

南乌拉尔地区中—新元古代地层序列 及碳酸盐岩和碎屑岩发现臼齿构造的地质意义

高林志¹ 丁孝忠¹ 尹崇玉¹ 任留东¹ 李廷栋²

陈廷愚¹ 陈炳蔚¹ 李贵书² 陆松年³

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2 中国地质科学院, 北京 100037;
3. 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170)

提要:中—新元古代地层在南乌拉尔海槽中极为发育, 地层厚度巨大, 几个阶段的构造演化和沉积特征清晰可见。新太古代和下里菲是俄罗斯重要的大型层状铁矿和菱镁矿的宿主地层, 中里菲群(元古宙地层)地层厚度极大, 伴随了几次沉积旋回, 发育了从深海相到大陆缓坡的碳酸盐岩沉积; 随着新元古代末次冰期之后, 文德系发育了可全球对白的白海动物群(伊迪卡拉动物群)。笔者首次确认了南乌拉尔地区中—新元古代地层 3 套臼齿构造, 其中巴卡尔组(Bakal)碳酸盐岩臼齿构造与碎屑岩地震液化脉互层共生, 特别是大量臼齿构造也发育在大型叠层石中。从臼齿构造与碎屑岩液化脉互层的共生特征, 说明发育在碳酸盐岩中臼齿构造与地震机理的液化作用有关。该 3 套臼齿构造与中国华北地台中—新元古代地层中发现的臼齿构造(液化脉)时代大体接近。

关键词:南乌拉尔山; 中—新元古代地层; 臼齿构造; 地震液化脉

中图分类号: P588.24*5; P588.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2007)06-0962-12

本文是根据五国(中国、俄罗斯、哈萨克斯坦、蒙古、韩国)1:250 万亚洲中部及邻区地质编图项目合作交流计划, 应俄罗斯自然资源部全俄地质研究所(VSEGEI)邀请, 以李廷栋院士为团长的中国代表团一行 9 人, 于 2006 年 7 月 25 日—8 月 5 日赴俄罗斯南乌拉尔地区(South Urals)进行野外地质考察所获得的资料撰写而成。

俄罗斯南乌拉尔海槽中—新元古代地层极发育, 厚度达 4 万多米, 是里菲与文德地层出露的典型地区之一, 该区为俄罗斯晚前寒武纪里菲地层的标准剖面所在地(图 1)。沙茨基^[1]首次将发育在古老变质岩之上, 寒武系之下的全部岩组归并一个完整的超旋回, 并用来自乌拉尔—里菲山脉的“Riphean”命名了这段地层, 即包括了 Ai-Asha 不同岩组。在南乌拉尔地区里菲系总厚度为 12750~19500 m, 自下而上分 3 个群, 13 个组。乌拉尔地区里菲系发育多层火成岩, 从碱性—中性—酸性的完整裂谷型火山岩系列。而阿申(Asha 相当于文德系)厚 1200~2600 m, 发育了著名的白海动物群, 具有全球地层对比意义。南乌拉尔海槽中—新元古代地层极为

发育, 厚度巨大, 几个阶段的构造演化和沉积特征清晰可见。太古宇和下里菲是俄罗斯重要的大型层状磁铁矿(BIF)、赤铁矿和菱镁矿的宿主地层。

1 南乌拉尔地区的中—新元古代地层序列

俄罗斯地质年表中—新元古代地层由里菲和文德两部分组成(图 2)。下里菲 Ai 组由砾岩角度不整合在太古宙塔拉塔什(Taratash)杂岩之上。塔拉塔什杂岩, 由多种杂岩、斜长角闪岩、角闪辉石斜长片麻岩、紫苏混合岩、石榴子石黑云斜长片麻岩等组成, 总厚达 4800 m。拉达什(Radash)铁矿即位于塔拉塔什杂岩中。矿区有片麻岩、混合岩、辉石斜长结晶片岩、含铁石英岩(图 3-E)。其中基性岩比例较高, 可见变质科马提岩。

拉达什铁矿石品位一般>50%, 甚至可达 80%。高品位既与原岩沉积时富含铁有关, 也与变质过程中进一步重结晶的富矿化有关。矿区岩石经历了麻粒岩相变质作用和多期变质叠加的改造。其中麻粒岩相变质时期大于 24 亿年, 同变质花

收稿日期: 2007-05-24; 改回日期: 2007-10-13

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(1212010511607, 1212010511506)资助。

作者简介: 高林志, 男, 1955 年生, 研究员, 从事生物地层、层序地层、灾变事件地层研究; E-mail: gaolzh@cags.net.cn。

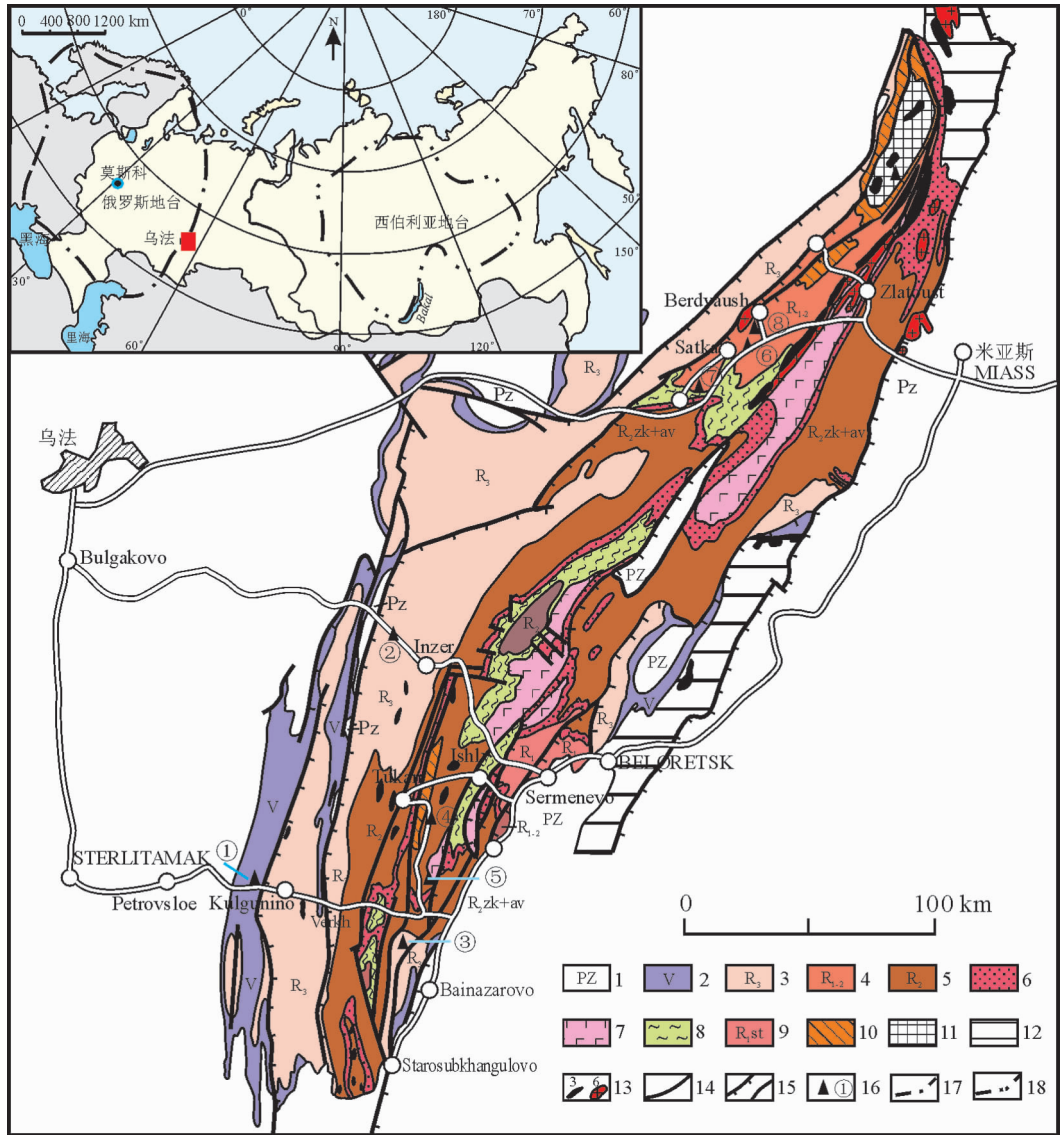


图 1 南乌拉尔山中—新元古代地层分布

1—古生界;2—文德系;3—上里菲;4—中下里菲;5—中里菲;6—Zyglga 组;7—Mashak 组;8—Bakal 和 Jushin 组;
9—Satkin 和 Suran 组;10—Ai 和 Bolsheiner 组;11—太古宙塔拉塔什杂岩;12—乌法—乌拉尔变质岩;
13—岩浆岩;14—地质界线;15—主要断裂;16—野外参观路线;17—俄罗斯地台;18—西伯利亚地台

Fig.1 Meso- and Neoproterozoic strata in the South Urals

1—Paleozoic;2—Vendian System;3—Upper Riphean;4—Mid-Lower Riphean;5—Middle Riphean;6—Zyglga Fm.;
7—Mashak Fm.;8—Bakal and Jushin Fms.;9—Satkin and Suran Fms.;10—Ai and Bolsheiner Fms.;
11—Achean Traratash Complex;12—Ufa-Ural metamorphic rocks;13—Magmatic rocks;14—Geological boundary;
15—Main fault;16—Field trip route;17—Russian platform;18—Siberian platform

岗岩的锆石 U-Pb 年龄(2344±29)Ma, 角闪岩相退变质发生于 21~17 亿年, Radashniy 矿区花岗岩锆石年龄(2044.4±7.8)Ma(图 3-E), 代表混合岩化年龄, 强烈的花岗岩化早于 17 亿年, 第三期绿帘角闪岩相变质 12~11 亿年, 而第四次绿片岩相退变质发生于 6~4 亿年。与中国相当类型的鞍山式铁矿相比, 乌拉尔地区的围岩基性程度和矿石品位均很高。

1.1 下里菲

又称布尔江群(Burzyan), 自下而上分为 3 个组。底部 Ai 组由砾岩、砂岩、页岩等碎屑岩及玄武岩组成, 厚 1700~2500 m; 中部为 Satka 组(图 4-E), 主要由碳酸盐岩夹碎屑岩组成, 含叠层石, 液化脉发育(图 4-A-D), 厚 2400~3000 m; 上部为巴卡尔组(Bakal) 由碳酸盐岩夹碎屑岩组成, 巴卡尔组上部

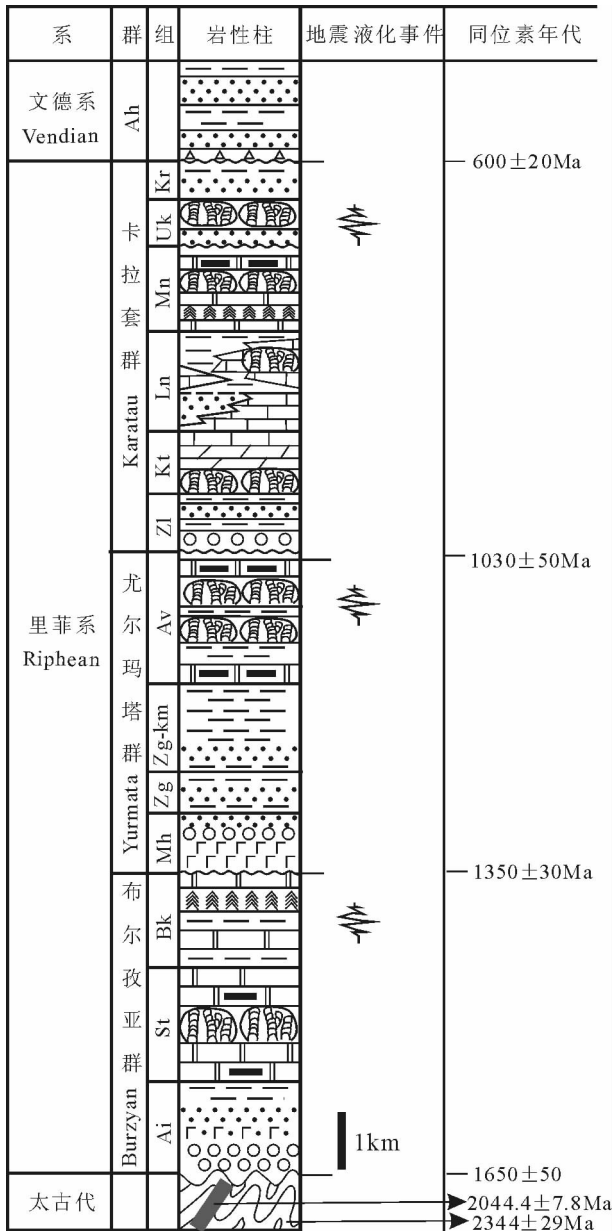


图 2 南乌拉尔山的中—新元古代综合地层柱

Fig.2 Meso- and Neoproterozoic stratigraphic column of the South Ural Mountains

(Malobakal 亚组)的碳酸盐岩夹铁矿层, 矿石主要为菱铁矿和进一步氧化而成的褐铁矿(图 5-E), 该亚组 Gaevsky 段之下的 Shuydin 段下部, 以炭质页岩和碳酸盐岩为主, 其中发育白齿构造(图 5-A-D), 并产出层状和透镜状菱铁矿, 巴卡尔组厚 1200~1400 m。

1.2 中里菲

又称尤尔玛塔群(Yurmata), 自下而上由 4 个组组成。最底部为 Mashak 组, 主要为一套巨厚砾岩、砂砾岩夹玄武岩、

流纹岩等, 砾石主要为火成岩, 厚度 2500~3100 m; 其上为 Zigalga 组, 由砂岩夹页岩组成, 厚 250~600 m; 再上部为 Zigazin-Komarov 组, 主要为砂岩、页岩等细碎屑岩, 上部夹碳酸盐岩, 厚 1000~1200 m; 最顶部为阿瓦孜亚组(Avzyan), 主要为一套碳酸盐岩夹细砂岩、页岩、泥岩等, 含叠层石, 在碳酸盐岩地层中发育白齿构造(图 3-C-D), 该组厚 1500~2000 m。

1.3 上里菲

又称卡拉套群(Karatau), 自下而上划分为 6 个组。最底部为 Zilmerdak 组, 底部由快速堆积的长石石英砂砾岩、砂岩组成, 向上变为较纯的石英岩, 厚度 1400~2400 m; 其上为 Katav 组, 由紫色、灰色碳酸盐岩组成, 含特征的紫色叠层石礁, 厚 200~400 m; 再上为 Inzer 组, 主要为灰岩、泥灰岩及页岩, 厚 400~700 m; 再上为 Minyar 组, 主要为一套含叠层石礁、燧石条带碳酸盐岩, 厚 500~600 m; 再上是 UK 组, 其下为灰色碳酸盐岩, 向上为一套含叠层石礁的碳酸盐岩, 白齿构造发育(图 6-D-E), 厚 180~200 m; 最顶部为 Krivoluk 组, 分布局限, 主要为一套砂岩及辉绿岩侵入体, 厚度 >200 m。

1.4 文德系

在乌拉尔地区曾称阿申(Asha), 自下而上由 5 个组构成, 即 Bakeev 组, Uryuk 组(图 6-A-B), Basa 组(图 6-C), Kukkarauk 组和 Zigan 组。南乌拉尔地区上里菲卡拉套群的 Krivoluk 组碎屑岩沉积与文德系 Uryuk 组底部砾岩平行不整合接触(图 6-A-B), 中间缺失文德系下部的 Bakeev 组(杂砾岩)。

2 白齿构造(地震液化脉)

在乌拉尔地区中—新元古代地层中(自下而上)发育了 3 套碳酸盐岩微亮晶脉沉积(白齿构造), 或称谓地震液化脉(图 8~9, 液化脉薄片特征)。俄罗斯地质学家称之为“蠕虫构造”。南乌拉尔地区地震液化脉(白齿构造)明显与元古宙地层成矿带和较大的构造或地层转换面有关。与成矿带相关的有下里菲与赤铁矿(相当于中国华北地台中元古界宣龙式铁矿)伴生的巴卡尔组(Bakal); 中里菲顶部阿瓦孜亚组(Avzyan), 以及上里菲卡拉套群顶部尤卡组(UK), 其中下里菲巴卡尔组碳酸盐岩微亮晶脉与碎屑岩液化脉沉积共生, 对理解白齿构造的成因, 有着重要的意义。

2.1 白齿构造(molar tooth structures)——微亮晶脉碳酸盐岩(micrispar)

白齿构造是前寒武纪地层中广泛发育的一种微亮晶灰岩, 其成因至今是地质学家的一个谜。Bauerman(1885)最早在文献中描述过碳酸盐岩中的奇特沉积现象^[4]。Smith^[5]和 O'Connor^[6]试图探索其成因, 并从此激活全球范围白齿构造的研究(图 7)。这种微亮晶脉被区域地质学家赋予不同的描述性名称, 如异常方解石脉、蠕虫状灰岩、网状方解石脉, 作为标志层在地层对比中广泛使用^[5-7]。

近年来关于碳酸盐岩微亮晶脉的成因, 引起国内外众多地质学家广泛的争论, 已成为国内外研究的热点。国内外地质



图 3 乌拉尔太古宙杂岩及文德系杂砾岩

A—文德系 Kukkarauk 组杂砾岩(冰碛岩);B—Kukkarauk 冰碛砾石;C—卡拉套 Avzyan 组碳酸盐岩与粉砂岩互层;
D—Avzyan 组碳酸盐岩中白齿构造;E—太古宙塔拉塔什杂岩及变质花岗岩

Fig.3 Archean Talatash complex and Vendian diamictite

A-Diamictite (tillite) of the Vendian Kukkarauk Fm.;B-Pebbles in the Kukkarauk Fm.;C- Alternating beds of carbonate rocks and siltstone in the Avzyan Fm.;D- Molar-tooth structure in carbonate rocks of the Avzyan Fm.;

E-Archean Talatash complex and metamorphosed granite

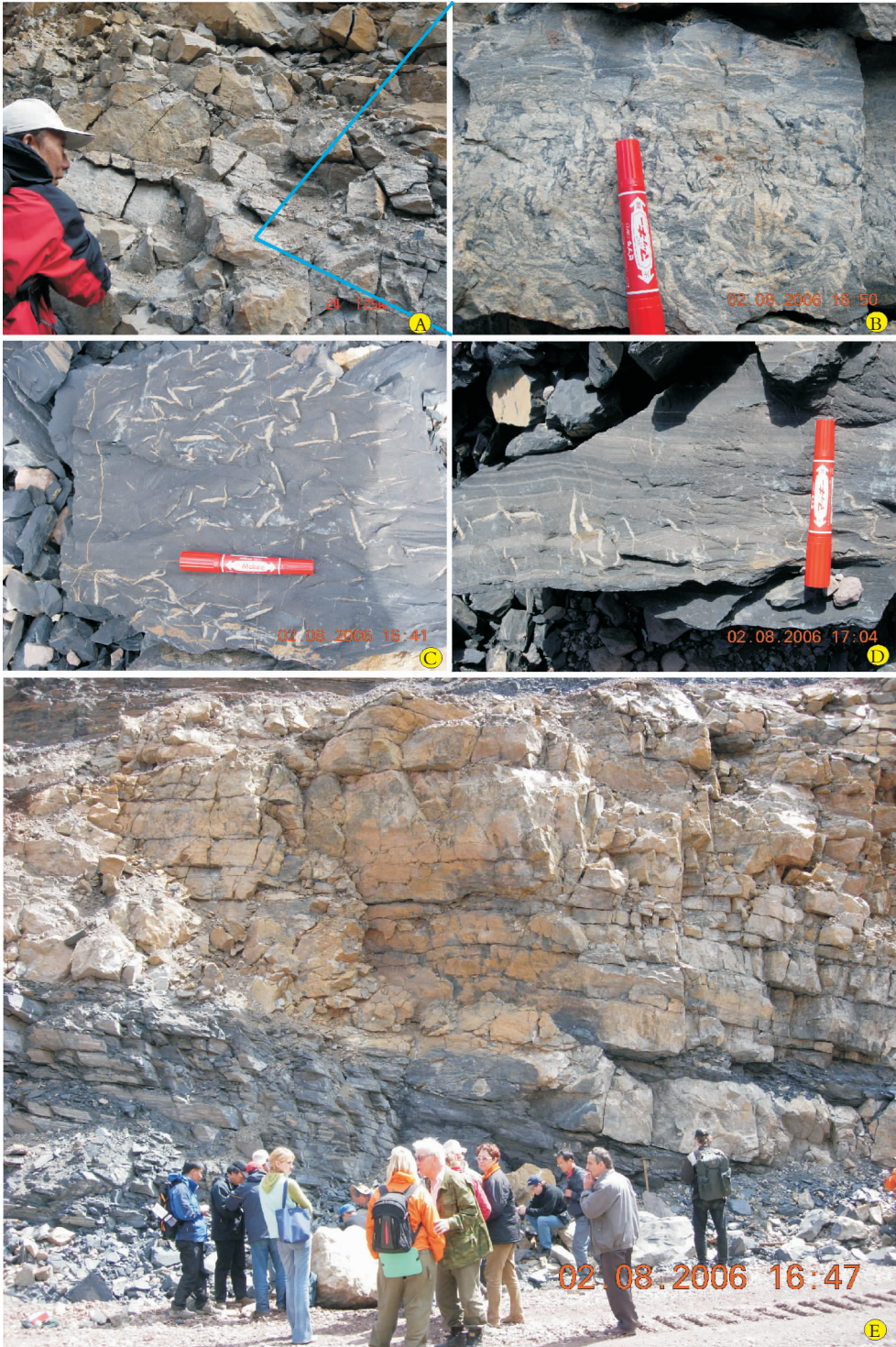


图 4 里非 Sataka 组碳酸盐岩及白齿构造

A—里非布尔江群 Sataka 组碳酸盐岩; B—Sataka 组液化脉(白齿构造); C—D—Sataka 组碎屑岩液化脉;
E—下里非布尔江群 Sataka 组铁矿层

Fig.4 Carbonate sequence and molar tooth structures in the Riphean Fm

A—Carbonate rocks in the Riphean Sataka Fm.; B—Liquefied vein (molar tooth structure) in the Sataka Fm.;
C—D—Clastic liquefied vein in the Fm.; E—Iron ore bed in the Lower Riphean Sataka Fm

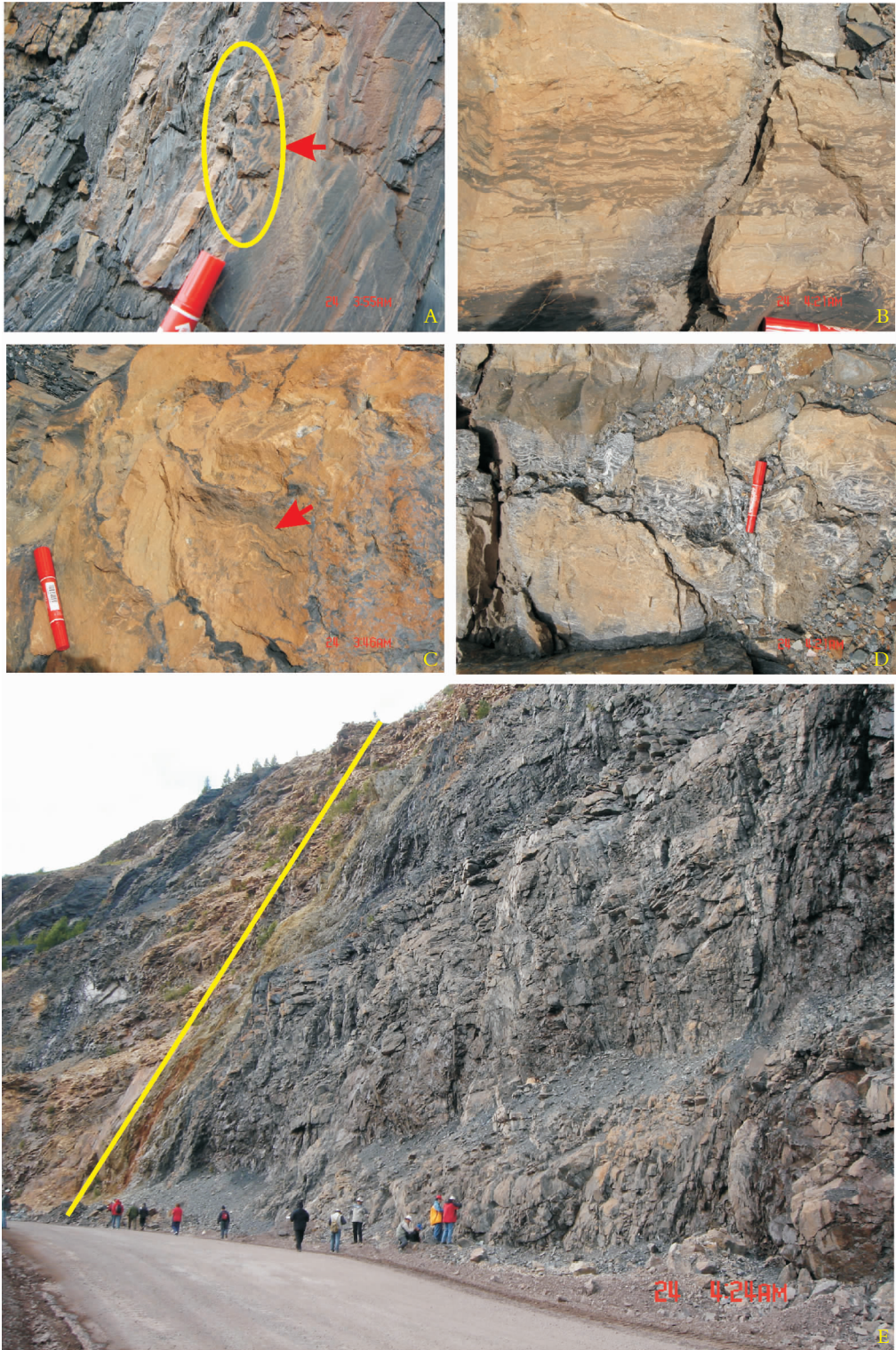


图 5 里非布江群 Malobakal 铁矿层和碎屑岩及碳酸盐岩液化脉(白齿构造)

A—碎屑岩液化脉; B,D—碳酸盐岩液化脉; C—发育在叠层石之间的液化脉

Fig.5 Malobakal iron bed and clastic rocks in the Burzyan Group and liquefied veins (molar tooth structures) in carbonate rocks

A—Clastic liquefied veins; B, D—Carbonate liquefied veins; C—Liquefied vein in stromatolites



图 6 卡拉套群与文德系之间的平行不整合及 UK 组的白齿构造

A—卡拉套群 UK 组与文德系 Uryuk 组之间的平行不整合;B—Uryuk 组的底砾岩;C—文德系 Basa 组;
D—E—卡拉套群 UK 组中液化脉(白齿构造)

Fig.6 Disconformity between the Kalatao Group and Vendian System and molar-tooth structure in the UK Fm
A—Disconformity between the UK Fm. of the Kalatao Group and Vendian;B—conglomerates in Uryuk Fm.;
C—Vendian Basa Fm.;D—E—Liquefied vein (molar-tooth structure) in the UK Fm. of the Kalatao Group

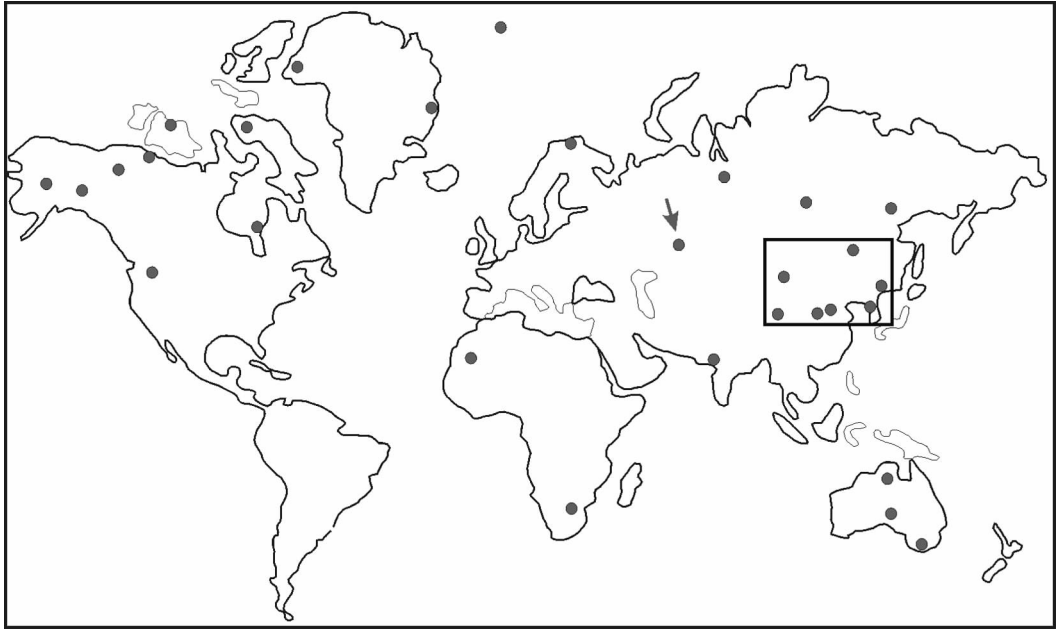


图 7 全球范围发现的臼齿构造
箭头—本文臼齿构造研究区;方框—中国华北地台上发现的臼齿构造产地

Fig.7 Molar tooth structures found over the globe
Arrow—the study area of molar-tooth structures in this paper;Square—occurrence of molar tooth structures found in the North China platform

学家对碎屑岩沉积物中的地震液化脉与液化变形构造进行了详细研究,确定了碎屑岩的液化脉为地震成因^[11-13]。目前,对碳酸盐岩微亮晶脉的成因,国际地学界主要有 3 种认识:

(1)生物成因,不少碳酸盐岩沉积学家认为“臼齿构造”与某种藻类有关,并倾向该构造是限于一定时代分布的产物(1600~540 Ma)^[14-17]。

(2)化学事件成因^[18],认为与沉积物中碳氢化合物气体释放有关^[19-26];与二氧化碳气体释放有关^[27-28];也有人主张为特殊地化环境成因^[29]。

(3)物理成因,认为与脱水收缩作用有关或为地震成因^[30-37]。

本次对南乌拉尔地区的野外考察所发现的臼齿构造,结合野外沉积特征和构造演化阶段分析,笔者认为微亮晶液化脉(臼齿构造)为地震液化脉,它的出现应与俄罗斯地台东缘(乌拉尔海槽)构造事件有关,并与乌拉尔地区的某些矿产形成相关。

3 南乌拉尔地区的碳酸盐岩微亮晶脉(地震液化脉)特征

3.1 地震液化脉下里菲层控矿伴生的萨塔卡组(Satka)和巴卡尔组(Bakal)

(1)下里菲 Ai 组之上为萨塔卡组,全俄最大的菱镁矿即

与萨塔卡组碳酸盐岩有关,其中菱镁矿位于上 Satka 组的中部和上 Kusa 亚组的下部。在 Karagay 露天采坑中可以看到上 Satka 组的中部,岩性为白云岩、菱镁矿和页岩。矿体具层控特征:矿层基本沿特定的碳酸盐岩层分布,但又不严格呈层状,矿脉可切割或穿入沉积岩层中。菱镁矿矿石呈粗粒,菊花状或不定向排列,表明矿床系碳酸盐岩成岩过程中经进一步改造而成。矿体被 Berdyaush 环斑花岗岩(1373±21 Ma U-Pb 锆石年龄)所侵入。矿石平均成分为 MgO 为 45.1%。萨塔卡组以炭质页岩和碳酸盐岩为主,地震液化脉极发育(图 4-A-E)。炭质页岩和碳酸盐岩交替沉积,形成 3 个较大的向上变浅的沉积旋回,地震液化脉(碳酸盐岩微亮晶脉和砂岩脉)交替发育在炭质页岩中和碳酸盐岩中。

(2)巴卡尔组上部(Malobakal 亚组)的碳酸盐岩中,为巨厚的铁矿层,矿石主要为菱铁矿,品位 30%~35%,以及进一步氧化而成的褐铁矿,另有一些赤铁矿;在 Malobakal 亚组 Gaevsky 段出现叠层石白云岩,并形成工业铁矿体。在 Bakal 组铁矿区范围内还可见到结晶菱镁矿,产于 Malobakal 亚组 Gaevsky 段之下的 Shuydin 段的下部,该段以炭质页岩和碳酸盐岩为主,产出层状和透镜状菱铁矿。该组中部为粗大柱状叠层石,礁顶部和叠层石之间以及碎屑岩沉积(页岩或粉砂岩)均发育臼齿构造。其特点为液化脉不仅发育在碳酸盐岩中(图 5-D),也发育在碎屑岩中(图 5-A),同时并伴有大量的

同沉积变形、同沉积断层和液化现象(图 5-B)。该铁矿的时代可能与中国华北地台中元古界宣龙式铁矿时代(1600 Ma)大体相当,其层控矿床的层位值得进一步研究。在 Shuydin 段赤铁矿最发育的下部层位(图 5-E),白齿构造呈层状展布,伴随着铁矿层。层控铁矿伴随着白齿构造现象不是偶然,在中国河北宣化地区,也发育有同样的赤铁矿层,铁矿层的顶底板也发育有大量的成层性的白齿构造。铁矿的物质可能来自地幔,伴随着地壳运动,从地球深部运移到地表,浅水中的大量的噬铁细菌的吸附,加速了铁矿的富集。不同块体上的层控矿床伴随着大量地震液化脉,有着共同的沉积特点和找矿标志。

3.2 中里菲顶部阿瓦孜亚组(Avzyan)

阿瓦孜亚组(Avzyan)底部砂岩与下覆地层 Ziganin-Komarov 组整合接触。阿瓦孜亚组为一套复理石建造沉积,中上部为复理石建造碎屑岩与碳酸盐岩互层。碳酸盐岩砾屑发育,伴有津浪风暴丘状层和凹状层。整个沉积序列为由浅变深—由深变浅序列。同时,白齿构造(地震液化脉)发育在碳酸盐岩地层中(图 3-C-D)。由于伴随着风暴岩和复理石沉积(鲍马序列发育),该地震液化脉发育在相对水深的下缓坡。阿瓦孜亚组是尤尔玛塔群的顶部,是重要的地层转换面,也是构造最为发育的地段。从阿瓦孜亚组开始,整个南乌拉尔地区抬升,地震液化脉主要发育在成岩的软沉积中,是当时重要的构造活动证据。

上里菲卡拉套群顶部 Uk 组。卡拉套群 Uk 组下部碎屑岩(砂岩、页岩),上部叠层石灰岩,微亮晶液化脉发育在中部夹薄层灰岩中(图 6-D-E)。其微亮晶特点与中国胶辽徐淮地区的碳酸盐岩中白齿构造一样(图 8~9)。

3.3 试论地震液化脉与构造关系

南乌拉尔山的中—新元古代地层中发育的 3 套地震液化脉,较完整地体现了全球的超大陆旋回的构造事件。下里

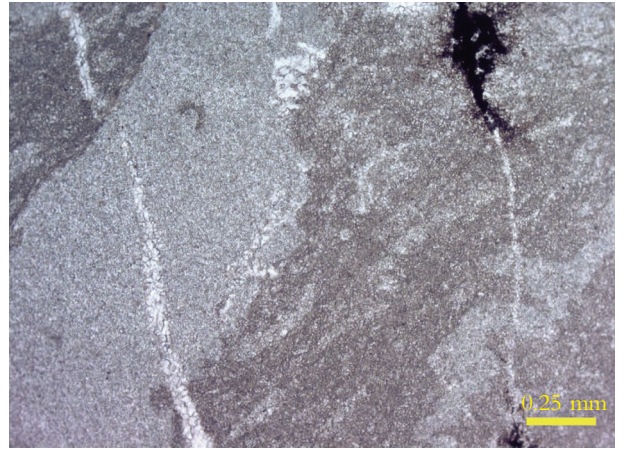


图 9 上里菲卡拉套群顶部 UK 组 MT 脉的显微特征
Fig.9 Microscopic features of molar-tooth structures in the UK Fm. at the top of the Upper Riphean Kalatau Group

菲巴卡尔组上部(Malobakal 亚组)的碳酸盐岩中的液化脉,反映了哥伦比亚超大陆裂解构造事件,巴卡尔组的成矿物质是来源于乌拉尔地槽扩张深部。该构造事件中的液化脉,可对应中国北方燕山裂陷槽的串岭沟组、团山子组和高于庄组上部碳酸盐岩中所发现的液化脉。中里菲群顶部阿瓦孜亚组(Avzyan)的碳酸盐岩中的液化脉,反映了 Rodinia 超大陆聚合时期构造事件。最上部上里菲卡拉套群顶部 Uk 组的碳酸盐岩中的液化脉,反映了 Rodinia 超大陆裂解时期构造事件。

4 结 论

(1)南乌拉尔地区的中—新元古代地层发育完整,在一个地区概括了中国华北燕山地区和胶辽徐淮地区中—新元古代地层以及扬子地台的南华系和震旦系,唯一的遗憾,该地区森林植被覆盖太多,大部分地层界线,见于钻井岩心。但是,南乌拉尔地区的中—新元古代地层地震液化脉具有鲜明的特点,反映了全球重大构造事件。

(2)巴卡尔组上部(Malobakal 亚组)的碳酸盐岩和碎屑岩中同时发育液化脉,有利于地质学家充分地理解白齿构造(molar-tooth structures)与液化脉一同发生的事件。

(3)南乌拉尔地区卡拉套群顶部 Uk 组发育的白齿构造,其时代意义重大,有利于理解和重新认识胶辽徐淮地区新元古代地层在地层柱中的位置。

(4)与南乌拉尔海槽与全球构造演化的各阶段的构造事件相呼应。

致谢:笔者衷心感谢全俄地质研究所(VSEGEI)E. A. Kiselev 博士,俄罗斯科学院乌法地质研究所(科学中心),V. N. Puchkov、V. I. Kozlov 先生及其他俄罗斯同行全程接待和野外讲解;柳永清博士的室内岩石薄片鉴定以及与邢裕盛、乔秀夫、耿树方、王宗起研究员等在成文过程中进行的有益交流。

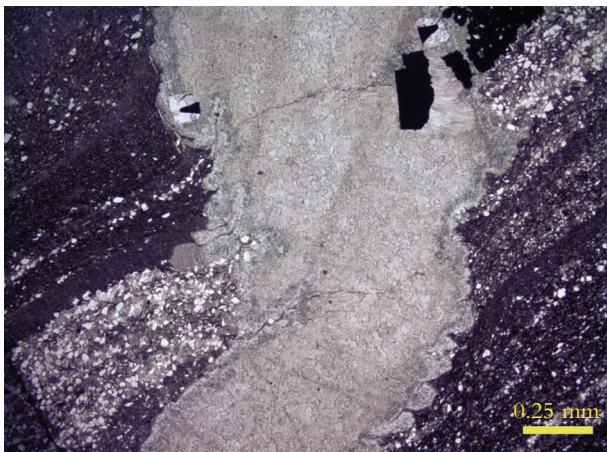


图 8 巴卡尔组上部 Shuydin 段 MT 脉的显微特征
Fig.8 Microscopic features of molar-tooth structures in the Shuydin Member of the Balokal Fm

参考文献(References):

- [1] Shatsky N. S. Notes on tectonics of Volga-Ural oil bearing region and adjacent part of the Western slope of the South Ural. Materials to study geological structure of the USSR M., 1945, 26:1-130.
- [2] Bauerman H. Report on the geology of the country near the forty-ninth parallel of the north latitude west of Rocky Mountains [J]. Canadian Geological Survey, Report of Progress. (1882-83-84, pt. B), 1885:1-42.
- [3] Smith A G. The origin and deformation of some "molar tooth" structure in the Precambrian belt Purcell Supergroup [J]. Journal of Geology, 1968, 76:426-443.
- [4] O'Connor M P. Classification and environmental interpretation of the cryptalgal organosedimentary "molar tooth" structures in the Late Precambrian Belt-Purell Supergroup [J]. Journal of Geology, 1972, 80:592-610.
- [5] 乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 等. 碳酸盐岩振动液化地震序列 [J]. 地质学报, 1994, 68(1):16-34.
Qiao Xiufu, Song Tianrui, Gao Linzhi, et al. Seismic sequence in carbonate rocks by vibrational liquefaction [J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 7 (3):243-265.
- [6] 乔秀夫, 宋天锐, 李海兵, 等. 辽东半岛南部震旦系 - 下寒武统成因地层 [M]. 北京: 科学出版社, 1996:1-174.
Qiao Xiufu, Song Tianrui, Li Haibing, et al. Genetic Stratigraphy of the Sinian and Lower Cambrian Strata in South Liaoning Province [J]. Beijing: Science Press. 1996:1-174(in Chinese).
- [7] 乔秀夫, 高林志. 华北中—新元古代及早古生代地震灾变事件及与 Rodinia 的关系 [J]. 科学通报, 1999, 44(16):1753-1757.
Qiao Xiufu, Gao Linzhi. Earthquake events in Neoproterozoic and Early Paleozoic and its relationship with supercontinental Rodinia in North China [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(10):931-935.
- [8] 乔秀夫, 高林志, 彭阳. 古庐带新元古界--灾变、层序、生物 [M]. 北京: 地质出版社, 2001:1-128.
Qiao Xiufu, Gao Linzhi, Peng Yang. Neoproterozoic in Paleo-Tanlu Fault Zone, Catastrpche, Sequences, Biostratigraphy [M]. Beijing: Geological Publishing House:2001:1-128(in Chinese).
- [9] 乔秀夫, 高林志. 燕辽裂陷槽中元古代古地震与古地理 [J]. 古地理学报, 2007, 9(4):337-352.
Qiao Xiufu, Gao Linzhi. Mesoproterozoic palaeoearthquake and palaeogeography in Yan-Liao Aulacogen [J]. Journal of Palaeogeography, 2007, 9(4):337-352(in Chinese with English abstract).
- [10] Plaziat J C, Purser B H, Philobos E. Seismic deformation structures (seismites) in the syn-rift sediments of the NW Red Sea Egypt [J]. Bull. Soc. Geol. France, 1990, (8):419-434.
- [11] Purser B H, Philobos E, Soliman M. Sedimentation and rifting in the new parts of the Red Sea - a review [J]. Bull. Soc. Geol. France, 1990, (8):371-384.
- [12] Purser B H, Plaziat J C, Philobos E. Stratiform breccias and associated deformation structures recording Neogene earthquake in Syn-Rift sediments of the Egyptian Red Sea Coast [J]. Geol. Soc. Egypt, Spec. Publ., 1993, 1:189-204.
- [13] 张传恒, 武振杰, 高林志, 等. 雾迷山组中地震驱动的软沉积物变形构造及其地质意义 [J]. 中国科学(D), 2007, 27(3):336-343.
Zhang Chuanheng, Wu Zhenjie, Gao Linzhi. Earthquake-induced soft-sediment deformation structures in the Mesoproterozoic Wumishan Formation, North China, and their geologic implications [J]. Science in China(Series D), 2007, 50(3):350-358.
- [14] James N P, Narbone G M, Sherman A G. Molar-tooth carbonates; Shallow subtidal facies of the Mid-to Late Proterozoic [J]. Journal of sedimentary Research, 1998, 68(5):716-722.
- [15] Shields A S. Molar-tooth microspar: a chemical explanation for its disappearance-700Ma [J]. Terra Nova., 2002, 14(2):108-113.
- [16] Meng X H, Ge M. The sedimentary features of Proterozoic microspar (molar-tooth) carbonates in China and their significance [J]. Episodes, 2002, 25(3):185-195.
- [17] Meng X H. Recent advance in Precambrian carbonate sedimentary geology; Report on International Conference of IGCP 447 on Molar tooth carbonates and evolution of the Earth in the Proterozoic [J]. Episodes, 2003, 26(1):28-29.
- [18] Abelson P H. Chemical Events on the Primitive Earth [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1966, 55 (6):1365-1372.
- [19] Pratt B. Gas bubble and expansion crack origin of molar tooth calcite structures. Marine and Petroleum [J]. Geology, 1998, 15:427-437.
- [20] Bakker R J. Improvements in clathrate modeling H: the H₂O-CO₂-CH₄-N₂-C₂H₆ fluid system. Geological Society of London, Special Publication, 1998, 137:75-105.
- [21] Furniss G J, Rittle J F, Winston D. Gas bubble and Expansion crack origin of "Molar Tooth" calcite structures in the Middle Proterozoic Belt Supergroup, Western Montana [J]. Journal of Sedimentary Research, 1998, 68:104-114.
- [22] Frank T D, Lyons T W. "Molar-tooth" structures: a geochemical perspective on a Proterozoic enigma [J]. Geology, 1998, 26:683-686.
- [23] Marshall D, Angling C D. soft sediment carbonate vein networks in the Belt Purcell rocks of Southeast BC: a new mode of formation [J]. British Columbia Geological Survey, Geological Fieldwork, 2000, 1:115-118.
- [24] Marshall D, Angling C D. CO₂-clathrate destabilization: a new model of formation for molar-tooth structures [J]. Precambrian Research, 2004, 129:325-341.
- [25] Bishop J W, Sumner D Y, Huerta N J. Molar tooth structures of the Neoproterozoic Monteville Formation, Tansvaal Super group, South Africa. I: Constraints on microcrystalline CaCO₃ precipitation [J]. Sedimentology, 2006, 53(5):1049-1068.
- [26] Marshall D, Anglin C D. CO₂-Clathrate Destabilization: A New Model of Formation for Molar-Tooth Structures [J]. Precambrian Research, 2004, 129:325-341.
- [27] Booth J S, Winters W J, Dillon W P, et al. Gas Hydrate

- Reservoirs. Geological Society of London, Special Publication. 1998, 137:113-127.
- [28] Winston D, Rittel J F, Furniss G. Gas bubble and expansion crack origin of molar-tooth calcite structures in the Middle Proterozoic Belt Supergroup, western Montana—Reply [J]. *J. Sediment Res.* 1999, 49(2): 437-462.
- [29] 旷红伟, 刘燕学, 孟祥化, 等. 吉辽地区新元古代白齿碳酸盐岩岩相的若干岩石学特征研究 [J]. *地球学报*, 2004, 25(6):647-653.
Kuang Hongwei, Liu Yanxue, Meng Xianghua, et al. Sedimentary Lithofacies and petrological features of Neoproterozoic MT structures bearing carbonates in Jilin—Liaoning Area [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, 25(6):647-652 (in Chinese with English abstract).
- [30] Pratt B R. Seismites in the Mesoproterozoic Altyn Formation (Belt Supergroup), Montana: a test for tectonic control of peritidal carbonate cyclicity [J]. *Geology*, 1994, 22(12):1091-1094.
- [31] Pratt B R. Syneresis cracks: subaqueous shrinkage in argillaceous sediments caused by earthquake induced dewatering [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 117(1/2):1-10.
- [32] Pratt B R. Molar-tooth structure in Proterozoic carbonate rocks: Origin from synsedimentary earthquakes, and implications for the nature and evolution of basins and marine sediment [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1998, 110 (8):1028-1045.
- [33] Pratt B R. Oceanography, Bathymetry and syn-depositional tectonics of a Precambrian intracratonic basin: Integrating sediments, storms, earthquakes and tsunamis in belt supergroup (Helena Formation, ca. 1.45 Ga), Western North America [J]. *Sediment. Geol.*, 2001, 141-142:371-391.
- [34] Pratt B R. Tepees in peritidal carbonates; origin via earthquake-induced deformation, with example from the Middle Cambrian of Western Canada [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 153(3/4):57-64.
- [35] Mohindra R, Bagati T N. Seismically induced soft-sediment deformation structures (seismites) around Sumdo in the lower Spiti valley (Tethys Himalaya) [J]. *Sedimentary Geology*, 1996, 101: 69-83.
- [36] Fairchild I J, Einsele G, Song T R. Possible seismic origin of molar-tooth structures in Neoproterozoic carbonate ramp deposits, north China [J]. *Sedimentology*. 1997, 44:611-636.
- [37] Moretti M. Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in Middle-Late Pleistocene aeolian deposits (Apulian foreland southern Italy) [J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 135:167-179.
- [38] 高林志, 柳永清. 河南嵩山地区新元古界何家窑微亮晶脉特征、成因及地质意义探讨 [J]. *地质论评*, 2005, 51(4):373-381.
Gao Linzhi, Liu Yongqing. Explanation of microspar veins in the Neoproterozoic Hejiayao Formation and its geological significance in Songshan Area, Henan [J]. *Geological Review*, 2005, 51(4):373-381 (in Chinese with English abstract).

Meso- and Neoproterozoic stratigraphic sequences in the Southern Ural area and discovery of molar-tooth structures in carbonate and clastic rocks of the sequences and their geological significance

GAO Lin-zhi¹, DING Xiao-zhong¹, YIN Chong-yu¹, REN Liu-dong¹, LI Ting-dong¹,
CHEN Ting-yu¹, CHEN Bing-wei¹, LI Gui-shu¹, LU Song-nian¹

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 10037, China* ;

2. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 10037, China*;

3. *Tianjin Institute of Geological and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China*)

Abstract: Meso- and Neoproterozoic strata are very well developed in the southern Ural Trough. They have a huge thickness and show distinct features of tectonic evolution and deposition of several stages. The Neoproterozoic and Lower Riphean are important host strata of large stratabound iron and magnesite deposits. The Middle Riphean (Mesoproterozoic) has very thick deposits with several depositional cycles, when carbonate rocks of abyssal to ramp facies were developed. After the Neoproterozoic last glaciation, the White Sea fauna (Ediacaran fauna), which may be used for global correlation, appeared in the Vendian System. The authors for the first time recognize three sets of molar-tooth structures in the Meso- and Neoproterozoic strata of the Southern Ural area. Of these, the molar-tooth structure in carbonate rocks of the Bakal Formation alternates and is associated with seismic liquefied veins, and even the molar-tooth structures are also developed in large-scale stromatolites in the lower Riphean Staka and Bakal formations. This feature indicates that the molar-tooth structure in carbonate rocks is related to seismic liquefaction. The age of the three sets of molar-tooth structures is largely close to that of the molar-tooth structure (liquefied vein) found in the Meso- and Neoproterozoic strata in the North China block.

Key words: Southern Ural Mountains; Meso- and Neoproterozoic; molar tooth structure; seismic liquefied vein

About the first author: GAO Lin-zhi, male, born in 1955, senior researcher, engages in the stratigraphic and paleontological study; E-mail: gaolzh@cags.net.cn.