

从地球系统圈层互馈与地理综合角度 探讨水循环研究

刘昌明^{1,2,3}, 刘小莽¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 中国科学院遗传与发育生物学研究所
农业资源研究中心, 石家庄 050022)

摘要: 地球是一个由岩石圈、土壤圈、水圈、生物圈、大气圈等层圈组成的系统, 水循环过程是这些圈层间联系的纽带, 维持良性水循环是实现可持续发展的关键所在。水循环不是一个独立的自然过程, 水问题的解决方案往往涉及到地球系统的各个圈层和经济社会的方方面面。本文以森林与水的关系、水循环变化预估、水循环综合研究这3个话题为例, 尝试从地球系统的角度探讨水循环研究。

关键词: 地球系统; 圈层互馈; 水循环过程; 地理综合

DOI: 10.11821/dlxb202307001

1 引言

从深海、深空、深地、地球系统(“三深一系统”)认知地球过去、现在与未来已成为地球科学研究的主旋律^[1]。从地球系统整体出发, 关注地球系统各圈层、各要素之间的相互作用及其对人类社会经济发展的影响研究方兴未艾^[2]。水作为自然界中最活跃、最关键的要素, 水循环过程是地球系统各圈层联系的纽带, 维持良性水循环是实现可持续发展的关键所在^[3]。自工业革命以来, 由于自然和人文因素的双重影响, 全球水循环过程发生了显著变化, 引发了一系列水问题, 对全球水安全和可持续发展带来了挑战^[4]。水问题的解决方案往往远远超出了水问题的自身范畴, 涉及到地球系统的各个圈层和经济社会的方方面面。因此, 有必要将研究角度从水科学拓展到地球系统科学, 探讨水循环过程与水问题解决方案。本文以近年来3个热点的水循环研究话题为例, 尝试从地球系统的角度探讨水循环过程研究, 以供参考。

2 基于圈层互馈来探讨 确切地估计森林的作用

森林(植被)与水的关系研究一直是水文学的热门话题, 甚至可以认为是水文学的永恒话题。国际上, 法国早在19世纪就开展了“森林和水”的科学辩论^[5], 日本在1933—1936年间也开展了森林是否减水的激烈辩论^[6]。在中国, 随着1978年启动“三北防护林”工程的建设, 1981—1982年也发生了一场著名的“林—水关系”辩论。黄秉维以《确切地估计森林的作用》为题, 发文质疑当时的“森林万能”“造林等于修水库”等

收稿日期: 2023-02-14; 修订日期: 2023-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41922050) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41922050]

作者简介: 刘昌明(1934-), 男, 湖南汨罗人, 中国科学院院士, 研究方向为水文学与水资源。E-mail: liucm@igsrr.ac.cn

1593-1598 页

观点，认为增加森林在某些区域可能减小径流和水资源量^[7]。刘昌明等于1978年分析了黄土高原径流试验资料，支持了黄秉维的部分观点，即在黄土高原地区，年径流量随森林覆盖率的增加而下降^[8]。事实上，哪怕经历了超过200年的科学辩论，森林与水的关系至今仍是充满争议的科学问题。2019年*Nature*杂志基于论据不充分和数据不一致撤稿了题为“Global Analysis of Streamflow Response to Forest Management”的科研论文，这也侧面说明森林与水的关系研究仍面临着众多难以解决的问题。区域气候条件、天然林与人工林、森林覆盖度、树龄树种、土壤类型等诸多要素均会影响森林与水的关系。本文无意于、也不能解决森林与水关系的争论，只是想从圈层互馈的角度来思考森林与水的关系。尤其是在中国对“双碳目标”庄严承诺的背景下，未来森林植被覆盖率必将继续增加（通过新增森林来增加碳汇），基于圈层互馈来探讨森林与水的关系尤为重要。

从水文学的角度通常认为森林增加往往会导致蒸发增加，在降水量不变的前提下，根据水量平衡方程，认为径流会相应减少。从气象学的角度来看，地球降水的水汽来源于蒸发，任何蒸发水汽最终会形成降水降落到地球表面，因此森林增加的蒸发会增大某些区域的降水。近年来，随着大尺度森林水文气象研究的深入，国内外学者逐渐注意到植被蒸发会增加下风向的降水，提升水汽内循环速率，进而在一定程度上缓解森林蒸发的减水效应^[9-11]。这些研究提醒水文学者，蒸发既是水资源的“消耗项”，也是降水的“供给项”。在评价森林与水的关系时，需要综合考虑水圈、大气圈、生物圈等圈层的互馈，不能只关注森林蒸发的减水效应，而不考虑森林蒸发的增雨效应。

以黄土高原为例，2001—2020年间黄土高原植被覆盖度显著增加（图1）。基于Penman-Monteith-Leuning蒸发模型计算得出，黄土高原植被覆盖度的增加导致蒸发增加了4.6 mm/a^[12]。基于UTrack降水水汽追踪模型^[13]，本文计算得到黄土高原降水的水汽中有16.6%来源于本地蒸发，黄土高原植被覆盖度增加导致降水增加了1.1 mm/a，这部分增加的降水可以在一定程度上缓解植被覆盖度增加导致部分区域的径流下降。当然，不

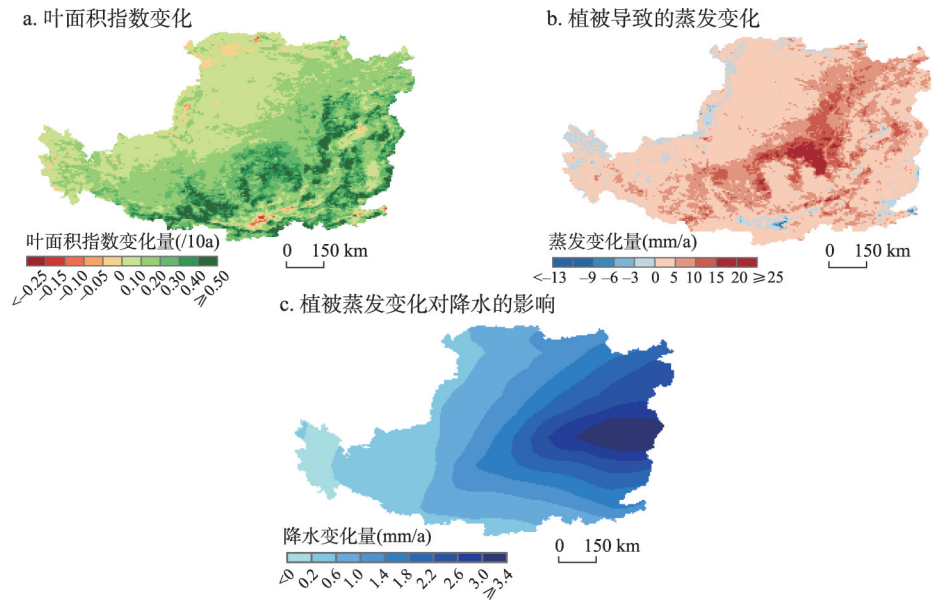


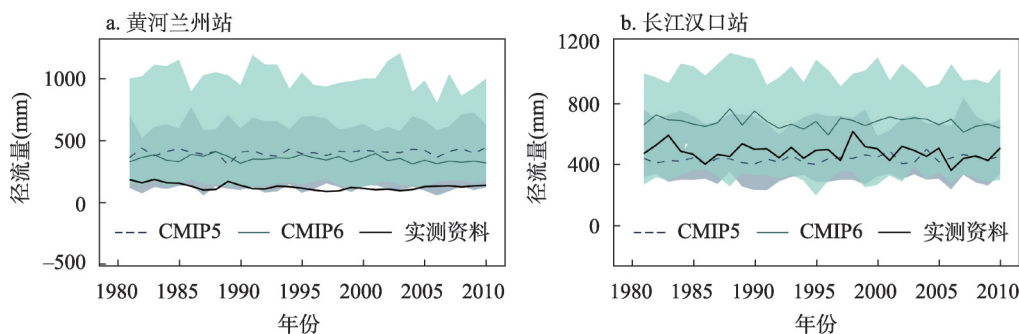
图1 2001—2020年黄土高原植被叶面积指数变化、植被导致的蒸发变化及植被蒸发变化对降水影响
Fig. 1 Changes of leaf area index, evaporation due to vegetation change, and impact of vegetation evaporation changes on precipitation on the Loess Plateau from 2001 to 2020

同模型估算的植被蒸发对降水的影响可能不一致，植被增加引起的降水增加能在多大程度上缓解径流的下降也存在估算结果的差异^[10, 14]。此外，植被涵养水源的能力随时间变化，植被增加对径流的影响具有阶段性。虽然有这些不确定性，但是本文认为在评估森林与水的关系时，需要综合考虑森林蒸发增加的减水效应和增雨效应。

3 地球系统模式与水循环模拟 机理与精度的权衡

地球系统模式（Earth System Model）是理解过去气候与环境演变机理、预估未来全球变化情景的重要工具。地球系统模式是基于气候模型发展而来，早期的气候模型一般包括大气环流过程、陆表物理与水文过程、海洋环流过程等。21世纪以来，随着对全球气候变化研究的不断深入，气候模型逐渐完善，先后融入了大气化学、陆表生态、生物地球化学等过程，发展形成地球系统模式。地球系统模式可以模拟地球系统各圈层中的物理、化学和生物过程、以及它们之间的物质和能量交换。近年来，世界各国纷纷发展了自己的地球系统模式，如美国大气研究中心（National Center for Atmospheric Research, NCAR）研制的地球系统模式（Community Earth System Model, CESM），中国科学院大气物理研究所牵头研发的地球系统模式（Chinese Academy of Sciences Earth System Model, CAS-ESM）等。

水循环过程是连接地球系统多个圈层相互作用的纽带，大部分地球系统模式都模拟了水在大气圈、土壤圈、生物圈等圈层中的运动。因此，地球系统模式一般都输出了土壤蒸发、植被蒸腾、土壤水、地表径流、地下径流等水循环主要要素。由于地球系统模式不是专门针对水循环过程的模拟而研发的，它需要协调兼顾和综合模拟地球系统的各个过程，因此地球系统模式简化了水循环过程模拟，导致水循环要素模拟精度往往偏低。以径流模拟为例，图2展示了第五次和第六次国际耦合模式比较计划（Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 and 6, CMIP5 和 CMIP6）地球系统模式模拟的黄河兰州站和长江汉口站的历史径流过程线，可以看出无论是径流的均值和年际波动均与观测值相差较大。此外，大部分地球系统模式未考虑人类取用水活动对水循环过程的影响。英国气象局哈德雷中心（Hadley Centre）研发的 HadCM 模式（Hadley Centre



注：黑色实线为径流观测值，蓝色虚线和实线分别为CMIP5和CMIP6地球系统模式径流模拟的集合平均值；
浅色和深色阴影分别为CMIP5和CMIP6不同地球系统模式模拟的径流范围。

图2 黄河和长江水文站年径流模拟值与观测值比较

Fig. 2 Comparison of simulated and observed annual runoff values at typical hydrological stations of the Yellow River and Yangtze River

Coupled Model) 最早植入较为简单的取用水活动模块, 模拟灌溉对大气圈的反馈过程, 但总体而言, 地球系统模式对水循环部分的模拟依然较为简略。

相比地球系统模式, 水文模型模拟的径流等水循环要素的精度明显要高很多。水文模型精度高的原因之一是模型的参数优化, 即水文模型一般根据观测的水文要素来优化模型参数, 提高水文要素的模拟精度。需要注意的是, 基于历史水文资料优化的模型参数不一定适用于未来水文预测, 因为气候变化会改变水文气候要素间的响应关系。因此, 在预测未来水文变化时, 需要修改水文模型参数, 而往往不知道应该如何修改。随之而来的问题是, 当水文模型和地球系统模式预估的未来径流变化趋势相差较大时, 相信哪种模型的结果? 从机理上看, 地球系统众多过程“牵一发而动全身”, 径流未来变化趋势受大气圈、生物圈、土壤圈等多圈层相互作用的影响, 预测未来径流变化应该采用地球系统模式(Online 模式), 而不应采用水文模型(Offline 模式), 毕竟水文模型不能模拟圈层互馈对径流的影响。从精度上看, 地球系统模式对历史径流的模拟精度确实较差, 径流甚至只是部分地球系统模式的副产品(Byproduct), 地球系统模式更多关注的是气温和降水等要素的变化预估, 水文模型重点关注径流等水文要素的模拟与预估。水资源的规划和水利工程的设计往往需要考虑径流等水文要素的未来变化趋势, 如何兼顾水文变化预测的机理与精度? 本文认为这需要水文学者深度参与地球系统模式的研发, 重视水圈与其他圈层相互作用的过程与机制, 在细致分解的基础上完善地球系统模式的架构, 不断提高地球系统模式的水循环模拟精度。毕竟水循环过程不是一个独立的自然过程, 需要基于地球系统来预估未来的水文变化趋势。

4 面向联合国可持续发展目标与未来地球计划的水循环综合研究

联合国可持续发展目标(Sustainable Development Goals)是联合国于2015年制定的17个全球发展目标, 旨在从2015年到2030年间以综合方式解决社会、经济和环境3个维度的发展问题, 转向可持续发展道路^[15]。这17个发展目标包括“清洁饮水”“消除饥饿”“清洁能源”“陆地生态”等多个直接或间接与水密切相关的议题。此外, 为应对全球变化给区域、国家和社会带来的挑战, 加强自然科学与社会科学的沟通与合作, 为全球可持续发展提供理论知识、研究手段和实现方法, 由国际科学理事会和国际社会科学理事会牵头发起的“未来地球计划(Future Earth)”(2014—2023)也将水问题作为重要议题。人类经济社会可持续发展离不开水问题的妥善解决, 水循环研究是支撑水安全的科学基础。

20世纪60年代, 黄秉维等地理学者提出水循环研究需要“大搞水平衡、攻克蒸发关”, 倡导建立观测台站开展水循环实验研究, 更多的是从自然科学角度研究水循环。进入21世纪, 全球人口急剧增加, 经济社会快速发展, 人类活动对水循环的干预和影响不断增强。例如, 大型水库建设、灌溉面积扩张、淤地坝和梯田等大型水保工程建设、城市化等显著影响了水循环过程, 随之而来的水问题往往涉及自然科学与社会科学。因此, 水循环研究需要基于地理学综合性的研究特点, 从自然地理与人文地理等多个方面探索水资源如何支撑人类经济社会的可持续发展。正如2023年1月创刊的*Nature Water*期刊目标: 旨在成为研究水资源和社会间演化关系的专业期刊^[16], 全球水问题的解决离不开社会科学。

从自然科学与社会科学综合的角度来看, 降水、蒸发、径流等水循环要素的研究不是水循环研究的终点, 而只是水循环研究的起点, 基于自然和人文的水循环综合研究应

该成为“人类世”水循环研究的重点内容。近年来,已有一些研究初步从自然和人文两方面探索了水循环综合研究。例如,Yu等估算英格兰地区不同重现期的城市洪涝积水深度,进而探讨积水深度对消防车与救护车到达社区救援时间的影响,建议制定更加公平、可靠和韧性的城市洪涝应急救援方案^[17]。Naumann等揭示欧洲干旱事件的演变规律,进而评估干旱对欧洲经济损失的影响,呼吁如果不采取气候行动,欧洲经济损失将由现阶段的年均90亿欧元增加到21世纪后半叶的年均超650亿欧元^[18]。这些研究案例探索了水循环变化的自然规律和社会影响两个方面,研究结果有望直接支撑政府组织的相关决策。相信未来会有越来越多的基于自然科学与社会科学综合角度的水循环研究,为人类社会的可持续发展提供科学支持。

5 展望

地球系统科学作为一门学科,经历了20世纪70年代前的萌芽阶段、80年代的学科建立、21世纪初的走向全球、2015年后的当代发展4个阶段;形成了观测与实验、地球系统模拟、评估与综合等研究方法;催生了人类世、行星边界框架等新认知^[2]。1998年陈述彭主编出版了《地球系统科学:中国进展·世纪展望》,推动了中国的地球系统科学研究^[19]。本文从地球系统科学的角度探讨水循环过程研究,尚有诸多不成熟之处,如:由于对土壤学和生态学知识储备的不足,没有从气圈—土圈—水圈—生物圈相互作用探讨森林与水的关系,只从水圈和气圈相互作用探讨了森林与水的关系;由于没有实际参与地球系统模式的研究,对地球系统模式诸多细节了解不深入、不全面,可能存在认知上的不足;由于缺乏社会学、经济学等人文学科背景,关于面向联合国可持续发展目标与未来地球计划的水循环综合研究的探索目前只是浮于表面。未来需要通过学习多学科的知识,来提升对这些水循环问题的理解与认知。此外,还有众多的水循环研究问题需要学者跳出传统的水文学视角,从地球系统的角度去思考。如,考虑水循环演变特征的水资源供需预测、“双碳目标”下的水碳协同管理、气候和国际局势变化下的跨国河流冲突与合作问题、水—能源—粮食安全问题等。面向“人类世”的可持续发展目标和“宜居地球”建设,需要“积极拥抱地球系统,综合探索水文循环”。

参考文献(References)

- [1] Zhu Rixiang, Hou Zengqian, Guo Zhengtang, et al. Summary of "the past, present and future of the habitable earth: Development strategy of earth science". Chinese Science Bulletin, 2021, 66(35): 4485-4490. [朱日祥, 侯增谦, 郭正堂, 等. 宜居地球的过去、现在与未来: 地球科学发展战略概要. 科学通报, 2021, 66(35): 4485-4490.]
- [2] Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. The emergence and evolution of Earth System Science. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(1): 54-63.
- [3] Liu Changming. Enhancing the observational study of the coupling effect of water on natural resource elements and exploring the unified management of the life community of mountains, waters, forests, farmland, lakes and grassland. Geological Survey of China, 2021, 8(2): 1-3. [刘昌明. 加强水在自然资源要素耦合作用中的观测研究: 探究山水林田湖草生命共同体统一管理. 中国地质调查, 2021, 8(2): 1-3.]
- [4] Abbott B W, Bishop K, Zarnetske J P, et al. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. Nature Geoscience, 2019, 12(7): 533-540.
- [5] Andréassian V. Waters and forests: From historical controversy to scientific debate. Journal of Hydrology, 2004, 291(1/2): 1-27.
- [6] Yang Haijun, Yu Xinxiao. Forest hydrological research and development in Japan. Journal of Beijing Forestry University, 1992, 14(1): 98-104. [杨海军, 余新晓. 日本森林水文研究与发展. 北京林业大学学报, 1992, 14(1): 98-104.]

- [7] Huang Bingwei. Exact assessment of the role of forests. *Geographical Knowledge*, 1981(1): 1-3. [黄秉维. 确切地估计森林的作用. *地理知识*, 1981(1): 1-3.]
- [8] Liu Changming, Zhong Junxiang. The influence of forest cover upon annual runoff in the Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 1978, 33(2): 112-127. [刘昌明, 钟骏襄. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析. *地理学报*, 1978, 33(2): 112-127.]
- [9] Ellison D, Futter M N, Bishop K. On the forest cover-water yield debate: From demand- to supply-side thinking. *Global Change Biology*, 2012, 18(3): 806-820.
- [10] Zhang B, Tian L, Yang Y T, et al. Revegetation does not decrease water yield in the Loess Plateau of China. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(9): e2022GL098025. DOI: 10.1029/2022GL098025.
- [11] van Dijke A J H, Herold M, Mallick K, et al. Shifts in regional water availability due to global tree restoration. *Nature Geoscience*, 2022, 15(5): 363-368.
- [12] Bai P, Liu X M, Zhang Y Q, et al. Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China. *Water Resources Research*, 2020, 56(10): e2019WR027019. DOI: 10.1029/2019WR027019.
- [13] Tuinenburg O A, Theeuwes J J E, Staal A. High-resolution global atmospheric moisture connections from evaporation to precipitation. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 3177-3188.
- [14] Cui J P, Lian X, Huntingford C, et al. Global water availability boosted by vegetation-driven changes in atmospheric moisture transport. *Nature Geoscience*, 2022, 15(12): 982-988.
- [15] UNDP. Sustainable developments goals. 2015. <http://www.undp.org/content/undp/en/home/sdgoverview/post-2015-development-agenda/goal-13.html>.
- [16] Nature Water Editorial Board. A journal for all water-related research. *Nature Water*, 2023, 1(1). DOI: 10.1038/s44221-023-00026-3.
- [17] Yu D P, Yin J, Wilby R L, et al. Disruption of emergency response to vulnerable populations during floods. *Nature Sustainability*, 2020, 3(9): 728-736.
- [18] Naumann G, Cammalleri C, Mentaschi L, et al. Increased economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming. *Nature Climate Change*, 2021, 11(6): 485-491.
- [19] Chen Shupeng. *Earth System Science: The Progress of China and Prospect of Century*. Beijing: China Science and Technology Press, 1998. [陈述彭. *地球系统科学: 中国进展·世纪展望*. 北京: 中国科学技术出版社, 1998.]

Water cycle research from the perspective of earth system's sphere feedback and geographic synthesis

LIU Changming^{1,2,3}, LIU Xiaomang¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, CAS, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract: The earth is a system consisting of lithosphere, hydrosphere, pedosphere, biosphere, and atmosphere, and the water cycle process is the link between these spheres. Maintaining a healthy water cycle is key to achieving sustainable development. The water cycle is not an independent natural process, and solutions to water problems associated with the water cycle typically involve all spheres of the earth system and all aspects of the economy and society. In this study, we discuss the water cycle research from the perspective of the earth system, taking the three topics of forest-water relationship, water cycle change prediction, and comprehensive water cycle research as examples, for the reference of water science colleagues.

Keywords: earth system; sphere feedback; water cycle; geographic synthesis