

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.06.04

水文改变指标体系在生态水文研究中的应用综述

程俊翔^{1,2}, 徐力刚^{1,2,3}, 姜加虎^{1,2}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 江西省山江湖开发治理委员会办公室, 江西 南昌 330046)

摘要:回顾了水文改变指标体系的发展历程, 详细介绍了水文改变指标体系所包含的水文改变指标、变化范围法和环境流量成分 3 部分内容, 总结了水文改变指标体系在水文情势改变评估、生态环境影响评估、生态环境流量估算等方面的应用; 指出水文改变指标体系是一种简便有效的评估工具, 在水文情势变化及其生态效应评估和水资源管理实践上具有广泛的应用前景, 但水文改变指标体系也存在参数冗余问题, 未来发展可以耦合生态水文模型。

关键词:生态水文; 水文改变指标; 变化范围法; 环境流量成分

中图分类号:TV213.4; P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2018)06-0024-09

Review of application of hydrologic alteration index system in eco-hydrology research

CHENG Junxiang^{1,2}, XU Ligang^{1,2,3}, JIANG Jiahu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Office of Mountain-River-Lake Development Committee of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China)

Abstract: The development history of hydrologic alteration index system is reviewed, and three parts of the indicators of hydrologic alteration, range of variability approach, and environmental flow components are introduced in detail. The application of hydrologic alteration index system in hydrological regime change assessment, ecological environment impact assessment and eco-environmental discharge estimation is summarized. It is pointed out that hydrologic alteration index system is a simple and effective assessment tool and has wide application prospects in hydrological regime change, ecological effect evaluation, and water resources management practice. But the hydrologic alteration index system has the problem of parameter redundancy, and its future development can be coupled with eco-hydrological model.

Key words: eco-hydrology; indicators of hydrologic alteration; range of variability approach; environmental flow components

自 20 世纪 90 年代以来, 水文过程研究越来越重视与生态过程的结合, 并由此衍生出了一门新的边缘学科——生态水文学。区别于传统的水文学,

生态水文学主要研究水文过程与生态过程的相互关系与耦合机制, 尤其强调生物特征和尺度问题^[1-3]。作为保证河流、湖泊等水域生态系统健康完整的核

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2018YFC0407600); 江西省重点研发计划(20171BBH80015)

作者简介: 程俊翔(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为水文水资源。E-mail: chengjunxiang15@163.com

通信作者: 徐力刚, 研究员。E-mail: lgxu@niglas.ac.cn

心要素,水文情势在一定程度上决定着水域生态系统的生物组成、群落结构以及生态功能等^[4-5]。水文情势变化既可以直接影响生态系统,还可以通过改变环境而间接地作用于生态系统^[6-7]。因此,在对水资源进行合理的开发利用时,有必要考虑水文情势变化可能触发的生态环境效应^[8]。与此同时,水域生态系统对水文情势变化的响应极其敏感,而气候变化和人类活动对水文过程的影响也日益显著^[9-11],这也引起了国内外社会的普遍关注。

水文情势研究一般需要通过特定的水文指标来表征,而水文情势指标的定性或定量描述是生态水文过程研究的一项重要内容。Poff 等^[12]率先较为全面地阐述了水文情势变化的 5 个方面内容,包括流量量级、历时、出现时间、频率和变化率,用以描述整个水文过程。随着研究的深入,目前已有超过 170 个水文指标被提出^[13],用以评估水文改变状况及其所引发的生态环境效应。其中,Richter 等^[14]提出的包含 32 个参数的水文改变指标(indicators of hydrologic alteration, IHA),可以定量评估水文情势的变化特征,成为此后生态水文过程研究的重要基础。为了进一步定量评估水文改变度并设定自然状态下的环境流量变化范围,Richter 等^[15-16]在 IHA 的基础上又提出了变化范围法(range of variability approach, RVA)。然而,由于 RVA 在设定环境流量目标时存在复杂、操作性不强等缺点,包含 34 个参数的环境流量成分(environmental flow components, EFCs)逐渐发展起来,能够克服 RVA 的缺点并快速简便地设定环境流量管理目标^[17-18]。经过美国大自然保护协会的发展和完善,原来的 32 个 IHA 参数修订为 33 个,增加了“断流天数”和“基流指数”2

个参数,并把原来的“流量上升次数”和“流量下降次数”两个参数整合为“流量逆转次数”。目前,IHA 与 RVA、EFCs 一起集成了一套开源软件系统,统称为 IHA 体系。

1 IHA 体系的内容

IHA 体系主要包括 IHA、RVA 和 EFCs 三部分内容,其中,IHA 和 RVA 为同一套参数(表 1),而 EFCs 使用另一套参数(表 2)。IHA 体系可以快速、便捷地评估由人类活动(如大坝水库建设、调水工程等)引起的水文改变及生态效应,并通过设定合理的生态环境流量为水资源管理提供参考。一般地,IHA 以逐日流量(河流流量)或水位(湖泊水位、地表水位等)数据为计算基础,能够同时得到 67 个生态水文参数的结果,即 33 个 IHA 参数和 34 个 EFCs 参数。水文数据序列应当超过 20 a,既可以是整个时段,也可以对比分析两个时段。计算方法包括参数化方法和非参数化方法,其中参数化方法的计算结果为均值和标准差,非参数化方法的计算结果为中值和百分位数。由于水文数据一般为非正态分布,故常采用非参数化方法。高、低流量阈值以及 RVA 的上下限也是据此两种方法所确定的。

1.1 IHA

IHA 包含了 5 组 33 个水文参数,其分组是依据流量量级、历时、出现时间、频率、变化率来划分的,每组均包含了若干水文指标,并对应着相应的生态系统影响,详见表 1。第 1 组包括 12 个水文参数,分别为 12 个月的流量中值或均值;第 2 组为年极端流量和历时,包括 12 个参数,其中基流指数为年最小 7 d 流量与该年平均流量的比值;第 3 组为年最大

表 1 IHA 参数及其对应的生态系统影响

IHA 分组	水文参数(33 个)	生态系统影响
月流量	各月流量中值或均值	水生生物栖息地的可利用性;植被对土壤水分的利用;陆地动物对水资源和食物的需求及筑巢地的可达性;影响水温、溶解氧、光合作用等
年极端流量及历时	年最小 1 d 流量、年最小 3 d 流量、年最小 7 d 流量、年最小 30 d 流量、年最小 90 d 流量、年最大 1 d 流量、年最大 3 d 流量、年最大 7 d 流量、年最大 30 d 流量、年最大 90 d 流量、断流天数、基流指数	平衡生物之间竞争及耐受性;提供植物繁殖场所;通过生物和非生物因素构建水生生态系统;重塑河道形态和自然栖息地;土壤水分、缺氧环境对植物的胁迫;营养在河流与洪泛平原之间的交换;水生生境中低氧和化学物质聚集的持续时间;湖泊、池塘和洪泛平原的植物群落分布;洪水对净化水体、产卵河床曝气等作用的持续时间
年极端流量出现时间	年最小流量出现时间、年最大流量出现时间	生物体生命循环的兼容性、对生存压力的可预见性或躲避性;在繁殖期或避免被捕食而进入特殊栖息地的可达性;鱼类洄游产卵;生存策略和行为机制演化
高低流量发生频率和历时	低流量年内发生次数、低流量年内平均历时、高流量年内发生次数、高流量年内平均历时	土壤水分、缺氧的发生频率、强度及历时对植物的胁迫;水生生物对洪泛平原栖息地的需求;河流与洪泛平原之间的营养和有有机质交换;土壤矿化程度;水禽对食物、生长和繁殖场所的需求;高流量对河床碎石输移、沉积物质地以及基底扰动时间的影响
流量改变率和频率	上升率、下降率、流量逆转次数	干旱对植物的胁迫;岛屿和洪泛平原上的生物捕食;缺水对河岸周边低移动性生物的胁迫

注:整理自 IHA 用户手册^[18]。

和最小流量出现时间;第4组为高、低流量的发生频率和历时,其默认阈值为25%和75%分位数;第5组包括上升率、下降率和流量逆转次数3个参数,其中上升率(下降率)定义为连续日流量之间所有正差异(负差异)的平均值或中位数。

1.2 RVA

RVA是在IHA的基础上发展起来的,最初是为了设定基于环境流量的河流生态系统管理目标^[15],此后又可以用来定量评估河流的水文改变度^[16]。RVA设定河流环境流量的管理目标是基于流量的自然变化情况,即人类活动影响前的河流水文情势。按照百分位数(默认值为33%和67%)将影响前的流量序列分为高、中、低3个不同的区间,那么设定环境流量目标时只需观察影响后的流量值是否落在对应的区间内即可。与此同时,根据各个水文参数的期望频率和实际频率的变化百分比可以计算出对应的水文改变度(degree of hydrologic alteration),有利于充分理解生态水文指标的统计学特征,并判断水文状况的改变度。需要注意的是,RVA只对IHA参数有效,对EFCs无效,且必须是比较两个不同时段时才可用。

1.3 EFCs

依据水文气候区的流量大小,河道流量可依次分为洪水、高流量脉冲、低流量和极枯流量,其中洪水又可分为大洪水和小洪水,即EFCs的5种类型(表2),全面概括了河道流量的变化过程。EFCs包含34个水文参数,其中低流量对应12个月的平水流量,极枯流量包括峰值流量、持续时间、出现时间和发生频率4个参数,高流量脉冲、小洪水和洪水还在极枯流量的基础上增加了上升率和下降率

2个参数。5种类型的划分主要是依据流量序列的百分位数及重现周期,具体算法请参见IHA用户手册^[18]。从其生态系统影响来看,EFCs提供了一个描述生物与水文情势变化关系的基础框架,对实现正常的生态功能和维持生态系统完整性具有重要作用,是一种评估和推荐生态环境需水的有效方法^[17]。

2 IHA体系在生态水文研究中的应用

作为评估水文改变及其生态系统影响的一种有效方法,IHA在全世界范围内得到了广泛的应用。据美国大自然保护协会的初步统计,全世界有将近2000位水资源管理者、水文学家、生态学家以及政策制定者运用IHA体系来评估河流、湖泊乃至流域的水文改变及其生态效应,并为将来的水资源管理情景提供支持。总结起来,IHA体系的应用大致可以归纳为3个主要方面:水文情势改变评估、生态环境影响评估、生态环境流量估算。

2.1 水文情势改变评估

在全球气候变化的大背景下,人类活动影响下的水文情势正发生着显著的变化,特别是水坝(库)建设、调水工程、围垦等对水文情势改变的定量评估是近年来研究的热点问题之一^[19-20]。IHA体系在定量评估人类活动导致的水文改变时,具有快速、方便、准确、全面等特点。基于IHA和RVA,学者们评估了大坝建设对我国长江^[21-24]、黄河^[25-26]、淮河^[27]等河流以及湄公河^[28]、Lower Zab河^[29]等跨国河流水文情势的影响。RVA可以定量计算出每个指标的水文改变度 D_i ,其绝对值分布在0~33%、34%~67%和68%~100%时分别对应着无或低改变度、

表2 EFCs参数及其对应的生态系统影响

EFCs类型	水文参数(34个)	生态系统影响
极枯流量	峰值流量、持续时间、出现时间、发生频率	保持特定洪泛平原的植物种类;减少水域或河岸的外来物种入侵;把猎物限制在一定区域,有利于捕食者捕食
低流量	每月低流量	为水生生物提供适宜的栖息地;保持合适的水温、溶氧和水化学性质;保持适合植物生长的洪泛平原水位和土壤水分;为陆生动物提供饮用水源;保持鱼类和两栖动物的卵处于悬浮状态;满足鱼类觅食和产卵的场所;支撑底栖生物的生存
高流量脉冲	峰值流量、持续时间、出现时间、发生频率、上升率和下降率	塑造河道形态;决定河床基质颗粒(砂、砾石、卵石)的大小;阻碍河岸植被侵占河道;恢复经过长期枯水的正常水质状态,冲走废弃物和污染物;有利于产卵砾石曝气,防止淤积;维持河口适宜的含盐量
小洪水	峰值流量、持续时间、出现时间、发生频率、上升率和下降率	提供鱼类迁徙和产卵场所;促进生命循环;提供幼鱼生长空间;为鱼类和水禽创造新的觅食机会;调控洪泛平原潜水位;通过延长淹没时间来保持洪泛平原森林类型多样性;控制洪泛平原植被分布、数量和多样性;营养物质沉积;保持水生和陆生群落平衡;为入侵植物提供场所;塑造洪泛平原栖息地;砾石和鹅卵石在产卵场所沉积;冲刷有机质和木屑等进入河道;传播河岸植被的种子和果实;驱动河道侧向移动,形成牛轭湖等新的栖息地;增加土壤水分,促进种子萌发
大洪水	峰值流量、持续时间、出现时间、发生频率、上升率和下降率	与EFCs类型中“小洪水”生态系统影响相同

注:整理自IHA用户手册^[18]。

中改变度和高改变度^[16]。然而,Shiau 等^[30-31]认为不同的 D_i 可能对应着不同的改变度等级,因此提出了以权重的方式计算总体水文改变度(overall degree of hydrologic alteration),用来从整体上评估河流的水文改变度。杨娜等^[32]考虑到这两种分级方法要么忽略 D_i 的分布特征,要么易受数值较大参数的影响,从而根据归一化思想对其进行了改进。Lin 等^[33]从 IHA 秩次和对称性的角度对 RVA 进行了改进,并提出了频率改变指数、趋势改变指数和对称性改变指数来描述水文改变状况,得到了比传统方法更加精确的定量结果。邓迪水文情势改变法(Dundee hydrological regime alteration method, DHRAM)也是在 IHA 的基础上发展起来的一种评估水文改变状况的方法,该方法通过权重打分的形式将水文改变状况(生态系统响应)划分为 5 个等级,依次对应着水文状况未受影响(无风险)、受到轻微影响(低风险)、受到中度影响(中风险)、受到高度影响(高风险)和受到极端影响(极端风险)^[34]。

我国拥有 770 座大型大坝和水库^[35],位居世界前列,然而数量众多的大坝和水库严重影响了河流、湖泊的水情特征,尤其是以长江三峡为代表的水库对其下游水情和生态的影响,吸引了人们的热切关注。Jiang 等^[36]采用 RVA 评估了三峡大坝对长江中下游水情的影响,指出径流变化率和年极端流量受到的影响较大,且影响程度随着距离的增加而减弱。张飒等^[37]基于 RVA 研究了丹江口水库对汉江水文情势的影响。Duan 等^[38]综合运用 IHA、RVA 和 DHRAM 等分析了长江流域 24 个大型水库群对长江水情的影响。此外,东江流域的水文过程也因为水库建设而发生显著改变,直接影响广州、深圳等珠三角城市群以及香港的水资源供给,也是学者们的重点研究对象之一。Zhang 等^[39-40]采用 IHA、RVA 揭示了新丰江、枫树坝等水库对东江流域河流水情的影响。同样以东江为研究对象,Chen 等^[41]认为通过可视化图形对 RVA 结果进行展示将比表格更好,并借助 XmdvTool 软件以平行坐标系图和雷达图等形式展示了分析结果,不仅更加生动直观,而且信息量也更多。黄速艇等^[42]、顾西辉等^[43]、Lin 等^[44]基于 IHA 体系从不同角度探讨了东江流域的水文情势改变。Richter 等^[16,45]还采用 RVA 评估了大坝和水库建设等人类活动在空间上对水文状况的影响。此外,IHA 也可用于评估气候变化对水文情势的影响^[29]。

以上研究大都是从河流径流量的角度来分析水文改变特征,而从水位视角进行的研究相对较少,特

别是关于湖泊水位的研究鲜见报道。根据 IHA 和 RVA,Zhang 等^[46]分析了珠江三角洲月水位的空间变异特征;Xu 等^[47]比较了我国东部城镇和城郊河网水位的水文改变度。未来研究需要从多维度、多层次来开展,特别是需要开展湖泊水位、河网水位乃至流域水文过程定量评估的研究。

2.2 生态环境影响评估

IHA 体系较好地将水文与生态联系在一起,特别是为缺少生态数据的水域生态系统研究提供了一种崭新的思路,而且更加强调了生态系统的整体性。Maingi 等^[48]根据 IHA 的分析结果指出,大坝建设削减了 Tana 河的洪峰流量,显著增加了最低流量,对河岸带森林植被造成了严重的影响。在实际研究中,学者们往往还结合生态盈余(ecosurplus)和生态赤字(ecodeficit)来分析河道生态径流的变化特征^[49-50]。Gao 等^[51]和 Zhang 等^[39]的研究都表明生态盈余和生态赤字与 IHA 之间的相关关系较强,不仅可以反映 IHA 的 33 个参数信息,还能有效缓解其冗余性问题。基于数据挖掘算法,Yang 等^[52]从 33 个参数中筛选出了 6 个生态最相关的参数,并拟合出了其与香农指数(Shannon index)的数学表达式,为水文改变下的生物多样性评价研究提供了参考。

在闸坝水生态效应分析研究中,RVA 强调水文与生态的联系,评估结果更适用于生态恢复和闸坝生态调度^[53]。基于上述方法,顾西辉等^[43-44]评价了水库对东江流域河流生态径流变化及生物多样性的影响;Yang 等^[54-55]分析了黄河干流的生态径流特征,评估了其生态效应;史方方等^[56]评估了丹江口水库对汉江中下游水文情势及鱼类生境的影响。另外,Shieh 等^[57]结合 IHA 和栖息地改变指标评估了大坝建设对径流和栖息地环境的影响,并指出这一评估方法不需要生态调查数据和生态学概念。然而,有学者对此有不同的看法,他们认为生态系统极其复杂,IHA 体系的评估结果的可靠性和精确性还需要更多的生态数据来进行验证^[52, 58]。

在评估水文改变导致的生态环境影响时,IHA 体系是一项最基础、最重要的研究内容。在利用 IHA 体系评估水文生态效应时,仅需要径流量、水位等基础水文数据即可,但是要求水文序列足够长(≥ 20 a),限制了在某些数据缺测或无测站河流的应用,同时还缺少生态方面的数据进行补充和验证。因此,实际应用中往往还需要结合其他研究手段或方法来弥补其自身的缺陷和不足,这些问题也是 IHA 体系未来发展的一大瓶颈。

2.3 生态环境流量估算

目前,河流生态环境需水评估方法大致可以分为水文学方法、水力学方法、生境模拟法和综合法4类^[59-60],其中,IHA估算生态环境流量属于水文学方法。张爱静等^[61]基于IHA体系的定量评估结果,研究了河口水流需求及调水调沙后水文情势对环境水流的满足度,建议适当增加黄河口4月和5月的流量,以维持良好的河口生态环境。采用RVA建立的生态需水管理模式在美国、加拿大、澳大利亚等国家都有广泛的应用,而国内的相关研究起步较晚。Galat等^[62]利用RVA为Missouri河推荐了一种接近自然水文条件的水库调度运行模式,这种模式包括增加年度洪水脉冲、推迟生长季节的最小下泄流量出现时间、减少每年的径流逆转次数等。在国内,陈启慧等^[63]率先介绍了计算生态需水的RVA及其应用。马晓超等^[64]认为基于RVA计算出的渭河中下游的生态需水与其他方法得到的结果较为接近,说明其适用性较好。尽管RVA对数据的要求不高,但是RVA设定的管理目标和策略都比较复杂,在实际应用中还需要因地因时制宜地进行相应的调整。Smakhtin等^[65]对RVA进行了改进,认为1、2、…、12月流量,年最小和最大1d、30d流量等16个指标也能较好代表河道生态流量,而且调控目标越少越有利于实际应用和管理。舒畅等^[66]基于RVA提出了一种更加简便、着眼于河流整体水文情势的生态流量估算方法,刘贵花等^[67]将其应用于评估鄱阳湖流域的信江生态流量。官云飞等^[68]也在RVA的基础上构建了一种河流的生态环境流量计算方法,包括最大生态环境流量、适宜生态环境流量和最小生态环境流量。

近年来,EFCs作为另一种估算和设定河流生态环境流量的方法,正受到学者们越来越多的重视。Mathews等^[17]详细介绍了IHA软件在生态环境流量研究中的发展及应用,并讨论了美国Green河生态环境流量的适应性管理研究。Souter^[69]计算了澳大利亚南部Murray河的EFCs,并比较了自然和目前状态下的模拟径流数据,为指导和推荐自然状态下的环境流量提供了参考。Zhang等^[40]研究了东江的EFCs的变化特征,为东江的环境流量需水决策提供了有力支撑。基于IHA体系,涂晶晶等^[70]以东江为例给出了不同泄流量条件下的河流生态健康状况,其中按照EFCs模式的泄流方式最符合自然径流过程,为流域水库调度提供了重要的参考。此外,还有学者将IHA体系与生态或水文模型进行耦合研究,如谢悦等^[71]采用了IHA和EFCs,并结合

HEC-RAS模型,得到了满足自然径流动态变化和鱼类不同等级生境目标需求的生态需水推荐结果,为淮河流域水资源配置提供了依据。

总的来看,IHA体系在评估水文情势改变及其生态效应时,有其独特的优势,特别是RVA及其改进方法是目前使用最广泛、最受青睐的评估方法^[72]。在评估水文改变引起的生态环境影响时,往往需要结合其他手段和方法(如生态盈余和生态赤字、生态和水文模型等),有利于指导当地的水资源管理和生态系统保护。然而,虽然IHA体系也可以用于估算和设定河流环境流量,但与其他评估方法相比,其优势并不明显:一方面是管理目标过多,复杂性和难操作性不言而喻;另一方面是仅仅通过水文数据来估算环境流量,没有将生态数据进行有效的耦合,估算结果或许有失偏颇。

3 存在问题与研究展望

IHA体系作为一种快速、方便、易操作的水文改变评估工具,不仅可以全面评估水文情势的变化特征,而且可以通过图表的形式对分析结果进行友好的展示,受到越来越多研究者的青睐。尽管IHA体系是目前生态水文学研究的重要基础,但是其自身发展也面临着一些挑战。

a. IHA体系的参数众多,在某种程度上仍然存在着信息冗余问题,无疑增加了在水资源管理实践中的操作难度。IHA体系的简化和综合研究将是学者们持续关注的焦点问题之一,即如何以最少的水文指标尽可能多地表达关键的生态信息,如生态最相关水文指标的选取、生态盈余和生态赤字的研究等。

b. IHA体系对生态系统的影响评估只是通过水文指标进行间接的反映,目前已有的生态验证也仅仅限于个体或种群的尺度,而忽视了生态系统的整体性。因此,将来的研究需要更多的生态数据来直接验证其结果准确性和精度,特别是要考虑生态系统的整体性,包括生境、个体、种群、群落、生态系统等层面。

c. IHA关于水文情势的研究主要集中在河流流量方面,而水位作为另一项最基本的水情要素,其研究尚不充分。以我国鄱阳湖和洞庭湖两大通江湖泊为例,湖泊水情与长江水情息息相关,并相互作用相互影响,其水位变动对湖区生态系统乃至长江水情的影响都十分明显。此外,对于无测站的河流或流域,IHA的应用同样受限,这也是今后水文过程研究所需要尽力克服的一个重大问题。

d. 在未来的研究中,IHA 的分析结果还可以用于验证水文模型的输出结果,比如验证模型预测的未来水资源管理情景的适宜性、对比模型模拟的自然条件下的水文情势结果等,特别是与相关生态模型进行耦合将是未来发展的一个重要方向。

参考文献:

- [1] 傅伯杰. 新时代自然地理学发展的思考[J]. 地理科学进展,2018,37(1):1-7. (FU Bojie. Thoughts on the recent development of physical geography[J]. Progress in Geography,2018,37(1):1-7. (in Chinese))
- [2] 杨大文,徐宗学,李哲,等. 水文学研究进展与展望[J]. 地理科学进展,2018,37(1):36-45. (YANG Dawen,XU Zongxue, LI Zhe, et al. Progress and prospect of hydrological sciences[J]. Progress in Geography,2018,37(1):36-45. (in Chinese))
- [3] ZALEWSKI M. Ecohydrology and hydrologic engineering: regulation of hydrology-biota interactions for sustainability [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(1): A4014012.
- [4] KUIPER J J, JANSE J H, TEURLINCX S, et al. The impact of river regulation on the biodiversity intactness of floodplain wetlands [J]. Wetlands Ecology and Management,2014,22(6):647-658.
- [5] 陈凯麒,陶洁. 河流生物栖息地的生态水文学研究[J]. 水资源保护,2015,31(6):52-56. (CHEN Kaiqi, TAO Jie. Research on eco-hydrology of river habitat[J]. Water Resources Protection,2015,31(6):52-56. (in Chinese))
- [6] FANAIAN S, GRAAS S, JIANG Y, et al. An ecological economic assessment of flow regimes in a hydropower dominated river basin: the case of the lower Zambezi River, Mozambique[J]. Science of the Total Environment, 2015, 505:464-473.
- [7] JAIN S K. Assessment of environmental flow requirements for hydropower projects in India [J]. Current Science, 2015, 108(10):1815-1825.
- [8] GORLA L, PERONA P. On quantifying ecologically sustainable flow releases in a diverted river reach [J]. Journal of Hydrology,2013,489:98-107.
- [9] 董磊华,熊立华,于坤霞,等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. 水科学进展,2012,23(2):278-285. (DONG Leihua, XIONG Lihua, YU Kunxia, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2):278-285. (in Chinese))
- [10] HOMA E S, BROWN C, MCGARIGAL K, et al. Estimating hydrologic alteration from basin characteristics in Massachusetts [J]. Journal of Hydrology, 2013, 503: 196-

208.

- [11] AL-FARAJ F A M, AL-DABBAGH B N S. Assessment of collective impact of upstream watershed development and basin-wide successive droughts on downstream flow regime; the Lesser Zab transboundary basin [J]. Journal of Hydrology, 2015, 530: 419-430.
- [12] POFF N L, ALLAN J D, BAIN M B, et al. The natural flow regime [J]. Bioscience, 1997, 47(11):769-784.
- [13] OLDEN J D, POFF N L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes [J]. River Research and Applications, 2003, 19(2): 101-121.
- [14] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. Conservation Biology, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [15] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, WIGINGTON R, et al. How much water does a river need? [J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1): 231-249.
- [16] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1998, 14(4): 329-340.
- [17] MATHEWS R, RICHTER B D. Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(6): 1400-1413.
- [18] The Nature Conservancy. Indicators of hydrologic alteration version 7. 1 user's manual [R]. Arlington: The Nature Conservancy, 2009.
- [19] 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.
- [20] SONG X, ZHUANG Y, WANG X, et al. Combined effect of Danjiangkou Reservoir and cascade reservoirs on hydrologic regime downstream [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2018, 23(6): 05018008.
- [21] WANG Y, RHOADS B L, WANG D. Assessment of the flow regime alterations in the middle reach of the Yangtze River associated with dam construction: potential ecological implications [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(21): 3949-3966.
- [22] WANG Y, WANG D, LEWIS Q W, et al. A framework to assess the cumulative impacts of dams on hydrological regime: a case study of the Yangtze River [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(17): 3045-3055.
- [23] YU Y, WANG C, WANG P, et al. Assessment of multi-objective reservoir operation in the middle and lower Yangtze River based on a flow regime influenced by the

- Three Gorges Project [J]. *Ecological Informatics*, 2017, 38:115-125.
- [24] CAI W, ZHANG L, ZHU X, et al. Optimized reservoir operation to balance human and environmental requirements: a case study for the Three Gorges and Gezhouba Dams, Yangtze River Basin, China [J]. *Ecological Informatics*, 2013, 18:40-48.
- [25] ZHANG Q, ZHANG Z J, SHI P J, et al. Evaluation of ecological instream flow considering hydrological alterations in the Yellow River Basin, China [J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 160:61-74.
- [26] ZHANG H, SINGH V P, ZHANG Q, et al. Variation in ecological flow regimes and their response to dams in the upper Yellow River Basin [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(11):938.
- [27] HU W, WANG G, DENG W, et al. The influence of dams on ecohydrological conditions in the Huaihe River Basin, China [J]. *Ecological Engineering*, 2008, 33(3/4):233-241.
- [28] LI D, LONG D, ZHAO J, et al. Observed changes in flow regimes in the Mekong River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551:217-232.
- [29] MOHAMMED R, SCHOLZ M, ZOUNEMAT-KERMANI M. Temporal hydrologic alterations coupled with climate variability and drought for transboundary river basins [J]. *Water Resources Management*, 2017, 31(5):1489-1502.
- [30] SHIAU J T, WU F C. Compromise programming methodology for determining instream flow under multiobjective water allocation criteria [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, 42(5):1179-1191.
- [31] SHIAU J T, WU F C. Pareto-optimal solutions for environmental flow schemes incorporating the intra-annual and interannual variability of the natural flow regime [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(6):W06433.
- [32] 杨娜, 梅亚东, 尹志伟. 建坝对下游河道水文情势影响 RVA 评价方法的改进 [J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(5):560-565. (YANG Na, MEI Yadong, YIN Zhiwei. Impact assessment of dams on the flow regime of lower river by improved RVA [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(5):560-565. (in Chinese))
- [33] LIN K, LIN Y, LIU P, et al. Considering the order and symmetry to improve the traditional RVA for evaluation of hydrologic alteration of river systems [J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(14):5501-5516.
- [34] BLACK A R, ROWAN J S, DUCK R W, et al. DHRAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive [J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2005, 15(5):427-446.
- [35] LEHNER B, LIERMANN C R, REVENGA C, et al. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(9):494-502.
- [36] JIANG L, BAN X, WANG X, et al. Assessment of hydrologic alterations caused by the Three Gorges Dam in the middle and lower reaches of Yangtze River, China [J]. *Water*, 2014, 6(5):1419-1434.
- [37] 张飒, 班璇, 黄强, 等. 基于变化范围法的汉江中游水文情势变化规律分析 [J]. *水力发电学报*, 2016, 35(7):34-43. (ZHANG Sa, BAN Xuan, HUANG Qiang, et al. Analysis of hydrological regime changes in the midstream Han River using range of variability approach [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(7):34-43. (in Chinese))
- [38] DUAN W, GUO S, WANG J, et al. Impact of cascaded reservoirs group on flow regime in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Water*, 2016, 8(6):218.
- [39] ZHANG Q, GU X, SINGH V P, et al. Evaluation of ecological instream flow using multiple ecological indicators with consideration of hydrological alterations [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529:711-722.
- [40] ZHANG Q, XIAO M, LIU C L, et al. Reservoir-induced hydrological alterations and environmental flow variation in the East River, the Pearl River Basin, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014, 28(8):2119-2131.
- [41] CHEN Y D, YANG T, XU C Y, et al. Hydrologic alteration along the Middle and Upper East River (Dongjiang) Basin, South China: a visually enhanced mining on the results of RVA method [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2010, 24(1):9-18.
- [42] 黄速艇, 陈森林, 艾学山, 等. 基于流量分级的生态流量过程线确定方法: 以东江水库为例 [J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(5):22-27. (HUANG Suting, CHEN Senlin, AI Xueshan, et al. Deterministic method of ecological flow process line based on flow classification: a case study in Dongjiang Reservoir [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2014, 25(5):22-27. (in Chinese))
- [43] 顾西辉, 张强, 孔冬冬, 等. 基于多水文改变指标评价东江流域河流流态变化及其对生物多样性的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(19):6079-6090. (GU Xihui, ZHANG Qiang, KONG Dongdong, et al. Based on multiple hydrological alteration indicators evaluating the characteristics of flow regime with the impact on the

- diversity of hydrophilily biology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016,36(19):6079-6090. (in Chinese))
- [44] LIN K, LIAN Y, CHEN X, et al. Changes in runoff and eco-flow in the Dongjiang River of the Pearl River Basin, China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2014, 8(4):547-557.
- [45] YANG T, ZHANG Q, CHEN Y D, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(18):3829-3843.
- [46] ZHANG Q, XU C Y, CHEN Y D, et al. Spatial assessment of hydrologic alteration across the Pearl River Delta, China, and possible underlying causes [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(11):1565-1574.
- [47] XU G, XU Y, LUO X, et al. Temporal and spatial variation of water level in urbanizing plain river network region[J]. *Water Science and Technology*, 2014, 69(11):2191-2199.
- [48] MAINI J K, MARSH S E. Quantifying hydrologic impacts following dam construction along the Tana River, Kenya [J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(1):53-79.
- [49] VOGEL R M, SIEBER J, ARCHFIELD S A, et al. Relations among storage, yield, and instream flow [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(5):W05403.
- [50] GAO B, YANG D, ZHAO T, et al. Changes in the eco-flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008 [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 448/449:30-38.
- [51] GAO Y, VOGEL R M, KROLL C N, et al. Development of representative indicators of hydrologic alteration [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 374(1/2):136-147.
- [52] YANG Y C E, CAI X, HERRICKS E E. Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance: a data mining approach for fish community analysis [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(4):W04412.
- [53] 刘静玲, 尤晓光, 史璇, 等. 滦河流域大中型闸坝水文生态效应 [J]. *水资源保护*, 2016, 32(1):23-28. (LIU Jingling, YOU Xiaoguang, SHI Xuan, et al. Hydrological and ecological effects of dams in Luanhe River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(1):23-28. (in Chinese))
- [54] YANG Z, YAN Y, LIU Q. Assessment of the flow regime alterations in the Lower Yellow River, China [J]. *Ecological Informatics*, 2012, 10:56-64.
- [55] 张宗娇, 张强, 顾西辉, 等. 水文变异条件下的黄河干流生态径流特征及生态效应 [J]. *自然资源学报*, 2016, 31(12):2021-2033. (ZHANG Zongjiao, ZHANG Qiang, GU Xihui, et al. Changes of eco-flow due to hydrological alterations in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(12):2021-2033. (in Chinese))
- [56] 史方方, 黄薇. 丹江口水库对汉江中下游影响的生态学分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(10):954-958. (SHI Fangfang, HUANG Wei. Ecological impacts of the Danjiangkou Reservoir on the middle and lower reaches of the Han River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(10):954-958. (in Chinese))
- [57] SHIEH C L, GUH Y R, WANG S Q. The application of range of variability approach to the assessment of a check dam on riverine habitat alteration [J]. *Environmental Geology*, 2007, 52(3):427-435.
- [58] KROLL C N, CROTEAU K E, VOGEL R M. Hypothesis tests for hydrologic alteration [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 530:117-126.
- [59] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers [J]. *River Research and Applications*, 2003, 19(5/6):397-441.
- [60] 韩帅, 夏自强, 刘猛, 等. 水库调度对大坝下游河道生态径流的影响 [J]. *水资源保护*, 2010, 26(1):21-23. (HAN Shuai, XIA Ziqiang, LIU Meng, et al. The influence of reservoir operation on in-stream ecological flow downstream of dam [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(1):21-23. (in Chinese))
- [61] 张爱静, 董哲仁, 赵进勇, 等. 黄河水量统一调度与调水调沙对河口的生态水文影响 [J]. *水利学报*, 2013, 44(8):987-993. (ZHANG Aijing, DONG Zheren, ZHAO Jinyong, et al. Effects of the integrated water regulation and water-sediment regulation of the Yellow River on the eco-hydrology of its estuary [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(8):987-993. (in Chinese))
- [62] GALAT D L, LIPKIN R. Restoring ecological integrity of great rivers: historical hydrographs aid in defining reference conditions for the Missouri River [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 422/423:29-48.
- [63] 陈启慧, 夏自强, 郝振纯, 等. 计算生态需水的 RVA 法及其应用 [J]. *水资源保护*, 2005, 21(3):4-5. (CHEN Qihui, XIA Ziqiang, HAO Zhenchun, et al. RVA method for the computation of ecological water requirement and its application [J]. *Water Resources Protection*, 2005, 21(3):4-5. (in Chinese))
- [64] 马晓超, 粟晓玲. 基于 RVA 的渭河中下游生态环境需水及其满足度研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(6):220-224. (MA Xiaochao, SU Xiaoling. Research on the eco-environment water requirements and its satisfaction of the middle and downstream of Weihe River based on RVA [J]. *Agricultural Research in the Arid*

- Areas,2013,31(6):220-224. (in Chinese))
- [65] SMAKHTIN V U, SHILPAKAR R L, HUGHES D A. Hydrology-based assessment of environmental flows: an example from Nepal [J]. Hydrological Sciences Journal, 2006,51(2):207-222.
- [66] 舒畅,刘苏峡,莫兴国,等. 基于变异性范围法(RVA)的河流生态流量估算[J]. 生态环境学报,2010,19(5):1151-1155. (SHU Chang, LIU Suxia, MO Xingguo, et al. Estimation of instream ecological flow based on RVA [J]. Ecology and Environmental Sciences,2010,19(5):1151-1155. (in Chinese))
- [67] 刘贵花,朱婧瑄,熊梦雅,等. 基于变动范围法(RVA)的信江水文改变及生态流量研究[J]. 水文,2016,36(1):51-57. (LIU Guihua, ZHU Jingxuan, XIONG Mengya, et al. Assessment of hydrological regime alteration and ecological flow at meigang station of Xinjiang River [J]. Journal of China Hydrology,2016,36(1):51-57. (in Chinese))
- [68] 官云飞,黄显峰,方国华,等. 基于RVA框架的河流适宜生态环境需水研究[J]. 中国农村水利水电,2014(1):105-110. (GUAN Yunfei, HUANG Xianfeng, FANG Guohua, et al. Research on river eco-environment water requirement based on RVA [J]. China Rural Water and Hydropower,2014(1):105-110. (in Chinese))
- [69] SOUTER N J. Applying the environmental flow components approach to the River Murray in South Australia[J]. Transactions of the Royal Society of South Australia,2017,141(2):132-150.
- [70] 涂晶晶,陈森林,艾学山,等. 河流生态流量特征图及生态流量评价方法[J]. 水资源保护,2015,31(1):99-105. (TU Jingjing, CHEN Senlin, AI Xueshan, et al. Diagram of river ecological flow characteristics and evaluation method of ecological flow [J]. Water Resources Protection,2015,31(1):99-105. (in Chinese))
- [71] 谢悦,夏军,张翔,等. 基于淮河流域中游鱼类不同等级生境保护目标的生态需水[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(5):76-81. (XIE Yue, XIA Jun, ZHANG Xiang, et al. Definition of environmental flow components based on different fish habitat protection goals in the middle reaches of Huai River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5):76-81. (in Chinese))
- [72] GEBREMICHAEL T G, MOHAMED Y A, VAN ZAAG P, et al. Temporal and spatial changes of rainfall and streamflow in the Upper Tekeze-Atbara River Basin, Ethiopia [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2017,21(4):2127-2142.

(收稿日期:2017-12-15 编辑:熊水斌)

· 信息播报 ·

灌溉效率悖论

2018年8月24日出版的《Science》发表了题为《灌溉效率悖论》(*The paradox of irrigation efficiency*)的论文。澳大利亚国立大学克劳福德公共政策学院的R. Q. Grafton教授为论文第一作者,中国清华大学公共管理学院的王亚华教授为该文共同作者,11名作者来自澳大利亚、法国、英国、美国、埃及、中国等国家。该研究发现,提高灌溉效率通常不会减少作物耗水量。该研究结果可能会促使各国政府重新思考和定位当前被普遍接受并认可的节水灌溉政策。

水资源高需求与水资源短缺是许多国家政府面临的一个政策难题。许多国家应对水资源危机的重要方法是提高灌溉效率(如推动新技术改进作物滴灌),将农业节水省出的水资源分配给工业、居民和生态环境用水,然而,提高灌溉效率通常不会减少耗水量。该文运用流域水循环机理和水资源过程要素的百分比变化情况,从理论上分析了节水困境的原因。该文指出,灌溉效率的提高会导致更多的农田耗水量、更多的地下水抽取量甚至更高的单位面积农田耗水量。原因是许多国家对灌溉效率的提高进行补贴,节水灌溉发展迅速,而节水灌溉技术进步会使农民种植更多的水资源密集型作物,以获取更大的经济收益,从而增大作物用水量与灌溉面积,减少回归水量,增加灌溉用水的消耗。导致节水困境难以打破的重要原因,是现行灌溉效率政策下,获益者希望维持现状,而大量为了提高灌溉效率而给予的补贴,又促进了这些寻租行为。

该文提出了应对节水困境的5条新的政策建议:①从农场到流域尺度,都设立水资源账户,进行全面综合的水资源核算,以记录和公开不同尺度水资源量的变化;②减少水资源的灌溉量,并且对灌溉面积进行总量控制;③对水资源进行价值评估,以确保对提高灌溉效率进行补贴所产生的公共利益大于成本;④对灌溉效率的提高所带来的影响进行风险评估,包括对入流量和出流量的不确定性进行评估;⑤更加深入分析灌溉效率政策对灌溉者行为的影响机制。

(河海大学雍斌供稿)