

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.04.004

# 完善新时期水资源管理指标的方法

吴炳方<sup>1,2</sup>, 曾红伟<sup>1,2</sup>, 马宗瀚<sup>1</sup>, 苟思<sup>3</sup>, 刘俊国<sup>4</sup>, 王金霞<sup>5</sup>, 蒋礼平<sup>3</sup>

(1. 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. World Bank, Washington DC 20433, USA; 4. 南方科技大学环境科学与工程学院, 广东 深圳 518055; 5. 北京大学现代农学院, 北京 100091)

**摘要:** 气候变化和人类活动极大地改变了流域水循环和水资源分布, 以供需管理为核心的水资源管理方法难以缓解缺水的局面。中国提出了新时期水资源相关管理政策, 然而受数据、对象和方法的限制, 新政策采用的管理指标和内涵目标间存在差异, 在缺水地区还必须增加耗水总量控制的约束指标, 实施取水与耗水的双向管控。本文通过综述国内外最新进展和案例, 提出新时期水资源管理指标的完善方法: 建立以蒸散监测为核心的现代耗水要素监测体系; 健全以耗水上限为核心的水资源刚性约束方法, 通过综合考虑环境流量用水和生态服务耗水的需求, 核定流域人类活动水资源可消耗量的上限, 实现水资源的刚性约束; 实施耗水约束机制, 通过约束农业规模、合理规划生态恢复治理的规模和方式, 实现水资源发展的“四水四定”既定原则。期望通过数据、方法和措施的创新能够切实保障新时期水资源治理模式的有效实施。

**关键词:** 水资源; 耗水; 双控; 遥感; 蒸散发

中图分类号: TV213.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2022)04-0553-14

水资源不足是人类面临的共同挑战, 全球近 40 亿人面临严重的缺水问题<sup>[1]</sup>, 缺水导致社会内部动荡, 加剧了国家之间的冲突<sup>[2]</sup>。在高强度人类活动影响下, 流域水循环过程、产汇流机制和水资源分配都发生了显著的变化<sup>[3-4]</sup>。当前, 全球只有 37% 的河流整体保持自由流动, 绝大多数人口稠密地区的河流已经丧失自由流动性<sup>[5]</sup>。河流流量调节和灌溉还在一定程度上增加了水资源的消耗<sup>[6-7]</sup>, 随着人口持续增长和经济社会的不断发展, 在人地耦合的复杂流域, 如何实现水资源的科学调控, 应对日益突出的水资源供给和需求之间的矛盾成为流域水管理的当务之急<sup>[7]</sup>。为有效管理水资源, 防止水资源枯竭, 各国出台了系列政策, 采取了各种措施应对危机, 但是危机并没有得到有效缓解<sup>[8]</sup>, 局部地区甚至还有加剧的趋势<sup>[9]</sup>, 如中国华北、印度北部与美国加州等全球重要农业区, 尽管采取了大量的节水措施, 但地下水超采和湖泊萎缩现象依然突出<sup>[10-11]</sup>, 甚至出现“越节水、超采越严重”的悖论<sup>[6, 12-13]</sup>, 说明以往的水资源管理方式亟待改进。

当前供给侧的水资源管理占据主流地位, 该方法认为气候变化是导致水资源不足的主要原因, 往往倾向于通过工程措施增加供水解决缺水的问题<sup>[9]</sup>。后来系列实践发现仅从供给侧进行水资源管理的效果有限, 越来越多的国家采用水资源需求侧的管理作为解决缺水的主要措施<sup>[14-15]</sup>, 特别是引入水权、水交易等市场机制来促进水资源的优化配置<sup>[16]</sup>。例如, 澳大利亚和美国加州都将水资源管理从传统的供给侧管理转变为更全面的基于需求侧的水资源管理, 建立了包括水市场、水定额、节水技术和综合水资源管理计划在内的调控体系<sup>[17]</sup>。澳大利亚引入水市场, 允许水权的买卖, 发挥市场在水资源调配中的作用, 促进水从低产值向高附加值的产业交易转移, 同时政府可通过直接回购水权以增加环境流量<sup>[14]</sup>。以色列采用双管齐下的方式管理水资源, 一方面通过海水淡化等举措保障淡水供应, 另一方面政府采用阶梯水费的方式提高用水效益, 实现对水资源的合理使用, 从而确保水资源安全<sup>[15]</sup>。然而遗憾的是, 部分国家的相关措施并没有达到预期

收稿日期: 2022-02-24; 网络出版日期: 2022-07-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20220713.1329.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41991232)

作者简介: 吴炳方(1962—), 男, 江西玉山人, 研究员, 博士, 主要从事水资源、农业与生态遥感研究。

E-mail: wubf@aircas.ac.cn

的效果<sup>[14-17-18]</sup>，由于干旱和地下水的持续超采，美国加州中部地区地下水位快速下降<sup>[19]</sup>，地面年沉降速度达到 0.5 m，要实现地下水的采补平衡目标，加州圣华金河谷需休耕 15% 的灌溉农田<sup>[20]</sup>。近些年，澳大利亚墨累-达令流域累积投资 53 亿美元治理水资源，但成效并不显著<sup>[14]</sup>，其河口水量锐减导致生物多样性受到威胁。上述案例说明，不论是基于供给侧的供水管理，还是基于需求侧的需水管理，都存在明显的漏洞。一是当前的供需管理都是通过对径流数据分析、趋势预判进行的，但拦河筑坝、灌溉、雨水收集等人类活动严重改变了流域水循环过程，地面观测得到的径流信息已不能全面反映实际的流域水循环状况，容易导致预判失真<sup>[21]</sup>；二是当前水资源管理的对象主要关注蓝水，而长期忽视绿水的消耗<sup>[22]</sup>，随着生态恢复，生态消耗的绿水资源对水资源影响越来越大，局部地区已经达到了水资源承载能力的极限<sup>[23-25]</sup>，研究表明黄淮海流域的归一化植被指数每增加 10%，流域年径流量平均减少 8.3%<sup>[26]</sup>；三是缺乏对水资源消耗量有效的监测与调控方法，难以实施工行星边界的水资源约束<sup>[22-27]</sup>。

中国水资源空间分布不均<sup>[28]</sup>，水资源人均占有量少<sup>[29]</sup>，长期面临着“水少、水多、水脏、水浑”的系列顽疾<sup>[30-32]</sup>。为解决水资源不足的问题，中国成立了庞大的机构来管理水资源<sup>[33]</sup>，颁布制定了各类管理政策和约束指标，然而工程驱动的思想在水资源管理中根深蒂固，不论是水资源供给不足的缓解<sup>[29]</sup>，还是约束指标的落实最终都是通过工程措施来实现<sup>[34]</sup>，而对政策和指标本身的适应性、可行性缺乏全面的分析、比较和评估<sup>[29]</sup>，使得水资源问题周而复始，间歇性阵痛，部分区域问题愈发严重，如黄河、海河、西北地区的地下水超采严重<sup>[35]</sup>。为促进水资源的可持续利用，2012 年以来，中国制定并颁布了一系列新的水资源管理政策，力求在生态文明建设中找出一条水资源可持续利用的高质量发展路径，以适应新时期发展要求<sup>[36]</sup>。然而受数据和方法的限制，新政策采用的管理指标和内涵目标间存在一定差异，依据现有指标采取的各类措施难以达到新时期水资源管理政策的期许。因此，本文通过综述国内外最新进展和案例，从数据保障、方法发展和具体措施等方面提出完善新时期水资源管理指标的方法，促进这些新的政策能够落实到位，切实发挥应有的作用。

## 1 新时期水资源相关管理政策采用的指标

2011 年，中央一号文件明确提出在全国实行最严格的水资源管理制度，2012 年 1 月，国务院发布了《关于实施最严格水资源管理制度的意见》，确立用水总量、用水效率、水功能区限制纳污等“三条红线”，并将指标分解到全国 2 500 多个县级行政单元，建立了各级责任制度<sup>[37]</sup>。2012 年，习近平总书记在中央财经领导小组第五次会议上提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的“十六字”治水思路，成为新时期水利高质量发展的根本遵循；2014 年，中国在华北平原启动了地下水超采综合治理试点。2016 年，习近平总书记在党的十八届五中全会上明确提出“实行水资源消耗总量和强度双控行动”，紧接着水利部、国家发展和改革委员会联合印发了《“十三五”水资源消耗总量和强度双控行动方案》，在“三条红线”的基础上，进一步增加了耗水管控的新内涵。党的十九届五中全会要求全面提高资源利用效率，实施国家节水行动，把水资源作为最大的刚性约束。2014 年的中央财经领导小组第五次会议、2021 年的深入推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上，习近平总书记强调“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”的水资源发展“四水四定”原则，重新定义了“水-人-城”和谐发展理念。2019 年，国家发展和改革委员会、水利部联合印发了《国家节水行动方案》，对万元国内生产总值用水量、万元工业增加值用水量、规模以上工业用水重复利用率、农田灌溉水有效利用系数等提出了新的要求。相关政策的内涵目标与对应的管理指标见表 1，并将指标分解到省、市、县，作为水资源管理体系绩效考核的依据，强化目标约束。

水资源计量方法的差异会对水资源管理产生截然不同的影响<sup>[38]</sup>，基于不同用水控制指标的水资源目标实现进度评估有时存在相左的情况<sup>[39]</sup>。为落实新时期水资源治理措施而设计的相关指标(表 1)包括取(用)水量、用水效率、水环境等约束性指标，但没有耗水量指标。对于干旱缺水地区而言，限制取水量需要与控制耗水同步；对于水量丰富的地区，限制取水量并不是优先事项，水环境质量才是主要问题，也就是区域水

管控指标的设定需要与区域面临的最紧迫的水资源问题相符<sup>[37]</sup>。

约束取水总量和提高用水效率并不一定能降低耗水总量。从理论上说,限制取水量可以减轻水资源的利用强度,倒逼改革以提高用水效率,但国内外的大量实践已经证明仅靠约束取水量很难达到减少耗水的预期效果<sup>[11-13, 37, 40-41]</sup>,下面从3个方面说明。

表1 新时期水资源治理制度与指标

Table 1 Policies and indicators of new paradigm water governance

时间	政策	内涵目标	管理指标
2012年	三条红线	用水总量红线	2030年用水总量
		用水效率红线	2030年万元工业增加值用水量 2030年农田灌溉水有效利用效率
		水功能区限制纳污红线	2030年水功能区水质达标率
2014年	“四水四定”原则	以水定城	建立初始水权分配和交易制度 水资源监管“硬措施” 2025年水资源刚性约束“硬指标”
		以水定地	
		以水定人	
		以水定产	
2016年	双控目标	水资源消耗总量	2020年用水总量 2020年万元生产总值用水量 2020年万元工业增加值用水量
		耗水强度	2020年农田灌溉水有效利用效率
			万元国内生产总值用水量 万元工业增加值用水量 规模以上工业用水重复利用率 农田灌溉水有效利用系数
2019年	国家节水行动方案		
2020年	刚性约束	重点河湖生态流量	江河水量分配
		江河流域水量分配	河湖生态流量水量保障目标
		地下水管控指标	地下水的取水总量和水位双控指标
		地区可用水量	区域的可用水量

第一种情况,在取水量一定的前提下,用水效率越高,消耗的水量越大。以2个农场为例,1个采用漫灌,灌溉效率为70%;另1个采用滴灌,灌溉效率为95%。假设2个农场的取水量相同,采用漫灌的农场,消耗了取水量的70%,而剩下的30%将回流到河流或含水层,供其他用户或生态环境再次使用;采用滴灌的农场,消耗了取水量的95%,只剩下5%的水回流到河流或含水层。二者尽管取水量相同,但对流域水资源的可持续利用和生态环境的影响截然不同,如果要保持2个农场的耗水量相同,采用滴灌的农场需要减少约26%的取水量。然而要调减取水量困难重重,一是从水权的角度来说有失公允,不利于鼓励节水措施的落实;二是难操作,涉及到多方经济利益和区域发展机会的博弈。因此,取水权一旦确定,一般不会轻易变动,如黄河“八七”分水方案实施后其分配原则就没有变过,但该方案在2014年后就已不能适应环境的变化<sup>[42]</sup>。

第二种情况,在取水量一定的前提下,提高灌溉效率并不总是能达到预期的节水效果<sup>[43]</sup>。如果采用漫灌的农场也将灌溉效率提高到95%,意味着取水量可以减少26%,如果这部分节约的水量没有用于扩大灌溉面积或另作他用,就能实现取水量的节约,但受利益驱动,农场往往会将灌溉效率提升节省的水量用于扩大灌溉面积,反而增加了水资源消耗,即反弹效应<sup>[13]</sup>或“灌溉效率”悖论<sup>[18]</sup>。2002—2007年建设节水型社会期间,张掖市有效灌溉面积从2002年的1531 km<sup>2</sup>增加到2007年的2073 km<sup>2</sup>,在有效保障粮食安全、提高

农民收入的同时,整体增加的耗水几乎抵消了提升灌溉效率带来的节水成效<sup>[13]</sup>。

第三种情况,取水量确定后,经济利益将促使用户提高耗水强度,期望从相同的水量中获得更多的产出(值),这反而会增加耗水量。在现实中,农民倾向于种植经济价值更高的作物或提高种植密度以提增产量<sup>[40]</sup>,如新疆地区的棉花<sup>[44]</sup>、葡萄、果园种植的效益显著,农户普遍采用膜下滴灌等技术提高灌溉效率,但这些高附加值的经济作物耗水量远高于玉米等大田作物;在相同的取水量约束下,工业部门可以通过技术的进步无限提高水的循环利用率,增加工业成品的数量,部分工业用水固化在产品中被消耗,反而增加了工业耗水量或虚拟耗水量<sup>[45]</sup>。

因此,在缺水地区,仅限制取水量和提高效率不足以限制水资源的过度利用,还必须增加耗水总量约束指标。耗水量包括通过地表蒸发和植物蒸腾作用从流域永久损失的蒸散发量( $E_T$ ),还包括生产和生活消耗的水量。将耗水总量作为刚性约束指标,有利于协调各用水行业的耗水量,倒逼各行业基于耗水量去提高用水效率,推动用水结构的优化升级,促进社会经济的高质量发展<sup>[13 46]</sup>。就新时期水资源管理指标而言,需要在“三条红线”<sup>[37]</sup>和“双控目标”的指标中增加耗水指标;在《国家节水行动方案》设定指标的基础上,需要增加与耗水相关的指标,如流域耗水上限、实际耗水总量、农业耗水总量、灌溉增加的耗水量、工业耗水量与耗水率、生活耗水量与耗水率、自然耗水量(不可控 $E_T$ )、人类活动耗水量(可控 $E_T$ )等<sup>[47]</sup>。另外,基于市场机制的需求管理工具(水价政策、水权制度、水市场交易、生态补偿政策等)也应该将基于用水量的设计原则改为以取水和耗水并重的思路进行重新设计。从而通过取水、耗水双管齐下的管理,从根本上打破“越节水,水资源越匮乏”的怪圈<sup>[18]</sup>。

## 2 建立以蒸散监测为核心的耗水要素监测体系

耗水指标的缺失与耗水监测手段和方法不足密切相关。新时期水资源治理制度的落实情况与实施效果评价需要可靠的取水、用水与耗水监测信息支撑,即何时、何地、谁利用或消耗了水资源量,是否超标或达到预期目标等,涉水信息的准确测量能显著提升管理效率。当前,中国已经建立了比较完善的降水、径流、地下水监测网络和取水量计量体系,但全国性的耗水总量、强度与过程监测手段还比较匮乏,“双控行动”方案和“四水四定”是否落实的监督体系亟待加强。在水资源消耗中,蒸散发是耗水最主要的组成部分,占人类水资源消耗总量的80%以上,只有实现蒸散发的精准监测和业务化运行,才能促进和保障新时期水资源管理制度的落实。

蒸散发看不见摸不着,不易观测,一直是水循环和水资源管理的难点。早在20世纪50年代,以黄秉维和谢家泽为首的科学家就提出并策划了“大搞水平衡,攻破蒸发关”的倡议<sup>[48]</sup>。在几代人的不懈努力下,随着遥感的不断进步,蒸散发遥感监测方法取得了很大的发展,如ETWatch模型及系统<sup>[49-50]</sup>。该模型揭示了不同气候特点下蒸散发的作用机理、过程、主导影响因子及其耦合机理<sup>[51-53]</sup>,充分利用多源遥感数据解决蒸散发遥感监测普遍存在的共线性问题<sup>[54]</sup>,保证了蒸散发遥感监测的可靠性、稳定性和时空连续性<sup>[55]</sup>,以及在不同气候类型下的适用性<sup>[56]</sup>。基于ETWatch模型开发的多时空尺度蒸散发遥感监测系统与云平台(<http://ETWatch.cn>)<sup>[57]</sup>,实现了从数据处理、模型标定、蒸散发监测与分析的全链条流程,有效解决地块、流域、区域多尺度的蒸散发耗水量动态监控的难题<sup>[58]</sup>。基于ETWatch云平台,能定制符合流域特点的蒸散发遥感监测模块<sup>[57]</sup>,大幅降低蒸散发遥感监测的成本,其运行维护的费用远低于灌区量水设施的维护成本。ETWatch先后以单一技术来源服务世界银行全球环境基金(GEF)海河流域水资源与水环境综合管理<sup>[59]</sup>、世界银行贷款吐鲁番地区节水灌溉项目<sup>[60]</sup>、GEF赠款艾比湖流域可持续性和生物多样性保护项目<sup>[61]</sup>、GEF水资源与水环境综合管理主流化项目,并出口埃及遥感与空间局,为流域尺度耗水总量、耗水结构、耗水演变的时空过程和水资源的优化配置提供了关键的蒸散发信息支撑。

工业耗水和生活耗水是流域人类活动耗水的重要组成部分,当前规模以上工业和城镇居民生活用水都建立了完善的计量体系,但工业和生活的耗水量监测,特别是居民生活耗水还缺乏详细的数据支撑<sup>[62-64]</sup>,因

此, 需要在供水监测的基础上, 新建或扩建排水监测网络, 完善工业生活排水监测体系, 开展不同类型工业、企事业单位和家庭的耗水核算, 实现工业耗水、生活耗水的定量观测, 为工业和生活耗水的调控提供支持<sup>[37 45 65]</sup>。

除蒸散发遥感监测外, 遥感独立、客观、重复监测的特点, 还能够为新时期水资源管理制度的落实提供多维度的数据支撑, 如监测降水<sup>[66]</sup>、土壤水和地下水的蓄变量<sup>[67]</sup>、用水效率<sup>[68]</sup>、流域下垫面<sup>[69-70]</sup>、河网<sup>[71]</sup>、河宽<sup>[72]</sup>、水面<sup>[10 73]</sup>、耕地种植结构变化<sup>[74-75]</sup>以及灌溉面积变化<sup>[76]</sup>等, 提供独立于传统水利观测体系的监测手段和新的监督指标, 反映人类活动对水循环过程的干预<sup>[70]</sup>。

尽管中国已在水资源要素监测体系和管理机制构建方面取得成效, 但由于涉水部门众多且分散, 水管线仍存在“九龙治水、多级管理、分层负责”的特点, 各部门、各层级单位根据职能构建不同的水资源相关指标的监测网络, 相互之间存在信息不统一、甚至矛盾等问题<sup>[77]</sup>。遥感监测手段能够为多部门、多层级提供客观的、时空连续的、一致的监测数据, 推动解决跨行政边界与部门之间数据不一致的问题, 满足水资源双控目标的监测需求。

### 3 健全以耗水上限为核心的水资源刚性约束方法

新时期水资源管理制度的首要任务是水资源的刚性约束, 也就是确定耗水总量约束目标<sup>[78]</sup>。现有的水资源管理还是以“供需平衡”为核心, 主要是对水循环过程中的径流量实施管理<sup>[79]</sup>, 通过工程措施和管理等手段提高水资源的利用效率, 增加供水量或减少用水量, 而对生产活动和生态环境保护方面上发挥重要作用的绿水资源如土壤水耗散并不涉及。然而, 由于人类活动极大地改变了自然水文循环过程<sup>[3 80]</sup>, 如灌溉扩张、秸秆还田、雨水收集坑、坡改梯及水土保持鱼鳞坑等<sup>[81-82]</sup>, 这些干预措施都将改变流域产汇流机制、水资源分布格局, 同时水文模型也难以表现区域生态恢复导致的耗水量变化, 增加了水资源估算的不确定性<sup>[83]</sup>。因此, 需要采用新的方法, 量化人类可消耗的水资源量, 即流域水资源可消耗量上限(  $W$  )<sup>[84]</sup>, 也就是流域可消耗的水资源量( 蓝水 )<sup>[27 85]</sup>。

从流域水量平衡角度, 流域来水量包括降雨(  $P$  ) 和外流域来水(  $I$  ), 减去不可控的自然蒸散发耗水(  $E_{T_n}$  ) 和不可控或不可利用的外流量(  $O$  ), 就是流域人类活动可耗水总量的上限(  $W = P + I - E_{T_n} - O$  )<sup>[84]</sup> ( 图 1 )。  $E_{T_n}$  是自然( 包括森林、草地、湿地 ) 作用产生的蒸散发量, 也是不可控  $E_T$ 。蒸散发遥感监测的进步为  $E_{T_n}$  的估算提供了基础, 当前蒸发遥感监测的年误差已控制在 3% 以下<sup>[49]</sup>, 能够为流域水量平衡分析提供精准数据支撑, 即便降雨、蒸散发与径流间的闭合性存在一定的问题, 也可以通过相关方法消除<sup>[86-87]</sup>。在遥感

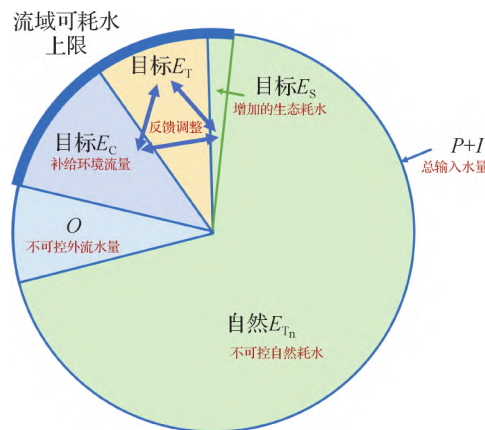


图 1 流域可耗水上限、目标  $E_T$ 、目标  $E_C$ 、目标  $E_S$  间的内在联系

Fig. 1 Nexus of basin available water consumption, target  $E_T$ , target  $E_C$  and target  $E_S$

监测  $E_T$  的基础上,可进一步将蒸散发分解为  $E_{T_n}$  和人类活动消耗的蒸散发 ( $E_{T_h}$ ),即可控蒸散发<sup>[84]</sup>。用数据驱动的方法,能有效解析流域尺度蒸散发变化中自然要素和人类活动的贡献度<sup>[88]</sup>,如临近的种植相同作物的雨养地和灌溉地,两者的耗水差异就是在其他影响因子相同的情况下因灌溉引起的蒸散发变量<sup>[47]</sup>,贡献度的分离还可进一步揭示气候变化、人类活动如耕地扩张和大规模植被恢复对水资源消耗的影响。此外,通过耦合气候模式,还可以厘定气候变化导致的长期干旱或降水波动对流域可耗水量上限的影响<sup>[11]</sup>,从而为目标年(2035年、2050年)耗水上限目标的确定提供依据。流域耗水上限目标可通过上下游和左右岸的权衡,进一步分配到流域内的各行政单元,约束各行政单元的耗水总量<sup>[27 84 89]</sup>。

然而耗水上限 ( $W$ ) 并不是人类活动实际可以消耗的水量,而是  $E_{T_h}$ 、生态耗水增量 ( $E_S$ ) 和水环境用水 ( $E_C$ ) 的总和<sup>[90]</sup>。人类活动耗水目标 ( $E_{T_i}$ ) 的制定还需要综合考虑生态耗水增量目标 ( $E_{S_i}$ ) 和水环境用水目标 ( $E_{C_i}$ )。 $E_{T_i}$  是对流域内生态系统不造成负面影响的情形下,可供流域人类经济社会活动消耗的水量。 $E_{T_i}$  随着流域降水量、生态环境保护目标的变化而不断修正。 $E_{C_i}$  是指为维持河流基本形态、基本生态功能、水生生物群落生物多样性的河道内环境流量<sup>[91]</sup>。环境流量与水功能和水质要求密切相关,对水功能和水质的要求越高,需要的环境流量也就越多;如果不控制污染,则需要更多的环境流量才能达到水质目标,导致人类可消耗的水量减少。流域生态系统服务功能的改善,也会增加水的消耗,尽管该项消耗主要体现自然蒸散耗水,但人类活动如生态恢复、水土保持也会改变自然蒸散耗水<sup>[23 25]</sup>,需要在原有的水量-水质-水生态“三水融合”的基础上,充分考虑陆生生态的耗水过程及变化<sup>[92]</sup>。目标  $E_T$ -目标  $E_C$ -目标  $E_S$  的互馈(简称 3E)与水资源短缺、水环境污染和生态系统退化的挑战相对应。

“3E”对应的耗水量互相关联,此消彼长,任何一方的增加意味着另外两方的减少(图1)。减少人类活动耗水(即减少目标  $E_T$ ) 能够增加径流,可以稀释更多的污染物,改善水质,也就增加了目标  $E_C$ ; 污染控制(即减少目标  $E_C$ ) 可以缓解与污染相关的水资源短缺,从而增加目标  $E_T$ ; 生态系统保护和恢复(即增加目标  $E_S$ ) 可能会增加耗水量,从而导致目标  $E_T$  或目标  $E_C$  的减少。因此,与  $E_T$ 、 $E_C$  和  $E_S$  相关的措施和行动需要仔细评估,并应考虑潜在的生态系统服务间的权衡<sup>[61]</sup>。

“3E”集成方法首先通过水平衡确定  $W$ , 进而依据水质要求确定允许的最大污染物排放量和相应环境流量,并评估生态服务的耗水变化,通过三者之间的不断交互和权衡,考虑不同部门的活动对耗水的扰动,尤其是生态工程的实施对耗水的影响,从而找到目标  $E_T$ -目标  $E_C$ -目标  $E_S$  间的平衡点,实现人类活动耗水、生态耗水和水环境的和谐统一。然后通过优化水资源利用、水污染治理和生态系统恢复活动,如农田改造和灌溉耗水控制农田耗水量,森林提质改造等以降低自然耗水量,形成对蒸散耗水增长部分的有效控制,多方优化后的总耗水量应低于可持续的耗水量水平,即  $E_{T_i} + E_{C_i} + E_{S_i} \leq W$  或  $E_{T_i} \leq W - E_{C_i} - E_{S_i}$ 。

“3E”方法是资源性缺水地区在水资源刚性约束和“四水四定”原则下实现“水-人-城”和谐发展的流域水资源评估方法,权衡生产生活耗水目标(现状  $E_T$ 、目标  $E_T$ )、生态耗水(现状  $E_S$ 、目标  $E_S$ ) 和水环境用水目标(现状  $E_C$ 、目标  $E_C$ ),解决“水少、水脏、水浑”的问题。该方法不仅综合考虑了水环境用水与生态耗水的需求,也反映了人类活动对流域水循环过程和水资源时空分布的影响,而无需对径流数据进行还原,降低了不确定性。该方法已应用于 GEF 水资源与水环境综合管理主流化项目<sup>[93]</sup>、世界银行吐鲁番项目<sup>[37]</sup> 和黄河项目<sup>[94]</sup>、摩洛哥可持续农业用水项目与巴基斯坦水和农业改造项目的技术评估<sup>[95]</sup>,以及联合国粮农组织的巴基斯坦气候基金项目<sup>[96]</sup>。

#### 4 落实以耗水管控为核心的耗水约束机制

新时期水资源管理制度中的“刚性约束”和“双控行动”是以水资源消耗总量是否超过允许耗水量为评判标准,旨在通过减少消耗实现水资源的可持续利用<sup>[78]</sup>。“四水四定”原则的主要对象是农业耗水、景观(人工林、水土保持措施、城市绿地、人工水体等)耗水、工业和生活耗水等,目的是采取合适的管理措施控制

或减少人类活动耗水量,确保耗水总量约束目标的实现。因此在水资源缺乏地区,需要形成耗水约束机制。

#### 4.1 落实以水定地的方针,约束农业耗水总量

灌溉耗水占人类蓝水耗水总量的82%以上<sup>[47]</sup>,是耗水管理的主要对象。灌溉效率是评估农田节水的主要指标,该指标通过减少灌溉水在输送过程中的“跑、冒、漏、滴、渗”现象,以降低单位面积农田的灌溉取水量,实现农田灌溉水的节约利用。但是灌溉效率的提升,将显著减少回流到流域水文系统的水量,导致地下水含水层和下游河段的枯竭<sup>[14]</sup>,造成河道和流域生态环境的破坏。此外,以提升灌溉效率为目的的节水,还容易导致灌溉面积的无序扩大和单位农田耗水量的提升,产生灌溉水利用效率悖论<sup>[18]</sup>。位于干旱、半干旱区的黑河流域大力推行节水型社会建设,1997—2007年间,技术进步使单位面积耗水量下降了40%;由于节水增加了下游水资源的供应,作物种植面积扩大,使得流域虚拟水量出口增加,在很大程度上抵消了技术进步节水效果,整个流域节水效果并不明显<sup>[45]</sup>。20世纪80年代,河套灌区面积680万亩(约合45.33万ha),年均引黄水52亿 $m^3$ ,2013—2018年河套灌区灌溉面积增大,规模超1000万亩(约合66.67万ha),但取水量基本维持在47亿 $m^3$ ,呈下降趋势,平均灌溉水量从之前的7500 $m^3/ha$ 下降至4200 $m^3/ha$ ,但灌区地下水水位却迅速下降<sup>[97]</sup>,究其原因现有节水模式并没有考虑耗水量。农田灌溉 $E_T$ 占总 $E_T$ 的比重与干燥度成显著正相关关系,西部干旱区农田灌溉 $E_T$ 占比在80%左右。因此,在保证粮食安全的前提下,需要赋予农田节水的新内涵,一是需要在流域和地块2个尺度,增加流域和农田耗水总量的约束指标,确保将农业耗水总量控制在约束范围内;二是要以水分生产率和地块耗水为约束,遴选与推广既能保证粮食产量、又能减少农田耗水量的节水措施和技术<sup>[98]</sup>。如秸秆覆盖保墒可减少耗水量10%~30%,塑料覆盖保墒可减少耗水量10%~20%,膜下滴灌、机械蓄水保墒、秸秆还田、塑料薄膜覆盖保墒等也具有一定的降耗效果<sup>[99-100]</sup>,当这些措施的节水潜力远不能解决当前水资源过度消耗的问题时<sup>[59,101]</sup>,需要以耗水总量为约束,以水定地,通过种植结构调整、休耕、轮作等减少农业耗水<sup>[43,102]</sup>或通过跨流域调水以补充水资源的亏缺<sup>[103-104]</sup>。最新研究表明,通过优化种植结构,全球能再多养活8.25亿人,同时农业种植中水和灌溉水的消耗能分别下降14%和12%<sup>[105]</sup>。

#### 4.2 强化生态环境与水资源约束,优化生态恢复治理的方式与规模

为治理土地退化和水土流失等问题,中国先后实施了三北防护林、退耕还林等投入大、持续时间长、时间跨度大的生态恢复治理工程。经过几十年的治理,上述工程有效地减轻了流域水土流失的强度,遏制了土地退化的趋势,为流域生态环境的恢复做出了重要贡献。但随着时间的推移,部分生态工程实施区域的水资源消耗量显著增加,土壤含水量显著下降,如黄土高原的植树造林等使得流域的耗水已经逼近区域水资源承载力的极限<sup>[23,106]</sup>,土壤层干化<sup>[107]</sup>;因水资源消耗过快,三北防护林每年都有大批的树木因缺水而死亡,造成不必要的资源浪费<sup>[108]</sup>,如2013年,河北坝上三北防护林大面积干枯死亡,原因就是地下水位快速下降,自然降水无法满足生态需水。

因此,在干旱和半干旱地区的生态环境建设中,要坚决落实“四水四定”原则。在设计生态恢复的方式和规模时需要充分考虑水资源约束,更多地采用当地耐旱树种实现森林的提质改造,补充配套耗水控制措施,合理平衡自然耗水量与社会经济用水需求,真正领会并贯彻“绿水青山就是金山银山”的科学内涵,实施渐进式生态修复<sup>[109]</sup>,指导生态工程的建设。近年来,部分地区为营造“风景优美”的景观,在城市绿地建设的过程中,种植了大量观赏性强的乔木、草坪、绿地,并实施了“造湖大跃进”活动,但因气候干燥,水资源先天不足,各类精心营造的人工景观都需要额外水资源维持,显著增加了水体蒸发,进一步加剧了区域水资源紧张的局面,制约了经济社会的可持续发展。遥感监测表明,干旱地区的乔木、绿地、水体等人工景观的单位面积新增耗水量远远高于灌溉农田新增的耗水量。滹沱河流域的人工林耗水量比农田耗水高约1500 $m^3/ha$ ,干旱、半干旱地区的城市生态环境建设不能照搬照抄“江南水乡”模式。针对城市绿地扩张无序化和水资源约束力不足问题,2021年,国家《“十四五”节水型社会建设规划》提出了坚决制止“造湖大跃进”,严控水面景观用水的指导意见。因此,在水资源不足的区域要严格落实以水定城、以水定产和以水定

人的原则,优化城市生态建设的方式,减少不必要的水资源的消耗和浪费。

## 5 结 语

新时期水资源相关管理政策在政策和法规层面保障了水的可持续发展,然而制度的充分落实需要好的数据、方法和措施保障。本文通过分析新时期水资源管理指标设计所面临的挑战,建议在现有水资源管理指标中,在缺水地区增加耗水管控指标,将耗水总量作为刚性约束指标,协调各用水行业的耗水量,通过取水、耗水双管齐下式的有效管理,从根本上打破“越节水,水资源越匮乏”的怪圈,保障水资源利用的可持续性。本文提出了落实新时期水资源相关管理政策要充分利用最新技术如遥感、人工智能、地球大数据等支持,构建以蒸散发监测为核心的耗水指标监测体系。在中国现有水资源管理方法基础上,需要构建以耗水上限为核心的水资源刚性约束指标,在耗水上限的约束下,综合考虑环境流量用水和生态服务耗水的需求,在对流域内生态系统不造成负面影响的情形下,量化流域人类经济社会活动可消耗的水量,并通过约束农业规模和优化生态恢复治理的方式与规模,做到以水定地、以水定城,实现水资源的可持续利用。

水资源管理制度的落实需要广大水利工作者和用水户的实践。需要从理念和应用工具 2 个角度开展系统培训,转变观念,认识水资源消耗的科学内涵,以及与已有知识的异同,学会如何应用具体措施以减少耗水量、提高效率。农业是耗水大户,在中国占人类耗水量的 82% 以上,农民是农业的主体,更是耗水管理的主要实践者,需要不断提高农民的耗水管理和控制水平。

### 参考文献:

- [1] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Four billion people facing severe water scarcity [J]. *Science Advances*, 2016, 2 (2): e1500323.
- [2] GLEICK P H. Water as a weapon and casualty of armed conflict: a review of recent water-related violence in Iraq, Syria, and Yemen [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2019, 6(4): e1351.
- [3] 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 H, JIA Y W. 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))
- [4] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(3): 313-323. (WANG G Q, ZHANG J Y, GUAN X X, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3): 313-323. (in Chinese))
- [5] GRILL G, LEHNER B, THIEME M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers [J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 215-221.
- [6] JARAMILLO F, DESTOUNI G. Local flow regulation and irrigation raise global human water consumption and footprint [J]. *Science*, 2015, 350(6265): 1248-1251.
- [7] 练继建, 徐梓曜, 宾零陵, 等. 基于 Agent 的水资源管理模型研究进展 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(2): 282-293. (LIAN J J, XU Z Y, BIN L L, et al. Progress of Agent-based modeling for water resources management: a review [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(2): 282-293. (in Chinese))
- [8] FAMIGLIETTI J S. The global groundwater crisis [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(11): 945-948.
- [9] ABBOTT B W, BISHOP K, ZARNETSKE J P, et al. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(7): 533-540.
- [10] PEKEL J F, COTTAM A, GORELICK N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. *Nature*, 2016, 540(7633): 418-422.
- [11] GRAFTON R Q, PITTOCK J, DAVIS R, et al. Global insights into water resources, climate change and governance [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 315-321.
- [12] PERRY C, STEDUTO P, KARAJEH F. Does improved irrigation technology save water? A review of the evidence [M]. Cairo: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017.



- [13] LIU J G, ZHAO X, YANG H, et al. Assessing China's "developing a water-saving society" policy at a river basin level: a structural decomposition analysis approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 190: 799–808.
- [14] GRAFTON R Q. Editorial: water reform and planning in the Murray–Darling basin, Australia [J]. *Water Economics and Policy*, 2017, 3(3): 1702001.
- [15] MARIN P, TAL S, YERES J, et al. *Water Management in Israel: key innovations and lessons learned for water scarce countries* [M]. Washington, DC: World Bank, 2017.
- [16] 李春晖, 孙炼, 张楠, 等. 水权交易对生态环境影响研究进展 [J]. *水科学进展*, 2016, 27(2): 307–316. (LI C H, SUN L, ZHANG N, et al. Advances in ecological environment impacts of water trading [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(2): 307–316. (in Chinese))
- [17] BERBEL J, ESTEBAN E. Droughts as a catalyst for water policy change. Analysis of Spain, Australia (MDB), and California [J]. *Global Environmental Change*, 2019, 58: 101969.
- [18] GRAFTON R Q, WILLIAMS J, PERRY C J, et al. The paradox of irrigation efficiency [J]. *Science*, 2018, 361(6404): 748–750.
- [19] SCANLON B R, FAUNT C C, LONGUEVERGNE L, et al. Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US high plains and central valley [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(24): 9320–9325.
- [20] MURRAY K D, LOHMAN R B. Short-lived pause in Central California subsidence after heavy winter precipitation of 2017 [J]. *Science Advances*, 2018, 4(8): eaar8144.
- [21] COSGROVE W J, LOUCKS D P. Water management: current and future challenges and research directions [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 4823–4839.
- [22] WANG–ERLANDSSON L, TOBIAN A, van der ENT R J, et al. A planetary boundary for green water [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(6): 380–392.
- [23] FENG X M, FU B J, PIAO S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019–1022.
- [24] LI C J, FU B J, WANG S, et al. Drivers and impacts of changes in China's drylands [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(12): 858–873.
- [25] ZASTROW M. China's tree-planting drive could falter in a warming world [J]. *Nature*, 2019, 573(7775): 474–475.
- [26] 张建云, 张成凤, 鲍振鑫, 等. 黄淮海流域植被覆盖变化对径流的影响 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(6): 813–823. (ZHANG J Y, ZHANG C F, BAO Z X, et al. Analysis of the effects of vegetation changes on runoff in the Huang–Huai–Hai River basin under global change [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(6): 813–823. (in Chinese))
- [27] LI M, WIEDMANN T, LIU J G, et al. Exploring consumption-based planetary boundary indicators: an absolute water footprinting assessment of Chinese provinces and cities [J]. *Water Research*, 2020, 184: 116163.
- [28] 刘向培, 佟晓辉, 贾庆宇, 等. 1960—2017年中国降水集中程度特征分析 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 10–19. (LIU X P, TONG X H, JIA Q Y, et al. Precipitation concentration characteristics in China during 1960—2017 [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 10–19. (in Chinese))
- [29] JIANG Y. China's water security: current status, emerging challenges and future prospects [J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54: 106–125.
- [30] 夏军, 翟金良, 占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(9): 905–915. (XIA J, ZHAI J L, ZHAN C S. Some reflections on the research and development water resources in China [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(9): 905–915. (in Chinese))
- [31] LIU J G, YANG W. Water sustainability for China and beyond [J]. *Science*, 2012, 337(6095): 649–650.
- [32] QIU J. China faces up to groundwater crisis [J]. *Nature*, 2010, 466(7304): 308.
- [33] WANG J X, ZHU Y Y, SUN T H, et al. Forty years of irrigation development and reform in China [J]. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2020, 64(1): 126–149.
- [34] The World Bank Group. *Watershed: a new era of water governance in China: synthesis report* [M]. Washington, DC: World Bank, 2018.

- [35] 陈飞, 徐翔宇, 羊艳, 等. 中国地下水资源演变趋势及影响因素分析[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 811-819. (CHEN F, XU X X, YANG Y, et al. Investigation on the evolution trends and influencing factors of groundwater resources in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(6): 811-819. (in Chinese))
- [36] 孙金华, 王思如, 朱乾德, 等. 水问题及其治理模式的发展与启示[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 607-613. (SUN J H, WANG S R, ZHU Q D, et al. Development and enlightenment of water issues and its governance[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5): 607-613. (in Chinese))
- [37] WU B F, ZENG H W, ZHU W W, et al. Enhancing China's Three Red Lines strategy with water consumption limitations[J]. Science Bulletin, 2021, 66(20): 2057-2060.
- [38] 金菊良, 陈梦璐, 郦建强, 等. 水资源承载力预警研究进展[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 583-596. (JIN J L, CHEN M L, LI J Q, et al. Advance in early warning of water resources carrying capacity[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 583-596. (in Chinese))
- [39] ALDAYA M M, SESMA-MARTÍN D, RUBIO-VARAS M. Tracking water for human activities: from the ivory tower to the ground[J]. Water Resources and Economics, 2021, 36: 100190.
- [40] NOGRADY B. Management of Australia's Murray-Darling basin deemed 'negligent' [M/OL]. (2019-02-01) [2022-02-01]. <https://www.nature.com/articles/d41586-019-00438-w>.
- [41] JOYCE E. Caps on groundwater use create a new market in California[M]. London: The Economist, 2019.
- [42] 王煜, 彭少明, 郑小康, 等. 黄河“八七”分水方案的适应性评价与提升策略[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 632-642. (WANG Y, PENG S M, ZHENG X K, et al. Adaptability assessment and promotion strategy of the Yellow River Water Allocation Scheme[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 632-642. (in Chinese))
- [43] The World Bank Group. Design of water consumption based water rights administration system for Turpan prefecture of Xinjiang China[M]. Washington, DC: World Bank, 2012.
- [44] 丁宏伟, 王振华, 李文昊, 等. 极端干旱区降解膜对棉田耗水、籽棉产量及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(1): 41-48. (DING H W, WANG Z H, LI W H, et al. Effects of degradation film on water consumption, cotton yield and water utilization of cotton field in extreme arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(1): 41-48. (in Chinese))
- [45] ZHOU F, BO Y, CIAIS P, et al. Deceleration of China's human water use and its key drivers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(14): 7702-7711.
- [46] 吴炳方, 曾红伟, 陈曦. 基于空间认知的“丝绸之路经济带”耕地利用模式[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(5): 542-549. (WU B F, ZENG H W, CHEN X. Spatial cognition on cultivated land utilization pattern of the Silk Road Economic Belt[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(5): 542-549. (in Chinese))
- [47] WU B F, TIAN F Y, ZHANG M, et al. Quantifying global agricultural water appropriation with data derived from earth observations[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 358: 131891.
- [48] 刘昌明, 刘小莽, 张丹, 等. 有关地理学研究中几个学术问题的研讨: 学习黄秉维院士严谨治学的精神[J]. 地理学报, 2013, 68(1): 3-9. (LIU C M, LIU X M, ZHANG D, et al. Commemorating the 100th birthday of Academician Huang Bingwei: discussion on the four academic issues in geographic sciences[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(1): 3-9. (in Chinese))
- [49] WU B F, ZHU W W, YAN N N, et al. Regional actual evapotranspiration estimation with land and meteorological variables derived from multi-source satellite data[J]. Remote Sensing, 2020, 12(2): 332.
- [50] 吴炳方. 陆表蒸散遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2021. (WU B F. Territorial evapotranspiration remote sensing[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese))
- [51] ZHUANG Q F, WU B F, YAN N N, et al. A method for sensible heat flux model parameterization based on radiometric surface temperature and environmental factors without involving the parameter KB-1[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 47: 50-59.
- [52] WU B F, LIU S F, ZHU W W, et al. An improved approach for estimating daily net radiation over the Heihe River basin[J]. Sensors, 2017, 17(1): 86.
- [53] WU B F, XING Q, YAN N N, et al. A linear relationship between temporal multiband MODIS BRDF and aerodynamic roughness

- in HiWATER wind gradient data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(3): 507-511.
- [54] XU J M, WU B F, RYU D, et al. A canopy conductance model with temporal physiological and environmental factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148283.
- [55] MA Z, WU B F, YAN N N, et al. Spatial allocation method from coarse evapotranspiration data to agricultural fields by quantifying variations in crop cover and soil moisture [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 343.
- [56] TAN S, WU B F, YAN N N. A method for downscaling daily evapotranspiration based on 30-m surface resistance [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 123882.
- [57] WU F M, WU B F, ZHU W W, et al. ETWatch cloud: APIs for regional actual evapotranspiration data generation [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 145: 105174.
- [58] MA Z H, WU B F, YAN N N, et al. Coupling water and carbon processes to estimate field-scale maize evapotranspiration with Sentinel-2 data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 306: 108421.
- [59] YAN N N, WU B F, PERRY C, et al. Assessing potential water savings in agriculture on the Hai Basin plain, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 154: 11-19.
- [60] TAN S, WU B F, YAN N N, et al. Satellite-based water consumption dynamics monitoring in an extremely arid area [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1399.
- [61] ZENG H W, WU B F, ZHU W W, et al. A trade-off method between environment restoration and human water consumption: a case study in Ebinur Lake [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 732-741.
- [62] CHAI L, HAN Z X, LIANG Y, et al. Understanding the blue water footprint of households in China from a perspective of consumption expenditure [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121321.
- [63] ABU-BAKAR H, WILLIAMS L, HALLETT S H. A review of household water demand management and consumption measurement [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292: 125872.
- [64] 钟方雷, 郭爱君, 蒋岱位, 等. 面向需水管理的居民用水行为研究进展 [J]. *水科学进展*, 2018, 29(3): 446-454. (ZHONG F L, GUO A J, JIANG D W, et al. Research progress regarding residents' water consumption behavior as relates to water demand management: a literature review [J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(3): 446-454. (in Chinese))
- [65] 周晋军, 刘家宏, 董庆珊, 等. 城市耗水计算模型 [J]. *水科学进展*, 2017, 28(2): 276-284. (ZHOU J J, LIU J H, DONG Q S, et al. Simulation model for urban water dissipation [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(2): 276-284. (in Chinese))
- [66] SKOFRONICK-JACKSON G, PETERSEN W A, BERG W, et al. The global precipitation measurement (GPM) mission for science and society [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(8): 1679-1695.
- [67] TAPLEY B D, BETTADPUR S, RIES J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the Earth system [J]. *Science*, 2004, 305(5683): 503-505.
- [68] YAN N N, WU B F. Integrated spatial-temporal analysis of crop water productivity of winter wheat in Hai Basin [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 133: 24-33.
- [69] ZIOTI F, FERREIRA K R, QUEIROZ G R, et al. A platform for land use and land cover data integration and trajectory analysis [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 106: 102655.
- [70] 吴炳方, 朱伟伟, 曾红伟, 等. 流域遥感: 内涵与挑战 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 654-673. (WU B F, ZHU W W, ZENG H W, et al. Watershed remote sensing: definition and prospective [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 654-673. (in Chinese))
- [71] WANG Z F, LIU J G, LI J B, et al. Basin-scale high-resolution extraction of drainage networks using 10-m Sentinel-2 imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 255: 112281.
- [72] WANG Z F, LI J B, LIN Y, et al. GrabRiver: graph-theory-based river width extraction from remote sensing imagery [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-5.
- [73] WANG Z F, LIU J G, LI J B, et al. Multi-spectral water index (MuWI): a native 10-m multi-spectral water index for accurate water mapping on sentinel-2 [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1643.
- [74] 吴炳方, 张淼, 曾红伟, 等. 大数据时代的农情监测与预警 [J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1027-1037. (WU B F, ZHANG M, ZENG H W, et al. Agricultural monitoring and early warning in the era of big data [J]. *Journal of Remote Sensing*,

- 2016, 20(5): 1027–1037. (in Chinese)
- [75] HU Y R, ZENG H W, TIAN F Y, et al. An interannual transfer learning approach for crop classification in the Hetao irrigation district, China [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1208.
- [76] DEINES J M, KENDALL A D, CROWLEY M A, et al. Mapping three decades of annual irrigation across the US high plains aquifer using landsat and Google Earth Engine [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111400.
- [77] 李原园, 曹建廷, 黄火键, 等. 国际上水资源综合管理进展 [J]. *水科学进展*, 2018, 29(1): 127–137. (LI Y Y, CAO J T, HUANG H J, et al. International progresses in integrated water resources management [J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(1): 127–137. (in Chinese))
- [78] 于琪洋. 对水资源集约节约安全利用的思考 [J]. *中国水利*, 2021(21): 34–37. (YU Q Y. Considerations on improving the level of water resources intensive, economical and safe utilization [J]. *China Water Resources*, 2021(21): 34–37. (in Chinese))
- [79] ROCKSTRÖM J, FALKENMARK M, KARLBERG L, et al. Future water availability for global food production: the potential of green water for increasing resilience to global change [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): 1–16.
- [80] YANG D W, YANG Y T, XIA J. Hydrological cycle and water resources in a changing world: a review [J]. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(2): 115–122.
- [81] HUANG H R, ZHUO L, WANG R R, et al. Agricultural infrastructure: the forgotten key driving force of crop-related water footprints and virtual water flows in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 309: 127455.
- [82] JÄGERMEYER J, GERTEN D, SCHAPHOFF S, et al. Integrated crop water management might sustainably halve the global food gap [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(2): 025002.
- [83] HER Y, YOO S H, CHO J, et al. Uncertainty in hydrological analysis of climate change: multi-parameter vs. multi-GCM ensemble predictions [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 4974.
- [84] WU B F, ZENG H W, YAN N N, et al. Approach for estimating available consumable water for human activities in a river basin [J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(7): 2353–2368.
- [85] 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.
- [86] LUO Z L, SHAO Q X, WAN W, et al. A new method for assessing satellite-based hydrological data products using water budget closure [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 594: 125927.
- [87] ABOLAFIA-ROSENZWEIG R, PAN M, ZENG J L, et al. Remotely sensed ensembles of the terrestrial water budget over major global river basins: an assessment of three closure techniques [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 252: 112191.
- [88] ZENG H W, ELNASHAR A, WU B F, et al. A framework for separating natural and anthropogenic contributions to evapotranspiration of human-managed land covers in watersheds based on machine learning [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 823: 153726.
- [89] GAO G Y, SHEN Q, ZHANG Y, et al. Determining spatio-temporal variations of ecological water consumption by natural oases for sustainable water resources allocation in a hyper-arid endorheic basin [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 185: 1–13.
- [90] JIANG L, WU B, RADOSEVICH G, et al. China country water resources partnership strategy (2013–2020) [M]. Washington, DC: World Bank, 2013.
- [91] ROBERTSON D M, PERLMAN H A, NARISIMHAN T N. Hydrological cycle and water budgets [M] // *Encyclopedia of Inland Waters*. Amsterdam: Elsevier, 2022: 19–27.
- [92] LIAN X, PIAO S L, CHEN A P, et al. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(4): 232–250.
- [93] The World Bank Group. GEF Mainstreaming integrated water and environment management [M]. Washington, DC: World Bank, 2016.
- [94] DANIEL M. Concept stage program information document (PID): Yellow River basin resilience program: P172806 (English) [M]. Washington, DC: World Bank, 2021.
- [95] GREG J B. Concept project information document-integrated safeguards data sheet: sindh water and agriculture transformation project (SWAT): P167596 (English) [M]. Washington, DC: World Bank, 2021.

- [96] UN FAO. Transforming the Indus Basin with climate resilient agriculture and climate-smart water management [M]. Rome: United Nations, 2018.
- [97] 张文鸽, 侯胜玲, 殷会娟. 内蒙古河套灌区地下水埋深时空变化及其驱动因素 [J]. 节水灌溉, 2020, 1(7): 36-40. (ZHANG W G, HOU S L, YIN H J. Spatial and temporal variation of groundwater depth and its driving factors in hetao irrigation district of Inner Mongolia [J]. Water Saving Irrigation, 2020, 1(7): 36-40. (in Chinese))
- [98] 吴炳方, 闫娜娜, 曾红伟, 等. 节水灌溉农业的空间认知与建议 [J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 70-77. (WU B F, YAN N N, ZENG H W, et al. Outlook on water saving agriculture [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 70-77. (in Chinese))
- [99] CHUKALLA A D, KROL M S, HOEKSTRA A Y. Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(12): 4877-4891.
- [100] GAO H H, YAN C R, LIU Q, et al. Effects of plastic mulching and plastic residue on agricultural production: a meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 484-492.
- [101] NOURI H H, STOKVIS B, GALINDO A, et al. Water scarcity alleviation through water footprint reduction in agriculture: the effect of soil mulching and drip irrigation [J]. Science of the Total Environment, 2019, 653: 241-252.
- [102] BRAR A S, KAUR K, SINDHU V K, et al. Sustainable water use through multiple cropping systems and precision irrigation [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 333: 130117.
- [103] DICKSON K E, DZOMBAK D A. Inventory of interbasin transfers in the United States [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2017, 53(5): 1121-1132.
- [104] MA Y S, CHANG J X, GUO A J, et al. Optimizing Inter-basin water transfers from multiple sources among interconnected River basins [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125461.
- [105] DAVIS K F, RULLI M C, SEVESO A, et al. Increased food production and reduced water use through optimized crop distribution [J]. Nature Geoscience, 2017, 10(12): 919-924.
- [106] MA Z H, YAN N N, WU B F, et al. Variation in actual evapotranspiration following changes in climate and vegetation cover during an ecological restoration period (2000-2015) in the Loess Plateau, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 689: 534-545.
- [107] SHAO M A, WANG Y Q, XIA Y Q, et al. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the Loess Plateau: a review [J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 170077.
- [108] XU Z Q, ZHANG N X, WANG R, et al. The ecological water demand of different vegetation types in the Bashang area, North-west Hebei Province [J]. Journal of Resources and Ecology, 2022, 13(1): 113-119.
- [109] 刘俊国, 崔文惠, 田展, 等. 渐进式生态修复理论 [J]. 科学通报, 2021, 66(9): 1014-1025. (LIU J G, CUI W H, TIAN Z, et al. Theory of stepwise ecological restoration [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(9): 1014-1025. (in Chinese))

## Methods to improve management indicators to ensure the implementation of new water governance in China\*

WU Bingfang<sup>1,2</sup>, ZENG Hongwei<sup>1,2</sup>, MA Zonghan<sup>1</sup>, GOU Si<sup>3</sup>, LIU Junguo<sup>4</sup>, WANG Jinxia<sup>5</sup>, JIANG Liping<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, College of Resources and Environment, Beijing 100049, China; 3. World Bank, Washington DC 20433, USA; 4. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 5. School of Advanced Agricultural Policy, Peking University, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Climate change and human development have significantly altered the processes of natural water cycling, aggravating the challenge of worldwide water governance. China has initiated a new paradigm of water governance. However, the gap between concept and reality widened due to a lack of appropriate data and methodology. Current water management focuses on limiting the water withdrawals and improving the water use efficiency, and is not yet able to ensure the implementation of the new water governance paradigm. After a thorough study of the advanced development and achievement of water governance policies both at home and abroad, the conclusion has been reached that the total water consumption should be introduced as an additional management indicator to implement a dual control of water withdrawal and consumption. The paper proposes to: ① Establish water consumption monitoring infrastructure with evapotranspiration remote sensing monitoring as its core component. ② Implement the rigid water resources constraint by determining available water consumption targets of human activities in the basin, considering water requirements of environmental flow and ecosystem restoration, and establish a cascading system assigning targets to the sectors and/or stakeholders. ③ Implement the water consumption reduction schemes by limiting agricultural planting areas and optimizing ecosystem restoration with indigenous species. It is expected that the proposed approaches will effectively ensure the implementation of China's new water resources governance paradigm with innovative data, methods, and measures.

**Key words:** water resources; water consumption; dual-control; remote sensing; evapotranspiration

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41991232).