



移动阅读

王晓楠, 任强, 侯明才, 等, 2024. PBDB 数据库在古地理重建中的重要应用进展[J]. 沉积与特提斯地质, 44(1): 34-44. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.09001

WANG X N, REN Q, HOU M C, et al., 2024. Progress in the applications of the Paleobiology Database in paleogeographic reconstruction[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(1): 34-44. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.09001

PBDB 数据库在古地理重建中的重要应用进展

王晓楠, 任强*, 侯明才, 董俊玲, 陈安清, 马超, 钟瀚霆, 郑栋宇

(成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059)

摘要: 大数据时代的信息技术革命带来了科学研究的数字化变革, 作为地球科学领域开展数字化科研重要里程碑的古生物数据库 Paleobiology Database (PBDB), 为古地理研究提供了重要的数据支撑。通过调研 PBDB 数据库平台内容及其在古地理重建中的应用实例, 总结 PBDB 数据库目前在古地理重建中存在的问题, 展望其未来的发展方向。结果表明: (1) 古生物数据库包含大量的可溯源数据, 是古生物领域研究的重要信息来源和成果交流平台, 其中 PBDB 数据库具有可视化特点, 能提供多种数据检索和下载方式, 是古地理重建工作的首选古生物数据库; (2) PBDB 数据库的分类学和采集记录数据, 在约束古地理位置、修订古气候带划分方案、定量古高程古水深、校正古海岸线等古地理重建领域具有明显优势; (3) 古生物数据库偏向于古生物研究领域, 且古生物记录的历史可能存在偏差和不完整性, 其在古地理重建中起辅助约束作用, 而非绝对途径; (4) 如何实现古生物数据库中数据的自动分类、筛选, 如何精确约束古板块位置的相对经度, 如何提升古气候、古高程、古水深等研究的精确性, 是应用 PBDB 数据库进行古地理重建的重要发展方向。

关键词: PBDB 数据库; 古生物化石; 古地理重建; 现存问题; 应用展望

中图分类号: P531

文献标识码: A

Progress in the applications of the Paleobiology Database in paleogeographic reconstruction

WANG Xiaonan, REN Qiang*, HOU Mingcai, DONG Junling, CHEN Anqing, MA Chao, ZHONG Hanting, ZHENG Dongyu

(Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The information technology revolution in the era of big data has brought about the digital evolution of scientific research. As a significant milestone of digital scientific research in earth science, the Paleobiology Database (PBDB) can provide essential data support for paleogeographic research. Through the investigation of the content of the PBDB platform and its applications in paleogeographic reconstruction, the current problems in the paleogeographic reconstruction of PBDB are summarized, and its future development is anticipated. The results show that: (1) Paleontology database contains a large number of traceable data, which is an important information source and exchange platform for paleontology research. The PBDB includes a visualization function, can provide a variety of data retrieval and download methods, and is the preferred paleontology database for paleontology reconstruction work. (2) The classification and collection data of the PBDB have many applications in the field of paleogeographic reconstruction,

收稿日期: 2022-07-11; 改回日期: 2022-08-22; 责任编辑: 郭秀梅; 科学编辑: 万友利

作者简介: 王晓楠 (1998—), 女, 硕士研究生, 沉积学与地层古生物学专业。E-mail: wangxiaonan1998@126.com

通讯作者: 任强 (1989—), 男, 博士, 研究员, 主要从事古地理重建、构造古地磁学及磁性地层学研究。

E-mail: renqiang@cdut.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (41902227)

such as constraining paleoplates locations, revising the division scheme of paleoclimatic zones, quantifying paleolatitudes and paleodepths, and correcting paleocoastlines. (3) The paleontological database is more suitable for the field of paleontological research, and the history of paleontological records may be biased and incomplete, so it plays an auxiliary constraint role in paleogeographic reconstruction, rather than an absolute approach. (4) Future developments and applications of paleogeography reconstruction using PBDB include automatic classification and screening of data, methods to accurately constrain the relative longitude of paleoplate positions, and approaches for improving the accuracy of paleoclimate, paleoelevation, and paleodepth determinations.

Key words: Paleobiology Database; paleontological fossil; paleogeographic reconstruction; current problems; prospects of application

0 引言

古地理重建工作主要基于板块构造理论,重建古海陆位置分布、气候及生物演化规律(张蕾等, 2020),古生物完整记录了地史时期中生命演化、环境变迁以及古地理迁移的全过程。因此,研究古生物化石群对生物古地理区系划分有着重要作用,能够为古地理重建提供重要的理论依据(谢俊芳等, 2007; 邓怡颖等, 2020; 邵梦媛等, 2017)。同时,古生物学数据也是深时数字地球(Deep-time Digital Earth, DDE)国际大科学计划数据建设的重要组成部分。基于古生物大数据综合分析重建古地理已成为地学领域的前沿发展方向,并经研究者长久积累,逐渐建立起现代化的古生物学数据库(樊隽轩等, 2013)。其中, Paleobiology Database(简称为 PBDB)是众多古生物数据库中数据体量最大、更新维护时效性最好、应用领域最为广泛的数据库。基于其提供的全球化石产出记录和分类学信息以及优越的交互性和开发能力, PBDB 在解决数据驱动下的大尺度古生物学重要科学问题方面,产出了最多科研成果(邓怡颖等, 2020)。

Philips(1860)最早应用古生物学数据库思想,在英国化石数据集基础上绘制出可追溯的第一条古生物种属多样性曲线。随后,19世纪末至20世纪末发展起了一批具有系统编目性质的无脊椎、脊椎动物化石名录资料,如 Sepkoski 建立的全球显生宙海洋动物科级化石纲要(Sepkoski, 1982, 1992)。目前,全球已建立上百个古生物数据库,包括古生物学数据库 Paleobiology Database(PBDB)、微体化石数据库 Neptune(NSB)以及地质历史时期生物多样性数据库 Geobiodiversity Database(GBDB)等。自古生物数据库思想提出以来,相关数据库在古板块

位置重建(Ren et al., 2021)、古气候带划分(Chaloner and Creber, 1990)、古高程(周浙昆等, 2007)和古水深研究(Cao et al., 2017)方面取得诸多成果,为古地理重建工作提供了极为重要的理论支撑。但不同数据库中可能存在的古生物记录历史的偏差与不完整性,往往造成与古地理不完全协调的结果,因此,有必要系统梳理古生物数据库应用在古地理重建研究中的优势和局限。鉴于此,本次研究聚焦“如何利用古生物数据库开展古地理研究工作”这一关键问题,以 PBDB 数据库为例,结合该数据库的平台功能和数据类型,分析利用该数据库进行相关古地理重建的成功案例,总结其当前的局限性,展望其未来的发展方向,以期为广大古地理重建工作者提供重要的研究方法思路,进一步激发该数据库的潜在价值。

1 PBDB 数据库介绍

Sepkoski et al.(1979, 1984)建立了地质历史中生命演化的宏观规律,并识别出五大灭绝事件。由于所利用的显生宙海洋动物数据库信息仅包含科及属级化石分类,分析能力有限,因此,为进一步探索生命演化的详细过程与机制,1998年, A Iroy John et al. 建立了 PBDB 数据库(樊隽轩等, 2011),并相继获得了美国国家生态分析与综合研究中心、美国国家科学基金会、澳大利亚研究委员会及全球各研究团队或个人项目的支持。作为古生物领域研究工作者获取古生物记录及分类学信息的重要来源和交流科研成果的重要平台, PBDB 数据库内容涵盖古生物分类学数据、化石产出记录与文献数据等(侯旭东和樊隽轩, 2012),截至2022年8月16日,在 PBDB 数据库基础上,已产出432篇标注科研成果。近期,基于 PBDB 数据库, OneStratigraphy

古生物数据库及应用平台得以发展,它属于“深时数字地球(DDE)国际大科学计划”里的重要平台,但目前还未完全开放。

1.1 PBDB 数据库结构及数据

PBDB 数据库结构主要由化石产出记录、分类学数据以及数据查询表等数据表组成,还包含关于生态学、埋藏学和形态学等独立数据表内容。数据表由若干数据记录组成,例如分类学数据表中包含权威分类、观点和分类树(图 1),数据记录又由若干数据字段构成,例如采集记录包括地理学信息、地质学信息和采集方法等。所有数据都链接到参考文献,以追溯数据公开来源,数据表内的数据记录间相互链接提供科学依据,数据表间也建立了联系(图 1)。

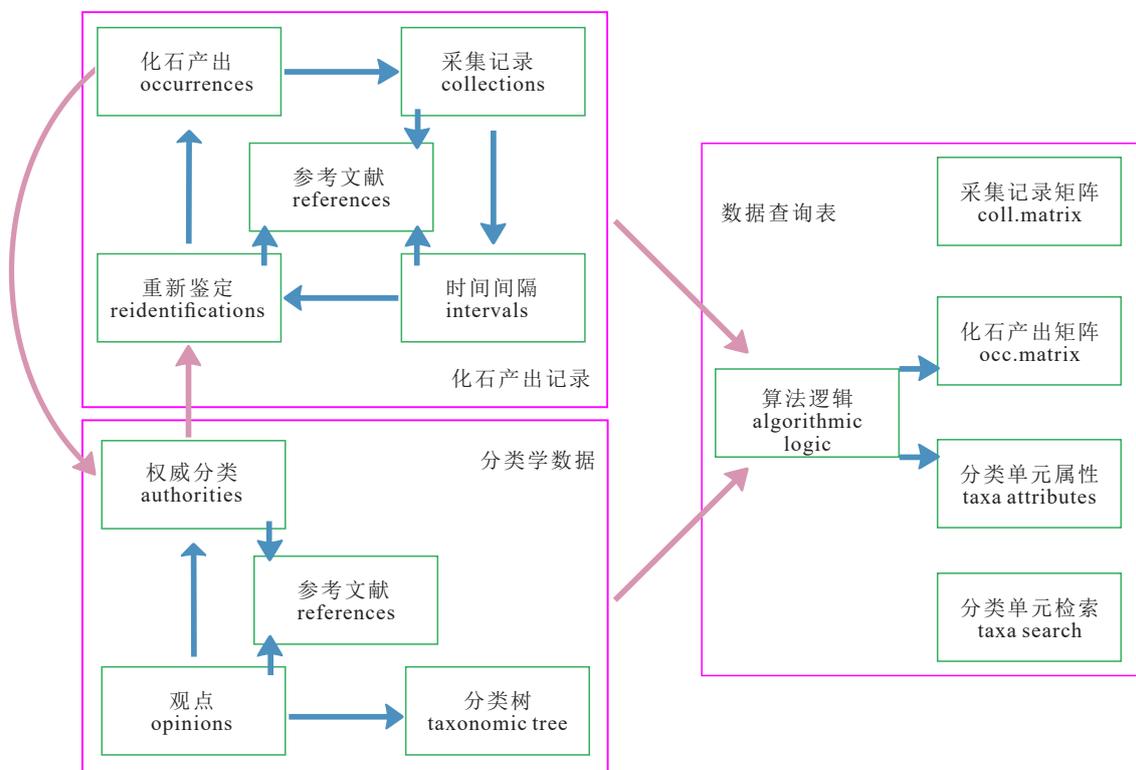
PBDB 数据库的基本构成是数据,包含绝大部分地质历史的古生物数据、地层学数据、地理数据和数据来源等信息。化石产出记录表中包括化石采集数据及分类信息、采样地层、岩石学信息、古地理背景、地理位置、地质年代信息等数据。分类学信息表包括观点和由其构建的权威分类,分类单

元名结合观点确定最新分类系统,同时也记录了不同学者的分类方案。目前已建立起含 20 个大型数据集的在线分类档案,附带分类单元名称和观点的下载链接,包括在地史时期生物多样性方面研究最卓越的全球显生宙海洋无脊椎动物多样性数据集(樊隽轩等,2011)。数据来源信息包括文献信息和数据贡献者,因而所有数据具有可溯源性。

截至 2022 年 8 月 16 日, PBDB 数据库涵盖了 82 278 篇专业文献, 461 290 个分类单元, 886 689 条观点信息, 226 783 条采集记录, 共有 1 563 479 条化石产出记录, 410 位研究者参与贡献, 由美国自然历史博物馆、哈佛大学、中国科学院南京地质古生物研究所等众多高校及科研院所的研究者共同搭建。

1.2 PBDB 数据库的基本功能

PBDB 从科学研究需要出发,开发了在线图形化交互检索程序,访问者可以对库内数据进行多途径检索,还可以通过网页端程序、移动端程序、R 语言包及标准程序接口(API)等方式快捷获取及使用数据(潘照晖和朱敏,2020)。对于古地理重建工



注: 蓝色箭头表示数据表内链接关系, 粉色箭头表示数据表间链接关系, 黄色外框表示数据表, 绿色外框表示数据记录。

图 1 PBDB 数据库主要结构(改自 Peters and McClellenn, 2016)

Fig. 1 Main structure of PBDB (modified from Peters and McClellenn, 2016)

作者而言, PBDB 的应用可充分利用数据库资源, 推动科研工作的进展。

1.2.1 可视化——PBDB Navigator

网站应用 PBDB Navigator, 主页面为电子地图(图 2A), 提供地理信息可视化查询与下载、生物多样性统计分析功能、古今地理投点等工具。几大特点如下:

(1) 色标点直观显示了采样点地理位置、数量分布和地质年代, 色标点和地质年代表使用国际标准年代地层颜色。用户可筛选条件或选择地图具体区域以获得化石事件, 单击采样点弹出详细信息, 包括化石物种、生存年代、发现者、产出时间、产出地层、现代经纬度及古地理位置、相关文献等详细数据。

(2) 决定数据库易用性的关键功能是数据检索, 检索框可以按照化石物种、生存年代、化石发现者和发现地层四类关键词调用数据库内的化石数据。

(3) 左侧菜单栏可生成生物多样性曲线图, 支持用户查阅研究对象随时间的多样性变化情况, 选择生物分类和地质年代, 对相关图片与数据进行保存下载。

(4) 可切换古今地理投图。数据库收录的化石记录包含当前地理坐标和对应地质年代信息, 将两者与 GPlates 的古板块重建模型结合即可为化石记录匹配对应的古地理坐标, 例如展示早石炭世古地理视图(图 2B)。在古地理重建方面, 该功能方便了研究者对某地质历史时期地球板块的制图与研究, 可以直接生成对应时期古板块重建图。

1.2.2 数据检索与下载

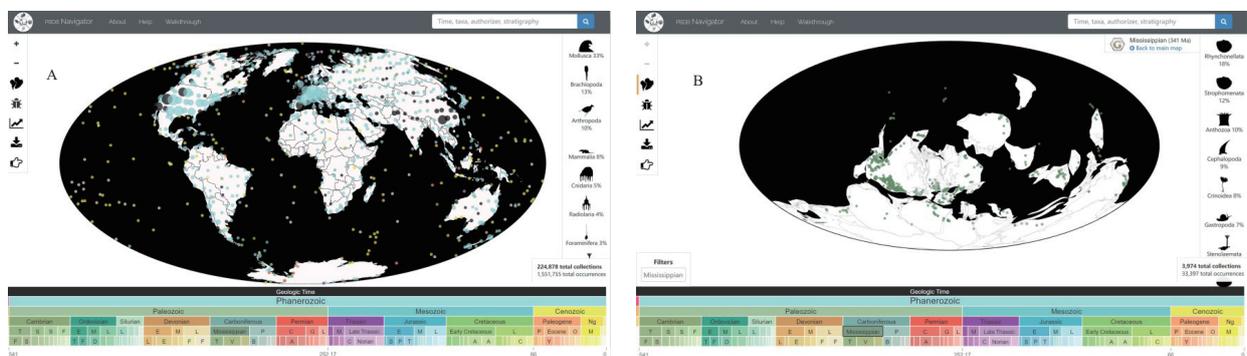
对于用户来说更重要的在于数据检索、下载

及分析(郭安林等, 2004)。PBDB 数据库顶端菜单栏的检索类别多样化, 可获得采集记录信息(采集地区、地层样本编号、古今地理经纬度、地层学信息、参考文献信息、数据贡献信息等)、分类学相关信息(分类学信息、生物学信息、化石采集记录等)、相关参考文献信息(参考文献编号、文献 DOI 号、分类学名称数量及分类学观点数、采集记录等)、分类单位物种下级单位分类相关信息(结果标识为分类单位缩写+名称+文献作者+文献发表时间, 且展示全部内容后可看到以某观点为基础所发展新观点的分支内容)、地质单元信息(地质学信息、地质年龄范围、化石采集记录), 数据库做到了完全可追溯性。

PBDB 主页数据下载功能允许访问者下载所有公共类型数据。数据下载格式有 CSV、TSV、JSON 和 RIS, 可自由选择所需检索信息数据输出格式。另外, 输入关键字生成特定 URL 以提供原始数据接口, 数据库旨在鼓励用户利用公共数据开发针对性数据分析工具。PBDB 开放了应用程序接口(API), 用户可基于 API 接口调用数据, 利用编程编写交互式 Web 应用, 实现数据深度挖掘和检索分析。除此之外, 开放 API 还可以整合不同来源数据库的资源, 快速抓取所需数据, 实现跨平台合作。

2 PBDB 中古生物数据在古地理重建方面的应用

PBDB 中可应用于古地理重建的数据类型主要有分类学数据和采集记录数据。通过“生物学信息/化石采集记录+采集位置”, 可实现气候带的



A. The Paleobiology Database 网页界面; B. 早石炭世古地理视图。

图 2 PBDB Navigator 视图

Fig. 2 PBDB Navigator interface

划分;通过“化石采集记录+采集位置集合”,可实现古板块位置、古海拔(古高程)、古水深及古海岸线重建。

2.1 利用 PBDB 数据划分古生物区系重建古板块位置

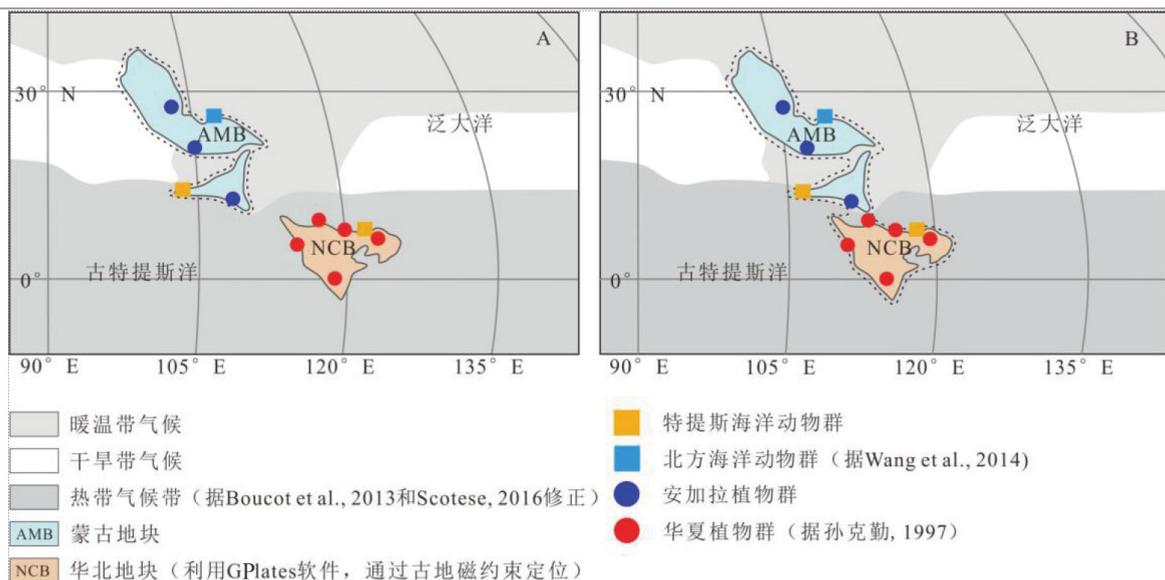
古地理重建图主要根据古地磁方法,即拟合多个稳定克拉通的视极移曲线进行古大陆重建(Zhang et al., 2012),但对于一些来自造山带的的数据,由于区域构造旋转影响,其只能定量确定大陆古纬度。此时就需要其它方法确定板块间的相对连接关系,如生物古地理分区(王成文等, 2014)、碎屑锆石物源分析(Eizenhoefer et al., 2015)、造山带几何连接(Zhao et al., 2002)、岩浆岩特征性质分析(Wang et al., 2017)等。大地构造环境控制着生物古地理分布(王永标和杨浩, 2003),因而生物古地理是研究大地构造的必须手段之一(王乃文, 1984),是恢复板块相对古地理位置的重要研究手段。在古地磁学定量重建古纬度的基础上,利用动植物化石特征和亲缘关系划分生物古地理分区重建古海陆格局,能更准确地重建古地理位置。

Ren et al.(2021)利用蒙古和华北地块的生物古地理分区重建两者相对古地理位置。首先通过古地磁数据计算出在 330~315 Ma 蒙古地块和华北地块具有相同的古纬度(换算到同一参考点)。但

单独利用古纬度值进行古板块重建会导致古经度位置存在多解性,比如,蒙古和华北地块相似古纬度的情况可能指示两个地块连为一体(图 3B),也可能指示存在两个地块在近似纬度分别并置(图 3A)。为了解决相对古经度的不确定性问题,通过 PBDB 筛选出石炭纪(330~315 Ma)华北地块(North China Block, NCB)和蒙古地块(Amuria Block, AMB)的陆地植物和海洋动物化石数据,发现蒙古地块发育以科达属和蕨类为主的安加拉植物区系和以凉水分子为主的北方海洋动物群(Wang et al., 2014),而华北地块发育以东方型鳞木、窝木为主的华夏植物区系(孙克勤, 1997)和以暖水分子为主的特提斯海洋动物群(图 3),二者的显著差异表明地块间存在宽阔的海洋将其隔离,因此 Ren et al.(2021)的重建方案将蒙古和华北地块在相似纬度分别并排放置(图 3A)。

2.2 PBDB 中的植物化石作为古气候带划分的重要指标

古气候重建是古地理重建的重要单元,常见的古气候带划分概念和方法主要是根据 Köppen 气候分带模式,主要包括赤道附近热带雨林、亚热带沙漠带、暖温带草原和雨林、季节性冷暖温带、极地区(Scotese et al., 2021),是分析地质历史时期气候敏感物分布规律的主要指导思想。



A. 两地块在相似纬度间隔大洋状态; B. 两地块连接状态。

图 3 石炭纪宾夕法尼亚时期蒙古地块 (AMB) 与华北地块 (NCB) 古地理重建模式 (改编自 Ren et al., 2021)

Fig. 3 Model maps of paleogeography reconstruction of the Mongolian Block (AMB) and the North China Block (NCB) during the Carboniferous Pennsylvanian Period (modified from Ren et al., 2021)

目前,利用气候敏感沉积物的分布特征重建古气候(Boucot A J et al., 2009; Cao et al., 2017),其解释存在一定不确定性,如煤层可以发育在热带、亚热带和温带等多个气候带。因此,需要结合其他气候敏感指标数据才能对古气候带进行合理划分。大量研究表明陆生植物的生长发育受气候环境影响显著(Bailey and Sinnott, 1916; Gregory and Chase, 1992; Wolfe, 1978; Wolfe, 1993),即光照、水分和温度等环境因素与植物的地理分布紧密相关(Woodward and Williams, 1987),是控制植物群落分布的主要影响因素(Chaloner and Creber, 1990)。在气候古地理重建过程中,可通过 PBDB 数据库搜集植物化石类型及分布,利用其适应环境指示的古气候特征修订古气候带划分方案。

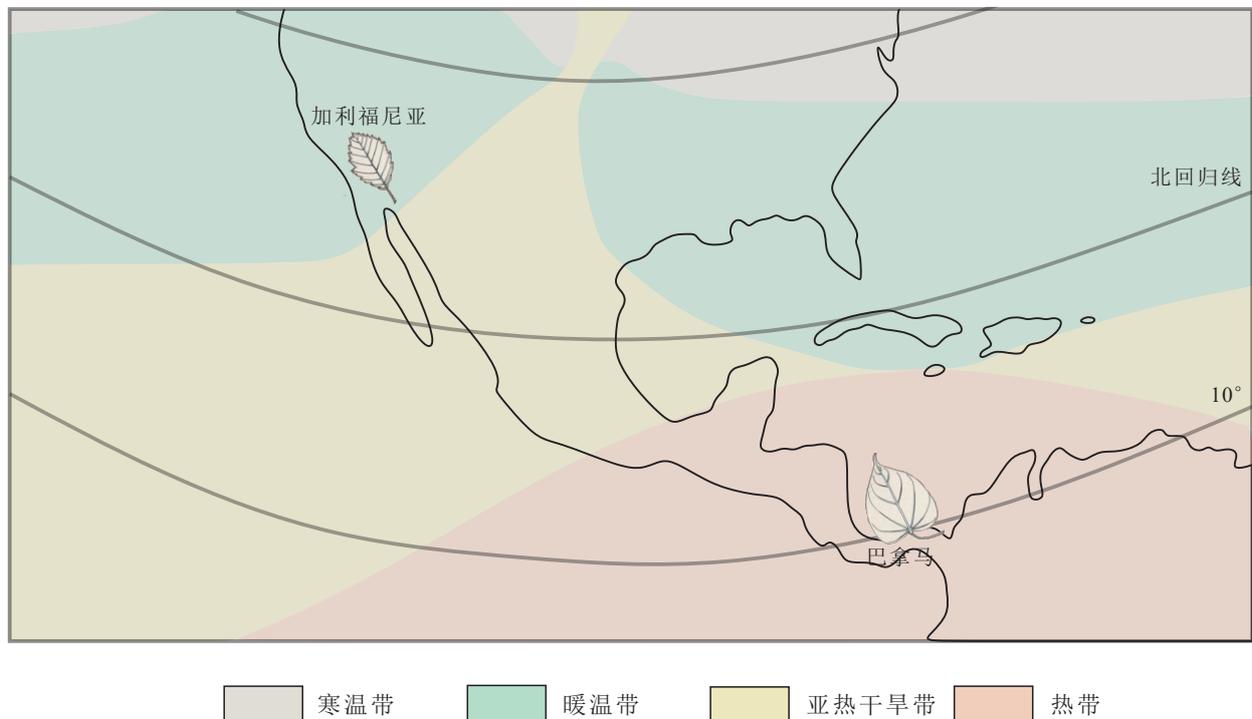
植物叶片形态(叶相)特征反映了植物在生理和生态过程上的功能适应,从而敏感地指示区域气候,而在大陆尺度甚至全球尺度内都存在这种相关性,是定量重建新生代陆地古气候的重要方法之一。Bailey and Sinnott(1916)最早提出利用叶相分析法反演气候特征。一般叶片较小(<10 cm)且叶缘具

齿、角质层薄的植物指示温带条件;植物叶片较大(>10 cm),呈“滴水叶尖”状,并具较厚角质层特征,则指示潮湿热带环境(图 4)。

更直观的方法是依据已划分的生物区系划分气候带。Ren et al.(2021)通过 PBDB 数据库筛选出 330~315 Ma 华北和蒙古地块的陆地植物和海洋动物化石数据,根据生物适应环境大致划分气候带分布,将分布有安加拉植物区系和北方海洋动物群的蒙古地块划为暖温带,分布有华夏植物区系和特提斯海洋动物群的华北地块划为热带(图 3)。

2.3 利用 PBDB 数据库中的古植物确定古地形

温度和湿度是陆生植物生长的关键环境因素(Greenwood, 1992),生态环境已被证明与纬度和海拔高度的变化密切相关(Forest, 2007; Forest et al., 1999)。在 PBDB 中重建古海拔主要利用共存因子分析原理,通过确定化石现存最近亲缘类群(nearest living relatives, NLRs)所提供的生态指标和气候数据进行数值范围叠加,进行定量的共存区间数据分析,适用于叶、木材、果实、种子和孢粉等化石植物群(孙启高, 2008)。



注: 加利福尼亚地区落叶乔木叶片大小<10 cm, 角质层薄, 叶缘具齿, 指示暖温带为主的气候; 巴拿马地区植物叶片大小>10 cm, 角质层厚, 呈滴水叶尖状, 指示热带为主的气候。

图 4 美洲中部植物叶相与气候分布(改自 Chaloner and Creber, 1990; Chaney, 1947; Scotese, 2021)

Fig. 4 Leaf morphological distributions and their relationships with climate in Central America (modified from Chaloner and Creber, 1990; Chaney, 1947; Scotese, 2021)

周浙昆等(2007)重新研究了西藏希夏邦马峰中—晚上新世植物化石和南木林中中新世植物化石群,基于化石最近亲缘现生物种的海拔高度,利用共存因子分析法推测希夏邦马峰化石点的古海拔约为2 500~3 500 m(图 5A),认为自上新世以来,希夏邦马峰至少抬升了2 200~3 400 m;而中新世南木林下段和上段植物化石所代表的古海拔分别为2 000~3 000 m(图 5B)和2 800~3 000 m(图 5C),表明自中新世以来,西藏南木林地区至少抬升了1 300 m。

2.4 PBDB 数据中的古生物应用于古水深重建和古海岸线修正

2.4.1 古水深重建

古水深是确定盆地升降历史和海平面变化幅度的重要分析指标。依据生物与环境的协同演化关系,重建古水深的方法包括:(1)利用微体古生物种群分析(van der Zwaan et al., 1990)等方法,根据不同化石组合划分水深相带的定性分析;(2)利用具古水深意义的水生植物孢粉分布特征分析的定量恢复(潘文静等, 2019);(3)通过底栖有孔虫与浮游有孔虫比值或含量定量恢复古水深。

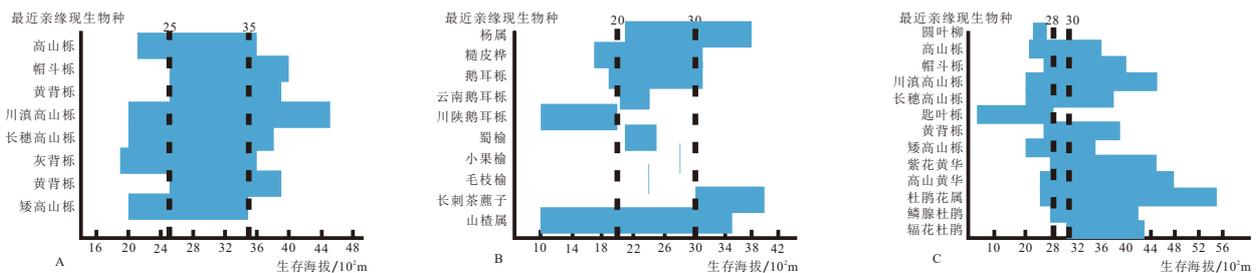
潘文静等(2019)结合新近纪水生草本植物的古水深指示意义对渤海东南部新近纪古湖盆水体特征进行定量恢复。统计现代亚热带淡水湖盆鄱阳湖、洪湖、洪泽湖等的水生植物分布特征,整理

出一些常见水生植物与古水深指示关系(表 1)。蓬莱 7 构造 3 井区馆陶组以浮水植物带为主,指示馆陶组沉积时期古水深为 1.5~3 m,明化镇组下段井出现沟鞭藻,指示水深为 5~20 m,且最大古水深上下部地层主要为 4~6 m 处生长的植物带,指示明下段沉积时期主体古水深约 4~6 m。研究发现,馆陶组沉积早中期南侧主要是生长在水深小于 3 m 环境的浮水植物,并且南侧井区早期稳定存在指示 4~6 m 深度生存的浮游生物类,在其它井区中晚期后才出现。这些数据重建了渤海东南部盆地古水深中心由南向北迁移的古地理演化特征。

古地理重建工作者利用 PBDB 数据库进行区域古水深重建时,只需要筛选出研究区的古生物分类名,对其进行分区后对比指示古水深关系表便可初步得出研究区域重建的古水深。

2.4.2 海岸线修正

海平面变化影响生物栖息地的分布,对生物多样性的演化具有重要影响(Kocsis and Scotese, 2021),显生宙五次生物大灭绝事件和几次较小灭绝事件的发生节点多与高频次海侵-海退耦合的明显海平面升降拐点相吻合(Hallam and Wignall, 1999)。海岸线代表各地质时期的最大海侵面,确定海岸线位置及其演变过程是研究大陆生长和海平面升降的关键,对理解地球古地形、海洋环流和



A. 希夏邦马峰组海拔共存区; B. 南木林乌龙组下段组海拔共存区; C. 南木林上段组海拔共存区。

图 5 利用最近亲缘现生物种共存区间推测古海拔,蓝色矩形条表示物种的生存海拔(高程)范围(改自周浙昆等, 2007)

Fig. 5 The coexistence interval of nearest living relatives was used to estimate the ancient altitude. The blue rectangular represents the range of living altitude (elevation) of the species (modified from Zhou et al., 2007)

表 1 渤海海域新近纪常见水生植物与古水深指示关系(改自潘文静等, 2019)

Table 1 Relationship between common aquatic plants and paleo-bathymetric indicators in the Bohai Sea during Neogene (modified from Pan et al., 2019)

植物类型	挺水植物带	浮水植物带	沉水植物带	无水底植物带	浮游植物带	轮藻植物带
水深/m	<1.5	1.5~3	3~5, 局部到7	>7	4~6	2.5
属种类型	Sparganium stoloniferum Ranunculus	Azolla Sporotrapoidites	Potamogeton		Pediastrum	轮藻

地幔对流在形成长周期中的作用具有重要意义。古生物化石数据可独立定性研究海洋和陆地沉积环境(Kocsis and Scotese, 2021), 特别是利用已发掘的海洋生物化石位置校正古海岸线已成为古地理重建的重要手段。

Cao et al.(2017)使用 PBDB 数据库中的某一地质时期海洋化石分布确定其海洋环境, 以此对比和校正已有的岩相古地理图。通过海洋生物化石分布的不一致性来修改古海岸线位置。首先从 PBDB 下载的数据中选取目标地质时期的生物化石点集合, 利用 ArcGIS 软件进行数据空间配准和矢量化, 将其绑定对应古板块的 ID, 通过已有的古地理重建旋转参数(来自 GPlates 软件; Matthews et al., 2016)将这些化石点数据恢复到目标地质时期的古地理位置。这些化石点数据会叠加到待检验的古地理重建图上, 如果海洋生物化石位置在陆地上, 则需要将这些陆地修改为海洋(图 6)。通过此方法, Cao et al.(2017)的研究将古地理重建的精度大幅提高, 美洲、非洲和欧洲主要地区的古地理情况发生重大改变。

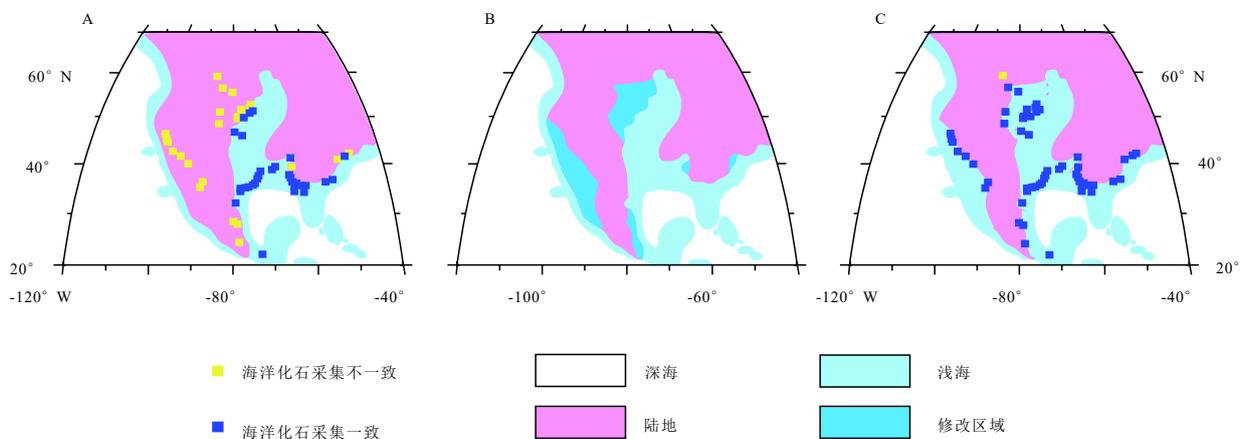
3 现存问题与展望

古生物学应用于古地理重建优势明显, 但有时可能存在历史记录的偏差与不完整, 与古地理不完全协调。应用动物化石最明显的问题在于动物活动性更强, 所以利用动物化石进行研究时要排除小概率事件的影响。在解决不同问题时应尽可能采用多种类型的动植物化石进行对比分析。同时 PBDB 对古地理重建工作有一定的辅助作用, 而非

绝对途径, 因为数据库更偏向古生物研究, 与地质工作者的研究需求不完全一致。当前 PBDB 下载的数据没有分类, 应用于古地理重建时需要人工分类筛选, 如前所述分析数据时, 要实现数据自动分类可通过 API 接口或 R 语言制作数据筛选分析应用。

对于古板块位置重建, Ren et al.(2021)结合古地磁和古生物数据的重建方案为我们作古大陆重建提供了一个范式。但是, 其方案无法定量确定两地块的相对古经度。目前对于解决这个难题还处于探索阶段, 充分利用 PBDB 古生物数据是解决途径之一。例如, Macarthur and Wilson(1963)曾提出岛屿生物地理平衡理论, 主旨为远岛上的物种数量随面积的增加速度快于近岛, 该理论中的隔离效应原理和物种-面积关系原理直接与古板块面积及与相邻大板块距离相关, 可能有助于推导相关群岛中两岛屿间的远近关系(王军等, 2001)。因此, 通过 PBDB 古生物数据与岛屿生物地理平衡理论以解决相对古经度问题是未来的研究方向。

在研究古气候与古海拔方面, 利用植物化石现存最近亲缘种的适应环境特征重建区域古气候特征方法可行。但由于物种进化差异、现存认识不充分等因素而具有局限性, 同时化石组合的埋藏过程可能使得叶片性状特征缺失而导致植物区系划分不准确, 进而使得古气候分析存在误差(Wolfe, 1995)。并且叶相学分析仅适用于预测被子植物为主的叶区系植被类型和古气候(Greenwood, 1992; Wolfe, 1985), 叶缘类型可能与区域气候无直接关系, 导致较大估测偏差, 因此要依据叶相学对古气候进行解释必须使用密切代表原始植被的化石组



A. 修改前海洋化石采集点及古海岸线位置; B. 将不一致的采集点手动修改; C. 修改后的古海岸线。

图 6 利用 PBDB 数据修正 76 Ma 北美板块海岸线 (改自 Cao et al., 2017)

Fig. 6 Corrected 76 Ma North American plate shorelines using PBDB data (modified from Cao et al., 2017)

合(Boyd, 1994)。研究表明树木化石的生长轮对古气候的指示更加准确稳定(Chaloner and Creber, 1990)。Wei et al.(2016)发现中国西北哈密市天山镇地区中-晚二叠系存在指示温带环境的清晰生长轮和热带-亚热带环境的无清晰生长轮的混合树木化石,结合研究区存在安加拉区系和华夏区系的混合植物区系的情况,认为新疆东部研究区古气候是介于热带和亚热带之间相对温暖湿润的过渡类型气候,显示了季节性变化且不稳定的气候条件。目前, PBDB 数据库中在此方面数据较少,今后可增加化石的详细数据,使得库中的古生物信息不局限于分类信息及产地信息。

利用共存因子分析重建古海拔仅适用于中新世以后。古植物学家目前提出了两种利用植物化石重建古海拔的方法:气孔参数法和热力学原理(黄永江等, 2010)。气孔参数法在实现定量重建古海拔方面具有很大潜力,首先确定现生亲缘种并利用叶片气孔参数估算古大气 CO₂ 浓度,再根据分压与海拔为减函数原理结合海平面的 CO₂ 浓度估算古海拔(Kouwenberg et al., 2007)。此方法得到的古海拔误差在±300 m 以内(McElwain, 2004),但存在诸多局限性。首先,化石必须是保存有较好角质层;其次,与叶化石气孔频率的线性关系受 CO₂ 浓度制约(Beerling and Royer, 2002)。Spicer et al.(2003)首次应用热力学原理定量重建西藏南木林中新世的古海拔,即某海拔点的湿静能等于该点垂直线上任何点的热焓,已知该海拔点的热焓与湿静能可计算该点海拔。然而以热力学方法估算海拔高度,更合适的数据库为 Physg3ar,通过对反映植物叶片生长发育的叶相进行计分评估,计算植物群热焓。因此重建古海拔应结合实际需求选择合适的方法并尽量多方法相互检验。目前 PBDB 调用的数据信息还不足以通过气孔参数法和热力学原理完成古海拔重建,但是该数据提供的可追溯功能有助于研究者在获得相关数据的植物化石分类后,进一步追溯原始资料详细信息,从而完成分析。

在古水深重建方面,有限的钻孔中微体生物记录少或不完整,还需加强对古生物组合与高分辨率层序地层对比研究来提高时空精度(苏新等, 2012)。在古海岸线修正的应用方面,由于使用不同板块模型产生的几何间隙或重叠,以及生物化石地层是否具有精确时间尺度的厘定,都会对结果造成影响。要考虑化石物种的生活习性和相关地质环境(Cao

et al., 2017)以排除小概率事件导致的误差。例如 Wichura et al.(2015)发现的一块喙鲸化石,表明 17 万年前这头鲸可能沿向东的河流由印度洋向内陆移动,并在距东非现今印度洋海岸线 740 km 的内陆搁浅。因此,在利用古生物进行海岸线修正时,要将此类误导性化石数据排除。

4 结论

(1)古生物数据库包含大量的古生物分类、化石产出记录和文献等可溯源数据,其中 PBDB 数据库具有可视化特点,可提供多种数据检索和下载,是古生物领域研究的重要信息来源和成果交流平台,也是古地理重建工作的首选古生物数据库。

(2)使用 PBDB 数据库的分类学和采集记录数据,在古地磁定量重建古纬度基础上,约束相对古经度,与气候敏感沉积物分布结合修订古气候带划分方案,定量重建古高程、古水深,校正古海岸线等古地理重建领域具有明显优势。

(3)古生物数据库提供的数据虽在古地理重建中具有显著优势,但其记录的历史可能存在偏差和不完整性,往往会造成与古地理不完全协调的结果;且数据库更偏向于古生物研究领域,与古地理重建的需求不完全一致,共同表明古生物数据库对古地理重建起辅助、约束作用,而非绝对途径。

(4)结合古地理重建需求,如何实现数据自动分类、筛选,如何准确约束古板块位置的相对经度,如何丰富化石的详细数据,以提升古气候、古高程、古水深等研究领域的精确性等内容,是 PBDB 数据库在古地理重建工作的重要发展方向。

致谢:感谢各位前辈在论文的撰写过程中所给予的宝贵建议。诚挚感谢编辑部和两位匿名审稿人对本文提出的宝贵意见。谨以此文献与“深时数字地球(Deep-time Digital Earth)”国际大科学计划,并向长期从事地质调查和科学研究的地质工作者致以崇高的敬意!

References

- Bailey I W, Sinnott E W, 1916. The Climatic Distribution of Certain Types of Angiosperm Leaves[J]. *American Journal of Botany*, 3 (1) : 24 - 39.
- Beerling D J, Royer D L, 2002. Reading a CO₂ signal from fossil stomata[J]. *The New Phytologist*, 153 (3) : 387 - 397.
- Boucot A J, Chen X, Scotese C R, et al., 2009. Phanerozoic global

- paleoclimatic reconstruction[M]. Beijing: Science Press.
- Boyd A, 1994. Some limitations in using leaf physiognomic data as a precise method for determining paleoclimates with an example from the Late Cretaceous Pautūt Flora of West Greenland[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 112: 261 – 278.
- Cao W C, Zahirovic S, Flament N, et al., 2017. Improving global paleogeography since the late Paleozoic using paleobiology[J]. *Biogeosciences*, 14 (23) : 5425 – 5439.
- Chaloner W G, Creber G T, 1990. Do fossil plants give a climatic signal?[J]. *Journal of the Geological Society*, 147 (2) : 343 – 350.
- Chaney R W, 1947. Tertiary centers and migration routes[J]. *Ecological Monographs*, 17 (2) : 139 – 148.
- Deng Y Y, Fan J X, Wang Y, et al., 2020. Current status of paleontological databases and data-driven research in paleontology[J]. *Geological Journal of China Universities*, 26 (4) : 361 – 383 (in Chinese with English abstract).
- Eizenhöfer P R, Zhao G C, Sun M, et al., 2015. Geochronological and Hf isotopic variability of detrital zircons in Paleozoic strata across the accretionary collision zone between the North China Craton and Mongolian arcs and tectonic implications[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 127 (9-10) : 1422 – 1436.
- Fan J X, Hou X D, Chen Z Y, et al., 2013. GeoBiodiversity database and its application in stratigraphic research[J]. *Journal of Stratigraphy*, 37 (4) : 400 – 409 (in Chinese with English abstract).
- Fan J X, Zhang H, Hou X D, et al., 2011. Quantitative research trends in palaeobiology and stratigraphy—construction of the GeoBiodiversity database(GBDB) using escience technology[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 50 (2) : 141 – 153 (in Chinese with English abstract).
- Forest C E, Wolfe J A, Molnar P, et al., 1999. Paleoaltimetry incorporating atmospheric physics and botanical estimates of paleoclimate[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 111 (4) : 497.
- Forest C E, 2007. Paleoaltimetry : A Review of Thermodynamic Methods[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 66 (1) : 173 – 193.
- Greenwood D R, 1992. Taphonomic constraints on foliar physiognomic interpretations of Late Cretaceous and Tertiary palaeoclimates[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 71 (1-4) : 149 – 190.
- Gregory K M, Chase C G, 1992. Tectonic significance of paleobotanically estimated climate and altitude of the late Eocene erosion surface, Colorado[J]. *Geology*, 20 (7) : 581 – 585.
- Guo A L, Zhang G W, Yao A P, 2004. System analysis in building geological database[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 34 (2) : 203 – 206 (in Chinese with English abstract).
- Hallam A, Wignall P B, 1999. Mass extinctions and sea-level changes[J]. *Earth-Science Reviews*, 48 (4) : 217 – 250.
- Hou X D, Fan J X, 2012. Current development of the Geobiodiversity Database (GBDB) and its data statistics[J]. *Journal of Stratigraphy*, 36 (3) : 627 – 629 (in Chinese with English abstract).
- Huang Y J, Su T, Xing Y W, et al., 2010. Two methods of palaeoaltitude reconstruction and quantitative palaeoaltitude reconstruction of the middle Miocene Shanwang[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 49 (4) : 532 – 538 (in Chinese with English abstract).
- Kocsis Á T, Scotese C R, 2021. Mapping paleocoastlines and continental flooding during the Phanerozoic[J]. *Earth-Science Reviews*, 213: 103463.
- Kouwenberg L L R, Kürschner W M, McElwain J C, 2007. Stomatal Frequency Change Over Altitudinal Gradients: Prospects for Paleoaltimetry[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 66 (1) : 215 – 241.
- Macarthur R H, Wilson E O, 1963. An Equilibrium Theory of Insular Zoogeography[J]. *Evolution*, 17 (4) : 373 – 387.
- Matthews K J, Maloney K T, Zahirovic S, et al., 2016. Global plate boundary evolution and kinematics since the late Paleozoic[J]. *Global and Planetary Change*, 146: 226 – 250.
- McElwain J C, 2004. Climate-independent paleoaltimetry using stomatal density in fossil leaves as a proxy for CO₂ partial pressure[J]. *Geology*, 32 (12) : 1017 – 1020.
- Pan W J, Liu S L, Tian D R, et al., 2019. Reconstruction of palaeo-water depth of Neocene shrinking lake: an example from the south of Bodong low uplift, Bohai sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 35 (4) : 18 – 25 (in Chinese with English abstract).
- Pan Z H, Zhu M, 2020. Review of database in vertebrate Paleontology[J]. *Geological Journal of China Universities*, 26 (4) : 424 – 443 (in Chinese with English abstract).
- Peters, Shan E. McClennen, Michael, 2016. The Paleobiology Database application programming interface[J]. *PALEOBIOLOGY*, (1) : 1 – 7.
- Phillips J. 1860. *Life on the Earth: Its Origin and Succession* [M]. London: Macmillan and Company.
- Ren Q, Zhang S, Suhbaatar T, et al., 2021. Did the Boreal Realm extend into the equatorial region? New paleomagnetic evidence from the Tuva-Mongol and Amuria blocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 576: 117246.
- Scotese C R, Song H J, Mills B J W, et al., 2021. Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years[J]. *Earth-Science Reviews*, 215: 103503.
- Sepkoski J J, 1979. A kinetic model of Phanerozoic taxonomic diversity II. Early Phanerozoic families and multiple equilibria[J]. *Paleobiology*, 5 (3) : 222 – 251.
- Sepkoski J J, 1982. A compendium of fossil marine families [J]. *Milwaukee Public Museum Contributions in Biology and Geology*, 51: 1 – 125.
- Sepkoski J J, 1984. A kinetic model of Phanerozoic taxonomic diversity. III. Post-Paleozoic families and mass extinctions[J]. *Paleobiology*, 10 (2) : 246 – 267.
- Sepkoski J J, 1992. A compendium of fossil marine animal families, 2nd edition[J]. *Milwaukee Public Museum Contributions in Biology and Geology*, 83: 1 – 156.
- Spicer R A, Harris N B W, Widdowson M, et al., 2003. Constant elevation of southern Tibet over the past 15million years[J]. *Nature*, 421: 622 – 624.
- Su X, Ding X, Jiang Z X, et al., 2012. The micropaleontological quantitative bathymetry method was used to reconstruct the lake bathymetry in the early sedimentary stage of the upper fourth member of the Shahejie Formation in Dongying Depression[J]. *Earth Science Frontiers*, 19 (1) : 188 – 199 (in Chinese with English abstract).
- Sun K Q, 1997. Characteristics of the evolution and distribution of the global Carboniferous and Permian floras[J]. *Earth Science Frontiers*,

- 4 (3-4) : 129 – 138 (in Chinese with English abstract).
- Sun Q G, 2008. How to determine quantitative estimates of palaeoelevation from fossil plants?[J]. *Geological Review*, 54 (2) : 145 – 154 (in Chinese with English abstract).
- van der Zwaan G J, Jorissen F J, de Stigter H C, 1990. The depth dependency of planktonic/benthic foraminiferal ratios; constraints and applications[J]. *Marine Geology*, 95 (1) : 1 – 16.
- Wang C W, Zhao G W, Li N, et al., 2014. Coevolution of brachiopod paleobiogeography and tectonopaleogeography during the late Paleozoic in central Asia[J]. *Science China: Earth Sciences*, 56: 2094-2106.
- Wang C W, Li N, Zong P, et al., 2014. Coevolution of brachiopod Boreal Realm and Pangea[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 412: 160 – 168.
- Wang J, Shen G L, Zhang H, et al., 2001. On the application of the equilibrium theory of island biogeography to the Permian Cathaysian flora of China[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 40 (4) : 443 – 449 (in Chinese with English abstract).
- Wang N W, 1984. On the palaeobiogeography and plate tectonics of Qinghai-Tibet plateau[C]//Proceedings of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (9) .
- Wang T, Tong Y, Zhang L, et al., 2017. Phanerozoic granitoids in the central and eastern parts of Central Asia and their tectonic significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 368 – 392.
- Wang Y B, Yang H, 2003. Biopaleogeographic characteristics of the Early Permian in the East Kunlun-Anyemaqen-Bayan Har area[J]. *Science China: Earth Sciences*, 33 (8) : 775 – 780 (in Chinese with English abstract).
- Wei X X, Zhang X H, Shi G R, et al., 2016. First report of a phytogeographically mixed (transitional) Middle-Late Permian fossil wood assemblage from the Hami area, northwest China, and implications for Permian phytogeographical, paleogeographical and paleoclimatic evolution in central Asia[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 448: 125 – 140.
- Wichura H, Jacobs L L, Lin A, et al., 2015. A 17-My-old whale constrains onset of uplift and climate change in east Africa[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (13) : 3910 – 3915.
- Wolfe J A, 1978. A Paleobotanical Interpretation of Tertiary Climates in the Northern Hemisphere: Data from fossil plants make it possible to reconstruct Tertiary climatic changes, which may be correlated with changes in the inclination of the earth's rotational axis[J]. *American Scientist*, 66 (6) : 694 – 703.
- Wolfe J A, 1985. Distribution of major vegetational types during the Tertiary[J]. *The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂: Natural Variations Archean to Present*, 32: 357 – 375.
- Wolfe J A, 1995. Paleoclimatic estimates from tertiary leaf assemblages[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 119 – 142.
- Wolfe J A, 1993. A method of obtaining climatic parameters from leaf assemblages[M]. Washington: U. S. Geological Survey Bulletin 2040, 1.
- Woodward F I, Williams B G, 1987. Climate and Plant Distribution at Global and Local Scales[J]. *Vegetatio*, 69 (1-3) : 189 – 197.
- Zhang L, Zhong H T, Chen A Q, et al., 2020. Paleogeographic reconstruction driven by big data: challenges and prospects[J]. *Geological Journal of China Universities*, 26 (1) : 073 – 085 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S H, Li Z X, Evans D A D, et al., 2012. Pre-Rodinia supercontinent Nuna shaping up: A global synthesis with new paleomagnetic results from North China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 353-354: 145 – 155.
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al., 2002. Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent[J]. *Earth-Science Reviews*, 59 (1-4) : 125 – 162.
- Zhou Z K, Yang Q S, Xia K, 2007. Plant fossils of Quercus group inferred the uplift of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52 (3) : 249 – 257 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- Boucot A J, 陈旭, Scotese C R, 等, 2009. 显生宙全球古气候重建[M]. 北京: 科学出版社.
- 邓怡颖, 樊隽轩, 王玥, 等, 2020. 古生物学数据库现状与数据驱动下的科学研究[J]. *高校地质学报*, 26 (4) : 361 – 383.
- 樊隽轩, 侯旭东, 陈中阳, 等, 2013. 基于 GBDB 数据库的地层学研究与应用[J]. *地层学杂志*, 37 (4) : 400 – 409.
- 樊隽轩, 张华, 侯旭东, 等, 2011. 古生物学和地层学研究的量化趋势--GBDB 数字化科研平台的建设及其意义[J]. *古生物学报*, 50 (2) : 141 – 153.
- 郭安林, 张国伟, 姚安平, 2004. 地质数据库建立中的系统分析[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 34 (2) : 203 – 206.
- 侯旭东, 樊隽轩, 2012. GBDB 数据库的发展与数据简况[J]. *地层学杂志*, 36 (3) : 627 – 629.
- 黄永江, 苏涛, 星耀武, 等, 2010. 两种古海拔重建方法及山旺中新世古海拔的定量重建[J]. *古生物学报*, 49 (4) : 532 – 538.
- 潘文静, 刘士磊, 田德瑞, 等, 2019. 渤海海域新近纪湖盆萎缩期古水深恢复——以渤东低凸起南端为例[J]. *海洋地质前沿*, 35 (4) : 18 – 25.
- 潘照晖, 朱敏, 2020. 国内外古脊椎动物数据库综述[J]. *高校地质学报*, 26 (4) : 424 – 443.
- 苏新, 丁旋, 姜在兴, 等, 2012. 用微体古生物定量水深法对东营凹陷沙四上亚段沉积早期湖泊水深再造[J]. *地学前缘*, 19 (1) : 188 – 199.
- 孙克勤, 1997. 全球石炭纪-二叠纪植物群的演化和分布特征[J]. *地学前缘*, 4 (3-4) : 129 – 138.
- 孙启高, 2008. 如何利用化石植物定量研究古海拔?[J]. *地质论评*, 54 (2) : 145 – 154.
- 王成文, 赵国伟, 李宁, 等, 2014. 中亚地区晚古生代腕足动物古生物地理与构造古地理的协同演化[J]. *中国科学: 地球科学*, 44 (2) : 213-226.
- 王军, 沈光隆, 张泓, 等, 2001. 论我国二叠纪华夏植物群岛生物地理平衡理论的应用[J]. *古生物学报*, 40 (4) : 443 – 449.
- 王乃文, 1984. 青藏高原古生物地理与板块构造的探讨[C]//中国地质科学院地质研究所文集(9) .
- 王永标, 杨浩, 2003. 东昆仑-阿尼玛卿-巴颜喀拉地区早二叠世的生物古地理特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 33 (8) : 775 – 780.
- 张蕾, 钟瀚霆, 陈安清, 等, 2020. 大数据驱动下的数字古地理重建: 现状与展望[J]. *高校地质学报*, 26 (1) : 073 – 085.
- 周浙昆, 杨青松, 夏珂, 2007. 砾质高山砾组植物化石推测青藏高原的隆起[J]. *科学通报*, 52 (3) : 249 – 257.