

# 疏勒河中游绿洲生态环境需水研究

## —— I. 方法与参数选取

孙栋元<sup>1</sup>, 胡想全<sup>1</sup>, 杨俊<sup>2</sup>, 金彦兆<sup>1</sup>, 张云亮<sup>1</sup>

(1. 甘肃省水利科学研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省水利厅水土保持局, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 干旱内陆河流域绿洲生态环境需水研究是内陆河流域水资源综合管理和优化配置、保护和恢复生态环境中最为关键的科学问题之一, 本研究针对疏勒河中游绿洲生态环境现状以及天然植被、河流湖泊等生态需水特征, 建立了基于天然植被、河流、湿地和防治耕地盐碱化的疏勒河中游绿洲生态环境需水量化模型, 以期为干旱内陆河流域绿洲生态环境需水研究提供一种可借鉴方法。模型计算结果表明, 疏勒河中游绿洲 2013 年天然植被、河流基本生态、河流输沙、河流渗漏补给、水面蒸发和湿地生态环境需水量分别为  $1.90 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $2.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据目前疏勒河流域中游绿洲水资源与生态环境现状, 应加强水资源的综合管理, 协调农业用水与生态用水关系以及不同区域和不同部门间水资源配置量, 提高水资源综合利用效率; 进一步制定中游绿洲近期和远期生态保护和生态恢复目标, 确定生态综合治理重点区, 准确计算基于生态保护目标的流域中游绿洲生态需水量及阈值。

**关键词:** 疏勒河中游; 绿洲; 生态环境需水; 计算方法; 参数

**中图分类号:** TV213.4, X143, X171 **文献标志码:** A

## Eco-environmental water requirement in the middle reaches oasis of Shulehe River Basin

### —— Calculation method and parameter

SUN Dong-yuan<sup>1</sup>, HU Xiang-quan<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>2</sup>, JIN Yan-zhao<sup>1</sup>, ZHANG Yun-liang<sup>1</sup>

(1. Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. The Soil and Water Conservation Bureau of Water Resources Department of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** Eco-environmental water requirement in arid inland river basin is one of key scientific problems in the reasonable allocation and management of water resources and the eco-environmental protection and construction in arid regions. According to different types of eco-environmental water requirement in the middle reaches oasis of Shulehe river basin, quantification model of eco-environmental water requirement for plain regions of the middle reaches oasis of Shulehe river basin was established and the calculation method of eco-environmental water requirement was put forward. The research result indicated that eco-environmental water requirement of natural vegetation, basic eco-environmental water requirement, transportation sand eco-environmental water requirement, recharge of watercourse seepage water requirement, water surface evaporation eco-environmental water requirement, marsh eco-environmental water requirement were  $1.90 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,  $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,  $1.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,  $0.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,  $0.68 \times 10^8 \text{ m}^3$  and  $2.70 \times 10^8 \text{ m}^3$  in 2013, respectively. According to environmental status and the aim of ecological protection, optimal configuration and comprehensive management of water resources would need to be enhanced, the proportion of ecological water use and agricultural water use, and configuration quantity of water resources in different area and different usage department would be harmonized, comprehensive utilization efficiency of water resources would be heightened in the middle reaches oasis of Shulehe river basin. The recent and future ecological protection and restoration aim will be further established in the middle reaches oasis of Shulehe river basin. The significant zone of ecological governance will be ascertained, which the threshold and suitable quanti-

收稿日期: 2015-07-03

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“疏勒河流域中游绿洲生态需水过程与阈值研究”(51369004)和“气候与土地利用变化对石羊河流域水资源影响研究”(51369003); 水利部公益性行业科研专项“疏勒河中游绿洲水—经济—生态系统耦合调控技术”(201301081)

**作者简介:** 孙栋元(1978—), 男, 甘肃民乐人, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: gsausundy@126.com。

ty of ecological water requirement were calculated under different protection aim in the middle reaches oasis of Shule river basin.

**Keywords:** the middle reaches of Shulehe river basin; oasis; eco-environmental water requirement; calculation method; parameter

在干旱区,水是维系绿洲生态系统和保护生态环境的关键因素,由于人类经济活动对水资源的过度利用,使得生产、生活与生态用水之间的矛盾日益加剧,造成区域生态平衡破坏,影响区域水资源合理开发利用与生态系统的协调发展,为实现区域生态环境良性发展和水资源高效利用,必须研究区域生态环境需水量与水资源利用互馈关系<sup>[1-4]</sup>。生态环境需水研究是干旱内陆河流域绿洲水资源综合管理、保护和恢复生态环境中最为关键的科学问题之一,其目的是实现区域水资源的优化配置和高效利用,最终实现区域水—经济—生态与环境系统的协调可持续发展<sup>[5-8]</sup>。近些年,尽管国内外大量学者针对不同生态系统类型开展了生态需水方面的研究<sup>[9-14]</sup>,取得了一些可喜的成果,初步建立了生态环境需水量的计算方法体系。然而针对干旱内陆河流域及流域绿洲生态需水方面的研究相对欠缺,尤其在流域绿洲尺度对生态环境需水进行综合研究与估算还相对薄弱。因此,针对流域绿洲尺度开展生态需水研究,估算流域绿洲生态需水规模,这样既能满足生产和生活用水,还考虑到生态用水,从而实现绿洲水资源的合理利用与生态系统协调可持续发展。根据疏勒河中游绿洲生态环境现状以及天然植被、河流湖泊等生态需水特征,构建了基于天然植被、河流、湿地和防治耕地盐碱化的疏勒河流域绿洲生态环境需水量模型,估算了中游绿洲生态需水规模,从而为干旱区水资源合理配置和生态系统的协调可持续发展提供参考依据。

## 1 研究区概况

疏勒河流域位于河西走廊西端,是河西地区三大内陆河水系之一,流域全长 550 km,面积 39 497 km<sup>2</sup>。中游绿洲位于疏勒河中游的走廊平原地带,海拔 1 050 ~ 1 300 m,地势平坦开阔,分布有大片绿洲。由于独特地理位置和气候条件,导致区域形成昼夜温差大,蒸发强烈的气候环境,属典型温带大陆性干旱气候,多年平均降水量 39.2 ~ 63.1 mm,蒸发量 2 469 ~ 2 869.4 mm,多年平均气温 6.95℃ ~ 9.42℃,行政区划包括敦煌、瓜州和玉门的绝大部分地方。同时由于人类活动影响,使得脆弱生态系统日趋恶化,主要表现为绿色生态严重退化,湿地面积缩小,

盐碱地、沙地迅速增加,对当地的社会经济发展产生了一定的影响。再加之人类活动对水资源利用量的不断增加,使得区域生态环境需水严重不足,从而影响当地生态系统的平衡协调发展。因此,掌握流域中游绿洲生态环境需水状况,科学配置流域绿洲生态环境需水,对流域水资源科学管理和社会经济可持续发展有着重要意义。

## 2 疏勒河中游绿洲生态环境需水理论框架

目前,疏勒河中游绿洲区已出现了类似石羊河、黑河流域水土资源开发利用过程中出现的植被衰亡、草场退化、湿地衰减、生物多样性受损、土地盐渍化、沙漠化等一系列生态环境问题。为了进一步保护疏勒河中游绿洲生态环境,恢复中游绿洲生态系统功能,生态环境需水指维持中游绿洲稳定性与植被面积,保护河流湖泊及湿地生态系统的稳定与平衡所需水量。因此,生态环境需水内涵包括现状生态背景下天然及人工生态系统不再退化需要水量以及基于生态保护与恢复目标所需要的生态环境恢复水量<sup>[4,15]</sup>。因此,确定疏勒河流域中游绿洲生态环境需水量主要包括:天然植被、湿地、河流生态环境需水量。

## 3 疏勒河中游绿洲生态环境需水计算模型

疏勒河中游生态保护与恢复目标主要为天然植被、湿地和河流生态系统的良性循环和健康可持续发展,因此所建立模型主要针对这三类生态系统类型,同时考虑不同生态系统的时空差异与特殊性。本文根据疏勒河中游绿洲生态环境状况以及生态环境需水理论框架,确定区域生态需水模型结构,并建立计算模型。则模型为:

$$W = W_v + W_r + W_w \quad (1)$$

式中, $W$ 为区域生态环境需水量( $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ); $W_v$ 为天然植被生态环境需水量( $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ); $W_r$ 为河流生态环境需水量( $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ); $W_w$ 为湿地生态环境需水量( $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ )。

### 3.1 天然植被生态环境需水量 $W_v$ 计算方法

由于干旱区植被生长的特殊性,地下水状况的

好坏决定植物生长的好坏。因此,植被生长需水在综合考虑时空尺度基础上,时间按月计算,空间上按植被优势物种划分<sup>[16]</sup>。其计算  $W_v$  模型为:

$$W_v = \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^n K \cdot ET_{ij} \cdot A_i \quad (2)$$

其中,  $ET_{ij}$  可根据阿里维扬诺夫公式计算<sup>[1]</sup>, 即:

$$ET_{ij} = a(1 - H/H_{\max})^b \cdot (E_{\phi 20})_{ij} \quad (3)$$

式中,  $W_v$  为植被生态环境需水量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ );  $K$  为植被系数;  $A_i$  为  $i$  种生态区的面积 ( $\text{m}^2$ );  $ET_{ij}$  为潜水蒸发量 (mm);  $(E_{\phi 20})_{ij}$  为常规气象蒸发皿蒸发值 (mm),  $H$  为地下水埋深 (m);  $H_{\max}$  为极限地下水深度 (m);  $a, b$  为经验系数, 取  $a = 0.62, b = 2.8$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, \dots, 12$ 。

### 3.2 河流生态环境需水量 $W_r$ 的计算方法

河流生态环境需水量计算相对复杂, 涉及相关原则相对较多, 本文基于功能性需求原则、分时段考虑原则建立河流生态环境需水量的计算模型, 主要涉及河流基本生态、水质净化、输沙、河道渗漏补给和水面蒸发需水量<sup>[1, 17, 18]</sup>。

$$W_r = \max(W_b, W_c, W_s) + W_l + W_e \quad (4)$$

式中,  $W_b, W_c, W_s, W_l, W_e$  分别为河流基本生态、水质净化、输沙、河道渗漏补给和水面蒸发需水量。由于疏勒河属于典型内陆河流域, 其水质可满足饮用与灌溉需要, 因此可以不用考虑计算河流水质污染稀释自净需水量  $W_c$ <sup>[1]</sup>。

#### 3.2.1 河流基本生态环境需水量 $W_b$ 的计算方法

河流基本生态环境需水量以河流最小月平均实测径流量的多年平均值作为河流的基本生态环境需水量<sup>[19]</sup>。其计算公式为:

$$W_b = \frac{T}{n} \sum \min(Q_{ij}) \times 10^{-8} \quad (5)$$

式中,  $W_b$  为河流基本生态环境需水量 ( $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ );  $Q_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  月的河流月均流量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $T$  为常数, 其值为  $31.536 \times 10^6 \text{ s}$ ;  $n$  为统计年数。

3.2.2 河流输沙需水量  $W_s$  的计算方法 由于河流输沙需水量与河流输沙量、流量、水沙动力条件等因素有关, 而汛期水量相对较大, 能完成河流输沙功能, 因此, 将汛期用于输沙的水量和非汛期调水调沙 (冲沙) 的水量作为河流输沙需水量<sup>[20-21]</sup>, 其计算公式如下:

$$W_s = \frac{S_n}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max(C_{ij})} \quad (6)$$

式中,  $W_s$  为河流输沙需水量 ( $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ );  $S_n$  为多年平均输沙量 (kg);  $C_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  月的河流月均含沙

量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $n$  为统计年数。

3.2.3 河道渗漏补给需水量  $W_l$  的计算方法 由于受河床岩性、河道输水流量、地下水埋深等因素的影响<sup>[1]</sup>, 因此, 河道渗漏补给量可按达西定律计算:

$$W_l = 2K \cdot I \cdot L \cdot H \cdot t \quad (7)$$

式中,  $W_l$  为河道渗漏补给量 ( $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ );  $K$  为含水层渗透系数 ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $I$  为水力坡度 (%);  $L$  为含水层厚度 (m);  $H$  为过水断面宽度 (m);  $t$  为时间 (d)。

#### 3.2.4 河流水面蒸发生态需水量 $W_e$ 的计算方法

河流水面蒸发生态需水量与降水量、水域面积、水面蒸发量息息相关<sup>[22]</sup>, 因此水面蒸发需水量计算公式为:

$$W_e = \begin{cases} A(E - P) & (E > P) \\ 0 & (E < P) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $W_e$  为河流水面蒸发生态需水量 ( $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ );  $A$  为水面面积 ( $\text{km}^2$ );  $E$  为水面蒸发强度 (mm);  $P$  为平均降水量 (mm)。

水面蒸发强度  $E$  用下式表示, 其水面折算系数为:

$$E = K \cdot E_{20} \quad (9)$$

$$K = E_{20}/E_{20} \quad (10)$$

式中,  $K$  为水面蒸发折算系数;  $E_{20}$  为 20 cm 常规蒸发皿观测的水面蒸发量 (mm);  $E_{20}$  为 20m<sup>2</sup> 水面蒸发池观测的水面蒸发量 (mm)。

### 3.3 湿地生态环境需水量 $W_w$ 的计算方法

由于湿地类型不同, 生态环境需水量的计算方法也存在差异, 其生态环境需水量的确定相对比较复杂<sup>[1, 23]</sup>, 因此, 本文按如下公式计算:

$$W_w = \sum_{i=1}^n A_i (E_i - P) \quad (11)$$

式中,  $W_w$  为湿地生态环境需水量 ( $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ );  $A_i$  为某湿地水面面积 ( $\text{hm}^2$ );  $E_i$  为相应的水面蒸发能力。

## 4 不同计算方法中相应参数的选取

### 4.1 降水量与蒸发量

根据收集到玉门市 56 年降水与 20 cm 口径蒸发皿 ( $E_{20}$ ) 观测资料统计分析, 得到多年各月降水量与蒸发量 (表 1)。

### 4.2 单位面积蒸散量计算

由于干旱区植被需水量主要依靠地下水来满足, 因此根据流域各类植被的地下水埋深范围确定计算潜水蒸发的平均地下水埋深<sup>[4, 8]</sup>。而不同潜水埋深下的植被蒸腾对潜水影响系数采用干旱区多年实测数据分析得到, 因此, 本文参考河西走廊玉门镇

以及石羊河流域相关试验成果作为计算依据<sup>[4,25]</sup>。(表 2)。

表 1 不同月份的降水量与水面蒸发量/mm

Table 1 Evaporation of water surface and precipitation in different months

项目 Item	月份 Month												全年 Annual
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
平均降水 Average precipitation	1.25	1.90	4.89	4.50	7.61	8.96	13.11	10.48	5.48	1.99	2.07	1.55	63.78
平均蒸发 Average evaporation	46.29	77.77	183.93	320.61	388.01	369.64	353.92	346.26	269.84	194.03	103.03	51.54	2704.87

表 2 干旱区潜水埋深与植被影响系数<sup>[4,15,24]</sup>

Table 2 The vegetation coefficients and buried depth of phreatic water in arid regions

潜水埋深 Buried depth of phreatic water/m	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
植被影响系数 Vegetation coefficients	1.98	1.63	1.56	1.45	1.38	1.29	1.00

由于疏勒河中游绿洲区降水稀少,且多为无效降水,植被生长主要依赖地下水。因此,实际蒸散量近似等于潜水蒸发量。根据 2013 年植被类型划分情况,并依据研究区每种植被类型的地下水埋深范

围和平均埋深,并按相应公式计算得到不同潜水埋深蒸发量和不同植被单位面积蒸散量计算结果(表 3~4)。

表 3 疏勒河流域中游绿洲区潜水埋深蒸发量估算结果

Table 3 Assessment results of evaporation of buried depth of phreatic water in the middle reaches oasis of Shulehe River Basin

潜水埋深/m Buried depth of phreatic water	各月份潜水蒸发量 Month evaporation of buried depth of phreatic water/mm												全年 Annual
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1.0	14.2	23.9	56.4	98.3	119.0	113.4	108.6	106.2	82.8	59.5	31.6	15.8	829.7
1.5	9.2	15.5	36.6	63.9	77.3	73.6	70.5	69.0	53.8	38.7	20.5	10.3	538.9
2.0	5.5	9.3	22.0	38.3	46.4	44.2	42.3	41.4	32.3	23.2	12.3	6.2	323.4
2.5	3.0	5.0	11.8	20.5	24.8	23.7	22.7	22.2	17.3	12.4	6.6	3.3	173.2
3.0	1.3	2.2	5.3	9.2	11.1	10.6	10.1	9.9	7.7	5.6	2.9	1.5	77.4
3.5	0.4	0.7	1.7	2.9	3.6	3.4	3.3	3.2	2.5	1.8	0.9	0.5	24.9
4.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.1	0.1	3.6
4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

### 4.3 河流生态基流计算

利用 1953—1995 年疏勒河流域中游潘家庄水文站 43 年的河流流量统计数据,得到疏勒河中游多年月平均流量和多年月最小流量,并根据式(3-10),得出疏勒河基本生态环境需水量(表 5)为  $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

## 5 结论与讨论

根据上述计算公式和所选取的计算参数,得到

疏勒河中游绿洲 2013 年天然植被、河流基本生态、河流输沙、河流渗漏补给、水面蒸发、湿地生态环境需水量分别为  $1.90 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $2.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

对于生态需水计算的研究,疏勒河流域的相关研究相对较少,张学凤和罗越浩<sup>[25]</sup>按照水量平衡方法估算了 2009 年疏勒河流域湖泊湿地生态需水量为  $0.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。而本文计算疏勒河中游湿地生态环境需水量为  $2.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中包括沼泽、水库和湖

泊。由于计算区域不一致,选取相关参数也不一致,所以计算结果存在一定差异。本文较系统详细地从天然植被、河流基本生态、河流输沙、河流渗漏补给、

水面蒸发、湿地生态环境需水量计算了疏勒河中游绿洲生态环境需水量,为区域生态环境保护和恢复以及水资源综合管理和优化配置提供一定参考依据。

表 4 疏勒河流域中游绿洲区不同植被单位面积蒸散量估算结果

Table 4 Assessment results of evapotranspiration of different vegetation unit area in the middle reaches oasis of Shulehe River Basin

土地利用类型 Land use types	地下水埋深 Buried depth of groundwater /m	计算潜水蒸发的 平均地下水埋深 Average buried depth of groundwater on evaporation/m	植被系数 Vegetation coefficients	潜水蒸发量 Evaporation of buried depth of phreatic water /( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )
有林地 Forest land	1.0~4.5	2.0	1.56	5045.44
灌木林地 Shrub forest land	1.0~4.0	3.0	1.38	1067.77
疏林地 Open forest land	1.5~5.0	3.5	1.29	320.72
其他林地 Others forest land	2.0~6.0	4.0	1.00	35.70
高覆盖度草地 High degree of coverage grassland	1.0~3.5	2.5	1.63	2822.37
中覆盖度草地 Middle degree of coverage grassland	2.0~3.0	3.0	1.38	1067.77
低覆盖度草地 Low degree of coverage grassland	2.0~4.0	4.0	1.00	35.70

表 5 疏勒河生态基流计算结果

Table 5 Calculation result of eco-environmental base flow in Shulehe River Basin

项目 Item	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
多年月平均流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) Annual month average runoff	6.55	7.17	11.50	10.40	5.54	4.39	11.20	16.50	5.92	4.15	7.81	7.04
多年月最小流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) Annual month least runoff	3.45	3.70	6.60	5.61	1.20	1.42	2.34	3.28	1.76	1.65	4.19	3.31
月基本生态环境需水量/( $10^8 \text{ m}^3$ ) Month basic eco-environmental water requirement	0.09	0.10	0.17	0.15	0.03	0.04	0.06	0.09	0.05	0.04	0.11	0.09

由于人口增长和社会经济快速发展,疏勒河流域中游绿洲水资源过度开发,生态环境用水被大量挤占,使得绿洲生态环境受到威胁,继而影响绿洲的稳定性,严重制约绿洲生态系统健康发展和社会、经济与环境可持续发展,致使下游生态水量锐减,地下水位下降、河道断流,月牙泉几近干涸,尾间西湖急剧萎缩,敦煌绿洲的生存受到严重威胁。同时由于中游绿洲耕地面积的不断增大,对水资源的需求也相应的增大,而流域地表水资源的严重不足,导致对地下水开采量的日益增加,从而影响中游绿洲天然植被和湿地所需的生态水量,导致区域生态环境的日益退化。针对疏勒河中游绿洲生态环境现状和水资源开发利用情况,应加强水资源的综合管理,协调农业用水与生态用水关系,确定区域地表水地下水开发利用的适宜比例和布局,协调不同区域和不同部门间水资源配置量,提高水资源综合利用效率。进一步制定中游绿洲近期和远期生态保护和恢复目标,确定生态综合治理重点区,计算基于生态保护目

标的流域中游绿洲生态需水量及阈值。

本文在流域尺度上以疏勒河中游为例,对干旱内陆河平原区生态环境需水进行分析,针对流域存在的生态环境问题,构建了流域生态环境需水估算模型。但由于受多方面因素的影响,所建模型还存在一定的局限性,有待于进一步完善和深入。

#### 参考文献:

- [1] 孙栋元,赵成义,魏恒,等.干旱内陆河流域平原区生态环境需水分析—以新疆维吾尔自治区台兰河流域为例[J].水土保持通报,2011,31(4):82-88.
- [2] 黄晓荣,姜健俊,裴源生,等.基于生态保护的宁夏天然绿洲生态需水研究[J].水科学进展,2006,17(3):312-316.
- [3] 张丽,李丽娟,梁丽乔,等.流域生态需水的理论及计算研究进展[J].农业工程学报,2008,24(7):307-312.
- [4] 张丽.黑河流域下游生态需水理论与方法研究[D].北京:北京林业大学,2004.
- [5] Maciej Zalewski. Ecohydrology—The scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources[J]. Ecological Engineering, 2001,16:1-8.

- [11] 李波,张俊飏,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J].中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86.
- [12] 谷家川.皖江城市带碳排放与固碳量时空变化特征研究[D].芜湖:安徽师范大学,2013.
- [13] 苏洋,马惠兰,颜璐.新疆农地利用碳排放时空差异及驱动机理研究[J].干旱区地理,2013,36(6):1162-1169.
- [14] 伍芬琳,张海林,李琳,等.保护性耕作下双季稻农田甲烷排放特征及温室效应[J].中国农业科学,2008,41(9):2703-2709.
- [15] 张恒恒,严昌荣,张燕卿,等.北方旱区免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响[J].农业工程学报,2015,31(4):240-247.
- [16] 逯非,王效科,韩冰,等.农田土壤固碳措施的温室气体泄漏和净减排潜力[J].生态学报,2009,29(9):4993-5006.
- [17] 史磊刚,陈阜,孔凡磊,等.华北平原冬小麦-夏玉米种植模式碳足迹研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(9):93-98.
- [18] 王占彪,王猛,陈阜.华北平原作物生产碳足迹分析[J].中国农业科学,2015,48(1):83-92.
- [19] 智静,高吉喜.中国城乡居民食品消费碳排放对比分析[J].地理科学进展,2009,28(3):429-434.
- [20] 赵荣钦,刘英,丁明磊,等.河南省农田生态系统碳源/汇研究[J].河南农业科学,2010,39(7):40-44.
- [21] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002,91(1):217-232.
- [22] 伍芬琳,李琳,张海林,等.保护性耕作对农田生态系统净碳排放量的影响[J].生态学杂志,2007,26(12):2035-2039.
- [23] 段华平,张悦,赵建波,等.中国农田生态系统的碳足迹分析[J].水土保持学报,2011,25(5):203-208.
- [24] 李克让.土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M].北京:气象出版社,2002.
- [25] 徐小明,汤洁,李昭阳,等.吉林西部水田时空变化与固碳效应研究[J].第四纪研究,2011,31(2):370-377.
- [26] 赵荣钦,秦明周.中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异[J].生态与农村环境学报,2007,23(2):1-6.
- [27] 王强,伍世代,李婷婷.中国工业经济转型过程中能源消费与碳排放时空特征研究[J].地理科学,2011,31(1):36-41.

(上接第 226 页)

- [6] 王西琴,张远,刘昌明.辽河流域生态需水估算[J].地理研究,2007,26(1):22-28.
- [7] 马乐宽,李天宏,刘国彬.基于水土保持的流域生态环境需水研究[J].地球科学进展,2008,23(10):1102-1110.
- [8] 陈锐,邓祥征,战金艳,等.流域尺度生态需水的估算模型与应用——以克里雅河流域为例[J].地理研究,2005,24(5):725-731.
- [9] King J, Louw D. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology[J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 1998,1(2):109-124.
- [10] Luo H M, Li T H, Ni J R, et al. Water demand for ecosystem protection in rivers with hyper-concentrated sediment-laden flow[J]. Science in China (Series E), 2004,47(suppl.1):186-198.
- [11] Liu J L, Yang Z F. Ecological and environmental water demand of the lakes in the Haihe - Huaihe Basin of North China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2002,14(2):234-238.
- [12] Cui B S, Yang Z F. Eco-environmental water requirement for wetlands in Huang - Huai - Hai Area[J]. China Progress in Natural Science, 2002,12(11):841-848.
- [13] 杨志峰,尹民,崔保山.城市生态环境需水量研究——理论与方法[J].生态学报,2005,25(3):389-396.
- [14] Zhao W Z, Chang X L, He Z B, et al. Study on vegetation ecological water requirement in Ejina Oasis[J]. Science in China (Series D - Earth Sciences), 2007,50(1):121-129.
- [15] 张奎俊.石羊河流域下游民勤绿洲生态需水与措施研究[D].兰州:兰州理工大学,2008.
- [16] 何永涛,闵庆文,李文华.植被生态需水研究进展及展望[J].资源科学,2005,27(4):8-13.
- [17] 倪晋仁,金玲,赵业安,等.黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究[J].水利学报,2002,(10):1-7.
- [18] 高凯.吉林省西部生态环境需水研究[D].吉林:吉林大学,2008.
- [19] 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):496-500.
- [20] 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].海河水利,2003,(1):6-8.
- [21] 王玉敏,周孝德.流域生态需水量的研究进展[J].水土保持学报,2002,16(6):142-144.
- [22] 刘凌,董增川,崔广柏,等.内陆河流生态环境需水量定量研究[J].湖泊科学,2001,14(1):25-31.
- [23] 翟盛.干旱内陆河流域河流系统生态需水量计算[J].水利科技与经济,2010,16(8):854-855.
- [24] 杨秀英,张鑫,蔡焕杰.石羊河流域下游民勤县生态需水量研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(1):169-173.
- [25] 张学凤,罗越浩.疏勒河流域湖泊湿地生态需水量估算[J].甘肃水利水电技术,2009,45(7):14-15.