

新元古代九里桥组中的风暴活动记录及生物学响应*

贾志海, 洪天求

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要: 安徽淮南地区新元古代九里桥组主要由砂质、泥质灰岩, 叠层石灰岩和白云质灰岩组成。该组沉积物中保存了特征明显的海洋风暴活动记录。对该组风暴沉积序列的岩性和沉积构造的不同组合特征的研究表明, 这一时期发生的风暴活动作用过程经历了平静期、强盛期、减弱期和消亡期四个阶段。在不同的作用阶段, 风暴活动发生的频率与强度有所不同, 对沉积物的改造和破坏作用也不同, 与之相关的岩层中叠层石、微体浮游生物化石和宏体生物化石的分布和保存也各具特色, 这些迹象表明长期的风暴活动作用对区域性的生物生存和发展具有显著的影响。

关键词: 风暴活动; 化石分布; 新元古代; 九里桥组; 淮南地区

中图分类号: P512.2

文献标识码: A

0 引言

风暴沉积研究始于 20 世纪 50 年代末期, 近年来, 随着世界各地地史时期风暴沉积研究的逐渐深入, 相关理论已经逐渐建立并得到不断完善。利用古风暴沉积的特征来推算古水深, 恢复古气候、古环境、古盆地和古地理等已经逐渐为广大研究者所熟知^[1~10]。

海洋风暴活动对其存在环境的破坏、改造作用较大, 对一定区域内的生物活动能够产生较大影响。近年来, 风暴沉积的遗迹学研究取得了一定进展。Pemberton 等^[11]、Vossler 等^[12]通过对加拿大艾伯塔晚白垩世(土仑期)卡迪组陆源碎屑风暴沉积中遗迹化石的特征的研究解释风暴沉积。Pemberton 等^[13]对华北地台东部包括山东省泰安、莱芜、淄川一带上寒武统崮山组海相沉积中的一套风暴前—风暴—风暴后的碳酸盐风暴沉积序列中的遗迹化石进行了研究。Follmi 等^[14]则提出了“罹难者先驱”(doomed pioneer)的概念, 用以解释那些出现在无生物扰动的沉积物中, 惟一与重力流沉积物有关的异常的遗迹化石。

安徽淮南地区新元古代九里桥组主要由泥质、砂质灰岩和白云质灰岩组成, 其中记录有多次风暴活动, 它们与该组所含的叠层石、宏体生物化石和微体浮游生物化石的保存与分布具有密切联系。我们试就这一问题进行了初步探讨。

* 收稿日期: 2004-02-20; 修回日期: 2005-06-29

基金项目: 教育部博士学科点专项基金资助课题(20020359013)。

作者简介: 贾志海, 男, 1976 年生, 博士。研究方向: 前寒武纪碳酸盐岩及古生物。E-mail: j7698@xinhuanet.com

1 九里桥组岩性特征

九里桥组由朱兆玲等命名于寿县城北九里桥,该组广泛分布于安徽淮南地区,在寿县八公山、淮南闪冲、怀远至凤阳一带出露较好(图 1). 九里桥组与下伏寿县组砂岩和上覆四顶山组白云岩呈整合接触关系,由黄灰、深灰色薄层和中厚层粉砂质灰岩、泥质灰岩、含叠层石灰岩和白云质灰岩组成,厚度为 30~50 m. 该组上部深灰色薄层泥质灰岩中,含有丰富的软躯体后生动物实体化石、宏体碳质膜化石和遗迹化石等,这些化石构成了“淮南生物群”化石的主要分子.

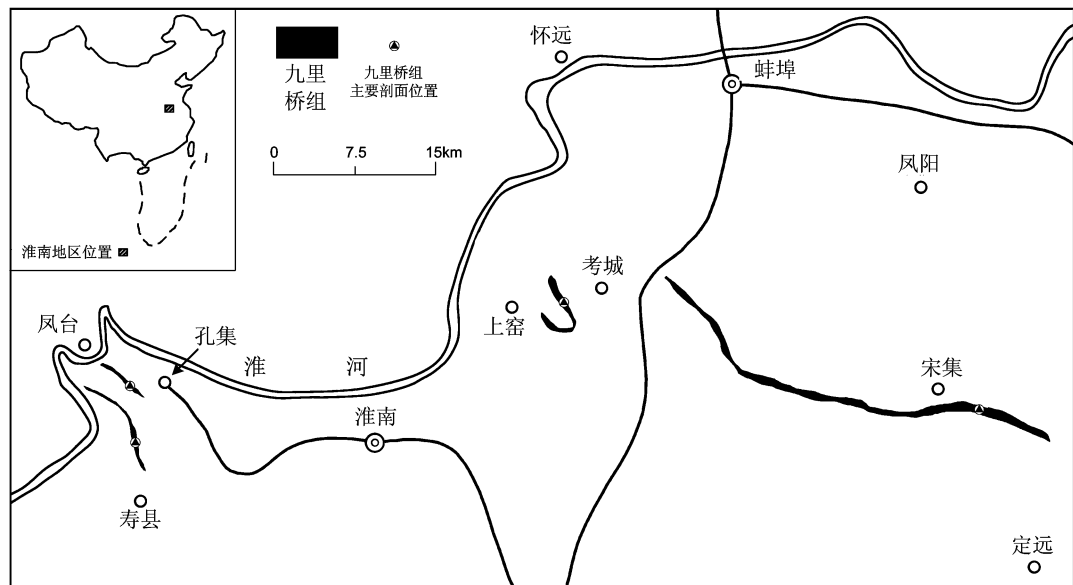


图 1 安徽淮南地区新元古代九里桥组分布略图

Fig. 1 Distribution sketch of the Neoproterozoic Jiuliqiao Formation in Huainan region, Anhui Province

依据九里桥组岩性组合特征以及叠层石和宏体古生物化石的分布特征,可将该组划分为 3 个主要岩性段,各岩性段基本岩性特征见图 2.

下部岩性段:由黄灰色中厚层含海绿石粉砂质灰岩与深灰色薄层泥质灰岩组成,其下部沙纹层理和波纹层理发育,局部发育有交错层理,自下而上粉砂质成份逐渐减少. 该岩性段厚约 13 m.

中部岩性段:由浅灰色中厚层含叠层石泥质灰岩、深灰色泥灰岩、薄层粉砂质灰岩和泥质灰岩组成. 该岩性段以含有大量的叠层石礁体为主要特征. 在该段下部,由砾屑粉砂质灰岩(A)、粉砂质灰岩(B)、含叠层石礁灰岩(C)、海绿石凝缩层(D)组成沉积韵律序列. 各韵律序列通常不完整,或是 A—B—C,或是 A—B—D,或是 B—C—D 组合,相邻韵律序列之间存在明显的风暴浪冲刷界面. 上部砾屑灰岩中含有宏体古生物化石. 该岩性段厚约 30 m.

上部岩性段:由薄层浅灰色砂质灰岩和薄层深灰色泥、砂质灰岩组成,水平层理发育. 深灰色薄层泥、砂质灰岩中含有丰富的后生动物实体化石、宏体碳质膜化石、遗迹化石和微体浮游植物化石^[16],顶部为中层白云质灰岩. 该岩性段厚约 7 m.

2 九里桥组中的风暴沉积

九里桥组中的风暴沉积集中分布在中部岩性段,下部和上部岩性段风暴沉积记录不明显,风暴沉积特征见图2。

2.1 岩石学特征

(i)原地型风暴砾屑灰岩(图版 I-4;图版 II-1,3):这种砾屑灰岩主要在风暴高峰期的风暴中心地带原地形成。砾屑形态为块状或长条状,成份单一,与下伏的中薄层灰岩或周围的叠层石灰岩相同;无磨圆度,砾屑大小0.5 cm至20 cm不等,杂乱排列,分选性差,砾屑局部呈放射状排列,颗粒支撑。这种砾屑灰岩通常由风暴浪将已经固结的沉积物打碎、搅起并就地堆积而成。

(ii)异地型风暴砾屑灰岩(图版 I-1,2):这种类型的砾屑灰岩主要在风暴高峰期边缘地带形成。风暴岩砾屑形态不规则,稍具磨圆度,砾屑大小在0.5~5 cm之间,分选性差,杂乱排列,基质支撑,与下伏岩层之间具有不规则起伏的冲刷界面。这种砾屑灰岩是风暴浪将已破碎的沉积物短距离搬运后堆积而成的。

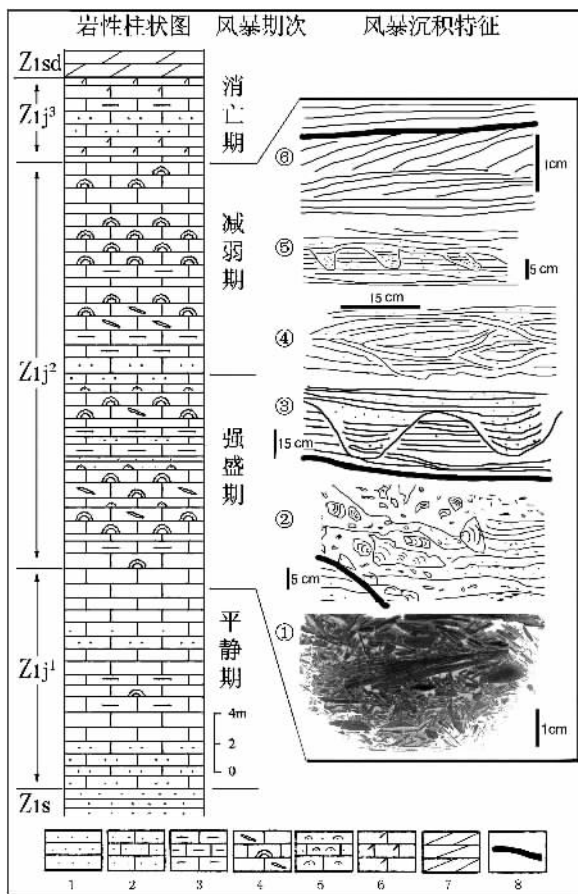
(iii)风暴浊积砂屑灰岩(图版 II-2):这种沉积类型主要在风暴减弱时期形成。随着风暴活动的减弱,风暴涡流的支撑力下降,原来处于悬浮状态的细粒沉积物按重力分选而下沉堆积形成粒序层。

(iv)海绿石凝缩层(图版 I-6):海绿石凝缩层厚度在3~7 cm之间,多在冲刷面之上或叠层石礁体顶部截切面之上形成。凝缩层中无细粒沉积物存在,表明是由风暴活动产生的强烈簸选作用而形成的。Kidwell^[16]曾对此作过专门论述。

2.2 沉积构造特征

(i)底面构造(图版 I-1,2,5;图版 II-1,2)

九里桥组中风暴作用底面构造主要包括冲刷界面和冲刷沟槽。冲刷界面呈不规则波状



Z1s: 寿县组, Z1j¹、Z1j²、Z1j³ 九里桥组下段、中段、上段, Z1sd: 四顶山组; 1. 砂岩, 2. 砂质灰岩, 3. 泥质灰岩, 4. 含叠层石、砾屑灰岩, 5. 含海绿石灰岩、砂岩, 6. 白云质灰岩, 7. 白云岩, 8. 风暴作用冲刷界面;

①原地型风暴砾屑, ②被风暴作用破碎的叠层石, ③强盛期冲刷充填构造及冲刷界面, ④丘状交错层理, ⑤减弱期冲刷充填构造, ⑥交错层理及冲刷界面

图2 九里桥组岩性柱状图及风暴沉积特征

Fig. 2 Lithologic column of the Jiuliqiao Formation and the characteristics of storm deposits

或平坦状,冲刷沟槽多呈不对称的“V”字形,上部开口直径 10~20 cm,其间沉积物为细粒砂质灰岩。

(ii) 交错层理(图版 I-3)

该组中的交错层理中具有大量丘状交错层理。尽管对于丘状交错层的形成过程长期以来一直存在较大争议,但研究表明^[17~21],丘状交错层主要由风暴作用造成。九里桥组中的单个交错层理丘状体直径在 30~60 cm 之间,厚 1~10 cm 不等,丘状体之间常相互叠置,有时还具有截切关系,反映了不同方向的风暴流对沉积物的改造作用。

(iii) 削顶构造(图版 I-1,6)

在九里桥组叠层石礁体的形成过程中,强烈的风暴活动所产生的风暴流携带大量碎屑对叠层石礁体产生截切和破坏作用,形成明显的削顶构造,在叠层石礁体顶部的截切面之上常可见到由砾屑灰岩、粒序层和海绿石凝缩层组成的风暴岩序列。

(iv) 粒序层(图版 II-2)

粒序层厚度一般在 10~20cm 之间,有的含砾级碎屑,显示正粒级递变性,其底面多为冲刷界面,这类构造多出现在砂质灰岩中并在垂直方向上与具交错层理或水平层理的砂屑灰岩相邻。

3 九里桥组风暴发展过程及其对生命活动的影响

根据九里桥组风暴沉积的岩性、沉积构造特征,可以将该时期风暴活动的发展过程划分为平静期、强盛期、减弱期和消亡期四个阶段。在不同的发展阶段,风暴活动发生的频率和强度对生物活动具有不同的影响。九里桥组风暴活动记录和相关岩层中的古生物化石记录的分布情况见表 1。

3.1 平静期

在九里桥组沉积早期,未见明显的风暴沉积,属于风暴活动平静期。这一时期的沉积物主要为水平层理和波纹层理发育的粉砂质灰岩和泥质灰岩,偶尔可见小型交错层理。在这一时期,除小型叠层石礁体开始出现外,没有发现其他类型的宏体或者微体古生物化石。

3.2 强盛期

九里桥组风暴活动的强盛期主要出现在沉积中期的前半段。在这一时期,风暴活动发生的频率高、强度大,对沉积物的改造作用明显,砾屑灰岩、丘状层理、粒序层、冲刷界面和冲刷沟槽频繁出现(图版 I-1~5)。

尽管叠层石礁体在九里桥组沉积早期就已经开始出现,但却是在风暴活动大规模作用阶段开始形成规模的。在风暴活动作用强盛期的早期,由于受到风暴活动的频繁破坏,叠层石常常刚形成便被破碎,并以砾块、砾屑的形式分布在风暴沉积层中。未被完全破坏的叠层石则形成直径 20~60 cm,高 15~20 cm 的小丘。在风暴活动的间歇期,造礁生物得到了充分的发展,逐渐形成了规模可观的叠层石礁体。在这一时期,微体浮游生物也明显受到了风暴作用的不利影响,在叠层石礁体上下的风暴沉积层中,保存有较多的微体浮游生物化石,可能是强烈的风暴活动导致了大量浮游生物的死亡和埋藏。

3.3 减弱期

九里桥组风暴活动的减弱期主要出现在沉积中期的后半部分。在这一时期,风暴活动频

率开始减缓,强度也有所减弱,但仍时有发生.这一时期的风暴活动以破坏叠层石礁体和改造沉积物为主,砾屑灰岩、海绿石凝缩层、丘状层理、冲刷界面和粒序层在叠层石礁体的上下层位中均有出现,叠层石个体之间,常充填有不规则砾块,它们多由破碎的叠层石和灰岩砾屑组成,并含有少量的海绿石颗粒(图版 I-6;图版 II-1、2).

在这一时期由于风暴活动的规模和频率逐渐变小,造礁生物得到充分的发展,形成了叠层石层礁和大量相对独立且个体较大的丘状叠层石礁体.叠层石层礁高度一般在 150~250 cm 之间,独立的丘状叠层石礁体直径在 200~500 cm 之间,厚度在 60~200 cm 之间,个别礁体直径可达 1 000 cm 以上,同一层位的各叠层石礁体之间有一定的距离,其间沉积含海绿石颗粒的砂屑泥晶灰岩或砾屑灰岩.除造礁生物以外,其他类型的微体浮游生物也得到了-定程度的发展,它们的大量出现使得以浮游植物为食的宏体后生动物的数量也开始增多,因而在这一时期的沉积物中宏体后生动物的化石记录也有所增加.

表 1 九里桥组风暴活动特征及其与叠层石、古生物化石的关系

Tab. 1 Storm characteristics in the Jiuliqiao Formation and their relationships with stromatolites and fossils

岩性段	风暴作用阶段	风暴沉积特征	叠层石特征	古生物化石特征 ^[15]
上段	消亡期	无风暴沉积记录	无叠层石记录	大量蠕形动物化石、宏体碳质膜化石和遗迹化石出现;发现微体浮游生物 20 个形态属和大量多细胞浮游植物碎片化石
中段	减弱期	原地及异地型砾屑灰岩厚度减小(小于 50 cm),砾屑较小,海绿石凝缩层增加,叠层石破坏程度降低,丘状交错层理不发育,交错层理及水平层理发育,无冲刷充填构造,冲刷界面较少	叠层石礁体体积较大,主要由柱状分叉和短柱状叠层石组成;层礁主要由长柱状局部分叉叠层石组成;可见块茎状叠层石组成的小型叠层石礁体	蠕形动物化石宏体碳质膜化石出现;发现有微体浮游生物的 16 个形态属和较多多细胞浮游植物碎片化石
	强盛期	原地及异地型砾屑灰岩厚度较大(大于 100 cm),砾屑颗粒大,海绿石凝缩层较少,叠层石破坏严重,丘状交错层理、交错层理、冲刷充填构造和粒序层发育,冲刷界面较多,局部发育水平层理	叠层石礁体体积较小,主要由柱状分叉、短柱状和块茎状叠层石组成,无叠层石层礁	未发现宏体化石;发现微体浮游生物的 8 个形态属和少量多细胞浮游植物碎片化石下段平静期无明显风暴沉积记录出现由块茎状叠层石组成的小型丘状礁体未发现宏体化石和微体浮游古生物化石
下段	平静期	无明显风暴沉积记录	出现由块茎状叠层石组成的小型丘状礁体	未发现宏体化石和微体浮游古生物化石

3.4 消亡期

九里桥组沉积晚期的沉积物主要为泥质、砂质灰岩和白云质灰岩,水平层理发育,风暴

活动记录不明显,表明风暴活动已经进入了消亡期.由于这种环境不适合造礁生物的生长发育,因此在这一时期的沉积记录中没有叠层石出现,但其他类型的微体浮游生物大量繁殖,大型藻类也得到了充分发展,宏体后生动物的数量明显增多,个体增大.表明生物在九里桥组沉积晚期进入了一个新的发展阶段.

4 结论

淮南地区新元古代九里桥组厚度不大的碳酸盐岩中不仅记录了多次特征明显的风暴沉积,还保存了在地球早期生命演化过程中具有重要地位的“淮南生物群”的主要化石分子.另外,该组中叠层石礁体发育,含有种类较多的微体浮游植物.九里桥组沉积期发生的风暴活动由盛到衰的过程与该组中的叠层石礁体、微体浮游生物和宏体后生动物化石记录由少增多的过程相对应.这种现象表明频繁发生的风暴活动对这一时期区域性生物的发展具有较为明显的影响.

参 考 文 献

- [1] 孟祥化,乔秀夫,葛铭. 华北古浅海碳酸盐风暴沉积和丁家滩相序模式[J]. 沉积学报, 1986,4(2):1-18.
- [2] 乔秀夫,邢裕盛,高林志等. 皖北震旦系张渠组风暴沉积——向上变浅的碳酸盐沉积序列[J]. 地质学报,1989,63(4):298-309.
- [3] 乔秀夫,高林志,彭阳. 古郟庐带新元古界——灾变、层序、生物[M]. 北京:地质出版社,2001:108-112.
- [4] 王翔,王战. 华北地块东南缘上元古界风暴沉积[J]. 沉积学报,1993,11(2):91-98.
- [5] 安桐林. 蓟县雾迷山组碳酸盐岩原地型风暴沉积特征及成因探讨[J]. 沉积学报,1993,11(4):30-36.
- [6] 孟庆任,胡健民,李文厚. 豫西前寒武纪汝阳群和洛峪群中风暴沉积[J]. 地质科学, 1995,30(3):240-246.
- [7] 李壮福,郭英海. 徐州地区震旦系贾园组的风暴沉积[J]. 古地理学报,2000,2(2):19-27.
- [8] Myrow P M, Southard J B. Tempestite deposition[J]. *Journal of Sedimentary Research* 1996, 66 (5):875-887.
- [9] Bose P K, Mazumder R, Sarkar S. Tidal sandwaves and related storm deposits in the transgressive Protoproterozoic Chaibasa Formation, India [J]. *Precambrian Research*, 1997,84(1):63-81.
- [10] Gehling J G. Environmental interpretation and a sequence stratigraphic framework for the terminal Proterozoic Ediacara Member within the Rawnsley Quartzite, South Australia [J]. *Precambrian Research*, 2000,100 (1):65-95.
- [11] Pemberton S G, Frey R W. Ichnology of storm influenced shallow marine sequence: Cardium Formation (Upper Cretaceous) at Seebe, Alberta[A]. In: Stott D F, Glass D J. *The Mesozoic of Middle North America* [C] Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 1984, 9:281-304.
- [12] Vossler S M, Pemberton S G. Skolithos in the Upper Cretaceous Cardium Formation: an ichnofossil example of opportunistic ecology [J]. *Lethaia*, 1988, 21(3):51-62.
- [13] Pemberton S G, 周志澄, Eacher J M. 风暴沉积的遗迹学研究[J], 沉积学报, 2000, 18 (4):490-494.
- [14] Foellmi K B, Grimm K A. Doomed pioneers: Gravity flow deposition and bioturbation in marine oxygen-deficient environments [J]. *Geology*, 1990,18(10):69-72.
- [15] 洪天求,贾志海,尹磊明,等. 淮南地区新元古代九里桥组的疑源类化石组合及其生物地

- 层学意义[J]. 古生物学报, 2004, 43(3): 377-387.
- [16] Kidwell S M. Stratigraphic condensation of marine transgressive records: origin of major shell deposits in the Miocene of Maryland [J]. J. Geol., 1989, 97:1-24.
- [17] Allen P A. Hummocky cross-stratification is not produced purely under progressive gravity waves [J]. Nature, 1985, 313:562-564.
- [18] Duke W L, Arnott R W C, Cheel R J. Shelf sandstones and hummocky cross-stratification: new insights on a storm debate [J]. Geology, 1991, 19:625-628.
- [19] Harms J C. Primary sedimentary structures [J]. Annual Review of Earth and Planetary Science, 1979, 7:227-248.
- [20] Hunter R E, Clifton H E. Cyclic deposits and hummocky cross-stratification of probable storm origin in Upper Cretaceous rocks of the Cape Sebastian area, southwestern Oregon [J]. Journal of Sedimentary Research, 1982, 52(1):127-143.
- [21] Leckie D A, Walker R G. Storm- and tide-dominated shorelines in Cretaceous Moosebar-lower Gates interval; outcrop equivalents of Deep Basin gas trap in Western Canada [J]. Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, 1982, 66(2):138-157.

图 版 说 明

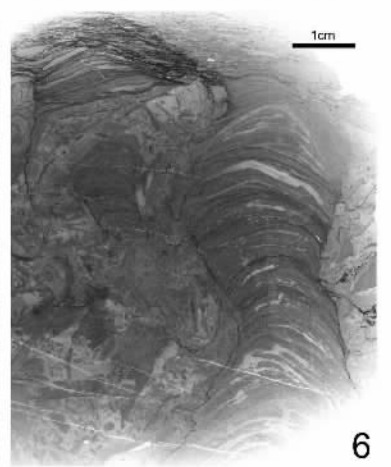
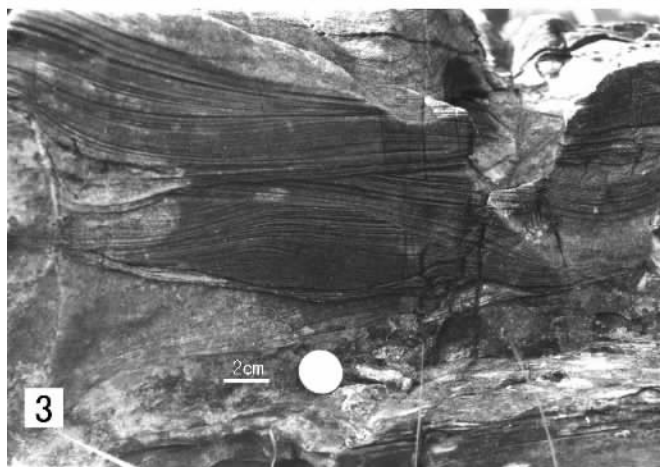
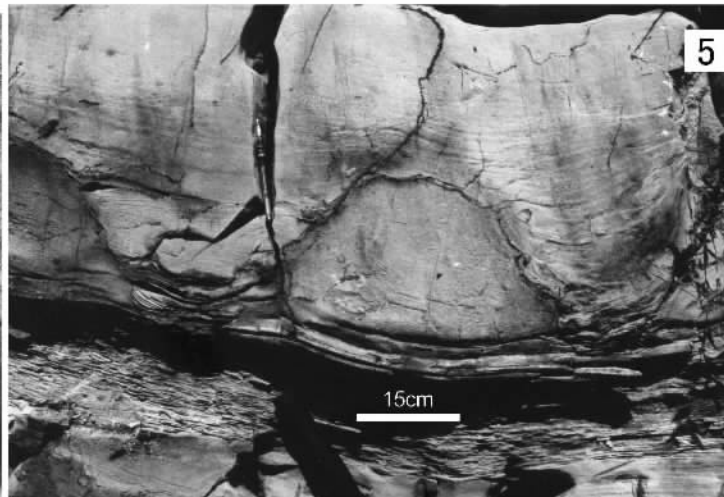
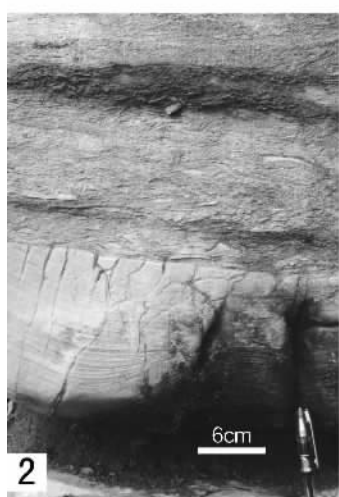
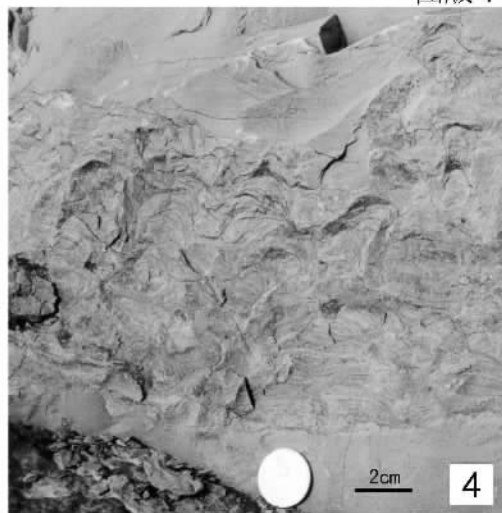
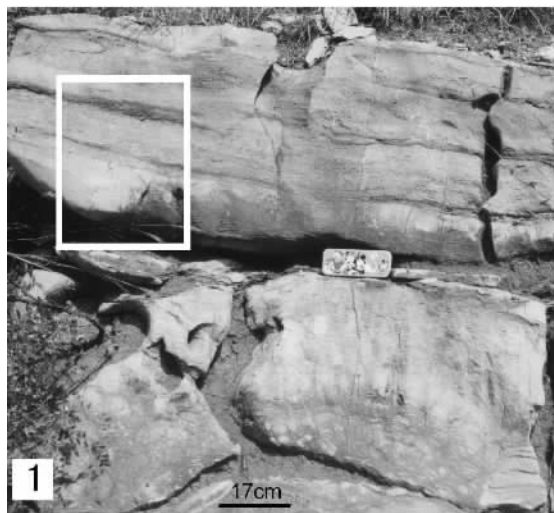
图版 I

- 1 风暴活动削顶作用及异地风暴砾屑灰岩, 文具盒所在位置为削顶面, 其上依次记录了波纹层理、冲刷界面和异地型风暴砾屑灰岩; 野外照片, 拍摄于淮南闪冲, 九里桥组中段下部。
- 2 图版 I-1 方框内部分的局部放大。
- 3 风暴作用形成的丘状交错层理与洼状交错层, 野外照片, 拍摄于淮南闪冲, 九里桥组中段下部。
- 4 叠层石被破碎成砾块分布在交错层理发育的砂质灰岩中, 野外照片, 拍摄于凤阳大屋山, 九里桥组中段下部。
- 5 风暴作用冲刷形成的沟槽及其沉积物, 冲刷沟槽呈“V”字形, 宽 50~60 cm, 高 30~40 cm, 其间充填有细小砾屑和砂屑, 野外照片, 拍摄于淮南闪冲, 九里桥组中段中部。
- 6 叠层石礁体顶部被风暴砾屑包围的叠层石单体, 叠层石上方覆盖一层含海绿石颗粒的砾屑层, 手标本光面照片, 标本采集于凤阳大屋山, 九里桥组中段中部。

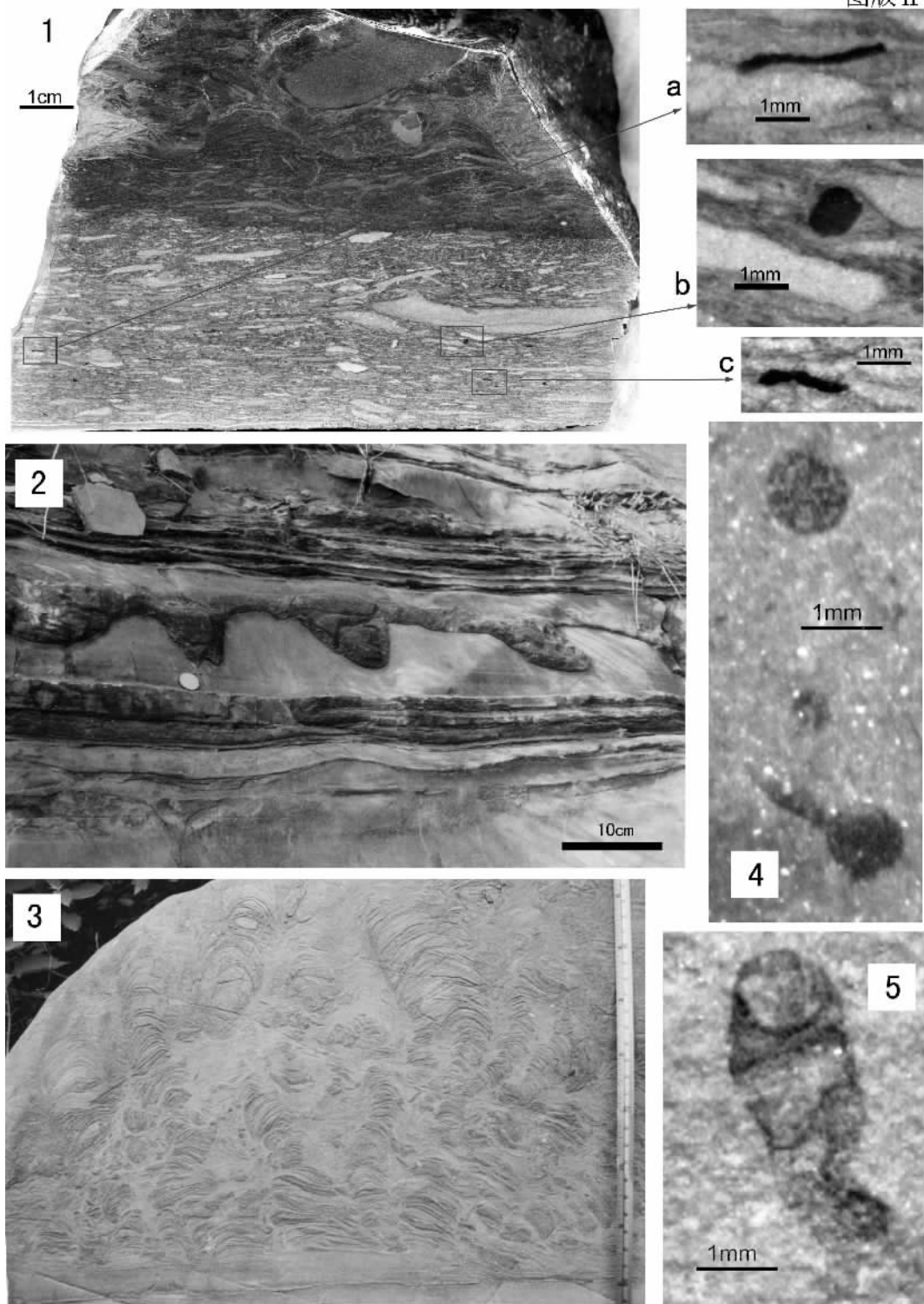
图版 II

- 1 含宏体化石碎片的风暴砾屑灰岩和被严重破坏的叠层石, 手标本光面照片, 标本采集于怀远百瓜山, 九里桥组中段中部, a, b, c 分别为放大 10 倍的化石碎片。
- 2 风暴作用冲刷沟槽、粒序层、冲刷界面及水平层理, 野外照片, 拍摄于凤阳大屋山, 九里桥组中段中部。
- 3 叠层石与风暴活动抗衡过程, 早期形成的叠层石被严重破坏, 后期叠层石(照片上方)的生长活动逐渐超过风暴活动的破坏作用, 野外照片, 拍摄于凤阳大屋山, 九里桥组中段中部。
- 4, 5 风暴活动间歇期薄层砂质灰岩中保存的宏体化石, 标本采集于怀远百瓜山, 九里桥组中段上部。

图版 I



图版 II



Storm Records and Their Biological Responses in Neoproterozoic Jiuliqiao Formation

JIA Zhi-hai, HONG Tian-qiu

(Institute of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The Neoproterozoic Jiuliqiao Formation in the Huainan region consists of sandy, silty, stromatolitic and dolomitic limestones. Typical ocean-storm deposits are well preserved in this Formation. The study on lithology and the sedimentary structures of the storm deposits in the Formation indicate that the storm activity during this depositional period has four stages: quiet stage, strong stage, weakening stage and dying-out stage. In different active stages, the frequency and strength of the storms and the correlative reconstructive effects on the deposits are different; the preservation and distribution of stromatolites, micro-plankton fossils and macro-fossils in corresponding strata have different typical characteristics. Such evidences suggest that the regional ocean storm activity may have a remarkable influence on the organisms' developments in this area.

Key words: storm activity; fossil distribution; Neoproterozoic; Jiuliqiao Formation; Huainan region