

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.03.001

全球治水模式思辨与发展展望

严登华^{1,2}, 王浩^{1,2}, 周梦³, 秦天玲^{1,2}

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 3. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038)

摘要:近百年全球治水取得了巨大成就,为保障可持续发展提供了关键支撑;然而,全球水问题愈演愈烈,亟待进一步创新治水模式。结合水问题发展历程,剖析了水问题的根本症结;从治水目标、总体路径和治理措施等方面解析了全球治水模式的不足,认为当前的全球治水模式未能充分融合水循环及多要素过程的自然属性,存在末端治理和过程分离等突出问题。对下一步治水模式提出了发展建议:从耦合流域水循环多过程互馈机制的角度,提升自然属性和自然力的作用,协调多要素多过程的功能,建设富自然-功能协调流域,系统治理复杂水问题。

关键词:水问题;治水模式;治水路径;治水措施;富自然-功能协调流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)03-0001-07

Scientific ideas and development prospects of global water management modes// YAN Denghua^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, ZHOU Meng³, QIN Tianling^{1,2} (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China; 2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China)

Abstract: In the past century, great achievements have been made in global water management, which has provided key supports for sustainable development. However, the global water problems keep increasing, it is urgent to further improve water management modes. Based on the development history of water problems, this paper explored the causes of water problems, and analyzed the shortcomings of global water management modes from the aspects of objectives, overall framework, and technical approaches; in the current global water management modes, the natural properties of water cycle and its multi-processes have not been fully integrated, and there exists serious problems such as end-disposal and process-dissociation. The development suggestions for the future water control mode are put forward: from the perspective of coupling multi process mutual feed mechanism of basin water cycle, we should enhance the role of natural attributes and natural forces, and coordinate the function of multi-elements and multi-processes, building a Nature Enriched and Attributes Coordinated Watershed to manage the complex water problems systematically.

Key words: water problems; water management modes; water management paths; water management measures; Nature Enriched and Attributes Coordinated Watershed

水是制约全球可持续发展的重大瓶颈^[1-2]。伴随着水问题的发生发展,全球治水模式发生了深刻变化,治水技术快速发展,工程体系、管理体制与机制日渐完善,取得了巨大成就,为全球可持续发展目标的实现提供了支撑^[3-4]。然而,在气候变化和人类活动的影响下,全球水问题呈愈演愈烈之势,是经济、社会发展和生态环境保护中最为突出的问题^[5-6],治

水成效与人民群众的期望值和获得感尚有不小差距。

全球治水成效与现实问题之间的矛盾,是水问题日趋复杂所致,还是因为治水模式存在不足,应如何有效解决,已成为全球治水中亟待回答的三大问题^[7-8]。本文拟结合全球水问题的发展历程,剖析全球水问题的症结;从治水目标、治水模式和技术路径

基金项目:国家杰出青年科学基金(51725905);国家重点研发计划(2016YFA0601503)

作者简介:严登华(1976—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事气候变化与水文水资源等研究。E-mail: yandh@iwhr.com

通信作者:秦天玲,高级工程师。E-mail: qintl@iwhr.com

等3个方面,剖析当前全球治水模式的不足,并展望全球治水模式的升级发展,旨在为政府部门选取治水路径、凝练水科学重大科技问题提供参考。

1 全球水问题发展历程与症结

1.1 发展历程

纵观人类文明和水问题的发展史,水问题伴随着人类文明的发展而不断发展演化。人类先后经历原始文明、农业文明、工业和城市文明、生态文明等不同阶段,各阶段的水问题及成因迥异^[9]。

在原始文明和农业文明初期阶段,人类逐水而居,因人口数量较少,人工取用水对水循环和生态环境的影响十分有限。水循环过程整体表现为以“降水-蒸发-径流”为主导的自然一元水循环,水生态和水环境过程呈现出天然演替与演变状态,水质和生态优良。

随着以灌溉为代表的现代农业文明的发展,灌溉取用水和排水对天然水循环的影响加剧;“取水-输水-用水-耗水-排水”等具有显著社会经济属性的人工水循环过程凸显,流域水循环过程也由自然一元水循环过程,向“自然-人工”二元水循环过程转变^[10];同时,为保障人民生命财产安全,自然洪涝过程被人为调节,水循环过程的自然属性被削弱^[11]。自然水循环通量与社会水循环通量此消彼长,过程上深度耦合,功能上竞争融合^[12]。伴随着社会水循环过程,污染物得以产生,并随排水进入天然水体中。当入河污染负荷超出天然水体的自净能力时,污染问题开始显现。

进入工业和城市文明以来,人类对水土资源的开发活动日渐增强,人工水循环的通量快速增加,水循环的自然属性被进一步削弱,甚至在部分流域人工水循环通量大于天然水循环通量。日趋增强的水土资源开发活动,使得流域下垫面条件发生改变,生态需水和生态用地被挤占^[13-14]。污染负荷的产生量和入河量呈剧增的态势,导致水生态与水环境问题日渐加剧^[15]。同时,伴随着化石能源等的消耗及温室气体的大量排放,大气系统能量富集、水热特性发生改变,稳定性下降,原有的自然节律被改变,极端事件发生频率增大^[16],天然水循环和人工水循环的自然属性也发生了根本性变化。

进入生态文明阶段,绿色发展、节水防污型社会建设成为主导。在人类的水土资源开发活动中,通过节约用水遏制社会水循环通量的快速增长,采取系列污染减排措施,降低污染负荷的输出,以遏制水污染,并对受损水生态系统进行修复^[17-18]。然而,在工业和城市文明阶段形成的水需求惯性和巨大污

染累积负荷,水质改善往往要经历一个较长时间的“污染-治理”相持、水质难以得到根本改善的阶段,加上修复后的水生态系统要达到“自维持”状态,往往要经历几年乃至数十年的时间^[19],水环境与水生态的改善难以一蹴而就。

不同国家和地区,水土资源的禀赋条件和发展阶段迥异,水问题的特性也不同。当前,我国正处在工业文明的后期和生态文明的前期,多种水问题往往在同一流域相交织,现阶段出现的复杂水污染问题集中体现了欧美发达国家在过去百年工业化进程、不同阶段上出现的全部水污染问题,治理任务异常繁重^[20]。

1.2 症结

完整的流域水循环过程,既包括自然水循环过程和社会水循环过程,还包括与之伴生的水生态过程、水环境过程和水沙过程,且各要素过程之间存在着多向的互馈作用^[21]。基于流域水循环及其要素过程,水问题不论其表现形式如何,都可归结为流域水循环分项或伴生过程的失衡和失调。以升温为背景的气候变化和以竞争性用水、用地为特征的人类活动影响^[22-23],水循环演变及要素过程间的多向反馈作用发生显著改变,这些是水资源、水环境与水生态问题演化的共同根源。全球水问题症结可概括为以下4方面:①干旱和洪涝是水在一定时间段内没有去到它应该去的地方;②生态退化或过度生态建设是在一定时间段内土地上没有生长它应该生长的生物;③泥沙问题是泥沙在一定时间段内没有随水循环去到它应该去的地方;④水污染是资源没有储存在其应该储存的地方,而随水循环过多富集到水体中。上述4个方面有两个共同的关键词,即“没有”和“应该”。其中,“没有”是气候变化和非理性的水土资源开发利用活动导致水循环自然演变规律和多要素过程之间的协同作用机制被打破;“应该”是指自然规律或良性健康的水循环模式和路径^[20]。

2 全球治水模式的思辨

针对干旱与洪涝、水污染治理、水生态退化和泥沙等问题,全球已经形成了针对不同地域特征和成因的治理模式,并逐渐从“单一问题治理”向“多问题系统解决”的模式转变^[24-26]。不论何种治水模式,治水目标、总体路径和治水措施是其核心三要素。下面融合水循环多要素过程及互馈机理、水问题的症结等,逐一进行思辨,以明晰治水模式存在的不足。

2.1 治水目标

a. 供水保障和干旱、洪涝灾害治理。重点是以

满足社会经济发展需求进行治理目标的设定,保证率、重现期、缺水率、设防标准等是关键指标。保证率和重现期的确定,往往以历史天然过程为依据,基于的是“一致性”假设^[27-28]。然而,在气候变化敏感和高强度人类活动流域,水循环的“非一致性”凸显,基于“一致性”假设分析的适用场景已不存在^[29]。同时,基于单要素、离散式的点线分析未能充分融合整体水循环过程中水文与水力联系。针对社会经济发展所需的缺水率和设防标准的确定,未能充分融合水循环应有自然属性特征保育需求,也难以满足水生态系统对水文水动力过程适宜性的需求。

b. 水污染防控目标设定。当前水污染防控主要执行的是国家统一水质标准和排污标准,而水质标准和排污标准执行等级的制定,主要以人的主观期望为依据^[30]。不同流域的水环境背景迥异,并随着自然演化而发生变化,且各流域的污染源分布差异也十分明显,而目前排污标准与水质目标未能实现良好衔接,环境基准的研究尚待深化^[31]。整体上看,水污染防治目标的设定未能充分融合水环境的自然属性特征,也未能充分融合流域内不同水体之间污染特征的协同性。

c. 水生态保护目标设定。当前主要依据历史演变过程中的水生态质量状况,期盼“历史的记忆成为现实”。但是,水生态系统有其固有的自然演化规律,在自然演化过程中水生态系统具有特定的功能,不同类型水生态系统生态服务功能之间有着固有的协同性^[32]，“历史的记忆不能成为现实”。当前对水生态修复目标的设定,未能充分融合水生态系统演变的自然规律,对各类型水生态系统服务功能之间的协调性考虑不足,单一服务功能问题凸显。

d. 泥沙问题治理的目标设定。减沙量、水源涵养量、河型、河势等是泥沙治理的关键指标^[33]。在自然演化过程中,泥沙去了其应该去的地方,该流走的泥沙需要流走,该留下来的泥沙则应该留下来,自然实现动态平衡^[34]。但目前坡面过度减沙和保水在局部地区已对河道及其生态系统产生了严重的负面影响^[35-36]。总体上说,现有泥沙问题治理目标的设定需要遵循泥沙自然演变规律,以找到科学合理的调控阈值。

总之,当前治水目标的制定未能充分结合水循环及伴生过程的自然属性特征,也未能从功能定位和发展演化的角度找到合理的调控阈值。

2.2 总体路径

a. 洪涝灾害治理。当前重点是通过水库、堤防等水利工程措施对洪水进行蓄导,以削减断面的洪

峰量和淹没范围。从降雨-产流过程和坡面-河道水文的地域联系来看,水库、河道是整体洪水形成演化的地域末端,暴雨特性、坡面下垫面条件是影响洪涝特性的根本所在^[37-38],当前的洪涝灾害治理属于空间上的“末端治理”模式,未能从洪涝形成全过程进行层层动态防控。

b. 旱灾应对。总体路径是旱灾场景下应急找水、供水。旱灾的本质是缺水,旱灾在演化发生过程中经历了从丰水、缺水旱象到缺水程度持续加剧的过程^[39]。然而往往是发生了旱象,人们才采取相应的措施。从旱灾整体形成演化的时间过程而言,旱象就是进入到多水-缺水演变的末期,在这个阶段进行治疗,属于时间上的末端治理,需要基于水循环时间节律及周期采取全周期精准调控。

c. 水污染治理。重点采用的是“源头减排—过程阻断—末端治理”的模式^[20],水污染伴随着“取水—输水—用水—耗水—排水”等人工水循环过程而孕育演化^[30]。当前的源头减排措施,重点是在排水环节,从人工水循环全过程的角度来看,这属于循环过程的末端。水污染治理需要从人工水循环全过程出发,遏制污染物进入水(体)中。

d. 水生态治理。其模式主要是生态修复与重建。但是,除了土地利用开发直接导致的生态系统类型改变外^[40],其他绝大多数水生态问题均是因生境条件改变而发生的生态逆行演替^[41-42]。在当前的水生态治理中,往往是固有水生态系统类型已演变成新的生态系统类型后再采取人为措施进行干扰,属生态演替时间序列上的末端治理。

e. 水土流失及其影响的治理。目前已形成较为完备的“固—移—输—淤—置”模式^[43-44],在黄河流域形成了享誉世界的“拦—排—放—调—挖”模式^[45],实践中已取得了显著效果。流域泥沙运动过程中,其完整的“侵蚀—搬运—沉积”链式过程构成了天然的空间配置格局^[34]。当前重点关注的是减沙,但随着生态环境的修复,“少沙”及其伴生问题已在局部地区凸显^[35-36],为此,需要融合泥沙运移规律及泥沙自然属性特征,合理确定阈值,进行流域尺度的泥沙调配。

总之,当前水问题治理总体路径选取中存在末端治理的不足;同时,因部门分工不同,往往是针对单一水问题进行整治。从完整水循环的角度,各水问题之间存在互馈作用,对单一单元、单一问题的治理,若处置不当,往往会导致次生问题发生,如在全球局部地区已出现坡面过度水土保持导致河道断流等流域性问题^[46]。总体来看,当前水问题治理未能充分融合多过程之间的耦合关系,存在“过程分离”

的不足。

2.3 治理措施

a. 供水保障和水旱灾害应对。当前重点采取的是“蓄、引、提”以及堤防等措施^[47],整体上属于“点线”结合的灰色基础设施调配及人为作用。天然水循环过程包括大气、地表、土壤和地下等要素过程,地表-土壤-地下相联合,坡面-河道相制约,属于典型的三维模式;地表尤其是坡面单元上的植被与土壤状况,在流域降水再分配及干旱与洪涝灾害孕育过程中发挥着主体作用^[39,48-49];同时,灰色基础设施的建设和运行调度,势必会对生态和环境产生不同程度的负面影响^[50]。为此,在应对水旱灾害的过程中,需要从当前的一维“点-面”结合措施,向“点-线-面-体”相结合的立体水网构建转变;同时,充分发挥绿色基础设施及自然力的作用。整体上看,当前的水旱灾害应对措施处置对象较单一,未能充分发挥自然力的作用。

b. 水污染治理。当前分别从点源和面源污染孕育过程,通过物料的加入和人为、能量动力调节,试图进行全面的污染物削减。当前在污水处理尤其是点源污染的处理过程中,能量投入占的成本最高,然而污染的水体本身就饱含能量,大量的外加能量投入属于典型的“以能量攻击能量”模式^[51-52];同时,污染物在水体中的迁移转化,受到多层次水生态系统中生物和非生物环境的整体调节,且不同污染物之间具有互馈作用^[53]。当前针对特征污染物的削减过程,重点是通过人为干预,并没充分发挥水生态系统多层次、多要素之间的协同作用。

c. 水生态修复。当前重点采取的是“美化”和“绿化”措施。在自然演化与自然选择的过程中,一定时间和地域上发育着特定的水生态系统,且各要素具有特定的生态服务功能,这些功能之间相互协调^[54-55]。然而,在“美化”过程中,重点针对的是单一功能尤其是景观的可欣赏功能;在“绿化”过程中,重点通过植树造林与种草,添加或重建品种相对单一的植被,生态服务功能的单一问题凸显。可见,“美化”不同于自然,“绿化”不同于生态。在局部地区物种的选取与当地的生境适宜性和整体生态服务功能不符,已产生较为严重的次生生态与环境问题^[56-58]。总体来说,当前的水生态修复措施未能充分融合流域生态完整性和生态服务功能协调性需求,需要构建“体系完整、功能协调、各在其位、各司其职”的协调流域体系。

d. 水土流失及其影响治理。当前重点采取的是建设水土保持林、淤地坝等坡面固沙工程措施,以及疏浚、控导等河型、河势调控工程措施^[33]。与水

生态修复措施一样,单一针对固沙的坡面工程措施对坡面生态系统的完整性和生态服务功能的协同性将会产生影响。此外,河型河势是制约河流水动力特征和生境适宜性的关键因子,部分疏浚措施会直接导致底栖生境的破坏,致使水下草场和森林成为水下荒漠^[59]。在水沙治理过程中,需要进一步从流域生态完整性角度,进一步发挥自然力的作用,提升生态服务功能,规避不利影响。

3 全球治水模式发展展望——建设富自然-功能协调流域

今后治水既要满足经济社会发展需求,还要应对气候变化,更要保护好生态环境^[60-61]。围绕水问题的根本症结,结合当前治水过程中存在的自然属性减弱、末端治理、过程分离和功能不协调等问题,应增强水循环过程的自然属性,从流域层面实现水循环多过程、多功能的协调,充分发挥水的社会经济功能和生态环境功能,有效规避极端事件带来的不利影响,这是今后治水的根本遵循原则。笔者认为,建设富自然-功能协调流域(Nature Enriched and Attributes Coordinated Watershed, NeaCow),是今后治水的基本模式和任务。

a. 富自然-功能协调流域建设的总体目标。优化调整人类的水土资源开发与利用模式,在流域尺度上系统解决水问题,让水和沙尽量去其应该去的地方,让土地上生长其应该生长的生物,让资源储存在其应该储存的地方而不过度在水体中富集,这中间关键是增强水循环多过程的自然属性,核心是实现水循环多要素、多过程、多功能之间的协调,要领是科学、充分发挥自然力的作用。

b. 富自然-功能协调流域建设的基本路径。要遵循水循环多过程的自然规律,采用“层层剥笋”的方式,充分发挥自然地理要素对水循环多过程的调节作用,系统布置和建设人工林草等绿色基础设施、土壤水库等棕色基础设施和地下水库等蓝色基础设施、水利工程群等灰色基础设施,同时完善智能水网和智慧水务等红色基础设施,并提升对这4类基础设施的监测、预警预报和调控能力。

c. 富自然-功能协调流域建设的关键举措。增强和维系流域的“四性”:①全面提升流域的调节能力和生态服务功能,增加应对系统外环境风险的能力,以强化流域的“韧性”;②构建立体畅流水网,消除梗阻,以增强水的“活性”;③提升流域生态环境质量,全面实现自然资产的保值和增值,以充实流域的“绿性”;④整合人工智能和大数据技术,构建智能化、智慧化的监管体系,实现流域的“慧性”。

较之当前的治水模式,富自然-功能协调流域具有以下特点和优势:①从流域生态完整性出发,充分融合“山水林田湖草”生命体保育与维系的需求,较之河流生态完整性,该体系更完整,功能更明确;②充分遵循自然规律,提升自然属性,注重自然力的科学运用;③重在系统治理和功能提升,以能力提升来应对各类风险与挑战;④充分吸收了“海绵田”和“海绵城市”建设中水循环立体调控精髓,在流域层面开展水循环的立体调控,并实现多功能的协调。

需要指出的是,在富自然-功能协调流域建设中,强调增强水循环多过程的自然属性,并非实现完全的自然状态;强调绿色基础设施建设和自然力的应用,并非要抛弃灰色基础设施、完全规避人类干预,而是要与自然相协调,充分肯定灰色基础设施全球治水历史所取得的巨大功效,进一步推进灰色基础设施的绿色升级发展。

4 结 语

全球水问题纷繁复杂,成因迥异。富自然-功能协调建设模式有效规避了当前治水模式的不足,应是今后治水模式的首要选择。在富自然-功能协调流域建设中,首先需要回答水沙应该去哪里、土地上应该生长什么生物、资源应储存在哪里等重大问题,以便为建设目标找到对照基线 & 基准,属于复杂系统的量化精准分析;其次,措施的适应性分析与比选属于具有物理机制的复杂群决策,基础科学问题繁多,攻关难度极大。

富自然-功能协调流域建设模式与笔者2017年提出的生态海绵智慧流域建设框架^[20],在总体目标和总体模式等方面基本一致。在实践验证过程中,生态海绵智慧流域存在以下不足:一是因流域本身就可视作一类生态系统,且流域本身就是一类海绵体^[62]，“生态流域”和“海绵流域”的概念不严谨;二是未能充分体现“富自然”这一关键路径,也未能体现建设中各类举措要实现“多要素、多功能协调”的总体要求;三是未能体现动态适应的需求,也不便于交叉学科的研讨。为此,在此基础上,调整升级为富自然-功能协调流域。

参考文献:

[1] United Nations. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development [R]. New York: United Nations, 2015.

[2] 唐克旺. 中国治水已进入大保护的新时代[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 16-17. (TANG Kewang. A new era of great protection for water governance in China[J]. Water

Resources Protection, 2018, 34(1): 16-17. (in Chinese))

[3] DONOSO M, DI BALDASSARRE G, BOEGH E, et al. International hydrological programme (IHP) eighth phase: water security: responses to local, regional and global challenges: strategic plan, IHP-VIII (2014—2021) [R]. Paris: UNESCO, 2012.

[4] 左其亭, 郝林钢, 刘建华, 等. “一带一路”分区水资源特征及水安全保障体系框架[J]. 水资源保护, 2018, 34(4): 16-21. (ZUO Qiting, HAO Lingang, LIU Jianhua, et al. Characteristics of water resources in “Belt and Road” district and its framework of water security system[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 16-21. (in Chinese))

[5] MONTANARI A, YOUNG G, SAVENIJE H H G, et al. “Panta Rhei-Everything Flows”: change in hydrology and society: the IAHS scientific decade 2013—2022 [J]. Hydrological Sciences Journal, 2013, 58(6): 1256-1275.

[6] IPCC. Global warming of 1.5 °C [R]. Geneva: IPCC, 2018.

[7] LIU Junguo, YANG Hong, GOSLING S N, et al. Water scarcity assessments in the past, present, and future[J]. Earth's Future, 2017(5): 545-559.

[8] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science, 2000, 313: 1068-1072.

[9] 雷社平, 阮本清, 解建仓. 论水与人类文明的历史关系[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2003, 3(6): 61-65. (LEI Sheping, RUAN Benqing, XIE Jiancang. Function of water resource on human civilization innovation mechanism[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Social Science Edition), 2003, 3(6): 61-65. (in Chinese))

[10] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1219-1226. (WANG Hao, JIA Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1219-1226. (in Chinese))

[11] GAO Shida, LIU Pan, PANG Zhengke, et al. Incorporating reservoir impacts into flood frequency distribution functions[J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 234-246.

[12] 王浩. 水生态文明建设的理论基础及若干关键问题[J]. 中国水利, 2016(19): 5-7. (WANG Hao. Theoretical basis and key problems of water ecological civilization construction[J]. China Water Resources, 2016(19): 5-7. (in Chinese))

[13] YAN D H, WANG G, WANG H, et al. Assessing ecological land use and water demand of river systems: a case study in Luanhe River, North China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2469-2483.

[14] YAN Ziqi, ZHOU Zuhao, SANG Xuefeng et al. Water

- replenishment for ecological flow with an improved water resources allocation model [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643:1152-1165.
- [15] LI J P, LI M R, WANG J N, et al. Global environmental issues and human wellbeing [C]//Report on global environmental competitiveness (2013): current Chinese economic report series. Berlin:Springer, 2014:8.
- [16] IPCC. IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate[R]. Geneva:IPCC, 2019.
- [17] SCHWARZENBACH R P, EGLI T, HOFSTETTER T B, et al. Global water pollution and human health[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2010, 35(1):109-136.
- [18] 张建云, 李云, 王小军. 我国水生态文明建设中几个问题的再思考[J]. *中国水利*, 2016(19):8-11. (ZHANG Jianyun, LI Yun, WANG Xiaojun. Reconsideration on issues related to water ecological civilization construction in China[J]. *China Water Resources*, 2016(19):8-11. (in Chinese))
- [19] 郑丙辉. 中国湖泊环境治理与保护的思考[J]. *民主与科学*, 2018, 174(5):15-17. (ZHENG Binghui. Thoughts on the management and protection of lake environment in China[J]. *Democracy & Science*, 2018, 174(5):15-17. (in Chinese))
- [20] 严登华, 王浩, 张建云, 等. 生态海绵智慧流域建设:从状态改变到能力提升[J]. *水科学进展*, 2017, 28(2):302-310. (YAN Denghua, WANG Hao, ZHANG Jianyun, et al. From changing status to improving capability: construction of an ecological sponge-smart river basins [J]. *Advances in Water Resources*, 2017, 28(2):302-310. (in Chinese))
- [21] WANG H, JIA Y W, YANG G Y, et al. Integrated simulation of the dualistic water cycle and its associated processes in the Haihe River Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(27):3297-3311.
- [22] IBRAHIM S. Impact of greenhouse gases and climate change[J]. *Nature*, 2016, 2(12):250-274.
- [23] DAMANIA R, DESBUREAUX S, HYLAND M, et al. Uncharted waters; the new economics of water scarcity and variability[M]. Washington:World Bank, 2017:9.
- [24] 邓铭江. 三层级多目标水循环调控理论与工程技术体系[J]. *干旱区地理*, 2019(5):961-975. (DENG Mingjiang. System of three-scale multi-objective water cycle regulation theory and engineering technology [J]. *Arid Land Geography*, 2019(5):961-975. (in Chinese))
- [25] 褚俊英, 周祖昊, 王浩, 等. 流域综合治理的多维嵌套理论与技术体系[J]. *水资源保护*, 2019, 35(1):1-5. (CHU Junying, ZHOU Zuhao, WANG Hao, et al. Study on multi-dimensional nested theory and technological system for comprehensive watershed management [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(1):1-5. (in Chinese))
- [26] HERING J G, INGOLDK M. Water resources management: what should be integrated? [J]. *Science*, 2012, 336(6086):1234-1235.
- [27] 夏军. 水文非线性系统理论与方法[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002:7-8.
- [28] BRADLEY A A. Regional frequency analysis methods for evaluating changes in hydrologic extremes [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(4):741-750.
- [29] BOWEN G J. A faster water cycle[J]. *Science*, 2011, 332(6028):430-431.
- [30] 王浩, 秦大庸, 肖伟华, 等. 汤逊湖流域纳污能力模拟与水污染控制关键技术研究[M]. 北京:科学出版社, 2012:1-2.
- [31] WU F, MENG W, ZHAO X, et al. China embarking on development of its own national water quality criteria system[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(21):7992-7993.
- [32] AZNAR-SÁNCHEZ J A, VELASCO-MNÑOZ J F, BELMONTE-UREÑA L J, et al. The worldwide research trends on water ecosystem services [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 99:310-323.
- [33] LIU C, WALLING D E, HE Y. Review: the international sediment initiative case studies of sediment problems in river basins and their management [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2018, 33(2):128-131.
- [34] 胡春宏, 王延贵, 陈绪坚. 流域泥沙资源优化配置关键技术探讨[J]. *水利学报* 2005, 36(12):1405-1413. (HU Chunhong, WANG Yangui, CHEN Xujian. Optimal deployment of sediment resources in river basins [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(12):1405-1413. (in Chinese))
- [35] GERBERSDORF S U, WIEPRECHT S. Biostabilization of cohesive sediments: revisiting the role of abiotic conditions, physiology and diversity of microbes, polymeric secretion, and biofilm architecture[J]. *Geobiology*, 2015, 13:68-97.
- [36] 胡春宏. 黄河水沙变化与治理方略研究[J]. *水利发电学报*, 2016, 35(10):1-11. (HU Chunhong. Changes in runoff and sediment loads of the Yellow River and its management strategies [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(10):1-11. (in Chinese))
- [37] 张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. *水科学进展*, 2016, 27(4):485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(4):485-491. (in Chinese))
- [38] LAVELL A, OPPENHEIMER M, DIOP C, et al. Climate change: new dimensions in disaster risk, exposure,

- vulnerability, and resilience [C]//Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [39] YAN D, WENG B, WANG G, et al. Theoretical framework of generalized watershed drought risk evaluation and adaptive strategy based on water resources system [J]. *Natural Hazards*, 2014, 73(2): 259-276
- [40] ZHAO F, LI H, LI C, et al. Analyzing the influence of landscape pattern change on ecological water requirements in an arid/semi-arid region of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 1-13.
- [41] FO X P, HUTTON P H, HOWES D J, et al. Reconstructing the natural hydrology of the San Francisco Bay-Delta watershed [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2015, 19(10): 4257-4274.
- [42] GRAF W, LEITNER P, HANETSEDER I, et al. Ecological degradation of a meandering river by local channelization effects: a case study in an Austrian lowland river [J]. *Hydrobiologia*, 2016, 772(1): 145-160.
- [43] LIU C, WALLING D E, SPREAFICO M, et al. Sediment problems and strategies for their management-experience from several large river basins [R]. Paris: the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2017.
- [44] WANG Z Y, LEE J H W, MELCHING C S. River dynamics and integrated river management [M]. Berlin: Springer, 2015.
- [45] 江恩慧, 王远见, 张原锋, 等. 黄河泥沙研究新进展 [J]. *人民黄河*, 2016, 38(10): 24-31. (JIANG Enhui, WANG Yuanjian, ZHANG Yuanfeng, et al. New advances in Yellow River sediment research [J]. *Yellow River*, 2016, 38(10): 24-31. (in Chinese))
- [46] LI Binquan, LIANG Zhongmin, ZHANG Jianyun, et al. Attribution analysis of runoff decline in a semi-arid region of the Loess Plateau, China [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2018, 131(1/2): 845-855.
- [47] 翟正丽, 桑学锋, 顾世祥, 等. 基于水资源配置平衡的云南省水系连通格局效果分析 [J]. *水资源保护*, 2019, 35(3): 48-52. (ZHAI Zhengli, SANG Xuefeng, GU Sixiang, et al. Effect analysis of water system connectivity pattern in Yunnan Province based on water resources allocation balance [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(3): 48-52. (in Chinese))
- [48] 严登华, 翁白莎, 王浩等著. 区域干旱形成机制与风险应对 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 20-21.
- [49] SOFIA G, RODER G, DALLA F G, et al. Flood dynamics in urbanised landscapes: 100 years of climate and humans' interaction [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1-12.
- [50] PALMER, M A, LIU J, MATTHEWS J H, et al. Manage water in a green way [J]. *Science*, 2015, 349(6248): 584-585.
- [51] WANG X, DAIGGER G, LEE D J, et al. Evolving wastewater infrastructure paradigm to enhance harmony with nature [J]. *Science Advances*, 2018, 4(8): 0210.
- [52] YANG M, DONG J K, MARIN A. Flexo-photovoltaic effect [J]. *Science*, 2018, 360: 904-907.
- [53] CARDINALE, B. Biodiversity improves water quality through niche partitioning [J]. *Nature*, 2011, 472: 86-89.
- [54] STRASSBURG, B B N, BEYER H L, CROUZEILLERS R, et al. Strategic approaches to restoring ecosystems can triple conservation gains and halve costs [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3(1): 62-70.
- [55] MANNING, P, VANDERPLAS F, SOLIVERES S, et al. Redefining ecosystem multifunctionality [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(3): 427-436.
- [56] CAO S, CHEN L, SHANKMAN D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: lessons in ecological restoration [J]. *Earth Science Reviews*, 2011, 104(4): 240-245.
- [57] 王夏晖, 何军, 饶胜, 等. 山水林田湖草生态保护修复思路与实践 [J]. *环境保护*, 2018, 46: 17-20. (WANG Xiahui, HE Jun, RAO Sheng, et al. Design of implementation path of ecological engineering for ecological protection and restoration of multi ecological elements [J]. *Environmental Protection*, 2018, 46: 17-20. (in Chinese))
- [58] BIRD R B, NIMMO D. Restore the lost ecological functions of people [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(7): 1050-1052.
- [59] MEYER A, HUETEPERE J A. Conservation; Nicaragua Canal could wreak environmental ruin [J]. *Nature News*, 2014, 506: 287.
- [60] United Nations Development Programme (UNDP). Human development report 2019: beyond income, beyond averages, beyond today: inequalities in human development in the 21st century [R]. New York: UNDP, 2019.
- [61] BATES B C, KUNDZEWICZ Z W, WU S, et al. Climate change and water. technical paper of the intergovernmental panel on climate change [R]. Geneva: IPCC, 2008.
- [62] 大寨大队科研小组. 大寨“海绵田” [M]. 北京: 科学出版社, 1975: 22.

(收稿日期: 2020-03-13 编辑: 彭桃英)

