

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.02.001

从地球生物学视角创新地质调查工作

黄长生¹, 姚华舟^{1,2}, 李璇³, 谢树成⁴

HUANG Chang-Sheng¹, YAO Hua-Zhou^{1,2}, LI Xuan³, XIE Shu-Cheng⁴

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205;
 2. 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205; 3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074;
 4. 中国地质大学(武汉) a. 生物地质与环境地质国家重点实验室, b. 流域关键带演化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074
1. Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China;
2. Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, Hubei, China;
3. School of Environment Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;
4. a. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, b. Hubei Key Laboratory of Watershed Critical Belt Evolution, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:地球生物学是地球科学与生命科学交叉融合而形成的新学科,主要探索生物圈与地球其他圈层之间的相互作用与协同演化。地球生物学研究涉及的时间跨度较大,从地球形成早期一直到现在,是在古生物学的基础上重点发展地质微生物、生物对地质环境的作用与反馈等领域。地球生物学的系统研究工作离不开地质调查,地质调查也需要从地球生物学的新视角进行开拓创新。地球生物学不仅是地球系统科学的一大关键支撑,而且极大地提升了地质学为经济社会发展的服务能力,具有很重要的科学功能和社会功能,因而其繁荣发展对新时期地质调查工作的创新意义重大。

关键词:地球生物学;地质微生物学;环境;地质调查;科技创新

中图分类号:P56;Q911

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2022)02-0189-06

Huang C S, Yao H Z, Li X and Xie S C. 2022. Innovative Geological Survey Work Based on Geobiology. *South China Geology*, 38(2): 189-194.

Abstract: Geobiology is a new discipline that incorporates earth sciences and biology to investigate how the physical Earth affects and interacts with the biosphere. Geobiology research focuses on the interactions of organisms and microorganisms with the environments of early Earth to the present day, on the basis of paleontology. The systematic approach to geobiology is dependent on the geological survey, which in turn needs pioneering innovation from the new perspectives of geobiology. Geobiology is not only a key fundamental discipline for earth system science, but also an important scientific and social tool that serves as geological information for economic and social development. Collectively, geobiology is of great significance to the innovation of geological survey work in the new period.

Key words: geobiology; geological microbiology; environment; geological survey; scientific and technological innovation

收稿日期:2022-5-29;修回日期:2022-6-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41821001,41830319)、中国地质调查局项目(DD20190824)

第一作者:黄长生(1964—),正高级工程师,博导,主要从事水文地质、环境地质调查研究, E-mail: 185236157@qq.com

地球生物学是地球科学与生命科学交叉结合形成的学科,既包含对现代生物及其与环境关系的研究,又包含对重大地质时期生物与环境关系的分析(谢树成等,2006)。地球是生命的重要载体,在漫长的地质历史中,生命与地球之间、生物圈与地球其他圈层之间发生着重要的相互作用(谢树成等,2018)。生命与地球环境之间的相互作用导致了它们之间出现了协同演化,并最终出现了适合人类居住的宜居地球。这些过程构成了地球生物学研究的核心,包括微生物、植物、动物等不同类别、不同层次生物与地球环境之间的关系。

荷兰生物学家于 1930 年提出了“地球生物学”的概念:注重生命与地球系统相互作用的研究。我国学者张文佑先生于 1962 年向中国科学院致信建议:“地质科学应结合物理、化学、生物,发展地球物理、地球化学、地球生物(学)三个边缘学科”。21 世纪以来,《国家创新驱动发展战略纲要》的发布,更体现了诸如地球生物学等新学科体系构建对发展我国基础学科的重要性。学者们对地球生物学的概念、学科位置及分类体系、学科前沿方向、应用领域等问题进行了深入讨论,与其相对应的学术机构、科研平台、学术期刊等相继成立。2003 年国际上推出了“地球生物学”期刊,2016 年成立了“国际地球生物学会”,我国学者谢树成在这个国际期刊和国际学会中都担任职务。殷鸿福院士最早在国内公开出版物上倡导地球生物学的发展(殷鸿福,1994),2011 年他领导建立了以地球生物学为主题的生物地质与环境地质国家重点实验室,2015 年出版了《中国学科发展战略·地球生物学》,2018 年成立了中国古生物学会地球生物学分会,等等。这些都体现了地球生物学作为一个新的学科体系得到了国内外学者的极大关注。

地球生物学是研究生命演化过程与地球圈层演变的相互联系,地球不断变化的环境影响着生物圈的发展,生物圈也反过来影响着地球系统的演化(谢树成等,2011)。新时代的地质工作应结合地球生物学,利用学科交叉的优势实现地球生物学引领地质调查工作的创新,让地球生物学服务于长江经济带等国家重大战略和地方经济社会的发展,这是当前地质调查工作需要考虑、需要实现的重要课题。

1 地球生物学的重要发展领域与方向

1.1 地球生物学的重要研究方向

地球生物学的形成与生物学(由生物学→生命科学→整合 / 分子生物学)以及地质学(地质学→地球科学→地球系统科学)的不断发展紧密相关,是在古生物学基础上形成的地球系统科学的一大支撑学科。地球生物学研究涉及很多方面,从基础地质到关键地质时期重大科学难题,从生物与环境的相互作用到协同演化,从微生物作用到地质环境变化,从元素循环到气候环境演变,从深海到高山的极端环境生物适应与反馈等众多方面。在时间尺度上,地球生物学不仅研究现代环境的变化,也对关键地质时期的一些重大气候环境变化进行探索,例如,雪球地球、大氧化事件、海洋硫化等一系列环境事件,这些环境的异常以及之后的环境恢复,导致了一系列重大生命事件,是地球生物学关注的重要主题之一(殷鸿福等,2009,2011)。地球生物学不仅研究地质环境对生物的影响,而且更注重生物对地质环境的作用,特别是各类地质微生物功能群通过元素循环对地质环境产生重要影响,是地球由早期的无氧状态演化到富氧状态的主要机制,也是后生生物能够出现的前提条件(谢树成等,2015),而且与碳循环有关的微生物功能群不仅影响海洋环境,更重要的是影响大气环境与全球变化,也影响着气候的演变。

在研究对象上,地球生物学在古生物学主要研究动植物的基础上,加强细菌、古菌等地质微生物的研究。这些地质微生物积极参与了地质环境的改变,例如古生代硫化海洋的出现和维持(Canfield, 1998; Gric et al., 2005; Marynowski and Filipiak, 2007; Armstrong et al., 2009; vanBentum et al., 2009; Gill et al., 2011)与硫酸盐还原微生物、 H_2S 的厌氧氧化细菌和硫化物的好氧化细菌等典型的微生物功能群有着密切联系。微生物功能群的固氮作用则影响地质环境的营养条件(谢树成等, 2012)。微生物参与铁的氧化及还原过程,使得含铁矿物-微生物之间的协同进化(Dong H L, 2010)。地球上还存在多种多样的极端环境,如极高温、极低温、高压、高盐、高放射性和极度酸碱性等,从一

些极端环境中能够发现进而分离出一些重要的微生物。研究极端环境下微生物如何参与元素循环,如何适应这些极端环境条件,如何作用于地质环境,特别是研究极端环境中微生物的地质作用,这些都是地球生物学的重要研究方向。

1.2 地球生物学的发展重点

地球微生物学(也称地质微生物学)是地球生物学发展的重点领域或者分支学科,微生物作为地球的“元老”,在地球生命历史的前 5/6 阶段占主导地位,阐述生物圈与地球其他圈层双向的相互作用必须开展地质微生物的研究。从生态系统的能量传递过程来说,最初从环境中摄取能量的生物主要是地质微生物,最后把能量从生物圈返回给环境的还是地质微生物。地质微生物对全球变化、矿产资源的形成以及地球表层系统的改变起着至关重要的作用,是地球生命的支持系统。

地球生物学在强调“将今论古”重建地质历史时期生态环境的同时,更需要“以古示今”预判地球生态环境的未来发展方向。地球生物学是古生物学的继承和超越,古生物学是基石,也是研究的重点所在(王训练和沈阳,2020;殷鸿福等,2008)。地球历史有赖于人类对地史时期生物圈特征及其演化过程与其它圈层相互作用过程的全面、深入理解,进而揭示不同时期生物圈的特征、熟悉演化历程及深入探讨生物圈与地球其它圈层之间的关系。从地球生物学角度深入研究,有利于掌握生物演化过程的驱动力,根据生物演化的基本规律,判断生态环境的发展趋势,有助于人类趋利避害,促使人类与自然界和谐相处。

1.3 地球生物学的重要意义

地球生物学的重要意义在于揭示生命的形成、生物的演化及其与地球环境之间的相互作用与协同演化关系。

地质微生物功能群的研究实现了地球微生物学的突破。地质微生物功能群与重要地质时期的气候环境存在着密切的联系,无论是现代还是地史时期,自养微生物与异养微生物、好氧细菌与厌氧细菌、硫酸盐还原菌与甲烷菌等不同层次微生物群落,都在生态系统演化中扮演着不同的角色,都强烈地影响着地球各圈层系统(谢树成和殷鸿福,

2014)。微生物功能群将微生物生态学与生物地球化学过程联系起来,是研究微生物与环境相互作用的纽带。微生物的作用机制研究对于查明不同地质环境含有机质岩石的形成过程有着重要的地质学意义,同时也可以了解不同微生物功能群是如何响应、反馈各种地质事件,如何作用和影响各类地质环境的,它们作用的方式、条件、结果和机制如何等。

极端地质环境微生物研究有助于重建早期生命的起源与进化过程(肖湘和张宇,2014),而且通过各种极端环境条件下的微生物实验(李俊和李一良,2014),可以探讨生物标志矿物和生物有机分子富集机制,从而为无机到有机研究打下良好基础。古生物化石采集、系统分类和地层研究是探索生物大灭绝的根基和关键(戎嘉余和黄冰,2014),揭示了地球生命演化的规律。从古生物学发展到地球生物学,不仅仅是对这些古植物和微体古生物,以及细菌、古菌等地质微生物的深入分析,更是对古气候、古环境变化与微生物群落之间联系的深入研究。

2 地质微生物学服务于地质调查创新

2.1 服务方向

在学科大发展、地学大转变的新形势下,地球生物学为地质调查工作的创新提供了重要的学科支撑。地球生物学对于经济社会的发展主要有 4 大服务方向:资源能源、气候环境、生态安全、生命健康。

在资源能源方向上,地质微生物的研究已经有了成熟的体系(Leythaeuser et al., 1988; Banerjee et al., 2000; 梁祺, 2019):通过微生物氧化法富集金矿,致力于细菌浸出难处理金矿(李想, 2020);基于烃源岩的研究,如今已经深入到了优质烃源岩的生烃潜力,从分析残余有机质的反演机制到正演烃源岩形成的动力学过程(谢树成等, 2007)。当前,还加强了对各种储层的地球生物学研究,诸如白云岩的微生物成因(王金艺和金振奎, 2022)、含页岩气的页岩中“碎屑矿物”的微生物成因(韩梅, 2018)、纳米孔隙的微生物-有机作用(鲍园等, 2020)等等。

气候环境与生态安全作为现阶段地球生物学

的重要服务方向,已经进行了成功的探索(叶胜兰和舒晓晓,2021)。在地质微生物与气候环境的关系中,微生物通过驱动元素的循环,影响着大气成分、古气候与古环境的变化(Meyers et al.,2005;Sanders,2003),其出口正好服务于全球气候变化、碳中和等一些热门主题。地质微生物指标可以用来重建地质时期的气候环境变迁,包括古温度和干湿古气候(蒋辉等,2002;郑卓等,2013)。在地质微生物与生态安全的结合方面,从深时→深地→深海,微生物地质作用的生态效应无处不在,跨越了时间、空间,作用于矿物形成、环境污染以及污染的环境修复等过程中,这些都时时刻刻地影响着生态安全。

地质微生物与生命健康的关系是地球生物学服务社会的前沿研究领域,架起了生命科学与地球科学服务经济社会的新纽带。例如,地球科学应该在生命科学基础上为未来重大疫情的预测做出贡献。病毒无处不在,但是人类肉眼看不见,一旦引发疫情就会时时刻刻威胁着人类生命健康。有人甚至提出病毒导致了恐龙灭绝的推断(Peñalver et al.,2017),其逻辑链条是气候变化引发寄生虫大量繁殖,后者又携带了大量病毒,这些病毒的传播引起了恐龙灭绝。为了人类的生命健康,可以通过地球科学的支撑,开展对于未来疫情大流行的预测研究,其地球生物学的逻辑链条是:气候变化→病毒宿主的变化→病毒的传播→疫情扩散与爆发。基于这个逻辑链条,地球生物学家可以通过气候变化实现对未来疫情发展趋势的可能预测。

2.2 组织架构

人才团队:为了实现地球生物学创新地质调查工作,最为重要的就是建立起完善的组织,通过团队合作来快速实现对地球生物学的研究与探讨。基于大学(例如,中国地质大学等)的人才储备与科研机构(例如,中国地质调查局等)的优势资源,加强人才的引进,建立起优秀的地球生物学研究团队。从各个大学、研究院招募优秀的本科、研究生等有这方面天赋的年轻人才,将项目研究与人才培养相结合,形成一套完整人才培养、组织建设的体系,为以后的发展打下良好的基础。

研究平台:为了方便科研团队进行研究与实践,研究平台的搭建非常重要。建设国家级重点实

验室,为团队构建良好的实验条件和基地;建设工程技术中心,为团队将科研成果转化为实际应用的产品与技术;建设野外科学观测基地,为了方便野外实验与研究项目的实时动态监测。

重大项目:鼓励优秀研究员、博士、教授等科研人员申请国家自然科学基金项目、国家重点研发计划项目等等,项目的支持是研究可以顺利向前开展的重要基础和保证。有了项目的支撑,科研团队才能利用平台资源,才能培养优秀人才,才能将地球生物学的研究成果推向世界顶尖的行列。科技部、国家自然科学基金委、自然资源部中国地质调查局等部门设立项目资金,鼓励地质科技工作者申请地球生物学研究课题,利用项目资金优势吸引人才,以积极开展深入研究,促进重要研究成果的不断增多。

重大成果:将以往的重要科研成果和重要项目成果进行汇总,建立好已有成果数据库。进一步在已有成果的基础上扩展研究,将研究内容与创新理念不断深化,努力跻身地质与地球生物相结合的世界前沿行列。努力完成成果转化,将科研理论转化为实践操作,将研究成果转为实际产品,将科学研究转化到社会服务,最终实现科研落地,惠及人民群众,服务国家需求。

2.3 行动方案建议

地球生物学在地球科学领域具有广阔的应用前景,应该遵循以下目标清晰的技术路线。

(1)试点示范调查:为了明确研究区的情况,首先应该开展试点示范调查,明确地质微生物的赋存情况,调查地质微生物的分布、结构与生态功能关系;其次对地质环境有不同作用效果的微生物群落,还要调查清楚不同种类、不同群落的地质微生物在那里“做什么”,掌握地质微生物的基本情况。建议以长江中游和珠江、长江三角洲地区、南岭等重要经济区或成矿区带部署试点示范调查。

(2)建立标准规范:基于试点调查工作的内容,建立一套标准规范,如1:5万微生物调查规范、编图规范。将研究流程、注意事项、实验要求等都纳入这套科学严谨的技术标准中。这套技术标准将规范后续的研究工作,让后续的研究人员严谨而认真地开展工作,遵循标准而不忽略细节问题,不去犯相同的错误。

(3)加强机理研究:地球生物学的研究,需要攻克地质微生物的作用机制。地质微生物通过自身功能实现地质作用过程,都与特定的基因有关,要了解地质微生物的作用机理,就需要找到发挥作用酶或蛋白质,分析DNA指纹,从而明确表达功能的重要基因片段。分析作用原理可以通过高通量测序法、克隆文库法、蓝白斑挑选、Blast 比对等涉及功能群的一系列方法与操作来实现,这个过程就可以培养人才,鼓励科研人员在技术层次实现创新。

(4)推动成果转化:如何实现成果的应用,如何让成果服务于资源能源开发、生态环境保护、大气环境改善和生命健康安全,这是开展地球生物学研究最为重要的一个环节。科研成果要实践、应用、服务于社会,这就需要通过工程技术中心将成果转化,将成果的价值从研究层面带到社会服务中来。优秀的科研成果需要回答地质微生物研究中“谁在那里”、“为什么在那里”,以及“在那里干什么”等一系列的问题,从而明确其与环境污染的关系,实现将地质微生物应用于污染治理等社会服务中。

3 结束语

地球生物学的核心是生物与地球环境的相互作用和协同演化。地质微生物演化、地质微生物与环境变化的联系,以及重大地质时期生物与环境的关系是如今地球生物学的重要研究方向。生命的起源、辐射、灭绝和复苏等重大生命事件的发生,与地球深部过程以及受其影响的地球表层过程乃至行星环境密切相关(谢树成等,2007)。各类地质微生物功能群不仅灵敏地响应地质环境的变化,而且通过元素循环和矿物转变对地质环境产生重要影响。这些方向的深入研究拓展了地球生物学在地球演化、资源和全球变化等领域的应用,可以将地球生物学亟待解决的科学问题归纳为地球环境对生命系统的影响和生命系统对地球环境的作用两大方面,包括早期地球环境背景及其对生命起源、演化的影响,全球环境变化对地质微生物的影响与地质微生物的反馈(如对海洋水化学和大气成分的影响),以及极端地质环境微生物与深部生物圈的联系。

地球生物学可以开拓创新中国地质调查的新

视角和新局面,地球生物学的发展也需要地质调查工作的支撑。将地球生物学服务于经济社会的发展,实现地质调查的创新,是地球生物学与地质调查相结合的意义所在。地球生物学与地质调查的结合,是一项具有划时代意义、以往的地质调查工作所不能替代、具有很强的应用转化能力的工作,亟待开展。

说明:文章据中南地质科技创新中心首期“华南地质名家论坛”谢树成院士多媒体课件整理形成。

参考文献:

- 鲍园,唐佳阳,据宜文.2020.生物气化过程中煤岩纳米孔隙结构演化特征及富气机制[J].地质论评,66(S1):149-150.
- 韩梅.2018.川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩储层特征及控制因素[D].山东科技大学博士学位论文.
- 蒋辉,吕厚远,支崇远,羊向东.2002.硅藻分析与第四纪定量古地理和古气候研究[J].第四纪研究,22(2):113-122.
- 李俊,李一良.2014.模拟成岩或低级变质作用对铁氧化菌席的影响[J].中国科学:地球科学,44(6):1263-1272.
- 李想.2020.微生物氧化过程中群落结构及其演变规律研究[D].东北大学硕士学位论文.
- 梁祺.2019.乙醇促进煤地质微生物增产甲烷及菌群多样性分析[D].山西大学硕士学位论文.
- 戎嘉余,黄冰.2014.生物大灭绝研究三十年[J].中国科学:地球科学,44(3):377-404.
- 王金艺,金振奎.2022.微生物白云岩形成机理、识别标志及存在的问题[J].沉积学报,40(2):350-359.
- 王训练,沈阳.2020.地球系统科学时代的区域地质调查应更加重视古生物资源调查[J].地质论评,66(4):829-835.
- 肖湘,张宇.2014.极端环境中的生命过程:生命与环境协同演化探讨[J].中国科学:地球科学,44(6):1087-1095.
- 谢树成,龚一鸣,童金南,史晓颖,赖旭龙,冯庆来,王红梅,杜远生,王永标,颜佳新,张克信,殷鸿福.2006.从古生物学到地球生物学的跨越[J].科学通报,51(19):2327-2336.
- 谢树成,杨欢,罗根明,黄咸雨,刘邓,王永标,龚一鸣,徐冉.2012.地质微生物功能群:生命与环境相互作用的重要突破口[J].科学通报,57(1):3-22.
- 谢树成,殷鸿福,史晓颖.2011.地球生物学:生命与地球环

- 境的相互作用和协同演化 [M]. 北京: 科学出版社.
- 谢树成, 胡超涌, 顾延生, 黄咸雨, 朱宗敏, 黄俊华. 2015. 最近 13 ka 以来长江中游古水文变化 [J]. 地球科学, 40(2):198-205.
- 谢树成, 殷鸿福, 解习农, 秦建中, 史晓颖, 胡超涌, 颜佳新, 黄俊华, 周炼, 杨香华, 王永标, 徐思煌, 腾格尔. 2007. 地球生物学方法与海相优质烃源岩形成过程的正演和评价 [J]. 地球科学, 32(6):727-740.
- 谢树成, 殷鸿福, 刘邓, 邱轩. 2018. 再谈古生物学向地球生物学的发展: 服务领域的拓展与创新 [J]. 地球科学, 43(11):3823-3836.
- 谢树成, 殷鸿福. 2014. 地球生物学前沿: 进展与问题 [J]. 中国科学: 地球科学, 44(6):1072-1086.
- 叶胜兰, 舒晓晓. 2021. 微生物菌肥联合植物生态修复技术在矿山治理中的应用研究 [J]. 安徽农学通报, 27(18):156-157.
- 殷鸿福, 谢树成, 秦建中, 颜佳新, 罗根明. 2008. 对地球生物学、生物地质学和地球生物相的一些探讨 [J]. 中国科学: 地球科学, 38(12):1473-1480.
- 殷鸿福, 谢树成, 童金南, 史晓颖. 2009. 谈地球生物学的重要意义 [J]. 古生物学报, 48(3):293-301.
- 殷鸿福, 谢树成, 颜佳新, 胡超涌, 黄俊华, 腾格尔, 鄯文昆, 邱轩. 2011. 海相碳酸盐烃源岩评价的地球生物学方法 [J]. 中国科学: 地球科学, 41(7):895-909.
- 殷鸿福. 1994. 生物地质学 [J]. 地球科学进展, 9(6):79-82.
- 郑卓, 黄康有, 魏金辉, 乐远福, 万秋池, 许清海, 吕厚远, 罗运利, 罗传秀, 郑艳伟, 李春海, 杨士雄, 李杰, 潘安定, 邓韞, 魏海成, Beaudouin C. 2013. 中国及其邻区现代孢粉数据: 空间分布特征和定量古环境重建中的应用 [J]. 第四纪研究, 33(6):1037-1053.
- Armstrong H A, Abbott G D, Turner B R, Makhlof I M, Muhammad A B, Pedentchouk N, Peters H. 2009. Black shale deposition in an Upper Ordovician-Silurian permanently stratified, peri-glacial basin, southern Jordan[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 273:368-377.
- Banerjee A, Jha M, Mittal A K, Thomas N J, NMisra K. 2000. The effective source rocks in the north Cambay basin India[J]. Marine and Petroleum Geology, 17(10):1111-1129.
- Canfield D E. 1998. A new model for Proterozoic ocean chemistry[J]. Nature, 396:450-453.
- Dong H L. 2010. Mineral-microbe interactions: A review[J]. Frontiers of Earth Science in China, 4:127-147.
- Gill B C, Lyons T W, Young S A, Kump L R, Knoll A H and Saltzman M R. 2011. Geochemical evidence for widespread euxinia in the Later Cambrian ocean[J]. Nature, 469:80-83.
- Grice K, Cao C Q, Love G D, BottcherRicher M E, Twitchett R J, Grosjean E, Summons R E, Turgeon S C, Dunning W and Jin Y G. 2005. Photic zone euxinia during the Permian-Triassic superanoxic event[J]. Science, 307:706-709.
- Leythaeuser D, Schaefer R G, Radke M. 1988. Geochemical effects of primary migration of petroleum in Kimmeridge source rocks from Brae Field area North Sea [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52(3):701-713.
- Marynowski L, Filipiak P. 2007. Water column euxinia and wildfire evidence during deposition of the Upper Famennian Hangenberg event horizon from the Holy Cross Mountains (central Poland) [J]. Geological Magazine, 144(3):569-595.
- Meyers S R, Sageman B B, Lyons T W. 2005. Organic carbon burial rate and the molybdenum proxy: theoretical framework and application to Cenomanian-Turonian oceanic anoxic event 2[J]. Paleoceanography, 20:2002-2020.
- Peñalver E, Arillo A, Delclòs X, Peris D, Grimaldi D A, Anderson S R, Nascimbene P C and Fuente R P. 2017. Ticks parasitised feathered dinosaurs as revealed by Cretaceous amber assemblages[J]. Nature Communications, 8, 1924.
- Sanders D. 2003. Syndepositional dissolution of calcium carbonate in netric carbonate environments: geological recognition, processes, potential significance[J]. Journal of African Earth Sciences, 36:99-134.
- van Bentum E C, Hetzel A, Brumsack H J, Forster A, Reichart G J, Damsté J S S. 2009. Reconstruction of water column anoxia in the equatorial Atlantic during the Cenomanian-Turonian oceanic anoxic event using biomarker and trace metal proxies[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 280(3-4):489-498.