

全球地下水储库影响长期海平面波动

张之辉¹, 王天天^{2,3*}, 吕大炜^{1,4*}, 高远^{2,4}, 王成善^{2,4}

1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590

2. 中国地质大学(北京)地质微生物与环境全国重点实验室, 北京 100083

3. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083

4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

* 通讯作者, E-mail: tianwang@cugb.edu.cn(王天天), lvdawei95@163.com(吕大炜)

2025-08-12收稿, 2026-02-14修回, 2026-04-22接受, 2026-06-23网络版发表

地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项项目(2024ZD1001105)和国家自然科学基金项目(42472165、42102127、42172117)资助

摘要 长期(10^7 – 10^8 年尺度)的全球绝对海平面变化通常归因于构造作用通过改变洋盆容量所产生的影响。然而, 在更短的时间尺度(10^4 – 10^6 年)上, 海平面同样表现出持续波动。近年来研究提出, 在温室气候时期, 大陆地下水储库的气候驱动变化可能是这些较高频率绝对海平面波动的重要机制。煤作为泥炭的成岩产物, 其古地理分布主要受气候条件控制。本文以煤这一代用指标为基础, 在过去415 Myr的时间范围内、以5 Myr的时间分辨率来评估大陆水储库的变化, 并将其与绝对海平面变化进行对比分析。结果表明, 在温室气候时期, 含水层型海平面变化(aquifer-eustasy)对长期绝对海平面波动具有重要控制, 且可能是主导过程之一。此外, 陆地水体(如沼泽/湿地)的面积在非冰期条件下可能构成气候模式中的关键边界条件。

关键词 大陆地下水, 煤, 含水层型海平面变化, 温室气候, 海平面

1 引言

全球海平面(绝对海平面)变化通过重塑陆地与海洋的空间分布格局, 对地球表层系统演化以及动植物的生存范围产生深远影响。绝对海平面变化主要由两类过程控制: 一类是洋盆容量的变化, 另一类是海洋中水体总体积的变化(Conrad, 2013; Brikiatis, 2019)。在较长的时间尺度($>10^6$ 年)上, 洋盆体积变化主要受构造过程控制, 例如洋中脊扩张速率和洋脊长度的变化(Conrad, 2013)。相比之下, 在较短的时间尺度($\leq 10^6$ 年)上, 海水体积变化则主要由海水的物理性质(盐度和温度)以及全球水文循环所驱动, 尤其是大陆冰盖的消长, 即冰川型海平面变化(glacio-eustasy)。这一机制可在短时间尺度上引起幅度较大且变化迅速的绝对海平面波动(Miller等, 2005; Boulila等, 2011)。除冰川作用之外, 越来越多的研究表明, 大陆地下水储库的变化同样可以

通过大陆含水层与海洋之间的水量交换, 引发绝对海平面变化(Sames等, 2016; Li等, 2018; Brikiatis, 2019; Wang等, 2020, 2022; Zhang等, 2022; Wei等, 2023)。这一过程称为“湖泊型海平面变化”(limno-eustasy; Wagneich等, 2014)或“含水层型海平面变化”(aquifer-eustasy; Wendler等, 2016)。其基本物理内涵在于, 气候变化驱动下的水文循环重组会导致大陆含水层在充水与排水状态之间发生系统性转变(Sames等, 2020)。在现代地球系统中, 陆地水储库变化及其对海平面变化的贡献已可通过卫星观测进行定量评估(Reager等, 2016)。而在地质历史时期, 对气候驱动含水层型海平面变化的认识主要依赖于多种间接证据, 包括稳定同位素记录(Föllmi, 2012; Wendler和Wendler, 2016; Laurin等, 2019)、碳酸盐台地的风化旋回(Wendler等, 2014, 2016)、沙漠沉积体系的演化(Wu等, 2017), 以及湖面变化与海平面变化之间的对应关系(Wagneich等,

中文引用格式: 张之辉, 王天天, 吕大炜, 高远, 王成善. 2026. 全球地下水储库影响长期海平面波动. 中国科学: 地球科学, 56(7): 2755–2763, doi: 10.1360/N072025-0442
英文引用格式: Zhang Z, Wang T, Lv D, Gao Y, Wang C. 2026. Global groundwater reservoir's influence on long-term sea level fluctuations. Science China Earth Sciences, 69(7): 2707–2714, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1934-6>

2014; Li等, 2018; Wang等, 2020, 2022; Zhang等, 2022; Wei等, 2023)。这些多指标研究普遍认为, 在大陆不存在大规模冰盖的时期, 湿润-干旱气候旋回所控制的含水层充排过程在驱动短期绝对海平面波动方面具有重要作用(Sames等, 2020); 而在冰室气候条件下, 冰川绝对海平面作用则明显占据主导地位(Wendler等, 2016)。然而, 由于缺乏能够反映二级(约5–20 Myr)和一级(100–200 Myr)时间尺度上大陆水储库变化的可靠代用指标, 目前对含水层型海平面变化在长期尺度上海平面变化中的作用仍然认识不足。

煤自早泥盆世首次出现以来, 几乎贯穿整个地质历史(Boucot等, 2013)。煤是泥炭在埋藏条件下, 经数百万年成岩演化形成的产物, 而泥炭的形成通常发生在地下水位接近或高于地表, 从而造成缺氧环境的条件下(Parrish, 1998)。气候模拟结果表明, 在整个地质历史中, 泥炭沉积普遍形成于净降水量为正的气候背景之下(Bao等, 2023)。现代全球地下水埋深分布图与泥炭地分布图高度一致, 显示浅层地下水位范围与泥炭地空间分布之间存在显著相关性(Yu等, 2010; Fan等, 2013; 图1)。此外, 高地下水位(即大陆含水层高度充水状态)与地壳2 km深度以内的地下水总体积之间也呈正相关关系(Gleeson等, 2016; 图1)。因此, 内陆地区广泛发育的泥炭地反映了长期高地下水位条件, 可作为大陆含水层接近饱和状态的重要指示。基于上述认识, 煤的古地理分布不仅是温暖湿润气候的经典指示标志(Boucot等, 2013), 同时也可能作为重建地质历史时期大陆地下水储库变化的潜在代用指标。

基于此, 本文利用过去415 Myr内全球煤(古泥炭地)的古地理分布特征, 定量评估大陆水储库的长期变化, 并将其与全球绝对海平面变化进行对比, 以探讨含水层型海平面变化在长期尺度上海平面演化中的潜在机制。

2 材料与方法

本研究所采用的煤层数据集覆盖早泥盆世至中新世(Boucot等, 2013), 是目前最为全面的显生宙全球煤炭分布汇编资料。该数据集按地质阶尺度划分为23个时间区间, 并基于Boucot等(2013)的全球尺度综合汇编。现代泥炭地分布数据来源于Ziegler等(2003)。煤层的古地理位置通过其现代地理坐标, 利用Christopher Scotese开发的Point Tracker软件进行时间回溯重建, 并投影到PALEOMAP古地理图上(Scotese, 2016)。板块构造重建基于Scotese(2008)的全球板块构造模型, 并使用GPlates 2.2.0软件完成(附图S1)。我们认识到该数据库采样强度在空间和时间上存在不均一性(Boucot等, 2013)。然而,

全球范围的覆盖以及数百万年时间区间的使用, 可在较大程度上减少局部采样偏差对本文所分析的大尺度趋势的影响。

PALEOMAP PaleoAtlas(Scotese, 2016)包含自泥盆纪以来的71幅古地理图件, 使得本研究能够以约5 Myr的时间分辨率进行分析。在地质记录中, 煤的沉积环境可分为大陆环境与海相环境(包括海陆过渡环境)(Diessel, 2012)。为定量刻画大陆环境中煤的发育程度, 本文计算了各时间区间内位于未被海水淹没大陆区域中的煤面积占同期全部煤数据的比例(附图S2)。

此外, 本文利用GPlates 2.2.0软件测量了自早泥盆世以来所有煤和泥炭产地与同期古海岸线之间的最短距离(附图S2)。在该分析中, 未考虑降水水汽来源及山地对水汽输送的阻挡效应。显生宙绝对海平面曲线基于全球海相沉积剖面的层序地层学研究成果(Haq等, 1987; Haq和Al-Qahtani, 2005; Haq和Schutter, 2008; Haq, 2014, 2018)。长期绝对海平面曲线用于估算各时期被淹没地形面积以及古地理图上的海岸线位置(Scotese, 2016)。我们认识到古地理重建与相对海平面估计均存在空间不确定性, 尤其在海平面快速变化的时间段内, 这种不确定性在区域尺度上可能导致海岸线位置存在数百千米的偏差。然而, 本文关注的是5–20 Myr分辨率上的一级趋势与全球尺度总体格局。在此类大尺度分析中, 平均距离的相对变化比其绝对数值更为稳健, 因此主要结论对上述不确定性不敏感。

本文采用箱线图展示数据离散程度, 绘图使用Matlab软件完成。需要指出的是, 本文的地下水信号由煤分布的空间特征间接推断, 其反映的是地下水富集环境的相对空间范围, 而非地下水储库的绝对值。由于该代用指标本质上是定性的空间指标, 而非连续数值变量, 因此不适合采用依赖连续定量数据的非线性统计检验。基于此, 我们采用“跷跷板式”的定性对比方法, 用以评估内陆煤分布范围较大时期是否对应较低海平面, 反之亦然。同时, 我们在Spyder 3.3.6环境下使用Pandas与Scipy计算总体相关系数及滑动窗口皮尔逊(Pearson)相关系数。皮尔逊相关系数用于衡量两组时间序列的协同变化, 其相关系数范围为-1–1。

3 结果

3.1 煤的古纬度分布

煤的形成在时间与空间上均表现出显著不均一性(Nelsen等, 2016)。目前已知最早的煤记录出现在早泥盆世地层中, 而泥盆纪及早-中三叠世含煤地层数量极少

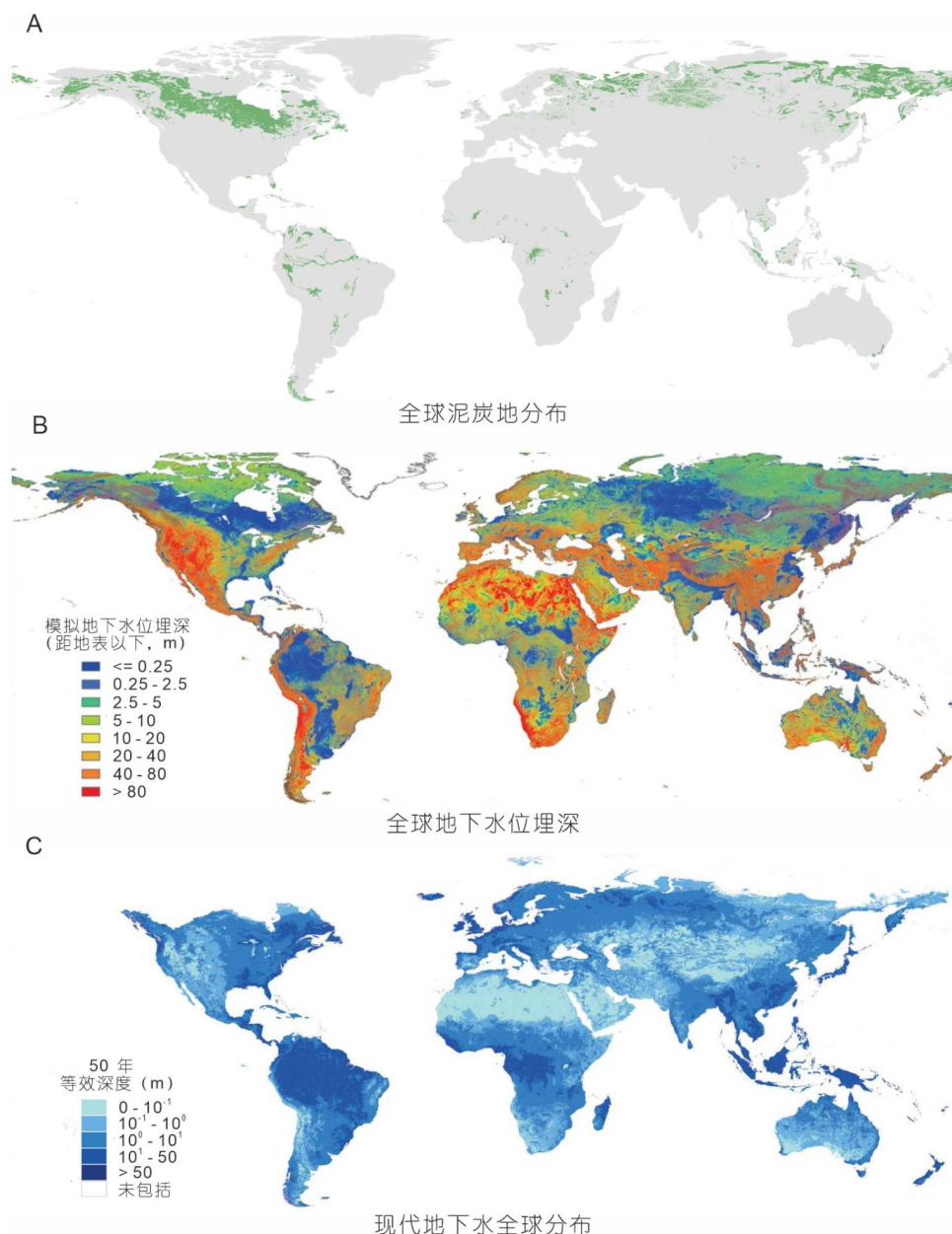


图1 全球泥炭地分布与地下水位空间格局。(A) 全球泥炭地分布(Yu等, 2010); (B) 全球地下水埋深分布(Fan等, 2013); (C) 基于地下水补给量与水位梯度计算的现代全球地下水分布(Gleeson等, 2016)

(附图S3)。煤最为广泛发育的时期主要包括晚石炭世-二叠纪、侏罗纪以及晚白垩世-新生代(附图S1、S3)(Boucot等, 2013)。在整个显生宙期间, 煤沉积广泛分布于从赤道到极地的各纬度范围内, 但主要煤成区的纬度位置随时间发生了系统性变化(图2)。在古生代, 煤主要分布于低纬度地区: 早泥盆世由南半球中纬度逐渐向赤道迁移, 并在二叠纪再次回到南半球中纬度(图2B)。自三叠纪以来, 主要煤成区迅速向北迁移, 并长期稳定于中-高纬度地区(图2B)。

3.2 非海相环境中煤的比例变化

为定量评估大陆环境中煤的发育程度, 我们计算了各时期位于非海相(未被海水淹没)大陆区域内的煤面积占同期全部煤数据的比例(图2)。结果显示, 该比例在地质历史中显著波动, 范围为22%–100%。大陆环境中煤沉积比例的峰值通常与全球海平面低位期相伴, 例如早泥盆世、早二叠世、早-中三叠世、侏罗纪以及新近纪。然而需要指出的是, 由于部分时期保存下来的煤记录较少(尤其是早泥盆世), 这些阶段所提供的气候信息存在一

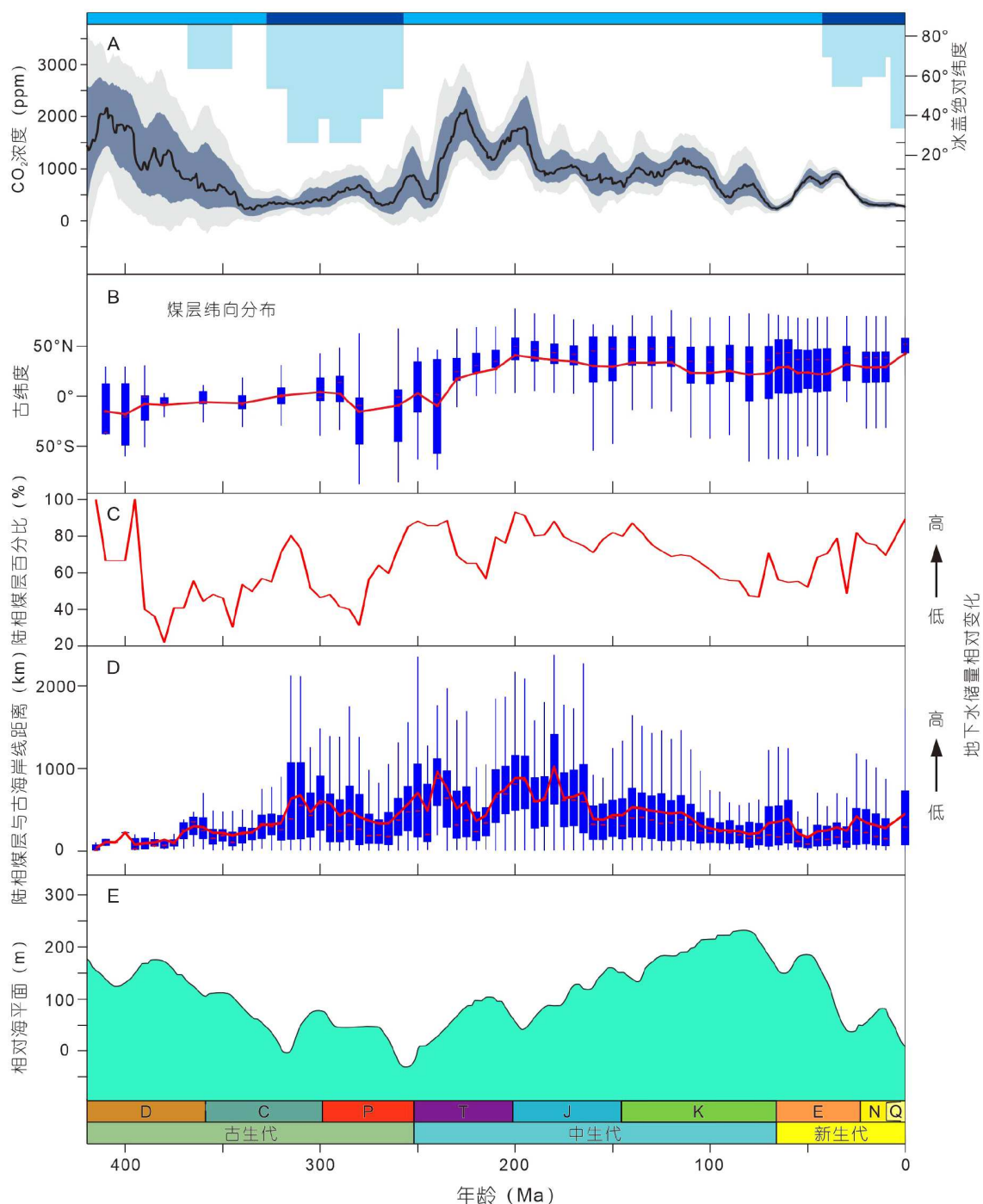


图2 显生宙冰期-温室期气候背景下煤分布特征及海平面变化。(A) 大陆冰川沉积物的纬度分布范围(顶部深蓝色与浅蓝色条分别代表冰室期与温室期)(Crowley和Burke, 1998)及大气CO₂浓度变化(Foster等, 2017); (B) 煤的纬度分布特征(红线表示平均值); (C) 陆相煤层百分比; (D) 陆相煤层与古海岸线之间的距离变化(红线表示平均值); (E) 长期尺度的全球相对海平面变化曲线(Haq等, 1987; Haq和Schutter, 2008)

定局限性(图2C)。

3.3 煤与古海岸线之间的距离变化

在泥盆纪, 煤形成位置与古海岸线之间的距离整体较短。进入早密西西比世后, 该距离明显增大。随后出

现三个煤-海岸线距离显著增大的时期, 分别为中宾夕法尼亚世-早二叠世、早-中三叠世以及早-中侏罗世。其中, 侏罗纪时期煤-海岸线距离达到整个显生宙的最大值。自晚侏罗世以来, 煤-海岸线距离整体呈现逐步但阶段性的减小趋势, 并持续至晚白垩世。在最近约60 Myr的新生

代时期,煤-海岸线距离总体较为稳定,但仍明显小于现代值(图2D)。

4 讨论

4.1 地质历史中泥炭地体系指示长期大陆水储库的证据

自泥盆纪开始形成煤以来,除二叠纪-三叠纪之交外,过去415 Myr的煤沉积记录总体上得以连续保存(Faure等, 1995)。海相环境中煤的形成与海侵-海退过程密切相关:长期海侵会逐步淹没大陆区域,并在海侵推进过程中形成广泛的泥炭沼泽(Railsback, 1995)。例如,晚白垩世被海水淹没的陆地总面积比现代超过40%(Takashima等, 2006),从而导致晚白垩世与海相相关的煤形成更多(附图S3)。相对而言,非海相环境(原本为内陆泥炭地)中煤的形成,与大陆地下水储库较高呈正相关关系。

煤与古海岸线之间的距离反映了内陆泥炭累积的原始空间范围,也与地下水储库的变化相关。该距离同时也可能受到不同时期大陆地壳展布范围的影响:在超大陆时期,理论上内陆距离应更长;大陆破碎时期则更短。尽管大陆破碎指数(fragmentation index或breakup index)(Cogné和Humler, 2008; Zaffos等, 2017)与煤-海岸线距离在某些阶段看似呈相同趋势(附图S3),但对比不同时期大陆煤分布图并不支持二者存在简单的一致对应关系。过去415 Myr大陆周长/面积比在约200 Ma冈瓦纳大陆拼合时达到最低值(附图S4)(Merdith等, 2019)。同时,主要含煤纬度带在古生代总体位于低纬度,而在中生代与新生代总体位于中纬度(图2B)。需要指出的是,植物演化及其从滨岸向内陆与高地环境的扩张,可能在长时间尺度上对煤分布随时间变化引入一定趋势(DiMichele等, 2001; Cleal和Thomas, 2005; Greb等, 2006)。早古生代泥炭主要由孢子植物和树状石松类在湿润低地环境中形成(Greb等, 2006)。晚古生代与中生代,裸子植物主导的植物群逐步扩展到更为多样的气候与地形条件中(DiMichele等, 2001; DiMichele等, 2009);自白垩纪以来,被子植物进一步扩大了泥炭可能形成的环境范围(Wing和Boucher, 1998; Berendse和Scheffer, 2009)。如果植物演化是控制泥炭地空间范围的首要因素,那么理论上应当在显生宙表现为一个长期的单调趋势:煤出现位置逐渐向内陆推进,煤-海岸线距离随时间逐步增大。然而,我们的数据并未显示这种简单的单调增加。相反,煤-海岸线距离呈现非单调波动,并可识别出三个主要的内陆距离显著增大期(中宾夕法尼亚世-早二叠世、早-中三叠

世-侏罗纪、晚白垩世-新生代),其间夹杂着煤沉积再次相对集中于近岸带的阶段。这种非单调波动并不随裸子植物与被子植物分阶段出现的时间进程而变化,却与气候和大陆水文系统的重大重组更为一致(Cleal和Thomas, 2005; DiMichele等, 2009; Gibling和Davies, 2012)。因此,我们认为植物演化决定了泥炭的潜在形成范围,而煤-海岸线距离所记录的泥炭地的实际内陆范围则主要反映气候与地下水条件。尽管古海岸线位置的不确定性会影响单个年代距离值的精确度,但不太可能改变支撑我们解释的长期模式。

综上,全球尺度煤的古地理格局在潜在意义上可反映陆地水储库的变化:内陆泥炭地(煤)更为广泛且古泥炭地位置与古海岸线距离更长,指示陆地地下水储库体量更大。我们的代用指标记录显示,在过去415 Myr内大陆水储库存在显著波动,并且整体上与海平面变化呈反相位关系(图2)。

我们承认煤数据并不完整,仅代表原始泥炭地覆盖范围的一部分,因而不可避免地受到保存与采样偏差影响。这些偏差主要来自:(1)埋藏前泥炭的氧化与侵蚀(DiMichele和Phillips, 1996; Bohacs和Suter, 1997; Flores, 2003);(2)地质调查与勘探在时空上的不均一性。然而,我们认为这些偏差不太可能从根本上改变支撑本文结论的主要趋势:第一,本文分析基于全球尺度大型汇编与较长时间平均(5–20 Myr),局部效应与随机保存事件往往相互抵消;第二,气候模拟表明煤沉积分布与净降水为正的区高度一致,验证煤记录可作为古湿润度的代表性代用指标(Bao等, 2023)。因此,尽管记录不完整,煤的空间分布相对变化仍可为大陆地下水条件的大尺度变化提供稳健约束。

4.2 含水层型海平面变化作为长期海平面变化的可能驱动机制

长期(10^7 – 10^8 年)尺度的全球性海平面变化通常被归因于与地幔动力学相关的固体地球构造-火山过程(Conrad, 2013)。深部地幔水循环可逐渐改变海洋水体体积,是超大陆时间尺度上重要的海平面变化机制之一(Karlsen等, 2019)。此外,改变洋盆体积的过程还包括洋中脊体积变化、沉积物充填、动力地形演化、海底火山作用以及大陆碰撞等(Conrad, 2013)。然而,板块扩张速率并不能解释发生在约10–50 Myr尺度上、幅度30–50 m的二级海平面变化;这些变化更可能与动力地形变化导致的局部隆升或沉降有关(Lovell, 2010; Conrad, 2013)。

地表湖泊与河流的储水量仅约为 0.03×10^6 – 0.3×10^6 km³,而大陆平均海拔以上1 km范围内的地下水

系统的孔隙空间约为 $25 \times 10^6 \text{ km}^3$ (Hay和Leslie, 1990)。这一体量与大陆冰盖和冰川总量相当, 对应的潜在海平面变化可在不考虑均衡调整时超过76 m、考虑均衡调整时约为50 m (Hay和Leslie, 1990)。若将现代可用于地下水储存的孔隙空间全部以大气降水补给充满, 海平面可降低超过320 m (Southam和Hay, 1981; Peters和Husson, 2015)。此外, 在地质历史时期, 大陆多孔沉积物中的孔隙空间可能显著大于现代 (Hay和Leslie, 1990; Sames等, 2020), 加之更高的渗透率, 这会放大气候变化的海平面响应信号 (Hay和Leslie, 1990)。因此, 全球地下水储库变化具有在数千万至数亿年尺度上引发高幅度绝对海平面波动的潜力。需要注意的是, 含水层中储存的地下水并非在任何时刻都能全部输送至海洋; 全球地下水储库中可参与交换的部分可能对应~25 m的海平面等效变化 (Hay和Leslie, 1990; Wagreich等, 2014; Wendler等, 2016; Sames等, 2020)。

含水层型海平面变化被认为是贯穿地质历史的一种普遍过程, 能够在米兰科维奇时间尺度上驱动短期绝对海平面变化, 尤其在大陆基本无冰盖的时期更为显著

(Wendler等, 2016; Sames等, 2020; Wei等, 2023)。轨道尺度气候强迫调控大陆水汽输送与降水格局, 被认为是温室气候条件下通过改变陆地水储库而导致短期地下水驱动海平面变化的关键机制 (Trenberth, 2011)。此前, 有两个因素使得人们难以在长期时间尺度上厘清该过程: (1) 低估了地下含水层容量, 并将其与湖泊、河流水量混淆 (Hay和Leslie, 1990); (2) 缺乏来自长期地质记录中的大陆含水层直接代用指标, 且缺少可解释 $>10^6$ 年尺度陆-海水量交换的合理的物理机制。

为评估大陆含水层储库是否驱动长期绝对海平面变化, 我们对两类地下水代用指标与海平面进行了统计相关性检验。结果显示, 除早三叠世(约250–240 Ma)与晚侏罗世-早白垩世(约155–140 Ma)外, 海平面与地下水储库在整体时间段内具有良好相关性(总体相关系数 $r = -0.25 \sim -0.46$) (图3)。早三叠世因数据点极少可靠性可能不足; 晚侏罗世-早白垩世可能受约150 Ma裂谷脉冲构造效应影响 (Karlsen等, 2019)。在温室期, 海平面与地下水储库呈显著负相关; 在冰室期, 该相关性较弱甚至为正 (图3)。这表明含水层型海平面变化可能在整个地质历

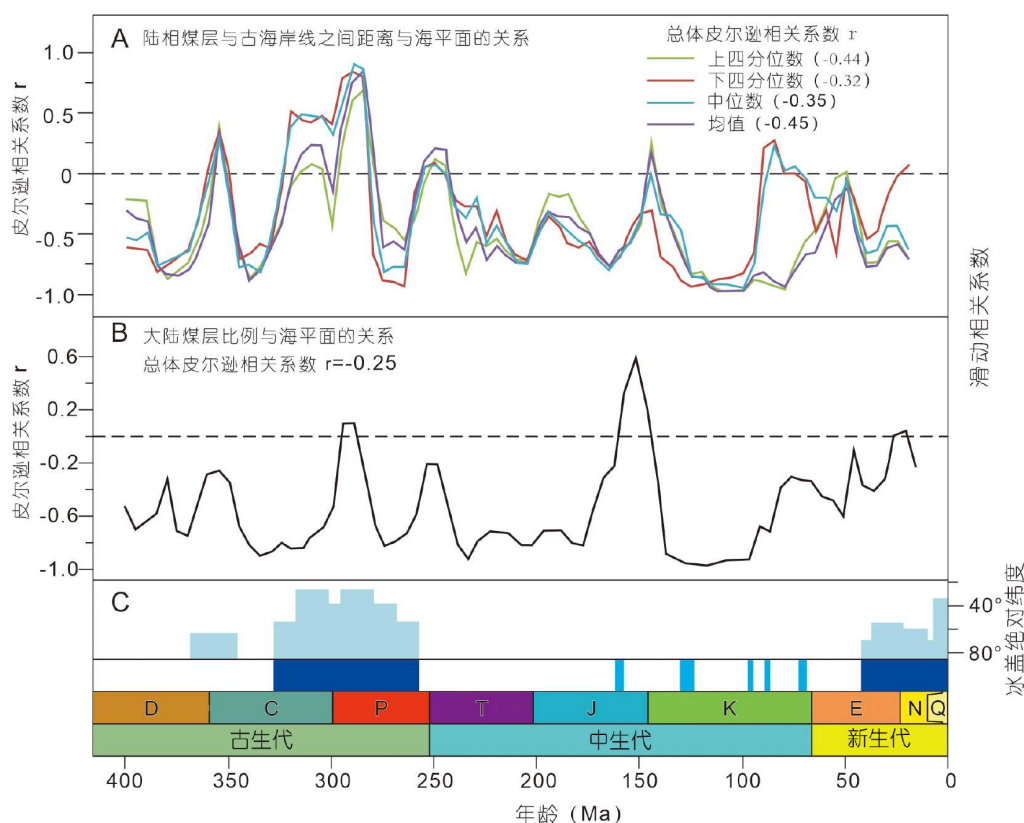


图3 海平面变化与大陆地下水储库之间的相关关系。(A) 陆相煤层-古海岸线距离与海平面之间的整体皮尔逊相关系数及滑动窗口相关系数(滑动窗口为40 Myr; 箱线图中提取的四条曲线分别代表上四分位数、下四分位数、中位数与均值); (B) 陆相煤层比例与海平面之间的整体皮尔逊相关系数及滑动窗口相关系数(滑动窗口为40 Myr); 所有原始数据均以各自的平均值进行归一化处理; (C) 底部为直接冰川证据的纬度分布及对应气候状态(深蓝色: 冰室气候; 浅蓝色: 寒冷气候; 白色: 温室气候)(Crowley和Burke, 1998)

史中普遍参与长期绝对海平面波动调控，且在温室期更关键；冰室条件下则由冰川控制的海平面升降作用占主导(Wendler和Wendler, 2016; Wendler等, 2016)。在温室气候条件下，更高温度可通过增强海洋蒸发、陆地蒸散与降水等过程强化水文循环(Trenberth, 2011)，从而增强含水层-绝对海平面变化幅度。需要强调的是，我们并不否认构造过程的重要性；我们提出的是，含水层型海平面变化为一种额外机制，可在相近时间尺度上对海平面进行调制。相关性较弱的时段确实可能反映构造驱动占主导。大陆含水层储库变化受两类因素控制：一是含水层补给与排泄(Sames等, 2020)，二是可供储水的孔隙空间规模(Hay, 2017)。前者受气候控制。长期尺度上，气候驱动的湿润/干旱格局常由火山过程、大陆重新分布等诱发。例如，中-晚侏罗世东亚显著干旱化事件与大规模真实极移有关(Yi等, 2019)，可能对应地下水储库变化。另有研究提出，代表较短米兰科维奇周期倍周期的长周期天文旋回可能是绝对海平面变化的潜在驱动因子之一(Boulila等, 2018; Haq和Ogg, 2024)。

海平面变化幅度还取决于海平面以上可用于地下水储存的孔隙空间，其受大陆高程分布变化以及大陆冰盖与多年冻土分布范围的影响(Sames等, 2020)。高程分布变化主要与大陆碰撞或裂解有关；冰盖是否存在取决于全球气候条件(Hay等, 2019)。在无大陆冰盖与多年冻土的情况下，大陆地形起伏越大，则含水层充排所需孔隙空间增加越大，反之亦然。我们的结果表明，在约200 Ma冈瓦纳大陆拼合阶段，与其后在温室条件下裂解阶段相比，大陆地下水储存能力显著更高(附图S4)。此外，海平面波动导致被淹没陆地面积变化可能产生正反馈，从而在含水层-绝对海平面模型中放大孔隙空间可用性的作用。

4.3 对温室时期气候模拟的启示

中生代被广泛认为是典型温室期(Takashima等, 2006)。然而，许多中生代古气候数值模拟结果长期难以与化石证据及气候敏感沉积记录相吻合(Hay等, 2019)。近期，对于中白垩世“温暖北极”的问题(寒冷大陆内部悖论“Cold Continental Interior Paradox”)，已有研究通过假设陆地湿地更为广泛(50%–75%)，并将其作为大陆额外温室气体(水汽)来源而得到解释(Hay等, 2019)。我们的结果显示，中生代尤其侏罗纪具有高体量地下水储库。侏罗纪泥炭地广泛分布于北半球中纬度湿润带，这意味着湿地占据面积可能像现代一样远大于泥炭地面积，甚至可达其数倍。广阔湿地将提供大量水汽与甲烷(Sloan等, 1992)，而二者均为重要温室气体，却通常未被数值

气候模型直接考虑。对CO₂之外温室气体的低估，可能解释模拟结果与古生物学及地层记录之间的不一致性。因此，在温室期气候模拟中，需要重新评估大陆水面(湿地等)面积这一边界条件。尤其在海平面较低时，水面面积非常大的时期可能伴随较高地下水储库。更广泛的陆地水面也可能是理解古生物生存环境的关键因素。

5 结论

全球尺度煤的古地理分布能够指示地质历史时期大陆地下水储库的变化。本文利用(1)陆相环境中煤沉积比例，以及(2)煤沉积与古海岸线之间的距离，评估了大陆地下水储库在长期尺度上的变化。大陆水储库与绝对海平面趋势之间，尤其在温室期表现出的强烈反相位关系，可由“多百万年尺度气候驱动地下水-绝对海平面作用”假说加以解释。长期气候变化迫使陆-海水体质量交换的物理机制，可能同时与构造过程和轨道尺度变化有关。本文支持这样一种观点：低频绝对海平面波动可分别通过构造与气候来驱动——前者通过强迫改变洋盆容量，后者通过强迫改变海水体积。我们的发现也可能对未来温室期数值气候模拟与古生物学研究具有重要意义。

致谢 我们衷心感谢William W. HAY教授与Judith Totman PARRISH教授在稿件改进方面付出的努力及提出的建设性意见。

补充材料 补充材料为作者提供的原始数据，作者对其学术质量和内容负责，详见网络版(<http://earthcn.scichina.com>)。

参考文献

- Bao X, Hu Y, Scotese C R, et al. 2023. Quantifying climate conditions for the formation of coals and evaporites. *Natl Sci Rev*, 10: nwad051
- Berendse F, Scheffer M. 2009. The angiosperm radiation revisited, an ecological explanation for Darwin's 'abominable mystery'. *Ecol Lett*, 12: 865–872
- Bohacs K, Suter J. 1997. Sequence stratigraphic distribution of coaly rocks: Fundamental controls and paralic examples. *AAPG Bull*, 81: 1612–1639
- Boucot A J, Xu C, Scotese C R, et al. 2013. Phanerozoic Paleoclimate: An Atlas of Lithologic Indicators of Climate. Tulsa, OK: SEPM (Society for Sedimentary Geology)
- Boulila S, Galbrun B, Miller K G, et al. 2011. On the origin of Cenozoic and Mesozoic “third-order” eustatic sequences. *Earth-Sci Rev*, 109: 94–112
- Boulila S, Laskar J, Haq B U, et al. 2018. Long-term cyclicities in Phanerozoic sea-level sedimentary record and their potential drivers. *Glob Planet Change*, 165: 128–136
- Brikiatis L. 2019. Arido-eustasy: A new example of non-glacial eustatic sea level change. *Gondwana Res*, 70: 25–35
- Cleal C J, Thomas B A. 2005. Palaeozoic tropical rainforests and their effect on global climates: Is the past the key to the present? *Geobiology*, 3: 13–31

- Cogné J P, Humler E. 2008. Global scale patterns of continental fragmentation: Wilson's cycles as a constraint for long-term sea-level changes. *Earth Planet Sci Lett*, 273: 251–259
- Conrad C P. 2013. The solid Earth's influence on sea level. *Geol Soc Am Bull*, 125: 1027–1052
- Crowley T J, Burke K. 1998. *Tectonic Boundary Conditions for Climate Reconstructions*. Oxford: Oxford University Press
- Diessel C F. 2012. *Coal-Bearing Depositional Systems*. Berlin: Springer Sci Business Media
- DiMichele W A, Montañez I P, Poulsen C J, et al. 2009. Climate and vegetational regime shifts in the late Paleozoic ice age earth. *Geobiology*, 7: 200–226
- DiMichele W A, Pfefferkorn H W, Gastaldo R A. 2001. Response of Late Carboniferous and Early Permian plant communities to climate change. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 29: 461–487
- DiMichele W A, Phillips T L. 1996. Clades, ecological amplitudes, and ecomorphs: Phylogenetic effects and persistence of primitive plant communities in the Pennsylvanian-age tropical wetlands. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 127: 83–105
- Fan Y, Li H, Miguez-Macho G. 2013. Global patterns of groundwater table depth. *Science*, 339: 940–943
- Faure K, de Wit M J, Willis J P. 1995. Late Permian global coal hiatus linked to ^{13}C -depleted CO_2 flux into the atmosphere during the final consolidation of Pangea. *Geology*, 23: 507–510
- Flores R M. 2003. Coal and Coalbed Gas: Fueling the Future. American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology 53
- Föllmi K B. 2012. Early Cretaceous life, climate and anoxia. *Cretac Res*, 35: 230–257
- Foster G L, Royer D L, Lunt D J. 2017. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years. *Nat Commun*, 8: 14845
- Gibling M R, Davies N S. 2012. Palaeozoic landscapes shaped by plant evolution. *Nat Geosci*, 5: 99–105
- Gleeson T, Befus K M, Jasechko S, et al. 2016. The global volume and distribution of modern groundwater. *Nat Geosci*, 9: 161–167
- Greb S F, DiMichele W A, Gastaldo R A. 2006. Evolution and importance of wetlands in earth history. Geological Society of America Special Paper, 399: 1–40
- Haq B U. 2014. Cretaceous eustasy revisited. *Glob Planet Change*, 113: 44–58
- Haq B U. 2018. Triassic eustatic variations reexamined. *GSA Today*, 28: 4–9
- Haq B U, Al-Qahtani A M. 2005. Phanerozoic cycles of sea-level change on the Arabian Platform. *GeoArabia*, 10: 127–160
- Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, 235: 1156–1167
- Haq B U, Schutter S R. 2008. A chronology of paleozoic sea-level changes. *Science*, 322: 64–68
- Haq B, Ogg J. 2024. Retraversing the highs and lows of Cenozoic sea levels. *GSA Today*, 34: 4–11
- Hay W W. 2017. Toward understanding Cretaceous climate—An updated review. *Sci China Earth Sci*, 60: 5–19
- Hay W W, DeConto R M, de Boer P, et al. 2019. Possible solutions to several enigmas of Cretaceous climate. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 108: 587–620
- Hay W W, Leslie M A. 1990. Could possible changes in global groundwater reservoir cause eustatic sea-level fluctuations? In: *Sea-Level Change*. Washington, DC: US National Academy Press. 161–170
- Karlsen K S, Conrad C P, Magni V. 2019. Deep water cycling and sea level change since the breakup of Pangea. *Geochem Geophys Geosyst*, 20: 2919–2935
- Laurin J, Barclay R S, Sageman B B, et al. 2019. Terrestrial and marginal-marine record of the mid-Cretaceous Oceanic Anoxic Event 2 (OAE 2): High-resolution framework, carbon isotopes, CO_2 and sea-level change. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 524: 118–136
- Li M, Hinnov L A, Huang C, et al. 2018. Sedimentary noise and sea levels linked to land-ocean water exchange and obliquity forcing. *Nat Commun*, 9: 1004
- Lovell B. 2010. A pulse in the planet: Regional control of high-frequency changes in relative sea level by mantle convection. *J Geol Soc*, 167: 637–648
- Merdith A S, Williams S E, Brune S, et al. 2019. Rift and plate boundary evolution across two supercontinent cycles. *Glob Planet Change*, 173: 1–14
- Miller K G, Kominz M A, Browning J V, et al. 2005. The Phanerozoic record of global sea-level change. *Science*, 310: 1293–1298
- Nelsen M P, DiMichele W A, Peters S E, et al. 2016. Delayed fungal evolution did not cause the Paleozoic peak in coal production. *Proc Natl Acad Sci USA*, 113: 2442–2447
- Parrish J T. 1998. *Interpreting Pre-Quaternary Climate from the Geologic Record*. New York: Columbia University Press
- Peters S E, Husson J M. 2015. Phanerozoic growth of the epicontinental sedimentary reservoir: Implications for long-term sea level change. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*. San Francisco, America. PP33B-2307
- Railsback L B. 1995. Controls on Long-Term Global Rates of Coal Deposition, and the Link Between Eustasy and Global Geochemistry. Dordrecht: Springer Netherlands
- Reager J T, Gardner A S, Famiglietti J S, et al. 2016. A decade of sea level rise slowed by climate-driven hydrology. *Science*, 351: 699–703
- Sames B, Wägreich M, Conrad C P, et al. 2020. Aquifer-eustasy as the main driver of short-term sea-level fluctuations during Cretaceous hothouse climate phases. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 498: 9–38
- Sames B, Wägreich M, Wendler J E, et al. 2016. Review: Short-term sea-level changes in a greenhouse world—A view from the Cretaceous. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 441: 393–411
- Scotese C R. 2008. The PALEOMAP PaleoAtlas for ArcGIS. Volume, 2: Cretaceous paleogeographic and plate tectonic reconstructions: PALEOMAP Proj
- Scotese C R. 2016. PALEOMAP PaleoAtlas for GPlates and the PaleoData Plotter Program, PALEOMAP Proj
- Sloan L C, Walker J C G, Moore Jr T C, et al. 1992. Possible methane-induced polar warming in the early Eocene. *Nature*, 357: 320–322
- Southam J R, Hay W W. 1981. *Global Sedimentary Mass Balance and Sea Level Changes*. New York: Wiley
- Takashima R, Nishi H, Huber B, et al. 2006. Greenhouse world and the Mesozoic ocean. *Oceanography*, 19: 82–92
- Taylor G H, Teichmüller M, Davis A, et al. 1998. *Organic Petrology*. Berlin: Springer Science Business Media
- Trenberth K E. 2011. Changes in precipitation with climate change. *Clim Res*, 47: 123–138
- Wägreich M, Lein R, Sames B. 2014. Eustasy, its controlling factors, and the limno-eustatic hypothesis—Concepts inspired by Eduard Suess. *Austrian J Earth Sci*, 107: 115–131
- Wang M, Chen H, Huang C, et al. 2020. Astronomical forcing and sedimentary noise modeling of lake-level changes in the Paleogene Dongpu Depression of North China. *Earth Planet Sci Lett*, 535: 116116
- Wang M, Li M, Kemp D B, et al. 2022. Sedimentary noise modeling of lake-level change in the Late Triassic Newark Basin of North America. *Glob Planet Change*, 208: 103706
- Wendler J E, Meyers S R, Wendler I, et al. 2014. A million-year-scale astronomical control on Late Cretaceous sea-level. *Newslett Stratigr*, 47: 1–19
- Wendler J E, Wendler I. 2016. What drove sea-level fluctuations during the mid-Cretaceous greenhouse climate? *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 441: 412–419

- Wendler J E, Wendler I, Vogt C, et al. 2016. Link between cyclic eustatic sea-level change and continental weathering: Evidence for aquifer-eustasy in the Cretaceous. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 441: 430–437
- Wei R, Li M, Zhang R, et al. 2023. Obliquity forcing of continental aquifers during the late Paleozoic ice age. *Earth Planet Sci Lett*, 613: 118174
- Wing S L, Boucher L D. 1998. Ecological aspects of the cretaceous flowering plant radiation. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 26: 379–421
- Wu C, Liu C, Yi H, et al. 2017. Mid-Cretaceous desert system in the Simao Basin, southwestern China, and its implications for sea-level change during a greenhouse climate. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 468: 529–544
- Yi Z, Liu Y, Meert J G. 2019. A true polar wander trigger for the Great Jurassic East Asian Aridification. *Geology*, 47: 1112–1116
- Yu Z, Loisel J, Brosseau D P, et al. 2010. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophys Res Lett*, 37: 2010GL043584
- Zaffos A, Finnegan S, Peters S E. 2017. Plate tectonic regulation of global marine animal diversity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 114: 5653–5658
- Zhang Z, Huang Y, Li M, et al. 2022. Obliquity-forced aquifer-eustasy during the Late Cretaceous greenhouse world. *Earth Planet Sci Lett*, 596: 117800
- Ziegler A M, Raymond A L, Gierlowski T C, et al. 1987. Coal, climate and terrestrial productivity: The present and early Cretaceous compared. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 32: 25–49
- Ziegler A M, Eshel G, Rees P M A, et al. 2003. Tracing the tropics across land and sea: Permian to present. *Lethaia*, 36: 227–254

(责任编辑：朱茂炎)