



基于大洋钻探计划的年龄—深度模型对比研究

龚成, 张鹏程, 韩卿臣, 马超

引用本文:

龚成, 张鹏程, 韩卿臣, 等. 基于大洋钻探计划的年龄—深度模型对比研究[J]. 沉积学报, 2025, 43(5): 1874–1896.

GONG Cheng, ZHANG PengCheng, HAN QingChen, et al. [Comparative Analysis of Age-Depth Models Based on the Ocean Drilling Program](#)[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2025, 43(5): 1874–1896.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[崇明岛H12孔百年来长江入海沉积物来源变化及原因](#)

Provenance Tracing of Sediment in Changjiang Estuary in the Past 150 Years and the Implications: Case study in core H12 at Chongming Island

沉积学报. 2020, 38(6): 1204–1214 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.002>

[南黄海西部日照海域海侵沉积地层及其古环境意义](#)

Transgressive Succession Offshore Rizhao in Western South Yellow Sea and Paleoenvironmental Implications

沉积学报. 2020, 38(4): 790–809 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.063>

[鄂尔多斯盆地镇泾地区长8致密储层成藏期临界物性厘定](#)

Determination of Lower Limits of Critical Properties of Chang 8 Tight Sandstone Reservoirs, Zhenjing Block, Ordos Basin

沉积学报. 2020, 38(1): 231–243 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.012>

[南海北部白云峡谷群富有孔虫砂层沉积特征及发育机制](#)

Sedimentary Features and Genetic Mechanisms of the Foraminifer-rich Sand Layers in the modern Baiyun Submarine Canyons, Northern South China Sea

沉积学报. 2019, 37(4): 798–811 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.187>

[强制海退体系中烃源岩的类型与测井评价——以尼日尔Termit盆地为例](#)

Source Rock Types and Logging Evaluation in Forced Regressive Systems Tract: Taking the Termit Basin (Niger) as an Example

沉积学报. 2018, 36(2): 390–400 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.036>

文章编号:1000-0550(2025)05-1874-23

基于大洋钻探计划的年龄—深度模型对比研究

龚成^{1,2,3}, 张鹏程^{4,5}, 韩卿臣^{4,6}, 马超^{1,2,3,4}

1. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 成都理工大学, 成都 610059

2. 成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 成都 610059

3. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

4. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

5. 湖北永业行评估咨询有限公司, 武汉 430070

6. 山东黄金矿业(玲珑)有限公司, 山东烟台 265406

摘要 【目的】年龄—深度模型在地质历史重建、地层对比与古气候研究中具有核心作用,但针对不同地质背景选择最优模型仍存在不确定性。为提升全球尺度沉积历史时间框架的精度,并解决多源异构数据整合的难题,通过整合全球大洋钻探计划自1968年以来获取的年代学数据,对560个岩心数据的年龄信息进行标准化处理,以增强跨地区与跨数据库的可比性。【方法】基于标准化数据,分别采用线性拟合、多项式拟合、Clam、Bacon、Undatable和Bchron等6种方法构建年龄—深度关系模型,并建立多维评估体系,利用地层叠覆率分析与均方根误差(RMSE)等指标,对各模型在精度、稳定性以及沉积速率变化和异常数据处理能力等方面进行系统比较。【结果】非贝叶斯模型(线性拟合、多项式拟合、Clam)在沉积速率均匀条件下表现较好,但在应对沉积间断与异常值方面存在不足;贝叶斯模型(Bacon、Bchron、Undatable)能够有效剔除异常值并精确模拟沉积速率变化,其中Bchron在精确度、稳定性及对大洋钻探数据的适应性方面综合表现最佳。【结论】全球大洋钻探数据的标准化整合不仅能显著提升年龄—深度模型的可比性与精度,还为未来模型参数优化、测年精度提升及其在全球地层对比与古地理重建中的应用奠定了坚实的基础。

关键词 大洋钻探计划;年龄—深度模型;数据标准化;贝叶斯统计

第一作者简介 龚成,男,2000年出生,硕士研究生,沉积学,E-mail: 496883732@qq.com

通信作者 马超,男,教授,E-mail: machao@cdut.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.054

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.054

0 引言

科学大洋钻探计划(SOD)是全球海洋科学领域规模最大、时间跨度最长的国际合作项目,其发展历程包括深海钻探计划(DSDP, 1968—1983年)、大洋钻探计划(ODP, 1984—2003年)、综合大洋钻探计划(IODP, 2003—2013年)以及国际大洋发现计划(IODP, 2013—2023年)^[1-4]。该计划通过在全球海洋钻取沉积物与岩石样品,探索地球历史、地壳演化、生物进化及气候变化等重大科学问题^[5-6]。截至2024

年,项目已完成403个航次^[7-9](图1),相关数据包括测井、地震、环境及数字化数据库等,由IODP等国际组织统一管理和共享^[10],为全球地球科学研究提供了重要支撑,尤其在古气候与古海洋学研究中贡献突出^[11]。

地质年龄数据为气候演变研究提供时间框架,而年龄模型则将离散的年龄数据转化为连续时间序列,是古气候重建的关键环节^[12]。大洋钻探数据中保存了大量全球地质年龄记录,不仅可用于重建海洋历史,还可为板块运动、火山喷发、气候模式及生物

收稿日期:2025-08-19;修回日期:2025-09-16;录用日期:2025-10-10;网络出版日期:2025-10-10

基金项目:国家重点研发计划(2023YFF0804000);国家自然科学基金项目(42488201,42172137);四川省科技计划项目(2023NSFSC1986)[**Foundation:** National Key Research and Development Program of China, No. 2023YFF0804000; National Natural Science Foundation of China, No. 42488201, 42172137; Science and Technology Planning Project, Sichuan Province, No. 2023NSFSC1986]

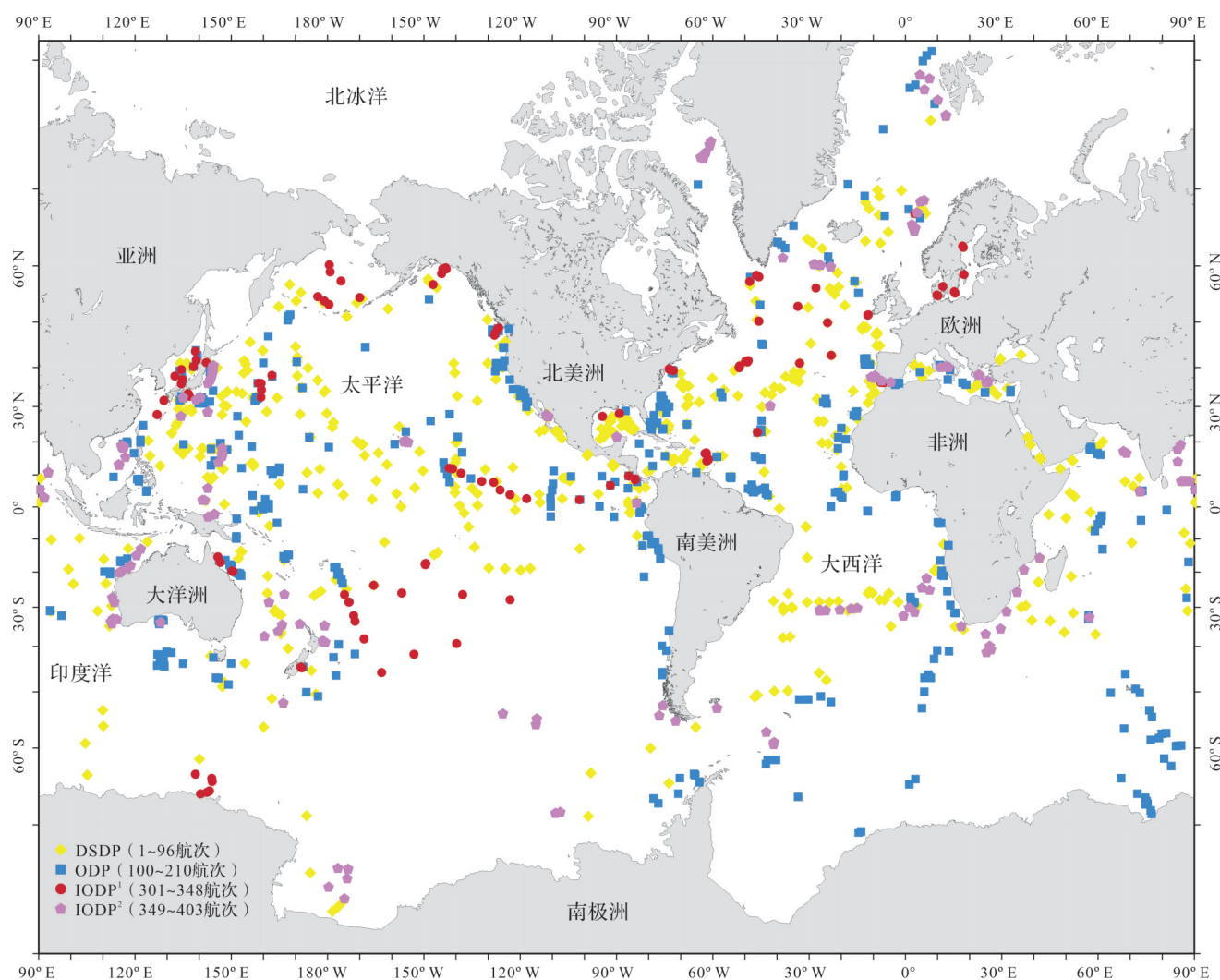


图1 大洋钻探截至2024年执行的全部航次站位分布图(据 <https://iodp.tamu.edu/scienceops/maps.html> 修改)

Fig.1 Map of all stations visited by ocean drilling expeditions by 2024 (modified from <https://iodp.tamu.edu/scienceops/maps.html>)

多样性研究提供支撑^[13-14]。由于实际观测比较稀疏,年龄模型也是比较密集的离散的点,需结合沉积物深度建立年龄—深度模型(Age-Depth Model),以推算任意深度的年龄分布^[15-16]。目前,构建此类模型的方法包括传统数学拟合及基于贝叶斯统计的模型,如Bacon^[17]、Bchron^[18]与Undatable^[19]等。模型选择需综合数据特性与研究目标,是一项具有挑战性的任务^[20]。随着观测技术进步,地质数据呈指数级增长^[21],但不同地区、时期与研究领域采集的数据在格式与标准上存在差异,影响整合与应用^[22-23]。尽管大洋钻探数据已实现长期公开,但格式依然异构,数据挖掘潜力巨大^[24-25]。深时数字地球(Deep-time Digital Earth, DDE)国际大科学计划也指出大量深时地球数据尚未数字化^[26],进一步凸显数据标准化的重要性。

本研究基于大洋钻探年龄与深度数据,首先开展统一化与标准化处理,随后利用线性拟合、多项式拟合及Bacon、Clam、Bchron、Undatable等6种方法构建年龄—深度模型,并比较模型的拟合精度与适用性,旨在评估并选取最适合大洋钻探数据的建模方案,为全球海洋钻探数据在古气候与地球系统科学研究中的深度应用提供方法参考。

1 数据与方法

1.1 数据收集

在大洋钻探研究中,岩心年代数据主要依赖生物地层学与磁性地层学。前者基于浮游有孔虫等微体化石的演化序列建立生物年代框架^[27-28],后者通过识别磁极性反转序列并与全球地磁极性时间尺度对

比实现定年^[29-30]。在实际应用中,通过确定化石或磁性事件的首次出现(FAD)与末次出现(LAD)位置,可推算对应岩心段的年代^[31]。本研究所用化石包括钙质超微化石、有孔虫、放射虫和硅藻:钙质超微化石广泛分布、进化速率快,适用于中生代和新生代高分辨率年代划分^[32-33];有孔虫分为浮游与底栖两类,前者常用于白垩纪—第四纪的古海洋学与地层学研究,后者可指示古环境与深海沉积过程^[34];放射虫具硅质骨架、进化迅速,适合晚古生代—新生代深海地层精细划分^[35];硅藻对水体环境敏感,在古湖泊、古气候及第四纪地层研究中应用广泛^[36-37]。这些化石在时间和环境指示性上互补,综合使用可覆盖古生代至现代的年代重建^[38-39]。

年龄数据的管理依托标准化结构表(表1),其中记录了岩心名称、深度、年龄、年龄不确定度及数据来源等信息。Event_Name用于标注事件名称, top_sample与bot_sample存储样品信息并与深度对应;若深度缺失,则可通过样品编号进行推算。Depth_Type用于标识深度单位(如mbsf、mcd、CSF-A),但目前不同单位之间的换算尚未完全统一。对于化石带,年龄取“Young Age”与“Old Age”的中值作为代表值,其差值作为误差;若缺失不确定度且仅有单一年龄值,则参考微区分析,取约3%作为估算误差^[40]。Comments字段用于记录数据修改责任人和备注信息,便于质量控制与追溯。为最大化收集大洋钻探的年代信息,本研究不仅整合了数据库中已有的模型年龄数据,还系统采集了相关出版物中的年代资料,并以统一方法加以处理,最终建立标准化的年龄模型(图2)。

在数据库获取方面,海王星数据库(Neptune)的年龄数据可直接下载,主要涵盖深海钻探计划(Deep

Sea Drilling Program, DSDP)、大洋钻探计划(Ocean Drilling Program, ODP)及少量综合大洋钻探计划(International Ocean Discovery Program, IODP)数据;潘基亚(Pangaea)数据获取相对复杂,需以“Chronology”“Age Depth”“Age model”等关键词下载相关表格,提取所需字段并进行人工核查。数据库之间存在部分重叠,已在后续清洗环节剔除^[40]。在文献与航次报告处理方面,IODP阶段采用人工精筛法:先锁定可能包含模型年龄数据的文件,定位表格位置,统一电子化并按标准格式提取。DSDP与ODP阶段则利用大数据批处理,将航次报告表格批量转为Excel,通过规则筛选匹配目标表,并借助Excel映射插件自动转换为标准入库格式。对于仅以图像呈现的年龄模型数据,采用Getdata软件精确提取^[41]。

1.2 数据清洗

在数据收集过程中,难免获取部分无用或错误信息^[42-43]。此类“脏数据”可分为五类:(1)无效数据:不属于古生物或磁性地层事件,缺乏地质意义,应予剔除;(2)错误数据:下载或提取过程中因人为原因导致字段描述错误,需要修正;(3)缺失数据:字段为空或缺值,需通过插补或合并补全;(4)重复数据:多来源冗余记录,需去重;(5)不一致数据:同一事件在不同来源存在差异,需比对与校准。为此,构建了半自动化数据清洗流程,利用计算机代码识别并纠正错误、缺失、重复及不一致记录,最终筛选出准确的目标数据(图2)。

为解决年龄数据缺乏统一标准的问题,本研究制定了标准化处理方案,将不同来源、不同形式的年龄数据转换为统一计量单位,确保数据一致性与可比性。由于涉及大量专业古生物学知识,清洗与标准化过程邀请古生物专家审核,并制定规则与标准,以减少因知识缺失引入的偏差与误差。文献与航次报告类数据以人工检测为主。除直接提取数据表格外,还需从正文挖掘关键信息,并在电子化过程中修正字符与数字识别错误。所有年龄数据均进行溯源记录,确保与原文一致。同时,针对部分年代久远的记录,更新已更名的物种及对应年龄信息,保持数据的时效性与准确性。数据库类数据以机器检测为主,定期(半年)下载并比对Neptune与Pangaea数据库的更新,重点监测新岩心数据及旧数据修订情况。Python脚本可精准识别数据变化,减少人工误差,相比Excel检测更为稳定高效。

表1 年龄数据结构表

Table 1 Age data structure

列名	含义
Leg_Exp, Site, Hole	岩心信息
Chrono_Type, Event_Type, Event_Name	确定年龄的方法
Core_Section, Top_Sample, Bot_Sample	样品信息
Depth_Type, Depth, Top_Depth, Bot_Depth	深度信息
Thickness	深度的不确定值
Young_Age, Old_Age, Age_Original	原始数据库或文章中的年龄数据
Standard_Age	标准化之后的年龄数据
Standard	GTS2020、Neptune
Age_Uncertainty	年龄的不确定值
Comments	备注
Author, Year, Reference	年龄数据的出处

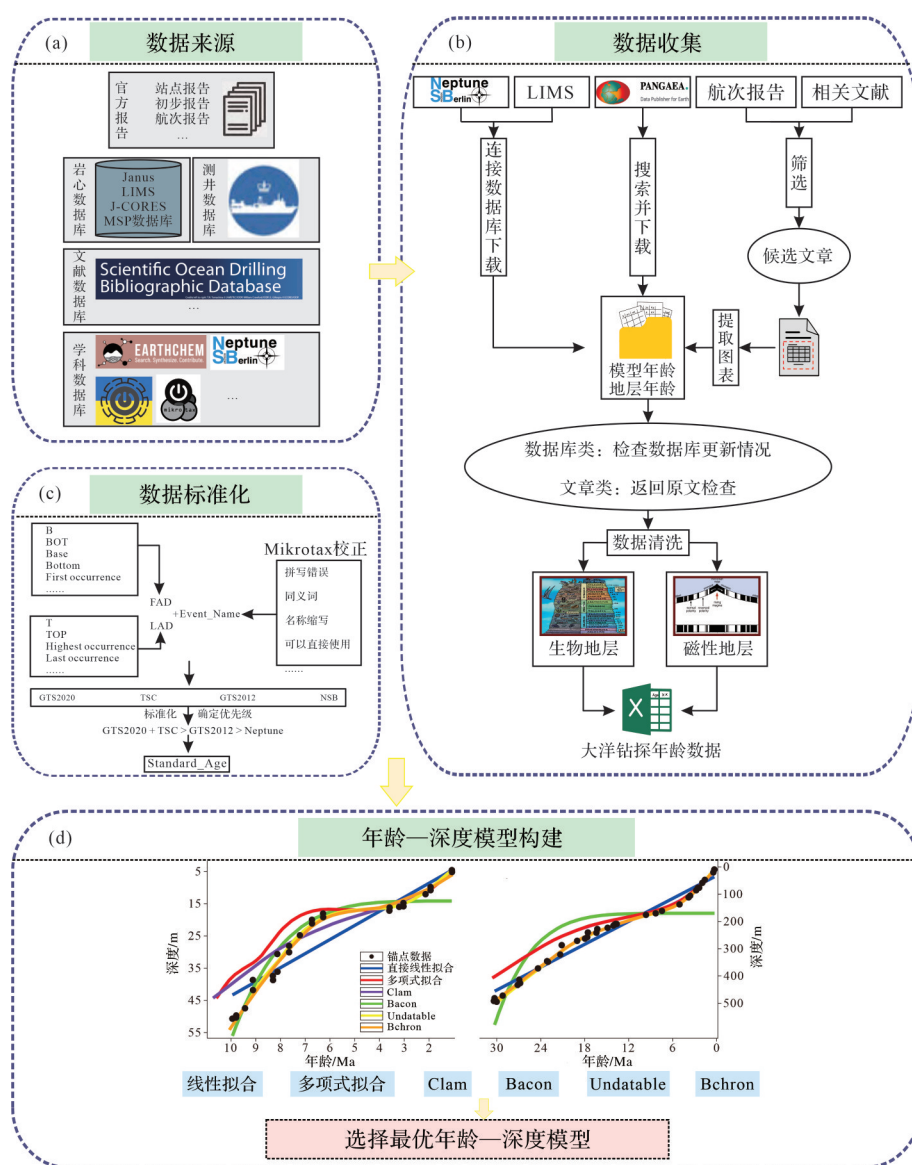


图2 获取大洋钻探地质年龄数据流程图

(a)数据来源;(b)数据收集过程;(c)数据标准化流程;(d)年龄—深度模型构建过程

Fig.2 Flowchart for obtaining chronological data from ocean drilling

(a) data source; (b) data collection process; (c) data standardization procedure; (d) age-depth model construction process

1.3 数据标准化处理

随着测试技术的进步,绝对年代测定精度显著提高^[44-45],且磁性反转与生物事件的定义也可能随研究深入而变动^[46-48]。为确保不同时期产生的数据的一致性,本研究在数据清洗后对绝对年龄进行了标准化处理,并在古生物专家参与下修正事件信息。标准化过程包括:首先,利用 Mikrotax 数据库核对样品名称并生成“Url_Name”字段,与原始“Event_Name”比对,相同则直接使用,不同则溯源查错并更正;对于存在同义词的样品名进行替换,未被 Mikrotax 收录的种类(如部分有孔虫)则结合文献与

专家知识补充(图2)。其次,统一事件类型为首次出现(FAD)或最后出现(LAD),通过Python程序批量转换为标准格式,以避免与全球年代地层表及Neptune数据库匹配时产生误差。第三,统一标准,将使用不同标准赋予的地层事件年龄,按优先级依次匹配统一到2020年的标准,其中包括GTS2020,TSC以及NSB2020,同时补齐缺失的年龄信息。

1.4 收集结果

为提高数据处理效率与准确性,本研究采用计算机编程的半自动化方法进行数据采集与清洗,结合地质专家的审核,显著提升工作效率并降低人

为误差。在整理阶段,基于年龄模型对钻探数据进行年代学分析,确保年代信息合理可靠,从而形成高质量数据集,为后续地质研究奠定基础。国际大洋钻探科学数据源自标准化采样与多元测试手段,具有规模大、速度快、类型多等特点。本研究整合 Neptune、LIMS、Pangaea 数据库及航次报告、文献中的全球地质年龄数据,并与 GTS2020、GTS2012 和 Neptune 年龄标准对标,最终构建涵盖 135 个航次、560 个岩心的年龄数据集,共 32 927 条记录,其中补充 53 条同位素定年数据(表 2)。

本研究共收集生物地层与磁性地层事件数据 1 542 条,其中硅藻 226 条(IODP 128、ODP 192、DSDP 38)、有孔虫 422 条(IODP 223、ODP 300、DSDP 176)、钙质超微化石 496 条(IODP 185、ODP 332、DSDP 263)、放射虫 347 条(IODP 174、ODP 282、DSDP 176)及磁性地层 104 条(IODP 78、ODP 105、DSDP 86)(图 3a~c)。年龄校正方面,12 571 条数据采用 GTS2020 标准,14 630 条采用 GTS2012,1 881 条参考 Neptune 标准,其余 3 845 条保留原始年龄,主要因部分样品年代过早无法标准化或采样时间较新无需调整(图 3d~f)。各钻探阶段不同生物类群及磁性地层的年龄分布存在显著差异:DSDP 阶段硅藻主要集中于 0~20 Ma,有孔虫和钙质超微化石分布较广,中位数约为 20~30 Ma 及 >30 Ma,放射虫中位数约为 20 Ma,磁性地层集中于 0~30 Ma,中位数约为 10 Ma;ODP 阶段总体跨度达 0~160 Ma,有孔虫与钙质超微化石跨度最大,中位数分别约为 40 Ma 和 50 Ma,硅藻集中于 0~20 Ma,放射虫延伸至 100 Ma 以上,磁性地层集中于 0~40 Ma,中位数约为 10 Ma;IODP 阶段跨度介于 0~120 Ma,硅藻集中于 0~40 Ma(中位数为 10~20 Ma),有孔虫与钙质超微化石中位数为 40~50 Ma,放射虫可达 120 Ma,磁性地层集中于 0~40 Ma,中位数约为 15 Ma。大部分数据聚集于 0~

20 Ma,反映深层地层生物及磁性事件记录减少的趋势,主要因高温引发有机物与矿物化学变化影响化石保存,高压导致微化石变形或破碎,以及钻探机械作用破坏岩石结构,造成化石信息缺失。

2 年龄—深度模型的构建

2.1 模型介绍

2.1.1 直接线性拟合

直接线性拟合年龄—深度模型是一种常用的地层年代学方法,其通过拟合深度与年龄控制点的线性关系,构建单调的年龄—深度曲线,用于推导沉积速率及年代框架(图 4)。该方法最早用于沉积速率相对稳定的环境^[46-47],因其直观与简便而广泛应用。模型假设沉积速率在研究尺度内基本恒定或呈线性变化,因此更适用于沉积环境单一、扰动较小的地层。结合测井与地层对比等数据,该模型的适用性可进一步拓展,作为一种基础工具在地层研究中仍具有重要价值。

2.1.2 多项式拟合

多项式拟合年龄—深度模型是一种利用沉积剖面中已知年龄数据点(例如放射性同位素测年或其他地层对比提供的时间锚点)来构建年龄与深度关系的数学模型(图 5)^[47]。这种模型通常通过拟合一个 n 次多项式来描述沉积物年龄随深度的变化关系,其数学表达式为:

$$A(d) = c_0 + c_1d + c_2d^2 + \cdots + c_nd^n \quad (1)$$

式中: $A(d)$ 为深度 d 处的年龄, $c_0, c_1, \cdots, c_n$ 是模型系数。这些系数通过最小二乘法拟合测定的深度—年龄数据点而得到。低阶多项式适用于沉积速率相对恒定的剖面,而高阶多项式可以适应速率变化较大的情况,但可能导致过拟合问题。该模型使用多项式拟合函数来逼近数据点之间的关系,以找到最佳拟合曲线。在实际应用中,多项式拟合年龄—深度模型常被用于地层学、古气候学和沉积学研究,特别是在湖泊或海洋沉积环境中,用于估算沉积速率变化并推断环境演化趋势。实现流程通常包括收集深度和年龄数据、选择适当的多项式阶数、拟合模型、验证拟合效果以及利用模型估算未获取深度的沉积年龄。例如,通过拟合一个二次多项式,可以从稀疏的测年点推算完整的年龄—深度关系曲线,为后续的地质分析提供基础。

表 2 数据来源和覆盖岩心详细统计

Table 2 Detailed statistics on data sources and covered core samples

时期	来源	航次	岩心	数据量/条数
DSDP	Neptune	50	132	7 324
	Pangaea	10	11	247
	航次报告 & 文献	14	29	695
ODP	Neptune	58	322	14 746
	航次报告 & 文献	29	111	3 039
IODP	Neptune	4	33	2 362
	航次报告 & 文献	21	82	2 912

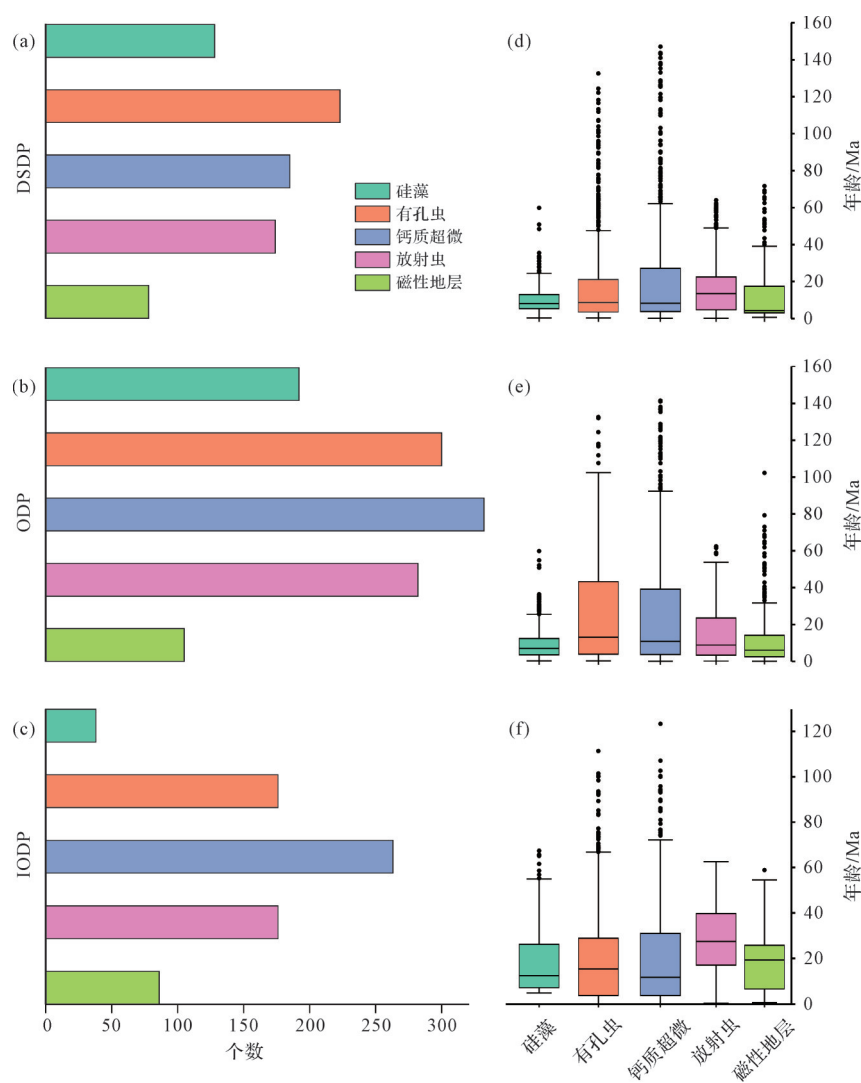


图3 已收集样品种类数目统计图和样品对应的年龄数据分布图

(a)DSDP阶段五类样品的个数统计图;(b)ODP阶段五类样品的个数统计图;(c)IODP阶段五类样品的个数统计图;(d)五类样品的年龄数据在DSDP阶段分布范围;(e)五类样品的年龄数据在ODP阶段分布范围;(f)五类样品的年龄数据在IODP阶段分布范围

Fig.3 Statistical charts of the number and age distribution of collected samples

(a) number of samples by type in the DSDP stage; (b) number of samples by type in the ODP stage; (c) number of samples by type in the IODP stage; (d) age distribution of samples by type in the DSDP stage; (e) age distribution of samples by type in the ODP stage; (f) age distribution of samples by type in the IODP stage

2.1.3 Clam

Clam是一种简单、系统、通俗易懂且可以实现定制化的年龄—深度模型^[48],在经典年龄—深度模型的基础上改进得到。Clam模型由Blaauw^[49]于2010年开发,是一个基于R语言的工具包,利用已知的控制点通过迭代算法拟合得到年龄—深度模型,模型默认拟合方式为线性内插(图6)^[50]。

该模型旨在为研究者提供一种灵活且直观的方法,用于沉积剖面的年龄—深度关系建模。其开发背景是在沉积学和古环境学研究中,许多剖面需要建立初步的年代框架,但并非所有研究都需要复杂

的贝叶斯推断模型或对测年数据的不确定性进行概率建模。Clam通过引入简单的插值和回归方法,为用户提供一种快速构建模型的选择。该模型假设沉积物以恒定速率堆积在已知控制点的年龄和深度之间。为得到一条最优的年龄—深度拟合曲线,该模型应用重要性抽样法(importance sampling)和线性内插等数学方法进行迭代算法。在迭代过程中,连接相邻深度控制点的年龄值,并通过剔除多次迭代过程中的异常值来优化模型结果。

2.1.4 Bacon

Bacon是基于R语言环境,采用逐步自回归 γ 过

程来构建年龄—深度模型。Bacon 年龄—深度模型的起源与贝叶斯统计方法在地质年代学中的引入以及对沉积速率复杂性的认识密切相关。该模型由 Parnell *et al.*^[51]提出,并开发为一个 R 语言包“rbacon”。其开发的背景是应对传统年龄—深度模型(如线性插值、分段线性模型或多项式拟合)在处理复杂沉积环境时的局限性。Bacon 模型的直接灵感来源于之前的贝叶斯年龄—深度模型。与这些模型不同,Bacon 对沉积速率变化的建模引入自回归过程,假定相邻深度段的沉积速率变化是平滑的但允许一定波动。

自发布以来,Bacon 模型迅速成为地质年代学领域的重要工具。其算法的核心是基于伽马分布的沉积速率先验和自回归平滑方法,被证明在多种沉积环境中具有广泛适用性。随着 R 语言和统计计算能力的提高,Bacon 的使用门槛逐步降低,成为湖泊沉积、海洋沉积物年代重建等研究中的常用方法。该模型结合其他先验知识,并运用贝叶斯方法计算日历年龄的概率密度分布,通过抽样得到的日历年龄与概率密度分布的高度成正比,进行迭代运算,并剔除年龄异常值,最终拟合出一条最优的年龄—深度曲线。模型还会给出拟合曲线的 95% 置信区间,可用于重建沉积演化历史(图 7)^[17]。

2.1.5 Undatable

Undatable 是一个基于 Matlab 环境的软件,适用于处理复杂的沉积过程以及深度数据本身具有不确定性的情况。该软件提供交互图形界面,用户可以在界面中设置模型的相关参数和模型的迭代次数。通过使用贝叶斯方法构建年代学模型,可以得到更加精确的结果(图 3~7)。Undatable 的优点主要体现在几个方面。首先,它对数据条件的要求较低,能够

适应稀疏、不连续或误差较大的测年数据。其次,它不依赖复杂的统计假设或先验信息,因此计算过程简单,模型结果易于解释。而且,由于采用随机化插值,它能够直接生成深度—年龄关系的概率分布,为研究者提供清晰的不确定性范围。这种方法特别适用于早期探索性研究或数据质量受限的场景。但是 Undatable 也存在一些局限性,由于不使用明确的统计模型或先验信息,在数据丰富且沉积环境较为复杂的情况下,其结果可能不够精确;同时其随机化插值的结果高度依赖于输入数据的质量,无法有效解决系统性误差或极端不准确的数据问题^[52]。

2.1.6 Bchron

Bchron 是一种基于贝叶斯统计的年龄—深度建模工具,由 Parnell 及其团队开发,用于沉积剖面的年代框架构建^[51]。该模型首先对增量概率分布以及异常值进行预估,然后运用二变量单调 γ 过程构建年龄—深度模型。模型采用泊松- γ 方法,属于线性分段沉积模型(图 3~8)^[53-54]。

Bchron 的开发背景源于对沉积年代模型中不确定性量化的需求。传统的年龄—深度建模方法难以充分整合测年数据的误差范围,而一些贝叶斯模型虽然统计方法严谨,但通常需要复杂的参数设置和先验信息。Bchron 通过高斯过程回归,结合测年数据和深度顺序的约束,为研究者提供一个灵活且直观的建模工具。Bchron 的建模过程基于以下核心步骤:先对每个测年数据点进行单独校准,将每个样本的测年结果转换为一个概率分布;其次模型通过高斯过程回归,在深度与年龄之间生成平滑且连续的关系曲线,同时保留年龄和沉积速率的不确定性信息。模型的优点在于:(1)能够有效处理异常值,并提供灵活多样的年龄—深度模型;(2)模型通过分段

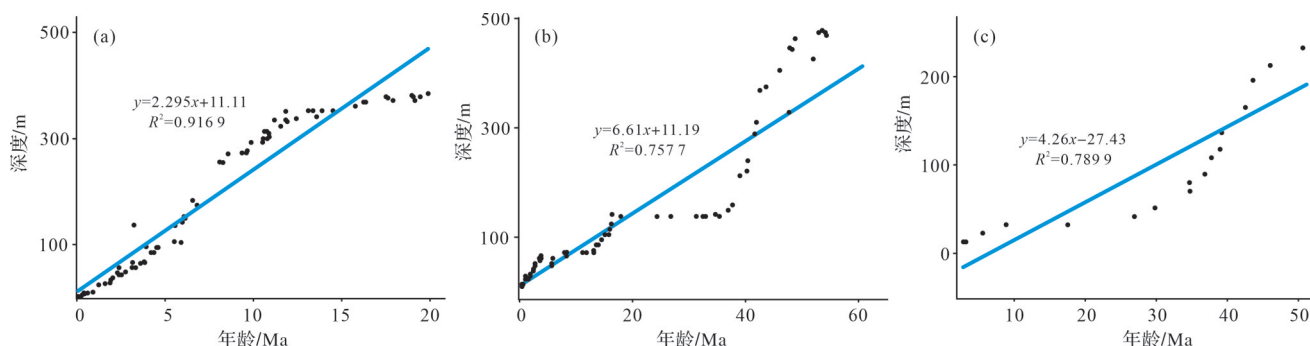


图 4 直接线性拟合年龄—深度模型示意图

(a) U1489C 岩心; (b) U1510A 岩心; (c) U1514A 岩心; 黑色点表示年龄数据, 蓝色直线为其线性拟合结果

Fig. 4 Schematic diagrams of direct linear fitting age-depth models

(a) hole U1489C; (b) hole U1510A; (c) hole U1514A; black dots represent age data; blue line indicates linear fit

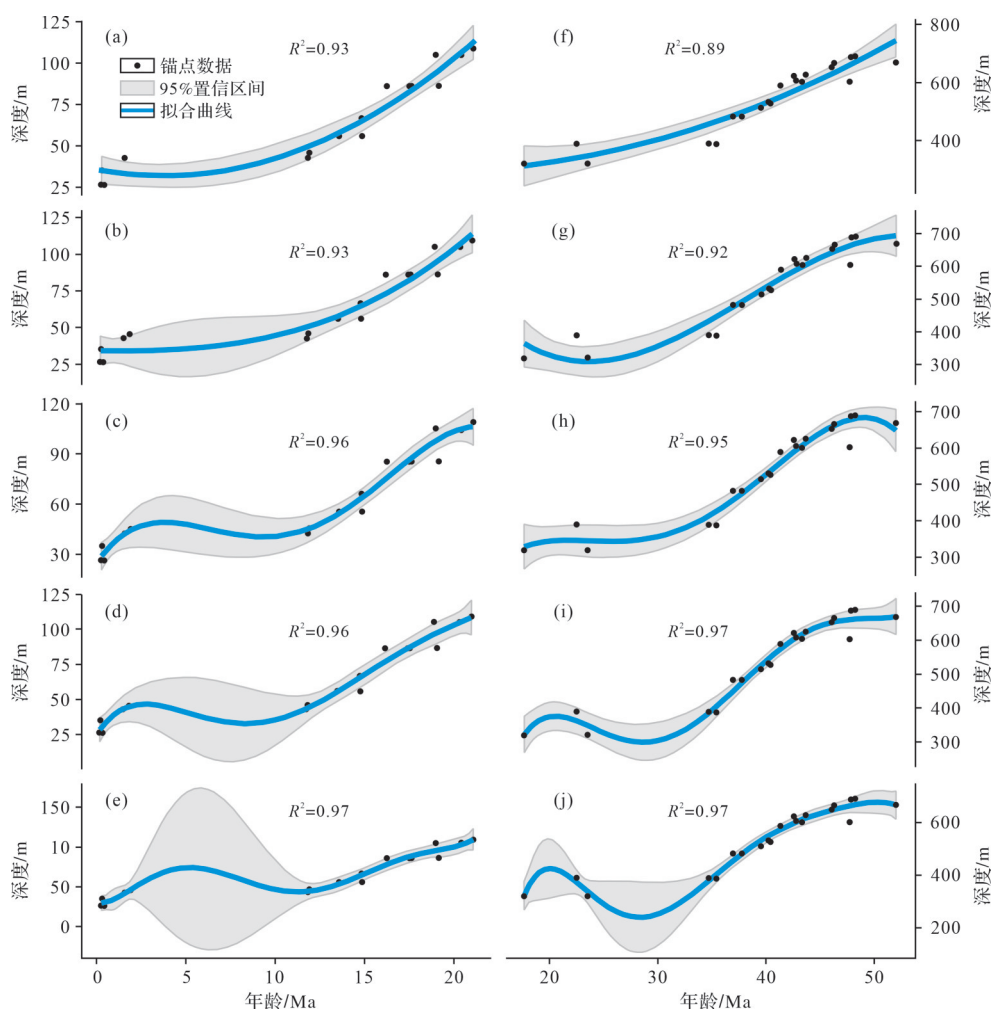


图5 多项式拟合模型示意图

(a)U1504A岩心的二阶多项式拟合年龄—深度模型示意图;(b)U1504A岩心的三阶多项式拟合年龄—深度模型示意图;(c)U1504A岩心的四阶多项式拟合年龄—深度模型示意图;(d)U1504A岩心的五阶多项式拟合年龄—深度模型示意图;(e)U1504A岩心的六阶多项式拟合年龄—深度模型示意图;(f)U1508C岩心的二阶多项式拟合年龄—深度模型示意图;(g)U1508C岩心的三阶多项式拟合年龄—深度模型示意图;(h)U1508C岩心的四阶多项式拟合年龄—深度模型示意图;(i)U1508C岩心的五阶多项式拟合年龄—深度模型示意图;(j)U1508C岩心的六阶多项式拟合年龄—深度模型示意图;黑色点为测年数据,蓝色曲线为拟合结果,灰色阴影表示95%置信区间

Fig.5 Schematic diagrams of polynomial age-depth fitting models

(a) second-order polynomial model for hole U1504A; (b) third-order polynomial model for hole U1504A; (c) fourth-order polynomial model for hole U1504A; (d) fifth-order polynomial model for hole U1504A; (e) sixth-order polynomial model for hole U1504A; (f) second-order polynomial model for hole U1508C; (g) third-order polynomial model for hole U1508C; (h) fourth-order polynomial model for hole U1508C; (i) fifth-order polynomial model for hole U1508C; (j) sixth-order polynomial model for hole U1508C; Black dots represent dating data, blue curves indicate fitted results, and gray shading denotes 95% confidence intervals

函数来构建年龄—深度模型,沉积速率根据贝叶斯公式以及相关先验知识随机变化,模型不需要指定具体沉积速率变化阶段,而是随机给定,模型这一特点非常适合批量处理数据来构建年龄—深度模型。Bchron模型也有一些局限性:(1)由于其基于贝叶斯方法,模型计算相对复杂,对计算资源有一定要求,特别是在处理大数据集时较为耗时;(2)Bchron的结果依赖于输入数据的质量和校准曲线的准确性,如果测年数据存在系统性误差或校准曲线不精确,可

能影响模型结果;(3)与其他贝叶斯模型相比,Bchron对用户参数调整的灵活性较低,可能限制某些复杂场景的应用。

2.2 模型构建方法

大洋钻探获取的岩心年代数据中虽包含少量可直接提供绝对年龄的同位素测年结果,但主体仍为生物地层和磁性地层资料,其原始形式只能提供相对年代^[55]。随着研究技术的进步,人们对年代事件的认识不断更新,同一事件在不同年代标准下可能存在差

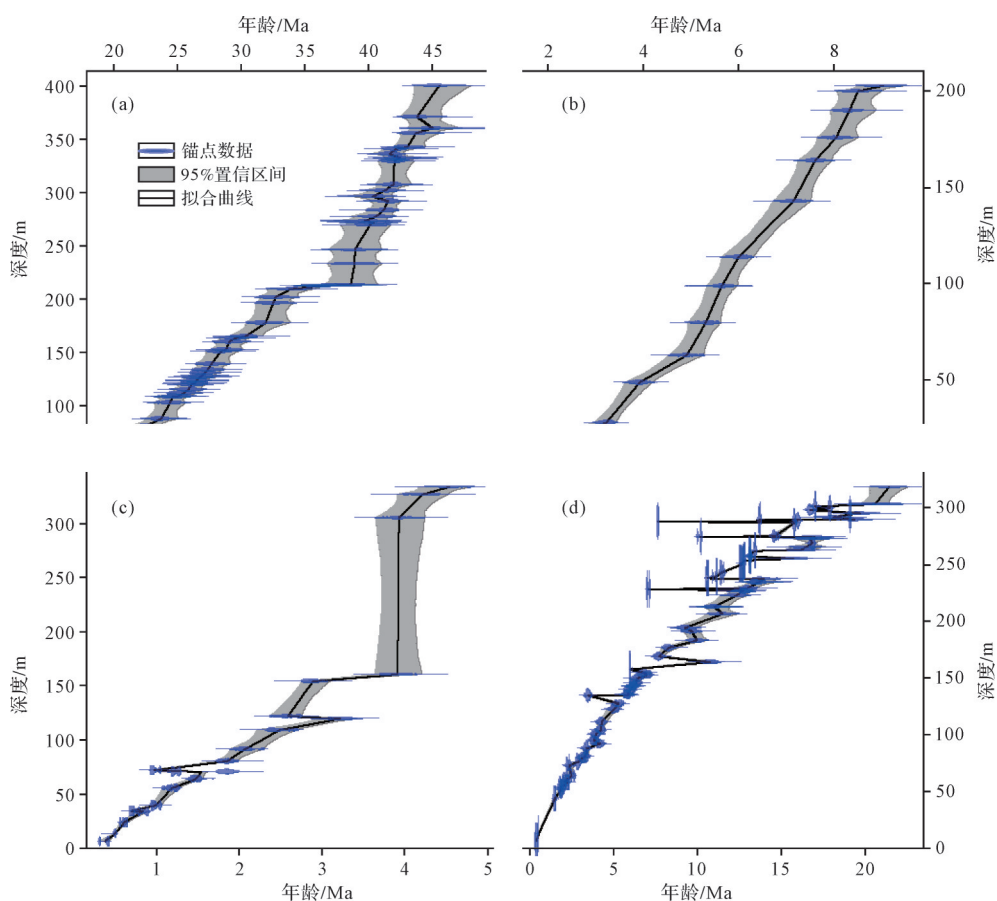


图6 Clam 年龄—深度模型示意图

(a) 1090B 岩心; (b) 1086B 岩心; (c) 997A 岩心; (d) 926A 岩心

Fig.6 Schematic diagrams for Clam age-depth models

(a) hole 1090B; (b) hole 1086B; (c) hole 997A; (d) hole 926A

异,因此需要采用GTS2020等国际通用标准进行统一校正与标准化^[56]。通过这一过程,资料被赋予一致的绝对年代属性,并转化为可用于模型构建的有效锚点,从而显著提升了数据的科学性与权威性,并在很大程度上保障了模型结果的准确性与稳健性。

经过上述校正的生物地层与磁性地层数据方可用于年龄—深度模型的建立。对校正数据的深度分布分析表明,研究岩心的年龄信息在垂向分布上较为完整,锚点数量充足,构建模型的精度较高。此外,大洋钻探数据库中部分同位素测年结果可直接提供绝对年龄,无需转换即可作为锚点数据使用^[57]。经系统化处理后,可直接用于模型构建的锚点数据总量超过3万条,覆盖大洋钻探计划的135个航次与560个岩心。在开展岩心相关的时空研究时,首先需要掌握沉积地层随深度变化的年代关系。年龄—深度模型正是用于刻画沉积物或地层在不同深度位置上的年代分布的重要工具。本文采用传统数学拟合

方法与基于贝叶斯算法的拟合方法,对下文所述七种年龄—深度模型进行了比较。结果表明,基于贝叶斯统计的年龄—深度模型在不确定性处理、先验信息整合、非线性沉积速率适应性、误差传播、复杂沉积环境适用性、可信区间提供、数据整合及计算效率等方面较传统方法更科学与精确。该方法通过贝叶斯推断结合已有测年数据,构建沉积剖面年代框架,特别适用于沉积速率不均匀或测年误差较大的情形。贝叶斯年龄—深度模型的核心思想是利用贝叶斯定理,在先验信息与观测数据的约束下,推断沉积物随深度变化的年代分布,其数学表达式为:

$$P(\theta|D) = \frac{P(D|\theta)P(\theta)}{P(D)} \quad (2)$$

式中: $P(\theta|D)$ 是在给定数据D后,参数 θ (如沉积年龄或沉积速率)的后验概率分布, $P(D|\theta)$ 是似然函数,表示在假设参数值下观测数据的概率, $P(\theta)$ 是先验分布,反映对参数的预期,而 $P(D)$ 是归一化因子。

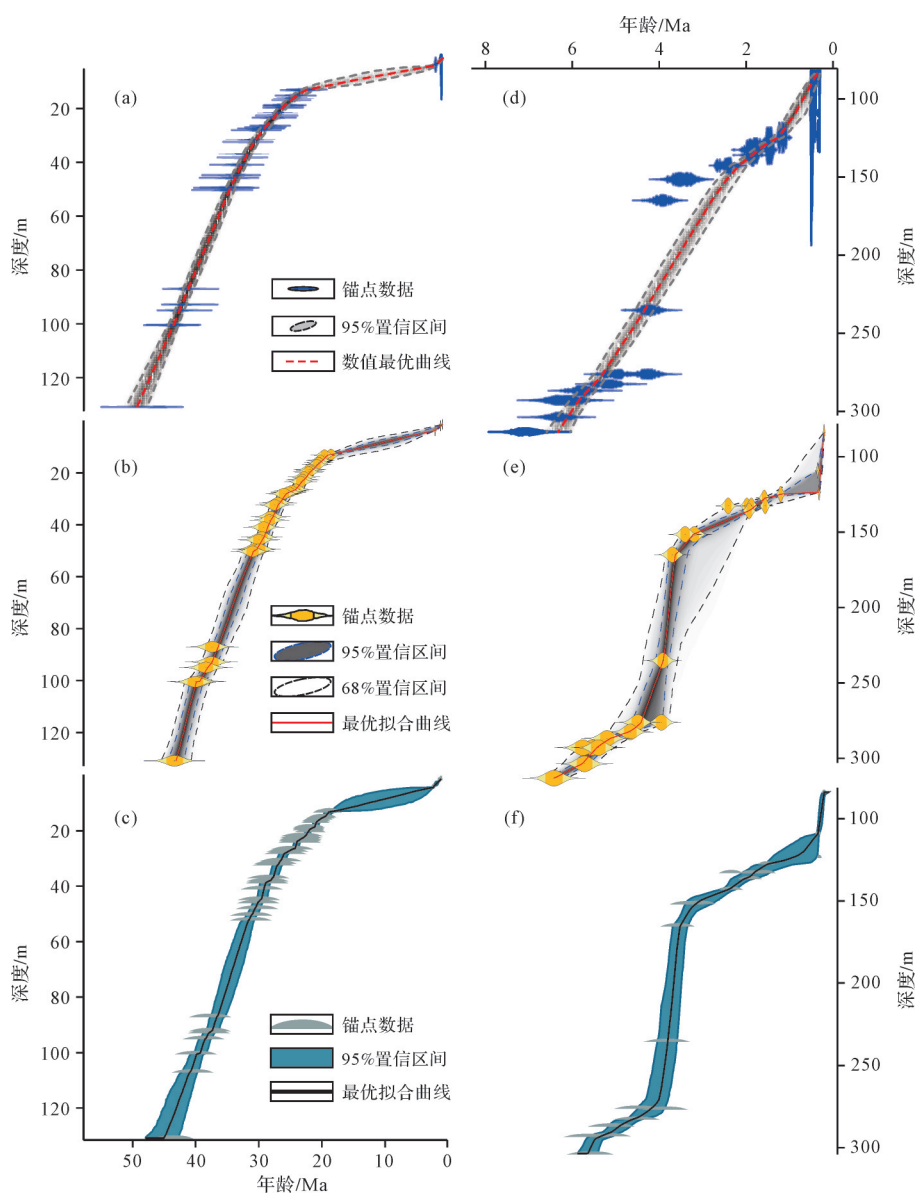


图7 基于贝叶斯统计学的模型示意图

(a) U1332C 岩心的 Bacon 年龄—深度模型示意图; (b) U1332C 岩心的 Undatable 年龄—深度模型示意图; (c) U1332C 岩心的 Bchron 年龄—深度模型示意图; (d) U1444A 岩心的 Bacon 年龄—深度模型示意图; (e) U1444A 岩心的 Undatable 年龄—深度模型示意图; (f) U1444A 岩心的 Bchron 年龄—深度模型示意图

Fig.7 Schematic diagrams for Bayesian statistics-based age-depth models

(a) Bacon model for the hole U1332C; (b) Undatable model for the hole U1332C; (c) Bchron model for the hole U1332C; (d) Bacon model for the hole U1444A; (e) Undatable model for the hole U1444A; (f) Bchron model for the hole U1444A

2.3 模型结果分析

本文基于当前国际上普遍采用的6种年龄—深度模型,并将直接线性拟合、多项式拟合、Clam、Bacon、Bchron以及Undatable这6种模型的优缺点进行简要总结和概括。由于Bacon、Bchron以及Undatable模型可基于贝叶斯统计学构建,可以将一些异常点排除,故而构建的模型数量较多(表3)。在建模的过程中,每种建模方法都有其不足之处,具体内容在本节下述内容中详细展示。

2.3.1 未基于贝叶斯统计学的模型结果

对所构建的458个直接线性拟合模型分析表明,该方法生成的拟合结果表现为一条直线,能够直观反映年龄与深度之间的一般线性关系,且计算速度快,适用于大规模数据处理。然而,该方法的不足亦十分明显,极易出现欠拟合现象,难以揭示沉积速率的细微变化。在U1489C、U1510A和U1514A三个岩心的模型构建中,由于原始数据分布较为离散,均出现了不同程度的欠拟合。在U1489C岩心中,数据点

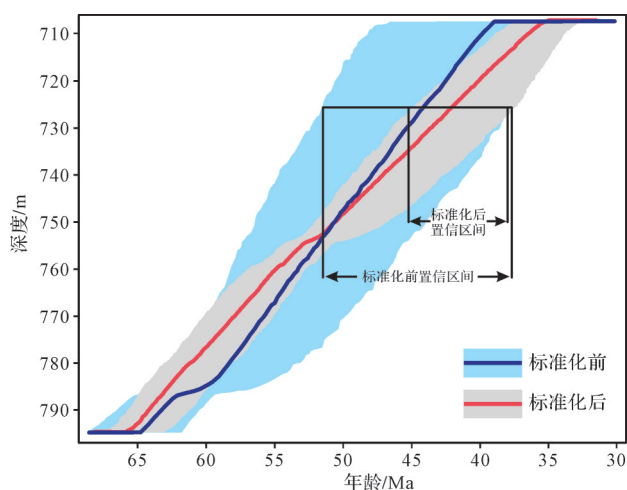


图8 岩心358的年龄数据标准化前后的模型对比图

Fig.8 Comparison of models before and after age data standardization for hole 358

表3 年龄—深度模型构建概况

Table 3 Overview of age-depth model construction

建模方法	模型的应用样本量(岩心个数)
线性拟合	458
多项式拟合	329
Clam	329
Bacon	519
Undatable	448
Behron	451

整体沿线性趋势分布,但在较深部位存在一定偏离(图4a);U1510A岩心的年龄跨度较大(约60 Ma),整体符合线性趋势,但在深部(>300 cm)可能受沉积速率变化或其他地质事件的影响(图4b);U1514A岩心的最大年龄约50 Ma,最大深度约200 cm,浅部(<100 cm)数据点分布集中,线性拟合虽能刻画总体趋势,但难以准确反映部分层段的沉积速率特征(图4c)。

在构建329个多项式拟合年龄—深度模型时,将拟合阶数控制在二至六阶之间,以兼顾模型的灵活性与拟合精度^[49]。多项式拟合方法简便高效,适用于沉积环境连续性较好且锚点数据明确的地质剖面。通过合理选择阶数,可在避免欠拟合与防止过拟合之间取得平衡。然而,该方法对数据分布的依赖性较高:当测年数据稀疏或分布不均时,模型可能难以准确反映实际沉积过程;高阶拟合尤其容易引入不合理的曲线震荡,且在锚点不足的情况下,难以处理沉积间断、侵蚀等非连续性事件,需结合地质背景进行阶数选择与结果判别^[58]。

以年龄数据分散的U1504A与U1508C两个岩心为例(图5)。总体上,两岩心年龄随深度增加而递增,符合典型沉积序列特征,但不同阶数拟合在局部段落呈现出明显差异,反映了大洋环境下沉积速率的变化。U1504A岩心的二阶与三阶拟合(图5a,b)曲线整体平滑,尤其在小于100 m深度范围内,沉积速率较为均匀,反映出稳定的沉积环境。当阶数提高至四阶及以上(图5c~e)时,浅部(0~50 m)曲线波动显著增强:四阶拟合在约25 m处出现局部波动,五阶与六阶拟合则在0~50 m区间表现出更剧烈的震荡,六阶拟合尤为明显,呈现出自然沉积过程中罕见的高频起伏,可能指示沉积速率突变或模型过拟合。深度超过50 m后,各阶曲线总体趋势趋于一致,拟合结果相对可靠。相比之下,U1508C岩心的年龄—深度关系更为复杂。二阶与三阶拟合(图5f,g)维持平稳的增长趋势,而四阶及以上拟合(图5h~k)在300~700 m深度范围内出现较大幅度波动:四阶拟合在500~600 m区间曲线明显陡峭,五阶拟合在同一深度范围的弯曲程度进一步增强;六阶拟合则在30~40 Ma(约400~500 m)及50 Ma附近均出现显著波动。这些异常震荡源于数据点稀疏分布,导致模型在数据不足的区段发生过拟合。

在构建Clam年龄—深度模型的过程中,共完成了329个模型。结果显示,Clam模型在沉积速率相对稳定的剖面中表现较好,其操作直观、参数设置简洁,并能够通过多种插值和回归方法实现灵活拟合。然而,分析结果也表明该模型存在一定局限性:首先,由于主要依赖传统的插值与回归方法,其统计推断能力有限,在表征测年数据不确定性方面表现不足;其次,模型假设沉积速率变化较为简单,难以适应沉积间断、侵蚀事件或沉积速率急剧变化等复杂情境,导致部分剖面的建模结果未能准确反映实际沉积历史。从已构建的模型中选择1090B、1086B、997A、926A四个岩心展示Clam年龄—深度模型建模情况(图6),其中1090B和1086B岩心的年龄数据分布集中,997A和926A岩心的年龄数据分布较分散。主要包含三个关键要素:蓝色锚点数据,代表测得的年龄数据及其误差范围;黑色拟合曲线,反映Clam模型计算的年龄—深度关系;灰色区域,表示95%置信区间,揭示年龄估计的不确定性范围。

1090B和1086B岩心的年龄—深度关系整体呈现较为稳定的线性趋势(图6a,b),表明其沉积速率

相对均匀,沉积环境较为稳定。1090B岩心的年龄范围约为20~45 Ma,深度覆盖0~400 m,曲线基本呈线性增长,局部轻微弯曲,反映沉积速率的微小波动。该岩心的置信区间较窄,表明数据误差较小,模型拟合效果较好;1086B岩心的年龄范围较短,为0~8 Ma,深度为0~200 m,其年龄—深度关系同样接近线性,说明沉积速率基本稳定。这两个岩心的共同特征是沉积速率较为稳定,置信区间较窄,表明其沉积环境可能较为单一,此种情况下Clam年龄模型显示效果较好。

相比之下,997A和926A岩心的沉积速率变化较大(图6c,d),表现出更复杂的沉积过程。997A岩心的年龄跨度为0~4 Ma,深度范围为0~300 m。在前100 m范围内,沉积速率较快,表现为较缓的年龄增长曲线。然而,在100~250 m深度区间内,置信区间显著增大,模型无法适用于较复杂的地质环境中;926A岩心的年龄范围为0~20 Ma,深度介于0~300 m。其年龄—深度关系呈现明显的波动性,沉积速率的变化幅度较大。0~10 Ma间,沉积速率较快,年龄增长较慢,而10~20 Ma期间,沉积速率显著减缓,年龄增长速率加快。该岩心在150~250 m深度时置信区间较宽,表明该区段的年龄测定存在较高的不确定性。997A和926A岩心的这些特征表明,当沉积过程受到显著的外部环境变化,或者地质环境发生较复杂的演化时,Clam年龄模型的适用性会受到一定限制,表现效果较差。

2.3.2 基于贝叶斯统计学的模型结果

贝叶斯统计方法在年龄—深度模型中具有显著优势,特别是在不确定性量化、沉积速率的灵活建模、先验信息的融合以及适应复杂测年数据等方面。本研究所构建的Bacon、Undatable和Bchron年龄模型均基于贝叶斯推断方法,模型结合马尔科夫链蒙特卡罗(MCMC)模拟技术^[50,59-60],通过对测年数据反演,推断出年龄分布并生成后验概率分布。模型能够给出可信区间,全面反映测年数据的不确定性。通过对519个Bacon模型、448个Undatable模型和451个Bchron模型的综合分析,结果表明,相较于传统的插值方法,基于贝叶斯方法的模型在充分考虑先验信息、测年数据误差和模型不确定性的同时,能够有效降低模型的偏差,提高预测结果的准确性,特别是在面对多源异构的数据结构和较复杂的沉积环境时,表现出显著的优势。选择U1332C和U1444A两个岩

心代表基于贝叶斯统计学的年龄—深度模型建模情况(图7),其中U1332C岩心的年龄数据分布较集中,U1444A岩心的年龄数据分布较分散,可代替大部分岩心的基本情况。

在U1332C岩心的建模结果中:(1)Bacon年龄模型通过红色虚线表示最优年龄—深度曲线,蓝色椭圆图案表示测年数据点的不确定性,灰色阴影代表95%置信区间(图7a)。曲线在0~20 m深度范围内较陡峭,表明沉积速率较低;在40~120 m深度范围内曲线趋于平缓,显示沉积速率增加;而在100 m之后曲线再次陡峭,说明沉积速率下降;整体曲线表现出良好的平滑性,反映贝叶斯模型在处理沉积速率变化时的合理性。(2)Undatable年龄模型使用黄色菱形点表示测年数据点,黑色虚线和黄色阴影分别表示95%和68%置信区间(图7b)。Undatable对年龄测定的不确定性更加敏感,特别是在50~120 m之间,95%置信区间明显增宽,该区域存在较大的测年误差。(3)Bchron年龄模型使用蓝色阴影表示95%置信区间,黑色实线为最优年龄—深度曲线(图7c)。曲线在0~40 m之间较陡峭,反映沉积速率较慢;而在50~100 m之间趋于平缓,表明沉积速率增加。

在U1444A岩心的建模结果中:(1)Bacon年龄模型显示0~100 m之间年龄—深度曲线较陡峭,沉积速率相对较低,而在100~200 m之间曲线变得较为平缓,反映沉积速率增加。在150 m处,测年误差较大,但Bacon仍然能够提供较为平滑的拟合曲线(图7d)。(2)Undatable年龄模型中50~150 m之间年龄—深度曲线的不确定性较大,95%置信区间明显增宽,表明该区域可能存在较大的沉积速率变化或沉积间断;而在150 m之后,年龄变化趋势较稳定,沉积速率较为均匀(图7e)。与Bacon模型相比,Undatable模型允许更大的不确定性范围,更适用于测年数据稀疏的情况。(3)Bchron年龄模型在0~50 m,曲线较陡峭,反映沉积速率较慢,而在100~200 m,曲线变得较为平缓,表明沉积速率增加。Bchron年龄模型的置信区间在275 m左右处明显增宽,模型会在数据不确定性较高的情况下会给出更大的可能年龄范围(图7f)。整体而言,基于贝叶斯统计学的年龄模型可结合地质先验信息优化年龄—深度关系的建模。该模型不仅适用于沉积速率较稳定且测年数据丰富的情况,在数据稀疏或沉积间断较多的环境下也可提供更大的不确定性范围。

3 年龄—深度模型的评价和应用

3.1 年龄数据标准化的意义

高精度的地层学与年代学研究依赖于深度与年龄数据的双重标准化。深度体系的一致性为年代数据可比性与精确性的前提,而年代框架的统一则为跨剖面对比和全球事件分析提供了坚实基础。在大洋钻探数据采集中,海底以下米(Meters Below Seafloor, MBSF)与综合深度(Meters Composite Depth, MCD)是两种常用的深度计量体系^[61-63]。MBSF直接记录钻头穿透地层的实际埋深,反映真实钻探深度;MCD则在MBSF的基础上,通过岩心对齐与多岩心数据整合获得,以提升剖面连续性与不同岩心间的可比性,因而在地层学与年代学研究中应用更为广泛。然而,本研究数据集中MBSF与MCD的转换尚未完全实现,目前仅依赖程序检索Core与Section的深度信息,仍存在以下技术瓶颈:(1)地层对齐复杂性——标志层(如火山灰层、特定化石组合、地球化学特征等)在不同岩心中的可识别性差异较大,导致难以实现统一的深度转换;(2)岩心取样与测量误差——岩心在取样过程中易受压缩、伸长或破碎影响,导致深度记录偏差或缺失;(3)人为与技术因素——历史航次间记录格式与测量精度差异较大,进一步增加了深度体系转换难度。

在此基础上,将生物地层事件对齐至全球统一的地质年代尺度(如GTS2020)是提高年代测定精度的重要步骤^[54-56]。标准化不仅消除了不同地区和研究者之间的时间尺度差异,还显著提升了事件对比的可靠性与全球地质过程解析能力。例如,三角粗糙方格藻(*Triquetrorhabdulus Rugosus*)在GTS2012与GTS2020中的末现面差异虽仅0.05 Ma^[64-67],但在高精度旋回地层学与沉积速率分析中,已足以影响事件同步性判断。Bchron年龄—深度模型分析表明,年代标准化对数据质量的提升在早期DSDP阶段岩心中尤为显著,反映了年代标志事件定义与分析技术在过去数十年的动态更新(图8)。然而,全球部分生物地层数据库(如Neptune)仍存在年代久远、样品制备方法不一致、部分年龄值依赖模型推算等问题^[68],限制了年代框架的精度与稳健性。

因此,高精度地层研究需将深度转换与年代标准化视为相辅相成的环节:深度体系的统一为事件对齐与年代标定提供物理基础,而年代标准化则为

跨剖面对比与全球事件研究提供时间尺度支撑。未来应加大对高质量放射性绝对定年的整合力度,并推动深度与年代数据在统一标准下的协同优化,从而建立更加精确、稳健的深时地质年代框架^[69]。

3.2 年龄—深度模型的比较

本研究从六个参数特征对不同类型的年龄—深度模型进行综合比较:(1)是否基于贝叶斯统计学——该类模型在处理数据时引入先验信息与观测数据,利用贝叶斯推断生成后验概率分布,而非仅通过插值或回归得到单一解^[70-72];(2)是否具备异常值分析能力——能够识别并处理异常定年点及沉积间断^[19,73];(3)是否支持批量建模——可自动化处理多个剖面或岩心数据,适应大规模数据集需求;(4)是否可校正单个控制点——用户可在建模过程中交互式调整或剔除关键年龄点,以增强地质解释的灵活性^[74-75];(5)是否提供最优曲线——输出结果中包含用于分析与展示的最优年龄—深度关系;(6)是否给出95%置信区间——量化不确定性,表示在统计意义下某深度点真实年龄的概率范围^[17,19](图9a)。

在满足上述特征的基础上,结合大洋沉积环境相对稳定的背景知识,引入地层叠覆率作为模型合理性评价指标。根据地质学原理,年代较早的地层应位于年代较晚的地层下方^[76-77]。若模型预测的地层年代顺序与叠覆律一致,则其可靠性更高。对比结果表明:(1)非贝叶斯类模型中,直接线性拟合数量最多,但无法识别异常值与沉积间断,也不支持单点校正(图4a~c);多项式拟合同样存在此类问题(图5c~e, i, j);Clam模型表现最差,大部分结果与叠覆律不符(图6c, d)。(2)贝叶斯类模型中, Bacon模型数量最多,但约三分之一不满足叠覆律;Undatable与Bchron模型数量接近,且Bchron在预测精度方面更优,其先验知识设定与叠覆律高度一致(图9b)。

Bchron模型在本研究中构建的年龄—深度曲线不仅完全符合地层叠覆律,还同时具备基于贝叶斯统计学、异常值分析、批量建模、单点校正、输出最优曲线及95%置信区间等六项关键特征。然而,上述结果仅反映模型在参数特征上的优势,并未直接证明其在所有情境下的适用性。因此,有必要进一步对那些既符合地层叠覆律、又可由全部六类模型构建的岩心进行对比分析,从而筛选出契合大洋钻探计划数据特征与研究需求的最佳年龄—深度模型。

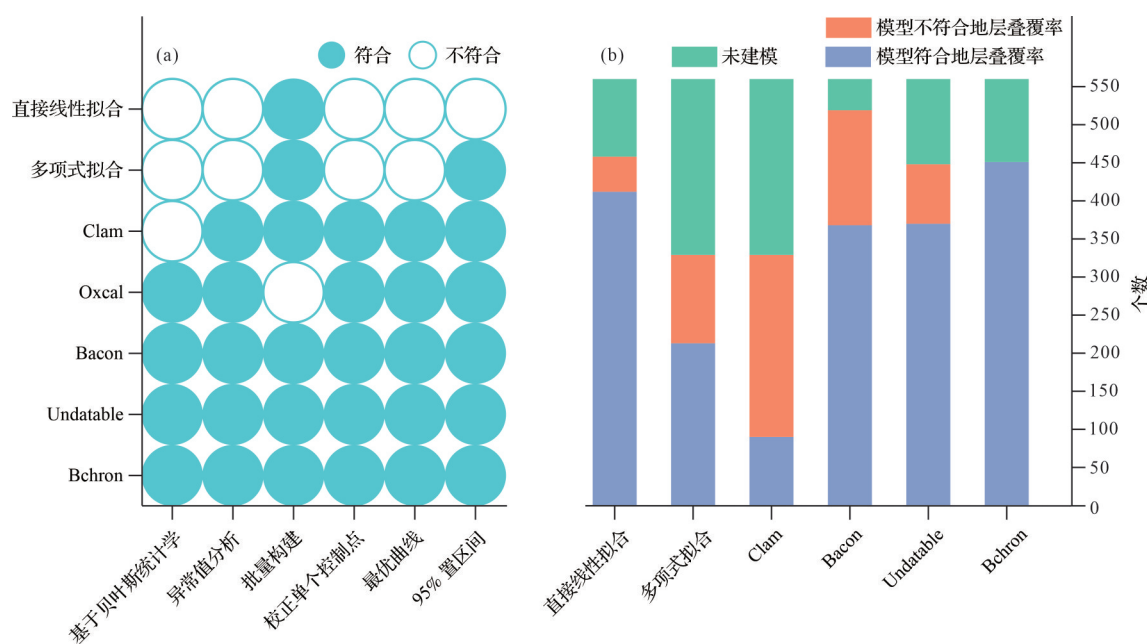


图9 模型的参数特征图和建模数目统计图

(a)年龄—深度模型的参数特征分析图;(b)年龄—深度模型数目示意图

Fig.9 Model parameter characteristics and statistics of all age-depth models

(a) parameter characteristics analysis; (b) schematic for all age-depth models

3.3 最优模型的选择

在满足地层叠覆率条件并可由六种模型同时构建的岩心数据中,共筛选出54个样本,包括124C、522A、538A、714B、753A、756B、822A、853D、853E、854C、884E、907C、908A、925D、926B、927B、928B、928C、929A、929B、967C、968A、981B、982C、983B、983C、984C、985A、985B、987A、987D、1083B、1083D、1086B、1124D、1125A、1146B、1149A、1168C、1192B、1194A、1198A、1219B、C0011D、C0012C、U1337C、U1337D、U1444A、U1454B、U1456C、U1465A、U1466A、U1470A、U1471C。为直观比较各模型在实际数据处理中的表现,将六种模型的最优拟合曲线绘制在同一图中,并以854C岩心与928B岩心为例说明差异:854C岩心的年龄数据分布较分散,而928B岩心的数据分布相对集中(图10)。结果显示,854C岩心中各方法所得曲线差异显著:直接线性拟合在深部存在年龄低估倾向,多项式拟合较好;基于贝叶斯统计学的Bacon、Undatable和Bchron模型在沉积速率变化较大的地层中表现更优(图10a)。相较之下,928B岩心的年龄数据集集中度较高,各方法的拟合趋势较为一致,但Bacon在深部的预测仍存在一定偏差(图10b)。

由于本研究所用锚点数据质量较高,模型优劣

的评价不仅依赖于综合对比图的直观观察,还引入了模型预测值与实际锚点数据之间差异的定量分析。为此,选取了两项常用且有效的误差指标:平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)。MAE表示预测值与真实值之间的平均绝对偏差,单位与原始数据一致,因而具有较强的直观解释力,能够反映整体误差水平;RMSE则通过对误差平方后求均值再开方的方式,使得较大误差被放大,更加敏感于离群点的影响^[78]。二者均为评估模型性能的经典指标,能够有效量化预测结果与观测数据的吻合程度。鉴于RMSE对较大偏差更为敏感,有利于筛选预测效果更佳的模型,本文以RMSE作为主要评价指标,比较不同模型的预测准确性,为模型优选提供定量依据。

在开展均方根误差(RMSE)比较之前,有必要充分考虑不同模型在建模机制上的差异。多项式拟合与直接线性拟合基于确定性的函数形式进行推算,而基于贝叶斯统计学的模型则具有更高的灵活性,能够在建模过程中引入不确定性,并通过先验分布与后验分布对模型参数进行推断。因此,贝叶斯模型在处理噪声和异常值时更为敏感,在数据不确定性较大的情况下,可能导致拟合误差增大,使得RMSE值偏高^[79-80]。

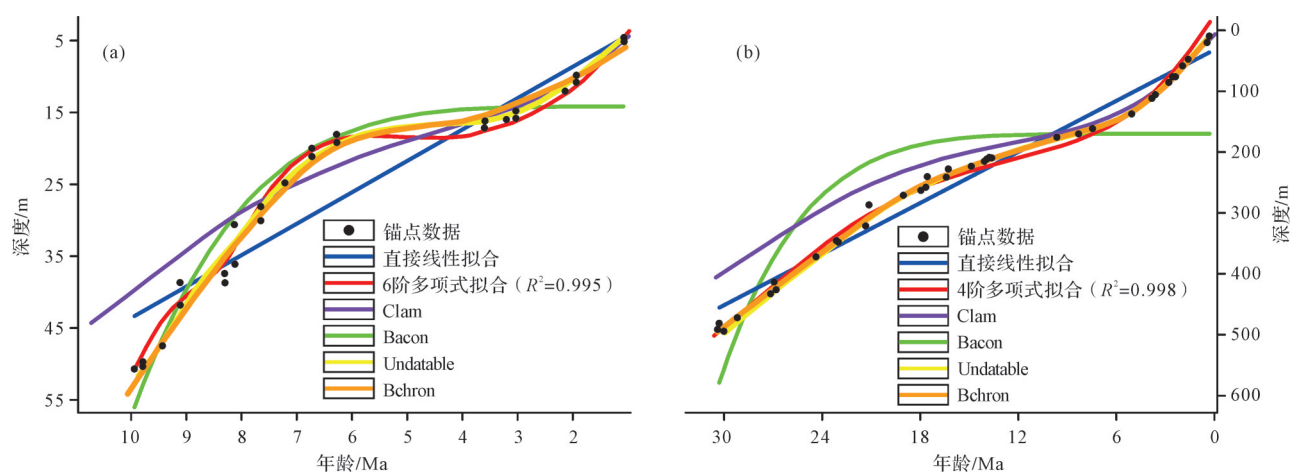


图10 不同年龄—深度模型综合对比图

(a)854C岩心;(b)928B岩心

Fig.10 Comprehensive comparison of different age-depth models

(a) hole 854C; (b) hole 928B

基于此研究思路,首先依据建模机制将六类模型划分为两大类:贝叶斯模型与非贝叶斯模型。具体方法包括:(1)提取各模型的拟合曲线数据;(2)获取锚点的原始观测值及对应预测值;(3)计算54个符合地层叠覆率要求的岩心中六类模型对锚点数据的RMSE,随后基于RMSE结果构建聚类热图,用于直观区分不同模型对实际观测值的拟合优劣。

考虑到大洋沉积物沉积速率通常并非恒定,直接线性拟合与Clam模型假设沉积速率在控制点之间保持恒定,因此在锚点数据偏离线性趋势时拟合效果不佳,往往难以准确反映原始数据特征。非贝叶斯模型中,直接线性拟合普遍表现出欠拟合倾向,而多项式拟合在一定程度上更适合处理大洋钻探的时空数据。贝叶斯模型中,Bchron与Undatable的拟合效果明显优于其他方法(图11)。

从适用范围来看,Bchron模型在多种沉积环境中均表现出良好的适应性和稳健性。为系统评价六类模型的优劣,综合考量以下五个方面的指标:(1)模型构建数量;(2)模型适用场景的覆盖度;(3)符合地层叠覆率的岩心占比;(4)54个岩心的RMSE比较结果;(5)最优模型的空间分布范围。在此基础上,进一步基于是否为贝叶斯模型,将六类方法在五维指标上绘制雷达图,从而甄别并确定最优的年龄—深度建模方法。

根据雷达图可以清晰地看到,在未基于贝叶斯的模型中,多项式拟合虽然无法保证所构建年龄—深度模型能够符合地层叠覆率,但是在综合考虑上述其余四个方面时,多项式拟合也可选择(图12a);

在基于贝叶斯的模型中,若不考虑年龄—深度模型构建数量和速度,选择Bchron模型构建年龄—深度模型无疑是最优解(图12b)。基于上述结果再考虑地质学相关先验知识,建议选择Bchron来为大洋钻探时空数据构建年龄—深度模型。

虽然研究重点是对于最优年龄—深度模型的筛选,并且已经为大洋钻探时空数据筛选出较为适合的贝叶斯模型,但模型效果的好坏仍然在很大程度上影响之后的研究。当前Bchron方法构建的年龄—深度模型依旧存在很大的改进空间:(1)构建年龄—深度模型时未考虑锚点数据的优先级,可能导致模型的准确度和可信度降低;(2)目前构建的年龄—深度模型对于模型锚点数据的不确定性估计相对宽泛,这可能会导致形成的年龄—深度模型不利于精确的数据解释;(3)目前构建的年龄—深度模型均以Hole为单位进行构建,这导致模型可能会因部分岩心段缺失而出现与实际地层概况不符的情况。

3.4 大洋钻探年龄—深度模型的应用

年龄—深度模型在地质学中的应用涵盖多个领域,主要用于揭示沉积物或岩层的年龄与其深度之间的定量关系^[81]。通过精确的年代学手段,结合深度数据,能够有效地推算沉积速率、沉积环境及古气候变化^[82]。模型在地层学和沉积学研究中能够提供沉积物沉积历史的精确时间框架,从而分析沉积速率的时空变化,并推测沉积环境的演变。另外,也可以直接通过模型来判断沉积间断和辅助碳酸盐补偿深度的量化研究工作。

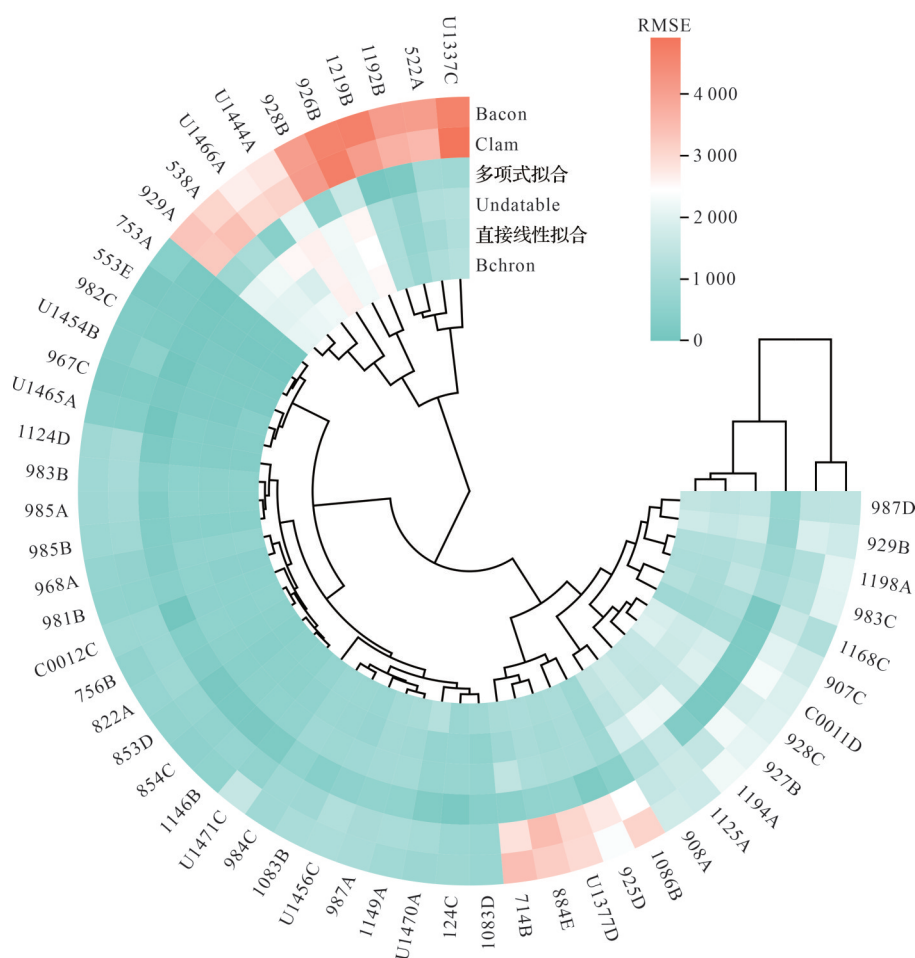


图 11 54 个岩心的不同年龄—深度建模方法的均方根误差 (RMSE) 环形聚类热图

外圈标签表示各个 DSDP/ODP/IODP 站点, 颜色梯度表示 RMSE 值 (红色=误差较大, 绿色=误差较小); 图中对比了六种建模方法: Bacon、Clam、多项式拟合、Undatable、直接线性拟合以及 Behron

Fig.11 Circular hierarchical clustering heatmap of root mean square error (RMSE) values for different age-depth modeling methods at 54 drill sites

Outer labels represent individual DSDP/ODP/IODP sites; color gradient indicates RMSE values (red = higher error, green = lower error); Six modeling methods are compared: Bacon, Clam, polynomial fitting, Undatable, direct linear fit, and Behron

3.4.1 沉积间断的判别

沉积间断是指沉积岩层之间记录的沉积中断或停滞现象, 表现为地层中存在明显的时间空白^[83]。这种间断通常发生在沉积物长期未堆积或沉积速率极低的时期, 从而导致新沉积层与下伏岩层之间形成不连续界面。其成因多样, 既可能受海平面升降、气候波动的控制^[84], 也可能源于海洋环流格局的改变, 例如洋流强度、方向或深度的变化, 造成沉积物的再分布或大规模物质运输中断^[85]。在实际分析中, 年龄—深度模型曲线的特征结合原始数据可用于识别潜在的沉积间断: 若沉积速率趋近于零, 或同一深度对应多个年龄区间, 均可能指示间断的存在。值得注意的是, 沉积间断不仅限于区域性现象, 往往与全

球尺度的重大地质事件密切相关, 如海平面大幅波动、气候突变以及生物大灭绝^[76,86]。通过比较不同地区海侵与海退事件的同步性, 可以揭示海平面变化对全球气候与沉积环境的深远影响, 并进一步推断其驱动机制^[87]。

以北太平洋 Shatsky 高原中央高地的 1208A 岩心为例 (图 13), 该岩心由 ODP 198 航次完成。前人通过分析 1208A 岩心资料, 揭示了白垩纪—古近纪一系列突发气候事件, 提供了丰富的地层学、生物地层学及地球化学证据, 阐释了这些事件的环境效应及潜在成因^[88]。然而, 该研究在年龄约束与沉积速率分析方面仍存在局限: (1) 在古新世—始新世极热事件 (Paleocene-Eocene Thermal Maximum, PETM) 等关键

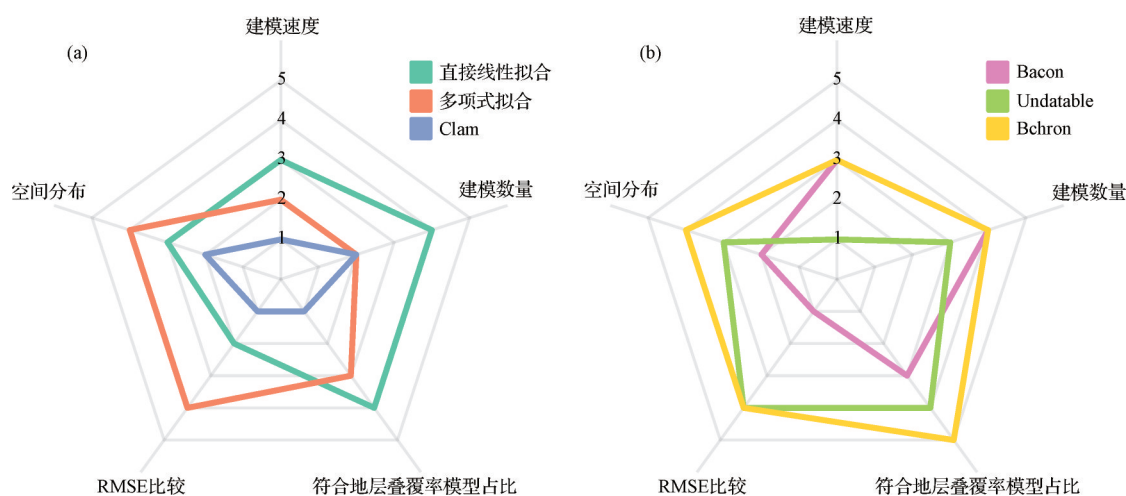


图12 模型五维雷达图

(a)未基于贝叶斯统计学的模型五维雷达图;(b)基于贝叶斯统计学的模型五维雷达图

Fig.12 Model five-dimensional radar charts

(a) not based on Bayesian statistics; (b) based on Bayesian statistics

时段,缺乏高分辨率的年代控制点,导致对事件起始时间与持续时间的精确界定存在不确定性;(2)沉积速率的讨论主要依赖地层学推测,而缺少定量计算。尽管研究确认了PETM期间碳酸盐补偿深度(Carbonate Compensation Depth, CCD)的显著上升及碳酸盐含量降低,但缺乏沉积速率数据支持这一结论。本研究基于1208A岩心建立的Bchron模型可在一定程度上弥补这一不足。通过模型提供的高精度时间框架与沉积速率估算,可以在PETM过渡期清晰识别碳酸盐含量的骤减,并验证这一现象是否与全球气候事件同步。此外,该模型亦提示进一步完善的必要性,即在关键气候事件阶段补充足够的控制点,以提升时间框架的精度。总体而言,年龄—深度模型不仅能够细化深海沉积记录,还为解析PETM等突发气候事件的成因及其与全球变化的联系提供了关键支撑(图13)。

3.4.2 沉积速率的估算

沉积速率是指沉积物在单位时间内的堆积厚度,通常以厘米/千年(cm/ka)或米/百万年(m/Ma)为单位表示^[89-91]。其计算通常基于沉积层厚度与所对应年代差的比值,而年龄—深度模型则通过地层学与年代学数据推算不同沉积层的形成时间,两者之间存在密切联系:沉积速率可用于推导年龄,年龄—深度模型则为沉积速率的校正与约束提供时间框架^[73, 92]。

沉积速率并非恒定,而是受气候变化、构造活动及沉积环境等多重因素的控制^[93]。不同沉积环境下

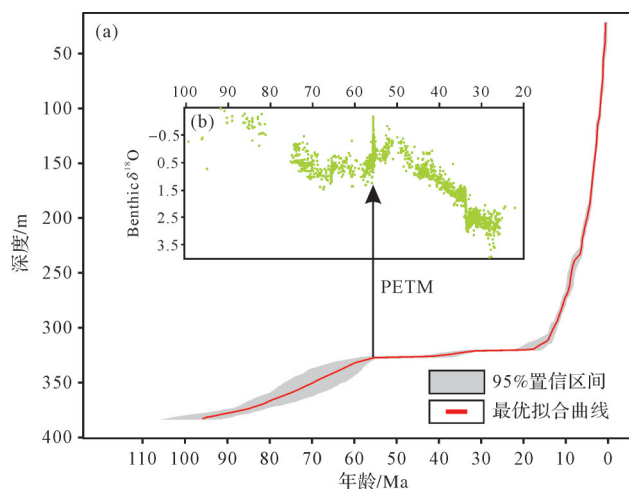


图13 1208A岩心年龄—深度模型示意图和气候曲线

(a)1208A岩心年龄—深度模型示意图;(b)深海底栖氧同位素曲线(据文献[88]修改)

Fig.13 Schematic diagrams of the age-depth model and climate curve for hole 1208A

(a) 1208A drilling age-depth model; (b) deep-sea benthic oxygen isotope curve (modified from reference [88])

的沉积速率差异,常可作为古环境演化的重要指示^[94-95]。沉积速率的精确估算不仅有助于地层对比与区域沉积史重建,还能揭示沉积事件的时空同步性。与此同时,大规模地质事件,如全球气候变冷或变暖,以及生物大灭绝,往往伴随沉积速率的显著波动,对这些变化的分析能够反映地球历史上关键的环境与生态转折^[95-96]。此外,沉积速率的变化特征亦可反映沉积物来源、搬运机制与堆积过程,为理解沉积体系的形成与演化提供了重要线索^[97]。

3.4.3 碳酸盐补偿深度定量化研究

碳酸盐补偿深度是海洋学与地质学研究中的核心概念,指代海水中碳酸盐沉积速率与溶解速率达到动态平衡的临界深度^[98]。在该深度以下,受制于海水化学环境的不利条件,碳酸盐几乎完全溶解,因而无法在沉积记录中长期保存^[99]。近年来,CCD重建正朝着高精度、高分辨率与定量化方向快速发展^[100]。在区域尺度的CCD重建中,年龄—深度模型发挥着关键作用,它能够将地层深度精确转化为时间序列,从而结合不同层位的碳酸盐含量,推演海洋CCD的时空演化规律。该方法不仅有助于揭示古海洋环境的变化过程,还为理解沉积动力学机制及地球系统长期演化提供了坚实依据^[101]。

本研究采用的Bchron年龄—深度模型已成功应用于南海CCD演化的重建,其所构建的高精度时间框架使得南海不同地质时期CCD的变化特征得以清晰辨识。基于这一时间尺度,研究者提出南海CCD在若干关键阶段呈现显著波动:27~18 Ma构造拉张作用引发的快速下降,18~13 Ma中新世气候适宜期(Middle Miocene Climatic Optimum, MMCO)期间的明显波动,以及自约8 Ma以来受巴士海峡隆起阻隔太平洋深水输入而导致的南海与赤道太平洋CCD演化趋势分化^[100]。这些关键演化事件的识别高度依赖于精确的时间控制,而年龄—深度模型正是实现这一目标的核心工具。Bchron模型通过对年龄数据的优化,有效减少误差并提高沉积速率估算精度,从而在提升CCD变化时间分辨率的同时,避免因时间不确定性引入伪信号^[102]。由此,CCD重建能够更准确地反映气候与构造驱动的过程,显著增强了研究结论的可靠性。

4 结束语

本研究围绕大洋钻探数据的年龄—深度建模展开。通过系统整合多类数据库、航次报告及相关文献中的异构数据,采用GTS2020、GTS2012及Neptune数据库为标准完成数据的年代统一,并基于贝叶斯统计学方法(Bacon、Undatable、Bchron)与非贝叶斯方法(线性拟合、多项式拟合、Clam)共六种模型开展建模工作。研究表明,贝叶斯统计学模型在处理沉积速率非均一性与数据不确定性方面具有显著优势。其中,Bchron模型在RMSE误差评估与地层叠覆率分析中表现最为优越,被确定为最适用于大洋钻探数

据的建模方法。与传统数学方法相比,Bchron能够更准确地反映复杂沉积环境下的年龄变化特征,并提供稳定且高分辨率的时间序列,为沉积间断判识、沉积速率变化分析及CCD重建提供了可靠的时间框架。相较而言,传统方法在特定条件下仍具备适用性,例如线性拟合适用于沉积速率相对均一的环境,多项式拟合在局部地层亦能获得较好效果,但在面对复杂沉积过程时常存在误差较大、难以量化不确定性的局限。相比之下,Bacon、Undatable与Bchron等贝叶斯方法在沉积速率快速变化或年代约束稀疏的情况下,能够更稳健地给出合理推断。

综上,本研究不仅为大洋钻探数据的年龄—深度建模提供了系统性的理论与实践框架,也为古气候、沉积学及板块构造等领域研究建立了更为精确的年代学基础。未来的研究可从以下方向进一步拓展:(1)优化贝叶斯模型的参数设定,以提升计算效率并降低模型误差;(2)探索与机器学习方法的融合,推动年龄—深度建模的自动化与智能化发展;(3)扩展数据覆盖范围,将模型应用于更大尺度的区域性 & 全球性地层对比。通过这些改进,年龄—深度模型将在深时地球系统研究中发挥更大作用,为揭示地球演化过程提供更高分辨率的时间约束。

致谢 感谢周生建、叶龙刚、黄天宇、成乐乐、张沁瑶、刘钰源、李雪霜、张欣怡、张佳佳、李婧浩、曹智松、侯立、王晨浩、荣建新、任森浩为数据提取提供的协助。此外,还要感谢中国地质大学(北京)的蔡灿在研究过程中提供的协助。

参考文献(References)

- [1] 徐鸿儒. 高瞻方向 清远瞩路线明——《中国至2050年海洋科技发展路线图》出版[J]. 海洋科学, 2010, 34(2): 101. [Xu Hongru. Looking ahead with clear direction — Publication of China's Marine Science and Technology Development Roadmap to 2050 [J]. Marine Sciences, 2010, 34(2): 101.]
- [2] Becker K, Austin J A, Exon N, et al. Fifty years of scientific ocean drilling[J]. Oceanography, 2019, 32(1): 17-21.
- [3] Kim G Y. Fifty years of scientific ocean drilling (1968-2018): Achievements and future direction of K-IODP[J]. The Sea: Journal of the Korean Society of Oceanography, 2019, 24(1): 30-48.
- [4] 徐晶晶, 张涛, 吴林强, 等. 大洋科学钻探特点与发展趋势: 基于国际大洋发现计划科学框架的对比分析[J]. 海洋开发与管理, 2023, 40(3): 30-38. [Xu Jingjing, Zhang Tao, Wu Linqiang, et al. Characteristics and development trends of ocean scientific drilling: Comparative analysis based on the scientific framework of international ocean discovery plan[J]. Ocean Development and

- Management, 2023, 40(3): 30-38.]
- [5] Inagaki F, Taira A. Future opportunities in scientific ocean drilling: Illuminating planetary habitability[J]. *Oceanography*, 2019, 32(1): 212-216.
- [6] Exon N F, Arculus R J. Scientific ocean drilling in the Australasian region: A review[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2022, 69(3): 305-382.
- [7] 汪品先. 大洋钻探五十年:回顾与前瞻[J]. *科学通报*, 2018, 63(36): 3868-3876. [Wang Pinxian. Fifty years of scientific ocean drilling: Review and prospect[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(36): 3868-3876.]
- [8] 拓守廷, 温廷宇, 张钊, 等. 大洋钻探计划运行的国际经验及对我国的启示[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(6): 632-642. [Tuo Shouting, Wen Tingyu, Zhang Zhao, et al. The experience of scientific ocean drilling operation and its enlightenment to China[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(6): 632-642.]
- [9] 马鹏飞, 刘志飞, 拓守廷, 等. 国际大洋钻探科学数据的现状、特征及其汇编的科学意义[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(6): 643-662. [Ma Pengfei, Liu Zhifei, Tuo Shouting, et al. Present status, characteristics, and compilation significance for the data of scientific ocean drilling[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(6): 643-662.]
- [10] 鲁铮博, 史宇坤, 华洪, 等. 国际大洋科学钻探的数据资源与共享现状[J]. *高校地质学报*, 2020, 26(4): 472-480. [Lu Zhengbo, Shi Yukun, Hua Hong, et al. Current data administration and sharing of international scientific ocean drilling[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2020, 26(4): 472-480.]
- [11] 翦知潜, 党皓文. 解读过去、预告未来: IODP 气候与海洋变化钻探研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(12): 1267-1276. [Jian Zhimin, Dang Haowen. Reading the past, informing the future: Progress and prospective of the recent ocean drilling researches on climate and ocean change[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(12): 1267-1276.]
- [12] 宋翠玉, 吕大伟. 米兰科维奇旋回时间序列分析法研究进展[J]. *沉积学报*, 2022, 40(2): 380-395. [Song Cuiyu, Lü Dawei. Advances in time series analysis methods for milankovitch cycles[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 380-395.]
- [13] Rubanik N K. Deep sea drilling in the oceans: History and potentials (to 40th anniversary of the International Ocean Drilling Program)[J]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2008, 16(6): 678-682.
- [14] Berger W H. Geologist at sea: Aspects of ocean history[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2011, 3: 1-34.
- [15] Heegaard E, Birks H J B, Telford R J. Relationships between calibrated ages and depth in stratigraphical sequences: An estimation procedure by mixed-effect regression[J]. *The Holocene*, 2005, 15(4): 612-618.
- [16] Lacourse T, Gajewski K. Current practices in building and reporting age-depth models[J]. *Quaternary Research*, 2020, 96: 28-38.
- [17] Blaauw M, Christen J A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process[J]. *Bayesian Analysis*, 2011, 6(3): 457-474.
- [18] Haslett J, Parnell A. A simple monotone process with application to radiocarbon-dated depth chronologies[J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 2008, 57(4): 399-418.
- [19] Loughheed B C, Obrochta S P. A rapid, deterministic age-depth modeling routine for geological sequences with inherent depth uncertainty[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2019, 34(1): 122-133.
- [20] Blaauw M, Heegaard E. Estimation of age-depth relationships [M]//Birks H J B, Lotter A F, Juggins S, et al. Tracking environmental change using lake sediments: Data handling and numerical techniques. Dordrecht: Springer, 2012: 379-413.
- [21] 翟明国, 杨树峰, 陈宁华, 等. 大数据时代: 地质学的挑战与机遇[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(8): 825-831. [Zhai Mingguo, Yang Shufeng, Chen Ninghua, et al. Big data epoch: Challenges and opportunities for geology[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(8): 825-831.]
- [22] Signor P W. The geologic history of diversity[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 1990, 21: 509-539.
- [23] 陈兵, 赵秉元. 数据要素市场高质量发展的竞争法治推进[J]. *上海财经大学学报*, 2021, 23(2): 3-16, 33. [Chen Bing, Zhao Bingyuan. Promotion of the high-quality development of data element markets by competition law[J]. *Journal of Shanghai University of Finance and Economics*, 2021, 23(2): 3-16, 33.]
- [24] Smith D K, Exon N, Barriga F J A S, et al. Ocean drilling: Forty years of international collaboration[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2010, 91(43): 393-394.
- [25] 拓守廷, 王文涛. 国际大洋钻探 2050 科学框架及其对未来大洋钻探发展的启示[J]. *地球科学进展*, 2022, 37(10): 1049-1053. [Tuo Shouting, Wang Wentao. International scientific ocean drilling 2050 science framework and its implications for future scientific ocean drilling development[J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(10): 1049-1053.]
- [26] Wang C S, Hazen R M, Cheng Q M, et al. The Deep-Time Digital Earth program: Data-driven discovery in geosciences[J]. *National Science Review*, 2021, 8(9): nwab027.
- [27] 徐钰麟. 大洋钻探与地层学: 高分辨率磁性生物年代地层格架[J]. *地球科学进展*, 1995, 10(3): 258-262. [Xu Yulin. Ocean drilling program and stratigraphy: High resolution magnetobiochronology scheme[J]. *Advances in Earth Sciences*, 1995, 10(3): 258-262.]
- [28] 赵泉鸿, 汪品先. 南海第四纪古海洋学研究进展[J]. *第四纪研究*, 1999, 19(6): 481-501. [Zhao Quanhong, Wang Pinxian. Progress in Quaternary paleoceanography of the South China Sea: A review[J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 19(6): 481-501.]
- [29] 田军, 汪品先, 成鑫荣, 等. 南海 ODP1143 站上新世至更新世天文年代标尺的建立[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2005,

- 30(1): 31-39. [Tian Jun, Wang Pinxian, Cheng Xinrong, et al. Establishment of the Plio-Pleistocene astronomical timescale of ODP site 1143, southern South China Sea[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(1): 31-39.]
- [30] 田军, 吴怀春, 黄春菊, 等. 从40万年长偏心率周期看米兰科维奇理论[J]. *地球科学*, 2022, 47(10): 3543-3568. [Tian Jun, Wu Huaichun, Huang Chunju, et al. Revisiting the Milankovitch theory from the perspective of the 405 ka long eccentricity cycle[J]. *Earth Science*, 2022, 47(10): 3543-3568.]
- [31] Lindsay E H. Chronostratigraphy, biochronology, datum events, land mammal ages, stage of evolution, and appearance event ordination[J]. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 2003(279): 212-230.
- [32] 刘传联, 成鑫荣. 从超微化石看南沙海区近2 Ma海水上层结构的变化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2001, 31(10): 834-839. [Liu Chuanlian, Cheng Xinrong. Exploring variations in upper ocean structure for the last 2 Ma of the Nansha area by means of calcareous nannofossils[J]. *Science China Earth Sciences*, 2001, 31(10): 834-839.]
- [33] Mortyn P G, Martínez-Boti M A. Planktonic foraminifera and their proxies for the reconstruction of surface-ocean climate parameters[J]. *Contributions to Science*, 2007, 3(3): 371-383.
- [34] Cortese G, Giuseppe, Feng Q L. Session 4 reconstruction of paleoenvironmental conditions and detection of climate changes through time using radiolarians[J]. *Radi Laria*, 2015: 134.
- [35] 蒋辉, 吕厚远, 支崇远, 等. 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*, 2002, 22(2): 113-122. [Jiang Hui, Lü Houyuan, Zhi Chongyuan, et al. Diatom analysis in quantitative reconstruction of Quaternary paleogeography and paleoclimate[J]. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(2): 113-122.]
- [36] 蓝先洪, 申顺喜. 南黄海中部沉积岩芯的微体古生物组合特征及古环境演化[J]. *海洋湖沼通报*, 2004(3): 16-21. [Lan Xianhong, Shen Shunxi. Micropaleontological assemblage characteristics of sediment cores from the centre of the southern Yellow Sea and palaeoenvironmental evolvement[J]. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 2004(3): 16-21.]
- [37] 王玉净, 勾韵娴, 章炳高, 等. 西沙群岛西琛一井中新世地层、古生物群和古环境研究[J]. *微体古生物学报*, 1996, 13(3): 215-223. [Wang Yujing, Gou Yunxian, Zhang Binggao, et al. Studies of Miocene strata, biota and palaeoenvironment from Xi-Chen no. 1 hole in Xisha islands[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1996, 13(3): 215-223.]
- [38] 程振波, 石学法, 刘东升, 等. 南黄海B10岩芯的微体古生物组合特征及古环境演化[J]. *科学通报*, 2001, 46(增刊1): 45-51. [Cheng Zhenbo, Shi Xuefa, Liu Dongsheng, et al. Microfossil assemblage characteristics in core B₁₀ and implication for paleoenvironmental evolution in the southern Yellow Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(Suppl. 1): 45-51.]
- [39] 刘健, 段宗奇, 梅西, 等. 南黄海中部隆起晚新近纪: 第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(5): 25-43. [Liu Jian, Duan Zongqi, Mei Xi, et al. Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the Late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(5): 25-43.]
- [40] Zein H, Tran V, Abdelmotaleb Ghazy A, et al. How to extract data from graphs using PlotDigitizer or Getdata Graph Digitizer[J]. 2015, doi:10.13140/RG.2.2.17070.72002.
- [41] Hernández M A, Stolfo S J. Real-world data is dirty: Data cleansing and the merge/purge problem[J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1998, 2(1): 9-37.
- [42] Kim W, Choi B J, Hong E K, et al. A taxonomy of dirty data[J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2003, 7(1): 81-99.
- [43] Geyh M A, Schleicher H. Absolute age determination: Physical and chemical dating methods and their application[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990.
- [44] 杨莉, 袁万明, 王珂. 热年代学方法、技术手段及其在矿床地质中的研究进展[J]. *地球科学*, 2018, 43(6): 1887-1902. [Yang Li, Yuan Wanming, Wang Ke. Research advances of thermochronology in mineral deposits[J]. *Earth Science*, 2018, 43(6): 1887-1902.]
- [45] Agterberg F P. Autocorrelation functions in geology[M]//Merriam D F. *Geostatistics: A colloquium*. Boston: Springer, 1970: 113-141.
- [46] Mahon K I. The New “York” regression: Application of an improved statistical method to geochemistry[J]. *International Geology Review*, 1996, 38(4): 293-303.
- [47] Buckland S T. Fitting density functions with polynomials[J]. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 1992, 41(1): 63-76.
- [48] Blaauw M. Methods and code for ‘classical’ age-modelling of radiocarbon sequences[J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(5): 512-518.
- [49] Blaauw M. CLAM: Classical age-depth modelling of cores from deposits[J]. 2022.
- [50] 赵晋军, 徐利强, 吴礼彬, 等. 西沙赵述岛和北岛海鸟遗迹¹⁴C年代模型及意义[J]. *地球环境学报*, 2018, 9(1): 28-37. [Zhao Jinjun, Xu Liqiang, Wu Libin, et al. Age models of seabird remains from Zhaoshu and Beidao islands in the Xisha Archipelago and its implications[J]. *Journal of Earth Environment*, 2018, 9(1): 28-37.]
- [51] Parnell A C, Buck C E, Doan T K. A review of statistical chronology models for high-resolution, proxy-based Holocene palaeoenvironmental reconstruction[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(21/22): 2948-2960.
- [52] Pfalz G, Diekmann B, Freytag J C, et al. Improving age-depth relationships by using the LANDO (“Linked age and depth modeling”) model ensemble[J]. *Geochronology*, 2022, 4(1): 269-295.

- [53] Parnell A C, Haslett J, Allen J R M, et al. A flexible approach to assessing synchronicity of past events using Bayesian reconstructions of sedimentation history[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(19/20): 1872-1885.
- [54] Parnell, A. *Bchron: Radiocarbon dating, age-depth modelling, relative sea level rate estimation, and non-parametric phase modelling*. (No Title), 2008.
- [55] Ericson D B, Wollin G. Pleistocene climates and chronology in deep-sea sediments: Magnetic reversals give a time scale of 2 million years for a complete Pleistocene with four glaciations [J]. *Science*, 1986, 162(3859): 1227-1234.
- [56] Harland W B. *A geologic time scale 1989*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [57] Miller B V. Introduction to radiometric dating[J]. *The Paleontological Society Papers*, 2006, 12: 1-23.
- [58] Zhou W J, Cheng P, Jull A J T, et al. ^{14}C chronostratigraphy for Qinghai Lake in China[J]. *Radiocarbon*, 2014, 56(1): 143-155.
- [59] Li Z Y, Zhang Y G, Torres M, et al. Neogene burial of organic carbon in the global ocean[J]. *Nature*, 2023, 613(7942): 90-95.
- [60] Gallagher K, Charvin K, Nielsen S, et al. Markov chain Monte Carlo (MCMC) sampling methods to determine optimal models, model resolution and model choice for Earth Science problems [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(4): 525-535.
- [61] D'Hondt S, Jørgensen B B, Miller D J, et al. Distributions of microbial activities in deep subseafloor sediments[J]. *Science*, 2004, 306(5705): 2216-2221.
- [62] Pálke H, Moore T, Backman J, et al. Integrated stratigraphic correlation and improved composite depth scales for ODP Sites 1218 and 1219[M]//Wilson P A, Lyle M, Firth J V. *Proceedings of the ocean drilling program, scientific results*. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 2005: 1-41.
- [63] Westerhold T, Röhl U, Wilkens R, et al. Revised composite depth scales and integration of IODP Sites U1331-U1334 and ODP Sites 1218-1220[M]//Pálke H, Lyle M, Nishi H, et al. *Proceedings of the IODP, 320/321*. Tokyo: Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., 2012: 321.
- [64] Gradstein F M, Ogg J G. The chronostratigraphic scale[M]//Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, et al. *Geologic time scale 2020*. Amsterdam: Elsevier, 2020: 21-32.
- [65] Petersen M, Glöckler F, Kiessling W, et al. History and development of ABCDEFG: A data standard for geosciences[J]. *Fossil Record*, 2018, 21(1): 47-53.
- [66] 袁满, 李盛锐, 刘小野. 地质知识图谱标准化模型研究[J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2021, 39(2): 215-222. [Yuan Man, Li Shengrui, Liu Xiaoye. Research on standardized model of geological knowledge graph[J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2021, 39(2): 215-222.]
- [67] Norris R D, Wilson P A, Blum P, et al. Paleogene Newfoundland sediment drifts and MDHDS test. In *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program*, 2014, 342.
- [68] Renaudie J, Lazarus D B, Diver P. NSB (Neptune Sandbox Berlin): An expanded and improved database of marine planktonic microfossil data and deep-sea stratigraphy[J]. *Palaeontologia Electronica*, 2020, 23(1): 1-28.
- [69] Williams J W, Grimm E C, Blois J L, et al. The Neotoma Paleocology Database, a multiproxy, international, community-curated data resource[J]. *Quaternary Research*, 2018, 89(1): 156-177.
- [70] 崔佳旭, 杨博. 贝叶斯优化方法和应用综述[J]. *软件学报*, 2018, 29(10): 3068-3090. [Cui Jiaxu, Yang Bo. Survey on Bayesian optimization methodology and applications[J]. *Journal of Software*, 2018, 29(10): 3068-3090.]
- [71] 周永章, 陈烁, 张旗, 等. 大数据与数学地球科学研究进展: 大数据与数学地球科学专题代序[J]. *岩石学报*, 2018, 34(2): 255-263. [Zhou Yongzhang, Chen Shuo, Zhang Qi, et al. Advances and prospects of big data and mathematical geoscience [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(2): 255-263.]
- [72] 张沥今, 陆嘉琦, 魏夏琰, 等. 贝叶斯结构方程模型及其研究现状[J]. *心理科学进展*, 2019, 27(11): 1812-1825. [Zhang Lijin, Lu Jiaqi, Wei Xiayan, et al. Bayesian structural equation modeling and its current researches[J]. *Advances in Psychological Science*, 2019, 27(11): 1812-1825.]
- [73] Crann C A, Patterson R T, Macumber A L, et al. Sediment accumulation rates in subarctic lakes: Insights into age-depth modeling from 22 dated lake records from the Northwest Territories, Canada[J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 27: 131-144.
- [74] Yang H P, Wang W P, Sun J G. Control point adjustment for B-spline curve approximation[J]. *Computer-Aided Design*, 2004, 36(7): 639-652.
- [75] Trachsel M, Telford R J. All age-depth models are wrong, but are getting better[J]. *The Holocene*, 2017, 27(6): 860-869.
- [76] Harris E C. The laws of archaeological stratigraphy[J]. *World Archaeology*, 1979, 11(1): 111-117.
- [77] Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 92(1/2): 1-33.
- [78] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1982, 63(11): 1309-1313.
- [79] Hsu K L, Moradkhani H, Sorooshian S. A sequential Bayesian approach for hydrologic model selection and prediction[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(12): W00B12.
- [80] Permai S D, Tanty H. Linear regression model using Bayesian approach for energy performance of residential building[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 135: 671-677.
- [81] Hagen C J. Sediment accumulation rates and high-resolution age-depth models[J]. *The Sedimentary Record*, 2024, 22(1).
- [82] 郭栋山, 韩喜球, 范维佳, 等. 大洋铁锰结壳年代框架模型的天文调谐校正: 方法与应用[J]. *地球科学进展*, 2023, 38(2): 125-136. [Guo Dongshan, Han Xiqiu, Fan Weijia, et al. Astro-

- nomical tuning and calibration for age model of pelagic Fe-Mn crust: Methods and application[J]. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(2): 125-136.]
- [83] 吴瑞棠. 重要的发现:深海沉积间断[J]. *地质科技情报*, 1985, 4(4): 51-57. [Wu Ruitang. Important discovery: Hiatuses in deep-sea sediments[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1985, 4(4): 51-57.]
- [84] 陈芳, 周洋, 庄畅, 等. 南海东北部冷泉区末次冰期沉积间断及其成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(2): 19-27. [Chen Fang, Zhou Yang, Zhuang Chang, et al. Origin of the hiatus of Last Glacial Period in cold seep area of northeastern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(2): 19-27.]
- [85] 刘季花. 大洋中的沉积间断[J]. *海洋地质动态*, 1990(8): 4-6. [Liu Jihua. Hiatuses in oceanic sediments[J]. *Marine Geology Dynamics*, 1990(8): 4-6.]
- [86] Keller G, Barron J A. 中新世深海沉积间断的古海洋学意义(上)[J]. 芮荷凤, 译. *海洋地质动态*, 1984(4): 45-56. [Keller G, Barron J A. Paleooceanographic significance of Miocene deep-sea hiatuses (Part I)[J]. Rui Hefeng, trans. *Marine Geology Frontiers*, 1984(4): 45-56.]
- [87] 井田喜明. 海平面变化与沉积间断[J]. 李杰, 译. *海洋地质译丛*, 1982(1): 62-66. [Ida Y. Sea-level changes and sedimentary hiatuses[J]. Li Jie, trans. *Marine Geology Translations*, 1982(1): 62-66.]
- [88] Bralower T J, Premoli Silva I, Malone M J, et al. New evidence for abrupt climate change in the Cretaceous and Paleogene: Ocean Drilling Program leg 198 to shatsky rise, northwest pacific [C]//*Proceedings of the AGU fall meeting abstracts*. 2002.
- [89] 许志峰. 南海中北部海域晚更新世以来沉积速率及其变化机制[J]. *台湾海峡*, 1995, 14(4): 356-360. [Xu Zhifeng. Sedimentary rates and changing mechanism in northern and middle South China Sea since Late Pleistocene[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1995, 14(4): 356-360.]
- [90] 李凤业, 高抒, 贾建军, 等. 黄、渤海泥质沉积区现代沉积速率[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(4): 364-369. [Li Fengye, Gao Shu, Jia Jianjun, et al. Contemporary deposition rates of fine-grained sediment in the Bohai and Yellow Seas[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(4): 364-369.]
- [91] Huang T Y, Ma C, Jin S D, et al. Quaternary sedimentation rate revealed by semi-quantitative analysis in global ocean[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, 166: 106900.
- [92] Hubay K, Molnár M, Orbán I, et al. Age-depth relationship and accumulation rates in four sediment sequences from the Retezat Mts, South Carpathians (Romania)[J]. *Quaternary International*, 2018, 477: 7-18.
- [93] Stein R. 有机碳与沉积速率的关系:大西洋森诺曼阶与土仑阶深海缺氧环境的实例[J]. 芮荷凤, 周平, 译. *海洋地质译丛*, 1987(2): 5-9. [Stein R. Relationship between organic carbon and sedimentation rate: Examples from deep-sea anoxic environments of the Cenomanian-Turonian in the Atlantic[J]. Rui Hefeng, Zhou Ping, trans. *Marine Geology Translations*, 1987(2): 5-9.]
- [94] 齐君, 李凤业, 宋金明, 等. 北黄海沉积速率及其沉积通量[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(2): 9-14. [Qi Jun, Li Fengye, Song Jinming, et al. Sedimentation rate and flux of the North Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(2): 9-14.]
- [95] 王永红, 沈焕庭. 河口海岸环境沉积速率研究方法[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(2): 115-120. [Wang Yonghong, Shen Huanting. The study methods of sedimentation rates in the estuarine and coastal environments[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(2): 115-120.]
- [96] Sugisaki R. 中白垩世以来太平洋底沉积物的化学成分与沉积速率的关系:古代沉积物沉积环境的化学限制的基本证据[J]. 傅友忠, 译. *地质地球化学*, 1986(3): 36-41, 35. [Sugisaki R. Relationship between chemical composition and sedimentation rate of Pacific floor sediments since the mid-Cretaceous: Basic evidence of chemical constraints on depositional environment of ancient sediments[J]. Fu Youzhong, trans. *Geology-Geochemistry*, 1986(3): 36-41, 35.]
- [97] 庄丽华, 常凤鸣, 李铁刚, 等. 南海黄 EY02-2 孔底栖有孔虫群落特征与全新世沉积速率[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(4): 7-14. [Zhuang Lihua, Chang Fengming, Li Tiegang, et al. Foraminiferal faunas and Holocene sedimentation rates of core EY02-2 in the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(4): 7-14.]
- [98] 陈荣华, 徐建, 孟翊, 等. 南海东北部表层沉积中微体化石与碳酸盐溶跃面和补偿深度[J]. *海洋学报*, 2003, 25(2): 48-56. [Chen Ronghua, Xu Jian, Meng Yi, et al. Microorganisms and carbonate lysocline depth and CCD in surface sediment of the northeastern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(2): 48-56.]
- [99] 刘振尤, 葛晨东, 石学法, 等. 中印度洋海盆南部中新世以来碳酸盐补偿深度的演变:来自微体化石组合和元素地球化学的证据[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2020, 56(5): 702-709. [Liu Zhenyou, Ge Chendong, Shi Xuefa, et al. CCD evolution since the Miocene: Evidence from nannofossils assemblage and element geochemistry in the south part of Central Indian Ocean Basin[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2020, 56(5): 702-709.]
- [100] 王家昊, 胡修棉, 蒋璟鑫, 等. 重建南海 27Ma 以来高分辨率碳酸盐补偿深度[J]. *地学前缘*, 2024, 31(1): 500-510. [Wang Jiahao, Hu Xiumian, Jiang Jingxin, et al. High-resolution reconstruction of carbonate compensation depth in the South China Sea since 27 Ma[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(1): 500-510.]
- [101] 肖开迅, 胡修棉, 蒋璟鑫, 等. 碳酸盐补偿深度(CCD)是解密新生代表层碳循环的潜在钥匙[J]. *中国科学:地球科学*, 2024, 54(6): 1769-1785. [Xiao Kaixun, Hu Xiumian, Jiang

Jingxin, et al. Unraveling the Cenozoic carbon cycle by reconstructing carbonate compensation depth (CCD)[J]. Science China Earth Sciences, 2024, 54(6): 1769-1785.]

[102] Cai C, Ma C, Hu B, et al. SedST: An updated chronological database for ocean sediments[J/OL]. GSA Bulletin. <https://doi.org/10.1130/B37957.1>.

Comparative Analysis of Age-Depth Models Based on the Ocean Drilling Program

GONG Cheng^{1,2,3}, ZHANG PengCheng^{4,5}, HAN QingChen^{4,6}, MA Chao^{1,2,3,4}

1. Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

4. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

5. Hubei Yongye Xing Evaluation Consulting Co. Ltd., Wuhan 430070, China

6. Shandong Gold Group (Linglong) Co. Ltd., Yantai, Shandong 265406, China

Abstract: [Objective] Age-depth models play a central role in geological history reconstruction, stratigraphic correlation and paleoclimate research; however, uncertainties remain regarding the selection of the best model for particular geological settings. To improve the precision of global-scale sedimentary chronologies and address the challenge of integrating heterogeneous multi-source data, this study compiled and standardized chronological information from 560 drill sites obtained by the Ocean Drilling Programs since 1968, thereby improving comparability between regions and databases. [Methods] Based on the standardized dataset, six modeling approaches-linear fitting, polynomial fitting, Clam, Bacon, Undatable and Bchron-were applied to construct age-depth relationships. A multi-dimensional evaluation framework was established, using stratigraphic superposition rate analysis and root mean square error (RMSE) as metrics, to systematically compare the models in terms of accuracy and stability, and their ability to capture sedimentation rate variability and to handle outliers. [Results] The results show that non-Bayesian models (linear fitting, polynomial fitting, Clam) perform well in conditions of relatively uniform sedimentation rates, but are less effective in addressing discontinuities and outliers. By contrast, Bayesian models (Bacon, Bchron, Undatable) effectively exclude outliers and accurately simulate variations in sedimentation rates, with Bchron demonstrating the best overall performance in accuracy, stability and adaptability to ocean drilling data. [Conclusions] This study highlights that standardized integration of global ocean drilling chronologies not only significantly improves the comparability and precision of age-depth models but also provides a robust methodological foundation for future optimization of model parameters and the enhancement of dating accuracy, along with their application in global stratigraphic correlation and paleogeographic reconstruction.

Key words: Ocean Drilling Program; age-depth model; data standardization; Bayesian statistics