“量-质-生”三维水资源短缺评价: 评述及展望

刘俊国*, 赵丹丹

南方科技大学环境科学与工程学院, 深圳 518055

* 联系人, E-mail: liujg@sustech.edu.cn

2020-07-24 收稿, 2020-09-04 修回, 2020-09-08 接受, 2020-09-23 网络版发表

国家杰出青年科学基金(41625001)、中美国际合作网络IRC项目(51711520317)和南方科技大学高水平专项(G02296302, G02296402)资助

摘要 社会经济发展导致人类对水资源系统干扰程度加剧, 水资源短缺成为社会普遍关注的生态环境问题. 水资源短缺评价历经40年发展, 取得了从“水量型”一维模式、“水量-水质型”二维模式到“水量-水质-生态”(“量-质-生”)三维模式的阶段性进展. 本文在对国内外水资源短缺评价进行系统梳理的基础上, 提出了“量-质-生”三维水资源短缺理论及评价框架体系, 并对三维水资源短缺评价原理和核算方法进行了阐述. 最后总结了未来4个主要研究方向, 即完善三维水资源短缺评价理论体系、开展多空间尺度应用研究、考虑实体水-虚拟水时空流动的影响, 以及揭示水资源短缺演变机理. 在水资源短缺评估中, 综合考虑水量、水质和生态3个维度, 可以突破传统单一模式的限制, 有利于有的放矢地制定水资源应对策略, 实现水资源综合管理.

关键词 水资源短缺, 水量型缺水, 水质型缺水, 三维水资源短缺评价, 人水和谐

随着社会经济快速发展, 水资源供需矛盾日益突出, 再加上不合理、不科学的水资源利用, 致使淡水资源短缺成为影响越来越多国家与地区可持续发展的“瓶颈”^[1-3]. 水资源短缺受到区域水资源禀赋和人类对水资源开发利用的影响, 在水资源数量不充分的情况下会形成“水量型缺水”. 同时, 污染水体所提供给人惠益与洁净水不等同, 水资源短缺也受到污染物排放的影响, 在污染物超出环境承载力情况下会形成“水质型缺水”. 近年来, 自然-社会复合系统下的水资源短缺评价逐渐成为国际科学领域研究的前沿.

自20世纪80年代Falkenmark等人^[4]首次提出水资源短缺概念及评价方法以来, 水资源短缺评价经历了将近40年的发展. 早期的水资源短缺评价方法通常以水资源数量和用水量为基础. 这种方法简单明了、应用广泛, 但却忽略了对水质型缺水的定量评价. 由水体污染引起的水质型缺水方面的研究更为复杂和更有挑战性.

2013年, 联合国教科文组织(UNESCO)发布了国际水文计划第八阶段战略计划——“水安全: 应对地方、区域和全球挑战”(IHP-VIII: Water Security: Responses to Local, Regional and Global Challenges (2014–2022)), 将“解决水资源短缺和水质问题”明确列为该战略计划六大主题之一^[5]. 联合国2030年可持续发展目标(SDGs)也明确将“解决水资源短缺问题, 并大幅减少缺水人口”作为其一项具体目标(具体目标6.4)^[6].

近年来, 随着一些新理论和新方法的诞生, 综合考虑水资源量、人类用水、水质污染以及环境流等方面因素, 科学评价水资源短缺、识别其形成机制和演变规律、探索水资源短缺应对策略, 逐渐成为当前科学研究的前沿, 也是实现可持续发展与人水和谐的重大实践需求. 本文在系统梳理国内外水资源短缺评价研究的基础上, 初步构建“量-质-生”三维水资源短缺理论及评价体系, 明晰水资源评价研究的主要难点和

引用格式: 刘俊国, 赵丹丹. “量-质-生”三维水资源短缺评价: 评述及展望. 科学通报, 2020, 65: 4251–4261

Liu J G, Zhao D D. Three-dimensional water scarcity assessment by considering water quantity, water quality, and environmental flow requirements: Review and prospect (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 4251–4261, doi: 10.1360/TB-2020-0918

未来重要研究方向。

1 水资源短缺概念、分类和成因

水资源短缺一般可定义为特定区域内水量或水质不能满足水资源需求的一种状态,这种需求可能来自社会经济部门,也可能来自自然生态系统。瑞典科学家Falkenmark等人^[4]是国际上最早开展水资源短缺研究的学者之一,她在20世纪80年代提出采用人均水资源量来表征不同国家的水资源短缺状态,人均水资源量越低,表示该地区水资源短缺越严重。我国著名水文水资源学者王浩和陈家琦等人^[7,8]指出,短缺是一种相对状态,水资源短缺描述一定经济技术条件下,可供水资源量和质的时空分布不能满足区域内生产、生活以及生态需求的一种不可持续的状态。因此,水资源短缺是测度一定生态保护标准下的社会经济系统缺水状况的重要指标,是科学配置水资源与度量水资源可持续性的重要科学依据之一。

水资源的总量、用水量和供给量是与水资源短缺密切相关的3个变量^[9,10]。其中,水资源总量通常是指由降水形成的扣除重复计算量后地表和地下产水量之和,是测度区域水资源禀赋的重要指标^[11,12];水资源用水量指国民经济各部门、生物与非生物环境维持正常运转所用水量^[13];水资源供给量则指通过各种工程与非工程措施从自然界提取的可供开发利用的水资源量,包括工程供水量、跨流域调配水量、地下水开采量、海水淡化、中水回用等多种类型^[11]。多数水资源短缺指标的定义、计算和解读主要以这3个变量为基础,例如:以人均水资源量大小衡量区域水短缺情况的Falkenmark指标法^[4];以用水与水资源量比例关系评价水短缺的紧迫系数法(criticality ratio)等^[14]。此外,很多研究也通过这3种水资源变量的特性来定义不同的水资源短缺类型,例如:将由于区域自然与气候条件本底差异而导致的水资源总量过少而带来的水短缺问题称为资源性缺水,典型地区如中国西北内陆干旱区、中亚和非洲等区域^[15];将水资源总量丰富,但由于成本过高或者水价过低使得水资源开发积极性受到抑制,从而导致水资源供给量不能满足基本需求的水短缺称为工程性缺水,其他诸如存量短缺、流量短缺等水短缺类型也与这3种水资源关键变量密切相关^[16]。因此,水资源短缺程度不仅受水资源量的影响,经济高速发展导致的用水量激增和供给量受限于技术水平等因素对水资源短缺的影响也越来越大,明确水资源的概念、分

类及其成因是评估水资源短缺的基础。

2 水资源短缺评价发展趋势

2.1 经典水量型一维水短缺指标评述

图1展示了近40年来发表在国际学术期刊、与水资源短缺密切相关的论文数量变化情况。水资源短缺研究正从初期的缓慢发展转向近年来的快速发展,研究维度也从早期的只注重水量型缺水(“一维”)扩展到同时关注水量型缺水和水质型缺水(“二维”)。近年来又延伸至水量-水质-水生态(“量-质-生”)三维水资源短缺,评价指标的丰富性和多样性得到了一定发展。表1展示了水短缺初期发展阶段5种主要水量型水短缺指标的测算方法、阈值标准等内容,指标的简要评述如下。

(i) Falkenmark指标法。该方法提出之前,水资源短缺研究没有明确的方法支撑,相关文献主要把水资源短缺作为一种生态环境问题进行表述,没有涉及定量评价的问题。20世纪80年代末,瑞典科学家Falkenmark等人^[4]在研究非洲地区水资源状况时,根据区域水资源量和区域人口数核算地区人均水资源占有量,并将平均值 $1700\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{年})$ 设定为衡量水资源充足与短缺的阈值。即人均水资源年占有量低于 1700 m^3 的地区存在水资源短缺压力,反之则为水资源无压力区或水资源丰富区,其中低于 1700 m^3 的地区又按照不同阈值分为高度水短缺($500\sim 1000\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{年})$)、绝对水短缺($<500\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{年})$)等类型。该方法凭借计算简单、数据需求低等优势在水资源评价领域得到广泛的应用,是目前世界范围内应用最多的水短缺指标之一^[17,18]。Ohlsson^[19]将人均水资源量与人力发展指数(human development index)相结合对Falkenmark指标进行完善,以反映水资源对社会的适应能力。童绍玉等人^[20]将该指标进一步完善,并用来评估中国水资源短缺的空间格局及缺水类型。

(ii) 紧迫系数法(criticality ratio)。该方法将取(用)水与水资源量进行比较以评价水资源短缺,是另外一个在水资源评价中得到广泛应用的水短缺指标^[14]。如Oki和Kanae^[1]在*Science*上发表文章,采用紧迫系数法评价了当前全球水资源短缺情况;Zhao等人^[21]采用改进的紧迫系数法,评价国内不同省份间虚拟水贸易和实体水调度对水资源短缺的影响。紧迫系数法规定当取用水占水资源量比例超过40%时,该地区就有较高的水资源短缺问题。由于用水既可指代生产活动的取水量,又

图 1 水资源短缺评价的3个研究阶段、发文量及水资源短缺代表性评价指标. 利用主题词“water scarcity”在Scopus检索, 检索时间为2020-07-15, 检索时段为1980~2019年. 其中, 橙色背景为主要关注水量型缺水一维模式的阶段, 绿色背景为同时重视水量型缺水和水质型缺水的二维模式阶段, 浅蓝背景为开始关注“量-质-水”三维水资源短缺评价的阶段

Figure 1 The number of publications and representative indicators based on the keyword “water scarcity” from Scopus. Searching time is 2020-07-15 and search period is 1980–2019. Orange background is the period for “quantity-induced scarcity”; green background is a period that paid attention to both “quantity-induced scarcity” and “quality-induced scarcity”; light blue is a period that starts the study on three-dimension water scarcity assessment including water quantity-water quality and environmental flows

表 1 经典水量型一维水短缺指标汇总

Table 1 Summary of the traditional approaches for one-dimension water scarcity assessment

指标名称	指标解释	单位	评价阈值	水量维度	水质维度	生态维度
Falkenmark指标法	人均可利用水资源量	m ³ /(人 年)	>1700, 无压力; 1000~1700, 有水资源短缺压力; 500~1000, 高度水短缺; <500, 绝对水短缺	有	无	无
紧迫系数法	用水量与水资源量数量关系	%	>40, 水短缺	有	无	无
IWMI指标法	物理型水短缺和经济型水短缺	无量纲	按照一定标准将国家分为4类: 物理型水短缺国家、经济型水短缺国家、物理型和经济型双重水短缺国家、无水短缺国家	有	无	无
蓝绿水短缺	满足健康饮食的蓝绿水需求量与蓝绿水资源数量关系	m ³ /(人 年)	>1300, 无压力; <1300, 水短缺	有	无	无
基于LCA水短缺	用水量、水足迹与水资源量的复合关系	无量纲	<0.1, 无压力; 0.1~0.5, 中度压力; 0.5~0.9, 严重压力; >0.9, 极端压力	有	无	无

可指代生产活动的实际水资源消耗的耗水量(“消耗性用水”), 一部分取水量通过回流或者渗漏等方式重新返回到流域, 使得取水量与耗水量之间的数量差异较大, 间接导致紧迫系数法的结果差异. 因此有些学者对以40%为阈值来反映区域水短缺状态提出一些质疑^[22].

从2009年开始, Pfister等人^[23]和Frischknecht等人^[24]将紧迫系数法引入生命循环周期研究领域, 提出了基于生命循环周期(LCA)的水短缺指标, 以强调耗水及其环境影响. LCA评估分为中点端和终点端两种, 其中, 中点端指标从水资源量消耗角度看水短缺问题, 而

终点端指标则强调水短缺对环境质量、人类健康等方面的潜在影响,涵盖水资源的用途差异性和生态特征等属性.当前LCA通常在中点端评估水短缺,Pfister等人^[23]创建的水压力指数强调降水的年内与年际变化会导致特定时期水压力增加,因此引入一个Nilsson等人^[25]发明的水文变化因子来表征此要素,最后用对数函数方程将结果调整为0~1的连续值,并分别将0.1、0.5和0.9作为中度、严重和极端水短缺的阈值^[23].这种基于LCA的水资源短缺指标的优势在于能对水资源利用的影响进行评估,但将该指标的应用还相对较少.

(iii) IWMI指标法. IWMI指标是由国际水资源管理研究所(International Water Management Institute, IWMI)提出的一个更为复杂的水资源短缺评估指标^[15],包括物理型缺水(physical water scarcity)和经济型缺水(economic water scarcity)两种指标.该指标不仅考虑可供人类需求的可再生淡水资源的供水比重,同时也考虑到现有的水利基础设施,如储存在水库中的水量,使其具备评估国家发展水利基础设施和提高灌溉用水效率潜力的能力.由于其相关指数计算较为复杂,且难以直观地表达,除了Rijsberman等人^[26,27]进行了相关研究之外,指标的应用范围和影响力远低于Falkenmark指标法和紧迫系数法.

(iv) 蓝绿水短缺指标(blue-green water scarcity). 绿水是指来源于降雨,存储于非饱和土壤层的土壤水,是农业生产的重要水资源,约占90%的农业耗水,全球粮食产量的约60%是由绿水供给^[28].融合绿水资源的蓝绿水短缺评估方法是由Rockström等人^[28]在评估未来粮食生产的可利用水量时提出,通过比较健康饮食条件下(3000 kcal/(人·天))的全球平均人均蓝绿水资源消耗量(1300 m³/(人·年))与当地人均可利用蓝绿水资源量的数量关系来确定水资源短缺等级.如果区域人均可利用蓝绿水量少于1300 m³,则认为该区域具有水短缺问题. Gerten等人^[29]将区域差异化饮食而导致的用水需求差异引入该指标,对该指标进一步完善,建立了可以考虑区域差异化的蓝绿水短缺指标. Kummu等人^[30]采用该方法分析了气候变化背景下的全球水短缺的年内变动.

2.2 水短缺指标新进展

综上所述,我们发现国内外水资源短缺评价主要关注一维的水量型缺水,很少把衡量水资源污染程度的水质型缺水纳入评价体系中,综合考虑水量水质两

个维度评价水资源短缺方面还未形成较好的研究体系.但水质型缺水已经成为影响许多国家和地区的社会、经济和环境可持续发展的重要制约因素.例如,中国被联合国列为13个具有先天性水资源的贫水国之一,随着人口增长、社会经济高速增长和城镇化加剧,水资源受到各种污染,导致水质急剧恶化,这种污染导致的水质型缺水与资源型缺水彼此影响,进一步加剧了中国的缺水状况.不考虑水质的、单纯的水量型水资源短缺评价,无法识别水质污染对可利用水资源量的影响,也就不能评估不同生产经营活动对水体水质恶化的影响程度.因此,综合评价水量型和水质型缺水成为当前水资源短缺研究的一个新方向.在此背景下,国际水文科学协会(IAHS)启动了2013~2022十年科学计划. Panta-Rhei把“水资源短缺评价”作为其首批11项研究主题之一,该主题的核心研究内容即为探讨水量型缺水和水质型缺水的评价方法及其应用^[31].

Sullivan等人^[32]曾提出过水贫穷指数法,将人类福祉与水资源可获得性连接起来,并指出水短缺对人类的影响程度.该指标既能反映水资源数量和实际供水能力,又可以考虑用水的生态效应,包含5个主要因素:可利用的水资源量、水资源可获性、水资源承载力、用水途径和与该地区水生栖息地密切相关的生态系统产品与服务.该指标要素选取全面,将以上3种评价方法未考虑的要素都囊括在内.但这种方法存在计算过程繁琐、获取整套数据难度大、个别指标选取和量化需征询专家意见、主观性强等问题,导致其更适合应用于国家层面而在小尺度的空间应用困难^[33].因此,该指数并没有在后续研究中得以发展.

结合水足迹理念评价水资源短缺成为近年来研究水资源短缺的一个新趋势.水足迹是指生产人类消费的产品与服务而消耗掉的水资源量^[34-36].水足迹包含消耗地表水和地下水的蓝水足迹、消耗土壤水的绿水足迹及表征水污染的灰水足迹. Hoekstra等人^[37]通过对比逐月的蓝水足迹与蓝水资源量,在全球尺度评价了405个流域水量性缺水的情况.由于灰水足迹的概念建立了生产消费活动所产生的污染物与稀释这些污染物到一定环境水质标准所需的淡水资源量之间的定量关系,为定量评价水质性缺水提供了新的思路.

水质型缺水也是学界近年来关注的重要方向.作者团队在2013年基于水足迹的理念,构建了一种综合考虑水量(quantity)和水质(quality)的二维水资源短缺评价方法(Q-Q指标法)^[38].水量型缺水采用国际上通用

的紧迫系数法进行评价,而水质型缺水评价首先依据污染物吸纳理论,以区域自然水体的本底浓度和现有的环境水质标准为基准,核算将污染负荷稀释至指定水质标准所需的淡水量(即灰水足迹);然后对比灰水足迹与区域环境承载力,揭示纳污负荷与临界负荷之间的定量关系,以此核算水质型缺水指标,从而评价不同尺度的区域水资源短缺的类型和程度。以首都北京市为研究区,核算该地区1995~2009年水资源短缺状况。结果显示,2009年北京市水量型和水质型缺水指标值分别为1.2和2.3,均高于各自的阈值0.4和1.0,得出北京市是一个同时具有水量型和水质型水资源短缺问题的典型地区的研究结论;同时“累计剩余水质型缺水指标”解释了74%的水质演变趋势,能够合理地阐释区域水质演变过程。张楠等人^[39]运用类似方法,基于灰水足迹理论对水资源较缺乏的河北省2005~2013年期间的水量-水质展开评价,研究结果显示河北省灰水足迹整体呈下降趋势,2013年的灰水足迹为242.41亿 m^3 ,比2005年下降了19.7%。除此之外,我国传统的水污染评价方法还包括综合污染指数法、污径比、模糊数学法、人工神经网络等多种方法^[40~45],然而这些方法主要评估受污染水体污染程度,对水资源数量与质量相互作用关系研究不多。相比之下,Q-Q评价法操作简单,而且能够直观地反映出某一流域(区域)水资源数量和质量时空分布状况,从而为该流域(区域)的水资源综合规划、配置和水环境管理提供方法支撑与决策依据。虽然基于水足迹理念评价水资源短缺已有一些前期的研究,但以前的研究过于简单,例如在Q-Q指标法中,水量型缺水评价中假定环境流需水量为水资源量的80%,未考虑环境需水量的区域时空差异性,加大了评估结果的不确定性^[46];在水质型缺水评价中假定排放到水体的污染物占总污染物排放量的固定百分比^[21,38,47]。因此,二维水资源短缺评价方法需要继续完善其对生态因素的考量,从而能够更加合理地评价水量型和水质型缺水。

3 “量-质-生”三维水资源短缺理论及评价体系

自Falkenmark等人^[4]在20世纪80年代提出水资源短缺概念至今,水量型缺水一直是水资源短缺评价的重点,在综合考虑水量、水质和生态评价水资源短缺方面始终没有形成完善的研究体系。“量(quantity)-质(quality)-生(environment)”三维水资源短缺评价(3D

water scarcity,或Q-Q-E指标法)是我国学者在研究中国水资源水环境实践中首次提出的、并快速被国际学者接受的研究体系^[46]。该评价体系在Q-Q水短缺评价方法基础上,将Q-Q指标中利用取水量与水资源量比值的方法改进成以耗水量与可利用水资源为基础的水量型缺水评估方法;同时,将原始方法中假设的80%的生态环境需水量改进成可代表区域生态差异性的实际生态需水量,从而形成了可全面考虑水量、水质和生态需水的“量-质-生”三维水短缺评估方法(图2)。如何合理地确定区域实际生态需水量是本方法体系的重点之一,从水循环角度看,生态需水是维持生态系统自身生存和生态功能,并保证一定的生态质量下的最低水资源需求量。国内外核算生态需水的方法达200多种,主要分为水文学方法、生境模拟法、水力学等级评定和整体分析法^[48],每种方法都有各自的优缺点及其使用条件。随着水文与生态系统过程模型的大力发展,以地区土地利用、气候、水文等特征为基础,利用诸如APEX、EPIC、SWAT等模型来模拟地区的实际生态需水量成为目前核算生态需水量的重要手段之一。这种改进后的评价方法能表征不同水禀赋、不同下垫面条件、不同生态特征背景下的区域水资源短缺现状,相较于传统的水资源短缺评价模式,新模式的信息与内涵更为丰富,对空间异质性的表达更为完善。Q-Q-E指标法的核心方程如下:

$$S_{\text{quantity}} = \frac{f}{C_{\text{quantity}}} = \frac{W-D}{Q-e}, \quad (1)$$

$$S_{\text{quality}} = \frac{L}{C_{\text{quality}}} = \frac{D \times c_{\text{effi}} - W \times c_{\text{act}}}{(c_{\text{max}} - c_{\text{nat}}) \times Q}, \quad (2)$$

其中, S_{quantity} 为区域内水量型缺水指标, f 为区域特定时间段内的实际消耗蓝水量,即蓝水足迹(m^3), W 为取水量(m^3), D 为排水量或退水量(m^3); C_{quantity} 为在满足环境流需求下人类可以利用的水资源量,即蓝水资源的承载能力(m^3), Q 为区域的淡水资源总量(m^3), e 为维持该区域基本生态系统功能所需的生态需水量(m^3); S_{quality} 为区域内水质型缺水指标, L 为区域内的净污染负荷(kg), c_{effi} 为区域内污染物排放浓度(kg/m^3), c_{act} 为区域内取水水源的实际污染物的浓度(kg/m^3), C_{quality} 则是在满足特定环境水质标准前提下,区域水资源量能够稀释的最大污染物阈值(kg),即环境承载力(kg), c_{max} 为达到特定环境水质标准的污染物最高浓度(kg/m^3), c_{nat} 为接纳水体的初始浓度(kg/m^3),也即自

图 2 3D water scarcity评价方法示意图
Figure 2 The approach of the 3D water scarcity

然条件下某种污染物的本底浓度。

3D water scarcity设立了阈值标准(表2), 为了便于理解, 图2以示意图形式揭示了该方法核算水资源短缺的基本原理与过程。Q-Q-E指标法本质上是一套可快速评估区域不同维度的水资源短缺现状的方法体系。一方面, 该方法体系既可以考虑区域生产活动带来的水量型缺水程度, 又可以评估生产和生活排污状况带来的水质型水短缺, 同时还能定量评估由于地区的地质地貌、产汇流特点和植被覆盖特征差异性而导致的生态需水的空间异质性。另一方面, 该方法具有操作简单、物理含义明确、数据需求量低和计算成本低等诸多优点, 可快速应用于不同空间尺度的水资源短缺状况评估。

3D water scarcity指标法首次应用于我国典型的干旱半干旱气候区——内蒙古黄旗海流域, 评价该流域水资源短缺状况^[46]。研究结果显示, 为了保证该地区生态系统维持基本生态功能, 大约26%的水资源量应该分配给生态系统, 即环境流应占用蓝水资源量的四分之一左右。区域水量型缺水和水质型缺水指标分别达到1.3和14.2, 均超过阈值1.0, 表明该区域存在水量型缺水和水质型缺水, 水质型缺水问题尤为严重。因此该区域的3D water scarcity指标法的结果表达为1.3(26%)|14.2, 即黄旗海流域水量型缺水程度为1.3, 生态需水量为流域总水资源量的26%, 水质型水短缺为14.2。3D

water scarcity评估可为区域提供一组包含水量、水质以及生态需水信息的水短缺信息, 适用于不同尺度、不同地区的水短缺核算。然而该指标不如Falkenmark指标法、紧迫系数法直观, 不能用单一值来表征区域缺水状况, 而是需要具备一些生态水文的专业知识后才能很好地解释指标包含的信息。

4 “量-质-生”三维水资源短缺评价未来重点研究方向

4.1 “量-质-生”三维水资源短缺评价研究体系发展完善

虽然3D water scarcity指标法已经充分考虑水资源数量、水污染和区域生态需水量情况, 但是该指标仍然有许多可供完善之处。例如: 水量型缺水评估中, 仍然以蓝水资源为主, 对绿水(土壤水)资源的研究还十分有限, Schyns等人^[49]基于绿水足迹和最大可利用绿水构建了一个简单的绿水短缺指标, 是为数不多的核算绿水短缺状况的研究之一。绿水作为最大的水资源储量库, 其可持续性对提高粮食产量、缓解贫穷、增强生态系统稳定性等问题具有极大的促进作用, 增加绿水短缺评估将是完善三维水短缺评价体系的重点与难点工作之一^[50]; 水资源短缺评估目前主要集中在空间

表 2 二维或三维模式下水量型和水质型缺水指标及其阈值标准
Table 2 The thresholds of 2D or 3D water scarcity indicators

3-D water scarcity指标	阈值设置	等级
$S_{quantity}$	$S_{quantity} < 1$	不缺水
	$1 < S_{quantity} < 1.5$	轻度水量型缺水
	$1.5 < S_{quantity} < 2$	中度水量型缺水
	$S_{quantity} > 2$	严重水量型缺水
$S_{quality}$	$S_{quality} < 1$	当地污染物可以被淡水资源量稀释到一定的环境标准, 无水质型水短缺
	$1 < S_{quality} < 1.5$	当地污染物无法完全被淡水资源量稀释达到一定的环境标准要求, 存在轻度水质型缺水
	$1.5 < S_{quality} < 2$	中度水质型缺水
	$S_{quality} > 2$	严重水质型缺水

尺度上的区域水短缺差异性的量化^[51], 对不同用水部门的水短缺水平的研究还十分有限^[52], 而部门尺度水短缺研究对明确用水职责、制定水资源可持续性管理政策具有重要现实指导意义, 因此构建部门尺度水短缺评价体系也是未来完善水短缺评价体系的重要方向。此外, 未来的生态需水量评估应尝试应用多种新方法, 并着重考虑将河流季节性波动、河流迁移转化规律、生物栖息地、物种多样性等因素在内的评估方法, 以便在生态需水量中体现不同流动特性水体的生态需水特征。

4.2 “量-质-生”三维水资源短缺评价方法的多空间尺度应用

3D water scarcity指标法将水质、水量和生态需水这3个重要水资源要素融合在“量-质-生”三维水短缺评估体系中, 为精确评估区域水资源短缺提供了重要的理论方法支撑。截至目前, 应用该方法评估区域水短缺研究还十分有限, 研究尺度也多以小流域为主。Ma等人^[53]评估了中国2012~2016年在栅格单位的水量-水质型水短缺状况, 是为数不多的在大尺度上作水质型水短缺的研究之一, 然而该研究也将环境流比例假设为80%, 并未考虑不同地质条件下生态环境需水量的差异性。因此, 基于3D water scarcity指标法的从全球到流域、从单一部门到多部门联合的水资源短缺评估将是今后重要研究方向之一。首先, 不同研究尺度的综合水短缺评估可为不同层次的政策决策者和利益相关方在区域水资源政策的制定与实施中提供科学的技术

支撑。其次, 考虑生态需水量的水短缺评估方法, 充分肯定了生态系统作为水资源系统中重要组成部分的不可替代的功能作用, 水资源的开发与利用必须以不破坏当地生态系统的持续发展、维持人类用水和生态用水的平衡为重要前提条件。最后, 量化分部门的水资源短缺水平是对现有水资源管理政策中重视总量控制、轻视部门目标分解的现状的有益补充与完善, 为科学合理地调配不同生产部门的水资源利用奠定重要基础。

4.3 在“量-质-生”三维水资源短缺评价中考虑虚拟水-实体水流动规律

最近研究显示, 区域贸易会影响局部地区的水资源短缺问题^[52]。全球水资源利用和水污染会隐含于商品中, 随着区域贸易在生产者和消费者之间不断流动, 这种虚拟水流动, 又会影响不同区域的水资源状况^[21,54-56]。实体水形式的长途输水系统, 比如南水北调、引滦入津、引黄入京等调水工程, 对调入区和调出区的缺水情况均有不同程度的影响^[57]。伴随贸易的虚拟水流动与调水工程中的实体水流动在区域水资源配置与调控中将扮演越来越重要的角色, 虚拟水-实体水对区域水资源短缺的影响不容忽视, 未来在全球合作日益深化的背景下, 虚拟水-实体水的贡献也会相应增加^[57]。虚拟水-实体水流动是一把“双刃剑”, 一方面, 水短缺地区有机会通过产品进口缓解其本身的物理性缺水, 水富裕地区可通过产业出口来获得经济收益; 另一方面, 如果水短缺地区经营水密集产品的出口贸易, 反而会加重其本地区的水压力, 而水丰富区从外部区域进口水密集产品来代替本地生产, 则会间接造成部分本地水资源的浪费。因此, 在“量-质-生”三维水资源短缺评价中, 需要充分考虑实体水和虚拟水的区域流动规律及其影响, 也将是“量-质-生”三维水资源短缺研究的重要方向之一。

4.4 水资源短缺演变机理解析

对水资源短缺的驱动因素进行分析是研究水资源安全的重要方面^[58]。目前大量研究表明, 人类活动, 包括人口增长、人均消费需求增加以及人类引起的气候变化等因素, 是引起自然水循环改变的主要原因^[58,59], 而其中高强度的生产和消费活动是造成水资源短缺的主要贡献因素^[50]。经济结构、消费结构、极端气候等因素也是造成区域水资源短缺的重要因素。结构分解

分析^[60]、指数分解分析^[61]、IPAT模型^[62]、多元统计分析^[63]等方法是目前驱动力分析的几种主流方法。此外,神经网络、机器学习、大数据分析等新兴理论在水资源管理与驱动力分析方面也初露头角^[64,65]。但目前从生产及消费角度定量评估水资源短缺演变机理的研究主要聚焦在水量型缺水方面,水质型缺水的演变规律和机理还鲜有报道,这与水质型缺水研究落后于水量型缺水有很大关系。另外,在基于水足迹评价水资源短缺的研究中^[66,67],也没有阐明水质型缺水演变机理。因此,在完善“量-质-生”三维水资源短缺评价方法的同时,也需要对三维水资源短缺的演变机理进行更深入的探讨和研究。

5 结语

水资源短缺评价为衡量全球、国家和地区水资源状态提供了方法支撑。本文回顾了水资源短缺评价40年发展历程,发现国内外水资源短缺评价已经从“水量型”一维模式向“水量-水质型”二维模式以及“水量-水质-生态”(“量-质-生”)三维模式转变。本文提出了“量-质-生”三维水资源短缺评价的理论框架体系,阐述了该研究体系的基本概念、原理及核算方法。最后,对未来水资源短缺的主要研究方向进行了探讨,为进一步完善水资源短缺评价体系,实现水资源可持续利用,及人水和谐提供新思路和方法支撑。

参考文献

- 1 Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 2006, 313: 1068–1072
- 2 Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J, et al. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 2000, 289: 284–288
- 3 Qin D Y, Lu C Y, Liu J H, et al. Theoretical framework of dualistic nature-social water cycle. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 810–820 [秦大庸, 陆垂裕, 刘家宏, 等. 流域“自然-社会”二元水循环理论框架. 科学通报, 2014, 59: 419–427]
- 4 Falkenmark M, Lundqvist J, Widstrand C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches. *Nat Resour Forum*, 1989, 13: 258–267
- 5 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). 2012
- 6 United Nation. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: Division for Sustainable Development Goals, 2015
- 7 Chen J Q, Wang H. Water Resources Introduction (in Chinese). Beijing: China Water and Power Press, 1996 [陈家琦, 王浩. 水资源学概论. 北京: 中国水利水电出版社, 1996]
- 8 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. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 3297–3311 [王浩, 贾仰文, 杨贵羽, 等. 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟. 科学通报, 2013, 58: 1064–1077]
- 9 Wang H, Qin D Y, Chen X J, et al. Water resources evaluation criteria and calculation methods (in Chinese). In: Proceeding of the 2013 Annual Conference of China Hydraulic Engineering Society, 2004 [王浩, 秦大庸, 陈晓军, 等. 水资源评价准则及其计算口径. 见: 中国水利学会2003年学术年会论文集, 2004]
- 10 Merritt S, Jiang L. Several explanations for water demand (in Chinese). *Water Resour Hydro Exp*, 2005, 26: 25–27 [S.梅瑞特, 江莉. 水需求的几种解释. 水利水电快报, 2005, 26: 25–27]
- 11 Ministry of Water Resource of China. Code of Practice for Water Resources Bulletin (in Chinese). GB/T23598-2009, 2009 [中国水利部. 水资源公报编制规程. GB/T23598-2009, 2009]
- 12 Li J Y, Li T J, Wang G Q, et al. Atmospheric water resource and precipitation conversion (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 2785–2796 [李家叶, 李铁键, 王光谦, 等. 空中水资源及其降水转化分析. 科学通报, 2018, 63: 2785–2796]
- 13 Schmied H M, Caceres D, Eisner S, et al. Simulating global freshwater resources with WaterGAP 2.2 D. In: American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, 2019
- 14 Alcamo J, Henrichs T, Rösch T. World water in 2025: Global modeling and scenario analysis for the world commission on water for the 21st century. Hessen: University of Kassel, 2000
- 15 Seckler D, Amarasinghe U, Molden D, et al. World Water Demand and Supply, 1990 to 2025: Scenarios and Issues. Research Report. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, 1998
- 16 Xia C X. Definition and measurement of water resource deficiency (in Chinese). *Water Resour Protect*, 2006, 22: 88–91 [夏骋翔. 水资源短缺的定义及其测度. 水资源保护, 2006, 22: 88–91]
- 17 Veettil A V, Mishra A K. Potential influence of climate and anthropogenic variables on water security using blue and green water scarcity, Falkenmark index, and freshwater provision indicator. *J Environ Manag*, 2018, 228: 346–362

- 18 Gampe D, Nikulin G, Ludwig R. Using an ensemble of regional climate models to assess climate change impacts on water scarcity in European river basins. *Sci Total Environ*, 2016, 573: 1503–1518
- 19 Ohlsson L. Water conflicts and social resource scarcity. *Phys Chem Earth Part B Hydrol Oceans Atmos*, 2000, 25: 213–220
- 20 Tong S Y, Zhou Z Y, Peng H Y. Spatial pattern of scarcity of water and its shortage types in China (in Chinese). *Ecol Econ*, 2016, 32: 168–173 [童绍玉, 周振宇, 彭海英. 中国水资源短缺的空间格局及缺水类型. *生态经济*, 2016, 32: 168–173]
- 21 Zhao X, Liu J, Liu Q, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 1031–1035
- 22 Liu J G, Yang H, Gosling S N, et al. Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth Future*, 2017, 5: 545–559
- 23 Pfister S, Koehler A, Hellweg S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environ Sci Technol*, 2009, 43: 4098–4104
- 24 Frischknecht R, Büsser S, Krewitt W. Environmental assessment of future technologies: How to trim LCA to fit this goal? *Int J Life Cycle Assess*, 2009, 14: 584–588
- 25 Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 2005, 308: 405–408
- 26 Cosgrove W J, Rijsberman F R. *World Water Vision: Making Water Everybody's Business*. London: Earthscan Publications Ltd, 2000
- 27 Rijsberman F R. Water scarcity: Fact or fiction? *Agric Water Manage*, 2006, 80: 5–22
- 28 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. *Water Resour Res*, 2009, 45: WR006767
- 29 Gerten D, Heinke J, Hoff H, et al. Global water availability and requirements for future food production. *J Hydrometeorol*, 2011, 12: 885–899
- 30 Kummu M, Gerten D, Heinke J, et al. Climate-driven interannual variability of water scarcity in food production potential: A global analysis. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2014, 18: 447–461
- 31 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. *Hydrol Sci J*, 2013, 58: 1256–1275
- 32 Sullivan C A, Meigh J R, Giacomello A M. The water poverty index: Development and application at the community scale. *Nat Resour Forum*, 2003, 27: 189–199
- 33 Zhang X L, Liu C M, Gao Y Y, et al. A study of several issues concerning water resources security (in Chinese). *China Rural Water Hydro*, 2011, 1: 9–13 [张晓岚, 刘昌明, 高媛媛, 等. 水资源安全若干问题研究. *中国农村水利水电*, 2011, 1: 9–13]
- 34 Hoekstra A Y. *The Water Footprint of Modern Consumer Society*. London: Routledge Taylor & Francis Group, 2019
- 35 Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resour Manag*, 2006, 21: 35–48
- 36 Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The water footprint of humanity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: 3232–3237
- 37 Hoekstra A Y, Mekonnen M M, Chapagain A K, et al. Global monthly water scarcity: Blue water footprints versus blue water availability. *PLoS One*, 2012, 7: e32688
- 38 Zeng Z, Liu J, Savenije H H G. A simple approach to assess water scarcity integrating water quantity and quality. *Ecol Indic*, 2013, 34: 441–449
- 39 Zhang L, Li C H, Yang Z F, et al. Water resources assessment of Hebei Province by grey water footprint (in Chinese). *J Beijing Normal Univ (Nat Sci)*, 2017, 53: 75–79 [张楠, 李春晖, 杨志峰, 等. 基于灰水足迹理论的河北省水资源评价. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53: 75–79]
- 40 Wang X Q, Liu C M, Zhang Y. Water quantity-quality combined evaluation method for rivers' water requirements of the instream environment in dualistic water cycle: A case study of Liaohe river basin. *J Geogr Sci*, 2006, 61: 1132–1140
- 41 Huang Q, Zhang Z Z, Wang K, et al. Improvement to the dilution-ratio calculation method and its application (in Chinese). *J Safety Environ*, 2008, 8: 37–39 [黄强, 张泽中, 王宽, 等. 改进污径比计算方法及应用. *安全与环境学报*, 2008, 8: 37–39]
- 42 Xia J, Wang Z G, Yan D, et al. An integrated assessment method of water quality and quantity related to surface water resource status (in Chinese). *J Nat Resour*, 2006, 21: 146–153 [夏军, 王中根, 严冬, 等. 针对地表来用水状况的水量水质联合评价方法. *自然资源学报*, 2006, 21: 146–153]
- 43 Peng Y J, Huang Y J, Guo M Z. Water shortage in major cities across the country: Fuzzy multi-factor and multi-level comprehensive evaluation method (in Chinese). *Water Plann Design*, 1996, 4: 20–24 [彭岳津, 黄永基, 郭孟卓. 全国主要缺水城市缺水程度和缺水类型的模糊多因素多层次综合评价法. *水利规划与设计*, 1996, 4: 20–24]
- 44 Wang J H, Xiao W H, Wang H, et al. Integrated simulation and assessment of water quantity and quality for a river under changing environmental conditions (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1101–1108 [王建华, 肖伟华, 王浩, 等. 变化环境下河流水量水质联合模拟与评价. *科学通报*, 2013, 58: 1101–1108]
- 45 Xia X H, Yang Z F, Shen Z Y, et al. Integrated evaluation of water quality and quantity of Yellow River (in Chinese). *Acta Sci Circumst*, 2005, 25: 595–600 [夏星辉, 杨志峰, 沈珍瑶, 等. 从水质水量相结合的角度再论黄河的水资源. *环境科学学报*, 2005, 25: 595–600]
- 46 Liu J, Liu Q, Yang H. Assessing water scarcity by simultaneously considering environmental flow requirements, water quantity, and water quality. *Ecol Indic*, 2016, 60: 434–441

- 47 Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The Monthly Blue Water Footprint Compared to Blue Water Availability for the World's Major River Basins. Delft: UNESCO-IHE, 2011
- 48 Zhong H P, Liu H, Geng L H, et al. Review of assessment methods for instream ecological flow requirements (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2006, (3): 430–434 [钟华平, 刘恒, 耿雷华, 等. 河道内生态需水估算方法及其评述. *水科学进展*, 2006, (3): 430–434]
- 49 Schyns J F, Hoekstra A Y, Booij M J, et al. Limits to the world's green water resources for food, feed, fiber, timber, and bioenergy. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2019, 116: 4893–4898
- 50 Liu J G, Zhao D D, Mao G Q, et al. Environmental sustainability of water footprint in mainland China. *Geogr Sustain*, 2020, 1: 8–17
- 51 Liu X C, Tang Q H, Liu W F, et al. A spatially explicit assessment of growing water stress in China from the past to the future. *Earth Future*, 2019, 7: 1027–1043
- 52 van Vliet M T H, Flörke M, Wada Y. Quality matters for water scarcity. *Nat Geosci*, 2017, 10: 800–802
- 53 Ma T, Sun S, Fu G T, et al. Pollution exacerbates China's water scarcity and its regional inequality. *Nat Commun*, 2020, 11: 650
- 54 Vörösmarty C J, Hoekstra A Y, Bunn S E, et al. Fresh water goes global. *Science*, 2015, 349: 478–479
- 55 Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity. *Sci Adv*, 2016, 2: e1500323
- 56 Zhao D, Tang Y, Liu J, et al. Water footprint of Jing-Jin-Ji urban agglomeration in China. *J Clean Prod*, 2017, 167: 919–928
- 57 Liu J, Zang C, Tian S, et al. Water conservancy projects in China: Achievements, challenges and way forward. *Glob Environ Change*, 2013, 23: 633–643
- 58 Wu P T, Zhuo L, Liu Y L, et al. Assessment of regional crop-related physical-virtual water coupling flows (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 1953–1966 [吴普特, 卓拉, 刘艺琳, 等. 区域主要作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程解析与评价. *科学通报*, 2019, 64: 1953–1966]
- 59 Vörösmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 2010, 467: 555–561
- 60 Su B, Ang B W. Multiplicative structural decomposition analysis of aggregate embodied energy and emission intensities. *Energy Econ*, 2017, 65: 137–147
- 61 Zhao X, Tillotson M, Yang Z, et al. Reduction and reallocation of water use of products in Beijing. *Ecol Indic*, 2016, 61: 893–898
- 62 Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology. *Hum Ecol Rev*, 1994, 1: 277–300
- 63 Zhao D, Hubacek K, Feng K, et al. Explaining virtual water trade: A spatial-temporal analysis of the comparative advantage of land, labor and water in China. *Water Res*, 2019, 153: 304–314
- 64 Ai P, Yue Z X. A framework for processing water resources big data and application. *Appl Mech Mater*, 2014, 519: 3–8
- 65 Adamala S. An overview of big data applications in water resources engineering. *Mach Learn Res*, 2017, 2: 10–18
- 66 Hu B, Liu J G, Zhao D D, et al. Using the theory of water footprint to assess water scarcity: A case study (in Chinese). *J Irrigat Drain*, 2017, 36: 108–115 [胡彬, 刘俊国, 赵丹丹, 等. 基于水足迹理念的水资源短缺评价. *灌溉排水学报*, 2017, 36: 108–115]
- 67 Wang Y J, Liu J G, Zhao D D. Assessing water resources based on theory of water footprint—A case study in Xuanhua District, Zhangjiakou City, Hebei Province (in Chinese). *Bull Soil Water Conser*, 2018, 38: 213–219 [王雅洁, 刘俊国, 赵丹丹. 基于水足迹理论的水资源评价——以河北省张家口市宣化区为例. *水土保持通报*, 2018, 38: 213–219]

Summary for ““量-质-生”三维水资源短缺评价: 评述及展望”

Three-dimensional water scarcity assessment by considering water quantity, water quality, and environmental flow requirements: Review and prospect

Junguo Liu^{*} & Dandan Zhao

School of Environmental Science & Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

^{*} Corresponding author, E-mail: liujg@sustech.edu.cn

The increasing population, improving living standards, and expanding economic activities are responsible for rising water demands. In recent decades, the imbalance between water supply and demand has become increasingly prominent. Coupled with the unreasonable use of water resources, this has led to serious water scarcity problems that affect the sustainable development of modern society. Under this background, water scarcity has become an important environmental issue for our sustainable planet. Water scarcity is affected by regional water resource endowments and the ways in which water resources are developed and utilized by human beings. Quantity-induced water scarcity occurs when the quantity of water resources is insufficient. Meanwhile, pollution can cause water scarcity as the services provided by polluted water are not equivalent to that of clean water. Quality-induced water scarcity occurs when the pollutants exceed the environmental carrying capacity.

Since Marlin Falkenmark first proposed the concept and assessment method of water scarcity in the 1980s, water scarcity assessment has developed for nearly 40 years. With the development of new theories, progress has been made, such as development of different approaches for assessing water scarcity, identification of influencing factors of water scarcity, revealing the formation mechanism, and exploring strategies to cope with water scarcity. As a result, water scarcity assessment has experienced an evolutionary pathway from a one-dimensional model emphasizing only quantity-induced water scarcity to a two-dimensional model (considering both quantity-induced and quality-induced water scarcity), toward a three-dimensional (3D) model (or 3D water scarcity theory) that considers water quantity, water quality, and environmental flows simultaneously.

Based on a systematic review of water scarcity assessment in the literature, this study demonstrates the 3D water scarcity theory and elaborates on its basic concepts, principles, and core methods. The 3D water scarcity theory was first proposed by Chinese scholars and then accepted by international scholars. The quantity-induced water scarcity is assessed based on the ratio of water consumption to water availability, and the quality-induced water scarcity is quantified by comparing gray water footprint (the amount of water required to dilute pollutants in wastewater sufficiently to meet environmental water quality standards) with local available water resources. Environmental flow requirements are quantified based on the characteristics of climatic and hydrological conditions rather than the traditionally adopted simple approach by assuming that they are equal to 80% of water resources. Hence, the 3D water scarcity theory and assessment method can consider water quantity, water quality, and environmental flow requirements comprehensively.

Finally, four main future research directions of water scarcity assessment are summarized: The further development and improvement of the theoretical framework of 3D water scarcity, applications of the assessment methods on multiple spatial scales, explicit consideration of the impacts of physical and virtual water flow, and mechanism of the evolution of water scarcity. 3D water scarcity is a key to achieving sustainable and harmonious development between humanity and water resources, and its assessment framework can break through the limitations of the traditional one- or two-dimensional models. Water scarcity theory provides methodological support for measuring the state of water resources on global, national, and regional scales, and it will help formulate appropriate water mitigation measures for integrated water resources management.

water scarcity, quantity-induced water scarcity, quality-induced water scarcity, three-dimension water scarcity theory (3D water scarcity), harmonious water-human relationship

doi: [10.1360/TB-2020-0918](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0918)