



秦皇岛石炭纪粪化石

龚一鸣^{①②*}, 张立军^①, 吴义布^①

① 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;

② 河南理工大学资源环境学院, 生物遗迹与沉积矿产河南省重点实验室, 焦作 454003

* E-mail: ymgong@cug.edu.cn

收稿日期: 2009-02-13; 接受日期: 2009-07-11

国家自然科学基金(批准号: 40872001, 40621002)、高等学校学科创新引智计划项目(编号: B08030)、地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项和中国石化海相前瞻性项目(编号: G0800-06-ZS-319)资助

摘要 报道的粪化石发现于河北省秦皇岛市抚宁县石门寨剖面石炭纪本溪组上部深灰色粉砂质页岩层内。粪化石呈芝麻粒状, 两端浑圆、等大, 粪粒长 2.2 mm, 宽 0.6 mm, 腹面扁平, 背面光滑、微凸, 发育一条由串珠状等直径小坑构成的轴向中沟。粪化石呈正弦曲线状的带状集合体产出, 多数粪粒具有定向排列, 其长轴大都垂直或近于垂直带状集合体的边缘, 粪粒在带状集合体内密度分布大体均匀。粪粒的内部保存有未被完全消化的动、植物残渣和以此为生长基形成的大量含硫异形方解石有机矿物集合体。推断其造迹者为细小(数厘米)的杂食性动物, 可能为类似于现生的泥鳅或鱼类。造迹动物的排便行为发生在水与沉积物界面之下的沉积层内部。粪化石排出时具有较高的黏度和强度, 由于微生物的作用, 粪化石的成岩作用发生较围岩早和快。石炭纪本溪组沉积期高的大气氧分压背景、湿热气候条件下淡化的泻湖环境、低水动能、常氧的造迹环境和缺氧、缺少其他宏体生物破坏的特殊埋藏环境使得粪化石得以超常保存。粪化石寄主地层的还原色(深灰色)形成于富氧、高生产力的沉积环境和还原的早期成岩环境。

关键词

粪化石
石炭纪
本溪组
超常保存的化石
秦皇岛
华北

粪化石(coprolite)由于难以保存, 但能提供实体化石难以或不能提供的重要生物和环境信息, 如造迹动物的行为习性, 消化系统的结构和功能, 食性和食物链/网特征, 寄主地层的特异埋藏和保存条件等, 一直被视为化石中的珍品。到目前为止, 中国专题描述报道的粪化石文献寥寥无几, 如贵州桐梓县中侏罗统沙溪庙组的鱼粪化石^[1](中国最早报道的粪化石), 陕西富县侏罗系鱼粪化石^[2], 三门峡和河南新蔡新生代哺乳动物粪化石^[3], 第四纪泥河湾哺乳动物粪化石^[4]以及云南禄丰侏罗系禄丰组的鱼粪化石^[5]。我国古生代真正意义的粪化石仅报道于晚二叠世^[6]和早

寒武世的澄江生物群中^[7~9]。

Coprolite(粪化石)一词源自希腊语“kopros”(粪), 和“lithos”(石头)。由英国学者William Buckland于1829年创名, 系指他在英格兰早侏罗世地层中发现的长浑圆状的磷酸盐质结核^[10]。与粪化石类似的术语尚有呕吐石(regurgitalites): 石化的从口中排出的废弃物; 胃石(gastrolites): 石化的胃中食物; 有阀肠石(enterospirae): 在有阀门肠道中的石化产物; 无阀肠石(cololites): 在无阀门肠道和盲肠中的石化产物^[11]。从这些定义可见, 要准确区分这些与粪化石类似的产物并非总是容易和可能的。因此, 从描述的角度,

可以将粪化石定义为: 具有浑圆状外形、石化的动物的消化物、排泄物和排出物的总称。

1 材料与地质背景

这里报道的粪化石材料产于河北秦皇岛市抚宁县石门寨剖面本溪组上部深灰色粉砂质页岩层内(图 1, 2)。本溪组在华北地区分布广泛, 尽管厚度和沉积环境各地不完全相同, 但总体上均为以淡化的陆表海为主的海陆交互环境^[13,14], 植物群反映的古气候特征为热带雨林气候^[15], 其时代相当于石炭纪晚石炭亚纪(Pennsylvanian, 宾夕法尼亚纪) Serpukhovian(谢尔普霍夫阶)上部-Bashkirian(巴什基尔阶), 即中国的罗苏阶-滑石板阶^[16]。秦皇岛市石门寨地区的本溪组厚 51 m, 可划分为上、下两部分。下部: 杂色、

深灰色铝土岩和铁质泥岩, 含铁质鲕, 与下伏的下奥陶统马家沟组石灰岩和白云质石灰岩呈平行不整合接触。上部: 灰色、深灰色细砂岩、粉砂岩、页岩夹石灰岩透镜体; 含蜓、珊瑚、腕足、双壳、苔藓虫化石和植物化石以及遗迹化石, 如: *Fusulinella laxa*, *F. colaniae*; *Arachnastraea machunrica*, *Bothrophyllum* sp.; *Martinia* sp., *Schellwienella* sp., *Astarlella* sp., *Pa-leoneilo* sp.; *Fenestella* sp.和*Neuropteris gigantean*, *N. pseudogigantea*^[13~15]以及*Chondrites*。石门寨地区的本溪组明显表现为由旋回型海进形成的退积序列, 自下而上可以分辨出 3 个海进旋回(图 1), 粪化石保存于第 3 旋回上部的深灰色粉砂质页岩层内, 寄主地层总体上应为湿热气候条件下淡化的泻湖环境。

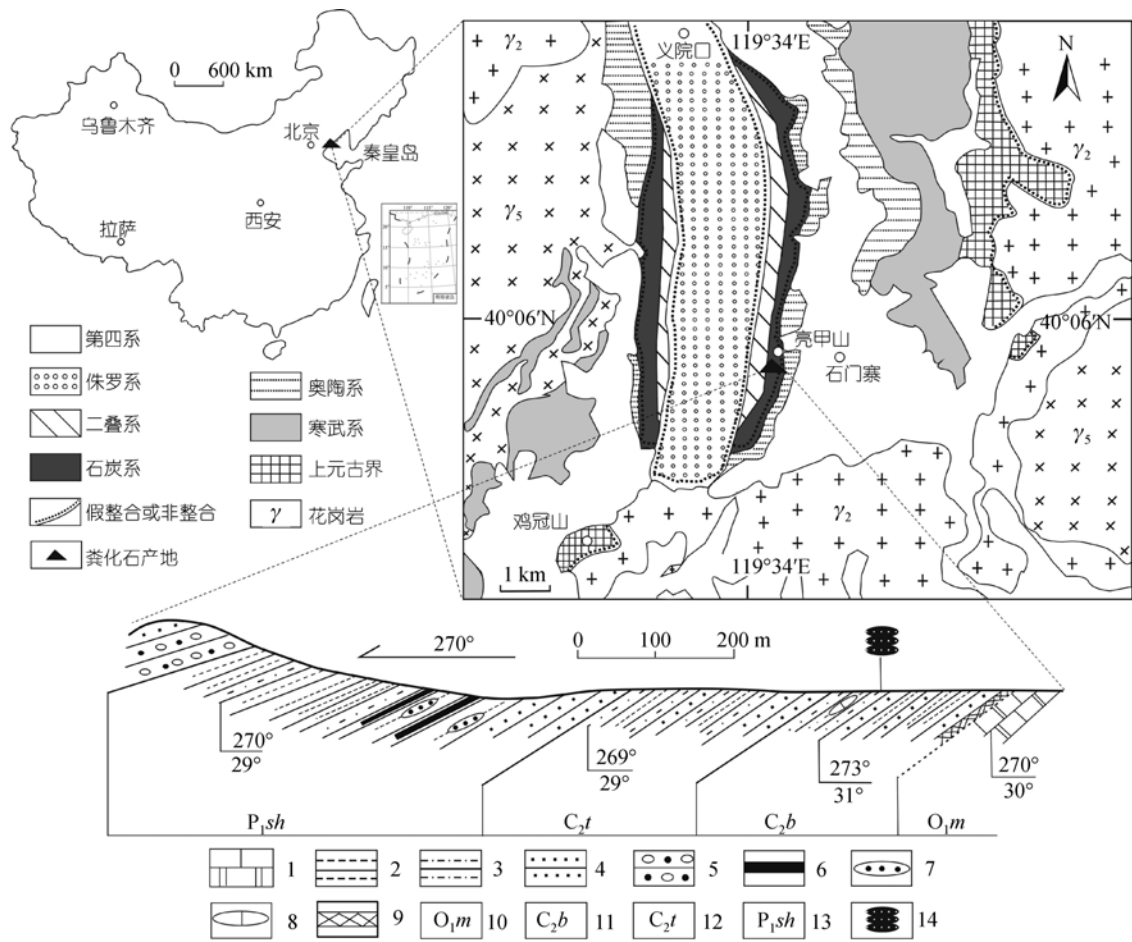


图 1 河北秦皇岛市抚宁县石门寨地区地质简图和粪化石产地及层位

1. 白云质石灰岩; 2. 页岩; 3. 粉砂质页岩; 4. 砂岩; 5. 砂质砾岩; 6. 煤层; 7. 透镜状砂岩; 8. 透镜状石灰岩; 9. 富铁铝质风化壳; 10. 早奥陶世马家沟组; 11. 晚石炭世本溪组; 12. 晚石炭世太原组; 13. 早二叠世山西组; 14. 粪化石的产出层位。据文献[12]修改

2 粪化石特征

粪化石以带状集合体的产状保存于本溪组上部深灰色粉砂质页岩层内, 呈宽缓的正弦曲线状产出, 带状集合体长大于 11 cm, 宽约 1 cm(图 2(a)~(d)). 单个粪粒呈芝麻粒状, 腹面(ventral surface, 指扁平粪粒的下表面)扁平, 背面(dorsal surface, 指扁平粪粒的上表面)光滑、微凸, 发育一条由串珠状等直径小坑

构成的轴向中沟; 始端(最初排出的一端)和末端(最后排出的一端)浑圆、等大; 单个粪粒长 2.2 mm, 宽 0.6 mm, 不具有明显的压实和塑性变形特征(图 2(c), (d); 3(a)). 多数粪粒具有定向排列, 其长轴大都垂直或近于垂直带状集合体的边缘, 粪粒在带状集合体内密度分布大体均匀, 基本上为原地原位保存(图 2(c), (d)).



图 2 秦皇岛石门寨剖面石炭纪本溪组粪化石产出层位与特征

(a), (b) 粪化石寄主地层的露头照片, 岩性为深灰色薄层状粉砂质页岩, (b)为(a)的局部放大; (c), (d) 粪化石及其寄主岩性的手标本照片, 粪化石呈正弦曲线状的带状集合体产出, (d)为(c)的局部放大

粪粒的内部在光学显微镜下可见直径为 5~25 μm , 具有同心状、放射状、网状构造的小球或碎片和形态不规则的、无特征组构的有机质块体, 它们分布无序(图 3(b)), 应该是未被完全消化的动、植物残渣. 粪粒的内部在 SEM 下可见异形方解石有机矿物集合体, 单个方解石晶体长 5~10 μm , 呈棒状、针状, 粗端直径 2~3 μm , 细端直径 1 μm , 方解石晶体从生长基向外均匀地由粗变细, 呈交织状、放射状和平行状

无序生长(图 4(a), (b)). 在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室运用 Quanta 200 环境扫描电子显微镜与之配套的 X 射线散射能谱仪(EDXSM)的成分分析表明, 方解石晶体的主要化学成分为氧和钙, 其次尚含有钠、氯、镁和硫(表 1).

粪化石的寄主地层为深灰色粉砂质页岩, 发育水平层理, 在偏光显微镜下, 片状、长条状碎屑略具定向排列(图 5).

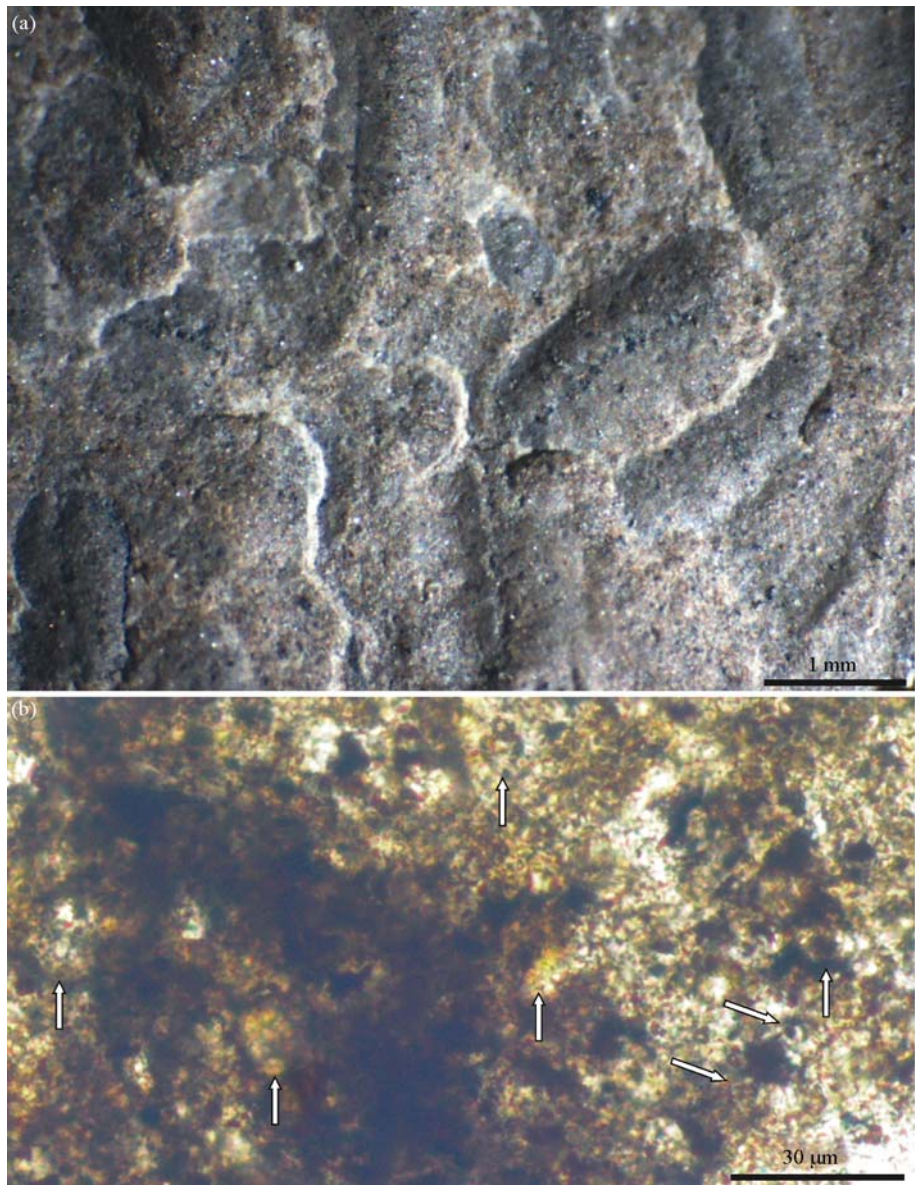


图 3 秦皇岛石门寨剖面石炭纪本溪组粪化石的外表和内部形态和结构
(a) 单个粪化石呈细小的芝麻粒状, 背面发育由串珠状等大小坑构成的轴向中沟; (b) 单个粪粒内部可见未被完全消化的动、植物残渣, 它们呈小球状、碎片状和不规则团块状无序分布, 部分残渣可见同心圆状、放射状和鳞片状构造(白色箭头所指)

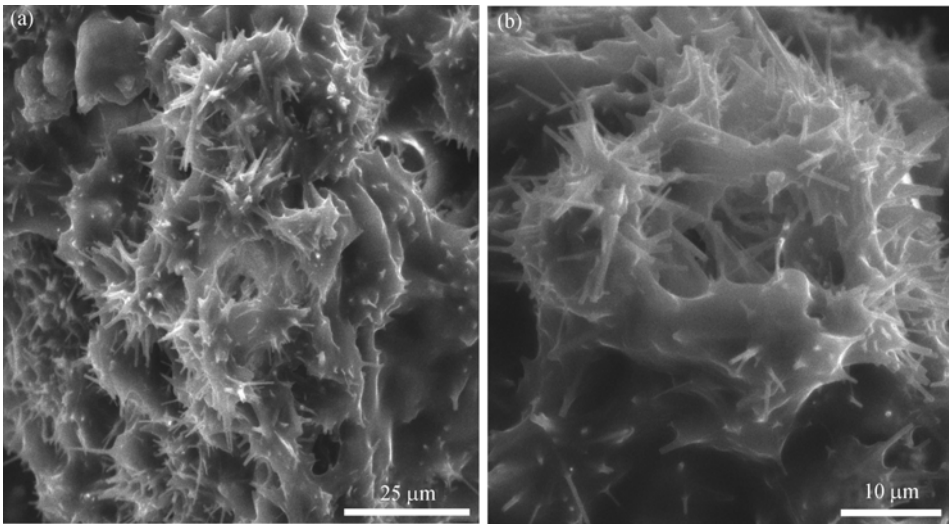


图 4 秦皇岛石门寨剖面石炭纪本溪组单个粪化石内部的异形方解石有机矿物集合体的扫描电子显微镜(SEM)照片
(a), (b) 单个异形方解石有机矿物呈针状和棒状, (b)是(a)的局部放大(微生物参与作用下形成的异形方解石有机矿物集合体)

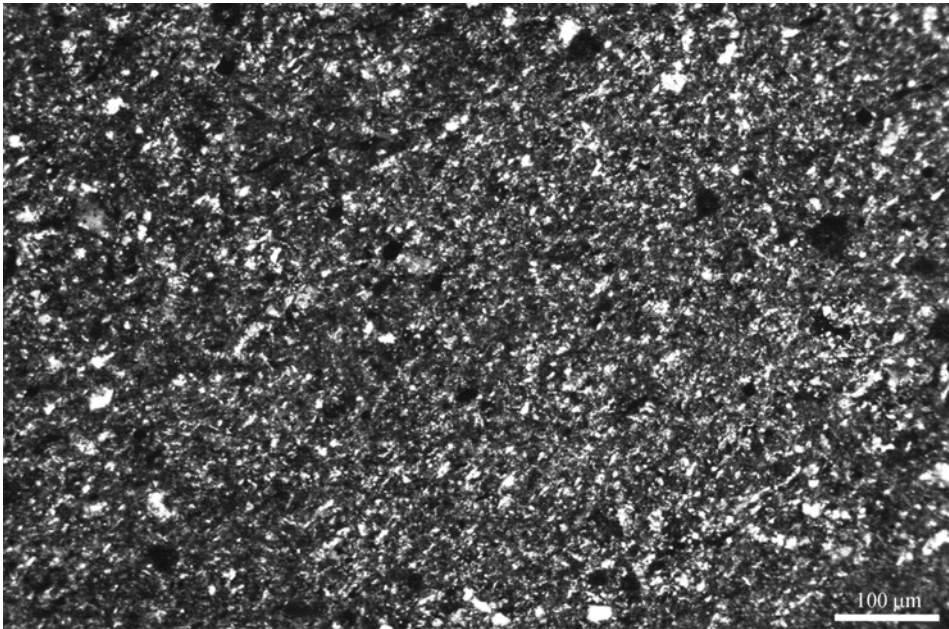


图 5 秦皇岛石门寨剖面石炭纪本溪组粪化石寄主围岩
岩性为粉砂质页岩, 长条状、片状矿物和碎屑略具定向, 正交偏光

表 1 粪化石中有机矿物方解石的化学成分

元素	Wt/%	At/%
O	59.09	77.30
Na	02.15	01.95
Mg	00.85	00.73
Si	00.32	00.24
S	00.39	00.25
Cl	01.42	00.84
Ca	35.79	18.69

3 讨论

3.1 粪化石与卵化石

在化石记录中不仅准确区分狭义的粪化石(石化的动物排泄物)与上文提及的呕吐石、胃石、有阀肠石和无阀肠石等广义的粪化石(本文定义的粪化石)并非总是容易和可能的, 而且正确区分粪化石与卵化

石也并非易事. 从已发表的有关粪化石与卵化石文献^[1~11,17]和我们自己的工作来看, 粪化石与卵化石的识别主要应该从群体和个体的外部形态和内部结构和成分等方面加以区分(表 2).

三方面的特征支持这里描述的材料是粪化石而不是卵化石:

其一, 描述的材料内部具有未被完全消化的动、植物残渣.

其二, 描述的材料外形浑圆, 无外壁/外壳, 并具有由串珠状等直径小坑构成的轴向中沟. 这种构造不太可能发育于卵化石中^[17], 很可能是造迹动物在排便过程中肠肛的特殊构造有节律的运动(收敛与松弛)所致, 肠肛的收敛形成粪化石背面上的等直径小坑.

其三, 描述的材料内部在SEM下可见呈无序分布的斑块状异形方解石有机矿物集合体, 单个方解石晶体及其集合体的形态与正常方解石晶体及其集合体的形态相去甚远, 应该是在有微生物参与作用下形成的有机矿物或生物矿物^[18]. 描述的材料内部未被完全消化的动、植物残渣, 在适宜的早期成岩环境中非常有利于微生物的生长和繁殖, 在微生物的调节作用下形成异形方解石有机矿物集合体. 从描述材料不具有明显的压实和塑性变形特征来看, 未被完全消化的动、植物残渣滋生微生物的时间和异形方解石有机矿物集合体的形成时间及其成岩作用的发生均应该比寄主地层早.

3.2 造迹生物行为习性与埋藏环境

粪化石作为废弃物通常在排列和保存状态上是无序的(表 2). 然而, 这里报道的粪化石带状集合体呈宽缓正弦曲线状产出, 多数粪粒具有定向排列, 其长轴大都垂直或近于垂直带状集合体的边缘, 并且粪粒在带状集合体内密度分布大体均匀的特征表明, 造迹动物是在沉积物内部一边作正弦曲线状穿行运

动一边排便, 在粪化石露头的可见长度内(>11 cm), 造迹动物的运动速度和姿态与排便速度和排便姿势基本保持同步和稳定, 总体上反映出造迹动物的悠然自得、舒适的常态行为习性. 在粪化石的带状集合体内, 一部分粪粒排列有序(粪粒的长轴大都垂直或近于垂直带状集合体的边缘)、少部分粪粒排列无序(排列规律和定向不明显)可能与造迹动物运动过程中对排出粪便的微小拖曳有关, 但这种拖曳只是对粪粒的排列方向略有改变, 并没有引起粪粒背面(具有由串珠状等直径小坑构成的轴向中沟的面)和腹面的翻转. 在粪化石带状集合体内, 单个粪粒细小(长 2.2 mm, 宽 0.6 mm), 内部尚保留有未被完全消化的动、植物残渣.

根据粪化石带状集合体呈正弦曲线状, 粪粒背面发育特殊的轴向中沟和粪粒内部尚保留有未被完全消化的动、植物残渣三方面的特征推断, 造迹动物可能为细小(数厘米)的杂食性动物, 类似于现生的泥鳅或鱼类.

由于动物粪便的强度低、富有机物, 无论是在陆上环境还是在水下环境都极易被自然营力、其他动物和细菌肢解和破坏. 因此, 保存粪化石的基本条件是: 低水动能条件(对水下环境而言), 基本不被搬运, 快速原地埋藏, 埋藏环境贫氧、准厌氧或厌氧. 从上文可见, 这里描述的粪化石的寄主地层为深灰色并富含有机质(反映还原环境)、薄层(反映沉积速率缓慢)、发育水平层理的粉砂质页岩(反映低水动能条件), 在该地层中未见宏体的实体化石、其他遗迹化石和生物扰动. 还原环境和低水动能条件对粪化石的埋藏和保存是有利的, 但沉积速率低对粪化石的埋藏和保存是不利的, 同时还原环境与上文推断的造迹动物为悠然自得、舒适的常态造迹行为习性矛盾, 其原因可能有 4 方面:

(1) 石炭纪-二叠纪是地质历史时期大气氧分压最高的时期, 氧气在大气中的含量高达 30%^[19], 这种

表 2 粪化石与卵化石的特征比较

特征	粪化石	卵化石
集合体/群体形态	通常无序, 或有序程度较低	通常有序, 或有生物膜维系着群体的有序性
个体形态	浑圆状, 外表通常有饰	浑圆状或棱角状
外壳/包壳	无	有, 外壳与内涵物在成分和结构上通常有差异
内部成分和结构	通常含有无序分布, 未被完全消化的动、植物残渣	成分和结构均一或有序
埋藏	原位埋藏, 原地埋藏	原地埋藏或异地埋藏

高的大气氧分压能使浅的、低水动能环境溶解更多的氧,使得这里的造迹动物能表现出悠然自得、舒适的常态造迹行为。

(2) 湿热气候条件下淡化的泻湖环境^[13]可能不利于狭盐性生物的生存;这里常氧/富氧的海底埋藏环境只存在于沉积和埋藏的早期,这时海底沉积物的含水量高(soupground, 汤底),即使有丰富的生物扰动,也不容易保存和识别,两种条件可能是宏体的实体化石、其他遗迹化石和生物扰动少见或缺少的主要原因。

(3) 这里描述的粪化石近于原地、原位、毫毛无损的保存与其造迹方式密切相关,即造迹动物的排便行为不是发生在水与沉积物界面上,而是发生在水与沉积物界面之下的沉积层内部,这种排便行为有利于粪化石的快速掩埋和免于遭受其他动物和自然营力的搬运和破坏;粪化石排出时具有比较高的黏度和强度(可能类似于现今的羊粪);埋藏环境除粪化石的造迹生物外缺少其他破坏粪化石的动物;粪化石的成岩比围岩较早和快。

(4) 粪化石的寄主地层表现出的还原色和富有机质的特征可能与两个因素有关:湿热气候条件下淡化的泻湖环境具有高的生物产力,形成大量的有机物,大量有机物沉积和埋藏使得早期埋藏和成岩环境快速缺氧,从而导致喜氧的后生动物不能发育

和粪化石的完好保存。粪化石中大量含硫异形方解石有机矿物集合体的发现(图 4, 表 1)也提供了早期成岩环境缺氧的佐证。

4 结论

(1) 粪化石发现于河北秦皇岛市石门寨剖面石炭纪本溪组上部深灰色粉砂质页岩层内,单个粪化石呈芝麻粒状,长 2.2 mm,宽 0.6 mm,近乎原地原位保存。粪化石集合体呈正弦曲线状产出。在粪粒内部尚保存有未被完全消化的动、植物残渣和以此为生长基形成的大量含硫异形方解石有机矿物集合体。粪化石产出层位的沉积环境为湿热气候条件下低水动能、淡化、高生产力的泻湖环境。

(2) 粪化石的造迹生物推断为细小(数厘米)的杂食性动物,可能为类似于现生的泥鳅或鱼类。造迹动物的排便行为发生在水与沉积物界面之下的沉积层内部。粪化石排出时具有比较高的黏度和强度。由于微生物的作用,粪化石的成岩作用发生较围岩早和快。石炭纪高的大气氧分压背景、湿热气候条件下淡化的泻湖环境、低水动能、低沉积速率、常氧的造迹环境和缺氧、缺少其他宏体生物破坏的特殊埋藏环境使得粪化石得以超常保存。

(3) 粪化石寄主地层的还原色(深灰色)形成于富氧、高生产力的沉积环境和还原的早期成岩环境。

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献

- 1 尹赞勋. 记鱼粪化石. 地质论评, 1945, 10(3-4): 89—96
- 2 刘宪亭. 陕西富县及彬县中生代鱼粪化石. 古生物学报, 1953, 1(3): 157—164
- 3 周明镇. 记三门峡和河南新蔡发现的哺乳类动物粪化石标本. 古生物学报, 1955, 3(4): 238—285
- 4 高福清. 记泥河湾粪化石层. 古脊椎动物与古人类, 1962, 6(4): 390—402
- 5 边兆祥, 王金元, 王正新. 云南禄丰、贵州桐梓、陕西富县的鱼粪化石. 成都地质学院学报, 1991, 18(2): 20—24
- 6 Seilacher A, Marshall C, Skinner H C W, et al. A fresh look at sideritic “coprolites”. *Paleobiology*, 2001, 27(1): 7—13[[doi](#)]
- 7 陈均远, 周桂琴, 朱茂炎, 等. 澄江生物群——寒武纪大爆发的见证. 台中: “国立”自然科学博物馆, 1996. 1—222
- 8 Zhu M Y, Vannier J, Iten H V, et al. Direct evidence for predation on trilobites in the Cambrian. *Proc R Soc London Ser B*, 2004, 271(Suppl): S277—S280
- 9 Vannier J, Chen J Y. Early Cambrian food chain: new evidence from fossil aggregates in the Maotianshan Shale Biota, SW China. *Palaio*, 2005, 20: 3—26[[doi](#)]
- 10 Ford T D, O'Connor B. Coprolite mining in England. *Geol Today*, 2002, 18(5): 178—181
- 11 Northwood C. Early Triassic coprolites from Australia and their palaeobiological significance. *Palaontology*, 2005, 48(1): 49—68[[doi](#)]

- 12 王家生. 北戴河地质认识实习指导书. 武汉: 中国地质大学出版社, 2004. 1—116
- 13 范炳恒, 李壮福. 柳江盆地本溪组底部海相动物群. 中国矿业大学学报, 1999, 28(1): 29—32
- 14 彭向东, 林英锡. 唐山-秦皇岛地区晚石炭世的皱纹珊瑚. 长春科技大学学报, 2001, 31(1): 1—7
- 15 阎同生. 河北柳江盆地石炭纪和二叠纪植物群及古地理演化. 古地理学报, 2003, 5(4): 461—474
- 16 彭玉鲸, 陈跃军, 刘跃文. 本溪组——岩石地层和年代地层与穿时性. 世界地质, 2003, 22(2): 111—118
- 17 赖星蓉. 松辽盆地白垩系枝角类(Cladocera)卵鞍化石. 微体古生物学报, 1990, 7(1): 77—81
- 18 Perry R S, McLoughlin N, Lynne B Y, et al. Defining biominerals and organominerals: direct and indirect indicators of life. *Sediment Geol*, 2007, 201: 157—179[[doi](#)]
- 19 Berner R A. Geocarbsulf: a combined model for Phanerozoic atmospheric O₂ and CO₂. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: 5653—5664[[doi](#)]