

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.05.013

# 三门峡库区湿地生态需水量估算

周维博<sup>1</sup>, 李跃鹏<sup>1,3</sup>, 王世岩<sup>2</sup>, 杨恒<sup>2,3</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100078; 3. 华北水利水电大学 资源与环境学院, 郑州 450045)

**摘要:** 基于2005年的水文和气象数据及2005年2月、6月、8月、11月四个不同时期的遥感影像解译数据。在三门峡库区湿地分类的基础上, 估算了2005年年内湿地生态需水量变化情况, 并分析了不同类型湿地的生态需水量年内变化规律, 结果表明, 2005年三门峡库区湿地最小生态需水量约为83.64亿m<sup>3</sup>, 适宜生态需水量约为144.07亿m<sup>3</sup>, 理想生态需水量约为304.50亿m<sup>3</sup>。其中多泥沙河流库区湿地生态需水最重要的是输沙需水量, 输沙需水量主要集中在汛期的6月-10月, 8月输沙需水最多, 约为25.27亿m<sup>3</sup>。通过计算湿地生态需水量能为库区湿地生态配水及湿地生态恢复提供基础数据。

**关键词:** 三门峡库区; 湿地; 生态需水量; 遥感

**中图分类号:** P426   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0877-06

## Estimation of ecological water demand in Sanmenxia reservoir wetland

ZHOU Wei bo<sup>1</sup>, LI Yue peng<sup>1,3</sup>, WANG Shi yan<sup>2</sup>, YANG Heng<sup>2,3</sup>

(1. School of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. China Department of Water Environment, Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100078, China; 3. North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** Based on the hydrological and meteorological data in 2005 and remote sensing image interpretation of four time periods (February, June, August, and November) in 2005 in Sanmenxia reservoir, variation of ecological water demand in the wetland in 2005 was estimated according to the classification of wetlands, and variation laws of ecological water demand in different types of wetlands were analyzed. The results showed that the minimum ecological water demand is 83.64 billion m<sup>3</sup>, the suitable ecological water demand is 144.07 billion m<sup>3</sup>, and the ideal ecological water demand is 304.50 billion m<sup>3</sup>. Water demand for sediment transport is the most important one of ecological water demand, and water demand for sediment transport was concentrated in the flood season from June to October with the maximum in August of 25.27 billion m<sup>3</sup>. Calculation of ecological water demand in the wetland can provide basic database for ecological water allocation and ecological restoration in Sanmenxia reservoir wetland.

**Key words:** Sanmenxia reservoir; wetland; ecological water demand; remote sensing

湿地是介于水陆过渡带的独特生态系统, 其在调蓄洪水、涵养水源及美化环境等方面发挥着重要的作用。水、土壤和生物是湿地生态系统的三大要素, 其中水要素是建立和维持湿地及其演变过程最重要的决定因子。近些年, 由于人类活动的干扰, 湿地遭到了不同程度破坏, 湿地生态系统健康不容乐观。威胁湿地生态系统健康的主要因素有: 水文情势改变、水质恶化、对生物资源的掠夺性开发以及对土地利用或土地覆盖的改变。人类活动对原有水文情势的改变, 表

现为水量的急剧减少以及流量或水位年内显著的变化。湿地生物群落通常来不及适应短期内水文情势的急剧改变, 必然造成湿地生态系统的退化。因此, 就需要在开发利用水资源的同时, 必须维持一定的生态需水过程以保障湿地生态系统健康<sup>[1]</sup>。生态需水研究始于20世纪40年代, 兴起于70年代大坝建设高峰期(WCD, 2000)。国外Spoor等<sup>[2]</sup>利用总超过数法计算了草原湿地需水量。Keddy<sup>[3]</sup>在湿地恢复中考虑了植物和动物需水的问题。Mayer等<sup>[4]</sup>研究了克拉斯

收稿日期: 2014-07-08   修回日期: 2015-08-09   网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2108.033.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179207; 51209231)

作者简介: 周维博(1956-), 男, 陕西乾县人, 教授, 博士生导师, 从事水资源与水环境及节水灌溉方面的教学与研究工作。Email: zwbzyz823@163.com

通信作者: 李跃鹏(1981-), 男, 内蒙古通辽人, 讲师, 博士研究生, 主要水文水资源方面的研究工作。Email: liyuepeng@ncwu.edu.cn

低地国家野生动物保护区内季节性湿地的秋季生态需水量的计算方法和模拟估算值。Eamus 等<sup>[5]</sup>分析了植被和土壤需水量的具体计算方法。湿地植物需水量在总需水量中占有较大比重,对于湿地植物需水量的研究也在不断的深入。Roberts 等<sup>[6]</sup>详细论述并估算了植物需水量。总体来说,国外湿地生态需水量的研究比较系统全面,详细论述了各类型湿地生态需水量的计算方法,强调水资源的重要性,并注重生态与水关系的综合研究,特别是生物多样性的研究。而国内的起步较晚,崔保山等<sup>[7]</sup>首先提出了湿地分级的概念,将湿地生态需水量分为最小、中等、优、最优和最大生态需水量。之后一些学者又提出根据湿地不同功能划分湿地生态需水类型的概念<sup>[8-9]</sup>。赵东升等<sup>[10]</sup>利用此法将洪河国家级自然保护区湿地生态需水量分为 4 种类型(植物、土壤、生物栖息地和补给地下水需水量),并通过划分的 3 种级别(最小、最适、最大)计算了保护区湿地生态需水量。同样,郭跃东<sup>[11]</sup>将扎龙湿地生态需水分为 4 种类型(植物、土壤、生物栖息地和净化污染物需水量)和 5 个级别,估算了扎龙湿地生态环境需水量。总体来说,国内是以分级分类为基础,运用经典公式计算湿地生态需水量。但由于各类型需水量存在重复计算的缺陷,重复量的不确定性降低了此方法的计算精度。

目前,关于湿地生态需水研究的成果主要集中在河流生态需水上,其中关于河流生态需水评估方法占有较大的比重;研究内容主要集中在湿地生态需水机理、模型及配置上。然而针对多泥沙河流库区湿地生态需水量的研究还相对较少。因此本文基于 RS 技术、湿地生态需水量的概念及多泥沙河流库区湿地的特点,计算三门峡库区湿地生态需水量,旨在为三门峡库区乃至黄河流域的可持续发展及社会、经济、生态需水配置提供科学依据。

## 1 研究区概况

1960 年 9 月,黄河上第一座综合性水利枢纽—三门峡水库建成,三门峡库区位于黄河中游,黄河中游是指从山西省和陕西省交界的禹门口到河南省的桃花峪这段呈“L”形河道及其沿河滩涂湿地,黄河中游以其河床宽、面积大、河道游荡不定、湿地类型多样、生物多样性丰富最具特色,成为湿地鸟类重要的觅食和栖息地。区域湿地位于我国候鸟迁徙三大通道中线的中心位置,是候鸟的重要停歇地、觅食地和越冬地,对于维持河流生态健康具有重要作用。黄河中游湿地具有河流湿地的特征,还具有库塘湿地和沼泽湿地的特征,包括河道水域生态系统、河滩生态系统、沼泽生态系统、林地生态系统、农田生态系统等,处于平原向山地丘陵的过渡地带,湿地中既有峡谷地貌,也有宽阔的滩涂,地理位置十分重要,是我国 2004 年启动的全国湿地保护工程规划中划定的重点区域之一。三门峡库区湿地与三门峡水库工程修建关系密切,湿地形成主要依赖于水库运用。周边属于旱丘陵区,库区湿地主要包括河流湿地、滩地、水塘、湖泊湿地等。三门峡库区湿地植被类型较多,是一个完整的湿地植被生态系统,其主要物种为芦苇、香蒲、莎草、节节草等 11 种类型,区内鸟类资源十分丰富,已知 175 种鸟类中,其中天鹅是保护区的主要保护物种之一<sup>[12]</sup>。

因此本文选择三门峡库区湿地为研究对象,针对多泥沙

河流,基于河流基本环境功能、生物生存环境、生态恢复等需求,根据湿地生态需水量的定义,在湿地分类的基础上,通过对三门峡库区湿地的遥感解译,分析三门峡库区湿地面积年内变化规律,并综合运用 T emant 法及关键物种水力学等方法,计算三门峡库区植被生态需水、土壤生态需水、栖息地生态需水、输沙生态需水、生态基流、降水量及蒸发量的年内变化规律,并探讨影响库区生态需水年内变化的主要因素。

## 2 研究方法

### 2.1 三门峡湿地类型及数据处理

湿地分类一直以来是湿地科学研究的前沿问题,较为准确全面的湿地分类,能为湿地其他理论研究奠定基础。目前,国际上较为重要的有欧洲分类系统、美国分类系统及《湿地公约》分类系统等。国内,在全国湿地资源调查中主要采用《全国湿地资源调查与监测技术规程》(GB/T 24708-2009)中的湿地分类标准。本文根据研究区域的特点,主要结合《湿地公约》、《全国湿地资源调查与监测技术规程》中的湿地分类,将研究区域分为水体(包括河流和湖泊的水体)、滩涂湿地以及沼泽湿地,其中水体集合了区域河流湿地、湖泊湿地以及库塘湿地等包含较大水面面积区域。

根据 2005 年 2、6、8、11 月四个不同时期的 TM 卫星影像解译结果,利用 Arcgis 10.1 统计了 2005 年四个时期不同类型湿地的面积(表 1)。由于每个季节面积波动不大,则采用 2、6、8、11 月的数据分别代表 1 月-3 月、4 月-6 月、7 月-9 月、10 月-11 月库区湿地面积。

表 1 2005 年三门峡库区湿地面积

Tab. 1 Area of Sanmenxia reservoir wetland in 2005 km<sup>2</sup>

月份	河流	湖泊	滩地	沼泽	人工湿地	总面积
2 月	108.10	2.91	70.70	5.27	10.96	197.94
6 月	92.54	3.49	80.34	5.38	10.97	192.72
8 月	55.27	1.28	112.01	4.65	10.62	183.82
11 月	87.20	2.60	88.39	5.22	10.80	194.21

从 2005 年湿地总体面积年内变化来看,库区湿地总面积年内变化不大,但是年内水体面积与滩地间存在明显转变特征,其中水体面积最大月份出现在 2 月份,与期间水库蓄水形成较大水面有关,水域面积年内由大到小依次出现在 6 月份及 11 月份,最小为 8 月份,均与水库年内不同运行方式有关;与此相反滩涂面积最大出现在 8 月份,其次为 6 月份及 11 月份,最小为 2 月份;相较水体面积最大的 2 月份,8 月份水体面积减少约 48 18 km<sup>2</sup>,仅占 2005 年水体最大面积 55 57%,而年内湿地总体面积变化不大。

### 2.2 各类型生态需水量的估算

#### 2.2.1 植被需水量

三门峡库区湿地植被类型较多,是一个完整的湿地植被生态系统。主要有灌丛沼泽、草丛沼泽、浅水湿地植物群落以及盐沼等。在各类湿地中,芦苇是占绝对优势和对环境扰动比较敏感的生物物种,在维系湿地生态系统发育、演替以及生态完整性方面具有重要作用。因此,本文选择芦苇作为库区关键物种进行湿地植被需水量计算。

(1) 计算方法。

植被需水量利用公式(1)计算<sup>[13]</sup>

$$W_{mi} = A_i \cdot ET_c \quad (1)$$

式中:  $W_{mi}$  为植被需水量( $m^3$ );  $A_i$  为植被面积( $m^2$ );  $ET_c$  为蒸散量(m)。

湿地芦苇蒸散量  $ET_c$  的计算采用传统的参考作物蒸散量—单作物系数法进行计算, 即:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (2)$$

式中:  $ET_c$  为实际蒸散量(mm/d);  $ET_0$  为参考作物蒸散量(mm/d),  $K_c$  为作物系数。 $ET_0$  反映了气象条件对作物需水量的影响,  $K_c$  则反映了不同作物的差别<sup>[14]</sup>。由于无实测资料, 湿地芦苇作物系数  $K_c$  采用 FAO-56 的推荐值并经调整得出。

本文采用 FAO Penman Monteith 公式计算库区湿地蒸散量, 该公式较全面的考虑了影响蒸散发的各种因素, 并在气候条件差异较大的不同地区的应用中都取得了较好的结

表 2 三门峡库区芦苇蒸散量

Tab. 2 Reed evapotranspiration in Sammenxia reservoir

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
月均 $ET_c$	11.98	16.19	51.09	131.51	161.5	190.17	164.14	159.06	65.26	47.98	16.61	12.22

### 2.2.2 土壤需水量

湿地土壤需水量是湿地生态系统水资源储量。草甸土、沼泽土和盐土是典型湿地土壤类型。三门峡库区属沼泽土类型, 由于湿地土壤的特殊性, 在计算中, 涉及两个水分常数: 一是田间持水量(指在地下水水位比较深时土层能保持的最大含水量); 二是饱和持水量(指土壤孔隙能容纳的最大水量); 计算土壤需水量采用公式<sup>[17]</sup>(5)。

$$W_{smi} = \alpha A_i H_s \quad (5)$$

式中:  $W_{smi}$  为湿地土壤需水量( $m^3$ );  $\alpha$  为田间持水量或饱和持水量百分比, 根据研究的土壤类型而定;  $A_i$  为湿地土壤面积( $m^2$ );  $H_s$  为土壤厚度(m)。

选取田间持水量和饱和持水量划分生态需水量级别, 指标及结果见表 8。

### 2.2.3 栖息地需水量

三门峡库区湿地主要保护目标是迁徙性珍稀鸟类, 迁徙鸟类栖息环境应作为主要生态研究对象。区内鸟类资源十分丰富, 根据鸟类保护级别, 充分考虑物种代表性, 选择大天鹅等作为指示物种。

大天鹅是国家二级保护鸟类, 为库区重要越冬鸟类之一。每年 11 月中旬至 4 月中旬在库区居留达 5 个月之久。主要栖息于黄河滩地及水域等地。

(1) 计算方法<sup>[18]</sup>。

$$W_{hmi} = \beta A_j h_l \quad (6)$$

式中:  $W_{hmi}$  为栖息地需水量( $m^3$ );  $\beta$  为水面面积百分比;  $A_j$  为湿地面积( $m^2$ );  $h_l$  为平均水深(m)。

(2) 计算结果。

根据指示鸟类生境类型及水分条件要求, 参考相关研究成果, 明确库区湿地指示鸟类需水规律, 见表 3。

水面面积和水深决定了天鹅的栖息地环境, 以上述两种

果, 具有较高的精度和良好的可比性<sup>[15]</sup>, 公式形式为:

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中:  $R_n$  为作物表层净辐射量( $MJ/(m^2 \cdot d)$ );  $G$  为土壤热通量( $MJ/(m^2 \cdot d)$ ); 系数  $\Delta$  是饱和水汽压对温度的曲线斜率( $kPa/^\circ C$ ), 是温度的函数;  $\gamma$  是干湿球常数( $kPa/^\circ C$ ), 是气压的函数;  $T$  为平均气温( $^\circ C$ );  $u_2$  为 2 m 高处的风速( $m/s$ );  $e_a$  为实际水汽压( $kPa$ );  $e_s$  为饱和水汽压( $kPa$ )。式中各参数的确定可以参考文献<sup>[16]</sup>。

(2) 计算结果。

根据上述计算方法, 计算出芦苇蒸散量  $ET_c$ , 结果见表 2。芦苇主要生长在沼泽湿地和滩地中, 设定沼泽面积和滩地面积之和为植被面积。至于需水量级别根据植被生长状况划分, 分别按照蒸散发量的 0.6、0.8、0.9 比例进行计算。植被需水量计算结果见表 8。

要素根据上表划定需水量级别, 计算结果见表 7。

表 3 黄河湿地指示鸟类需水规律

Tab. 3 Laws of bird water demand in the Yellow River wetland

需水时段	平均需水水深/m	需水水深范围/m	需水原因
4月-6月	0.1	0.1~0.5	繁殖
7月-10月	0.5	0.2~0.8	鸟类生长、繁殖
11月-次年3月	0.2	0.1~1	鸟类越冬

### 2.2.4 输沙需水量

河道输沙需水量是从中国河流特殊的生态系统考虑而提出的概念。以往对输沙需水量的研究中, 特定输沙情况下的净水量(径流量除去泥沙体积所剩的净水体积)往往被称为输沙需水量, 但是实际情况下, 净水量并不总是全部用来输沙的, 只有在平衡状态或淤积情况下, 净水量才全部用于输沙。因此, 可将输沙需水量定义为: 在一定水沙条件和河床边界条件下, 将一定量泥沙输移至下一河段所需要的水量。它特指净水量中用于泥沙输移的水量, 视水沙条件和输沙效率的不同, 输沙需水量是净水量的部分或全部<sup>[19]</sup>。

计算输沙需水量的方法归纳起来有含沙量法、输沙总水量法以及资料分析法, 但它们计算的实际上是单位净水量, 根据以上输沙需水量的定义, 输沙需水量可以由下式计算<sup>[19]</sup>:

$$W' = \eta W_\omega \quad (7)$$

$$W_\omega = W - W_s / \gamma_s \quad (8)$$

$$\eta = \frac{W_{s,进}}{W_{s,出}} = \sum [ \frac{Q_{进} \cdot S_{进} \cdot t_i}{Q_{出} \cdot S_{出} \cdot t_i} ] \quad (9)$$

式中:  $W'$  为输沙水量( $m^3$ );  $W_\omega$  为净水量( $m^3$ );  $W$  为径流量( $m^3$ );  $W_s$  为输沙量(亿 t);  $\eta$  为输沙效率;  $\alpha$  为指数;  $\gamma_s$  为泥沙容重(通常取  $2.65 t/m^3$ )。

本文选取表征三门峡库区进出库的潼关站和三门峡站

的径流和输沙率资料。采用上述计算方法, 计算出了 2005 年各月的输沙需水量(见表 4)。

表 4 2005 年各月输沙需水量

Tab. 4 Monthly water demand for sediment transport in 2005

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
需水量	0	0	0	0	0	12.44	12.91	25.27	12.06	13.32	0	0	76.002

### 2.2.5 生态基流

生态基流是维持河流生态系统基本流量, 是保证全河段具有连续径流的条件。本文运用 Tennant 法对库区生态基流量进行估算, Tennant 法也叫 Montana, 目前在国内外应用较为广泛, Tennant 法将年平均流量的百分比作为基流量, 具有宏观定性指导意义, Tennant 通过分析美国 11 条河流的断面数据, 建立了水生生物、河流景观、娱乐和河流流量之间的关系(表 5)。研究表明: 多年平均径流量的 10% 是保持河流生态系统健康的最小流量, 多年平均径流量的 30% 能为大多数水生生物提供较好的栖息条件<sup>[20]</sup>。以三门峡站多年平均径流量为基础, 生态基流计算结果见表 8。

表 5 Tennant 法推荐流量标准

Tab. 5 Recommend flow standard based on Tennant method

流量及相应栖息地的定性描述	推荐基流量(平均流量百分数)	
	一般用水期(10月-3月)	鱼类产卵育幼期(4月-9月)
最大	200	200
最佳范围	60~100	60~100
极好	40	60
非常好	30	50
好	20	40
中	10	30
差或最小	10	10
严重退化	<10	<10

## 2.3 降水量和蒸发量

### 2.3.1 降水量

根据 1957 年-2003 年潼关、三门峡站的降水量资料, 计算库区多年平均降水量, 见表 6。

### 2.3.2 蒸发量

根据 1957 年-2001 年三门峡站的蒸发量资料, 计算库区多年平均蒸发量, 见表 7。

## 2.4 生态需水总量

以上各项生态需水量存在交叉重复, 简单的相加并不能解决这个问题。因此, 本文采取如下减少重复计算的耦合方法: 将生态需水量划分为消耗性生态需水和非消耗性生态需水, 那么生态需水总量就等于消耗性生态需水的和加上非消耗生态需水的最大值<sup>[13]</sup>。针对三门峡库区湿地生态需水量为

库区生态需水总量=

$\max\{\text{栖息地需水量, 生态基流, 输沙需水量}\} + \text{植被需水}$

表 6 三门峡库区多年平均降水量

Tab. 6 Average annual precipitation in Sanmenxia reservoir

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年均
月均降水量	4.9	7.2	21.5	42.0	58.4	61.0	117.0	90.3	90.3	55.8	23.2	4.8	576.4

量+ 土壤需水量+ 水面蒸发量- 降水量

因此, 三门峡库区湿地生态需水总量见表 8。

## 3 结论与分析

(1) 通过计算 2005 年年内最适宜生态需水量变化范围为 83 64~304 50 亿  $m^3$ , 其中最大值出现在 8 月份为 43.58 亿  $m^3$ , 其最大为输沙需水量 25.27 亿  $m^3$ , 其次为生态基流 20.78 亿  $m^3$ ; 最小值出现在 1 月份为 12.66 亿  $m^3$ , 其中所占比例最大为生态基流量; 最大值是最小值的 4 倍, 其中造成差异的主要因子为降雨量及径流的时空变化, 这说明对三门峡库区湿地影响最大的因素为输沙需水量及生态基流。造成这一现象出现的原因是水库不同的运行方式和小浪底水库建成后调水调沙的结果。

(2) 从图 1 和表 8 可以知道 2005 年湿地适宜生态需水量的年内变化, 其中 1 月-5 月, 11 月-12 月需水量较少, 主要需水量类型为生态基流和土壤生态需水量, 汛期增加的主要是输沙需水量。从逐月生态需水量的最小值、适宜值及理想值的变化规律看, 变化最大的指标为栖息地需水量及生态基流, 最大值与最小值的平均倍数为 10 倍, 且栖息地需水量及生态基流是影响非汛期生态需水量的主要因素, 因此影响栖息地需水量及生态基流是造成生物多样性减少的主要因素。

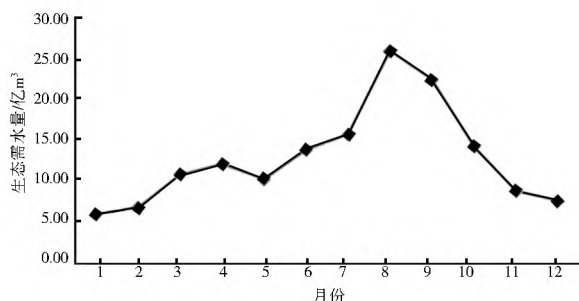


图 1 2005 年各月适宜生态需水量

Fig. 1 Monthly suitable ecological water demand in 2005

(3) 以上采用经典的公式计算各类型湿地生态需水量, 这种方法容易且适用范围较广, 为湿地生态配水及湿地的保护提供了较为有用的参考价值, 但实际上湿地的水资源是整个湿地生态系统共用的, 用于哪种类型的需水却没有严格的界限, 所以难免会重复计算<sup>[8]</sup>。同时针对多泥沙河流库区湿地而言, 输沙需水量是确保湿地演替的重要因素, 它与气候变化及人类活动密切相关, 因此, 输沙需水量的计算精度将是多泥沙河流湿地生态需水量的重要基础。

表7 三门峡库区多年平均蒸发量

Tab.7 Average annual evapotranspiration in Sanmenxia reservoir

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年均
月均蒸发量	65.92	91.18	160.64	216.08	266.00	311.83	263.00	243.27	165.34	130.05	85.85	63.38	2062.54

表8 三门峡库区湿地生态需水总量

Tab.8 Total ecological water demand in Sanmenxia reservoir wetland

月份	级别	植被需水量 / 亿 m <sup>3</sup>	土壤需水量 / 亿 m <sup>3</sup>	栖息地需水量 / 亿 m <sup>3</sup>	生态基流 / 亿 m <sup>3</sup>	水面蒸发量 / m <sup>3</sup>	降水量 / m <sup>3</sup>	生态需水总量 / 亿 m <sup>3</sup>
1	最小	0.005 5	0.28	0.11	1.15	0.130 5	0.009 7	1.56
	适宜	0.007 3	0.63	0.56	4.60	0.130 5	0.009 7	5.35
	理想	0.008 2	1.03	1.11	11.51	0.130 5	0.009 7	12.66
2	最小	0.007 4	0.28	0.11	1.38	0.180 5	0.014 3	1.84
	适宜	0.009 8	0.63	0.56	5.51	0.180 5	0.014 3	6.31
	理想	0.011 1	1.03	1.11	13.77	0.180 5	0.014 3	14.97
3	最小	0.023 3	0.28	0.11	2.41	0.318 0	0.042 6	2.99
	适宜	0.031 1	0.63	0.56	9.62	0.318 0	0.042 6	10.55
	理想	0.034 9	1.03	1.11	24.06	0.318 0	0.042 6	25.40
4	最小	0.067 6	0.32	0.10	6.46	0.416 4	0.080 9	7.18
	适宜	0.090 2	0.71	0.29	10.77	0.416 4	0.080 9	11.90
	理想	0.101 5	1.16	0.48	21.54	0.416 4	0.080 9	23.13
5	最小	0.083 1	0.32	0.10	5.20	0.512 6	0.112 5	6.00
	适宜	0.110 8	0.71	0.29	8.67	0.512 6	0.112 5	9.89
	理想	0.124 6	1.16	0.48	17.34	0.512 6	0.112 5	19.02
6	最小	0.097 8	0.32	0.10	5.03	0.601 0	0.117 6	13.35
	适宜	0.130 4	0.71	0.29	8.38	0.601 0	0.117 6	13.77
	理想	0.146 7	1.16	0.48	16.76	0.601 0	0.117 6	18.55
7	最小	0.114 9	0.44	0.11	8.63	0.483 4	0.215 1	13.73
	适宜	0.153 2	0.96	0.34	14.38	0.483 4	0.215 1	15.76
	理想	0.172 3	1.57	0.45	28.75	0.483 4	0.215 1	30.77
8	最小	0.111 3	0.44	0.11	12.47	0.447 2	0.166 0	26.10
	适宜	0.148 4	0.96	0.34	20.78	0.447 2	0.166 0	26.66
	理想	0.167 0	1.57	0.45	41.56	0.447 2	0.166 0	43.58
9	最小	0.045 7	0.44	0.11	13.04	0.303 9	0.166 0	13.66
	适宜	0.060 9	0.96	0.34	21.73	0.303 9	0.166 0	22.89
	理想	0.068 5	1.57	0.45	43.46	0.303 9	0.166 0	45.24
10	最小	0.026 9	0.35	0.18	3.28	0.252 6	0.108 4	13.84
	适宜	0.035 9	0.77	0.54	13.12	0.252 6	0.108 4	14.27
	理想	0.040 4	1.26	0.72	32.80	0.252 6	0.108 4	34.25
11	最小	0.009 3	0.35	0.09	1.86	0.166 7	0.045 1	2.34
	适宜	0.012 4	0.77	0.45	7.46	0.166 7	0.045 1	8.37
	理想	0.014 0	1.26	0.90	18.65	0.166 7	0.045 1	20.05
12	最小	0.006 9	0.35	0.09	1.55	0.123 1	0.009 3	2.02
	适宜	0.009 2	0.77	0.45	6.20	0.123 1	0.009 3	7.10
	理想	0.010 3	1.26	0.90	15.50	0.123 1	0.009 3	16.89
全年	最小	0.599 7	4.18	1.320	62.46	3.935 9	1.087 4	83.64
	适宜	0.799 6	9.21	4.984	131.22	3.935 9	1.087 4	144.07
	理想	0.899 5	15.06	8.642	285.70	3.935 9	1.087 4	304.50

## 参考文献(References):

[1] 杨志峰, 崔保山, 孙涛, 等. 湿地生态需水机理、模型和配置 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. (YANG Zhifeng, CUI Baoshan, SUN Tao. Mechanism of wetlands ecological water re-

quirement, model and configuration [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))

[2] Spoor G, Gowing D J. Quantification of water regime requirements of wet grassland flora// Brown LC, ed. Drainage in the 21st Century: Food Production and the Environment, Proceed-

- ings of 7th International Drainage Symposium. ASAE: St. Joseph, MI, 1998: 621-628.
- [3] Keddy P. Wetland restoration: The potential for assembly rules in the service of conservation[J]. *Wetlands*, 1999, 19: 716-732.
- [4] Mayer T D, Thomasson R. Fall water requirements for seasonal diked wetlands at lower Klamath National Wildlife Refuge [J]. *Wetlands*, 2004, 24: 92-103.
- [5] Eamus D, Hatton T, Cook P, et al. *Ecophysiology: Vegetation Function, Water and Resource Management*. Melbourne: CSIRO Publishing, 2006.
- [6] Roberts J, Young B, Marston F. *Estimating the Water Requirements for Plants of Floodplain Wetlands: A Guide*. Australia: Land and Water Resources Research & Development Corporation, 2000.
- [7] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康的时空尺度特征[J]. *应用生态学报*, 2003, 13(10): 121-125. (CUI Baoshan, YANG Zhifeng. Spatial and temporal scales of wetland ecosystem health[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2003, 13(10): 121-125. (in Chinese))
- [8] 孙晓梅, 曲延光. 莫莫格湿地生态环境需水量研究[J]. *东北水利水电*, 2007, 25(1): 54-55. (SU Xiaomei, QU Yanguang. Research into momo wetland ecological environment water demand[J]. *Northeast of Water Resources and Hydropower*, 2007, 25(1): 54-55. (in Chinese))
- [9] 唐占辉, 马逊风. 向海湿地生态需水量的初步研究[J]. *吉林水利*, 2003(12): 1-2. (TANG Zhanhui, MA Xunfeng. The preliminary research on the wetland ecological water requirement to the sea[J]. *Jilin Water Resources*, 2003(12): 1-2. (in Chinese))
- [10] 赵东升, 吴正方, 商丽娜. 洪河保护区湿地生态需水量研究[J]. *湿地科学*, 2004, 2(2): 133-138. (ZHAO Dongsheng, WU Zhengfang, SHANG Lina. The low reserve wetlands ecological water requirement study[J]. *Wetland Science*, 2004, 2(2): 133-138. (in Chinese))
- [11] 郭跃东, 何岩, 邓伟, 等. 扎龙国家自然湿地生态环境需水量研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 163-166. (GUO Yuedong, HE Yan, DENG Wei. Research into Zhalong national natural wetland ecological environment water demand[J]. *Journal of soil and water conservation*, 2004, 18(6): 163-166. (in Chinese))
- [12] 丁圣彦, 梁国付, 姚孝宗, 等. 河南沿黄湿地景观格局及其动态研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (DING Shengyan, LIANG Guofu, YAO Xiaozong. Research into Henan province along the yellow wetland landscape pattern and its dynamic. (in Chinese))
- [13] 赵少延. 三门峡库区湿地生态需水量研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013. (ZHAO Shaoyan. Wetland ecological water requirement in Sanmenxia reservoir area[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese))
- [14] 董仁, 隋福祥, 张树辉. 应用彭曼公式计算作物需水量[J]. *黑龙江水专学报*, 2006, 33(2): 100-101. (DONG Ren, SUI Fuxiang, ZHANG Shuhui. Application of crop water requirement in the penman formula[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulics Engineering College*, 2006, 33(2): 100-101. (in Chinese))
- [15] 李晓军, 李取生. 东北地区参考作物蒸散确定方法研究[J]. *地理科学*, 2004, 24(2): 212-216. (LI Xiaojun, LI Qusheng. Method to determine the reference crop evapotranspiration in northeast China[J]. *Geographical Science*, 2004, 24(2): 212-216. (in Chinese))
- [16] John D. Valiantzas. Simplified Versions for the Penman evaporation equation using routine weather data[J]. *Journal of Hydrology*, 2006: 690-702.
- [17] 徐艳菲, 张义文, 焦明, 等. 永年洼湿地生态需水量初步研究[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(9): 2031-2034. (XU Yanfei, ZHANG Yiwen, JIAO Ming. Preliminary studies Yongnian Wa wetland ecological water requirement[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(9): 2031-2034. (in Chinese))
- [18] 严军, 苗卉, 柴洪敏. 永定河下游河道输沙需水量[J]. *人民黄河*, 2006, 28(2): 51-53. (YAN Jun, MIAO Hui, CHAI Hongmin. Yongding river downstream water requirement of river sediment[J]. *Yellow River*, 2006, 28(2): 51-53. (in Chinese))
- [19] 严军, 胡春宏. 黄河下游河道输沙需水量的计算方法及应用[J]. *泥沙研究*, 2004(4): 25-32. (YAN Jun, HU Chunhong. The calculation method of the lower reaches of the Yellow River water requirement of river sediment and applications[J]. *Journal of Sediment Research*, 2004(4): 25-32. (in Chinese))
- [20] 于松延, 徐宗学, 武玮. 基于多种水文学方法估算渭河关中段生态基流[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(2/3): 175-179. (YU Songyan, XU Zongxue, WU Wei. Based on a variety of hydrology method for estimating the guanzhong weihe river ecological base flow[J]. *Journal of Beijing Normal University*, 2013, 49(2/3): 175-179. (in Chinese))

(上接第 870 页)

- [10] 沈亦龙, 何晶晶, 邵立明. 太湖五里湖底泥污染特性研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(6): 584-588. (SHEN Yilong, HE Pijing, SHAO Liming. Characteristics of contaminated sediments in wuli lake of Tai lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(6): 584-588. (in Chinese))
- [11] 李跃勋, 徐晓梅, 何佳, 等. 滇池流域点源污染控制与存在问题解析[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(5): 633-639. (LI Yueshun, XU Xiaomei, HE Jia, et al. Point source pollution control and problem in Lake Dianchi Basin[J]. *Journal of Lake Science*, 2010, 22(5): 633-639. (in Chinese))
- [12] 汪国华. 大共同体与差序格局互构: 我国农村点源污染治理困境研究[J]. *中国农业大学学报: 社会科学版*, 2012, 29(1): 45-50. (WANG Guohua. Mutual constructing of great community and the differential mode of association: research on the governance dilemma of rural point source pollution[J]. *China Agricultural University Journal of Social Sciences Edition*, 2012, 29(1): 45-50. (in Chinese))
- [13] 杨旭, 张雪萍, 王继富, 等. 人工湿地组合工艺处理对含油含污水净化效果研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(4): 662-665. (YANG Xu, ZHANG Xueping, WANG Jifu, et al. Purification efficiency of the constructed wetland combined process for oil wastewater[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(4): 662-665. (in Chinese))
- [14] 单立楠, 丁能飞, 王洪才, 等. 蔬菜地面源污染生态拦截系统与效果[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(20): 168-178. (SHAN Linnan, DING Nengfei, WANG Hongcai, et al. Effect of ecological interception system in reducing non-point source pollution from vegetable fields[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(20): 168-178. (in Chinese))