

Research of the wetland ecological water demand in the Yellow River Delta Nature Reserve

Mei HAN^{1#}, Xiaoyan YANG¹, Lihua SHI¹, Cui ZHANG¹, Juan NI²

¹ College of Geography and Environment, Shandong Normal University, 250014, China

² Department of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Urban Construction Vocational College, 250103, China

#Email: hanmei568568@126.com

Abstract

Take the most typical wetland ecosystem of the Yellow River Delta Nature Reserve for example to study the water demand in wetland ecosystems. Yellow River Delta Nature Reserve is located at the estuary of both the current and the old flow path of the Yellow River, which is a national nature reserve, was established for protecting native wetland ecosystems and valuable and endangered birds. Wetland in nature reserve are composed by the river wetlands, shallow sea wetlands, newborn estuary muddy wetland and so on. Condition of incoming water and sediment directly affect the evolution trend of the wetland ecosystem in nature reserve. Chose nature reserve as the study area, got the ecological water demand threshold of different levels of development of wetlands by using the functional approach to calculate according to the grade of wetland ecological water demand. The calculated results show that the incoming water of the Yellow River in the normal year can meet the minimum ecological water demand of wetland, but there is a big gap to suitable wetland ecological water demand. The wetland ecosystem is on the stage of unstable degenerate boundary at present. The wetland restoration projects should be done to promote the sustainable development.

Keywords: Yellow River Delta; Nature Reserve; Wetland Ecosystem; Ecological Water Demand; Grade;

黄河三角洲湿地生态需水研究*

韩美¹, 杨晓妍¹, 史丽华¹, 张翠¹, 倪娟²

1. 山东师范大学 地理与环境学院 山东 济南 250014

2. 山东城市建设职业学院 市政与环境工程系, 山东 济南 250103

摘要: 以湿地生态系统最为典型的黄河三角洲自然保护区为例来研究湿地生态系统的需水量。黄河三角洲自然保护区位于现行黄河流路和黄河故道的入海口处, 是为保护黄河口原生湿地生态系统和珍稀濒危鸟类而建立的国家级自然保护区。保护区内的湿地由河流湿地、浅海湿地、河口新生淤泥质湿地等组成, 黄河下游来水、来沙的变化直接影响着保护区湿地生态系统的演化趋势。以自然保护区为研究区域, 运用功能法对湿地生态需水量进行分级计算, 得到湿地不同发展水平下的生态需水阈值, 计算结果表明: 正常年份黄河来水量满足湿地最小生态需水量, 但离湿地适宜生态需水量还有很大的差距, 目前湿地生态系统处于临界退化的不稳定状态, 急需实施湿地生态恢复工程, 以保障湿地生态系统的健康发展。

关键词: 黄河三角洲; 自然保护区; 湿地生态系统; 生态需水; 等级;

*基金资助: 国家自然科学基金面上项目(41371517)、山东省科技计划(2013GSF11706)。

引言

生态需水作为一个新兴领域,源于 20 世纪 40 年代美国对河道内最小生态流量的研究^[1],20 世纪 60 年代至 70 年代,按照系统理论对重要流域重新评价与规划,提出了一些计算和评价方法^[2]。20 世纪 70-80 年代末,美国通过对流域开发与管理目标的全面调整,形成了生态与环境需水分配的雏形,尤其在河道内流量方面,已形成较完善的计算方法,如 IFIM 法、Tennant 法等^[3,4]。至 20 世纪 90 年代,Gleick^[3,5,6]明确提出并深入探讨了基本生态需水量(basic ecological water requirement)的概念,加之生态环境问题日益突出,生态环境需水量的研究逐渐展开^[7],如 Raskin 等^[8]提出了水资源的可持续利用。在类型方面,植物需水是生态需水的重要组成部分,有 Keddy^[9]在研究湿地恢复方法时就考虑了湿地中植物和动物需水的问题,Casanova 等^[10],Mawhinney^[11]分别进行了一些关于洪泛湿地植物生态需水的研究,Roberts 等^[12]、Eamus^[13]等分别估算了植物需水量,并阐述了植被和土壤需水量的计算方法,这些研究为水资源管理与决策提供了依据^[14]。近年来,其研究更加国际化,其中包括河流生态环境需水量的研究,比较典型的如 FRIEND(Flow Regimes from International Experimental and Network Data Sets)行动计划^[15,16],它向横、纵两方面发展,横向包括欧洲、西非等地区和国家^[17],纵向包括大尺度问题、方法问题以及水质等问题的研究。例如 Hughes 等^[18]介绍了在南非已广泛运用的综合水文、水力学与生态响应的河流环境需水方法及其应用与问题,Casanova^[19]以南澳大利亚的 the Angas River 为研究区域利用水生植物功能群探讨环境需水,Shokoohi 等^[20]通过与水文与水力学比较,介绍了一种计算河流生态需水的组合方法,并以 The Kazemroud River 为例,印证了该方法的可行性。

国内生态需水研究始于 70 年代末的河流最小流量计算,80 至 90 年代,因我国西北地区生态环境恶化,故把研究重点放在干旱、半干旱区的生态需水方面,例如,国家“九五”科技攻关项目“西北地区水资源合理利用与生态环境保护”。崔保山、杨志峰^[21]在对湿地生态需水量内涵、计算方法、关键指标等进行研究的基础上划分湿地生态需水量等级^[22]。袁平等^[23]运用生态水位法对白洋淀湿地生态需水量进行计算,唐蕴等^[24]以水量平衡原理为指导,通过分析向海湿地变化特征研究湿地生态需水,崔保山等^[25]利用生态水文分析法对不同层次管理目标的黄河三角洲湿地生态需水量进行计算,张长春^[26]用遥感技术对黄河三角洲湿地蒸散量的计算,以及谷晓伟^[27]采用 SOBEK 模型对生物栖息地淡水需水量的计算,奚歌^[28]等基于 SEBS 模型对湿地蒸散量的计算,郑世武等^[29]对河道自净需水量的探讨,李剑锋等^[30]通过考虑水文变异的河道内生态需水计算方法计算了黄河干流 7 站各月河道内生态流量,得到河道内生态需水情况,齐拓野等^[31]运用 GIS 和 RS 技术,采用功能法对阅海湿地生态需水量进行了分级计算,并应用多元线性回归模型对计算结果进行了拟合分析,欧阳丽等^[32]采用基于鱼类生物量的河道生态需水计算方法,并以雅砻江锦屏大河湾为例,建立研究区域内河流流量过程与鱼类生物量之间的关系。总之,这些研究均为后续相关研究奠定了良好的理论与实践基础,对湿地进行合理、有效管理并实现其可持续发展具有重要的指导意义。

总之,国外研究主要集中在河流生态环境需水方面,侧重于水资源的配置,而关于湿地、河口三角洲等生态系统需水量的研究相对较弱,也缺乏系统的成熟理论^[33,34]。国内相关研究起步较晚,其理论与实践研究有待完善。本文以黄河三角洲自然保护区为研究对象,对湿地各等级生态需水量进行研究,以期提高计算精度,为湿地水文调节提供科学依据。

1 研究区域

黄河三角洲自然保护区位于现行黄河流路和黄河故道的入海口,是国务院为保护黄河口原生湿地生态系统和珍稀濒危鸟类于 1992 年建立的国家级自然保护区。保护区范围在东经 118°33′~119°20′,北纬 37°35′~38°12′之间,总面积 153000 hm²,其中核心区 59419 hm²,缓冲区 11233 hm²,实验区 82348 hm²。其地理范围见图 1。

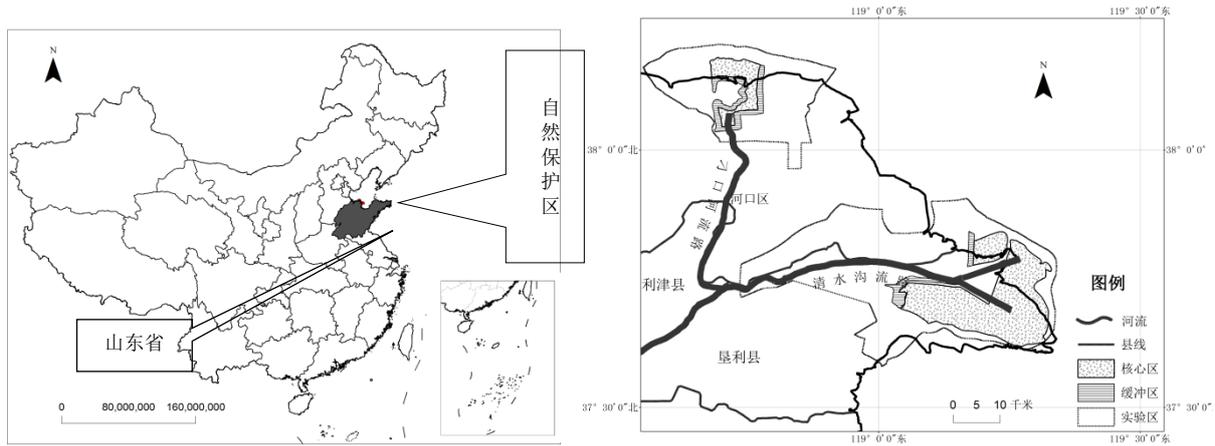


图 1 研究区地理位置图

2 研究方法与资料来源

2.1 研究方法

研究湿地生态需水量涉及多门学科，所以其计算方法也多种多样，但概括起来无外乎三类，即经验统计分析法、模拟模型法、遥感与地理信息系统法。考虑黄河三角洲地域特点及数据可获取性，采用经验统计分析法与遥感影像解译相结合的方法计算研究区湿地生态需水量，采用的经验公式如表 1。

表 1 生态需水计算模型

生态需水类型	经验公式	变量
植被蒸散发需水量	公式(1): $A = \iint_s (\frac{B_{in}mC_x}{D} + E)^2 dx dy$	$M = \iint_s (\frac{B_{in}mC_y}{D} + E)^2 dx dy$ 为植被年蒸散发需水量; ET_{mi} 为第 i 种植被的年蒸散发量; t 为时间, 以年为单位; A_i 为第 i 种湿地植被面积。
植物体含水量	公式(2): $W_i = W_p \%$	W_i 为植物体内含水量, W_p 为植被蒸散发需水量。
湿地土壤需水量	公式(3): $Q_i = \alpha \gamma H_i A_i$	Q_i 为土壤需水量; α 为田间持水量或饱和持水量体积百分比; γ 为土壤容重; H_i 为土壤厚度; A_i 为土壤面积。
补给地下水需水量	公式(4): $W_b = KIA t$	W_b 为湿地地下水补给量, K 为渗透系数, I 为水力坡度, A 为渗流剖面面积, t 为时间。
生物栖息地需水量	公式(5): $W_q = A(t) \% H(t)$	W_q 为生物栖息地需水量, $A(t)$ 为湿地面积, $\%$ 为水面面积百分比, $H(t)$ 为水深, t 为换水周期。
比降系数	公式(6): $i_e = 1 + \frac{\bar{i} - i}{i} (i < \bar{i})$	i_e 为比降系数, \bar{i} 为河流平均比降; i 为研究河段比降。
河流的基流生态需水量	公式(7): $W_h = Q_a k s i_e$	W_h 表示河流基流生态需水量, Q_a 表示天然状态下的多年平均径流量, k 表示多年平均径流量的比例, s 为时段系数, i_e 为比降系数。
单位泥沙输沙用水量	公式(8): $Q_s = \frac{1 - s / \rho_s}{s / 1000}$	Q_s 为单位泥沙输沙用水量(m^3/t), s 为河流某断面的平均含沙量(kg/m^3), ρ_s 为河流泥沙密度, 一般取 $2650 kg/m^3$ 。
河流输沙需水量	公式(9): $Q_{SP} = Q_s * (S - Z)$	Q_{SP} 为输沙需水总量, Q_s 为单位泥沙输沙用水量 (m^3/t); S 为来沙量(t), Z 为淤积量(t)。
防止岸线侵蚀需水量	公式(10): $W_f = Q_y C_n^{-1}$	W_f 为防止海岸侵蚀需水量, Q_y 为泥沙年淤积量, C_n 为冲泄流能力。

2.2 资料来源

本文中相关水文资料主要来源于黄河利津水文站水文监测数据、《黄河水资源公报》、《山东省水资源公报》、《山东省统计年鉴》、《东营市统计年鉴》等。相关湿地生态资料主要来源于 Landsat5TM 和 Landsat7 ETM+遥感影像解译、野外样方调查等。其它数据主要来源于中国知网、万方、读秀、Springer 等数据库中相关文献。

3 生态需水类型及等级

3.1 生态需水类型

湿地生态需水是保持湿地生态系统基本生态功能并维持其生态平衡与正常发展所需的水量，一般包括植被需水、生物栖息地需水、补给地下水需水、土壤需水等，但由于研究区位于黄河下游入海口，黄河为其主要补给水源，因此防止海岸线侵蚀需水、浅海生态环境需水和河流输沙需水、河道自净需水、河流生态基流需水都是本次研究必须考虑的重要指标。

3.2 生态需水等级

本文参照崔保山等^[25]、张长春等^[26]、奚歌等^[28]、王瑞玲等^[35]学者的研究成果，并结合课题组对保护区湿地、非湿地面积、生态系统组成、演化规律以及黄河来水来沙量与海岸线蚀退状况将湿地需水等级划分为最小、适宜、最大三级（表 2）。

表 2 湿地生态需水等级划分

生态需水类型	等级划分依据	最小	适宜	最大
植被蒸散发需水	芦苇沼泽蒸散发量(mm/a)	1000	1400	1600
	芦苇草甸蒸散发量(mm/a)	800	864	1000
	碱蓬和怪柳群落蒸散发需水量(m ³ /a)		2.15亿	
非植被区水域蒸发需水				
生物栖息地需水	水域面积占保护区湿地面积的百分比(%)	33	40	48
补给地下水需水				
滩涂蒸发需水	滩涂占湿地面积的百分比(%)	10	20	30
土壤需水	田间持水量的百分比(%)	33	60	90
输沙需水	汛期来水含沙量(kg/m ³)	30	45	60
生态基流需水量	多年来平均年径流量的百分比(%)	30	60	90
防止海岸线侵蚀需水	海岸线蚀退和淤积比例(%)	1:2	1	3:2

4 湿地生态需水量计算

4.1 湿地面积的确定

本文选取 1990、2000、2010 年 3 期 Landsat5 TM 遥感影像，经几何校正、波段组合、图像增强等处理，建立湿地解译标志。采取面向对象的分类方法对研究区的湿地进行自动分类，得到湿地类型、面积、比例等数据信息（表 3）。

表 3 研究区各类湿地面积(hm²)与比例

分 类 面 积	怪柳	芦苇群落	河流、水库、洼地 等水域	碱蓬	滩涂裸地	浅海	
		芦苇草甸 11315.2	芦苇沼泽 15198.3				
127347.1	18245.7	26513.5	7966	8980	38890.7	26751.2	
比例	14%	9%	12%	6%	7%	31%	21%

4.2 湿地生态需水量计算

4.2.1 湿地蒸散发需水量

(1) 植被区蒸散发需水量

本次计算的湿地植被包括碱蓬、柽柳灌丛、芦苇沼泽、芦苇草甸四种类型。其面积由遥感解译获得，分别为 8980hm²、18245.7hm²、15198.3hm²、11315.2hm²。其蒸散发量取值分别为 1.017m、0.671m、芦苇沼泽的最小、适宜、最大蒸散发量为 1m、1.4m、1.6m，芦苇草甸的最小、适宜、最大蒸散发量为 0.8m、0.864m、1m。将上述数据代入表 1 公式(1)和公式(2)即得湿地植被区蒸散发总需水量的最小、适宜、最大量分别是 4.63 亿 m³、5.31 亿 m³、5.77 亿 m³（表 4）。

表 4 湿地植被区蒸散发需水量（单位：10⁸m³）

等级	湿地植被区蒸散发需水量			植被蒸散发需水量	植被含水需水量	植被区总需水量
	碱蓬和柽柳灌丛	芦苇沼泽	芦苇草甸			
最小	2.15	1.52	0.91	4.58	0.046	4.63
适宜	2.15	2.13	0.98	5.26	0.053	5.31
最大	2.15	2.43	1.13	5.71	0.057	5.77

(2) 非植被区蒸发需水量

湿地非植被区包括裸露滩涂及水域，其中水域的最小、适宜和最大面积分别是 31025hm²、35939hm²、36127hm²，其蒸发参数为每年每公顷 1.25 m；滩涂的最小、适宜、最大面积分别为 12734.71hm²、25469.42hm²、38204.13hm²，其蒸发参数为每年每公顷 1.307 m，根据表 1 公式(1)得，湿地非植被区蒸散发需水量的最小、适宜、最大量分别为 5.54 亿 m³、7.82 亿 m³、9.51 亿 m³（表 5）。

表 5 湿地蒸散发需水量（单位：10⁸m³）

等级	非植被区蒸发需水总量		植被需水量	湿地蒸散发需水量
	滩涂	水域		
最小	1.66	3.88	4.63	10.17
适宜	3.33	4.49	5.31	13.13
最大	4.99	4.52	5.77	15.28

4.2.2 土壤需水量

研究区土壤为潮土和盐土，土壤容重为 1.49 g/cm³，平均土层厚度为 1.5 m，水域、芦苇沼泽区含水量取 100%，柽柳、碱蓬群落则取田间持水量的 33%、60%、90%作为最小、适宜、最大需水量的标准。遥感解译结果表明，研究区柽柳灌丛、碱蓬、芦苇草甸、芦苇沼泽、河流、水库、洼地等水域、滩涂裸地的面积分别为 18245.7hm²、8980hm²、11315.2hm²、15198.3hm²、7966hm²、38890.7hm²，根据表 1 公式(3)得出土壤需水量（见表 6）。

表 6 土壤需水量（单位：10⁸m³）

等级	柽柳	碱蓬	芦苇草甸	芦苇沼泽	河流、水库、洼地等	滩涂裸地	土壤需水量
最小	1.3	0.7	0.8	3.4	1.8	8.7	16.7
适宜	2.4	1.2	1.5	3.4	1.8	8.7	19.0
最大	3.7	1.8	2.3	3.4	1.8	8.7	21.7

4.2.3 补给地下水需水量

只考虑研究区淡水补给地下水的需水量，水力坡度 I 为 0.06‰，土壤渗透系数 K 为 0.5m/d，时间 t 取 180 天^[22]，但因研究区坡度较低，可忽略不计，故其淡水水域的渗流剖面面积最小、适宜和最大值分别为

15273 hm², 24188 hm² 和 34375 hm²。根据表 1 中公式(4)得到保护区湿地补给地下水的^{最小、适宜、最大}需水量为 0.008 亿 m³、0.013 亿 m³、0.019 亿 m³。

4.2.4 动物栖息地需水量

水域和芦苇沼泽植被区共同为自然保护区水禽等动物提供栖息地^[26]，因此，本文选择水域和芦苇沼泽植被区计算其栖息地需水量。

水域面积的最小、适宜和最大值分别为 4273 hm²、9188 hm² 和 9375 hm²，多年平均水深 1 m。根据表 1 公式(5)得出动物栖息地需水量（水域）的最小、适宜、最大值为 0.43 亿 m³、0.92 亿 m³、0.94 亿 m³。

相对于芦苇沼泽植被区而言，平均水深为 0.2 m、0.5 m、0.8 m 时，淹没面积分别为 11000 hm²、15000 hm² 和 25000 hm²^[27]。湿地水体的换水周期为 1/a。将上述参数带入表 1 公式(5)得出动物栖息地需水量（芦苇沼泽区）的最小、适宜和最大值分别为 0.22 亿 m³、0.75 亿 m³、2.00 亿 m³。上述二者相加即湿地动物栖息地需水量（表 7）。

表 7 动物栖息地需水量（单位：10⁸m³）

等级	芦苇沼泽区	河道、水库等 水域	总需水量
最小	0.22	0.43	0.65
适宜	0.75	0.92	1.67
最大	2.00	0.94	2.94

4.2.5 黄河河道自净需水量

郑世武等^[29]运用最枯月流量法，确定利津站年自净需水量为 13.51 亿 m³；又黄河花园口到入海口河道长 768 km，年自净需水量 14.53 亿 m³^[36]，研究区内黄河河道长 58 km，故其年自净需水量 1.1 亿 m³，但依据兼容取大值原则，保护区黄河河道年自净需水量取 13.51 亿 m³。

4.2.6 河流生态基流需水量

利津站多年平均来水量 304.68 亿 m³，根据表 1 中公式(6)可知保护区的比降系数为 1.14；根据郑世武等^[29]的利津站三个阶段时段系数，得出利津站月平均时段系数为 0.87，多年平均径流量比例为 30%、60%、90%，则其相应最小、适宜、最大的河流生态基流需水量根据表 1 中公式(7)分别为 90.7 亿 m³、181.3 亿 m³、272.0 亿 m³。

4.2.7 河流输沙需水量

黄河下游输沙关键在于来水峰值与其含沙量的配合，汛期其输送单位泥沙用水量为 30~40 m³/t^[37,38]，非汛期其输沙用水量为 100~150 m³/t，相比可知，输沙需水量应选择计算汛期输沙需水量。根据含沙量 60 kg/m³、45 kg/m³、30 kg/m³ 分别为最小、适宜、最大输沙需水等级标准，同时根据公式(8)单位泥沙输送水量与含沙量的关系，得到相应等级的单位泥沙输沙需水量为 16m³/t、22 m³/t、32 m³/t。1951-1999 年黄河年均来沙量 8.43 亿 t，年均淤积量 2.3 亿 t，则根据表 1 中公式(9)得到黄河利津站输沙需水量（表 8）。

表 8 黄河利津站河流输沙需水量

等级	最小	适宜	最大
单位泥沙输沙需水量(m ³ /t)	16	22	32
河流输沙需水量(10 ⁸ m ³)	98.08	134.86	196.16

4.2.8 防止海岸线侵蚀需水量

1951-1999 年黄河年均淤积量 2.3 亿 t，将蚀退淤积比例 1:2、1:1、3:2 作为最小、适宜、最大防止海岸

线侵蚀需水量的标准，冲泄流能力采用经验数据（每亿立方米水量可冲泥沙 5 亿吨），将上述参数带入表 1 公式(10)得到防止海岸线侵蚀的需水量（表 9）。

表 9 防止海岸线侵蚀需水量

等级	年淤积量 (t)或(m ³)	需冲沙量 (t)或(m ³)	需水量 (m ³)	防止海岸侵蚀需水量(10 ⁸ m ³)
最小	Q	(1/2)Q	$Q \cdot (2C_n)^{-1}$	0.23
适宜	Q	(1/1)Q	$Q \cdot (C_n)^{-1}$	0.46
最大	Q	(3/2)Q	$Q \cdot (2/3C_n)^{-1}$	0.69

4.2.9 浅海湿地生态环境需水量

河口生态系统是各种现象、过程等耦合叠加的区域，生态环境极为脆弱，因此浅海湿地生态环境需水量的相关数据获取较为困难，本文采用郑世武等(2009)^[29]计算的浅海湿地生态环境需水量（不含输沙）的最小、适宜、最大值，分别为 22.46 亿 m³、43.7 亿 m³、63.38 亿 m³。

4.3 湿地生态需水量总量

采取兼容性、加和性、最大值与整体性原则，计算研究区湿地生态需水总量（表 10）。其中，河流生态基流需水量、河流输沙需水量、河流自净需水量与防止海岸线侵蚀需水量、浅海生态环境需水量采取兼容取大值原则；其他不兼容各项采取加和原则，又考虑到降水补给（每年平均 554 mm）因素，则研究区湿地生态需水量的最小、适宜、最大值分别为 141.99 亿 m³、252.71 亿 m³、369.22 亿 m³。

表 10 研究区生态需水总量（单位：10⁸m³）

生态需水类型		最小	适宜	最大	分项总量
陆地生态环境需水量	植被需水量	4.63	5.31	5.77	27.53~39.94
	土壤需水量	16.7	19.0	21.7	
	生物栖息地需水量	0.65	1.67	2.94	
	补给地下水需水量	0.008	0.013	0.019	
非植被区蒸发需水量		5.54	7.82	9.51	
河流生态环境需水量	生态基流量	90.7	181.3	272.0	98.1~272.0
	河流基本需水量	98.08	134.86	196.16	
	输沙需水量	13.51	13.51	13.51	
滨海区生态环境需水量	防止海岸线侵蚀需水量	0.23	0.46	0.69	22.46~63.38
	近海生态环境需水量	22.46	43.70	63.38	
湿地需水总量（不包括降水）		148.09	258.81	375.32	
湿地需水总量（包括降水）		141.99	252.71	369.22	

5 结果分析

5.1 可靠性分析

因黄河利津站来水为研究区主要补给来源，故可分析其与研究区生态需水量关系。从黄河利津站 20 世纪 50 年代到 21 世纪初的来水量（表 11）可以看出，黄河利津站来水量从 20 世纪 50、60 年代到 2002 年是逐渐减少的。

从表 11 可知，其满足最大生态需水量（375.32 亿 m³）的年份主要集中在 50、60 年代，不能满足最小生态需水量的年份主要集中在 1991-2009 年，但 2003-2006 年黄河利津站来水量均能满足最小生态需水量，原因是 2002 年湿地调水调沙工程的实施。所以，按照最小、适宜和最大三个等级划分的生态需水量与黄河利津站来水量的多年平均状况一致，也就是说上述结果可以较好地反映研究区湿地生态系统现状，计算结果可靠。

表 11 黄河利津站来水量 (单位: 10^8m^3)

年份	年来水量
1951-1959	476.1
1960-1969	496.8
1970-1979	308.7
1980-1989	285.3
1990-1999	138.1
2000-2002	40.9
2003-2010	179.8

5.2 与湿地实际来水量对比分析

2002 年以来由于湿地调水调沙恢复工程的实施, 黄河利津站年来水量基本稳定 (平均为 183.17 亿 m^3), 故选用 2003-2010 年的黄河利津站来水量与上述计算结果进行对比分析。2003-2006 年利津站汛期平均含沙量为 15.24 kg/m^3 , 则需来水 402 亿 m^3 , 大于年均径流量 (197.48 亿 m^3), 因此, 2003-2006 年黄河利津站来水量不能够满足河流输沙平衡。又即使保护区 2007-2010 年河流输沙平衡, 虽然黄河利津站年均来水量能够满足研究区最小生态需水量, 但是不能满足其适宜和最大生态需水量, 分别缺少 27.6% 和 50.4%。

5.3 各功能生态需水量的对比分析

研究区湿地生态系统是由功能各异的生态系统耦合形成的, 故其在生态需水总量中所占的比例不同(表 12), 它们之间的关系也不同。总的来看, 研究区各功能生态需水中补给地下水需水量所占比重最小, 输沙需水量所占比重最大。

表 12 研究区各功能生态需水量占总需水量的比重

需水量	最小	适宜	最大	
陆地湿地生态需水量	植被需水量	0.0313	0.0205	0.0154
	土壤需水量	0.1128	0.0734	0.0578
	动物栖息地需水量	0.0044	0.0065	0.0078
	补给地下水需水量	0.0001	0.0001	0.0001
非植被区蒸发需水量	0.0374	0.0300	0.0252	
河流生态需水量	生态基流需水量	0.6125	0.7005	0.7247
	输沙需水量	0.6623	0.5211	0.5226
	自净需水量	0.0912	0.0522	0.0360
浅海湿地生态需水量	防止海岸线侵蚀需水量	0.00155	0.00178	0.00184
	近海生态环境需水量	0.1517	0.1688	0.1689

对于陆地湿地生态需水量而言, 植被需水量、土壤需水量、输沙需水量、自净需水量所占比重随需水等级的升高而减小, 表明这些功能需水量较为稳定; 动物栖息地需水量、生态基流量、防止海岸线侵蚀需水量、近海生态环境需水量所占比重随需水等级的升高而升高, 其中动物栖息地需水量所占比重增幅在 0.3% 左右, 可见在湿地生态系统稳定的情况下, 保护区动物丰富性有较大发展潜力; 防止海岸线侵蚀需水量变幅最小, 因此在保持河道输沙平衡的前提下, 防止海岸线侵蚀需水量变幅不大; 近海生态环境需水量的比重呈现先增加 1% 后增加 0.01% 的趋势, 可见浅海湿地有较大发展潜力, 但也应保持在合理的环境容量范围内。

对于河流生态需水量而言, 当保护区生态系统处于稳定发展状态时, 河道生态基流需水量最大, 河道自净需水量最小, 当保护区生态系统处于其不再退化状态时, 河流输沙需水量最大, 河道自净需水量最小。

对于浅海湿地生态需水而言, 防止海岸线侵蚀需水量小于近海生态环境需水量, 所以海岸线稳定并不一定能够促进近海生态环境的良好发展。

6 结论

以黄河三角洲自然保护区湿地为研究对象,通过对黄河三角洲自然保护区内河流湿地生态需水量、陆地湿地生态需水量以及浅海湿地生态需水量的等级计算,为黄河三角洲水资源的合理、有效利用及其可持续发展提供依据。本文主要研究内容及成果如下:

1) 根据研究区湿地生态系统功能的差异性,将其划分为陆地湿地生态系统、河流湿地生态系统和浅海湿地生态系统三部分,并建立黄河三角洲自然保护区湿地生态需水量的计算模型,计算各功能需水量。

2) 黄河三角洲自然保护区最小、适宜、最大生态需水量分别为 141.99 亿 m^3 、252.71 亿 m^3 、369.22 亿 m^3 。2002 年以来在合理、有效的调水调沙工程下,黄河利津站来水量仅能满足其最小生态需水量,不能满足其适宜和最大生态需水量,分别缺少 27.6%和 50.4%。因此,研究区湿地生态系统处于不安全状态,有必要采取恢复措施。

3)各功能需水量中,植被需水量、土壤需水量、输沙需水量、自净需水量较为稳定;动物栖息地需水量、河流生态基流需水量、防止海岸线侵蚀需水量、近海生态环境需水量仍有较大发展潜力。

REFERENCES

- [1] G. W. Armentrout, J. F. Wilson. "An Assessment of Low Flows in Streams in Northeastern Wyoming." Report Published by United States Geological Survey. 1987.
- [2] G. E. Petts. "Water Allocation to Protect River Ecosystems." Regulated Rivers: Research & Management. 1996. doi: 10.1002/(SICI)1099-1646(199607)12:4/5<353::AID-RRR425>3.0.CO;2-6
- [3] P. H. Gleick. "Water in Crisis: Paths to Sustainable Water Use." Ecological Applications. 1998.
- [4] J. W. Male, H. Ogawa. "Tradeoffs in Water Quality Management." Journal of Water Resources Planning and Management. 1984.
- [5] P. H. Gleick. "The World's Water 2000-2001: The Biennial Report on Freshwater Resource." Washington DC, USA, Island Press. 1998.
- [6] P. H. Gleick. "The Changing Water Paradigm: A Look at Twenty-first Century Water Resource Development." Water International. 2000. doi:10.1080/02508060008686804
- [7] Zhifeng Yang, Baoshan Cui, Jingling Liu. Ecological Water Demand Theory, Methods and Practice[M] Beijing: Science Press, 2003
- [8] P. D. Rashin, E. Hansen, R. M. Margolis. "Water and Sustainability." Natural Researches Forum. 1996. doi: 10.1111/j.1477-8947.1996.tb00629.x
- [9] P. Keddy. "Wetland Restoration: The Potential for Assembly Rules in the Service of Conservation." Wetlands. 1999. doi:10.1007/BF03161780
- [10] M. T. Casanova, M. A. Brock. "How to Depth, Duration and Frequency of Flooding Influence the Establishment of Wetland Plant Communities?." Plant Ecology. 2000. doi: 10.1023/A:1009875226637
- [11] W. A. Mawhinney. "Restoring Biodiversity in the Gwydir Wetlands Through Environmental Flows." Water Science & Technology. 2003.
- [12] J. Roberts, B. Young, F. Marston. "Estimating the Water Requirements for Plants of Floodplain Wetlands: A Guide." Canberra, Australia, Land and Water Resources Research & Development Corporation. 2000.
- [13] D. Eamus, T. Hatton, P. Cook, et al. "Ecohydrology: Vegetation Function, Water and Resource Management." Melbourne, Australia, CSIRO Publishing. 2006.
- [14] S. J. Powell, R. A. Letcher, B. F. W. Croke. "Modelling Floodplain Inundation for Environmental Flows: Gwydir Wetlands." Ecological Modelling. 2008. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.09.013
- [15] V. U. Smakhtin. "Low Flow Hydrology: A Review." Journal of Hydrology. 2001. doi:10.1016/S0022-1694(00)00340-1
- [16] A. Gustard, L. A. Roald, S. Demuth, et al. "Flow Regimes from Experimental and Network Data (FRIEND)." Volume II:

Hydrological Data. IAHS Press. 1989.

- [17] A. Gustard, R. Gross. "Low Flow Regimes of Northern and Western Europe." IAHS-AISH publication 187 (1989): 205-212.
- [18] D.A. Hughes, D. Louw. "Integrating Hydrology, Hydraulics and Ecological Response into a Flexible Approach to the Determination of Environmental Water Requirements for Rivers." *Environmental Modelling & Software*. 2010. doi:10.1016/j.envsoft.2010.03.004
- [19] M. T. Casanova. "Using Water Plant Functional Groups to Investigate Environmental Water Requirements." *Freshwater Biology*. 2011. doi: 10.1111/j.1365-2427.2011.02680.x
- [20] A. Shokoohia, M. Amini. "Introducing a New Method to Determine Rivers'ecological Water Requirement in Comparison with Hydrological and Hydraulic Methods." *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2014. doi:10.1007/s13762-013-0404-z
- [21] Baoshan Cui, Zhifeng Yang. Water consumption for eco-environmental aspect on wetlands [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(2): 219-224.
- [22] Baoshan Cui , Zhifeng Yang .The Classification and Case Study on Eco-environmental Water Requirement of Wetlands [J]. *Resources Science*, 2003, 25(1): 21-28.
- [23] Zhong Ping, Yang Zhifeng, Cui Baoshan, et al. Baiyangdian wetland ecological water demand for environmental research [J]. *Environmental Science*, 2005, 25(8): 1119- 1126.
- [24] Yun Tang, Hao Wang, Denghua Yan. Wetland Ecological Water Demand in Xianghai Natural Reserve[J]. *Environmental Science*, 2005, 27(5): 101-106.
- [25] Baoshan Cui, Yinghua Li, Zhifeng Yang. Management-oriented Ecological Water Requirement for Wetlands in the Yellow River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 606-614.
- [26] Changchun Zhang, Guangqian Wang, Jiahua Wei. Study on Water Requirements in Yellow River Delta Based on Remote Sensing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 149-152.
- [27] Xiaowei Gu. Study on Ecological Water Requirement of Freshwater Wetland in Yellow River Delta Natural Conservation Area Based on SOBEK Model[D].Nanjing: Hohai University, 2007. 6. 5.
- [28] Ge Xi, Shaomin Liu, Li Jia. Stimulation of Regional Evapotranspiration and Ecological water Requirement of Vegetation by Remote sensing in the Yellow River Delta Wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5356-5369.
- [29] Shiwu Zheng. Study of Eco-environmental Water Requirements in the Yellow River Delta[D]. Ocean University of China, 2009. 2.
- [30] Jianfeng Li, Qiang Zhang, Xiaohong Chen, et al. Study of Ecological Instream Flow in Yellow River, Considering the Hydrological Change[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 66(1): 99-110.
- [31] Tuoye Qi, Wenbao Mi, Kaiyang, et al. The Quantities of Ecological Water Requirement for Wetland in the Arid Region- Illustrated by the Case of Yehai Wetland in Yinchuan City[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(3): 76-82.
- [32] Li Ouyang, Chisi Zhuge, Shiyi Wen, et al. Research and Application of Instream Ecological Water Requirement Based on Fish Biomass Method[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(4): 72-77.
- [33] Huanhuan Cheng, Biyu Rao. Review of Eco-environmental Water Demand[J]. *Water Resources Protection*, 2006, 22(3): 43.
- [34] Baoshan Cui, Xingtu Liu. Ecological Character Changes and Sustainability Management of Wetlands in the Yellow River Delta[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(3): 251-255.
- [35] Ruiling Wang, Michiel van Eupen, Xingong Wang, et al. Vegetation Succession of wetland in the Yellow River Delta Based on LEDESS model[A] *Proceedings of the Third International Yellow River Forum*. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2007: 275-288
- [36] Yuan Zhang. Research on the Ecological and Environmental Water Requirements of the Highland and River Channel in the Yellow River Basin[D]. Beijing: Beijing Normal University Institute of Environmental Science, 2003: 1-200.

- [37] Yean Zhao, Xiandi Pan, Yong Li, et al. A preliminary study of the Yellow River sediment water. [C] Scientific papers (Episode IV). Beijing: China Environmental Science Press, 1993: 110-116. delman, Rachel. "Such Stuff as Dreams Are Made On": God's Footstool in the Aramaic Targumim and Midrashic Tradition." Paper presented at the annual meeting for the Society of Biblical Literature, New Orleans, Louisiana, November 21-24, 2009

【作者简介】



¹韩美（1963-），女，汉族，博士学位，教授，博士生导师，研究方向有环境演变与灾害、湿地演化与湿地生态评价、水资源评价与水资源优化配置、生态规划与环境影响评价等，学习经历：1981-1985年就读于山东师范大学；

1985-1988年就读于山东师范大学；2010-2012年就读于山东大学。Email: hanmei568568@126.com

²杨晓妍（1986-），女，汉族，硕士学位，研究方向为湿地演化与湿地生态评价和学科教学，学习经历：2005-2009年就读于忻州师范学院；2009-2012年就读于山东师范大学。

Email: 549662302@qq.com

³史丽华（1990-），女，汉族，硕士研究生，研究方向是区域环境演变与可持续发展，学习经历：2008-2011年就读于淄博师范高等专科学校；2011-2013年就读于临沂大学；2013年至今就读于山东师范大学。

Email: shilihua30@163.com