

引用格式: 杨子杰, 李倩倩, 徐博洋, 等. 2026. 徐淮盆地北缘新元古界望山组叠层石类型及古环境意义[J]. 沉积学报, 44(5): 1783-1799.

YANG ZiJie, LI QianQian, XU BoYang, et al. 2026. Types of Stromatolites in the Neoproterozoic Wangshan Formation at the Northern Margin of the Xuhuai Basin and Their Paleoenvironmental Significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(5): 1783-1799.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.041

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.041

徐淮盆地北缘新元古界望山组叠层石类型及古环境意义

杨子杰, 李倩倩, 徐博洋, 孙风波, 郑德顺

河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454003

摘要 【目的】叠层石的特征及类型对揭示地球早期生命与地质环境的协同演化具有重要意义。华北克拉通东南缘徐淮地区新元古界望山组叠层石广泛发育, 叠层石宏微观特征及其对沉积环境的响应机制与古气候指示意义尚不明确。【方法】以望山组叠层石为研究对象, 通过叠层石宏微观特征分析, 结合主量元素和碳氧同位素分析, 系统划分望山组叠层石的沉积相带, 重建其与古环境的协同演化关系, 并探讨叠层石生长的主控因素。【结果】望山组主要赋存柱状、波状及纹层状三种类型叠层石。地球化学数据表明, $\delta^{13}\text{C}$ 值介于+2.61‰~+6.26‰, 呈现出三个上升和下降的周期。 P_2O_5 含量与 Al_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 及 SiO_2 呈弱相关性, 且 P_2O_5 含量旋回峰值层位常伴生风暴成因的竹叶状砾屑及叠层石富集。 Fe/Mn 值及 Ca/Mg 值的变化指示沉积期内气候变化频繁。【结论】望山组叠层石的形成是生物与环境因素共同作用的结果, 其繁盛期与干旱气候背景下的浅水环境存在耦合关系。微生物的代谢活动及相互作用制约叠层石的微观形态。陆源碎屑输入强度、风暴事件在一定程度上调控微生物生态演替; 可容纳空间、光照强度和水动力环境因素影响叠层石的宏观形态。该研究为新元古代生命与环境协同演化提供了新证据。

关键词 叠层石; 古环境; 望山组; 新元古界; 徐淮盆地

第一作者 杨子杰, 男, 2004年出生, 本科, 地质学, E-mail: yzj32062588371@outlook.com

通信作者 郑德顺, 男, 教授, E-mail: zhengdeshun@126.com

中图分类号: P534.3 P588.24^{*8} **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0550(2026)05-1783-17

0 引言

叠层石是以蓝细菌为主的微生物在生长活动过程中黏附和沉淀矿物质或捕获矿物颗粒而形成的一种生物沉积构造(Walter, 1976)。作为地球上最古老的微生物生态系统之一, 其形成过程记录了地球早期生命与地质环境的协同演化(曹瑞骥和袁训来, 2009; 常玉光等, 2012; 李倩倩和郑德顺, 2023; Yuan *et al.*, 2025)。尤其在新元古代叠层石经历了从短暂繁盛到全球性衰退的转折, 这一演化轨迹与罗迪尼亚超大陆裂解、“雪球地球”事件、大气氧含量跃升及埃迪卡拉纪后生物辐射等重大地质事件在形成时间上耦合(Peters *et al.*, 2017)。通过对该时期叠层石蕴含的生物与环境信息进行深入解析, 有助于揭示

当时环境变化的影响因素, 更能为探究生命与环境的协同演化机制提供重要依据。

叠层石的宏微观特征能够有效记录其生长环境的关键参数, 包括水深、物质来源、水动力条件和光照强度等环境因素(苑鼎成等, 2024)。通常认为环境因素控制着叠层石宏观形态, 而微观特征则归因于微生物作用(Grotzinger and Knoll, 1999; 贾志海等, 2008; Planavsky and Grey, 2008; Zhang *et al.*, 2023a, 2023b)。部分学者采用地球化学分析的方法, 进一步约束了前寒武纪叠层石形成的古环境, 有效解译了叠层石中所蕴含的关键生物-环境演化信息(闵隆瑞等, 2002; Yuan *et al.*, 2025)。同时, 现代环境中的叠层石分布局限, 通过古今叠层石的对比研究, 不仅可定量评估环境参数对叠层石形态的调控机制,

收稿日期: 2025-04-07; 修回日期: 2025-09-07; 录用日期: 2025-11-03; 网络出版日期: 2025-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172131, 42572141)

更为理解前寒武纪沉积环境和叠层石形成机制提供了新窗口,也为研究底栖微生物群落与环境相互作用的基本原理建立了参照基础(乔丹,2020;张薇,2020;苑鼎成等,2024)。

我国新元古界发育类型丰富、保存完好的叠层石建造。徐淮盆地北缘新元古界望山组广泛发育叠层石和白齿构造(贾志海等,2003;陈松等,2012;孙云鹏等,2020),但叠层石宏微观特征及其对沉积环境的响应机制与古气候指示意义尚不明确,亟须系统深入的探讨。本文通过运用叠层石宏观形态与微观组构分析方法,结合地球化学数据,分析古海洋、古气候等环境变化,进而划分沉积相类型并构建其动态演化模式,探讨叠层石对古气候和海平面变化的响应机制及其控制作用,为新元古代生物—环境协同演化研究提供新证据。

1 区域地质概况

华北克拉通是世界最古老的克拉通之一,基底由太古宙—古元古代变质杂岩体构成,其上不整合覆盖中—新元古代及显生宙沉积盖层序列(翟明国和彭澎,2007)。在中元古代晚期至新元古代早期,

沿华北克拉通东南边缘发育了一系列沉积盆地,包括朝鲜半岛的平南盆地、山东半岛的胶莱盆地、辽宁半岛的大连盆地和江苏与安徽交界处的徐淮盆地(Sun *et al.*, 2020)。

研究区位于华北东南缘徐淮盆地,在构造上位于郯庐断裂带西部及大别山活动带北部,在地层区划上属于中朝地层区的胶辽徐淮分区(Wan *et al.*, 2019)。区内出露的地层以元古界和下古生界为主,地层保存良好,其中淮北群不整合覆于太古宇泰山群之上,与上覆寒武系猴家山组平行不整合接触,共有兰陵组、新兴组等13个组(Xiao *et al.*, 2014)。望山组整体为碳酸盐沉积,上覆于史家组灰绿色钙质页岩,下伏于金山寨组黑色砾岩(图1c)(贾志海等,2003;洪天求等,2004)。史家组最年轻单颗粒碎屑锆石 LA-ICP-MS $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 910 ± 10 Ma、 953 ± 10 Ma,最年轻峰值年龄为 950 Ma(庞科等,2021)。对侵入望山组的基性岩墙进行的锆石 U-Pb 测年结果显示,SHRIMP $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 锆石年龄为 897 ± 16 Ma, LA-Q-ICP-MS $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 锆石年龄为 890 ± 14 Ma(王清海等,2011)。基于上述精确的年代学数据,结合区域地质背景,推测出望山组的沉积时代应介于 910~890 Ma。

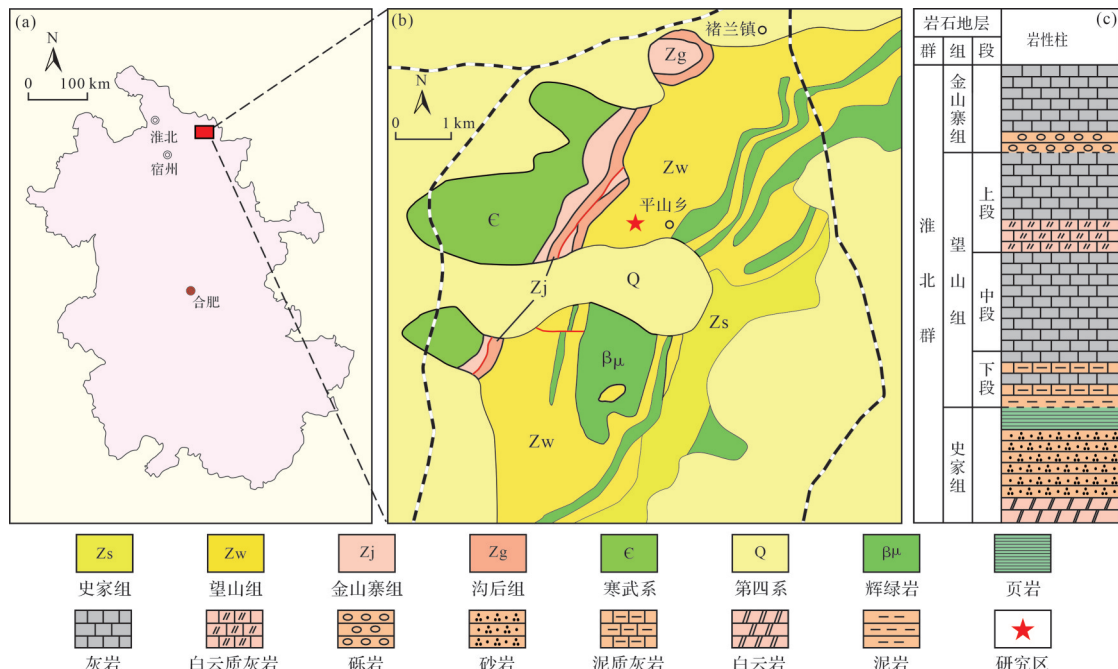


图1 研究区位置图及望山组地层柱状图

(a)研究区位置图(底图据自然资源部标准地图服务网站,审图号GS(2019)3266号);(b)研究区区域地质图;(c)淮北群望山组地层柱状图

Fig. 1 Location of the study area and stratigraphic column of the Wangshan Formation

(a) location map of the study area (base map from the Standard Map Service website of the Ministry of Natural Resources, Map Review Number GS(2019)3266); (b) regional geological map of the study area; (c) stratigraphic column of the Wangshan Formation of the Huaibei Group

2 地层剖面特征

研究剖面位于安徽省宿州市褚兰乡黑土窝地区(图 1a,b),望山组出露完整,实测剖面厚 362 m,按岩性组合特征系统划分为 10 个岩层。该组整体为一套海相碳酸盐岩沉积序列,依据岩性组合与沉积构造特征可划分为下、中、上三段(图 2)。

望山组下段岩层为 9~10,厚度为 92.1 m,底部以深灰色薄层微晶灰岩与黄色薄层泥灰岩韵律互层为特征,发育连续水平纹层。向上过渡为中—薄层泥晶灰岩,含顺层分布的硅质结核,顶部突变为厚 30 cm 的砾屑灰岩层,砾屑磨圆度较好,多为板状、椭球状,分选性差,指示风暴浪改造作用;望山组中段岩层为 5~8,厚度为 157.5 m,岩性为灰色中厚层—厚

层灰岩,其中发育典型的叠层石和白齿构造;同时普遍存在多种伴生沉积构造,包括砾屑灰岩、缝合线构造、冲刷构造等。望山组上段岩层为 1~4,厚度为 112.4 m,岩性主要为浅灰色中厚层—厚层白云质灰岩、泥晶灰岩,广泛发育叠层石、白齿构造、鸟眼构造以及硅质结核等,以 0.7 m 厚的燧石质角砾岩为望山组和金山寨组的界线。

3 样品信息与测试方法

样品采自安徽省宿州市褚兰乡黑土窝剖面,按岩层自下而上取样 99 块,所有样品均取自未受风化或后期蚀变影响的新鲜露头,并尽可能避开方解石脉和肉眼可识别的次生构造,以最大限度降低表生

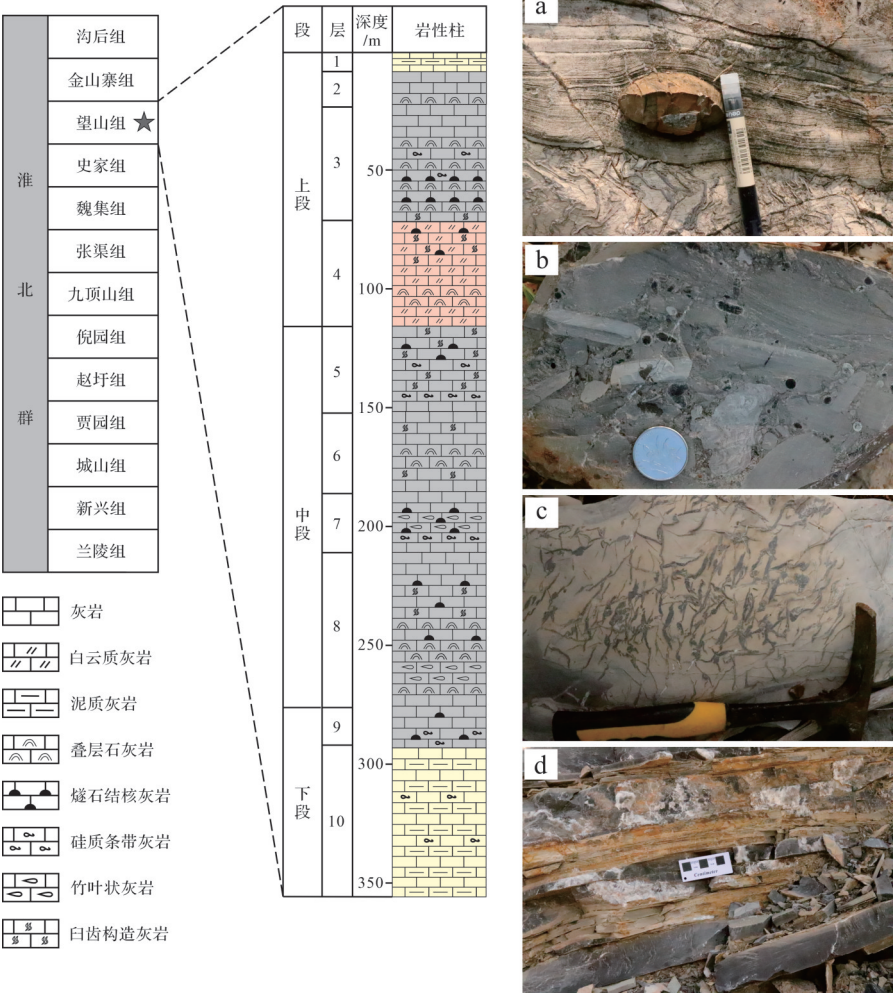


图 2 望山组实测地层柱状图及露头剖面

(a) 硅质结核顺层分布; (b) 砾屑灰岩; (c) 白齿构造; (d) 深灰色微晶灰岩与黄色薄层泥灰岩韵律互层

Fig. 2 Measured stratigraphic histogram and outcrop section of the Wangshan Formation

(a) bedded distribution of siliceous nodules; (b) conglomeratic limestone; (c) molar-tooth structure; (d) rhythmic interbedding of dark gray micritic limestone and yellow thin-bedded marlstone

风化等作用对样品后期处理的干扰。室内处理阶段,筛选出无次生脉体、未受蚀变的岩石碎块用于主量元素和碳氧同位素分析,利用手持式牙钻钻取岩石碎块的粉末样品。本次室内研究所进行的分析测试样品包括50件薄片样品用于岩相学观察、20件用于主量元素和碳氧同位素分析。

岩相学观察在河南理工大学生物遗迹与成矿过程国际联合实验室完成,实验仪器为Carl Zeiss偏光显微镜Axioskop 40。通过单偏光、正交偏光镜观测后对薄片进行全区拍照。

主量元素测定采用熔片X荧光光谱法(XRF),在科荟测试(天津)科技有限公司完成,所用仪器为岛津XRF-1800。将样品粉末在1000℃马弗炉中灼烧3h,计算烧失量(LOI)。分析前,将样品粉末与助熔剂混合在1150℃熔样炉中熔融14min制作熔融玻璃盘。冷却后,将玻璃片取出以备XRF测试。在分析过程中使用了多个国际标样(GBW07105、GBW07111和GBW07112),这些标准样品的大多数氧化物的测量值和推荐值之间的相对差异小于±1%。

碳酸盐碳、氧同位素分析在中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室完成,实验仪器为Thermo Fisher MAT 253型稳定同位素质谱仪。通过对重复样的检测显示其 $\delta^{13}\text{C}$ 分析的外部误差低于0.06‰, $\delta^{18}\text{O}$ 分析的外部误差低于0.1‰。对大理石及方解石标样(GBW04416和GBW04417)的测试结果显示其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测试精度分别优于0.02‰和0.06‰,试验结果采用VPDB标准。

4 叠层石宏微观特征

4.1 宏观特征

对徐淮地区新元古界望山组叠层石的宏观形态特征、赋存叠层石的岩性及伴生的沉积构造进行系统研究,将该地区叠层石分为柱状、波状和纹层状3种类型。

柱状叠层石:岩性为浅灰色—灰色泥晶灰岩,伴生构造有硅质结核、交错层理、侵蚀面构造等。望山组中段底部依次发育平行分叉(图3a)和规则长圆柱状(图3b)叠层石,两者形态相似,仅分叉方式不同。前者具平行分叉,部分柱体可见多次分叉,分叉前母柱体有轻微膨大趋势,柱体高度为5~8cm,直径约3cm;后者未见分叉,柱体高度为10~13cm。叠层石

相邻柱体平行排列,常具收缩和膨胀特征。柱体具单层壁,侧部沉积物切割不明显,偶见少量檐和连层。相邻柱体间距为3~6cm。纹层对称性一般,继承性较好。望山组上段依次发育不规则柱状、穹形短柱状、棒状和散开分叉状叠层石,伴生鸟眼构造。不规则柱状叠层石(图3c)形态复杂多样,侧部不平整,帽檐较发育,柱体高度4~10cm,直径约4cm,柱体间距为1.0~3.5cm。穹形短柱状叠层石(图3d)簇拥状紧密生长,柱体高度为3~4cm。棒状叠层石(图3e)多数高度约为7cm,直径约为4cm。体侧不具壁,相邻柱体间距多数大于3cm。纹层对称性和继承性较差。散开分叉叠层石(图3f)母柱体底部直径约2cm,向上呈放射状生长。柱体具多次分叉,不具壁。纹层多为不规则带状,并具波状起伏。

波状叠层石(图3g):主要分布于望山组上段底部,岩性为白云质灰岩。纹层形态垂向上自下而上由较为平坦过渡为波状起伏,纹层厚度变小。两侧破碎较为严重,破碎处多被泥质充填。明暗纹层相间分明,纹层厚度介于1~2mm,层间偶见泥质夹层,继承性和横向连续性较差。

纹层状叠层石(图3h):主要分布于望山组上段底部和中段中部。岩性为浅灰色白云质灰岩,纹层横向连续且起伏较小,继承性好。亮暗纹层相间分布,厚度小。偶见硅质结核顺层产出,形态为规则椭圆状,长轴方向与纹层一致。

4.2 微观特征

望山组下段中识别出藻类丝状体(图4a),颜色为褐红色,丝体多呈单体或交织状生长,长0.2~0.4mm。这些丝状体分布在亮晶方解石基质之中,几乎不含其他杂质。丝状藻类通常被认为是较深水环境中微生物席的主要构建者,但研究区却缺乏典型的微生物席发育特征,说明望山组下段水深可能已经超过了叠层石生长所需要的水深(石敏,2014)。

望山组中段纹层状叠层石发育壳层状微构造,纹层横向连续,亮层与暗层渐变过渡,并且交替有规律。暗色纹层厚度为0.05~0.10mm,可见过渡界面(图4b),垂向上由等厚互层(单层0.05~0.10mm)过渡为厚亮层(0.3~0.5mm)与薄暗层(0.02~0.05mm)交替,界面之上暗层有机质含量降低,亮层石英含量增加。

望山组中段柱状叠层石,纹层呈连续—断续带状,厚度介于0.2~0.5mm,暗色纹层形态极不规则,

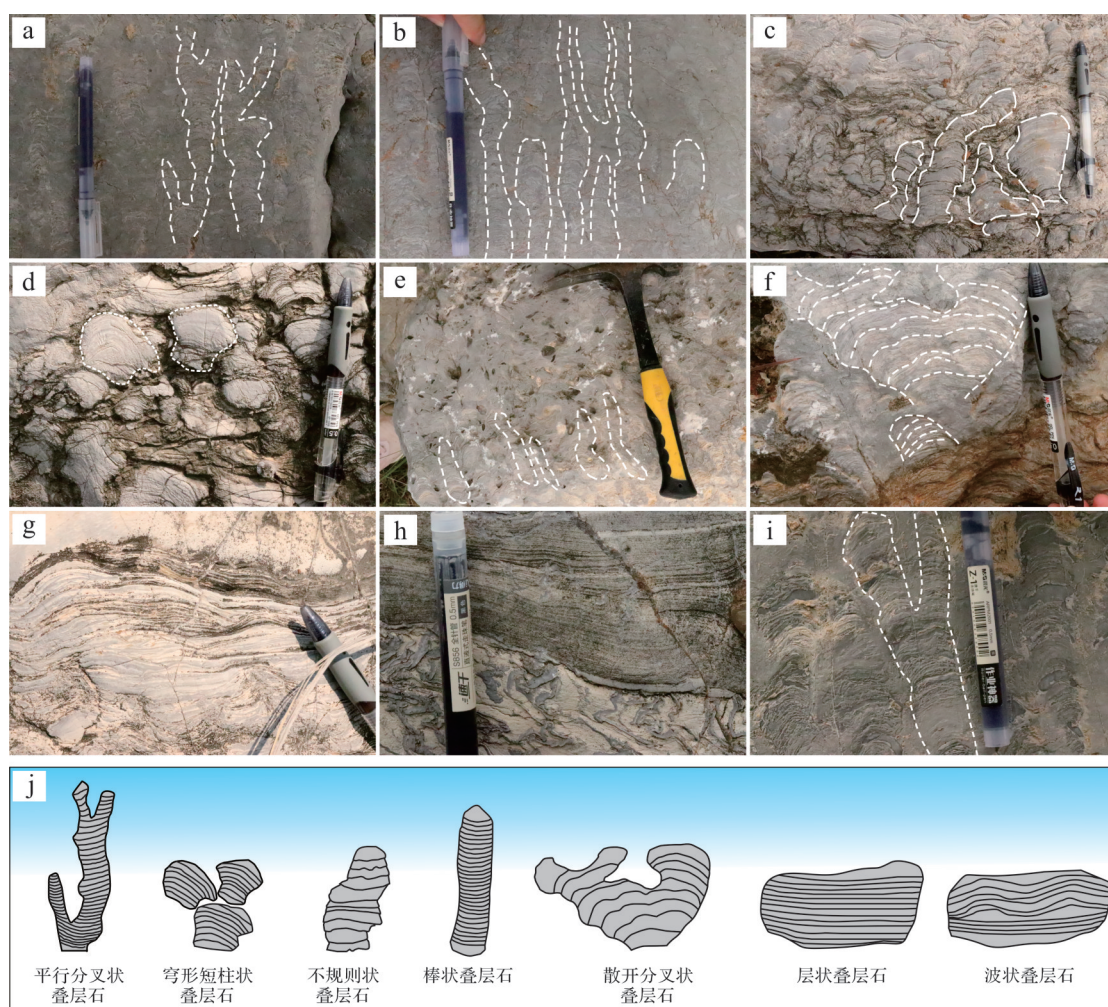


图3 徐淮地区望山组叠层石类型及宏观特征

(a)规则长圆柱状叠层石;(b)平行分叉叠层石;(c)不规则柱状叠层石;(d)穹形短柱状叠层石;(e)棒状叠层石;(f)散开分叉叠层石;(g)波状叠层石;(h)水平纹层状叠层石;(i)分叉状叠层石;(j)叠层石素描图

Fig. 3 Types and macroscopic characteristics of stromatolites in the Wangshan Formation, Xuhuai area

(a) regular long cylindrical stromatolites; (b) parallel bifurcated stromatolites; (c) irregular columnar stromatolites; (d) dome-shaped short columnar stromatolites; (e) rod-shaped stromatolites; (f) scattered bifurcated stromatolites; (g) wavy stromatolites; (h) horizontal laminated stromatolites; (i) bifurcated stromatolites; (j) sketch of stromatolites

横向上呈断续状,主要由泥晶碳酸盐矿物及有机质组成。柱间发育鲕粒、板状砾屑及藻类团块(图4c),鲕粒圈层结构特征明显,主要为表皮鲕,同心层厚度小于核心,核心为硅酸盐矿物。

望山组上段柱状叠层石发育斑点状微细构造(图4e)、气孔微细构造。纹层多呈连续—断续带状(图4f,g)。暗色层与浅色亮层交替出现,呈渐变过渡关系,继承性差。暗色纹层呈条带状,顶界凹凸不平,底界较为平整,厚度介于0.3~0.7 mm,主要由藻团块和泥晶级碳酸盐岩矿物组成,偶见黄铁矿沿暗层集中分布(图4d)。亮色纹层厚度不稳定,0.05~1.00 mm不等,主要由粉晶级碳酸盐岩矿物组成。纹层间可见暗色微球粒,形态和大小差别不大,呈球

状,相互黏结,多集中于暗色纹层中呈条带状分布,部分不均匀散落于亮色纹层中,柱间多为竹叶状砾屑和藻团块充填,砾屑多为椭圆状、板状,分选差,呈次棱角—次圆状。柱状叠层石轴部纹层曲率高,部分暗色纹层呈中间厚两端尖灭的透镜状(图4f),纹层弧度较下部增加,亮层厚度较为均匀。在曲率较大的纹层内发育窗格构造(图4h)。

5 地球化学特征

5.1 主量元素特征

20个岩石样品主量元素测试结果如表1所示, SiO_2 含量介于1.05%~12.50%,平均值为3.68%; CaO

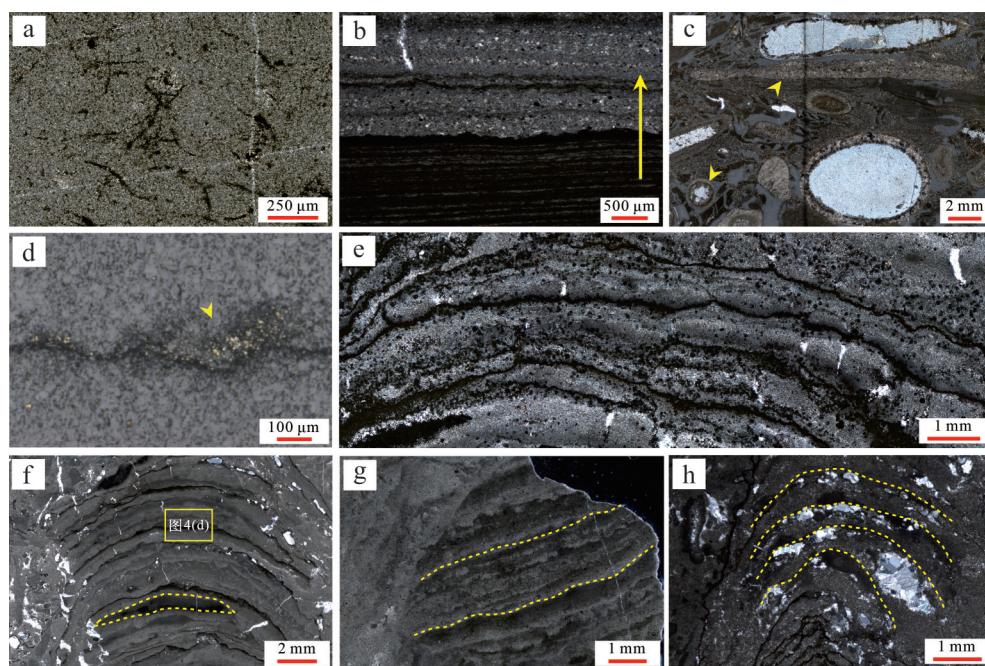


图4 徐淮地区望山组叠层石显微镜下特征

(a)藻类丝状体弯曲缠绕,密集分布,正交偏光;(b)层状叠层石纹层形态沿黄色箭头方向由等厚互层过渡为厚亮层与薄暗层交替,正交偏光;(c)黄色箭头指向板状砾屑和鲕粒,正交偏光;(d)黄色箭头指向暗色纹层中的黄铁矿,正交偏光;(e)斑点状微细构造,正交偏光;(f)上段柱状叠层石,暗色纹层呈中间厚两端尖灭的透镜状,正交偏光;(g)连续—断续带状微构造,纹层平缓宽阔,正交偏光;(h)窗格构造,正交偏光

Fig. 4 Microscopic features of stromatolites in the Wangshan Formation, Xuhuai area

(a) curved and entangled filamentous algae densely distributed, cross-polarized light (XPL); (b) laminar stromatolite showing a transition (along yellow arrow) from isopachous alternations of light and dark layers to alternating thick light layers and thin dark layers, XPL; (c) yellow arrows indicate tabular intraclasts and oolites, XPL; (d) yellow arrow pointing to pyrite within dark laminae, XPL; (e) spotted microstructure, XPL; (f) upper section columnar stromatolites, dark layers in the form of a lens with a thick middle and tapering ends, XPL; (g) continuous-discontinuous banded microstructure, gentle and wide layers, XPL; (h) window lattice structure, XPL

含量介于34.05%~54.50%,平均值为49.71%;MgO含量介于0.35%~16.83%,平均值为3.28%;K₂O含量介于0.03%~0.86%,平均值为0.19%;Al₂O₃含量介于0.16%~2.69%,平均值为0.65%;全铁含量介于0.03%~1.49%,平均值为0.31%。上述主量元素相对富集,而Na₂O、MnO、P₂O₅、TiO₂的含量均值都小于0.1%。

CaO与其他常量元素呈不同程度的负相关。TFe₂O₃与MnO、Al₂O₃、K₂O、TiO₂、SiO₂含量呈强正相关(图5)。垂向上具有相似的变化(图6),趋势大致与CaO的垂向变化相反,总体上在望山组中段呈现小幅的上升—下降的波动,在上段底部维持低值波动,在上部突然增加。

5.2 碳氧同位素特征

望山组碳酸盐岩碳氧同位素分析结果如表1所示, $\delta^{18}\text{O}$ 值范围介于-7.34‰~-5.44‰,平均值为-6.20‰, $\delta^{13}\text{C}$ 值范围介于+2.61‰~+6.26‰,平均值为+3.66‰。

剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化点线图表示(图7a), $\delta^{13}\text{C}$ 值有

两次明显的正向偏移和三次负向偏移。在望山组下段有一次负向偏移,负向偏移幅度达1.35‰。随后在中段出现了正向偏移,增加量达1‰,达到峰值后出现又一次负向偏移,偏移值为1.44‰。第二次正向偏移发生在望山组上段,从底部的+3.09‰至峰值+6.26‰,又经过长时间的下降, $\delta^{13}\text{C}$ 回落到+2.61‰。

6 讨论

6.1 成岩作用影响评价

前人研究表明,在变质作用、成岩作用等沉积后作用中,碳酸盐矿物的原始同位素组成可能受到一定程度的影响而发生改变(Bickle *et al.*, 1997)。成岩作用可能导致碳酸盐矿物 $\delta^{13}\text{C}$ 及 $\delta^{18}\text{O}$ 值的协同降低(Bekker *et al.*, 2006)。因此, $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值的相关性常作为评估碳酸盐岩成岩改造程度的重要指标。通过对望山组样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 进行相关性分析,结果显示两者之间缺乏明显的协同演化关系(图7b),表明望山组 $\delta^{13}\text{C}$ 数据可用来反映沉积期古环境信息。

表1 徐淮地区望山组样品碳氧同位素组成及主量元素含量

Table 1 Carbon, oxygen isotope compositions and major element contents of Wangshan Formation samples in the Xuhuai area

样品	稳定同位素‰		主量元素%										Fe/Mn	MgO/CaO		
	δ ¹³ C	δ ¹⁸ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	CaO	TFe ₂ O ₃	MnO			LOI	TOTAL
WS-16	3.75	-5.73	6.832 2	1.712 0	0.686 0	0.017 5	0.515 4	0.061 8	0.108 8	50.115 9	0.380 3	0.035 6	39.598 7	100.064 2	4.740	0.014
WS-20	2.61	-5.53	12.500 9	2.685 8	3.243 8	—	0.862 5	0.048 4	0.153 6	42.802 3	1.491 7	0.034 9	36.351 8	100.101 1	18.967	0.076
WS-25	3.39	-5.91	3.542 5	0.674 6	0.440 9	—	0.198 6	0.031 4	0.055 2	53.368 0	0.344 7	0.026 8	41.653 7	100.331 6	5.707	0.008
WS-30	3.26	-6.39	3.960 3	0.712 7	0.790 2	0.036 8	0.219 4	0.037 5	0.058 5	52.550 7	0.265 3	0.031 7	41.243 5	99.906 6	3.714	0.015
WS-34	3.33	-5.72	1.692 8	0.870 4	10.100 4	0.031 2	0.273 2	0.030 7	0.061 7	42.249 9	0.617 1	0.024 7	43.605 1	99.557 2	11.087	0.239
WS-35	3.62	-6.85	2.833 0	0.784 2	16.829 2	0.034 2	0.243 1	0.033 1	0.052 9	34.051 4	0.568 2	0.046 7	44.495 5	99.971 5	5.399	0.494
WS-46	4.39	-5.63	5.402 8	0.833 8	8.303 9	0.054 7	0.237 7	0.044 3	0.064 0	42.448 7	0.258 0	0.016 6	42.144 1	99.808 6	6.897	0.196
WS-48	6.26	-6.84	2.169 7	0.425 5	0.759 9	0.013 8	0.118 5	0.030 0	0.048 5	53.859 9	0.220 1	0.012 2	42.358 3	100.016 4	8.006	0.014
WS-52	3.65	-5.80	2.457 2	0.395 7	2.870 1	0.001 7	0.107 0	0.032 3	0.044 6	50.635 6	0.133 9	0.010 9	42.634 7	99.323 7	5.451	0.057
WS-53	3.72	-6.72	1.313 6	0.156 2	2.215 1	—	0.032 4	0.018 7	0.033 5	52.963 6	0.201 6	0.022 0	43.436 6	100.315 4	4.066	0.042
WS-57	3.09	-6.51	6.291 2	0.331 2	2.680 1	0.003 4	0.089 1	0.086 8	0.043 3	49.714 4	0.175 2	0.012 2	40.906 4	100.333 3	6.373	0.054
WS-60	3.60	-5.44	4.062 1	0.526 4	4.833 1	0.011 7	0.159 0	0.043 2	0.053 6	48.192 3	0.154 6	0.011 6	42.332 3	100.379 9	5.914	0.100
WS-64	2.96	-6.44	5.600 1	0.532 2	0.504 0	0.027 4	0.147 1	0.029 0	0.048 2	52.468 1	0.079 0	0.009 9	40.856 5	100.301 5	3.541	0.010
WS-66	2.63	-7.34	3.290 0	0.490 9	7.006 0	0.033 0	0.136 0	0.027 2	0.048 4	46.111 8	0.321 4	0.013 8	43.113 8	100.592 3	10.335	0.152
WS-68	4.07	-5.76	1.229 6	0.496 7	0.351 0	0.038 3	0.122 4	0.050 6	0.050 7	54.498 0	0.282 3	0.008 0	42.664 7	99.792 3	15.659	0.006
WS-69	3.87	-5.77	1.237 9	0.257 9	0.575 7	—	0.059 9	0.026 8	0.038 4	54.496 8	0.176 3	0.013 7	43.094 1	99.977 5	5.710	0.011
WS-70	3.07	-7.26	5.301 5	0.215 5	0.640 0	0.011 0	0.052 4	0.087 7	0.036 4	52.139 9	0.259 8	0.012 7	40.910 0	99.666 9	9.078	0.012
WS-73	3.48	-6.01	1.144 5	0.282 0	0.805 7	0.005 9	0.071 7	0.031 0	0.040 4	54.056 3	0.029 2	0.008 3	42.682 9	99.157 9	1.561	0.015
WS-81	3.97	-5.85	1.054 0	0.241 1	0.938 7	0.020 5	0.065 3	0.029 4	0.036 5	53.991 9	0.073 4	0.009 5	43.027 0	99.487 3	3.429	0.017
WS-93	4.42	-6.43	1.772 1	0.381 2	1.212 3	—	0.105 1	0.045 5	0.041 4	53.506 2	0.155 0	0.019 4	42.262 4	99.490 7	3.545	0.023

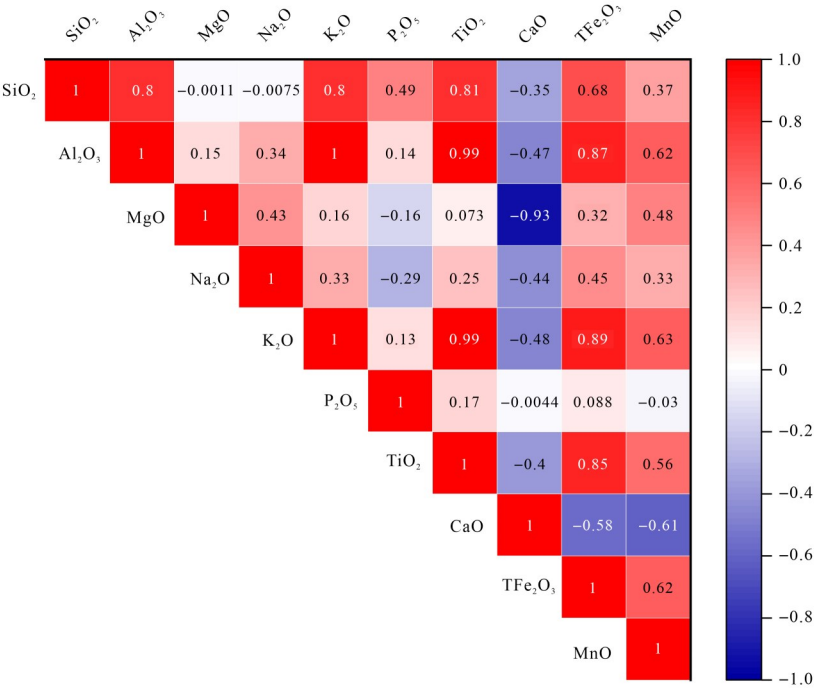


图5 徐淮地区望山组碳酸盐岩样品主量元素相关性热图

Fig. 5 Heat map of correlations between major elements in carbonate rock samples from the Wangshan Formation in the Xuhuai area

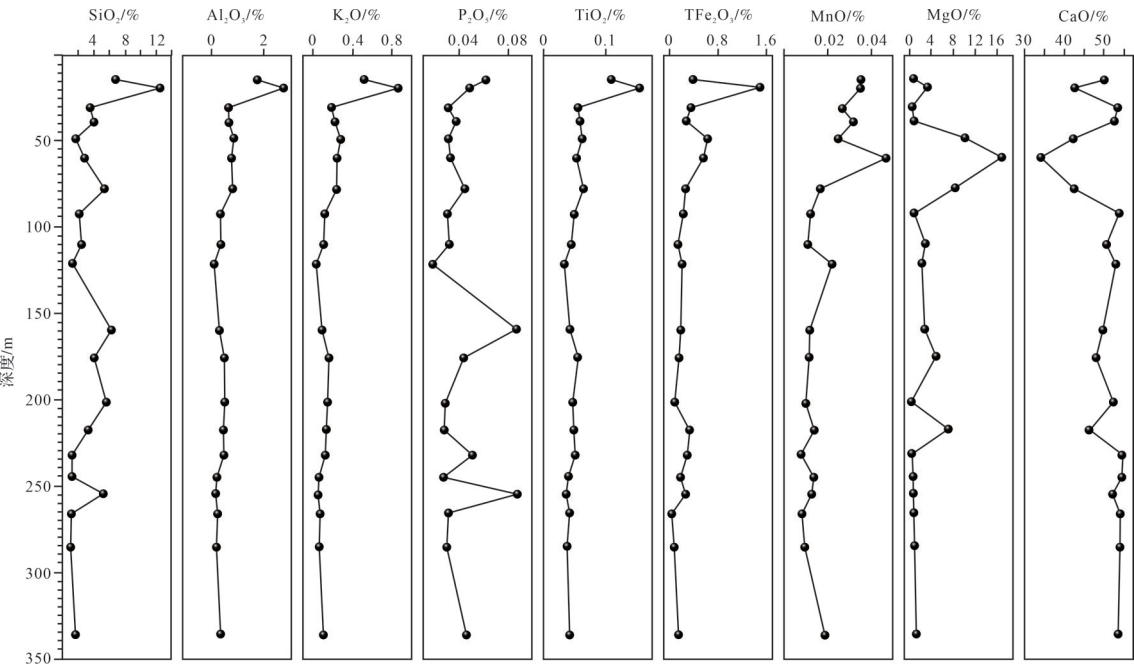
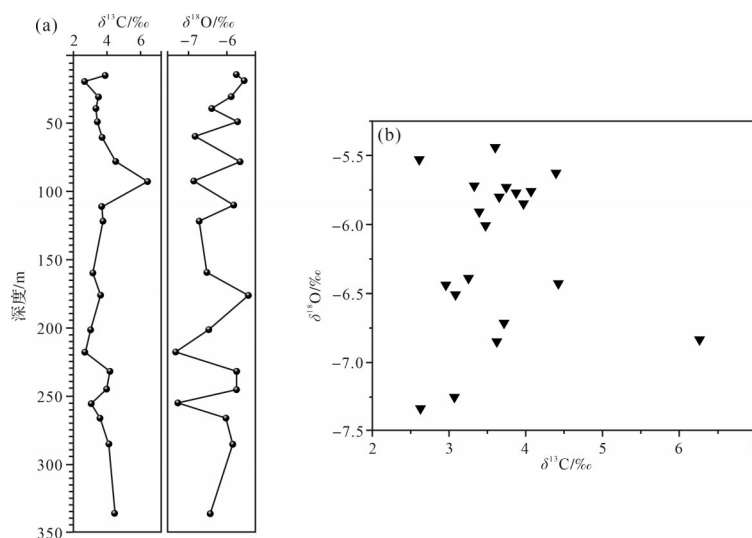


图6 徐淮地区望山组碳酸盐岩样品主量元素垂向分布

Fig. 6 Vertical distribution of major elements in carbonate rock samples from the Wangshan Formation in the Xuhuai area

同时 $\delta^{18}\text{O}$ 普遍大于 -10‰ ,也表明样品成岩改造作用微弱(Banner and Hanson, 1990)。此外,MgO/CaO值亦可作为碳酸盐岩蚀变程度的判断依据。当MgO/CaO小于0.125时,说明碳酸盐矿物未发生成岩蚀变作用(任影等,2018;Yuan *et al.*, 2025)。本研究中,样

品WS-34、WS-35、WS-46和WS-66的MgO/CaO值分别为0.239、0.494、0.196和0.152。除上述4个样品外,其余望山组样品的MgO/CaO值均显著小于0.125,进一步指示这些样品未发生明显成岩蚀变作用。

图7 徐淮地区望山组样品 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 及其相关性(a)望山组样品 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 点线图;(b)望山组 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 相关性Fig. 7 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ and their correlations in samples from the Wangshan Formation, Xuhuai area(a) $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ point-line diagram of the Wangshan Formation samples; (b) correlation between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the Wangshan Formation

综上所述,望山组碳酸盐岩整体成岩改造作用较弱,其地球化学指标能够较为可靠地反映原始沉积环境特征。

6.2 沉积相划分

根据望山组岩性及赋存叠层石的不同形态和生物特征对沉积相进行分析(图8a)。望山组下段底部以深灰色薄层微晶灰岩与黄色薄层泥灰岩韵律互层为特征,微细水平层理十分发育,指示低能静水的水动力条件,微观下观察到褐红色藻类丝状体(图4a),指示其形成于潮下低能带。向上渐变为泥晶灰岩夹砾屑灰岩层,砾屑呈次棱角状、叠瓦状排列(图2b),表示其可能位于风暴浪基面以上,陆源碎屑减少,反映水体变浅。

中段岩性主要为浅灰色中厚层状灰岩。第8层发育柱状叠层石(图3a),层位底部叠层石具多次不增宽平行分叉,向上过渡为未分叉叠层石,且柱体高度减小,表明水动力条件逐步减弱。叠层石纹层多为连续—断续状,体侧局部具单层壁,且柱间发育鲕粒、板状砾屑及藻类团块,指示潮间带底部高能沉积环境(范正秀等,2018),有利于微生物群落垂向生长形成高柱状叠层石。第7层可见多层砾屑灰岩层显示其为近风暴潮沉积(洪天求等,2004),代表望山组中部的碳酸盐岩沉积过程中受到了一定程度的风暴作用影响。第6层出现的水平纹层状叠层石纹层致密(图3h),延展性较好,无明显波动起伏,指示台地边缘潮滩环境中的潮间带上部或潮上带。中段上部

广泛发育臼齿构造,该构造多形成于潮间带环境,而在较深水环境中通常缺失。一种可能的解释是,由甲烷生产产生的局部气压必须通过静水压力来平衡,因此较深的水位不利于臼齿构造的形成(Shen *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2023)。整体而言,望山组中段记录了潮间带—潮上带的演化序列。

研究剖面显示望山组上段碳酸盐岩沉积序列具有显著的垂向相变特征。岩性组合自下而上呈现白云质灰岩到灰岩,再到灰岩与泥灰岩互层的岩性过渡序列。剖面底部发育纹层状叠层石及硅质结核。叠层石纹层具良好的继承性,表现为平直致密并可稳定侧向延伸;硅质结核形态较为规则,呈顺层产出,其形成未受明显扰动。整体特征指示其为浅水低能环境,符合潮上带或潮间低能带的沉积特征。此阶段沉积受潮汐主导,水体能量微弱,白云质灰岩的形成可能与潮坪环境的周期性暴露及早期成岩白云化作用有关。中部层位开始出现波状起伏的波状叠层石(图3g),该类型通常发育在潮间坪环境,与水平纹层状叠层石相比则需要更高的水体能量(乔丹, 2020),泥质和碎屑组分相对减少,伴生有鸟眼构造,指示水体能量增强并伴随周期性暴露。至上部过渡为柱状叠层石,其形态复杂,纹层多具连续—断续带状微构造,斑点状微细构造(图4e),纹层厚度不稳定,继承性较差,叠层石柱体间常充填不规则砾屑,反映了长期强动荡的浅水高能环境,推测沉积环境已进入受波浪作用主导的潮间高能带。

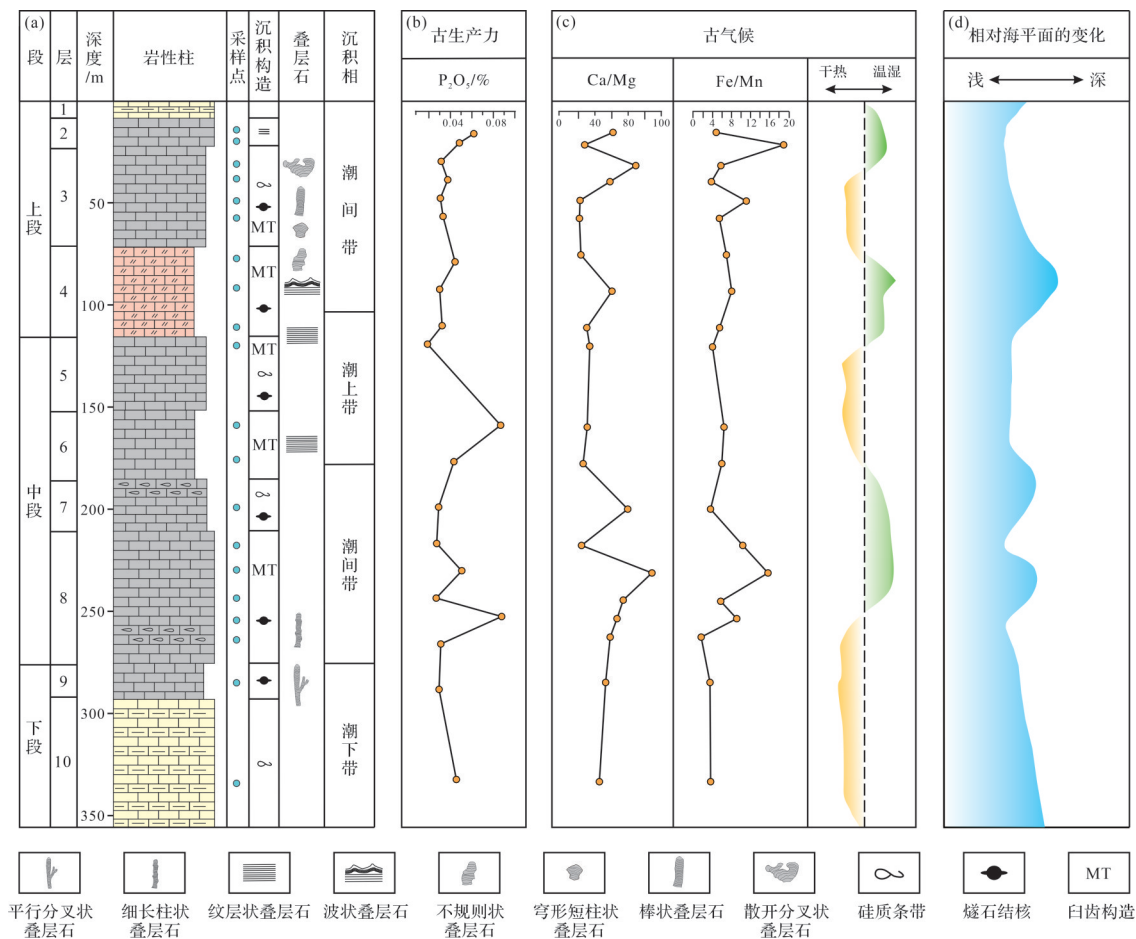


图8 徐淮地区望山组古环境演化图

(a)望山组沉积环境演化图;(b)古生产力纵向变化特征;(c)古气候纵向变化特征;(d)海平面波动曲线

Fig. 8 Paleoenvironmental evolution diagram of the Wangshan Formation in the Xuhuai area

(a) evolution diagram of the sedimentary environment of the Wangshan Formation; (b) vertical variation characteristics of paleoproductivity; (c) vertical variation characteristics of paleoclimate; (d) sea-level fluctuation curve

6.3 古环境分析

6.3.1 富营养事件

磷(P)作为生物代谢活动的关键营养元素,是重建古生产力的重要地球化学指标(沈俊等,2011)。Al、Si等高场强元素在海水中的滞留时间短,通常需通过陆源碎屑搬运进入海洋,而研究区 P_2O_5 含量与 Al_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 及 SiO_2 呈弱相关性(图5),暗示其来源可能以深部海水上升流为主,而非陆源输入。望山组上段 P_2O_5 含量整体呈上升趋势,中段则呈现三个显著的“上升—下降”旋回(图8b)。值得注意的是,旋回峰值层位常伴生风暴成因的竹叶状砾屑及叠层石富集,推测是风暴事件引发的垂向水体混合将深层富磷营养盐输送至透光层(李天义等,2008; Ma *et al.*, 2008; 丛帅等,2022),从而促进蓝细菌等微生物的繁盛。

6.3.2 古水深

根据沉积相分析结果,望山组下段表现为水体逐渐变浅,由潮下带向潮间带过渡;中段水位继续下降,沉积相转变为潮上带;随后海平面再次上升,使沉积环境回归潮间带。地球化学指标可作为对沉积相解释的补充。研究表明,碳酸盐岩碳同位素组成特征可用于全球海平面变化表征(王传尚等,2014; 赵宗举,2015; 白翔宇等,2022; 赵玉茹等,2024)。当发生全球性海平面上升事件时,深水区易于富 ^{12}C 有机质的埋藏保存,从而大量消耗海洋系统中的 ^{12}C 。上述过程导致相应的浅水碳酸盐岩 $\delta^{13}C$ 值升高(李儒峰和刘本培,1996; 田辉等,2021)。望山组 $\delta^{13}C$ 值在剖面底部小幅减小,表明此时海平面小规模下降。顶部则呈现显著正偏,对应快速海侵事件。期间发育三个升高—降低旋回,对应于三次完整的海平面

升降事件(图8d)。前人研究认为部分主量元素(Al_2O_3 、 K_2O 、 SiO_2 及 TiO_2)可作为判别陆源输入强度的有效指标(赵玉茹等,2024)。其中 Al_2O_3 、 K_2O 和 TiO_2 主要来源于陆源碎屑物质,并且它们主要赋存于陆源泥质中。在深水和低能环境中,通常由于细粒陆源碎屑和黏土的混入造成 Al_2O_3 、 SiO_2 和 TiO_2 等含量增加。在望山组的中段和上段 Al_2O_3 、 SiO_2 和 TiO_2 含量呈现显著增加趋势,反映望山组沉积中期和晚期经历了两次明显的水体加深事件,与 $\delta^{13}\text{C}$ 所反映的海平面波动特征具有良好的一致性。值得注意的是, Al_2O_3 、 K_2O 、 SiO_2 及 TiO_2 与 CaO 呈强负相关,指示陆源物质输入会抑制碳酸盐岩的沉积(汪凯明和罗顺社,2009;何雨旻等,2014;潘明等,2015)。

6.3.3 古气候

碳酸盐岩中的 Fe/Mn 可反映古气候的变化。 Fe 在潮湿环境中易以氢氧化铁胶体形式快速沉淀, Mn 在炎热环境水体强烈蒸发时会大量沉淀。因此沉积物中 Fe/Mn 的高值对应温湿气候,低值是干热气候的响应(宋明水,2005;任影等,2018;赵玉茹等,2024)。望山组样品 MnO 、 TFe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 和 SiO_2 含量呈较强正相关(图5),表明望山组铁、锰元素主要来源于陆源物质的供给,保留了原始沉积信号。 Fe/Mn 在下段和中段底部呈现先增加再减小的趋势,之后回归低值且波动较小。在望山组上段又呈现一个增加—减小的旋回。 Ca/Mg 同样也是气候变化的良好指示剂(田洋等,2014;任影等,2018),与 Fe/Mn 变化趋势相似,望山组下段样品 Ca/Mg 值较低,保持缓慢上升。在中段底部表现为极低值和极高值交互出现的剧烈波动特征。中段旋回结束后在垂向上保持低值,代表大气降水量减少,蒸发作用增强,气候由于干旱背景下相对湿润气候条件向该时期干旱气候的转变。上段波动剧烈旋回结束后又开始迅速上升。望山组样品 Fe/Mn 和 Ca/Mg 在剖面上的共同指向是在海平面高的层位保持相对高值,包括中段和上段的底部及顶部,指示温暖湿润的气候。而在海平面低的层位保持低值,包括下段和中段中部,指示干热的气候条件(图8c)。

6.4 叠层石与古环境的协同演化

望山组早期处于潮下带低能环境,受水体较深、循环受限等因素影响,生物群落发育程度较低,仅存少量丝状体藻类。该时期海平面持续下降,陆源碎屑供应量递减。

沉积阶段中期呈现显著的海平面高频振荡特征。沉积环境先过渡至潮间高能带,较强的潮汐和波浪作用在加强陆源物质淘洗的同时,形成了大量的浪成砾屑和鲕粒,透光性改善为蓝细菌等造席微生物的繁盛提供了条件,对应发育多次平行分叉的细长柱状叠层石,其侧部发育单层壁,沉积物切割不明显,说明在叠层石生长期间沉积物降落速度缓慢。海平面的继续下降导致水动力减弱,不分叉柱状叠层石逐渐发育,反映出叠层石建造对能量梯度变化的形态适应。随后气候向温暖湿润转变,海平面短暂上升,而后经历短暂海退,在此期间高频风暴事件驱动垂向水体混合,深层富磷海水涌上,微生物繁盛,促进柱状叠层石的建造,但柱体高度显著减小(图3i),揭示了水体变浅对可容纳空间的限制。此后海平面振荡加剧,沉积环境向潮间—潮上过渡带迁移,干旱炎热气候背景下,持续海退导致叠层石群落经历短暂生态位空缺后,以层状形态实现广泛定殖。海平面的下降在拓宽浅海生物宜居环境的同时也增大陆地面积,增加陆源输入,这与该时期形成的层状叠层石中微观层面上频繁出现纹层形态渐变界面的现象相一致。

沉积阶段晚期气候温暖湿润,适宜陆上河流的大量发育,带来大量的淡水输入,迎来持续时间较长的海侵,沉积环境进入周期性暴露的潮间带蒸发环境,发育层状叠层石。随着水体深度持续增加,层状叠层石逐渐消失。后续气候转为干热,海退过程中,波状叠层石在白云质灰岩基底进行生长。之后叠层石由波状向柱状演化,高能水流塑造不规则柱体形态,且柱间充填浪成砾屑。随着海平面的进一步下降,水体能量大,风浪冲击作用较强,叠层石柱体间距显著减小,开始呈丛状聚集。末期气候回返温暖湿润促使海平面回升,依次发育棒状及散开分叉状叠层石,河流的大量发育导致大陆风化作用加剧,陆源输入剧增,这可能是之后叠层石消失的原因。

地层序列记载望山组沉积期气候变化频繁,海平面经历三次完整的海侵—海退旋回,结合其与金山寨组的不整合,可判断总体上呈现水体逐渐变浅的趋势,与华北克拉通徐淮地块同期的构造拉张事件及徐淮盆地沉积中心迁移过程相耦合(洪天求等,2004),表明区域性地壳活动通过改变古地理格局,调控了叠层石生态域的时空分布。综合古环境及叠层石演化分析表明,望山组叠层石形态分异与古环

境演化间存在显著的动态耦合关系。为深入解析新元古代叠层石对古气候振荡及海平面波动的响应机制提供了证据。纵观剖面上岩性特征及叠层石沉积特征,望山组处于徐淮盆地边缘台地,此时的台地形态、水深、气候条件为藻类微生物繁育提供适宜的环境条件,叠层石与古环境存在良好的响应,主要发育在干旱炎热气候下的浅水位,古气候控制水循环,影响陆源输入强度,进而促进或抑制微生物的繁盛,调控叠层石的生长(图9)。

6.5 叠层石生长主控因素探讨

叠层石作为地球早期生命的重要载体,前人研究表明其存在5次大规模的衰减事件,并在中一新元古代达到演化鼎盛期。叠层石衰减的原因除了一致认为的与生物进化有关外,还有一定的外界环境因素和其自身因素,如环境变迁和钙化作用的变化等。在中一新元古代叠层石研究中时常参照现代叠层石用以解释其古环境和古生态(曹瑞骥和袁训来,2006)。这些现代碳酸盐叠层石为了解前寒武纪环境和叠层石的形成提供了潜在的窗口,同时为了解底栖微生物群落如何与环境相互作用提供了基础(张薇,2020)。为深入探讨望山组叠层石形成的主控因素,现代叠层石的宏微观形态建造和环境影响是重要的借鉴。

微观结构上,现代微生物席的碳酸盐岩纹层可类比于古代叠层石的纹层构造(张薇,2020)。现代巴哈马叠层石中微生物席由碳酸盐沉淀的白色层与包含各种微生物群落(包括自养细菌和异养细菌)的非岩化有机层交替组成,微生物垫的绿色、棕色和红色层代表不同的微生物群落(Vasconcelos *et al.*,

2006)。值得注意的是,现代叠层石中由微生物席绿色藻类层捕获或黏结矿物颗粒形成的暗层随着微生物席的向上生长,进入紫红色异养细菌层并在异养细菌层内的酸性条件下溶解并重结晶(Decho *et al.*, 2005)。望山组上段潮间带柱状叠层石暗色纹层中顺层分布着细粒的黄铁矿,可能指示硫酸盐还原细菌的存在。同时纹层中发育由半自形—自形方解石充填的穹窿状孔隙。这可能指示望山组叠层石发育类似现代叠层石的多种微生物群落协同作用体系,这些微生物通过代谢活动调控碳酸盐岩的沉淀和溶解,进而驱动叠层石纹层的周期性生长(Dupraz *et al.*, 2004; 常玉光等, 2012; 胡斌等, 2014)。微生物群落的生存状态对环境变化极为敏感(常玉光等, 2013)。巴哈马 Exuma Cays 和 Highborne Cay 现代叠层石生态系统的观测结果表明(Andres and Reid, 2006),快速埋藏事件导致的微生物席消亡会直接引发叠层石衰退。望山组中段层状叠层石亮纹层增厚现象,即由等厚互层(单层0.05~0.1 mm)过渡为厚亮层(0.3~0.5 mm)与薄暗层(0.02~0.05 mm)交替,界面之上暗层有机质含量降低,亮层石英含量增加。此外,上段因陆源输入激增造成的叠层石消亡,均印证沉积环境扰动对微生物群落的决定性影响。望山组中观察到高频风暴事件对叠层石生态系统可能具有双重作用:一方面强烈的水体扰动会破坏微生物席的稳定性;另一方面风暴引发的上升流可将富营养深部海水输送到透光层,为后续的微生物勃发提供物质基础。

宏观形态上,Andres 通过研究巴哈马 Highborne Cay 及 Exuma Cays 的现代海洋叠层石,发现叠层石的

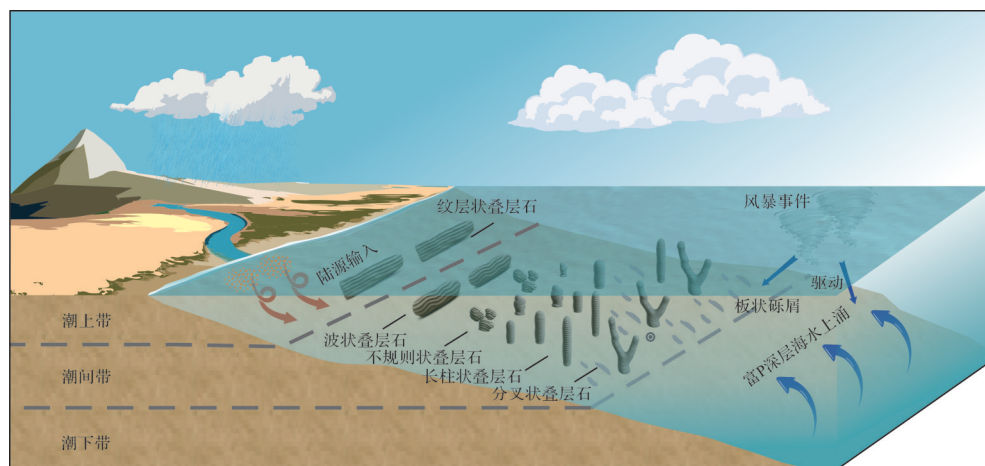


图9 徐淮地区望山组沉积模式图

Fig. 9 Sedimentary model diagram of the Wangshan Formation in the Xuhuai area

生长形态主要由水动力环境、可容纳空间和光照强度因素控制(Andres and Reid, 2006)。水动力条件控制微生物席的稳定性和形态复杂性。水动力条件越强,叠层石的类型越复杂(范正秀等, 2018),望山组叠层石沉积相分析表明柱状、波状叠层石集中发育于潮间带高能环境,其分叉复杂程度与水动力强度呈正相关,而层状类型则稳定存在于潮上带低能区,这种空间分异与现代巴哈马叠层石的生态分带规律具有可比性。不同沉积相带通过差异性的可容纳空间、水动力能量和光照强度等环境因素影响叠层石的宏观形态。可容纳空间决定了叠层石的潜在生长高度(Andres and Reid, 2006)。望山组中段由柱体高度5~8 cm的平行分叉柱状叠层石过渡为柱体高度10~13 cm的柱状叠层石,且水深相对变浅,是可容纳空间随海退过程逐渐缩小的直观记录。Ojakangas *et al.* (2023)通过构建数值模型揭示了光照驱动叠层石形态演化规律,当光照不足时,蓝藻在顶端生长最快,形成狭窄的圆锥形结构,顶端曲率半径逐渐减小。当光照过强时,顶端因光抑制生长减缓,侧翼生长更快,导致宽阔的圆顶形结构,顶端曲率半径增大。在望山组上段柱状叠层石中,叠层石纹层由宽缓状过渡为中间厚两端薄的透镜状(图4),或许指示光照条件的变化对叠层石纹层形态生长造成的影响。层状叠层石往往发育在潮上带或潮间带上部,而柱状叠层石往往发育在较深的潮间带下部或潮下带,微生物席从层状的水平扩展转变为柱状的垂向延伸可能也是适应弱光环境的体现。

通过将望山组叠层石与现代叠层石进行对比,发现望山组叠层石微生物席可能存在多种微生物共存现象,它们的相互作用及代谢活动在一定程度上制约了叠层石的微观形态。古环境与叠层石的形态结构之间存在着多尺度的响应关系。陆源碎屑输入强度和风暴事件可以在一定程度上调控微生物生态演替,而可容纳空间、光照强度和水动力环境因素则影响叠层石的宏观形态。这些研究结果不仅有助于更好地理解叠层石的形成机制,还为恢复古环境条件提供了重要线索。

7 结论

(1) 徐淮地区望山组叠层石广泛发育,根据其形态可划分为柱状叠层石、波状叠层石和层状叠层石。其中柱状叠层石形态丰富,主要有规则长圆柱状叠

层石、扁圆柱状叠层石、穹形短柱状叠层石、不规则柱状叠层石、平行分叉叠层石和散开分叉叠层石。柱状和波状叠层石发育在潮间高能带,而层状叠层石发育在潮上低能带。

(2) 望山组沉积期气候变化频繁,海平面经历了三个完整的海进—海退旋回,总体上呈现变浅的趋势。叠层石与古环境存在良好的响应关系,主要发育在干旱炎热气候下的浅水位环境,古气候控制水循环,影响陆源输入强度,进而促进或抑制微生物的繁盛,调控叠层石的生长。

(3) 望山组叠层石微生物席上可能有多种微生物共存,它们的相互作用及代谢活动在一定程度上制约了叠层石的微观形态。古环境与叠层石的形态结构存在多尺度的响应,陆源输入强度、风暴事件在一定程度上调控了微生物生态演替,可容纳空间、光照强度和水动力环境因素影响了叠层石的宏观形态。

致谢 感谢编辑部老师以及评审专家提出的宝贵意见。

参考文献(References)

- 白翔宇, 马郡伟, 夏清萍, 等. 2022. 北京西山下苇甸第三统/芙蓉统界线附近碳酸盐岩地球化学特征及古环境意义[J]. 现代地质, 36(2): 729-741. [Bai Xiangyu, Ma Junwei, Xia Qingping, et al. 2022. Geochemistry of carbonates near the Cambrian series 3-Furongian boundary and its paleoenvironmental constraints[J]. Geoscience, 36(2): 729-741.]
- 曹瑞骥, 袁训来. 2006. 叠层石[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社. [Cao Ruiji, Yuan Xunlai. 2006. Stromatolites[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press.]
- 曹瑞骥, 袁训来. 2009. 中国叠层石研究进展[J]. 古生物学报, 48(3): 314-321. [Cao Ruiji, Yuan Xunlai. 2009. Advances of stromatolite study in China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 48(3): 314-321.]
- 常玉光, 齐永安, 郑伟, 等. 2012. 河南登封寒武系叠层石组合类型及其控制因素[J]. 微体古生物学报, 29(4): 341-351. [Chang Yuguang, Qi Yong'an, Zheng Wei, et al. 2012. Assemblages and controlling factors of the Cambrian stromatolites in Dengfeng, Henan province[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 29(4): 341-351.]
- 常玉光, 齐永安, 郑伟, 等. 2013. 中国豫西寒武系馒头组叠层石的沉积特征及其古环境意义[J]. 沉积学报, 31(1): 10-19. [Chang Yuguang, Qi Yong'an, Zheng Wei, et al. 2013. Sedimentary characteristics and palaeoenvironmental significance on stromatolites of Mantou Formation in Cambrian, western Henan, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 31(1): 10-19.]
- 陈松, 傅雪海, 桂和荣, 等. 2012. 皖北新元古界望山组灰岩微量元素

- 地球化学特征[J]. 古地理学报, 14(6): 813-820. [Chen Song, Fu Xuehai, Gui Herong, et al. 2012. Geochemical characteristics of trace elements in limestone of the Neoproterozoic Wangshan Formation in northern Anhui province[J]. Journal of Palaeogeography, 14(6): 813-820.]
- 丛帅, 刘时桥, 辛姿仪, 等. 2022. 台风“巴蓬”对南海上层海洋水文特征与生态环境的影响[J]. 海洋地质前沿, 38(10): 79-86. [Cong Shuai, Liu Shiqiao, Xin Ziyi, et al. 2022. The impact of typhoon "Phanfone" on hydrological characteristics and ecological environment of the upper ocean in the South China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 38(10): 79-86.]
- 范正秀, 旷红伟, 柳永清, 等. 2018. 扬子克拉通北缘中元古界神农架群乱石沟组叠层石类型及其沉积学意义[J]. 古地理学报, 20(4): 545-561. [Fan Zhengxiu, Kuang Hongwei, Liu Yongqing, et al. 2018. Types of stromatolites of the Mesoproterozoic Shennongjia Group in northern margin of Yangtze Craton and their sedimentary significance[J]. Journal of Palaeogeography, 20(4): 545-561.]
- 何雨阳, 赵广涛, 赵利, 等. 2014. 巢北地区二叠系栖霞组碳酸盐岩地球化学特征及其古环境意义[J]. 中国海洋大学学报, 44(5): 79-88. [He Yuyang, Zhao Guangtao, Zhao Li, et al. 2014. Geochemistry characteristics and palaeo-environment significance of Qixia Formation in Chaobei area[J]. Periodical of Ocean University of China, 44(5): 79-88.]
- 洪天求, 贾志海, 郑文武, 等. 2004. 宿州地区震旦系望山组主要沉积类型及其形成环境分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 34(1): 5-11. [Hong Tianqiu, Jia Zhihai, Zheng Wenwu, et al. 2004. The analysis of the depositional types and the environments of the Wangshan Formation of Sinian in Suzhou area, Anhui province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 34(1): 5-11.]
- 胡斌, 周硕, 牛永斌. 2014. 豫西北焦作地区奥陶系马家沟组叠层石发育特征及其环境意义[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 33(1): 27-32. [Hu Bin, Zhou Shuo, Niu Yongbin. 2014. Characteristics and its environment significance of stromatolite from Ordovician Majiagou Formation of Jiaozuo area in the north-west Henan province[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 33(1): 27-32.]
- 贾志海, 洪天求, 王伟. 2008. 淮南地区新元古代九里桥组叠层石成礁过程及其影响因素[J]. 古生物学报, 47(1): 47-57. [Jia Zhihai, Hong Tianqiu, Wang Wei. 2008. The building process and influential factors of the stromatolite reefs in the Neoproterozoic Jiuliqiao Formation in Huainan region, Anhui[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 47(1): 47-57.]
- 贾志海, 洪天求, 郑文武, 等. 2003. 皖北新元古代望山组震积岩的基本特征及其形成环境分析[J]. 地层学杂志, 27(2): 146-149, 158. [Jia Zhihai, Hong Tianqiu, Zheng Wenwu, et al. 2003. The characters and environments of the seismites of the Neoproterozoic Wangshan Formation in north Anhui[J]. Journal of Stratigraphy, 27(2): 146-149, 158.]
- 李倩倩, 郑德顺. 2023. 豫西中元古界龙家园组二段叠层石特征及其沉积环境分析[J]. 现代地质, 37(4): 845-857. [Li Qianqian, Zheng Deshun. 2023. Characteristics of stromatolites and its significance in depositional environment reconstruction of the Mesoproterozoic Longjiayuan Formation (2nd member), western Henan[J]. Geoscience, 37(4): 845-857.]
- 李儒峰, 刘本培. 1996. 碳氧同位素演化与碳酸盐岩层序地层学关系研究[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 21(3): 29-34. [Li Rufeng, Liu Benpei. 1996. Application of carbon and oxygen isotopes to carbonate sequence stratigraphy: Analysis of the Maping Formation, southern Guizhou province[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 21(3): 29-34.]
- 李天义, 何生, 杨智. 2008. 海相优质烃源岩形成环境及其控制因素分析[J]. 地质科技情报, 27(6): 63-70. [Li Tianyi, He Sheng, Yang Zhi. 2008. The marine source rock formation conditions and control factors[J]. Geological Science and Technology Information, 27(6): 63-70.]
- 闵隆瑞, 迟振卿, 朱关祥, 等. 2002. 河北阳原东目连第四纪叠层石古环境分析[J]. 地质学报, 76(4): 446-453. [Min Longrui, Chi Zhenqing, Zhu Guanxiang, et al. 2002. Analysis of the palaeo-environment of Quaternary stromatolites at Dongmulian, Yangyuan county of Hebei province[J]. Acta Geologica Sinica, 76(4): 446-453.]
- 潘明, 吕勇, 山克强, 等. 2015. 云南保山栗柴坝组碳酸盐岩地球化学特征及环境意义[J]. 地质论评, 61(2): 333-343. [Pan Ming, Lü Yong, Shan Keqiang, et al. 2015. Geochemical characteristics and environmental significance of carbonate rock in Lichaiba Formation in Baoshan region, Yunnan[J]. Geological Review, 61(2): 333-343.]
- 庞科, 唐卿, 万斌, 等. 2021. 华北地台胶辽徐淮地区中—新元古代地层研究进展[J]. 地层学杂志, 45(4): 467-492. [Pang Ke, Tang Qing, Wan Bin, et al. 2021. Integrated meso-Neoproterozoic stratigraphy in the Jiao-Liao-Xu-Huai area of North China Craton: A review[J]. Journal of Stratigraphy, 45(4): 467-492.]
- 乔丹. 2020. 赣东—浙西地区震旦系灯影组叠层石特征与沉积环境分析[D]. 抚州: 东华理工大学. [Qiao Dan. 2020. Characteristics of stromatolites and sedimentary environment analysis of the Sinian Dengying Formation in eastern Jiangxi and western Zhejiang[D]. Fuzhou: East China University of Technology.]
- 任影, 钟大康, 柳慧琳, 等. 2018. 渝东地区寒武系第四阶龙王庙组古环境演化的稳定同位素与主、微量元素证据[J]. 地球科学, 43(11): 4066-4095. [Ren Ying, Zhong Dakang, Liu Huilin, et al. 2018. Isotopic and elemental evidence for paleoenvironmental evolution of Cambrian stage 4 Longwangmiao Formation, east Chongqing, China[J]. Earth Science, 43(11): 4066-4095.]
- 沈俊, 施张燕, 冯庆来. 2011. 古海洋生产力地球化学指标的研究[J]. 地质科技情报, 30(2): 69-77. [Shen Jun, Shi Zhangyan, Feng Qinglai. 2011. Review on geochemical proxies in paleo-productivity studies[J]. Geological Science and Technology Information, 30(2): 69-77.]
- 石敏. 2014. 华北中元古代碳酸盐岩系微生物群演替及真核生物演化[D]. 武汉: 中国地质大学. [Shi Min. 2014. Microbiotic re-

- placement and eukaryote evolution in Mesoproterozoic carbonate series of North China[D]. Wuhan: China University of Geosciences.]
- 宋明水. 2005. 东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征[J]. 矿物岩石, 25(1): 67-73. [Song Mingshui. 2005. Sedimentary environment geochemistry in the Shasi section of southern ramp, Dongying Depression[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 25(1): 67-73.]
- 孙云鹏, 郎咸国, 欧阳晴, 等. 2020. 安徽宿州新元古界望山组白齿碳酸盐岩特征及成因讨论[J]. 地层学杂志, 44(4): 386-400. [Sun Yunpeng, Lang Xianguo, Ouyang Qing, et al. 2020. Characteristics and origin of the molar-tooth carbonates from the Neoproterozoic Wangshan Formation in Suzhou, Anhui province[J]. Journal of Stratigraphy, 44(4): 386-400.]
- 田辉, 李怀坤, 相振群, 等. 2021. 蓟县中—新元古界剖面团山子组—景儿峪组碳氧同位素演化特征及其沉积环境与构造意义[J]. 华北地质, 44(1): 4-13. [Tian Hui, Li Huaikun, Xiang Zhenqun, et al. 2021. Characteristics of the carbon and oxygen isotopes of the Tuanshanzi Formation-Jingeryu Formation from the Meso-Neoproterozoic section in the Jixian county and constraints on depositional-tectonic environment[J]. North China Geology, 44(1): 4-13.]
- 田洋, 赵小明, 王令占, 等. 2014. 重庆石柱二叠纪栖霞组地球化学特征及其环境意义[J]. 沉积学报, 32(6): 1035-1045. [Tian Yang, Zhao Xiaoming, Wang Lingzhan, et al. 2014. Geochemical characteristics and its paleoenvironmental implication of Permian Qixia Formation in Shizhu, Chongqing[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 32(6): 1035-1045.]
- 王传尚, 李志宏, 彭中勤, 等. 2014. 黔桂地区早泥盆世晚期碳稳定同位素变化及其对海平面变化的响应[J]. 中国地质, 41(6): 2039-2047. [Wang Chuanshang, Li Zhihong, Peng Zhongqin, et al. 2014. The carbon isotope variation and its responses to sea level changes during the late Early Devonian Period in Guizhou and Guangxi[J]. Geology in China, 41(6): 2039-2047.]
- 汪凯明, 罗顺社. 2009. 碳酸盐岩地球化学特征与沉积环境判别意义: 以冀北拗陷长城系高于庄组为例[J]. 石油与天然气地质, 30(3): 343-349. [Wang Kaiming, Luo Shunshe. 2009. Geochemical characters of carbonates and indicative significance of sedimentary environment: An example from the Gaoyuzhuang Formation of the Changcheng System in the Northern Hebei Depression[J]. Oil & Gas Geology, 30(3): 343-349.]
- 王清海, 杨德彬, 许文良. 2011. 华北陆块东南缘新元古代基性岩浆活动: 徐淮地区辉绿岩床群岩石地球化学、年代学和Hf同位素证据[J]. 中国科学: 地球科学, 41(6): 796-815. [Wang Qinghai, Yang Debin, Xu Wenliang. 2011. Neoproterozoic basic magmatism in the southeast margin of North China Craton: Evidence from whole-rock geochemistry, U-Pb and Hf isotopic study of zircons from diabase swarms in the Xuzhou-Huaipei area of China[J]. Science China Earth Sciences, 41(6): 796-815.]
- 苑鼎成, 张永利, 赖冠明, 等. 2024. 辽东半岛震旦系甘井子组叠层石生长机制研究[J]. 地质论评, 70(1): 367-382. [Yuan Dingcheng, Zhang Yongli, Lai Guanming, et al. 2024. Growth mechanism of stromatolites in the Ganjingzi Formation, Sinian System, in Liaodong Peninsula[J]. Geological Review, 70(1): 367-382.]
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通元古代构造事件[J]. 岩石学报, 23(11): 2665-2682. [Zhai Mingguo, Peng Peng. 2007. Paleoproterozoic tectonic events in the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(11): 2665-2682.]
- 张薇. 2020. 现代碳酸盐叠层石的重要进展及意义[J]. 地球科学进展, 35(1): 70-78. [Zhang Wei. 2020. Important development and significance of modern carbonate stromatolites[J]. Advances in Earth Science, 35(1): 70-78.]
- 赵玉茹, 高达, 胡明毅, 等. 2024. 古气候和海平面变化对浅水碳酸盐岩高频层序及有利储层的控制: 以川中地区龙王庙组为例[J]. 中国地质, 51(2): 577-591. [Zhao Yuru, Gao Da, Hu Mingyi, et al. 2024. Controls of paleoclimate and sea-level changes on the high-frequency sequence of shallow-water carbonates: A case study of the Longwangmiao Formation in the central Sichuan Basin[J]. Geology in China, 51(2): 577-591.]
- 赵宗举. 2015. 全球海平面变化指标及海相构造层序研究方法: 以塔里木盆地奥陶系为例[J]. 石油学报, 36(3): 262-273. [Zhao Zongju. 2015. Indicators of global sea-level change and research methods of marine tectonic sequences: Take Ordovician of Tarim Basin as an example[J]. Acta Petrolei Sinica, 36(3): 262-273.]
- Andres M S, Reid R P. 2006. Growth morphologies of modern marine stromatolites: A case study from Highborne Cay, Bahamas[J]. Sedimentary Geology, 185(3/4): 319-328.
- Banner J L, Hanson G N. 1990. Calculation of simultaneous isotopic and trace element variations during water-rock interaction with applications to carbonate diagenesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54(11): 3123-3137.
- Bekker A, Karhu J A, Kaufman A J. 2006. Carbon isotope record for the onset of the Lomagundi carbon isotope excursion in the Great Lakes area, North America[J]. Precambrian Research, 148(1/2): 145-180.
- Bickle M J, Chapman H J, Ferry J M, et al. 1997. Fluid flow and diffusion in the Waterville limestone, south-central Maine: Constraints from strontium, oxygen and carbon isotope profiles[J]. Journal of Petrology, 38(11): 1489-1512.
- Decho A W, Visscher P T, Reid R P. 2005. Production and cycling of natural microbial exopolymers (EPS) within a marine stromatolite [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 219(1/2): 71-86.
- Dupraz C, Visscher P T, Baumgartner L K, et al. 2004. Microbe-mineral interactions: Early carbonate precipitation in a hypersaline lake (Eleuthera Island, Bahamas)[J]. Sedimentology, 51(4): 745-765.
- Grotzinger J P, Knoll A H. 1999. Stromatolites in Precambrian carbonates: Evolutionary mileposts or environmental dipsticks?[J]. Annual Review of Earth And Planetary Sciences, 27: 313-358.
- Liu Y, Zhao M Y, He T C, et al. 2023. Formation of molar tooth struc-

- tures in low sulfate Precambrian oceans[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 354: 62-73.
- Ma Z W, Hu C Y, Yan J X, et al. 2008. Biogeochemical records at Shangsi section, northeast Sichuan in China: The Permian paleoproductivity proxies[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 19(5): 461-470.
- Ojakangas G W, Awramik S M, Storrie-Lombardi M C. 2023. Stromatolite photomorphogenesis: Lighting up their shape[J]. *International Journal of Astrobiology*, 22(1): 33-56.
- Peters S E, Husson J M, Wilcots J. 2017. The rise and fall of stromatolites in shallow marine environments[J]. *Geology*, 45(6): 487-490.
- Planavsky N, Grey K. 2008. Stromatolite branching in the Neoproterozoic of the Centralian Superbasin, Australia: An investigation into sedimentary and microbial control of stromatolite morphology[J]. *Geobiology*, 6(1): 33-45.
- Shen B, Dong L, Xiao S H, et al. 2016. Molar tooth carbonates and benthic methane fluxes in Proterozoic oceans[J]. *Nature Communications*, 7(1): 10317.
- Sun F B, Peng P, Zhou X Q, et al. 2020. Provenance analysis of the Late Mesoproterozoic to Neoproterozoic Xuhuai Basin in the southeast North China Craton: Implications for paleogeographic reconstruction[J]. *Precambrian Research*, 337: 105554.
- Vasconcelos C, Warthmann R, McKenzie J A, et al. 2006. Lithifying microbial mats in Lagoa Vermelha, Brazil: Modern Precambrian relics?[J]. *Sedimentary Geology*, 185(3/4): 175-183.
- Walter M R. 1976. *Stromatolites, developments in sedimentology*[M]. Amsterdam: Elsevier.
- Wan B, Tang Q, Pang K, et al. 2019. Repositioning the Great Unconformity at the southeastern margin of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 324: 1-17.
- Xiao S H, Shen B, Tang Q, et al. 2014. Biostratigraphic and chemostratigraphic constraints on the age of Early Neoproterozoic carbonate successions in North China[J]. *Precambrian Research*, 246: 208-225.
- Yuan R Z, Yu Q, Tian T, et al. 2025. Characteristics and paleoenvironment of stromatolites in the southern North China Craton and their implications for Mesoproterozoic gas exploration[J]. *Processes*, 13(1): 129.
- Zhang Y L, Lai G M, Gong E P, et al. 2023a. Early Neoproterozoic well-preserved stromatolites from southern Liaoning, North China: Characteristics and paleogeographic implications[J]. *Palaeoworld*, 32(1): 1-13.
- Zhang Y L, Lai G M, Gong E P, et al. 2023b. Characteristics of Early Neoproterozoic stromatolites from southern Liaoning, North China: Insights into the formation of stromatolites[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9): 1709.

Types of Stromatolites in the Neoproterozoic Wangshan Formation at the Northern Margin of the Xuhuai Basin and Their Paleoenvironmental Significance

YANG ZiJie, LI QianQian, XU BoYang, SUN FengBo, ZHENG DeShun

School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China

Abstract: [Objective] Stromatolites are among the oldest microbial ecosystems on Earth, and they are profound significant for understanding the co-evolution of early life and geological environments. In the southeastern margin of the North China Craton, stromatolites were widely developed in the Neoproterozoic Wangshan Formation in the Xuhuai area. However, the macroscopic and microscopic characteristics of these stromatolites, their response mechanisms to different sedimentary environments, and their paleoclimatic implications remain insufficiently clarified. [Methods] This study focused on the stromatolites of the Wangshan Formation. Stratigraphic sections were systematically measured at the Heituwo outcrop in Chulan township, Suzhou city, Anhui province, and representative samples were collected for further analysis. Macroscopic observations were conducted to document the external morphology of stromatolites, and petrographic thin sections were examined under both plane-polarized and cross-polarized light to investigate microscopic characteristics. In addition, geochemical analyses were performed, including major element testing and carbon and oxygen isotope measurements. The integration of macro- and micro-scale observations with geochemical indicators made it possible to systematically classify the sedimentary facies of stromatolites in the Wangshan For-

mation in order to reconstruct their co-evolution with the depositional environment, and to evaluate the primary controlling factors that influenced stromatolite formation during the Neoproterozoic. [Results] The stromatolites of the Wangshan Formation are mainly divided into three types: columnar, wavy and laminated. Columnar and wavy stromatolites occur predominantly in high-energy intertidal environments, whereas laminated stromatolites are stably distributed in low-energy supratidal zones. Geochemical tests show $\delta^{13}\text{C}$ values between +2.61‰ and +6.26‰. At the bottom of the section, the $\delta^{13}\text{C}$ values decrease slightly, indicating a small-scale sea-level fall. Toward the top of the section, a significant positive increase of $\delta^{13}\text{C}$ was recorded, corresponding to a rapid marine transgression. During this interval, three successive cycles of $\delta^{13}\text{C}$ increase and decrease are recognized, interpreted as reflecting three complete transgression – regression events. The $\delta^{18}\text{O}$ values of all samples are greater than – 10‰, and there is no clear co-variation between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$, suggesting that the isotope signals largely preserve primary environmental information. Furthermore, the MgO/CaO ratio of most samples is <0.125, implying that the overall diagenetic modification of the Wangshan Formation carbonates was weak and that their geochemical indicators reliably reflect original depositional conditions. The P_2O_5 content are only weakly correlated with Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 and SiO_2 . It is notable that peak horizons of P_2O_5 are often associated with storm-related bamboo-leaf-shaped intraclasts and stromatolite enrichment. The Al_2O_3 , K_2O and TiO_2 contents display a marked increasing trend in the middle and upper portions of the Wangshan Formation, reflecting two distinct phases of sea-level rise, and are consistent with the fluctuations indicated by $\delta^{13}\text{C}$. In addition, Fe/Mn and Ca/Mg ratios suggest that the depositional period of the Wangshan Formation was characterized by frequent climatic oscillations. [Conclusions] Stromatolites of the Wangshan Formation record significant paleoenvironmental changes that occurred during the depositional period. Their formation was the result of complex interactions between biological processes and environmental factors. The flourishing of stromatolites was closely coupled with shallow-water environments that developed in relatively arid climatic conditions. On the microscopic scale, the metabolic activities and interactions of microorganisms constrained stromatolite morphology, whereas on the macroscopic scale, factors such as the intensity of terrigenous clastic input and the occurrence of storm events influenced microbial ecological succession. Moreover, accommodation space, light intensity, and hydrodynamic conditions collectively shaped the external morphologies of stromatolites. These findings provide new evidence for the co-evolution of life and the environment during the Neoproterozoic.

Key words: stromatolites; paleoenvironment; Wangshan Formation; Neoproterozoic; Xuhuai Basin