

荒漠绿洲植被生态需水研究现状及发展趋势

——以民勤县为例

石媛媛, 马国军, 王雅云, 姜田亮, 张恒嘉

(甘肃农业大学 水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 以民勤荒漠绿洲现状条件为基础,通过总结国内外相关研究成果,明晰了以植被生长为主体的生态需水内涵。从生态系统的适宜性、阈值性、循环性和农业气象原理入手,分析了植被生态需水的理论基础,藉此提出适宜民勤绿洲的生态需水估算方法,即依托于3S技术划分土地类型及面积,以潜水蒸发法为主,综合使用直接计算、Penman-Monteith公式等多种计算方法。此外,探讨了植被生态需水研究的难点所在,认为应将重心放在建立植被生长与降雨量、地下水埋深等因素的响应函数,探究潜水与SPAC系统的耦合机制,揭示植被生态需水机理。构建符合民勤荒漠绿洲的植被类型和水文生态条件适宜程度识别指标体系,探究植被生态需水驱动机制,最终实现统筹人口、资源、环境与经济社会的协调可持续发展。

关键词: 植被生态需水; 荒漠绿洲; 理论基础; 估算方法; 研究进展; 民勤县

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0034-05

Present situation and development trend of ecological water

requirement for vegetation in desert:

a case study of Minqin county

SHI Yuanyuan, MA Guojun, WANG Yayun, JIANG Tianliang, ZHANG Hengjia

(College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the present situation of Minqin desert oasis, this paper summarizes the relevant research results at home and abroad, and clarifies the connotation of ecological water demand, which is based on vegetation growth. Starting from the suitability, threshold, circulation and agrometeorology of ecosystem, this paper analyzes the theoretical basis of vegetation ecological water demand, and puts forward the ecological water demand estimation method suitable for Minqin oasis, that is, based on the 3S technology to divide the land type and area, mainly by using diving evaporation method, comprehensively use the direct calculation method, Penman-Monteith formula and other calculation methods. In addition, the difficulties in the study of vegetation ecological water demand are discussed, and the emphasis should be placed on establishing the response function of vegetation growth, rainfall, and groundwater depth, exploring the coupling mechanism of diving and SPAC system, and revealing the mechanism of vegetation ecological water demand. By constructing the index system of suitable vegetation degree and hydrological ecological conditions in Minqin desert oasis, and exploring the mechanism of vegetation ecological water demand, we will ultimately achieve the coordinated and sustainable development of population, resources, environment and economic society.

Key words: vegetation ecological water demand; desert oasis; theoretical basis; estimation method; research progress; Minqin County

收稿日期: 2017-09-01; 修回日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51669001)

作者简介: 石媛媛(1991-), 女, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要从事荒漠绿洲生态需水研究。

通讯作者: 张恒嘉(1974-), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程与农业生态研究。

1 研究背景

生态需水研究涵盖了生态学、水文学、植物生理学、统计学、地理学等学科,是当前研究的热点。生态需水最早由国外学者所提出,用于避免河流生态退化,探究河道内生物种群变化、鱼类产量与所需水量的关系,目的在于满足航运要求、保护鱼类等。国外关于生态需水的研究多集中在河流生态和植被上。Covich^[1]提出基于生态恢复和建设及系统健康发展所需最小水量为生态需水量。Cleick^[2]从生物多样性及生态整合性角度提出生态系统所需的最小需水量。Tennant^[3]认为河道内所需最小生态需水量是多年平均流量的10%。我国生态需水研究起步较晚,自20世纪90年代起,国内众多研究者从不同角度、不同区域对生态需水问题进行了探索研究。郭巧玲等^[4]从生态系统原动力出发,提出生态需水划分为天然生态需水和人工生态需水。邓坤等^[5]从水循环角度提出河道内生态需水主要包括:河道基本生态需水、蒸发渗漏需水、冲淤输沙需水三类。宋兰兰等^[6]从反映河流水文情势的径流因素中筛选水文指数,构建河流生态需水的计算方法。高凡等^[7]指出生态需水概念的界定应考虑时间性、空间性和目标性。吕妍等^[8]强调,植被类型、土壤理化特征、水资源利用情况等因子,都对生态需水的量化有着重要的影响。陈敏建^[9]则从水循环理论出发,分层次分析能量转化规律,对我国不同区域的生态类型进行划分。张树军等^[10]从柴达木盆地水资源开发利用、植被现状与地下水埋深和含盐量响应关系入手,估算盆地植被生态需水量。白元等^[11]利用RS和GIS技术,运用缓冲区梯度分析方法对林地分布结构和生态需水进行研究。施文军等^[12]提出,生态需水研究需要考虑差异化水量、水量交叉、尺度转换和评价体系4个方面内容。蒙格平等^[13]从全球生态系统水分平衡角度、维持生态系统健康与稳定角度及保护和改善生态系统角度出发论述了生态需水内涵。经过几十年的研究积累,在丰富生态需水内涵的同时还面临着很多问题,诸如生态需水内涵模糊不清,没有统一的认知、生态需水理论依据不完善、生态需水估算方法多而杂乱,现阶段直接套用公式计算结果误差大等。

鉴于此,以民勤荒漠绿洲为例,在国内外研究的基础上,完善生态需水内涵和理论基础,对比分析各生态需水估算方法的差异性,提出适宜民勤绿洲的生态需水估算方法,为合理配置和调度水资源提供

理论依据。同时着眼于未来,探索适宜于民勤荒漠绿洲植被生态需水量计算的新途径、新方法,探讨植被生态需水研究的难点及发展趋势。

2 民勤绿洲自然概况

民勤县隶属于甘肃省武威市,位于甘肃省西北部、河西走廊东北部、石羊河流域下游,东、西、北三面被腾格里和巴丹吉林大沙漠包围。民勤县的总面积约为 $1.6 \times 10^6 \text{ hm}^2$,绿洲面积为 $1.44 \times 10^5 \text{ hm}^2$,仅占总面积的8.99%,绿洲外围沙漠面积为 $1.12 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占总面积的70%,且绿洲内部还有沙漠面积为 $0.14 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

民勤县气候干燥,多风沙、少降雨,多年平均降雨量为116 mm,蒸发量在2 000 mm左右。从上世纪60年代起至今,民勤绿洲西部和北部沙漠一直向前推进,有70%以上的天然沙生植被衰退,虽然一直在建设防风固沙林,但只在局部地带有效阻止了沙漠入侵并使部分沙化土地转为人工绿洲,土地沙化总体上仍呈发展趋势,仍以每年2~3 m的速度在侵蚀绿洲,荒漠化面积持续扩大^[14]。石羊河总水资源量和可利用的水资源量在河西三大内陆河中都是最少的,但经对比发现,其经济用水量相比最多,生态用水量最少。石羊河流域需水量大于可供水量,整个流域尚且如此,可想而知,处于石羊河下游的民勤县可利用水资源必然极为紧缺。根据民勤县统计局统计资料汇编显示,民勤盆地农业灌溉用水连年减少,从2006年的 $5.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到2010年的 $3.1213 \times 10^8 \text{ m}^3$ 再到2015年的 $2.2314 \times 10^8 \text{ m}^3$;生态用水量近几年呈增长趋势,由2011年的 $0.1424 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到2013年的 $0.6790 \times 10^8 \text{ m}^3$ 再到2015年的 $1.1867 \times 10^8 \text{ m}^3$,其他各部门用水都处在稳定水平。由此看出维持生态环境稳定,保护荒漠绿洲植被生态安全的水量都是通过挤占农业灌溉用水来实现的。石羊河下游民勤盆地水资源紧缺引发了一系列生态环境及社会问题,已严重制约和影响到了区域经济社会可持续发展,引起了党中央、国务院及社会各界的广泛关注^[15-16]。

3 生态需水研究的内涵界定

生态需水是存在于生态系统中的客观需求量,根据研究地域的不同,有多种定义和内涵。生态系统是在特定时空范围内,生物与其生存环境之间进行相互作用的统一整体,水是生命体进行物质交换和能量流动的物质基础。随着人口增长、区域经济

高速发展,水资源的需求量必然有增无减,人类对水资源的利用从满足基本生存到发展国民经济,从和谐开发变成无序掠夺。在高强度的人类干扰下,生态系统退化严重,尤其是位于中国内陆腹地的西北干旱区,人类生产、生活用水和生态需水的矛盾日益加剧,不合理的水资源配置和大量挤占生态用水,使得西北干旱区出现了诸如河道断流、水库干涸、土地沙化、植被大量枯梢死亡等生态环境问题^[17]。用水主体的权益难以得到保障,影响到西北干旱区的政治稳定和国土生态安全。通过总结国内外相关研究成果,明晰了以植被生长为主体的生态需水内涵。

本文认为荒漠绿洲植被生态需水,是指在一定的时空范围内需要提供特定数量和质量的水,用以维持荒漠绿洲生态系统结构稳定和其功能效应的发挥,是开放系统对抗不良干扰条件和维持自身良性发展所必须消耗的水量,是水文循环的重要内容,且不以人类意志改变。此外,生态需水量与生态环境需水量虽仅有两字之差,但其内涵却不同,前者出发角度是动植物的生存和生长发育,着重强调生态性,后者则更多考虑保护水环境、景观等,着重强调社会性。

4 植被生态需水的理论基础

4.1 生态适宜性理论

生态缺水与生态退化存在着必然的联系,系统通过结构和功能的不良变化表达对生态的不适应性。在人口和经济集中分布的绿洲地带,生态环境通过绿洲面积减少、地下水位下降、沙尘暴危害加剧、人居环境恶化等方式来表达危险信息^[18-19]。民勤县自 20 世纪 70 年代以来,中上游来水量减少,水量不足以支撑经济建设,使得开采地下水成为必然趋势,地下水位普遍下降 10~20 m,有些地方甚至下降达 30 m。2003 年总需水量为 $7.172 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水开采量高达 $5.27 \times 10^8 \text{ m}^3$ 占总需水量的 74%,自 2007 年实施《石羊河流域重点治理规划》以来,地下水开采量由 2007 年的 $4.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到 2015 年的 $1.1493 \times 10^8 \text{ m}^3$,民勤荒漠绿洲生态环境有所改善,部分地区地下水位已有所上升,据甘肃省水文局观测数据显示,2012 年民勤县地下水位平均较上年上升了 0.085 m,青土湖地下水位较 2007 年上升了 0.54 m。张瑞君等^[20]研究表明,民勤县 2000—2009 年水资源压力指数由 0.627 降到 0.329,水资源压力有所减缓,但水资源短缺问题仍然严峻。

4.2 系统阈值理论

陈亚宁等^[21]提出,天然植被恢复和生长的合理地下水位的研究是确定生态需水的基础。荒漠绿洲植被生态系统良性可持续发展所需的水量是一个范围,随着降雨、蒸发、植被种类、植被覆盖度等的变化而变化。但变化的范围应该处在最适宜生态需水量与饱和生态需水量之间。如果生态需水量低于或高于生态系统承载能力,整个生态系统就会出现震荡,若没有得到有效的解决,超过临界值,生态系统就失去原有的结构和功能,发展成另一种生态系统,重新选择适宜的物种种类,这也是系统阈值的直观表现。民勤地区植被生长的适宜地下水埋深为 2.5~4.5 m,当地下水埋深 4.5 m 时平均土壤含水量为 15.5%,主要有怪柳、白刺、沙棘和梭梭等灌木,当地下水埋深大于 4.5 m 时严重威胁到荒漠绿洲植被的安全,大多数植被枯槁死亡,因此,将 4.5 m 和 15.5% 作为植被正常生长的适宜地下水埋深值和适宜土壤含水量下限值^[22]。

4.3 水文循环理论

人类利用水资源的同时,改变了径流形成条件、运动过程和耗散规律,破坏了水文循环的天然属性,这种干扰通过能量积累与传递,由点到线到面逐步变化,最后扩展到整个空间,影响该流域面积内的生态效应,使得水文循环基本格局变化,生态系统功能结构随之变化。位于民勤县境内的红崖山水库 2002 蓄水量为 $0.3277 \times 10^8 \text{ m}^3$,2008 年蓄水量为 $1.3212 \times 10^8 \text{ m}^3$,2015 年蓄水量为 $2.6306 \times 10^8 \text{ m}^3$,2004 年生态用水量为 $1.133 \times 10^8 \text{ m}^3$,此后逐年递减的到 2011 年的 $0.1424 \times 10^8 \text{ m}^3$,之后又逐步增多到 2015 年的 $1.1867 \times 10^8 \text{ m}^3$,上游来水量和民调水量的增长保证了人类生存和经济社会发展所需的一部分水量,用于生态建设的水则依据植被的生长规律进行季节性调控,由此改变原始径流状态,继而改变原有绿洲植被的物质能量循环。民勤湖区的湿地面积有所增加,物种丰富度有所提高,蒋友严等研究表明从 2000 年调水前到 2010 年调水后民勤绿洲面积占比从 8.93% 增加到 11.98%,说明该区域的水资源调控措施是有利于民勤绿洲生态恢复的^[23]。

4.4 农业气象学理论

农业气象学的基本任务在于研究自然资源和自然灾害的时空分布规律,研究农业生产过程中的耗水规律及其影响因素与调控措施。建立和健全生态农业气象预报系统,为地域规划、植被、作物的合理布局、人工调节小气候等服务^[24]。利用农业气象原

理研究生态需水时,应主要从太阳辐射(光强、光能利用率),热量条件(土壤温度、界限温度、温周期),水分(土壤水分类型、土壤水分系数、土壤水势与水分传输、影响蒸散的量因素),空气与风等入手,依托于GIS的农业气象情报,记录包含气象、时间、空间等信息,对民勤绿洲小气候类型进行细分,建立荒漠植被与气象因子的响应关系,探究各影响因素的重要性指数。黄庆忠基于GIS技术和农业气象学原理从热量因子、水分因子、光照因子入手对环江县农业气候进行区划^[25]。

5 植被生态需水估算方法及其适用条件

目前,植被生态需水估算方法尚不够成熟,还没有形成统一的标准,现有大约200多种估算方法涉及河流生态需水、河口生态需水、湖泊生态需水和旱地生态需水,计算方法的多样性使得计算结果差异很大^[26]。我国西北干旱区常用的方法有以下几种:

5.1 直接计算法(面积定额法)

该法适用于基础工作较好的地区,如人工绿洲及防风固沙林等。计算的核心是通过实验测得不同类型植被的生态需水定额。在计算时一般以具有代表性的植被的生态需水定额为参考,以此来估算整个系统的植被生态需水量。民勤绿洲通过人工种植的方式,平均每年营造以梭梭为主的防风固沙林 $1.04133 \times 10^4 \text{ hm}^2$,平均每年退耕还林约 $2.16174 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。用面积定额法能够准确和简便的计算人工林部分的植被生态需水量。

5.2 间接计算法(潜水蒸发法)

干旱区植被生长所需水量主要是由区域潜水蒸发供给,依据实际蒸散量约等于潜水蒸发量来间接计算植被生态需水量,适用于降水稀少蒸发强烈的干旱区。主要是用某一类型植被面积与该类型植被所处地下水的潜水蒸发量及植被系数的乘积,得到该面积下该植被生态需水量,各种植被生态需水量之和,即为该地区植被生态需水总量。

5.3 基于植物蒸散发量的计算方法

适用于水分条件充足且植被盖度较高地区,通过直接计算荒漠绿洲植被的蒸散发耗水量来确定植被耗水量,结合地面观测的蒸发量来计算生态需水定额。一般采用阿维里扬诺夫公式、改进后的Penman公式、蒸渗仪法、道尔顿经验公式等。阿维里扬诺夫计算公式为:

$$E = a(1 - H/H_{\max})^b \cdot E_0 \quad (1)$$

式中: E 为潜水蒸发量, mm/d; H 为地下水埋深, m;

$H_{\max}$ 为极限地下水埋深, m; E_0 为水面蒸发量, mm/d; a 、 b 为与植物有关的经验系数。

5.4 基于生物量的计算方法

主要以单位水量产生的干物质的量及水分利用效率为基础的计算方法,适用于地下水水位过低,植被生存仅能依靠大气降水支撑的地区。当地下水位大于4.5 m时,潜水蒸发几乎为零,仅有低盖度草地和少量梭梭、柽柳、白刺等物种存活。在运用生物量法计算时,一般考虑植被地上部分,对植被地下部分的考虑不够重视,因此计算结果可信度降低。徐先英等^[27]研究指出,降雨对梭梭、柽柳、白刺的贡献率分别为43.25%、58.4%和196%。

5.5 基于3S技术的计算方法

利用RS、GIS、GPS建立全方位监测网络,对区域水资源及相关数据进行实时监控和采集,3S技术的综合使用可获得连续的地表辐射、年际温度变化和土壤水分变化等,准确提供生物及其生存环境的能量信息、热量信息,其中通量观测系统可对生态系统水热通量进行连续观测。目前已利用遥感方法对蒸散发过程进行反演模拟,但精度均在80%以下^[28]。3S技术还能够提供大范围地表及下垫面特征信息,监测绿洲面积变化、绿洲水域面积变化等。并对区域自然地理进行分区、对群落生态系统中的地带性植被和非地带性植被进行分类,划分出荒漠生态系统、荒漠绿洲过渡区生态系统、绿洲生态系统、湿地生态系统等。3S技术为生态安全评价及生态需水计算提供基础数据,是未来准确计算生态需水必不可少的技术手段,需要注意的是在数据存储和转换时要保证内容完整,逻辑一致。目前已利用ArcGIS多层叠加功能,将石羊河流域北部平原划分为2个生态功能区及6个亚区^[29]。

5.6 基于参考作物蒸发蒸腾量和作物系数、土壤水分限制系数的计算方法

关于干旱区受破坏非完全覆盖的天然植被生态需水研究,联合国粮农组织(FAO)提出了基于参考作物蒸发蒸腾量和作物系数、土壤水分限制系数的方法(Penman-Monteith公式):

$$ET_p = ET_0 \cdot k_p \cdot k_s \quad (2)$$

式中: ET_p 为植被生态需水定额, mm/d; ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量, mm/d; k_p 为植被系数; k_s 为土壤水分限制系数。

基于对以上几种计算生态需水方法的总结,结合民勤荒漠绿洲的水文气象条件、土地利用类型及植被分布信息,提出适宜民勤绿洲的方法步骤是:先

利用 3S 技术对该区域进行分区,得出不同植被类型的土地利用面积、植被群落分布特点及地表特征信息,绿洲大部分荒漠区依靠地下水生长的植被可采用潜水蒸发法,在小部分人工防护林区域可采用面积定额法来计算。绿洲内部荒漠区采用阿维里扬诺夫公式和蒸渗仪法进行计算,根据地面实际勘测有准确参数时可采用 FAO 提出的 Penman - Monteith 公式来计算。需要注意的是,在计算总量时,还要考虑到地表径流与地下径流补给之间的相互转化关系,才能准确量化绿洲植被生态需水。

6 植被生态需水研究的难点及发展前景

干旱绿洲区生态系统良性循环的核心是绿洲植被的恢复与生长,这就明确了需水主体和需水研究方向。在多年研究进程中,干旱绿洲区植被需水问题逐渐清晰和明朗,众多学者提出的估算方法都为计算植被生态需水奠定了基础。但在有些方面还有待发展,例如缺乏一个普遍适用的判别标准来评价生态系统的健康发展;需要开发出以荒漠绿洲植被季节性需水为主体的评估方法,使植被生态需水量呈现动态变化;植被生态需水模型之间对比分析结果还需依据实际情况进行验证;从微观变化反映宏观特征时的尺度转换依据不够明确等。民勤荒漠绿洲的植被生态需水研究涉及多领域、多层面,各影响因素之间可能存在非线性耦合关系,必须用复杂性视角来探究荒漠绿洲植被生态需水。

民勤荒漠绿洲是西北干旱区的组成部分,在全国生态格局上具有重要的战略地位,国家已投入大量的人力、物力、财力用于治理民勤绿洲,当地政府也做了大量工作,水资源压力有所减小,但水资源问题却仍未缓解,植被生态需水问题在内涵和量化方法上虽有较大进展,但是问题依旧复杂,任务依旧艰巨。这就要求生态需水研究要以民勤荒漠绿洲现阶段的生态环境为基础,以生态系统可持续发展作为稳定的表现形式,收集水文气象资料与植被信息,对比和优选植被生态需水计算方法,建立植被盖度、密度、丰度对降雨量、地下水埋深等因素的响应关系,明晰复杂系统的相互关联性,为荒漠绿洲植被生态需水量化研究奠定基础。

以土壤剖面含水量、土壤水分通量和水分运动变化规律为基础,建立潜水蒸发对土壤水势、植物叶水势的响应函数,探究潜水与 SPAC 系统的耦合机制,深入分析 GSPAC 系统的能量转化及水信息传递,揭示植被生态需水机理。同时,采用驱动力一状

态一响应概念作为研究植被生态需水的基本框架,选取土地利用面积、经济发展、人口规模、水资源量等因子建立复杂性视角下植被生态需水与其影响因素间的关系网络,认清植被生态需水与影响因素的变化规律,预测荒漠绿洲植被生态需水的发展态势。利用植被系统结构特征与水文生态特征,制定符合民勤荒漠绿洲的植被类型和水文生态条件适宜程度识别指标体系,探究植被生态需水驱动机制。以此准确了解植被生态系统的需求和生态修复活动的效果,及时评价人类活动对绿洲植被的影响程度,实现统筹人口、资源、环境与经济社会协调发展。综合以上研究结果确定植被生态需水对各特征参数动态响应的临界阈值,提出植被生态用水安全保障策略,解决民勤绿洲水资源不合理利用问题,为民勤绿洲的可持续发展提供可靠依据。

参考文献:

- [1] COVICH A. Water and ecosystems Gleick P H [A]. Water in Crisis - A Guide to the World's Fresh Water Resources [C] // New York: Oxford University Press, 1993.
- [2] GLEICK P H. Water in Crisis: Paths to Sustainable Water Use [J]. Ecological Applications, 1998, 8(3): 571 - 579.
- [3] TENNANT D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources [J]. American Fisheries Society, 1976, 1(4): 6 - 10.
- [4] 郭巧玲, 杨云松, 李建林, 等. 额济纳绿洲生态需水及其预测研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(5): 135 - 139.
- [5] 邓坤, 张璇, 杨永生, 等. 抚河流域生态环境需水量研究 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(3): 45 - 47 + 164.
- [6] 宋兰兰, 陆桂华, 刘凌. 水文指数法确定河流生态需水 [J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1336 - 1341.
- [7] 高凡, 黄强, 畅建霞. 我国生态需水研究现状、面临挑战与未来展望 [J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(6): 755 - 760.
- [8] 吕妍, 王让会, 蔡子颖. 我国干旱半干旱地区气候变化及其影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(11): 65 - 71.
- [9] 陈敏建. 水循环生态效应与区域生态需水类型 [J]. 水利学报, 2007, 38(3): 282 - 288.
- [10] 张树军, 王光谦, 王芳, 等. 柴达木盆地植被生态需水研究 [J]. 水电能源科学, 2010, 28(12): 26 - 29.
- [11] 白元, 徐海量, 凌红波, 等. 塔里木河干流区天然植被的空间分布及生态需水 [J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1410 - 1416.
- [12] 施文军, 凌红波. 流域生态需水概念及估算方法评述 [J]. 水利规划与设计, 2013(8): 31 - 36.
- [13] 蒙格平, 尹世洋, 吴文勇, 等. 生态需水及其计算方法探讨 [J]. 北京水务, 2010(5): 37 - 40.

(下转第 44 页)

- 模拟:以山东省莱州湾南岸为例[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2011, 47(3): 281-290.
- [9] 荣慧峰,殷文静,杨学亮,等. 沧州地下咸水成因分析[J]. 地下水, 2011, 33(2): 26-27+45.
- [10] 李亚美,成建梅,李敏敏,等. 咸水在黏性土中迁移转化的试验研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 88-93.
- [11] 徐彦泽. 沧州市地下水的水文地球化学与稳定同位素[D]. 北京:中国地质大学, 2009.
- [12] 王仕琴,宋献方,肖国强,等. 基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 495-501.
- [13] 汪敬忠,吴敬禄,曾海鳌,等. 内蒙古河套平原水体同位素及水化学特征[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(4): 104-112.
- [14] 李莎,成建梅,李敏敏,等. 人类开采活动影响下的衡水地区地下水水质特征及演化[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 55-61+100.
- [15] 周炼,刘存富,王佩仪. 河北平原第四系咸水同位素组成[J]. 水文地质工程地质, 1998(3): 4-8.
- [16] 周炼,刘存富. 河北沧州地区天然水的氯同位素组成[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1996, 21(5): 563-566.
- [17] 冯欣,张亚哲. 深州地区地下水离子比例系数分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(4): 18-20+24.
- [18] DOTSICA E, POUTOUKIS D, MICHELOT J L, et al. Stable isotope and chloride, boron study for tracing sources of boron contamination in groundwater: Boron contents in fresh and thermal water in different areas in greece[J]. Water Air & Soil Pollution, 2006, 174(1-4): 19-32.
- [19] 肖荣阁,大井隆夫,蔡克勤,等. 硼及硼同位素地球化学在地质研究中的应用[J]. 地学前缘, 1999, 6(2): 361-368.
- [20] LESLIE D, LYONS W B, WARNER N, et al. Boron isotopic geochemistry of the McMurdo Dry Valley lakes, Antarctica[J]. Chemical Geology, 2014, 386(12): 152-164.
- [21] KLOCHKO K, KAUFMAN A J, YAO W, et al. Experimental measurement of boron isotope fractionation in seawater[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2006, 248(1-2): 276-285.
- [22] 李亚美,成建梅,崔莉红,等. 分层监测孔现场分级联合试验确定含水层参数[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(3): 132-137.
- [23] 肖军,贺茂勇,肖应凯,等. 硼同位素地球化学应用研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(9): 20-33.
- [24] 肖应凯,廖步勇,王中良,等. 长江口咸淡水混合过程中溶解态硼的含量及同位素组成特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(4): 324-327.

(上接第 38 页)

- [14] 邓建伟,唐小娟,张新民. 石羊河流域北部平原区生态安全评价[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(8): 21-24.
- [15] 胡芳芳. 甘肃河西内陆地区生态需水分析与生态恢复[J]. 北京农业, 2012(6): 189-190.
- [16] 陈福昌,杨小英,杨小梅. 石羊河流域水问题及生态需水估算[J]. 甘肃联合大学学报(自然科学版), 2008, 22(3): 82-87.
- [17] 靳美娟. 生态需水研究进展及估算方法评述[J]. 农业资源与环境学报, 2013, 30(5): 53-57.
- [18] 张恒嘉. 河西内陆河流域(张掖)水资源现状及生态环境问题研究[J]. 现代农业科技, 2009(2): 238.
- [19] 杨立彬,黄强,阮本清,等. 额济纳绿洲生态需水研究[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1127-1133.
- [20] 张瑞君,段争虎,陈小红,等. 民勤县 2000-2009 年来水资源生态环境压力分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 558-563.
- [21] 陈亚宁,郝兴明,李卫红,等. 干旱区内陆河流域的生态安全与生态需水量研究——兼谈塔里木河生态需水量问题[J]. 地球科学进展, 2008, 23(7): 732-738.
- [22] 郝博,栗晓玲,马孝义. 甘肃省民勤县天然植被生态需水研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 158-164.
- [23] 蒋友严,韩涛,王有恒,等. 石羊河调水 10a 来民勤绿洲生态脆弱性变化[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 157-162.
- [24] 杨辉,刘威. 对鄂州市生态农业气象服务的思考[J]. 现代农业科技, 2016(16): 298+300.
- [25] 黄庆忠,刘芳,莫丽娜. 基于 GIS 环江县桑蚕农业气候区划[J]. 广西农学报, 2014, 29(5): 38-41+37.
- [26] 汪志荣,张晓晓,田彦杰. 流域生态需水研究体系和计算方法[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(15): 3204-3211.
- [27] 徐先英,丁国栋,孙保平,等. 内陆河下游民勤绿洲主要防风固沙植被生态需水量研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 144-148.
- [28] 鱼腾飞,冯起,司建华,等. 遥感结合地面观测估算陆地生态系统蒸散发研究综述[J]. 地球科学进展, 2011, 26(12): 1260-1268.
- [29] 唐小娟,邓建伟,张新民,等. 石羊河流域北部平原区生态功能区划研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(5): 23-25.