

人类活动对全球淡水循环影响与水行星边界评估研究进展

杨建锋, 左力艳, 姚晓峰, 马 腾

Research progress of the anthropogenic influences on global freshwater cycle and the water planetary boundary assessment

YANG Jianfeng, ZUO Liyan, YAO Xiaofeng, and MA Teng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109051>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析

Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed

闫柏琨, 李文鹏, 甘甫平, 郑跃军, 祁晓凡, 白娟, 郭艺, 吴艳红, 王龙凤, 马燕妮 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 44–56

冻融循环作用下花岗岩损伤的宏微观尺度研究

A study of granite damage in the macro and microscopic scales under freezing–thawing cycles

戚利荣, 王家鼎, 张登飞, 张永双, 李贞孝, 孙嘉兴, 马剑飞 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 65–73

新疆准东地区场地尺度二氧化碳地质封存联合深部咸水开采潜力评估

A study of the potential of field-scale of CO₂ geological storage and enhanced water recovery in the eastern Junggar area of Xinjiang

马鑫, 李旭峰, 文冬光, 罗兴旺, 刁玉杰, 杨国栋, 尹书郭, 曹伟 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 196–205

蒸散发水源组成与测定方法研究进展

A review of the advances in water source composition and observation methods of evapotranspiration

王周锋, 王文科, 李俊亭 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 1–9

地下水氮循环与砷迁移转化耦合的研究现状和趋势

Research status and trend of coupling between nitrogen cycle and arsenic migration and transformation in groundwater systems

郭华明, 高志鹏, 修伟 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 153–163

一种可增加海岛地下淡水资源储量的方法研究

A method for improving the fresh groundwater storage of oceanic islands

马婧, 鲁春辉, 吴吉春, 罗剑 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 1–7



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109051

杨建锋, 左力艳, 姚晓峰, 等. 人类活动对全球淡水循环影响与水行星边界评估研究进展 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 1-9.

YANG Jianfeng, ZUO Liyan, YAO Xiaofeng, *et al.* Research progress of the anthropogenic influences on global freshwater cycle and the water planetary boundary assessment[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 1-9.

人类活动对全球淡水循环影响与水行星边界评估 研究进展

杨建锋, 左力艳, 姚晓峰, 马 腾
(中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘要: 近几十年来, 人类活动对淡水循环的影响已经超出了流域尺度。解决目前所面临的水资源问题, 不应只着眼于流域过程, 而应从更大的空间尺度——全球尺度对地球系统过程加以研究。文章总结了人类活动对全球淡水循环的影响途径, 论述了水行星边界方法框架与研究进展, 分析了淡水利用管理从流域尺度到全球尺度的实现方法。水行星边界方法以地球系统科学理论为指导, 以保持地球系统稳定运行为目标, 将淡水循环研究视野从流域尺度扩展至全球尺度, 定量描述了全球淡水利用安全运行空间, 成为评价全球水资源可持续性的重要方法。水资源管理既要考虑流域尺度的水资源、生态与经济社会发展关系, 也要考虑全球尺度的水循环、地球系统稳定与全球可持续发展关系。水行星边界是对现有区域水资源承载能力评价方法的重要补充, 为全球与区域淡水资源治理提供了重要的方法框架。根据我国自然资源管理新制度下水资源管理需要, 针对水行星边界评估, 建议加强全球淡水循环过程研究, 完善全球水文模型与模拟预测平台; 加强水行星边界与土地、生物、大气等其他行星边界的相互影响与作用研究; 探索应用水行星边界框架完善资源环境承载能力评价和国土空间开发适宜性评价方法。

关键词: 地球系统; 淡水循环; 水行星边界; 区域尺度; 全球尺度

中图分类号: P339;P641

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0001-09

Research progress of the anthropogenic influences on global freshwater cycle and the water planetary boundary assessment

YANG Jianfeng, ZUO Liyan, YAO Xiaofeng, MA Teng
(Development Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: In recent decades, the effect of human activities on freshwater cycle transgressed the catchment scale. In order to solve the global and regional water problems effectively, a new framework is needed to transform from the traditional hydrology which focuses on catchment processes to the global-scale hydrology which focuses on the earth system processes. Based on the recent progress of global hydrology, this paper summarizes the patterns of anthropogenic effect on global freshwater cycle, reviews the framework of Planetary Boundaries for Water (PBW) and the research progress, and analyzes the possible approaches of freshwater management from the catchment scale to the global scale. Directed by the Earth system science, PBW pushes forward water cycle research to the global scale from the local and catchment scale, and evaluates the safe operating space of global

收稿日期: 2021-09-15; 修订日期: 2021-10-18

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190669)

第一作者: 杨建锋(1971-), 男, 理学博士, 研究员, 主要从事水文地质环境地质战略研究。E-mail: jf.yang@sohu.com

freshwater use, with the aim to maintain the functions of the Earth system. The framework provides an important merit to evaluate the global sustainability of water resources. Water management should not only balance off the relations of water resources, ecological environment and socio-economic development locally, but also the relations of water cycle, Earth system functions and global sustainability. PBW is an important supplement to the watershed or aquifer management, and puts forward a new framework for the global and regional water management. In order to meet the demand of water management under the new system of natural resources management in China, the study of PBW should focus on the following aspects: to establish global hydrological models and simulation and prediction platform on the basis of better understanding of global water cycle; to advance the study of relations between PBW and other planetary boundaries such as land use, biodiversity, and atmospheric CO₂; to improve the double evaluation approaches (resource and environment carrying capacity, territorial development suitability) for territorial spatial planning with the framework of PBW.

Keywords: Earth system; freshwater cycle; planetary boundary for water; regional scale; global scale

淡水是保障一个国家或地区经济社会发展的基础性自然资源,同时也是维持地球系统稳定运行的关键地球生物物理要素。由于流域是天然的集水区域,流域之间一般被认为不存在水流联系,现代水资源调查监测、开发利用和管理保护通常以流域为单元实施^[1]。流域综合管理成为世界各国普遍推行的水资源管理解决方式^[2-3]。随着全球气候变化日趋严峻和全球化、区域经济一体化程度不断加深,越来越多的人认识到:一方面全球变化对流域尺度的水循环产生了明显的影响^[4-5],另一方面人类活动对水循环的影响已经超出了流域尺度,最大可能达到了全球尺度。早在 1986 年,美国著名水文学家 Eagleson 就意识到人类活动对土地覆被的改变会显著影响地表能量与水平衡,从而影响区域气候与陆地径流^[6]。近年的研究证实了这一判断,地球系统过程会对流域水循环产生影响,反过来流域水循环变化也会对地球系统过程产生影响。解决当今世界各国所面临的水资源问题,不应只着眼于流域过程,而应从更大的空间尺度——全球尺度对地球系统过程加以研究。在这一需求的推动下,水资源调查监测、开发利用与管理保护的基础理论正在从以流域过程为核心的传统水文科学向以地球系统过程为核心的全球尺度水文科学转变^[7]。

淡水循环是地球系统过程的重要组成,与气候变化、生物变化等过程共同决定着地球系统的功能与运行状态。由于淡水在维持地球生物圈完整性、调控气候变化、调节碳与养分循环等方面具有不可替代的主导作用,淡水循环变化会促使其他地球系统过程发生变化,从而影响地球系统的整体功能与状态。20 世纪 50 年代以来,在全球快速工业化、城市化等人类活动作用下,气候变化、生物圈完整性、淡水循环、土地

系统等地球系统过程发生了重大变化,使地球系统驶离了稳定、宜居的全新世,进入了自然条件有劣化倾向的人类世^[8]。以维持地球系统稳定运行为目的, Rockström 等^[9]提出了行星边界方法,针对关键地球系统过程从全球尺度量化了 CO₂ 排放、淡水利用、土地利用等人类活动的安全边界,明确了人类活动的安全运行空间。针对淡水循环,水行星边界方法以地球系统科学理论为指导,基于地球系统过程确定了全球水资源利用是否可持续的度量指标,为全球与各国水资源治理指明了方向。该方法一经问世,就成为地球系统科学的研究热点,得到了水资源管理者的重视和关注^[10]。

行星边界方法不仅将淡水循环研究视野从流域尺度扩展至全球尺度,更是促进了认知理念与思维方式的跃升,必将对水资源调查监测、开发利用与管理保护产生深远的影响。本文在梳理人类活动对地球系统淡水循环影响的基础上,论述了水行星边界方法框架与研究进展,总结了淡水利用管理从流域尺度到全球尺度的实现途径,以期为我国自然资源管理新制度下水资源管理提供参考。

1 人类活动对地球系统淡水循环的影响

人类活动已成为驱动地球系统变化的主要力量,引起淡水循环及其相互作用过程发生改变^[11]。人类活动从直接作用于局地或流域过程出发,不同地区、不同流域、不同作用相互叠加,从而对更大尺度的淡水循环过程产生影响。按照作用方式,人类活动对全球尺度淡水循环的影响可分为 3 个方面:水利工程建设的影响,土地利用与覆被变化的影响,虚拟水贸易的影响。

1.1 水利工程建设的影响

为了满足农业灌溉、城市供水、洪灾防治、水力发电等需要,世界各国修建了大量的水利工程,包括水库、调水工程、地下水井等。根据国际大坝委员会(ICOLD)数据库^[12],1900—2010年全球共建成坝高15 m以上水库29 484座,累计水库库容达8 300 km³;20世纪50—80年代是水库建设的高峰期,20世纪80年代之后特别是21世纪以来,随着各国对生态环境保护的重视,新建水库数量明显减少(图1)。统计表明全球有59%的大江大河流域受到了大坝建设活动的影响,影响范围占流域总面积的88%,在未受影响的流域中仍有部分河流在规划建设大坝^[13]。每年由大坝截留的河流排泄量达16 000 km³,相当于河流入海径流量的40%^[14]。

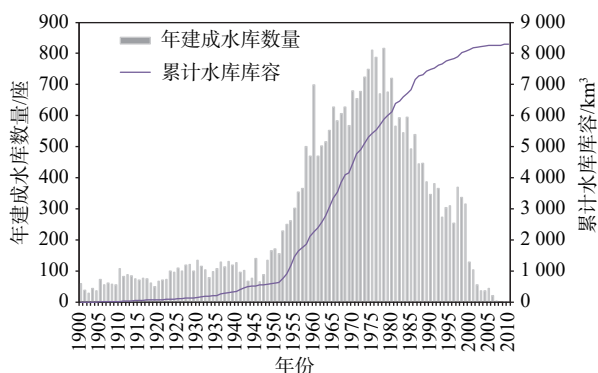


图1 1900—2010年全球年度建成水库数量与累计水库库容

Fig. 1 Global annual completed reservoirs and cumulative reservoir capacity from 1900 to 2010

注:数据来源为国际大坝委员会(ICOLD)世界注册大坝数据库^[12]。

大量水利工程建设和水资源开发显著改变了局地流域水循环,并通过陆地—大气过程改变了全球尺度的水循环过程。Cooley等^[15]利用美国国家航空航天局(NASA)ICESat-2卫星对全球227 386个地表水体水位与蓄水量变化进行了监测。结果表明:虽然由人类管控的水库数量仅占地表水体数量的3.9%,但是其蓄水量变化占有地表水体蓄水量变化的57%;人类管控的水库季节性水位变化平均为0.86 m,而自然湖泊、池塘等地表水体季节性水位变化平均为0.22 m。人类对水利工程的调控已成为全球地表水储量发生变化的主要原因。Jaramillo等^[16]对全球大型河流域的水文气象观测数据分析发现:水利工程建设与农田灌溉使得全球陆面蒸腾蒸发量明显增加,每年增加的蒸腾蒸发量约为3 563 km³。水库等水利工程设施的建设增加了地表水进入大气的水流,使得陆地水资

源损失量增加。Chao等^[12]估算了截至2007年全球已建成的水库蓄水量达10 800 km³,致使过去半个世纪全球海平面平均每年下降0.55 mm。Wada等^[17]基于地下水消耗量估算得出,由于地下水消耗量持续增加,地下水开采致使全球海平面上升由1900年的0.035 mm增至2010年的0.57 mm。Keune等^[18]采用陆地系统模型TerrySysMP对欧洲陆地水循环进行模拟,结果显示地下水开采与农田灌溉改变了大气水汽运移和陆地降水量与蒸发量平衡,南欧地区呈现干旱化趋势。

1.2 土地利用与覆被变化的影响

在农业发展与工业化、城市化驱动下,全球土地利用与覆被发生了重大变化。1901—2015年,总的趋势是拓荒草原与森林扩展农业用地,开发农业用地扩展城市和基础设施建设用地,森林、草原、湿地等面积不断萎缩;全球近50%的陆地表面发生了改变,原来的自然生物群落转变为城市、农田、草场等人工生态系统^[19]。1901—2015年,农业用地占全球土地面积的比例由20.6%增至38.0%。1901—1960年,森林面积年均减少0.18%;1960年以后,年均减少0.10%^[20]。联合国粮农组织(FAO)估计,目前城市面积以20×10⁶ hm²/a的速度扩展,80%的土地来自于农业用地^[21]。

土地利用与覆被变化改变了地表能量平衡与水平衡,从而对全球尺度水循环产生影响。大气水汽运移研究表明,全球陆地降水量约40%源于陆地蒸腾蒸发量,水汽在大气中的平均运移距离为500~5 000 km^[22]。土地利用与覆被变化通过改变热力层、陆地水分运移等陆地—大气作用过程,对降水和河流径流产生影响,并且影响会超出流域范围。研究发现部分大型河流盆地(如亚马逊流域),流域外土地利用变化对降水的影响明显大于流域内土地利用变化的影响^[23]。Gordon等^[24]分析1780—1980年200年间澳大利亚土地覆被变化表明,由于发展农业和畜牧业导致森林被大规模砍伐,澳洲陆地蒸腾蒸发量下降10%,相当于340 km³的水量。Gordon等^[25]采用全球网格模型估算表明由于森林采伐全球陆地蒸腾蒸发量下降约4%,相当于3 000 km³的水量。

1.3 虚拟水贸易的影响

虚拟水是指产品或服务在原产地消耗并通过贸易以嵌入方式输送到另一地区的淡水^[26]。例如,生产粮食、水果等农产品需要消耗大量的水资源,缺水地区通过进口这些农产品,相当于进口了大量的水资源,这些水资源不是以实体形式而是以嵌入到农产品的虚拟方式而存在。虚拟水的流入有助于缓解缺水

地区的水资源紧张状况^[27]。经济全球化促使水资源配置全球化,水资源在转化为产品或服务之后在全球范围内流动^[28]。不同国家、不同区域间的耗水性产品或服务贸易,使得虚拟水超出原产地跨越不同流域在全球流动,对全球水循环和水平衡产生影响。

Hoekstra 等^[29]对 1996—2005 年全球农业与工业产品贸易引起的虚拟水流动进行估算。结果表明:全球虚拟水贸易量达 $2\,320\text{ km}^3$, 占全球水资源消费量的 25.5%; 主要的虚拟水净流出地区有北美与南美(美国、加拿大、巴西、阿根廷)、南亚(印度、巴基斯坦、印尼、泰国)、澳洲等地区,主要的虚拟水净流入地区有北非、中东、墨西哥、欧洲、日本、韩国等。Serrano 等^[30]对欧盟虚拟水进行了估算,表明 2009 年欧盟虚拟水进口量达 585 km^3 , 占全球虚拟水贸易量的 28%; 南欧和东欧国家由于发展耗水农业成为欧盟主要的虚拟水出口国,致使其缺水问题突出。Zhao 等^[31]对我国工程调水与虚拟水流量进行了估算,发现工程调水量占全国供水量的 4.5%, 而虚拟水流量占全国供水量的 35%, 工程调水和虚拟水均加剧了水资源流出地区的水压力。

2 淡水利用安全运行空间评估的水行星边界框架

2.1 基本框架

行星边界理论认为,包括淡水循环、气候变化、生物变化等在内的 9 个关键生物物理过程共同控制着地球系统运行状态^[9]。在人类活动作用下,相应的生物物理过程会发生变化。如果人类活动在地球系统弹性范围内,这一变化将不会影响全新世以来地球系统稳定、宜居的运行状态;当人类活动超过某一临界点时,相应的生物物理过程会发生不可逆变化,目前地球系统稳定、宜居的运行状态将会明显改变,从而危及人类的生存与发展。对于某一控制变量,行星边界被置于临界点之前,当控制变量小于行星边界时,人类活动就处在安全运行空间(Safe Operating Space, SOS);超过行星边界,人类所面临的地球系统风险会上升;超过临界点,人类经济社会将处在高风险区,甚或面临崩溃的可能(图 2)^[32-33]。行星边界与临界点之间不确定区的划定主要考虑 2 方面原因:一是考虑到临界点确定存在着很大的不确定性,二是为人类应对可能的突变留出响应的时间。

水在陆地、大气、海洋之间相互作用构成了全球复杂的水文循环。在陆地赋存和流动的水流可分为

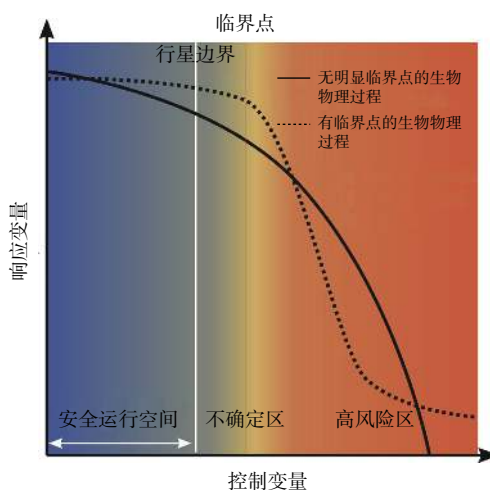


图 2 地球系统行星边界示意图^[33]

Fig. 2 Planetary boundaries of the Earth system^[33]

2 类: 蓝水和绿水。蓝水是指赋存于河流、湖泊中的地表水和赋存于含水介质中的地下水,用来维持水生生态系统、农业灌溉供水、人类生活与工农业生产供水等;绿水是指赋存于土壤中的水分,这部分水不形成径流,最终通过蒸腾蒸发进入大气中,用来维持陆地生态系统服务和调控陆地一大气水平衡。蓝水和绿水相互联系、相互交织,共同决定着全球水文循环的稳定性。人类活动通过 2 种方式威胁全球淡水系统的稳定性:一是通过影响降水和土壤水分引起绿水水流状态转变,二是通过开发利用蓝水引起水循环变化^[34]。水行星边界方法选取与人类对绿水、蓝水作用相关的指标作为控制变量,用以确定淡水利用 SOS。

2.2 水行星边界方法改进与发展

在最初提出行星边界框架时, Rockström 等^[34]采用“消耗性蓝水用水量”作为控制变量。消耗性蓝水用水量是指被开发利用且不返回到地表水体的用水量。从全球可利用蓝水资源量中扣除 60% 的环境需水量,从而获得水的行星边界为 $4\,000\text{ km}^3/\text{a}$ 。现状消耗性蓝水用水量为 $2\,600\text{ km}^3/\text{a}$, 表明人类活动尚未超过水行星边界,仍处于淡水利用 SOS。水行星边界的这一估算方法引起了很多争议和质疑。Molden^[35]认为该方法忽视了水资源分布与利用存在着巨大的空间与时间变异,对复杂的全球淡水系统而言过于简化和粗略; Bogardi 等^[10]认为由于未考虑人类活动对水质的影响和技术进步、管理措施的影响,限制了水行星边界的应用; Gleeson 等^[32]认为该方法没有充分考虑水在地球系统中的作用,难以全面反映人类活动对淡水循环的影响。尽管存在争议,多数科学家认为该方法从全球尺度衡量淡水资源利用的可

持续性,具有重要的学术与应用价值。

为了考虑水资源分布的时空变异, Gerten 等^[36]采用全球水文模型分区域计算环境需水量,从全球可利用蓝水资源量中扣除分区域环境需水量之和,获得水的行星边界为 $2\,800\text{ km}^3/\text{a}$ 。利用全球植被与水平衡模型 LPJmL^[37],按照 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 的网格,估算不同地区的环境需水量,考虑了不同地区因地理、生态、水文等自然条件差异造成的环境需水量变异,克服了 Rockström 等^[34]按照固定比例估算环境需水量方法的缺陷。

Rockström 等^[38]也意识到了单一采用消耗性蓝水用水量的局限性,并试图增加流域控制变量来弥补。Steffen 等^[39]对 Rockström 等^[34]提出的行星边界方法进行了拓展。在保留全球尺度水行星边界的同时,增加了流域尺度的控制变量:蓝水取水量占河流月平均流量百分比。该方法基于河流月平均流量,将全年划分为枯水期、平水期和丰水期,不同时期维持河流生态系统所需要的环境水流不同^[40]。在考虑环境需水量的前提下,枯水期流域尺度的边界为 25%,不确定区(风险上升区)为 25%~55%;平水期边界为 40%,不确定区为 40%~70%;丰水期边界为 55%,不确定区为 55%~85%。

Hogeboom 等^[41]探索采用水足迹方法估算水行星边界,全球所有河流盆地的允许最大蓝水足迹之和即是水行星边界。水足迹是指消费者在消费过程中所消耗的水资源量,有别于传统的取水量指标,水足迹包括消费者的直接用水、间接用水,但不包括消费过程中返回到取水所在流域的水量^[42]。Hogeboom 等^[41]采用全球水文模型和环境需水量模型估算了全球所有河流盆地的月度蓝水径流量、月度可利用蓝水资源量和月度环境需水量,基于满足生态环境用水的不同保证程度估算了水行星边界,分别为 $1\,200$, $2\,400$, $3\,200\text{ km}^3/\text{a}$ 。

Gleeson 等^[33]认为目前的行星边界方法并未全面考虑水在地球系统中的功能。从全球尺度来看,水对于维持地球系统的稳定运行具有重要的功能,主要体现在:水文气候调控、水文生态调控、淡水存储对海平面的调控、物质输移等。人类活动通过改变水在地球系统中的这些功能,影响地球系统的稳定运行。针对水循环中水的不同储存形式——大气水、地表水、土壤水、冻结水和地下水, Gleeson 等^[33]将水行星边界细分为 6 个子边界,分别是:影响蒸腾蒸发过程的大气水子边界、影响降水过程的大气水子边界、影响碳吸收与净初级生产过程的土壤水子边界、影响地表径

流与生态过程的地表水子边界、影响地表水基流过程的地下水子边界、影响冰川过程的冻结水子边界。尽管 Gleeson 等^[33]提出了新的水行星边界概念模型,但由于尚不能清晰地确定各个子边界的控制变量、响应变量及二者之间的关系,故而未能对各个子边界予以量化。Bunsen 等^[43]认为这个新的水行星边界概念模型值得进一步研究,但是探索其控制变量与响应变量之间的关系面临着很大挑战。

3 淡水利用管理从流域尺度到全球尺度

水行星边界从全球尺度确定了人类开发利用淡水资源的数量约束,为全球水资源治理提供了基础依据,引起了联合国 2030 年可持续发展议程的重视^[44]。但是,目前在全球层面并没有水资源治理的相关机构或机制,水资源治理主要在国家层面以不同行政区域或流域为单元实施^[45]。因此,水行星边界对全球淡水利用的约束,需要落实到行政区域或流域,通过区域或流域尺度的水资源管理来实现全球尺度的管理。将全球的淡水利用 SOS 转化到区域或流域,主要有 2 种实现途径:一种是自上而下分配,一种是自下而上聚合^[46]。

3.1 自上而下分配

自上而下分配是指按照某种分配原则将全球淡水利用 SOS 划分成一定份额,然后再分配到行政区域或流域。最常用的分配原则是人均份额法,即:将淡水利用 SOS 除以人口数量获得人均份额,然后按照区域或流域人口数量分配给区域或流域。其他的分配原则还有平等、社会经济能力、发展权、国际责任等方面^[47]。该方法的优点是可以将水行星边界在各个区域予以体现,所有区域共同维护水在地球系统中功能的稳定性;缺点是没有考虑淡水资源分布具有高度的空间和时间变异性,也没有考虑各个地区的经济发展阶段、应对环境变化的能力。

采用自上而下分配路径,有学者探索开展了国家或流域尺度的淡水利用 SOS 案例研究。Nykvist 等^[48]将 Rockström 等^[38]确定的全球淡水利用 SOS,按照人口计算出人均淡水利用 SOS 为 $585\text{ m}^3/\text{a}$,然后将其与 61 个国家现状人均蓝水足迹进行对比,发现葡萄牙、希腊、西班牙、以色列、土耳其、美国等 8 个国家淡水利用已经超出了其水行星边界份额。Hoff 等^[49]按照人口数量将全球人均淡水利用 SOS 确定为 $570\text{ m}^3/\text{a}$,与欧盟国家包含虚拟水净进口的人均消耗性用水量比较后得出,大多数欧盟成员国淡水利用量超出了其

SOS。O'Neill 等^[50]将 141 个国家的人均蓝水足迹与全球人均淡水利用 SOS 对比后得出,有 114 个国家淡水利用仍处在 SOS 之内。Fanning 等^[51]采用 Steffen 等^[39]的流域水边界估算方法,对加拿大和西班牙各个流域盆地的淡水利用 SOS 进行了估算,从月度河流径流量中扣除月度环境需水量获得月度可利用蓝水资源量,发现西班牙淡水利用超出了其 SOS,而加拿大仅在个别月份有超出其 SOS 的情形。

3.2 自下而上聚合

自下而上聚合是指以水行星边界框架为指导,根据区域或流域水资源和生态系统状况,遴选出表征本区(流)域淡水系统稳定性的控制变量与响应变量,基于二者之间的关系确定本区(流)域的淡水利用 SOS。由于区(流)域淡水系统变化主要驱动力与全球淡水系统不一定相同,该方法所选取的控制变量与响应变量与全球尺度不一定相同。该方法的优点是充分反映区域水资源与生态系统条件,所确定的淡水利用 SOS 易被水资源管理者所采纳和应用;缺点是难以反映区域尺度与全球尺度的相互关系,自下而上聚合的区域 SOS 可能与自上而下分配的 SOS 存在着较大的差异。

Cole 等^[52]对南非的淡水利用 SOS 进行了评估,在评估中并未采用 Rockström 等^[38]提出的控制变量,而是直接将淡水用水量作为控制变量,其现状淡水用水量为 $18\,895\text{ km}^3$,与可利用水资源量 $14\,319\text{ km}^3$ 比较后得出,南非淡水利用超出了其 SOS 34%。Fang 等^[53]将可更新水资源量的 40% 定义为一个国家的水边界,将国家水足迹与水边界进行比较,根据比值判断淡水利用是否可持续。对 28 个国家淡水利用评价结果表明,丹麦、南非、韩国等 5 个国家淡水利用不可持续,波兰、美国等 11 个国家淡水利用存在可持续风险。Teah 等^[54]针对处于半干旱地区的黑河流域,将流域可利用水资源量的 80% ($1.8 \times 10^8\text{ m}^3$) 确定为流域水边界,现状用水量 $2.39 \times 10^8\text{ m}^3$ 已超出了流域水边界。

针对自上而下分配与自下而上聚合 2 种方法在评价结果上不一致的问题,Zipper 等^[55]提出了协调办法。如果二者所涉及的水赋存类型(地表水、地下水、大气水、土壤水、冻结水等)不同,那么 2 种方法所计算的淡水利用 SOS 都可以作为区域水资源管理的依据;如果二者所涉及的水赋存类型相同但是控制变量不一样,那么 2 种方法所计算的水边界都可以作为区域水资源管理的依据;如果二者所涉及的水赋存类型相同、控制变量也相同,那么应将 2 种方法计算

的水边界中更低的值作为区域水资源管理的依据。

4 结论与建议

4.1 结论

近几十年来,水利工程建设、土地利用与覆被变化、虚拟水贸易等人类活动对淡水循环的影响已经超出了流域尺度,成为全球尺度淡水循环变化的重要驱动力。为适应这一变化,水资源调查监测、开发利用与管理保护的基础理论正在从以流域过程为核心的传统水文科学向以地球系统过程为核心的全球尺度水文科学转变。水行星边界方法以地球系统科学理论为指导,以保持地球系统稳定运行为目标,将淡水循环研究视野从流域尺度扩展至全球尺度,明确了全球淡水利用安全运行空间,成为评价全球水资源可持续性的重要方法。水资源管理,既要考虑流域尺度的水资源、生态与经济社会发展关系,也要考虑全球尺度的水循环、地球系统稳定与全球可持续发展关系。水行星边界是对现有区域水资源承载能力评价方法的重要补充,为全球与区域淡水资源治理提供了重要的方法框架和基础依据。

4.2 建议

为解决我国面临的资源、环境与生态问题,2018 年国家从系统工程的治理视角重构了我国自然资源管理体系,水资源管理成为新管理体系的重要内容^[56]。这就要求,水资源管理既要树立山水林田湖草沙生命共同体的理念面向区域尺度的问题,又要树立人类命运共同体的理念面向全球尺度的问题。水行星边界为新自然资源管理体系下水资源管理提供了重要的理论基础和实现路径。根据水资源管理需要,针对水行星边界评估,建议今后加强以下几方面研究:

(1) 加强全球淡水循环过程研究,完善全球水文模型与模拟预测平台。

水行星边界评估需要不同尺度的蓝水、绿水可利用资源量、取水量、用水量和环境需水量等大量基础数据,而目前已建立的水系统观测网只覆盖了陆地的小部分,建立覆盖全球的观测网存在很多障碍。利用有限的观测数据,基于淡水循环过程机理,建立全球水文模型,成为开展水行星边界评估的有效方法^[57]。目前已经建立的全球水文模型有 H08、LPJmL、WaterGAP、JULES 等^[58-59],还形成了用于支持模型运行的多个全球数据集^[60]。这些模型模拟结果之间相差较大。以现有的模型与数据集为基础,建立时空尺度更加精细的全球水文模型,是当前全球水文学的重要方向。

(2)加强水行星边界与土地、生物、大气等其他行星边界的相互影响与作用研究。

目前水行星边界是在假定其他行星边界没有被超出的情况下而确定的。研究表明,地球系统过程之间是相互作用、相互联系的,其中一个过程的变化会影响到其他过程,一个行星边界被超出,可能会导致其他行星边界发生变化^[61]。开展不同地球系统过程及其行星边界之间的关系研究,是准确界定各个过程的行星边界的重要基础。

(3)探索应用水行星边界框架完善资源环境承载力评价和国土空间开发适宜性评价(“双评价”)方法。

“双评价”是我国开展国土空间规划与管控的基础,在应用实践中面临着不少问题与挑战^[62]。目前的“双评价”方法主要考虑区域尺度资源环境的承载力,基本没有考虑资源利用对本区域外的影响,对虚拟水的流入流出也很少考虑,难以反映人类活动对地球系统的影响。

参考文献 (References):

- [1] MEDEMA W, MCINTOSH B S, JEFFREY P J. From premise to practice: A critical assessment of integrated water resources management and adaptive management approaches in the water sector[J]. *Ecology and Society*, 2008, 13(2): 29.
- [2] 杜鹏, 傅涛. 流域综合管理研究述评[J]. *水资源保护*, 2010, 26(3): 68 – 72. [DU Peng, FU Tao. Comment on integrated river basin management research[J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(3): 68 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 章光新, 陈月庆, 吴燕锋. 基于生态水文调控的流域综合管理研究综述[J]. *地理科学*, 2019, 39(7): 1191 – 1198. [ZHANG Guangxin, CHEN Yueqing, WU Yanfeng. Commentary on eco-hydrological regulation for integrated river basin management[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(7): 1191 – 1198. (in Chinese with English abstract)]
- [4] COOK B I, MANKIN J S, ANCHUKAITIS K J. Climate change and drought: From past to future[J]. *Current Climate Change Reports*, 2018, 4(2): 164 – 179.
- [5] 丁一汇. 人类活动与全球气候变化及其对水资源的影响[J]. *中国水利*, 2008(2): 20 – 27. [DING Yihui. Human activity and the global climate change and its impact on water resources[J]. *China Water Resources*, 2008(2): 20 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [6] EAGLESON P S. The emergence of global-scale hydrology[J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(9): 6S – 14S.
- [7] VÖRÖSMARTY C J, PAHL-WOSTL C, BUNN S E, et al. Global water, the anthropocene and the transformation of a science[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6): 539 – 550.
- [8] STEFFEN W, CRUTZEN P J, MCNEILL J R. The anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of nature[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2007, 36(8): 614 – 621.
- [9] ROCKSTRÖM J, STEFFEN W, NOONE K, et al. A safe operating space for humanity[J]. *Nature*, 2009, 461(7263): 472 – 475.
- [10] BOGARDI J J, FEKETE B M, VÖRÖSMARTY C J. Planetary boundaries revisited: A view through the ‘water lens’[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6): 581 – 589.
- [11] FALKENMARK M, WANG-ERLANDSSON L, ROCKSTRÖM J. Understanding of water resilience in the anthropocene[J]. *Journal of Hydrology X*, 2019, 2: 100009.
- [12] CHAO B F, WU Y H, LI Y S. Impact of artificial reservoir water impoundment on global sea level[J]. *Science*, 2008, 320(5873): 212 – 214.
- [13] NILSSON C, REIDY C A, DYNESIUS M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world’s large river systems[J]. *Science*, 2005, 308(5720): 405 – 408.
- [14] STEFFEN W, SANDERSON A, TYSON P, et al. Global change and the earth system: A planet under pressure[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [15] COOLEY S W, RYAN J C, SMITH L C. Human alteration of global surface water storage variability[J]. *Nature*, 2021, 591: 78 – 81.
- [16] JARAMILLO F, DESTOUNI G. Local flow regulation and irrigation raise global human water consumption and footprint[J]. *Science*, 2015, 350(6265): 1248 – 1251.
- [17] WADA Y, VAN BEEK L P H, SPERNA WEILAND F C, et al. Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(9): L09402.
- [18] KEUNE J, SULIS M, KOLLET S, et al. Human water use impacts on the strength of the continental sink for atmospheric water[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(9): 4068 – 4076.
- [19] ELLIS E C, KLEINGOLDEWIJK K, SIEBERT S, et al. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to

- 2000[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19: 589 – 606.
- [20] STEFFEN W, BROADGATE W, DEUTSCH L, et al. The trajectory of the anthropocene: The great acceleration[J]. *The Anthropocene Review*, 2015, 2(1): 81 – 98.
- [21] HOLMGREN P. Global land use area change matrix: Input to the fourth global environmental outlook (GEO-4)[R]. Rome: Forestry Department, FAO, 2006: 1 – 7.
- [22] VAN DER ENT R J, SAVENIJE H H G. Length and time scales of atmospheric moisture recycling[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(5): 1853 – 1863.
- [23] WANG-ERLANDSSON L, FETZER I, KEYS P W, et al. Remote land use impacts on river flows through atmospheric teleconnections[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(8): 4311 – 4328.
- [24] GORDON L, DUNLOP M, FORAN B. Land cover change and water vapour flows: Learning from Australia[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2003, 358(1440): 1973 – 1984.
- [25] GORDON L J, STEFFEN W, JÖNSSON B F, et al. Human modification of global water vapor flows from the land surface[J]. *PNAS*, 2005, 102(21): 7612 – 7617.
- [26] MA W J, OPP C, YANG D W. Past, present, and future of virtual water and water footprint[J]. *Water*, 2020, 12(11): 3068.
- [27] 杨志峰, 支援, 尹心安. 虚拟水研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(5): 181 – 190. [YANG Zhifeng, ZHI Yuan, YIN Xinan. Research advances in virtual water[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(5): 181 – 190. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 张晓宇, 何燕, 吴明, 等. 世界水资源转移消耗及空间解构研究: 基于国际水资源投入产出模型[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(增刊 2): 89 – 93. [ZHANG Xiaoyu, HE Yan, WU Ming, et al. Research on world water resource transfer consumption and spatial distribution in view of international water resource input and output model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(Sup 2): 89 – 93. (in Chinese with English abstract)]
- [29] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M. The water footprint of humanity[J]. *PNAS*, 2012, 109(9): 3232 – 3237.
- [30] SERRANO A, GUAND, DUARTE R, et al. Virtual water flows in the EU27: A consumption-based approach[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(3): 547 – 558.
- [31] ZHAO X, LIU J, LIU Q, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(4): 1031 – 1035.
- [32] GLEESON T, WANG-ERLANDSSON L, ZIPPER S C, et al. The water planetary boundary: Interrogation and revision[J]. *One Earth*, 2020, 2(3): 223 – 234.
- [33] GLEESON T, WANG-ERLANDSSON L, PORKKA M, et al. Illuminating water cycle modifications and earth system resilience in the anthropocene[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56: e2019WR024957.
- [34] ROCKSTRÖM J, STEFFEN W, NOONE K, et al. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity[J]. *Ecology and Society*, 2009, 14(2): 32.
- [35] MOLDEN D. The devil is in the detail[J]. *Nature Reports Climate Change*, 2009(3): 116 – 117.
- [36] GERTEN D, HOFF H, ROCKSTRÖM J, et al. Towards a revised planetary boundary for consumptive freshwater use: Role of environmental flow requirements[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6): 551 – 558.
- [37] SCHAPHOFF S, FORKELM, MÜLLERC, et al. LPJmL4—a dynamic global vegetation model with managed land—Part 2: Model evaluation[J]. *Geoscientific Model Development*, 2018, 11(4): 1377 – 1403.
- [38] ROCKSTRÖM J, FALKENMARK M, LANNERSTAD M, et al. The planetary water drama: Dual task of feeding humanity and curbing climate change[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(15): 15401.
- [39] STEFFEN W, RICHARDSON K, ROCKSTRÖM J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet[J]. *Science*, 347(6223): 1259855.
- [40] PASTOR A V, LUDWIG F, BIEMANS H, et al. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(12): 5041 – 5059.
- [41] HOGEBOOM R J, DE BRUIN D, SCHYNS J F, et al. Capping human water footprints in the world's river basins[J]. *Earth's Future*, 2020, 8(2): e2019EF001363.
- [42] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, 等. 水足迹评价手册[M]. 刘俊国, 译. 北京: 科学出版社, 2012. [HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual[M]. LIU Junguo, trans. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)]
- [43] BUNSEN J, BERGER M, FINKBEINER M. Planetary boundaries for water—A review[J]. *Ecological Indicators*,

- 2021, 121: 107022.
- [44] BRANDI C. Safeguarding the earth system as a priority for sustainable development and global ethics: The need for an earth system SDG[J]. *Journal of Global Ethics*, 2015, 11(1): 32 – 36.
- [45] GUPTA J, PAHL-WOSTL C. Global water governance in the context of global and multilevel governance: Its need, form, and challenges[J]. *Ecology and Society*, 2013, 18(4): 53.
- [46] 陈先鹏, 方恺, 彭建, 等. 资源环境承载力评估新视角: 行星边界框架的源起、发展与展望[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 513 – 531. [CHEN Xianpeng, FANG Kai, PENG Jian, et al. New insights into assessing the carrying capacity of resources and the environment: The origin, development and prospects of the planetary boundaries framework[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 513 – 531. (in Chinese with English abstract)]
- [47] HÄYHÄ T, LUCAS P L, VAN VUUREN D P, et al. From planetary boundaries to national fair shares of the global safe operating space—How can the scales be bridged?[J]. *Global Environmental Change*, 2016, 40: 60 – 72.
- [48] NYKVIST B, PERSSON Å, MOBERG F, et al. National environmental performance on planetary boundaries[R]. Stockholm: The Swedish Environmental Protection Agency, 2013.
- [49] HOFF H, NYKVIST B, CARSON M. Living well, within the limits of our planet? Measuring Europe’s growing external footprint[R]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2014.
- [50] O’NEILL D W, FANNING A L, LAMB W F, et al. A good life for all within planetary boundaries[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(2): 88 – 95.
- [51] FANNING A L, O’NEILL D W. Tracking resource use relative to planetary boundaries in a steady-state framework: A case study of Canada and Spain[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 836 – 849.
- [52] COLE M J, BAILEY R M, NEW M G. Tracking sustainable development with a national barometer for South Africa using a downscaled “safe and just space” framework[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(42): E4399 – E4408.
- [53] FANG K, HEIJUNGS R, DUAN Z, et al. The environmental sustainability of nations: Bench marking the carbon, water and land footprints against allocated planetary boundaries[J]. *Sustainability*, 2015, 7: 11285 – 11305.
- [54] TEAH H, AKIYAMA T, SAN CARLOS R, et al. Assessment of downscaling planetary boundaries to semi-arid ecosystems with a local perception: A case study in the middle reaches of Heihe River[J]. *Sustainability*, 2016, 8(12): 1233.
- [55] ZIPPER S C, JARAMILLO F, WANG-ERLANDSSON L, et al. Integrating the water planetary boundary with water management from local to global scales[J]. *Earth’s Future*, 2020, 8(2): e2019EF001377.
- [56] 习近平. 国家中长期经济社会发展战略若干重大问题[J]. *求是*, 2020(21): 4 – 10.
- [57] ARNELL N W. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios[J]. *Global Environmental Change*, 2004, 14(1): 31 – 52.
- [58] 高红凯, 赵舫. 全球尺度水文模型: 机遇、挑战与展望[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 224 – 233. [GAO Hongkai, ZHAO Fang. A review of global hydrological models: The opportunities, challenges and outlook[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 224 – 233. (in Chinese with English abstract)]
- [59] HADDELAND I, CLARK D B, FRANSSSEN W, et al. Multimodel estimate of the global terrestrial water balance: Setup and first results[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2011, 12(5): 869 – 884.
- [60] BIERKENS M F P. Global hydrology 2015: State, trends, and directions[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(7): 4923 – 4947.
- [61] STEFFEN W, ROCKSTRÖM J, RICHARDSON K, et al. Trajectories of the earth system in the anthropocene[J]. *PNAS*, 2018, 115(33): 8252 – 8259.
- [62] 岳文泽, 吴桐, 王田雨, 等. 面向国土空间规划的“双评价”: 挑战与应对[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2299 – 2310. [YUE Wenze, WU Tong, WANG Tianyu, et al. “Double evaluations” for territorial spatial planning: Challenges and responses[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(10): 2299 – 2310. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳