

黄河甘肃段流域生态环境需水量探究

邵鹏, 刘旻霞*, 赵瑞东, 张灿, 李瑞 (西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730070)

摘要 从流域生态环境平衡的角度出发, 探讨了符合黄河甘肃段流域生态环境实际的生态环境需水内涵。在此基础上, 构建了以面积定额法计算的河道外生态环境需水量模型和以水文法计算的河道内生态环境需水量模型。分别计算了河道外植被生态环境需水量和维持河道流量的河道内河流基础生态环境需水量、河流输沙运泥需水量、水库湖泊系统生态环境需水量。结果表明: 黄河甘肃段生态环境总需水量为 312.6 亿 m³, 约占流域年径流量的 52%, 这一结果远超国际上普遍认可的地表水资源合理的开发程度为 30% 的阈值, 说明该地区生态环境需水量与流域总径流量在环境保护和经济发展方面有一些冲突。

关键词 生态环境需水量; 黄河; 水资源; 生态恢复
中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)04-0053-04

Study on Water Demand of Ecological Environment in the Lanzhou Section of the Yellow River Basin
SHAO Peng, LIU Min-xia, ZHAO Rui-dong et al (School of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070)

Abstract From the angle of ecological environment balance of the river basin, the connotation of ecological environment water requirement conforming to the ecological environment of the Gansu section of the Yellow River was discussed. Based on that, a model for calculating the eco-environmental water requirement outside the river and the eco-environmental water demand model based on the water grammar method was built. The riverine basic ecological and environmental water demand, river sediment transport and sludge water demand and the eco-environmental water requirement of reservoir and lake system were calculated respectively. The results showed that the ecological environment of the Yellow River Gansu section of the total water demand was 31 billion 260 million m³, accounting for about 52% of the annual runoff, the results far beyond the internationally recognized surface water resources reasonable development degree for the 30% threshold, indicating that the ecological environment of the regional water demand and total watershed runoff has some conflicts in environmental protection and economic development.

Key words Eco-environmental water requirement; Yellow River; Water resource; Ecological restoration

进入 21 世纪以来, 我国的工业、农业以及第三产业快速发展, 给人们带来福利的同时也出现诸多问题。我国的北方大部分地区出现河道断流、河流污染、地下水位下降、生态退化等影响经济民生的生态环境问题。随着人类社会的过度开发利用水资源, 严重挤占了必要的生态需水量, 黄河流域生态环境问题则更加突出, 黄河流域整体水位下降、水污染严重、支流断流等成为阻碍生态文明建设亟待解决的问题^[1]。近年来, 我国已开展了黄河中下游流域部分河段河道生态水环境的修复与治理, 被修复河段的生态水环境有了很大程度的改善, 因而黄河流域的生态水环境应该作为一个整体进行修复与治理。生态环境需水量估算则是研究流域生态水环境修复和评估生态水环境承载力的重要内容^[2]。

目前, 对于黄河流域生态环境需水量研究主要集中于中下游地区^[1,3-4], 并且很多研究成果能够为生态环境恢复与治理提供理论支持。这说明对于黄河流域上游地区的生态环境需水量的研究很有必要, 就黄河甘肃段流域来说, 黄河水位下降、水质污染加重、水土流失严重、水生生物减少以及过度开发带来了水资源危机, 使得黄河流域上游地区生态环境变得更为脆弱^[5]。笔者以黄河流域甘肃段为例, 对黄河流域上游地区生态环境需水量进行研究, 旨在为黄河流域水资源合理而有效利用、沿河地区区域小气候以及河道内生态系统的稳定提供支持。

1 研究区概况

黄河源头位于青藏高原巴颜喀拉山北麓约古宗列盆地,

穿越青藏高原东部、黄土高原及黄淮海平原的沿黄河的 9 个省区, 并于山东东营市注入渤海。其主要河道全长约 5 464 km, 流域总面积 79.5 万 km², 黄河是甘肃省最重要的河流, 甘肃省黄河干流位于 101°02′~104°43′ E, 33°20′~37°20′ N, 流经甘南州、临夏州、兰州市、白银市, 甘肃省黄河全长 913 km, 流域总面积 144 968 km²。由于甘南州段黄河处于水源涵养区, 水资源条件及生态保持条件较好, 区域内居民以畜牧业和旅游业为主^[6], 因此甘南州生态需水可以暂不计入。该研究以黄河流经的临夏州、兰州市、白银市组成的黄河甘肃段作为研究区域, 其中黄河甘肃兰州段位于 102°45′~104°43′ E, 35°44′~37°20′ N, 流域长度为 480 km, 流经临夏州、兰州市、白银市, 流域面积为 75 270 km² (图 1)。

黄河甘肃段处于我国西北内陆干旱半干旱地区, 是我国水资源最为短缺的地区之一, 该区域人均水资源拥有量为 1 100 m³, 不到全国总体水平的 1/2, 其中农业灌溉用水量占总用水量的 80% 左右, 城镇化率的加快以及用水量的增加, 使得这一地区的供水需水矛盾加剧^[7]。该区域内不仅降水总量较少, 多年平均降水量也只有 318 mm 左右, 而且年际降水量在时空分布上也不均衡, 径流年际变化较大, 同时由于自然条件恶劣、地形复杂、沟壑间纵横不断、水土流失严重、植被覆盖度差, 蒸发量年均 2 084 mm, 远高于其他地区^[8]。近 40 年的极端水文事件以及流域工业污水问题增多, 水资源开发过程中的生态用水与生产用水矛盾突出^[5,9-10], 因而这一区域在生态恢复与保护中必须对生态环境需水量进行计算, 以使得该区域在未来的发展中更注重生态环境与人类发展的协调。黄河甘肃段区域概况见图 1。

作者简介 邵鹏(1990—), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 研究方向: 生态学与生态修复学。* 通讯作者, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事生态学生态修复学研究。

收稿日期 2017-11-22

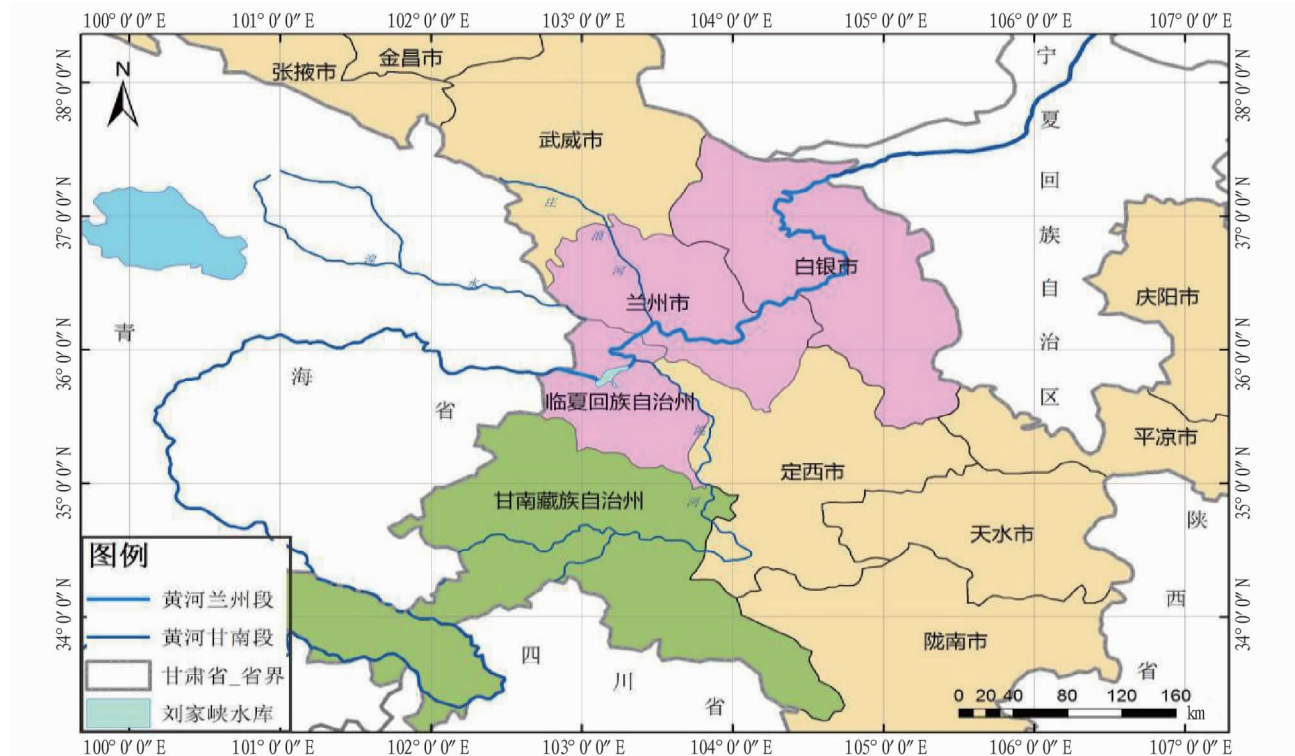


图1 黄河甘肃段区域概况

Fig.1 Survey of the broken area in Gansu, the Yellow River

2 生态环境需水量的内涵与类型

生态环境需水量是关于水资源在利用和开发过程中的流域生态环境可持续保护以及科学性地对生态环境修复和治理等问题提出的概念,单就生态需水量和环境需水量而言,生态需水量是指达到某种生态环境水平来维持一定程度上生态系统平衡所需要的用水量。环境需水量则是为满足生态系统在不同方面的功能以及稳定安全的生态环境所需要的水量^[11]。然而,单论环境需水量或生态需水量的任一需水量都是不全面的,因而需要对环境需水量和生态需水量的概念进行统合研究,即生态环境需水量这一整体概念。但目前对于生态环境需水的概念尚未形成统一的定义和趋于完善的理论体系^[12]。

国外对于生态环境需水量的研究内容主要为流域内的生态环境需水,如美国对于生态环境需水则定义为服务于野生动物和鱼类以及娱乐和其他美学价值方面的水资源需求,包含自然与景观河流的基本水量、河道内用水量、湿地需水量以及三角洲和海湾的水量^[13]。国内对于生态环境需水量方面的研究正处于蓬勃发展阶段,一些学者从不同角度对生态环境需水量进行了概括。李丽娟等^[14]从自然生态环境平衡的角度出发,通过对海滦河流域在一般情况下对河流流域系统的生态环境需水量的研究,认为生态环境需水量为维持地表水体所必须达到的使用和蓄存的最小水量值;丰丽华等^[3]将流域内的生态环境需水定义为改善当前生态环境所面临的问题或是维护生态环境现状不进一步恶化时,生态系统需满足的最小水量值和在这一水量值要求的基础上生态系统可以承受的最差水质标准。石伟等^[4]通过研究黄河特

殊性及其黄河生态需水量,将维持河道功能和保护河流水质功能的黄河下游地区生态需水量分为汛期输沙量和非汛期的生态基流量。严登华^[12]等研究认为,河流系统的生态环境需水量包括一定标准的水质与最小需求的水量两方面的要求,即符合一定水质标准的合理水量。中国工程院在《中国可持续发展水资源战略研究综合报告》中将生态环境需水量定义为:广义上是指维持自然环境生态系统的水分平衡所需的用水量,包括水沙平衡、水盐平衡、水热平衡等的一些生态环境用水;狭义上是指保护生态环境不再恶化的同时逐步得到恢复所需要使用水资源的总量^[15]。

不同类型生态系统中自然环境条件差异非常大,对于生态环境需水量的定义和研究方法也不尽相同,因此,国内外研究生态环境需水量方向的学者大多认为应当以生态环境现状作为评定生态环境需水量的标准,而不是以天然生态环境条件作为尺度进行评价^[13]。为保护和改善生态环境条件,生态环境需水量的计算区域应当以水资源供需矛盾严重的区域以及生态环境条件相对脆弱和人类生存以及生产活动较为困难的干旱区半干旱区与季节性干旱的半湿润区为主^[15]。生态环境需水量的计算内容:维持河流系统水沙平衡及水盐平衡的需水量;保证河流系统的基本生态需水量;恢复河流流域内湿地湖泊以及沙洲的需水量;保持河流河道内水草、植被及水生植物的健康与绿化河道外植被、草地的生态需水量;回补超采地下水以及水土保持的生态需水量^[14,3-4,15-16]。

3 生态环境需水量计算方法

流域生态环境需水量包括河道内生态基础流量、水流输沙需水量、湿地保护的生态环境需水量与河道外恢复与治理

沿岸环境的生态环境需水量,在不同时空位置上每个区域生态环境需水量的 2 部分比例各不相同,大部分区域可以忽略河道外生态环境需水量。因为黄河是甘肃省的最主要水源,根据黄河甘肃兰州段地处西北内陆干燥少雨的实际情况,故须同时考虑河道内与河道外的总需水量,即黄河甘肃段的生态环境需水量的组成为

$$W_T = W_k + W_z$$

式中, W_T 为生态环境总需水量; W_k 为计算得到的河道内生态环境需水量数值; W_z 为河道外生态环境需水量数值。

3.1 河道内生态环境需水量 黄河流域的河道内生态需水量计算内容主要包括河流基本生态需水量(W_b)、河流输沙需水量(W_l)、水库湖泊湿地生态环境需水量(W_k)。如下式:

$$W_k = W_b + W_s + W_l$$

式中, W_b 为河流年均基本生态需水量; W_s 为河流输沙需水量; W_l 为水库湖泊湿地的需水量。

3.1.1 河流生态系统需水量。水生系统需水量是维持水生生物的正常生长、繁殖与满足流域内水盐平衡、入渗循环、水质自我净化等方面的要求。对于常年不断流河流而言,是指保持沿河两岸基本形态不变、保障河道的输水能力、防止河道水断流、保持水体具有一定的自净能力的最小流量。以此为依据,以河流多年平均值的实际径流量最小月份作为河流基本生态需水量。计算公式^[14]为

$$W_b = \frac{T}{n} \sum_{i=1}^n \min(Q_{ij}) \times 10^{-8}$$

式中, W_b 为河流多年平均的基础需水量; T 为换算系数,为 31.536×10^6 s; n 为河流统计年数; Q_{ij} 为流域内第 i 年第 j 个月的月平均流量。

3.1.2 河流输沙需水量。水沙平衡生态需水量是指流域内水中沙土需要通过水的动力将其转运至下游河道不至于抬高河床或者堰塞河道,为保持河道畅通与泥沙的转移,则需要余留一部分生态环境水量为其提供动力。在估测得到需要靠水流运输至下游的输沙量时,输沙需水量与流域含沙量的多少有最直接关系,流量的大小以及水沙动力条件的不同等因素而不同,即影响河流输沙需水量的大小。

黄河是含沙量最多的河流,为防止黄河中下游河道淤积加剧,因此必须考虑输沙需水量,以保证水沙平衡。对于黄河流域实际情况分析,黄河流域输沙作用一般在雨汛时期完成。一般不考虑非雨汛时期较小的输沙流量,利用雨汛期水流量大的特点完成输沙要求,使得流域水资源的分配和使用更加合理。以此为根据,雨汛时期输沙水量也是流域生态需水量的内容,计算^[14]公式见下:

$$W_s = S_l / C_{\max}$$

式中, W_s 为河流输沙所需水量; S_l 为统计输沙量的多年平均值; $C_{\max}$ 为含沙量多年最大月份平均值,计算公式见下:

$$C_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max(C_{mi})$$

式中, C_{mi} 是 m 年 n 月的平均含沙量数值; n 是所统计年数。

3.1.3 水库、湖泊以及湿地生态系统需水量。水库、湖泊以

及实地生态系统是自然界至关重要的组成部分,是调节气候条件、区域水土保持、人类和动植物生存发展的重要因素。因而水库、湖泊以及湿地生态环境需水量是维持该生态系统内水生生态稳定、动植物正常生长繁殖和发育以及水盐平衡而消耗的生态用水量。计算公式^[14]见下:

$$\Delta W_l = P + R_i - R_f - E + \Delta W_g$$

式中, ΔW_l 为水库、湖泊以及湿地系统水量的变动值; P 为一年中该区域的总降水量; R_f 是从水库湖泊以及湿地流出的水量; R_i 为从不同途径流入水库湖泊湿地的水量; ΔW_g 是地下水位的变化量; E 为水面蒸发量。

为使得水库、湖泊以及湿地的生态作用不至下降,要求水库湖泊湿地存储水量保持在动态平衡水平上,即 ΔW_l 为 0 的情况下,由于黄河流域年均蒸发量远大于降水量,因而地下水位在动态平衡的条件下,可以认为水库湖泊湿地的需水量主要是维持水库湖泊湿地水量稳定而消耗与蒸发的水量。其计算公式如下:

$$W_l = \sum A_i (E_i - P_i)$$

式中, W_l 为水库湖泊湿地生态环境需水量, A_i 为第 i 水域水面的面积; E_i 为水面蒸发数量; P_i 为水库湖泊湿地的降水量。

3.2 河道外生态环境需水量 对黄河流域的河道外生态环境需水量而言,主要是灌溉流域周边的自然林草植被或人工林地的需水量。黄河流域中上游地区的水土流失相对严重,仅在甘肃省境内土壤侵蚀面积达 12.69 万 km^2 ,占流域总面积的 87.5%。因而需要采取一些退耕还林、绿化荒山、草地修复等治理措施,以加强水土流失治理,带动全流域共同加强生态环境建设,保护中下游地区人民群众生活和社会经济的发展。因此,河道外生态环境需水量主要是用于水土保持而采取的植树造林、绿化荒山的植被需水。其计算公式^[17]如下:

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \cdot K_s$$

式中, ET_0 为植被年蒸散量; K_c 为植被实际需水系数; K_s 为土壤水分修正系数。

$$W_z = S_g \cdot ET_c$$

式中, W_z 为林草植被生态需水量; S_g 为林草植被面积; ET_c 为林草植被需水定额。

4 生态环境需水量计算与分析

黄河甘肃段流域需水量主要是由河道内需水量和河道外需水量 2 部分组成,河道内主要是为了河流生态功能正常,河道外则是为了流域沿岸人类和动植物的利用。黄河甘肃段流域多年平均径流量为 312 亿 m^3 ,因此,对于合理分配水资源在农业、工业、生活用水与生态环境用水之间的比例至关重要。

4.1 黄河甘肃段河道内生态环境需水量计算

4.1.1 河流基本生态需水量。通过对 2006—2015 年甘肃省主要水文站最小月实测径流量数据计算,为保证黄河甘肃下游段河道基本生态功能不受影响,则要使黄河甘肃段最小生态流量达到 49.85 m^3/s 以上,因此,须通过保护黄河流域水

环境,改善河流污染状况,降低排污纳污水域的污染级数,才能满足黄河甘肃段下游基本生态需水量为 116.75 亿 m³ 这一最低理论值。

4.1.2 维持河流水沙平衡需水量。黄河甘肃段流域泥沙主要来自黄土高原,由于黄土高原地形斑驳,土质疏松,植被稀少,在季节性降雨和季节变化所带入的沙土的作用下,造成泥沙大量进入黄河使含沙量急剧增加。根据甘肃下游段黄河水资源时空分布不均,计算得到 2006—2015 年甘肃省主要观测站最大月实测平均含沙量 420.1 万 t,多年平均输沙量 11 302 万 t,通过计算得出黄河甘肃段的输沙生态需水量为 19.04 亿 m³。

4.1.3 水库湖泊与湿地需水量。水库、湖泊以及湿地生态系统的需水量主要在于水库湖泊与湿地水量的稳定、水质的安全、水盐的平衡、水生生物的健康而需要消耗和保证的水量^[18]。对于黄河甘肃兰州段来说,水库湖泊系统主要为刘家峡、盐锅峡、八盘峡三座水库,湿地系统主要是以黄河淤积滩涂和临夏、兰州、白银 3 个城市的人工湿地,黄河甘肃段流域水库湖泊与湿地面积约为 640.3 km²,根据甘肃省水资源公报资料中黄河甘肃段多年平均降水量为 318 mm,水面蒸发量为 2 084 mm^[19]。由此可估算出水库、湖泊与湿地需水量,结果见表 1。

表 1 水库、湖泊及湿地系统需水量

Table 1 Water requirement of the reservoir,lake and wetland system				
序号 No.	需水量类型 Water requirement type	面积 Area// × 10 ⁸ m ²	需水量 Water demand × 10 ⁸ m ³	所占比例 Proportion %
1	刘家峡水库	1.310	2.31	20.4
2	盐锅峡水库	0.160	0.28	2.5
3	八盘峡水库	0.063	0.12	0.9
4	湿地系统	4.870	8.60	76.0
合计 Total		6.403	11.30	100

通过计算可知,黄河甘肃段水库湖泊与湿地生态环境总需水量约 11.3 × 10⁸ m³,湿地系统需水量占比最大,约为 8.6 × 10⁸ m³;水库湖泊需水量为 2.71 × 10⁸ m³,占比为 23.8%。

4.2 黄河甘肃段河道外生态环境需水量 黄河甘肃段河道外需水量是为保持水土流失而进行的植树造林以及荒山绿化所需的余留水量,根据甘肃省林业厅各市州公布的最近年份植被绿化面积可知,临夏、兰州、白银 3 市植被覆盖面积约 60.13 万 hm²。田静等^[17]对近 30 年我国内陆地区地表蒸散时空变化的研究,得出西北地区林地蒸散量 636.83 mm。何永涛^[16]通过对黄土高原植被生态需水研究,确定了西北黄土高原地区乔木林的需水系数为 0.76,土壤水分修正系数为 0.556 4,综合 2 项研究结果与该研究区域类型相同,采用以上已知研究通过计算得到植被生态需水定额 *ET_c* 为 0.276 m³/hm²,即河道外的生态环境需水量 *W_g* 为 16.33 亿 m³。

4.3 黄河甘肃段的总生态环境需水量 通过对河道外和河道内生态环境需水量的计算,即总需水量为河道外保持水土流失的需水量与河道内保证河流各项基本功能、正常输沙排盐、稳定的水库湖泊湿地生态环境需水量之和,计算得到的

河道内生态环境需水量 *W_k* 为 147.1 亿 m³,河道外生态环境需水量 *W_g* 为 16.33 亿 m³,即黄河甘肃段总生态需水量约为 163.43 亿 m³(表 2)。从估算结果看出,河道内与河道外生态环境需水总量非常大,但黄河流域多年平均径流总量为 312.6 亿 m³,这说明黄河甘肃段的生态环境需水量非常大,因此,黄河甘肃段流域水资源的合理利用及循环使用非常必要,对于该区域生态环境的保护须以工业和农业对水资源的高效可重复利用以及城市生活用水的循环利用与节约使用为主。

表 2 黄河甘肃段生态环境需水量

Table 2 Water demand for ecological environment in Gansu section of the Yellow River

地点 Place	项目 Items	需水量 Water de- mand//亿 m ³	比例 Proportion %
河道内 Within the river	生态环境基流量	116.75	71.4
	输沙水量	19.04	11.8
河道外 Outside of the river	水库湖泊湿地需水	11.31	6.9
		16.33	9.9
合计 Total		163.43	100

5 结论

甘肃省位于“一带一路”中的重要区域,经济发展与社会进步都处于历史最高水平,与此同时也面临着水资源供需矛盾严重和生态环境恶化的问题。笔者通过估算生态环境需水量,结合甘肃省境内黄河流域的生态环境状况,提出了在该区域进行流域生态环境恢复需要考虑的因素,着眼于统筹开发利用水资源,协调经济、社会、民生发展与生态环境保护之间的关系。

黄河甘肃段需水量估算结果:河流基础生态需水量为 116.75 亿 m³,保持河流水沙平衡需水量为 19.04 亿 m³,水库湖泊湿地生态环境需水量为 11.31 亿 m³,河道外生态环境需水量为 16.33 亿 m³,黄河甘肃段流域生态环境总需水量为 163.43 亿 m³,约占流域年径流量 312.6 亿 m³ 的 52%。国际上普遍认可的地表水资源合理的开发程度为 30%,说明目前黄河甘肃段流域生态环境需水问题不容乐观,该地区生态环境需水量远超水资源合理开发的阈值,这就需要制订一套更符合黄河流域的水资源利用标准,分配好对农业、工业和城镇生活等各类用水的比例,促使水资源配置更为合理,使得生产、生活和生态环境用水均能得以保证。

关于生态环境需水量的研究角度不尽相同,因而需水量计算方法的选取和需要考虑的因素也不同。该研究从流域生态环境平衡的角度出发,运用水文法对河道内生态环境需水量进行估算,从地理自然因素的角度考虑,运用面积定额法对河道外的需水量进行估算,结果表明,与大部分北方河流生态环境需水量占流域年径流量 50% 左右比例的结果相近,在一定程度上也反映出黄河上游地区生态环境与中下游地区同样面临着水资源的利用与生态环境保护的矛盾。由于生态环境的变化是多种因素综合作用的结果,该研究的计

等土壤微量元素的含量随着土壤深度的变化而变化,且靠近梭梭根部的土壤微量元素含量较高,而原生荒漠不同土层土壤微量元素含量变化不明显。由此可得,人工干预对生态修复试验区域内的土壤变化起到积极作用,梭梭林人工接种肉苁蓉种植模式对生态修复起到推动作用。

3 结论与讨论

(1)改善区域小气候。吐鲁番荒漠区域人工种植梭梭林后,试验区内风速明显降低,气温降低,相对湿度增加,改善了区域内的小气候,而且随着梭梭接种肉苁蓉种植模式的推广,人工管护力度加大,植被高度增加,盖度增大,对区域内小气候的改善作用就越明显。

(2)提高植被覆盖度和生物多样性。梭梭林接种肉苁蓉种植模式的推广前期需要人工种植梭梭,提高当地的植被盖度。由于试验区梭梭是人工植被,植被的稳定性较差,接种肉苁蓉后大量的人工辅助措施确保了梭梭林的成活率,植物的生长速度也较快,也为其他生物生长提供了条件,使得物种的丰富度也有所增加,除灌木外出现较多的草本植物及少量的藤本植物,提高了生物多样性。

(3)改善土壤理化性质。人工梭梭林接种肉苁蓉使当地植物覆盖度增加的同时,减少了土壤风蚀造成的一系列环境问题。而区域内植物数量增加的同时,土壤中的植物根系数量也大大增加,对土壤具有一定的团聚作用,同时利于防风固沙、保持水土。接种肉苁蓉期间的人工灌溉等管护行为使得区域内土壤的保水保肥能力增强,并增加了土壤的有机质含量。而人工梭梭林区域的生态修复试验属短期项目,土壤全氮、全磷、全钾含量变化不明显。

(4)长期以来,吐鲁番地区自然条件恶劣,是生态脆弱的荒漠区域。一方面,当地人口多,可耕地面积少,经济基础薄弱,而人工梭梭林接种肉苁蓉种植模式改造荒漠土地进行生

态修复,变有害为有利,不但可以防风固沙,而且可以改善当地人民生存环境;另一方面,增加了当地的经济收入,促进了经济发展,提高了人们的生活水平,也为区域内提供了大量的就业机会,满足了社会对肉苁蓉加工原材料的需求,带动了相关产业的发展,加快了人民脱贫致富的脚步。更具意义的是这种种植模式减少了人为破坏自然环境和野生植被的行为,提高了当地居民治理荒漠的积极性。

参考文献

[1] 王涛,陈广庭,赵哈林,等. 中国北方沙漠化过程及其防治研究的新进展[J]. 中国沙漠,2006,26(4):507-516.

[2] 程小红,潘存军,彭建新. 新疆第三次荒漠化监测中的问题及其建议[J]. 云南地理环境研究,2006,18(2):12-16.

[3] 王根绪,程国栋,徐中民. 中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题[J]. 自然资源学报,1999,14(2):109-116.

[4] 孙同光,贾宏涛,杨春,等. 新疆和田地区人工柽柳大芸生态修复模式及效益评价[J]. 中国农业信息,2012(21):126-127.

[5] LU Z X,GAO B T. Study on ecological compensation system and land desertification control[J]. Asian agricultural research,2009(7):35-38.

[6] 张智一. 生态经济学视角下沙漠化治理效益分析:以内蒙古科尔沁沙地为例[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版),2015,30(6):497-502.

[7] 李丙文,王桂芬,张忠良,等. 肉苁蓉栽培技术研究进展[J]. 中国沙漠,2014,34(4):1049-1054.

[8] 宋政梅. 吐鲁番市防风治沙造林模式[J]. 干旱区研究,2012,29(1):181.

[9] 戴湘艳,吕衡彦. 制约吐鲁番盆地山南山北设施农业作物生长关键期的灾害性天气气候特征分析及防御对策[J]. 新疆农业科技,2010(6):6-7.

[10] 裴欢,覃志豪. 干旱区绿洲荒漠化演变趋势及成因分析:以吐鲁番绿洲为例[J]. 地理科学,2012,32(4):506-510.

[11] 陈怀顺,赵晓英. 西北地区不同类型区生态恢复的途径与措施[J]. 草业科学,2000,17(5):65-68.

[12] 穆哈西,洪明,马英杰,等. 搭配营造大芸的多种寄主林暨防风固沙模式[J]. 安徽农业科学,2013,41(4):1569-1570.

[13] 白伟本,李特林. 北疆地区肉苁蓉人工接种栽培技术[J]. 农技服务,2010,27(5):602.

[14] 孙慧琴. 梭梭人工接种肉苁蓉技术实验研究[J]. 农业科技与信息,2010(9):45-46.

干旱区资源与环境,2014,28(8):125-131.

[10] 黄维东,牛最荣,赵治文. 甘肃省主要河流环境质量分析评价[J]. 水文,2010,30(2):33-35.

[11] 魏国,何俊仕. 沈阳市生态环境需水研究[J]. 人民长江,2008,39(11):54-57.

[12] 严登华,何岩,邓伟,等. 东辽河流域河流系统生态需水研究[J]. 水土保持学报,2001,15(1):46-49.

[13] 姜德娟,王会肖,李丽娟. 生态环境需水量分类及计算方法综述[J]. 地理科学进展,2003,22(4):369-378.

[14] 李丽娟,郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J]. 地理学报,2000,55(4):495-500.

[15] 中国工程院“21世纪中国可持续发展水资源战略研究”项目组. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告[J]. 中国工程科学,2002,2(8):1-17.

[16] 何永涛,李文华,李贵才,等. 黄土高原地区森林植被生态需水研究[J]. 环境科学,2005,25(3):35-39.

[17] 田静,苏红波,陈少辉,等. 近20年来中国内陆地表蒸散的时空变化[J]. 资源科学,2012,34(7):1277-1286.

[18] 罗小勇,邱京,涂建峰. 长江流域生态环境需水量研究[J]. 人民长江,2011,42(18):77-80.

[19] 邱新法,刘昌明,曾燕. 黄河流域近40年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 自然资源学报,2003,18(4):437-442.

(上接第56页)

算方法选取和主要计算因素的确定仍有一定局限性,这就需要在今后的研究中进一步完善生态环境需水量的其他因素。

参考文献

[1] 张强,李剑锋,陈晓宏,等. 水文变异下的黄河流域生态流量[J]. 生态学报,2011,31(17):4826-4834.

[2] 孙栋元,赵成义,李菊燕,等. 基于层次分析法的干旱内陆河流域生态环境需水评价[J]. 水土保持通报,2011,31(5):108-114.

[3] 丰丽华,王超,李勇. 流域生态需水量的研究[J]. 环境科学动态,2007(1):27-30,37.

[4] 石伟,王光谦. 黄河下游生态需水量及其估算[J]. 地理学报,2002,57(5):595-602.

[5] 程瑛,李维京,王润元,等. 近40a甘肃省气象灾害对社会经济的影响[J]. 干旱区地理,2006,29(6):844-849.

[6] 姚玉璧,邓振镛,尹东,等. 黄河重要水源补给区甘南高原气候变化及其对生态环境的影响[J]. 地理研究,2007,26(4):844-852.

[7] 李磊,惠亚梅,马敏泉,等. 黄河兰州段总氮总磷污染特征及控制策略[J]. 中国人口·资源与环境,2013,23(11):105-108.

[8] 刘理臣,靳素芳,付春燕,等. 甘肃省水贫困时空分异及驱动因素研究[J]. 兰州大学学报,2016,52(1):205-210.

[9] 吴梦初,延军平,刘标杉. 甘肃省雨涝灾害时间对称性及趋势判断[J].