



水循环地质演变研究的重要性

朱茂炎^{1,2†*}, 郭正堂^{2,3†}, 汪品先^{4†}

1. 中国科学院南京地质古生物研究所, 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 南京 210008;

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;

4. 同济大学海洋与地球科学学院, 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: myzhu@nigpas.ac.cn

The importance of studying the geological evolution of water cycle

Maoyan Zhu^{1,2†*}, Zhengtang Guo^{2,3†} & Pinxian Wang^{4†}

¹ State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

² College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

⁴ State Key Laboratory of Marine Geology, School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

† Equally contributed to this work

* Corresponding author, E-mail: myzhu@nigpas.ac.cn

doi: [10.1360/TB-2023-0333](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0333)



朱茂炎

中国科学院南京地质古生物研究所研究员, 所学术委员会主任, 国际地层委员会成冰系分会主席。主要从事早期复杂生命和地球-生命系统演化等方面的研究。曾任国家重点基础研究发展计划(“973”计划)首席科学家, 主持国家科技专项项目, 联合发起并主持国际地质对比计划和国际大陆钻探计划项目等。获中国科学院自然科学特等奖、求是杰出科技成就集体奖, 以及德国哥廷根科学院外籍院士、伦敦地质学会荣誉会士等荣誉。

水是维持地球生物多样性和生态系统健康的根本保障, 更是地球表层系统机体运作的“血液”。当今全球变暖背景下, 与水循环变化密切相关的干旱、森林大火和洪涝等极端灾害天气频发, 以及海平面上升、海洋热浪与酸化等全球性生态危机问题日益突出, 深刻影响了全球生态系统健康和人类社会的可持续发展。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第6次评估报告中, 特别突出了系统性评估气候变化对全球水循环影响的重要性^[1]。毋庸置疑, 水循环是地球系统中的基本过程之一。为此, 由汪品先、郭正堂、焦念志、金之钧、王成善等先生负责、2019年年底立项的国家自然科学基金委员会-中国科学院前沿领域发展战略研究项目“地球系统科学(能源、环境和气候)发展战略研究(2021~2035年)”和中国科学院地学部学科发展战略研究项目“地球科学的转型——向系统科学发展”, 也将“水循环”与“碳循环”、“西太-东亚构造衔接”一起, 作为系列战略研讨的三大主题之一。其中, 以地球系统演化理论为指导, 探索地质时期不同时空尺度和气候背景下的水循环过程和规律, 即“水循环的地质演变”成为“水循环”主题研讨中的专题之一。因为水文循环作为地球系统运作的基本环节, 在前第四纪古气候学研究中未得到应有的重视。

相比现代气候学以蒸发降水的水文循环为主题, 古气候学则以第四纪冰期旋回起家。尽管自20世纪80年代起, 季风被引入第四纪气候研究作为冰期的补充, 却未能撼动冰期旋回在古气候学领域的主导地位。世纪之交, 冰芯气泡



郭正堂

中国科学院地质与地球物理研究所研究员,中国科学院院士,发展中国家科学院院士,国家自然科学基金委员会地球科学部主任,国际第四纪研究联合会副主席。主要从事新生代地质、古气候学、古土壤学与全球变化的研究。曾任国际地圈-生物圈计划过去全球变化科学指导委员会委员、亚澳环球环境大断面项目共同负责人。获国家自然科学基金二等奖、何梁何利科学与技术进步奖、全球变化科学奖等。



汪品先

同济大学教授,中国科学院院士,发展中国家科学院院士。主要从事气候演变和南海地质研究,致力于推进我国深海科学研究和地球系统科学的发展。主持了中国海首次大洋钻探和国家自然科学基金“南海深海过程演变”重大研究计划,提出了气候演变低纬驱动等新观点。获国家自然科学基金、欧洲地学联盟的米兰克维奇奖,以及伦敦地质学会荣誉会士、美国科学促进会会士等荣誉。

和石笋同位素揭示低纬区水文循环不受冰盖调控,推动了近年来晚第四纪水文循环气候学(hydro-climatology)的快速发展,但尚未影响深时地质过程与古气候变化的研究,而且第四纪冰期研究开创的定量古气候学也忽视了低纬过程^[2]。事实上,冰室气候(Ice-House)期占地质历史总时间不超过1/6,显生宙以来,冰室气候期的时间占比仅1/3左右。也就是说,地球历史上以暖室气候(Hot-House)为主,低纬为主的水文循环才是气候演变的主体。因而,古气候学不能只关注冷暖和冰盖,同样应当重视干湿和降水的研究,更要从整个地球历史的宽度,而不只是从晚第四纪以来的几十万年来理解水循环。古气候学不仅应当研究地质时期不同海陆分布和冰盖发育条件下,轨道周期调控低纬水文循环有何不同,同时还要研究地球过程本身驱动水文循环的调控机制。由此可见,聚焦水循环的地质演变,探讨地球不同历史时期古气候演变和水循环过程及其调控机制,是地球系统演变的基本科学问题之一,不仅对揭示地球系统演变规律至关重要,也为科学认识和应对当今全球升温下的水文气候灾害和生态危机提供理论支撑。

在这个共识下,根据战略研讨专家组的要求,经多方组织和筹备,“水循环的地质演变”专题研讨会于2021年10月11日在上海同济大学成功举办,来自国内外13个单位50余人参加了研讨。会议共包括19个主题报告,涉及地质学、海洋科学、地球化学、古生物学、地层学、古气候学等学科。研讨会从现代与晚第四纪水文循环的地质解读、地质历史时期水循环、古气候与水循环的示踪标志和模型等主题切入,围绕地质历史时期水循环过程和机制、古气候与水循环示踪标志、古气候与水循环模拟方法等进行了热烈研讨。鉴于会议讨论的内容和成果丰富,作为地球系统科学发展战略项目的成果之一,我们组织了《科学通报》“水循环的地质演变”专辑,包括12篇文章,涉及今后需要重视与加强的主要科学问题和研究方法。

专辑第一篇综述文章是在“水循环的地质演变”专题研讨会成果的基础上综合而成^[3]。在简要回顾水循环地质演变研究现状的基础上,我们提出了5个重大科学问题应在未来予以重点关注:(1)雪球地球时期的水循环;(2)植被起源和演化对水循环的影响;(3)深时热带辐合带(inter-tropical convergence zone, ITCZ)的演变与水循环;(4)暖室期地下水与海平面变化;(5)深时水循环中的氧同位素示踪。同时,建议了我国未来亟须加强的4个研究方向:(1)深时冰室期向暖室期转变中的水循环;(2)深时水循环与生态系统演变;(3)深时水循环研究方法的发展;(4)深时水循环与长周期地球系统演变的数值模型。

已知第四纪冰期旋回明显受地球轨道周期的控制,因而轨道尺度下的水循环是揭示全球水循环的重要窗口,加强轨道驱动对现代全球水循环的研究对探讨水循环的地质演变至关重要。吴志鹏等人^[4]围绕南北半球海冰和降水对不同外部驱动的响应、热带降水中的半岁差信号和太阳辐射引起的降水突变等科学问题,结合团队近期研究进行了分析总结,并提出一些当前研究中所面临的不足以及未来研究亟须加强的方向。

陆地植被起源和演化如何影响全球水循环及其生态系统无疑是水循环和地球系统演变中的重大事件,专辑中有3篇文章围绕这一科学问题进行了分析总结。其中,薛进庄等人^[5]系统分析了早期维管植物辐射演化对土壤-植物-大气连续体(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)和维管植物型陆-海水文连续

体(land-ocean hydrologic continuum, LOHC)的形成,以及与长时间尺度水-碳循环耦合关系方面的研究进展. 要乐等人^[6]重点围绕泥盆纪-石炭纪陆地植物演化对水循环的影响,分析了其与海洋生态系统,特别是生物礁演替之间的耦合关系和研究中存在的问题. 由于在现代陆地生态系统中占据优势的被子植物在水分运输效率和蒸腾作用能力方面远高于其他现生或已灭绝的植物大类群,为此,史恭乐^[7]针对被子植物演化和水循环这一问题进行了系统阐述,并结合实例,就如何利用被子植物化石重建古降水和古湿度等多个水循环相关的气候指标进行了介绍.

针对地质时期冰室气候下的水循环问题,仲钰天等人^[8]就与第四纪冰期可以比较的晚古生代大冰期碳-水循环研究现状和存在的问题进行了讨论,在指出1~8百万年轨道周期尺度下的冰期-间冰期旋回的同时,认为晚古生代大冰期地球表层系统各个圈层之间的反馈过程都非常复杂,今后需要开展不同复杂程度地球系统模型的模拟工作,以全面揭示晚古生代大冰期碳-水循环关联机制. 针对晚古生代大冰期结束之后至新生代早期温室气候下的水循环问题,宋汉宸等人^[9]聚焦古、中生代之交水循环的一系列重大变化进行了总结,包括全球干旱面积和降雨的变化、超级季风现象和热带辐合带的迁移摆动等,指出这些演变可能是该时期岩石圈、大气圈、水圈与生物圈相互作用的重要体现. 而李明松和张皓天^[10]则从温室期地下水水库与海平面变化关系的角度,提出了天文驱动的大陆地下水活动导致海平面变化这一“海绵大陆假说”,并讨论了该研究方向亟待解决的问题.

水循环地质演变研究需要应用和开发不同的技术手段与方法. 针对地质时期古气候和水循环研究中常应用的氧同位素方法,陈波和朱茂炎^[11]详细评估了成岩蚀变、生命效应、区域性海水同位素组成等不确定性因素对准确重建深时古温度的制约和解决方法,以及应用氧同位素指标开展深时水循环研究中的进展和存在的问题.

同时,专辑还包括两篇古气候和水循环演变如何对生物区系和生态系统产生影响的文章. 其中,邓涛等人^[12]以古生物化石材料为依据,重点总结了新生代温室和冰室两种气候背景下动物区系发生的一系列重大演变. 李树峰等人^[13]则结合古植物、地质学、地球化学等数据开发的古气候模拟方法的应用,针对新生代青藏高原的生长如何对东亚水循环及生态系统产生影响进行了系统总结. 上述两篇文章对预测未来全球气候急剧变化背景下生态系统响应的评估具有重要的参考价值. 最后,针对深时长时间尺度下古气候和地球系统数值模拟存在的问题,张莹刚等人^[14]回顾了COPSE(Carbon-Oxygen-Phosphorus-Sulphur-Evolution)和GEOCARB为代表的早期长时间尺度碳循环箱式模型的不足,对基于COPSE模型结合了FOAM(Fast Ocean-Atmosphere Model)气候模型数据集而发展起来的SCION(Spatial Continuous Integration)地球系统模型的特点和存在问题进行了介绍,并指出了下一步优化和发展的技术路径.

特别指出的是,由于水循环地质演变涉及整个地球演化历史,当前有关早期地球演化和水循环的研究还非常有限,本专辑并未太多涉及前寒武纪水循环研究问题. 同时,受邀参加专题研讨和专辑的作者以活跃在相关研究前沿方向的中青年学术骨干为主,还有众多水循环地质演变中的科学问题和研究方法并未涉及. 本专辑旨在抛砖引玉,不足和错误之处,欢迎读者不吝批评指正. 最后,感谢参与专题研讨的所有同仁和参与专辑写作的全体作者,期望本专辑的出版对我国“水循环地质演变”领域的发展起到推动作用.

参考文献

- 1 Douville H, Raghavan K, Renwick J, et al. Water cycle changes. In: Masson-Delmotte V P, Zhai P, Pirani A, et al., eds. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- 2 Wang P X, Tian J, Huang E Q, et al. *Earth System and Evolution (in Chinese)*. Beijing: Science Press, 2018. 565 [汪品先, 田军, 黄恩清, 等. 地球系统与演变. 北京: 科学出版社, 2018. 565]
- 3 Zhu M Y, Guo Z T, Wang P X. Evolution of water cycle in deep time: Current research status and key questions (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1425–1442 [朱茂炎, 郭正堂, 汪品先. 水循环的地质演变: 研究现状与关键问题. 科学通报, 2023, 68: 1425–1442]
- 4 Wu Z P, Yin Q Z, Liang M Q, et al. Effect of astronomical forcing on the water cycle: Sea ice and precipitation (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1443–1458 [吴志鹏, 尹秋珍, 梁明强, 等. 轨道驱动对高低纬水循环的影响特征: 海冰和降水. 科学通报, 2023, 68: 1443–1458]
- 5 Xue J Z, Li B X, Wang J S, et al. Coupling relationship between radiation of early vascular plants and the long-term water cycle (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1459–1472 [薛进庄, 李炳鑫, 王嘉树, 等. 早期维管植物辐射演化与长时间尺度水循环的耦合关系. 科学通报, 2023, 68: 1459–1472]

- 6 Yao L, Huang P, Chen B. Coupled evolution between plant hydrologic cycle and organic reef from Late Devonian to Mississippian (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1473–1486 [要乐, 黄璞, 陈波. 晚泥盆世-密西西比亚纪植物水循环与海洋生物礁耦合演化. 科学通报, 2023, 68: 1473–1486]
- 7 Shi G L. Evolution of the angiosperms and hydrologic cycle (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1487–1500 [史恭乐. 被子植物演化和水循环. 科学通报, 2023, 68: 1487–1500]
- 8 Zhong Y T, Chen J T, Gao B, et al. Carbon-water cycles during the Late Paleozoic Ice Age: Reviews and prospects (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1544–1556 [钟钰天, 陈吉涛, 高彪, 等. 晚古生代大冰期碳-水循环回顾与展望. 科学通报, 2023, 68: 1544–1556]
- 9 Song H C, Song H J, Zhang Z S, et al. Evolution and driving mechanism of water circulation during the late Paleozoic and early Mesozoic (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1501–1516 [宋汉宸, 宋海军, 张仲石, 等. 古生代-中生代之交水循环演变及驱动机制. 科学通报, 2023, 68: 1501–1516]
- 10 Li M S, Zhang H T, Wang M, et al. Astronomically forced changes in groundwater reservoirs and sea level during the greenhouse world (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1517–1527 [李明松, 张皓天, 王蒙, 等. 天文驱动的温室时期地下水储库与海平面变化. 科学通报, 2023, 68: 1517–1527]
- 11 Chen B, Zhu M Y. Oxygen isotope application in paleotemperature reconstruction and water cycle for the deep time (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1528–1543 [陈波, 朱茂炎. 氧同位素在古温度重建及其水循环研究中的应用. 科学通报, 2023, 68: 1528–1543]
- 12 Deng T, Hou S K, Wu F X. Faunal evolution under the background of the Cenozoic greenhouse and icehouse climate (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1557–1566 [邓涛, 侯素宽, 吴飞翔. 新生代温室和冰室气候背景下动物区系的演变. 科学通报, 2023, 68: 1557–1566]
- 13 Li S F, Zhao J G, Farnsworth A, et al. The growth of the Tibetan Plateau shaped hydrologic cycle and ecosystem in eastern Asia (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1567–1579 [李树峰, 赵佳港, Farnsworth A, 等. 新生代青藏高原生长对东亚水循环及生态系统的影响. 科学通报, 2023, 68: 1567–1579]
- 14 Zhang Y G, Mills B J W, He T C, et al. Simulating the long-term carbon cycle in the Phanerozoic: Current status and future developments (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1580–1592 [张莹刚, Mills B J W, 何天辰, 等. 显生宙长时间尺度碳循环演变的模拟: 现状与展望. 科学通报, 2023, 68: 1580–1592]