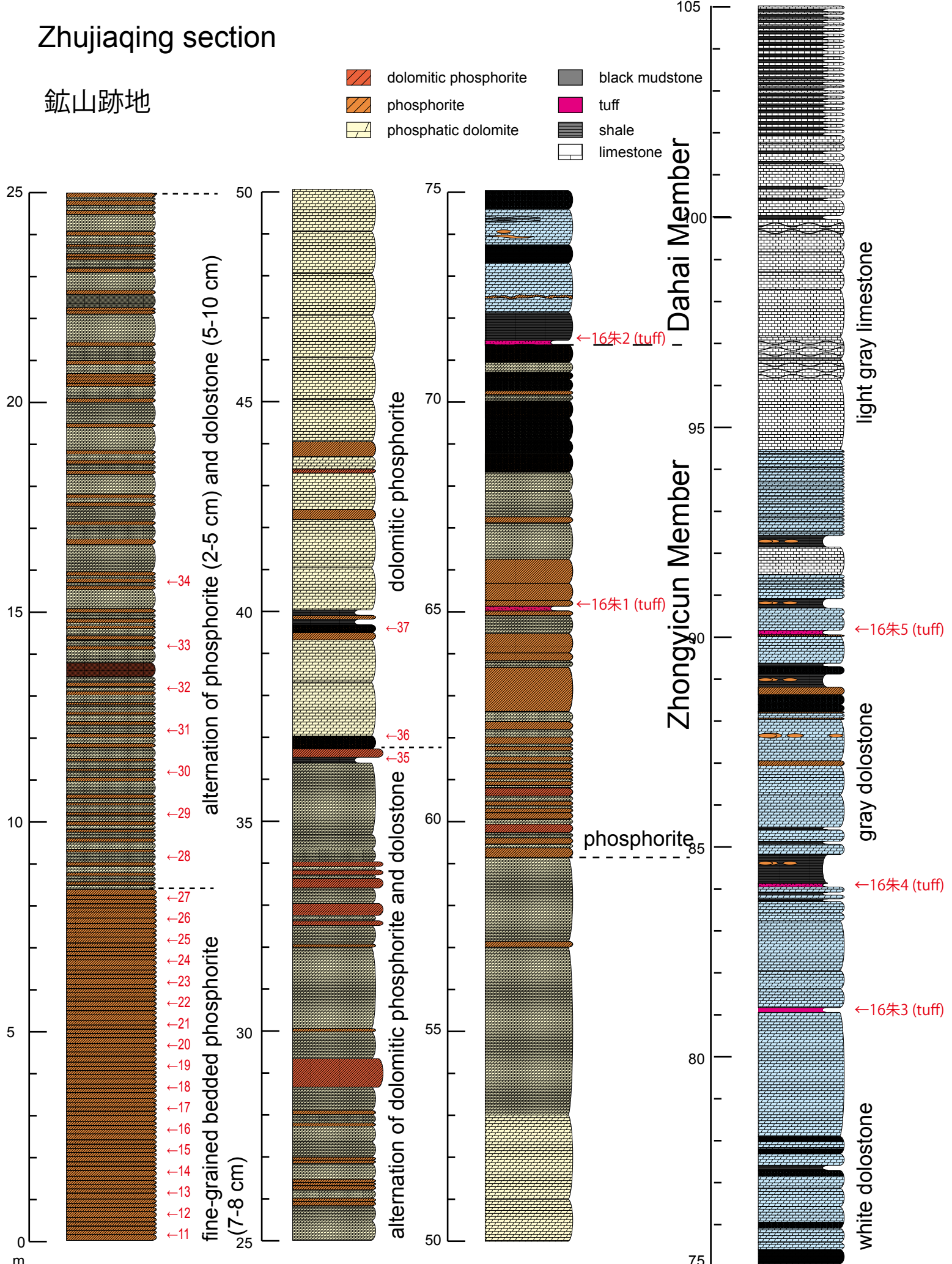


図 39. 朱家青セクション鉍山跡地点露頭柱状図およびサンプル番号

朱家青セクション鉞山跡地点

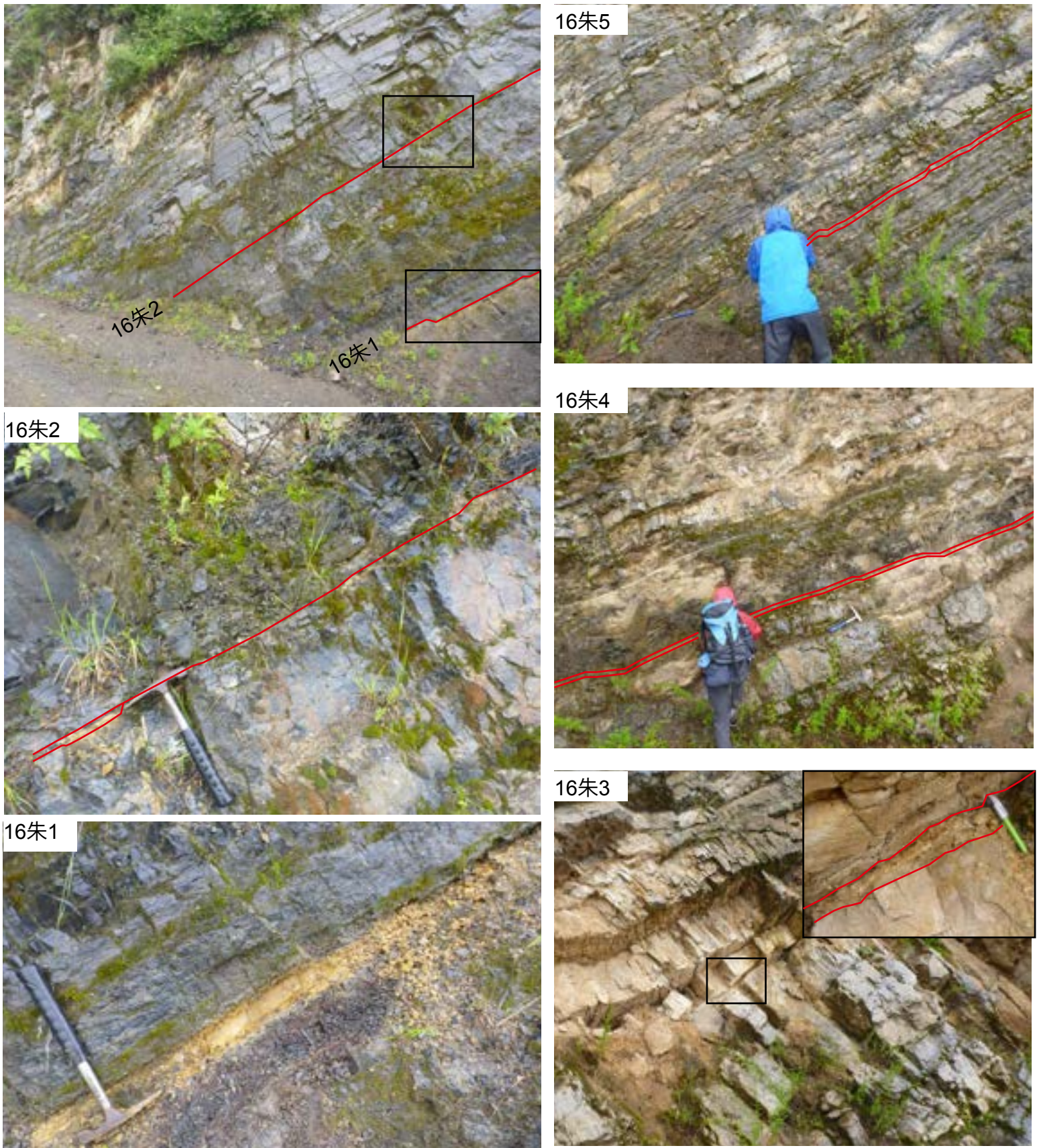


図 40. 朱家青セクション鉞山跡地点凝灰岩層

鉍山跡地点

林道地点

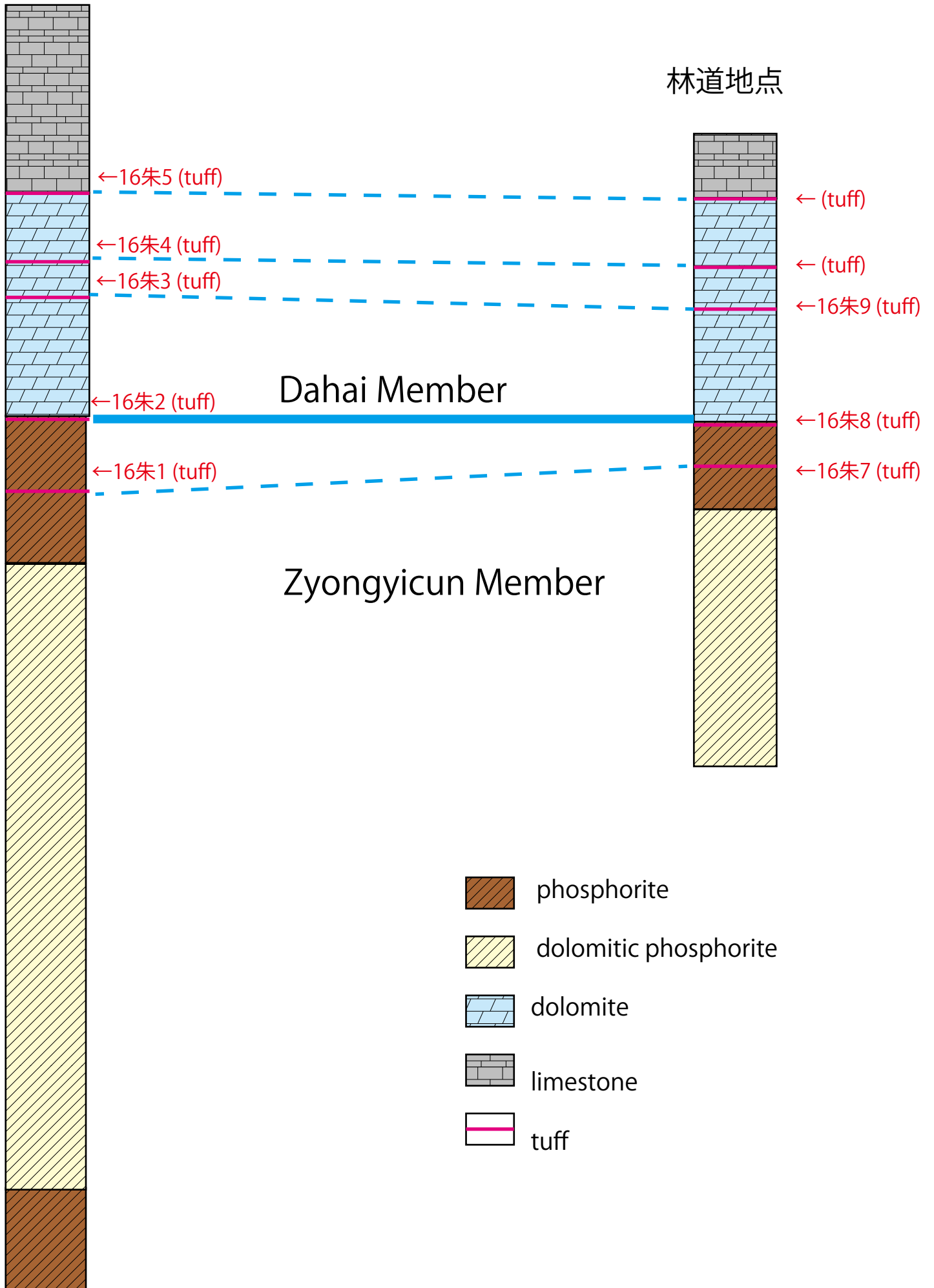


図 41. 朱家青セクション鉍山跡地点凝灰岩層

Hongjiachong

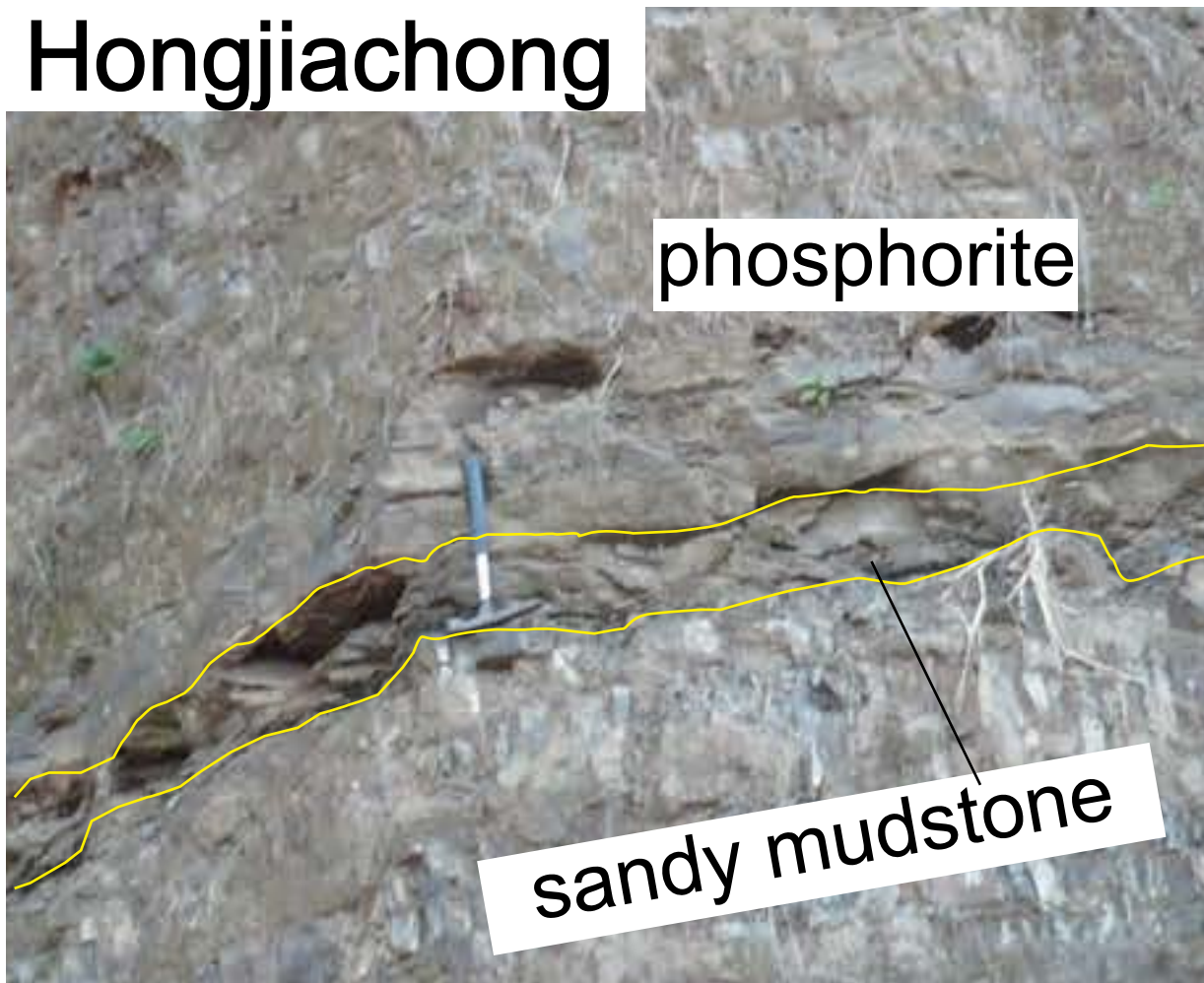


図 42. 洪家冲セクションにおける鍵層

Laolin



図 43. 朱家青セクションにおける鍵層

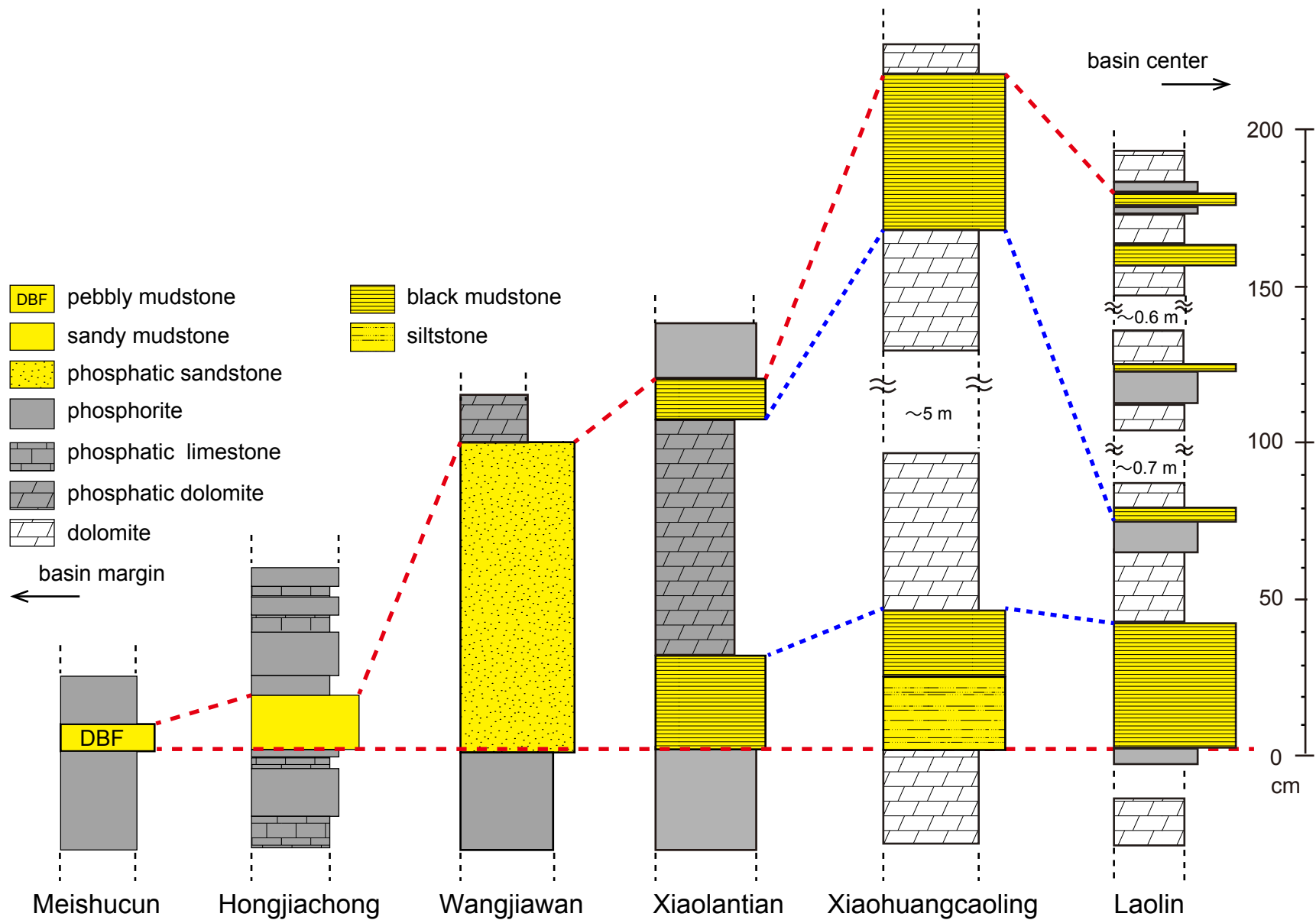


図 44. 雲南省における鍵層の詳細柱状図

第3章 ジルコンによる U-Pb 年代測定

学術雑誌に公表予定のため，除外する．

第4章 SSF層序

学術雑誌に公表予定のため，除外する．

第5章 考察

学術雑誌に公表予定のため，除外する．

第 6 章 結論

学術雑誌に公表予定のため，除外する．

謝辞

指導教官である東京大学総合文化研究科の磯崎行雄教授には、日々の研究を通し、絶え間ない御指導、多くの御教示を頂いた。また、同研究科の小宮剛教授には岩石試料提供および様々な御指導、御教示を頂いた。小河正基准教授、澤木佑介教授をはじめとする駒場地球科学セミナーのメンバーからは有益な議論および様々な御助力を頂いた。年代測定に際し、国立科学博物館の LAICPMS および電子顕微鏡を使用し、堤之恭博士に御指導、御助力頂いた。東京大学大気研究所佐野研究室の NanoSIMS を使用し佐野有司教授、高畑直人助教授に御指導、御助力頂いた。マサチューセッツ工科大学の Sam Bowring 教授、Kaori Tsukui 博士に分析をして頂いた。化石の処理および観察に際し、東京工業大学地球生命研究所のオスミウムコーターおよび電子顕微鏡を使用し、石川晃准教授に御指導、御助力頂いた。化石の分析に際し、東北大学博物館の佐々木理教授、Spring-8 の上杉健太郎博士に御指導、御助力頂いた。東京工業大学の佐藤友彦博士には野外調査から分析に至るまで多くの御指導、御協力を頂いた。磯崎研究室のメンバーには日々の研究生生活を通し、貴重な意見、御協力を頂いた。とくに、長谷川遼氏、沢田輝博士には野外調査に御協力頂いた。中国西北大学の舒徳干教授、張興亮教授、劉偉博士、長安大学の李勇教授には中国の野外調査に際し便宜を図って頂き、様々な御助力、御指導を頂いた。モンゴルの Uyanga Bold 博士、ハーバード大学の Francis A. McDonald 教授をはじめとする方々にはモンゴルでの野外調査に際し便宜を図って頂き、様々な御助力、御指導を頂いた。最後に父・河野雅昭、母・河野実季江をはじめ、家族には長い学生生活全般を支えて頂いた。以上の方々と研究生生活を通じてお世話になったすべての方々に心より感謝申し上げます。

引用文献

- Amothor, J. E., Grotzinger, J. P., Schröder, S., Bowring, S. A., Ramezani, J., Martin, M.W., Matter, A., 2003, Extinction of *Cloudina* and *Namacalathus* at the Precambrian-Cambrian boundary in Oman. *Geology*, 31(5), 431-434.
- Babcock, L. E., Robison, R. A., Rees, M. N., Peng, S. C., Saltzman, M. R., 2007, The Global boundary Stratotype Section and Point (GSSP) of the Drumian Stage (Cambrian) in Drum Mountains, Utah, USA. *Episodes*, 30, 85-95.
- Betts, M. J., Paterson, J. R., Jago, J. B., Jasquet, S. M., Skovsted, C. B., Topper, T. P., Brock, G. A., 2016, A new lower Cambrian shelly fossil biostratigraphy for South Australia. *Gondwana Research*, 36, 176–208.
- Betts, M. J., Paterson, J. R., Jasquet, S. M., Andrew, A. S., Hall, P. A., Jago, J. B., Jagodzinski, E. A., Preiss, W. V. Crowley, J. L., Brougham, T., Mathewson, C. P., García-Bellido, D. C., Topper, T. P., Skovsted, C. B., Brock, G. A., 2018, Early Cambrian chronostratigraphy and geochronology of South Australia. *Earth-Science Reviews*, 185, 498–543.
- Brasier, M. D., 1979, The Cambrian radiation event. in *The Origin of Major Invertebrate Groups* edited by House, M.R., Academic Press, 103–159.
- Brasier, M. D., 1992, Nutrient-enriched water and the early skeletal fossil record. *Journal of the Geologic Society, London*, 149, 621–629.
- Brasier, M. D., Magaritz, M., Corfield, R., Huilin, L., Xiche, W., Lin, O., Zhiwen, J., Hamdi, B., Tinggui, H., Fraser, A.G., 1990, The carbon- and oxygen-isotope record of the Precambrian–Cambrian boundary interval

- in China and Iran and their correlation. *Geological Magazine*, 127, 319–332.
- Brasier, M. D., Cowie, J., Taylor, M., 1994, Decision on the Precambrian–Cambrian boundary. *Episodes*, 17, 3–8.
- Brennan, S. T., Lowenstein, T. K., Horita, J., 2004, Seawater chemistry and the advent of biocalcification. *Geology*, 43, 473–476.
- Budd, G.E., Telford, M.J., 2009, The origin and evolution of arthropods. *Nature*, 457, 812–817.
- Burgess, S. D., Bowring, S., Shen, S.Z., 2014, High-precision timeline for Earth's most severe extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 3316–3321.
- Cai, Y., Hua, H., Schiffbauer, J.D., Sun, B., Yuan, X., 2014, Tube growth patterns and microbial mat-related lifestyles in the Ediacaran fossil *Cloudina*, Gaojiashan Lagerstätte, South China. *Gondwana Research*, 25, 1008-1018.
- Cai, Y., Hua, X., Xiao, S., Hua, H., Yuan, X., 2015, New material of the biomineralizing tubular fossil *Sinotubulites* from the late Ediacaran Dengying Formation, South China. *Precambrian Research*, 261, 12-24.
- Cai, Y., Hua, X., Xiao, S., Li, G., Hua, H., 2019, Diverse biomineralizing animals in the terminal Ediacaran Period herald the Cambrian explosion. *Geology*, 47(4), 380-384.
- Campbell, I.H. and Squire, R.J., 2010, The mountains that triggered the Late Neoproterozoic increase in oxygen: The second Great Oxidation Event. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 4187–4206.

- Canfield, D. E., Poulton, S. W., Narbonne, G. M., 2007, Late-Neoproterozoic deep-ocean oxygenation and the rise of animal life. *Science*, 315, 92–95.
- Caron, J. B., Gaines, R., Aria, C., Mangano, G., Streng, M., 2013, A new phyllopod bed-like assemblage from the Burgess Shale of the Canadian Rockies. *Nature Communications*, 5, 1–6.
- Chen, C., and Feng, Q., 2019, Carbonate carbon isotope chemostratigraphy and U-Pb zircon geochronology of the Liuchapo Formation in South China: Constraints on the Ediacaran-Cambrian boundary in deep-water sequences. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 535, 109361.
- Chen, D. Z., Wang, J. G., Qing, H. R., Yan, D. T., Li, R. W., 2009. Hydrothermal activities in the Early Cambrian, South China: petrological, geochronological and stable isotopic constraints. *Chemical Geology*, 258, 168–181.
- Chen, D., Zhou, X., Fu, Y., Wang, J., Yan, D., 2015, New U-Pb zircon ages of the Ediacaran-Cambrian boundary strata in South China. *Terra Nova*, 27(1), 62-68.
- Chen, X., Ling, H. F., Vance, D., Shields-Zhou, G.A., Zhu, M., Poulton, S.W., Och, L.M., Jiang, S.Y., li, D., Cremonese, L. and Archer, C., 2015, Rise to modern levels of ocean oxygenation coincided with the Cambrian radiation of animals. *Nature Communications*, 6, 1–7.
- Chen, Z., Bengtson, S., Zhou, C. M., Hua, H., Yue, Z., 2008, Tube structure and original composition of *Sinotubulites*: shelly fossils from the late Neoproterozoic in southern Shaanxi, China. *Lethaia*, 41, 37-45.

- Cohen, K. M., Finney, S. C., Gibbard, P. L., Fan, J. X., 2013, The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, 36, 199–204. <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2020-01.pdf> (updated in 2020) [Cited 2020/04/20].
- Compston, W., Zhang, Z., Cooper, J.A., Ma, G. and Jenkins, R.J.F., 2008, Further SHRIMP geochronology on the early Cambrian of South China. *American Journal of Science*, 308, 399–420.
- Cortijo, I., Mus, M. M., Jensen, S., Palacios, T., 2010. A new species of *Cloudina* from the terminal Ediacaran of Spain. *Precambrian Research* 176, 1–10.
- Conway Morris, S., Peel, J. S., Higgins, A. K., Soper, N. J. and Davis, N. C., 1987, A Burgess Shale-like fauna from the Lower Cambrian of Greenland. *Nature*, 326, 181–183.
- Cremonese, L., Shields-Zhou, G., Syrucek, U., Ling, H. F., Och, L., Chen, X. , Li, D., 2013, Marine biogeochemical cycling during the early Cambrian constrained by a nitrogen and organic carbon isotope study of the Xiaotan section, South China. *Precambrian Research*, 225, 148–165.
- Darroch, S. A. F, Sperling, E. A, Boag, T. H, Racicot, R. A, Mason, S. J, Morgan, A. S, Tweedt, S., Myrow, P., Johnston, D. T, Erwin, D. H, Laflamme, M., 2015, Biotic replacement and mass extinction of the Ediacara biota. *Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences*, 282, 20151003.
- Demidenko, Y. E., Zhegallo, E. A., Parkhaev, P. Y., Shuvalova, Y. V., 2013, Age of phosphorites from the Khubsugul basin (Mongolia). *Doklady Earth Sciences*, 389A (3), 317–321.

- Dong, B., Long, X., Li, J., Yang, X., Zhao, B., Luo, J., 2019, Mo isotopic variations of a Cambrian sedimentary profile in the Huangling area, South China: Evidence for redox environment corresponding to the Cambrian Explosion. *Gondwana Research*, 69, 45–55.
- Dorjnamjaa, D., and Altanshagai, G., 2015, Concerning the original viewpoint of biogeologic accumulation of the old bedded phosphorites in the Khubsugul and Zavkhan basins of Mongolia. *Open Journal of Geology*, 5, 666-675.
- Dzik, J., 2003, Early Cambrian lobopodian sclerites and associated fossils from Kazakhstan. *Palaeontology*, 46, (1), 93-112.
- Eggins, S. M., Kinsley, L. P. J., and Shelley, J. M. G., 1998, Deposition and element fractionation orifices of occurring during atmospheric pressure sampling for analysis by ICP-MS. *Applied Surface Science*, 129, 278-286.
- Elicki, O., 1994, Lower Cambrian carbonates from eastern Germany: Palaeontology, stratigraphy and palaeogeography, *N.Jb.Geol. Paläont. Abh.*, 191(1), 69-93.
- Erwin, D. H., 2009, Early origin of the bilaterian developmental toolkit. *Philosophy Transactions of the Royal Society London B*, 364, 2253–2261.
- Erwin, D.H., Laflamme, M., Tweedt, S.M., Sperling, E.A., Pisani, D., Peterson, K.J., 2011, The Cambrian conundrum: early divergence and later ecological success in the early history of animals. *Science*, 334, 1901–1907.
- Erwin, D.H. and Valentine, J.W., 2013, *The Cambrian Explosion: The Construction of Animal Diversity*. Roberts and Company Publishers, 406p.
- Fan, C. and Zang, Y., 1994, The structure and tectonics of western Yunnan. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9, 355–361.

- Fan, P.F., 1978, Outline of the tectonic evolution of southwestern China. *Tectonophysics*, 45, 261–267.
- Fu, D., Tong, G., Dai, T., Liu, W., Yang, Y., Ahang, Y., Cui, L., Li, L., Yun, H., Wu, Y., Sun, A., Liu, C., Pei, W., Gaines, R.R. and Zhang, X. (2019): The Qingjiang biota—A Burgess Shale-type fossil Lagerstätte from the early Cambrian of South China. *Science*, 363, 1338–1342.
- Gabbott, S.J., Siveter, D.J., Aldridge, R.J., Theron, J.N., 2003, The earliest myodocopes: ostracodes from the late Ordovician Soom Shale Lagerstätte of South Africa, *Lethaia*, 36, 151 – 160.
- Gehling, J.G., 1991, The case for the Ediacaran fossil roots to the Metazoan Tree. *Memories Geological Society of India*, 20, 181-223.
- Gehling, J. G., Jensen, S., Droser, M. L., Myrow, P. M. and Narbonne, G. M., 2001, Burrowing below the basal Cambrian GSSP, Fortune Head, Newfoundland. *Geological Magazine*, 138, 213–218.
- Germs, J. G. B., 1972. New shelly fossils from the Nama Group, South West Africa. *American Journal of Science*, 272, 752–761.
- Gould, S. J., 1989, *Wonderful Life: The Burgess Shale and Nature of History*. W.W. Norton, 352p.
- Grant, S. W. F., 1990. Shell structure and distribution of *Cloudina*, a potential index fossil for the terminal Proterozoic. *American Journal of Science*, 290-A, 261–294.
- Gravestock, D. I., Alexander, E. M., Demidenko, Yu. E., Esakova, N. V., Holmer, L. E., Jago, J. B., Lin, T., Melnikova, L. M., Parkhaev, P. Yu., Rozanov, A. Yu., Ushatinskaya, G. T., Zang, W., Zhegallo, E. A., Zhuravlev, A. Yu., 2001, The Cambrian biostratigraphy of the Stansbury

- Basin, South Australia. Transactions of the Palaeontological Institute
282. Moscow: IAPC Nauka/Interperiodica, 344 pp.
- Grotzinger, J. P., Bowring, S. A., Saylor, B. Z. and Kaufman, A.J., 1995,
Biostratigraphic and geochronologic constraints on early animal
evolution. *Science*, 270, 598–604.
- Han, J., Cai, Y., Schiffbauer, J.D., Hua, H., Wang, X., Yang, X., Uesugi, K.,
Komiya, T., and Sun, J., 2017, A *Cloudina*-like fossil with evidence of
asexual reproduction from the earliest Cambrian, South China:
Geological Magazine, 154, 1294–1305
- He, T., Zhu, M., Mills, B. J. W., Wynn, P. M., Zhuravlev, A. Y., Tostevin, R.,
Pogge von Strandmann, P. A. E., Yang, A., Polton, S. W., Shields, G. A.,
2019, Possible links between extreme oxygen perturbations and the
Cambrian radiation of animals. *Nature Geoscience*, 12, 468–474.
- 日達宇彦, 2011, 南中国雲南省王家湾地域における下部カンブリア 系の岩相層
序・生層序・同位体層序：リン酸塩濃集と SSF の多様化パターン. 東京大学大
学院総合文化研究科修士論文, 130p. [Hitachi, T., 2011, *Lower Cambrian
Lithostratigraphy, Biostratigraphy and Isotope Stratigraphy in the
Wangjiawan Area, Yunnan, South China: Concentration of Phosphate
and Diversification Pattern of SSF*. Master Thesis, Department of Earth
Science and Astronomy, University of Tokyo, 130p. (in Japanese with
English abstract)]
- Hofmann, H. J., and Mountjoy, E. W., 2001, *Namacalathus-Cloudina* assemblage
in Neoproterozoic Miette Group (Byng Formation), British Columbia:
Canada's oldest shelly fossils. *Geology*, 29(12), 1091-1094.

- Hou, X.G. and Bergström, J., 1997, Arthropods of the Lower Cambrian Chengjiang fauna, southwest China. *Fossils Strata*, 45, 1–116.
- Hou, X.G., Bergström, J. and Ahlberg, P. (1995): *Anomalocaris* and other large animals in the Lower Cambrian Chengjiang fauna of southwest China. *GFF*, 117, 163–183.
- Hou, X. G., Aldridge, R. J., Siveter, D. J., Siveter, D. J., Feng, X. H., 2002, New evidence on the anatomy and phylogeny of the earliest vertebrates. *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, 269, 1865–1869.
- Hou, X. G., Bergström, J., Xu, G. H., 2004, The lower Cambrian crustacean *Pectocaris* from the Chengjiang biota, Yunnan, China. *Journal of Paleontology*, 78, 700–708.
- Hu, S., 2005, Taphonomy and palaeoecology of the early Cambrian Chengjiang Biota from eastern Yunnan, China. *Berliner Palaobiologische Abhandlungen*, 7, 1–197.
- Hua, H., Chen, Z., Yuan, X., Zhang, L., Xiao, S., 2005. Skeletogenesis and asexual reproduction in the earliest biomineralizing animal *Cloudina*. *Geology*, 33, 277–280.
- Ishikawa, T., Ueno, Y., Komiya, T., Sawaki, Y., Han, J., Shu, D., Li, y., Maruyama, S., Yoshida, N., 2008, Carbon isotope chempstratigraphy of a Precambrian/Cambrian boundary section in the Three Gorges area, South China: Prominent global-scale isotope excursions just before the Cambrian Explosion. *Gondwana Research*, 14, 193-208.
- Jensen, S., Mens, K., 2001, Trace fossils *Didymaulichnus* cf. *tirasensis* and *Monomorphichnus* isp. from the Estonian Lower Cambrian, with a

- discussion on the early Cambrian ichnocoenoses of Baltica. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences (Geology)*, 50, 2, 75-85.
- Jiang, G., Wang, X., Shi, X., Xiao, S., Zhang, S., Dong, J., 2012, The origin of decoupled carbonate and organic carbon isotope signatures in the early Cambrian (ca. 542–520 Ma) Yangtze platform. *Earth and Planetary Science Letters*, 317, 96–110.
- Jiang, Z. and Chen, A., 2008, *The Basic Geology and Investigation Guidebook of Chengjiang Fauna National Geopark*. People's Publishing House, 138p. (in Chinese with English summary)
- Jin, Y.G., Wang, Y., Wang, W., Shang, Q.H., Cao, C.Q., Erwin, D.H., 2000, Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic boundary in South China. *Science*, 289, 432-436.
- Khomentovsky, V. V., 1986, The Vendian System of Siberia and a standard stratigraphic scale. *Geological Magazine*, 123, 333–348.
- Khomentovsky, V. V. and Karlove, G. A., 1992, The Precambrian–Cambrian and principles of its justification in Siberia. *Russian Geology and Geophysics* (Translation of *Geologiya I Geofizika*), 33, 1–18.
- Khomentovsky, V. V. and Karlova, G. A., 1993, Biostratigraphy of the Vendian–Cambrian beds and the lower Cambrian boundary in Siberia. *Geological Magazine*, 130, 29–45.
- Knauth, L. P., 2005, Temperature and salinity history of the Precambrian ocean: implications for the course of microbial evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 219, 53–69.
- Knoll, A.H., Carroll, S.B., 1999, Early animal evolution: emerging views from comparative biology and geology. *Science*, 284, 2129-2137.

- Laflamme, M., Darroch, S. A. F., Tweedt, S. M., Peterson, K. J., Erwin, D. H., 2013, The end of the Ediacara biota: extinction, biotic replacement, or Cheshire cat? *Gondwana Research*, 23, 558–73.
- Landing, E., 1994, Precambrian–Cambrian boundary ratified and a new perspective of Cambrian time. *Geology*, 22, 179–82.
- Landing, E. and Kouchinsky, A., 2016, Correlation of the Cambrian Evolutionary Radiation: Geochronology, evolutionary stasis of earliest Cambrian (Terreneuvian) small shelly fossil (SSF) taxa, and chronostratigraphic significance. *Geological Magazine*, 153, 750–756.
- Landaing, E., Peng, S.C., Babcock, L.E., Geyer, G., Moczydlowski, M., 2007, Global standard names for the lowermost Cambrian Series and Stage. *Episodes*, 30, 287-299.
- Li, D., Ling, H., Jiang, S., Pan, J., Chen, Y., Cai, Y., Feng, H., 2009, New carbon isotope stratigraphy of the Ediacaran–Cambrian boundary interval from SW China: Implications for global correlation. *Geological Magazine*, 146, 465–484.
- Li, D., Ling, H-F., Shields-Zhou, G. A., Chen, X., Cremonese, L., Och, L., Thirwall, M. and Manning, C.J., 2013, Carbon and strontium isotope evolution of seawater across the Ediacaran–Cambrian transition: Evidence from the Xiaotan section, NE Yunnan, South China. *Precambrian Research*, 225, 128–147.
- Li, G. and Xiao, S., 2004, *Tannuolina* and *Micrina* (Tannuolinidae) from the lower Cambrian of eastern Yunnan, South China, and their scleritome reconstruction. *Journal of Paleontology*, 78, 900–913.

- Li, G., 2014, Occurrence of the enigmatic bivalve fossil *Apistoconcha* in the lower Cambrian of southeastern Shaanxi, North China platform. *Journal of Paleontology*, 88(2), 359–366.
- Li, Z. X., Bogdanova, S. V., Collins, A. S., Davidson, A., De Waele, B., Ernst, R. E., Fitzsimons, I. C. W., Fuck, R. A., Gladkochub, D. P., Jacobs, J., Karlstrom, K. E., Lu, S., Natapov, L. M., Pease, V., Pisarevsky, S. A., Thrane, K., Vernikovsky, V., 2008, Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precambrian Research*, 160, 179–210.
- Lin, J.P., Gon, S.M., Gehling, J.G., Babcock, L.E., Zhao, Y.L., Zhang, X. L., Hu, S. X., Yuan, J.L., Yu, M.Y., Peng, J., 2006, A *Parvancorina*-like arthropod from the Cambrian of South China. *Historical Biology*, 18, 33–45.
- Linnemann, U., Ovtcharova, M., Schaltegger, U., Gärtner, A., Hautmann, M., Geyer, G., Vickers-Rich, P., Rich, T., Plessen, B., Hofmann, M., Zieger, J., Krause, R., Kriesfeld, L., Smith, J., 2019, New high-resolution age data from the Ediacaran-Cambrian boundary indicate rapid, ecologically driven onset of the Cambrian explosion. *Terra Nova*, 31, 49–58.
- Liu, Z. and Zhou, M., 2017, Meishucun phosphorite succession (SW China) records redox change of the early Cambrian ocean. *Geological Society of America*, 129, 1554–1567.
- Luo, H., Jiang, Z., Wu, X., Song, X., Ouyang, L., 1982, *The Sinian–Cambrian Boundary in Eastern Yunnan, China*. People’s Republic of China. 265p. (in Chinese with English summary)
- Luo, H. L., Jiang, Z., Wu, X., Song, X., Ouyang, L., Xing, Y., Liu, G., Zhang, S. and Tao, Y., 1984, *Sinian–Cambrian Boundary Stratotype Section at*

- Meishucun, Jinning, China*. People's Publishing House, 154p. (in Chinese and English)
- Luo, H., Wu, X., Ou, L., 1991, Facies changes and transverse correlation of the Sinian–Cambrian boundary strata in eastern Yunnan. *Sedimentary facies and Palaeogeography*, 4, 27–35.
- Mackenzie, L.A., Hofmann, M.H., Junyan, C., Hinman, N.W., 2015, Stratigraphic controls of soft-bodied fossil occurrences in the Cambrian Chengjiang Biota Lagerstätte, Maotianshan Shale, Yunnan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 420, 96–115.
- Marshall, C. R., 2006, Explaining the Cambrian “explosion” of animals. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34, 355–384.
- Matthews, S. C. and Missarzhevsky, V. V., 1975, Small shelly fossils of late Precambrian and early Cambrian age: A review of recent work. *Journal of the Geological Society of London*, 131, 289–304.
- Moore, J. L., Porter, S. M., Li, G., 2014, Two Unusual small shelly fossils from the lower Cambrian of southeastern Shaanxi province, China. *Journal of Paleontology*, 88(2), 348–358.
- Ministry of Housing and Urban–Rural Development of the People’s Republic of China, 2011, *Chengjiang Fossil Site*. Ministry of Housing and Urban–Rural Development of the People’s Republic of China, 143p.
- Misra, S. B., 1969, Late Precambrian(?) fossils from southern Newfoundland. *Geological Society of America Bulletin*, 80, 2133–2140.
- Missarzhevsky, V. V., 1989, *Drevneyshie skeletnye okamenelosti i stratigrafiya pogranychkh tolshch dokembriya i kembriya (Oldest Skeletal Fossils and the Stratigraphy of Precambrian/Cambrian*

- Boundary Beds*). Akademiya Nauk SSR, Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni Geologicheskii Institut, Trudy, 443, 238p.
- Muscente, A. D., Boag, T. H., Bykova, N., Schiffbauer, J. D. 2018, Environmental disturbance, resource availability, and biologic turnover at the dawn of animal life. *Earth-Science Reviews*, 177, 248–64.
- Okada, Y., Sawaki, Y., Komiya, T., Hirata, T., Takahata, N., Sano, Y., Han, J. and Maruyama, S., 2014, New chronological constraints for Cryogenian to Cambrian rocks in the Three Gorges, Weng'an and Chengjiang areas, South China. *Gondwana Research*, 25, 1027–1044.
- Paces, J. B., and Miller, J. D., 1993, Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, northeastern Minnesota: geochronological insights to physical, petrogenetic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga midcontinent rift system. *Journal of Geophysical Research*, 98, B8, 13997-14013.
- Parkhaev, P. Y. and Demidenko, Y. E., 2010, Zooproblematica and Mollusca from lower Cambrian Meishucun section (Yunnan, China) and taxonomy and systematics of the Cambrian small shelly fossils of China. *Paleontologica Journal*, 44, 883–1161.
- Peng, S.C., Babcock, L.E., Ahlberg, P., 2020. Chapter 19 – The Cambrian Period. In: Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D., Ogg, G.M. (Eds.), *The Geologic Time Scale 2020*. Elsevier, Amsterdam, pp. 565–629.
- Peterson, K. J., Cotton, J. A., Gehling, J. G., Pisani, D., 2008, The Ediacaran emergence of bilaterians: Congruence between the genetic and the geological fossil records. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 363, 1435–1443.

- Pruss, S. B., Dwyer, C. H., Smith, E. F., Macdonald, F. A., Torsca, N. J., 2019, Phosphatized early Cambrian archaeocyaths and small shelly fossils (SSFs) of southwestern Mongolia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 513, 166–177.
- Qian, Y., 1978, The Early Cambrian hyolithids in central and southwest China and their stratigraphical significance. *Memoirs of Nanjing Institute of Geology and Palaeontology. Academia Sinica*, 11, 1–50.
- Qian, Y. and Bengtson, S., 1989, Palaeontology and biostratigraphy of the Early Cambrian Meishucunian stage in Yunnan Province, South China. *Fossils and Strata*, 24, 1–156.
- Qian, Y., Li, G. X., Zhu, M. Y., 2001, The Meishucun stage and its small shelly fossil sequence in China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 40, 54–62.
- Qian, Y., Zhu, M., Li, G., Jiang, Z., Van Iten, H., 2002, A supplemental Precambrian–Cambrian boundary global stratotype section in SW China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 41, 19–26.
- Rota-Stabelli O, Daley A.C, Pisani D., 2013, Molecular timetrees reveal a Cambrian colonization of land and a new scenario for ecdysozoan evolution. *Current Biology*, 23, 392–398.
- Roazanov, A. Y. and Zhuravlev, A. Y., 1992, *The Lower Cambrian Fossil Record of the Soviet Union, in Origin and Early Evolution of the Metazoa*. Plenum Press, 205–282.
- Roazanov, A. Y., Missarzhevsky, V. V., Volkova, N. A., Voronova, L. G., Krylov, I. N., Keller, B. M., Korolyuk, I. K., Lendzion, K., Michniak, R., Pykhnova, N. G., Sidorov, A.D., 1969, *The Tommotian Stage and the Cambrian*

Lower Boundary Problem. Moscow, Nauka, 359p. (in English, 1981, New Delhi: India Amerind Publishing Co.)

Sato, T., Isozaki, Y., Hitachi, T., Shu, D., 2014, A unique condition for early diversification of small shelly fossils in the lowermost Cambrian in Chengjiang, South China: Enrichment of phosphorus in restricted embayments. *Gondwana Research*, 25, 1139–1152.

Sawaki, Y., Nishizawa, M., Suo, T., Komiya, T., Hirata, T., Takahata, N., Sano, Y., Han, J., Kon, Y., Maruyama, S., 2008, Internal structures and U–Pb ages of zircons from a tuff layer in the Meishucunian formation, Yunnan Province, South China. *Gondwana Research*, 14, 148–158.

Schröder, S., Grotzinger, J. P., 2007, Evidence for anoxia at the Ediacaran–Cambrian boundary: the record of redox-sensitive trace elements and rare earth elements in Oman. *Journal of Geologic Society of London*, 164, 175–187.

Shen, S. Z., Crowley, J. L., Wang, Y., Bowring, S. A., Erwin, D. H., Sadler, P. M., Cao, C. Q., Rothman, D. H., Henderson, C. M., Ramezani, J., Zhang, H., Shen, Y., Wang, X. D., Wang, W., Mu, L., Li, W. Z., Tang, Y. G., Liu, X. L., Liu, L. J., Zeng, Y., Jiang, Y. F., Jin, Y. G., 2011, Calibrating the end-Permian mass extinction. *Science*, 334, 1367–1372

Shen, Y. A. and Schildowski, M., 2000, New C isotope stratigraphy from southwest China: Implications for the placement of the Precambrian–Cambrian boundary on the Yangtze Platform and global correlations. *Geology*, 28, 623–626.

- Shields, G., Stille, P., 2001, Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: an isotopic and REE study of Cambrian phosphorite. *Chemical Geology*, 175, 29-48.
- Smith, E. F, Nelson, L. L, Strange, M. A, Eyster, A. E, Rowland, S. M, Schrag, D.P, Macdonald, F. A., 2016, The end of the Ediacaran: two new exceptionally preserved body fossil assemblages from Mount Dunfee, Nevada, USA. *Geology*, 44, 911–4.
- Smith, E. F, Nelson, L. L, Tweedt, S. M, Zeng, H., Workman, J. B., 2017, A cosmopolitan late Ediacaran biotic assemblage: new fossils from Nevada and Namibia support a global biostratigraphic link. *Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences*, 284, 20170934.
- Shu, D. G., Luo, H. L., Conway Morris, S., Zhang, X. L., Hu, S. X., Chen, L. Han, J., Zhu, M., Li, Y., Chen, L. Z., 1999, Lower Cambrian vertebrates from South China. *Nature*, 402, 42–46.
- Shu, D. G., Isozaki, Y., Zhang, X.L., Han, J., Maruyama, S., 2014, Birth and early evolution of metazoans. *Gondwana Research*, 25, 884–895.
- Stacey, J. S., and Kramers, J. D., 1975, Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science letters*, 26, 207-221.
- Steiner, M., Li, G., Qian, Y., Zhu, M., Erdtmann, B., 2007, Neoproterozoic to early Cambrian small shelly fossil assemblages and a revised biostratigraphic correlation of the Yangtze Platform (China). *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254, 67–99.

- Streng, M., and Skovsted, C., 2006, A new mobergellan (small shelly fossils) from the early Middle Cambrian of Morocco and its significance. *Paläontologische Zeitschrift*, 80(3), 209-220.
- Sun, X., Heubeck, C., Steiner, M., Yang, B., 2020, Environmental setting of the Cambrian Terreneuvian rocks from the southwestern Yangtze Platform, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 538, 1–17.
- Tarhan, L. G., Droser, M. L., Cole, D. B., Gehling, J. G., 2018, Ecological expansion and extinction in the late Ediacaran: weighing the evidence for environmental and biotic drivers. *Integrative and Comparative Biology*, 58(4), 688-702.
- Topper, T. P., Brock, G. A., Skovsted, C. B., Paterson, J. R., 2009, Shelly fossils from the lower Cambrian Pararaia bunyeroensis Zone, Flinders Ranges, South Australia. *Memoirs of the Association of Australasian Palaeontologists*, 37, 199-246.
- Torsvik, T. H. and Cocks, L. R. M., 2017, *Earth History and Palaeogeography*. Cambridge University Press, 317p.
- Tunheng, A. and Hirata, T., 2004, Development of signal smoothing device for precise elemental analysis using laser ablation-ICP-mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 19, 932-934.
- Walcott, C. D., 1911, Cambrian geology and paleontology II. Middle Cambrian Merostomata. *Smithsonian Miscellaneous Collections*, 57, 17–40.
- Wang, D., Struck, U., Ling, H. F., Guo, Q. J., Shields-Zhou, G.A., Zhu, M. Y., Yao, S. P., 2015, Marine redox variations and nitrogen cycle of the early Cambrian southern margin of the Yangtze Platform, South china:

- Evidence from nitrogen and organic carbon isotopes. *Precambrian Research*, 267, 209–226.
- Wang, W., Zhou, M., Chu, Z., Xu, J., Li, C., Luo, T., Guo, J., 2020, Constraints on the Ediacaran-Cambrian boundary on deep-water realm in South China: Evidence from zircon CA-ID-TIMS U-Pb ages from the topmost Liuchapo Formation. *Science China Earth Sciences*, 63(8), 1176-1187.
- Wang, X., Shi, X., Jiang, G., Zhang, W., 2012, New U-Pb age from the basal Niutitang Formation in South China: Implications for diachronous development and condensation of stratigraphic units across the Yangtze platform at the Ediacaran-Cambrian transition. *Journal of Asian Earth Sciences*, 48, 1-8.
- Williams, I. S., 1998, U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *Reviews in Economic Geology (Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*, edited by McKibben, M.A., Shanks, W.C.P., and Ridley, W.I.)
- Williams, M., Siveter, D.J., Salas, M.J., Vannier, J., Popov, L.E., GhobadiPour, M., 2008, The earliest ostracodes: the geological evidence. *Senckenbergiana lethaea*, 88, 11–21.
- Wei, W., Frei, R., Gilleaudeau, G. J., Li, D., Wei, G.T., Huang, F., Ling, H. F., 2020, Variations of redox conditions in the atmosphere and Yangtze Platform during the Ediacaran–Cambrian transition: Constraints from Cr isotopes and Ce anomalies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 543, 1–11.
- Wood, R., Curtis, A., Penny, A., Zhuravlev, A.Y., Cutis-Walcott, S., Lipinge, S., Bowyer, F., 2017, Flexible and responsive growth strategy of the

- Ediacaran skeletal Cloudina from the Nama Group, Namibia. *Geology*, 45(3), 259-262.
- Wu, Z. and Li, F., 2002, Chapter 7. Research of Palaeogeographic environment of the Chengjiang fauna. in *Early Cambrian Chengjiang Fauna in Eastern Yunnan, China* edited by Chen, L., Luo, H., Hu, S., Yin, J., Jiang, Z., Wu, Z., Li, F. and Chen, A, Yunnan Science and Technology Press, 114-154. (in Chinese with English introduction)
- Xiao, S., Laflamme, M., 2008, On the eve of animal radiation: phylogeny, ecology and evolution of the Ediacara biota. *Trends in Ecology and Evolution*, 24, 1, 31-40.
- Xing, L. Zhou, M., Qi, L., Huang, Z., 2015, Discussion on the PGE anomalies and source materials of K-bentonite (Bed 5) in the Lower Cambrian Meishucun section, Yunnan. *Chinese Journal of Geochemistry*, 34, 346–361.
- Yamaguchi, S., Endo, K., 2003, Molecular phylogeny of Ostracoda (Crustacea) inferred from 18S ribosomal DNA sequences: implication for its origin and diversification. *Marine Biology*, 143, 23 – 38.
- Yang, B., Steiner, M., Li, G., Keuoo, H., 2014, Terreneuvian small shelly faunas of East Yunnan (South China) and their biostratigraphic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 398, 28–58.
- Yang, B., Steiner, B., Zhu, M., Li, G., Liu, J., Liu, P., 2016, Transitional Ediacaran–Cambrian small skeletal fossil assemblages from South China and Kazakhstan: Implications for chronostratigraphy and metazoan evolution. *Precambrian Research*, 285, 202–215.

- Yang, C., Li, Z. H., Zhu, M., Condon, D., Chen, J., 2018, Geochronological constraint on the Cambrian Chengjiang biota, South China. *Journal of the Geological Society*, 175, 659-666.
- Yun, Y., Zhang, X. L., Li, L., Zhang M., Liu, W., 2016, Skeletal fossils and microfacies analysis of the lowermost Cambrian in the southwestern margin of the North China Platform. *Journal of Asian Earth Sciences*, 129, 54–66.
- Zhai, L., Wu, C., Ye, Y., Zhang, S., Wang, Y., 2018, Fluctuations in chemical weathering on the Yangtze Block during the Ediacaran-Cambrian transition: Implications for paleoclimatic conditions and the marine carbon cycle. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 490, 280-292.
- Zhang, W. and Hou, X., 1985, Preliminary notes on the occurrences of unusual trilobite *Naraoia* in Asia. *Acta Paleontologica Sinica*, 24, 591–595. (in Chinese with English summary)
- Zhang, X., Liu, W., Isozaki, Y. and Sato, T., 2017, Centimeter-wide worm-like fossils from the lowest Cambrian of South China. *Scientific Reports*, 7, 1–11.
- Zheng, Y. F. and Zhang, S. B., 2007, Formation and evolution of Precambrian continental crust in South China. *Chinese Science Bulletin*, 52, 1–12.
- Zhou, M. Z., Luo, T. Y., Liu, S. R., Qian, Z. K., Xing, L. C., 2013, SHRIMP zircon age for a K-bentonite in the top of the Laobao Formation at the Pingyin section, Guizhou, South China. *Science China Earth Sciences*, 56, 1677-1687.

- Zhu, M. and Li, X. H., 2017, Introduction: From snowball Earth to the Cambrian explosion—evidence from China. *Geological Magazine*, 154, 1187–1192.
- Zhu, M., Zhang, J., Steiner, M., Qian, Y., Jiang, Z., 2001, Early Cambrian stratigraphy of East Yunnan, southwestern China: A synthesis. *Acta Paleontologica Sinica*, 40, 4–39.
- Zhu, M., Zhang, J., Steiner, M., Yang, A., Li, G., Erdtmann, B. D., 2003, Sinian and early Cambrian stratigraphic frameworks from shallow- to deep-water facies of the Yangtze Platform: An integrated approach. *Progress in Natural Science*, 13, 951–960.
- Zhu, M., Babcock, L., Peng, S., 2006, Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: Integrating correlation techniques, palaeobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction. *Palaeoworld*, 15, 217–22.
- Zhu, M., Yang, A., Yuan, J., Li, G., Zhang, J., Zhao, F., Ahn, S. Y., Miao, L., 2019, Cambrian integrative stratigraphy and timescale of China. *Science China Earth Sciences*, 62, 25–60.
- Zhu, R. X., Li, X. H., Hou, X. G., Pan, Y. X., Wang, F., Deng, C. L., He, H. Y., 2009, SIMS U-Pb zircon age of a tuff layer in the Meishucun section, Yunnan, southwest China: Constraint on the age of the Precambrian-Cambrian boundary. *Science in China Series D: Earth Science*, 52(9), 1358-1392.
- Zhuravlev, A. Y. and Wood, R. A., 2018, The two phases of the Cambrian explosion. *Nature Scientific Reports*, 8, 1–11.