

DOI: 10.5846/stxb201305141053

孔东升, 张灏. 张掖黑河湿地自然保护区生态服务功能价值评估. 生态学报, 2015, 35(4): 972-983.

Kong D S, Zhang H. Economic value of wetland ecosystem services in the Heihe National Nature Reserve of Zhangye. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 972-983.

张掖黑河湿地自然保护区生态服务功能价值评估

孔东升^{1,*}, 张 灏²

1 河西学院, 张掖 734000

2 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070

摘要: 张掖黑河湿地国家级自然保护区地处内陆干旱区, 是西北典型的内陆河流湿地生态系统, 具有多种重要的生态服务功能。通过野外调查和实验室分析, 借助市场价值法、碳税法、影子工程法、生态价值法、旅行费用法等生态服务功能评估方法, 对研究区湿地的各项生态功能进行了价值估算。结果表明, 黑河湿地自然保护区生态服务功能总价值约为 32.89×10^8 元, 其中各生态服务功能的价值量依次为: 调蓄洪水功能 > 湿地固碳释氧功能 > 旅游休闲功能 > 提供水源功能 > 气候调节功能 > 物质生产功能 > 生物栖息地功能 > 科研教育价值功能 > 降解污染物功能。直观的货币价值突显了保护区湿地对区域经济发展的重要性, 同时也为我国湿地生态系统的保护和管理提供科学的理论依据。

关键词: 生态服务功能; 价值评估; 直接利用价值; 间接利用价值; 黑河湿地自然保护区

Economic value of wetland ecosystem services in the Heihe National Nature Reserve of Zhangye

KONG Dongsheng^{1,*}, ZHANG Hao²

1 Hexi University, Zhangye 734000, China

2 College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Wetland is one of the most important ecosystems on earth. They provide a wide variety of ecological services, including nutrient cycling, carbon storage, flood reduction, provisioning of habitats for wildlife as well as ensuring water supply, food security and livelihoods for people living in developing countries. The aim of this paper is to better understand the economic value of wetland and the services it provides to humanity and to offer a basis for policy and decision making and sustainable development. We take the wetland in the National Nature Reserve located at the Heihe River basin as a case study and collect data from field investigation. We assess the direct ecological service values (ESVs), i.e. biological production and industrial raw material, and indirect ESVs including climate regulation, flood adjustment, water supply, pollutants degradation, habitats providing, carbon sequestration and oxygen release and the value of recreation and culture, of the wetland ecosystem, using some mathematic and economic methods, such as market value method, the shadow engineering method, carbon tax method, ecological method and travel cost method. Results from this study showed that: wetlands in the Heihe Reserve which cover an area of 41164.56 hm^2 , are divided into natural and constructed wetlands, including river wetland, swamp wetland, lake wetland, aquaculture pond, irrigated land, water reserve, and salt pan and so on, 13 categories in total. The average ESV of the wetland ecosystem in the Heihe reserve was about 3 289 million Yuan per year. Of the total ESV, the annual value of flood adjustment was 1086 million Yuan, followed by the value of carbon

基金项目: 甘肃省科技支撑计划项目(1104FKCG160)

收稿日期: 2013-05-14; 网络出版日期: 2014-04-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kongdsh@sohu.com

sequestration and oxygen release being 673 million Yuan. The annual values of recreation, water supply, climate regulation, habitats provisioning, culture and pollutant degradation are 420, 380, 329, 101, 97 and 25 million Yuan, respectively. The direct ESV of the wetland ecosystem, namely industrial raw material production, is 178 million Yuan per year, which account for 5.4% of the total ESV. The results indicated that the ESVs of wetland is huge and indirect value is substantially greater than the direct value, which suggests that we should attach great importance to the significance of wetland's ecosystem service functions in ecological construction practices in river basin in desert area of China. We expect our study could help to cover the shortage of enough knowledge of service value of wetland ecosystem in arid regions thereby promoting the exclusion of blind development, irrational utilization and severely damage of the ecological environment, and achieve sustainable regional development.

Key Words: ecological system; ecosystem services; indirect use values; direct use values; the Heihe Wetland Nature Reserve

湿地独特而又富有生命力的生态系统^[1-2]具有多重服务功能,潜藏着巨大的效益,包括物质生产、气候调节、固碳、调洪蓄水、提供水源、降解污染物、生物栖息、教育科研、旅游休闲等主要生态功能^[3-5]。1997年, Costanza^[6]等对全球生态系统服务价值的估算约为 33×10^{12} 美元,是全球 GDP 的 1.8—2 倍,其中仅占陆地面积 6% 的湿地,生态服务价值高达 5×10^{12} 美元,这一发现使得国内外学者掀起了生态服务价值研究的热潮。Turner R · Kerry^[7]等提出了湿地生态经济分析的框架, Richard^[8]等系统总结了湿地生态系统服务功能的价值评价方法及案例。陈仲新^[9]对中国的生态服务总经济价值估算为 7.8×10^{12} 元,是国民生产总值的 1.73 倍,显示出生态服务功能对社会发展的重大作用。王伟^[10]对温州三垟城市湿地的生态服务功能价值进行深入的分析;赵同谦^[11]全面的研究了中国湿地生态系统服务功能及其价值;张晓慧^[12]等对黄河三角洲湿地、王凤珍^[13]等对武汉市严东湖城郊过渡带湖泊湿地、谢正宇^[14]等对艾比湖湿地自然保护区、张天华^[15]对西藏拉萨拉鲁等湿地进行了生态服务功能的价值评估,这些研究结果突显了湿地生态功能的作用和巨大经济价值。

张掖黑河湿地国家级自然保护区是 2010 年由国务院批准成立的,属于典型的干旱半干旱区内陆湿地生态系统,是全球八条候鸟迁徙的中亚—印度通道的重要中转站,是河西走廊甚至西北地区重要的生态屏障,也是黑河中下游重要的水源涵养地,有着十分重要的生态安全战略地位。许多文献^[16-18]对黑河湿地的生态效益开展了定性描述,但以定量的货币形式的研究还没有文献报道。本文参考国内外湿地生态服务价值研究的理论和方法,通过野外调查和实验室分析,对其生态服务功能价值进行了全面、定量的货币化估算,研究结果将有助于人们更加直观地认识到黑河湿地保护区的环境效益和生态功能及其对区域经济发展的重要性,同时也为湿地生态系统的保护和管理提供科学的理论依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

黑河湿地国家级自然保护区位于甘肃河西走廊中部的张掖市中北部,区划范围在甘州区、临泽县、高台县境内,地理坐标为 $99^{\circ}17'24''$ — $100^{\circ}30'15''E$, $38^{\circ}56'39''$ — $39^{\circ}52'30''N$,总面积 41164.56 hm^2 ,主要包括黑河流域中游干流分布的湿地(图 1)。

按照我国湿地类型划分标准,该保护区湿地主要包括天然湿地和人工湿地 2 个大类 13 个类别^[16](表 1)。

1.2 研究方法

1.2.1 数据资料来源

湿地类型、面积数据来源于张掖市黑河流域湿地调查;气象数据由张掖市气象局提供;计算中引用的各种参数均源于张掖市年鉴、物价局、参考文献及 2012 年野外调查及实验室测定数据。所得数据利用 Excel2003 软件进行处理,并对结果进行统计分析。

1.2.2 野外调查及样品测定

生物量调查和土壤样品是研究组 2012 年 10 月,采用 GPS 定位,分别在甘州区、临泽县和高台县的典型湿地选择 3 个样带,8 条样线,平行样线之间的距离为 200 m,长度 1.1 km,样线每隔 100 m 布设一个 1 m×1 m 的草本样方或 10 m×10 m 的灌木样方,开展土壤和植被调查。其中,植被调查地上和地下生物量,地上生物量采用剪草法和割灌法取样,地下生物量采用土钻法分层取样、洗根,草本取根 3 层(地下 0—10、10—20、20—40 cm),灌木取根 5 层(地下 0—10、10—20、20—40、40—60、60—100 cm),生物量均采用烘干法测试^[19];土壤取样 3 层(地下 0—10、10—20、20—40 cm),土壤含水量采用烘干法测试,土壤有机碳采用重铬酸钾容量法测试^[20]。

土壤碳密度 $C(\text{kg}/\text{m}^2)$ 的计算公式为^[21]:

$$C = C_d \times H \times B \tag{1}$$

式中, C_d 为有机碳含量(g/kg); H 为土壤厚度,取 40 cm; B 为土壤容重。

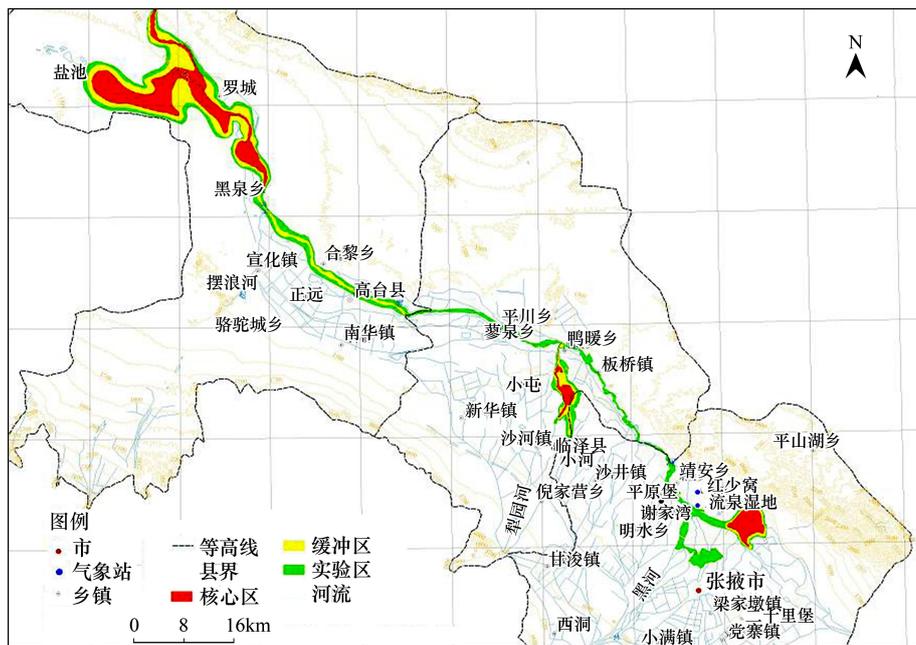


图 1 张掖黑河湿地国家级自然保护区规划图

Fig.1 Heihe wetland national nature reserve layout area of Zhangye

表 1 张掖黑河湿地国家级自然保护区湿地类型、面积

Table 1 Statistics of wetland types and areas in Heihe wetland national nature reserve of Zhangye

	湿地类型 Wetland types	面积/ hm^2 Area	占保护区比例/% The area ratio of reserve
天然湿地 Natural wetlands	河流湿地	13113.00	31.86
	沼泽湿地	10833.00	26.32
	湖泊湿地	645.00	1.57
	其它湿地(河滩、沙地、盐碱滩等)	7207.56	17.50
人工湿地 Constructed wetlands	盐田	2580.00	6.27
	灌溉地	3060.00	7.43
	水产池塘	73.00	0.17
	蓄水区	3653.00	8.87
合计 Total		41164.56	

数据来源于 2010 年张掖市黑河流域湿地管理局

湿地土壤总固碳量(SOC,kg)的计算公式^[22]:

$$SOC = \sum_{i=1}^n CS_i \quad (2)$$

式中, S_i 是*i*类湿地土壤类型的分布面积(hm^2)。

1.2.3 各生态功能采用的评估方法

针对黑河湿地自然保护区生态服务功能的特点,本研究采用了不同的评价方法对保护区主要的生态服务功能进行综合的货币化评价(表2)。同时,在研究过程中结合保护区客观情况,对相关公式的参数进行了修正。

表2 研究区湿地生态服务功能的评价方法

Table 2 The evaluation method of wetland ecosystem service in study area

生态服务功能 Ecological service function	选取的评价方法 Selection of evaluation methods
物质生产功能 Material production function	市场价值法 ^[12]
气候调节功能 Climate regulation function	成果参数法及市场价值法
提供水源功能 Water supplies function	市场价值法
调蓄洪水功能 Adjusting flood function	影子工程法 ^[11]
降解污染物功能 Pollutant degradation function	影子工程法,市场价值法
生物栖息地功能 Wildlife habitats function	生态价值法 ^[23] 及防护费用法
固碳释氧功能 Carbon fixation and oxygen release function	碳税法 ^[14] ,市场价值法
教育科研功能 Scientific research function	专家调查法及市场价值法
旅游休闲功能 Entertainment function	旅行费用法 ^[13]

(1) 市场价值法^[12]

$$V = \sum_{i=1}^n P_i \times Q_i \quad (3)$$

式中, V 为物质产品价值; Q_i 为第*i*类物质产量; P_i 为第*i*类物质市场价格, n 为湿地物质产品类型的数目。

(2) 影子工程法

$$Q_i = V_i \times t \quad (4)$$

式中, Q_i 代表调蓄洪水的价值; V_i 代表湿地调水量; t 取5.714元^[11],代表建设1 m³库容投入的平均成本(参照全国水库建设投资额计算)。

(3) 旅行费用法

即为旅游者费用支出的总和,包括游客在湿地游览中所支出的交通费、饮食费、门票、住宿费和旅行时间价值等^[13]。

(4) 碳税法

$$Y = \sum_{i=1}^n W_i A \quad (5)$$

式中, Y 为固碳价值量(元); W_i 为总固碳量(t/a); A 为碳税率(本文采用国际通用的瑞典碳税率150 \$/t,即1242元/t)^[14]; i 为不同类型湿地。

(5) 生态价值法^[23]

$$k = 1 / (1 + e^{-t}) \quad (6)$$

式中, k 为社会发展阶段系数; e 为自然对数的底; t 为 T 减去3(T 为恩格尔系数的倒数;恩格尔系数(En)是指食品消费占个人或家庭总消费的百分比, $En > 60\%$ 为贫困、 $50\% < En < 60\%$ 为温饱、 $30\% < En < 50\%$ 为小康、 $20\% < En < 30\%$ 为富裕、 $En < 20\%$ 为极富)。

(6) 估算保护区湿地气候调节功能价值,采用成果参数法

根据王继国的研究方法^[24],通过植物生物量、蒸腾系数及水面蒸发量,测算出保护区湿地生态系统中水汽蒸发和植被蒸腾的总量,再以 Costanza 的研究结果为参照,结合研究区的客观环境条件,对结果数值进行适当的修正,提出以下数学计算模型:

$$V = A \cdot P_i \cdot (WE + WT) \quad (7)$$

式中, V 表示黑河湿地保护区气候调节功能价值; P_i 取 0.02 美元/ m^3 ,表示单位体积水汽通过蒸腾作用调节气候的价值,参照 2012 年美元兑人民币 1:6.46 的汇率,折合人民币 0.129 元/ m^3 ; WE 表示保护区湿地水汽蒸发量, WT 表示保护区湿地植被水汽蒸腾量, WE 和 WT 越大,说明单位体积水汽调节气候的作用越大,即对区域气温和降水作用增强; A 取 10.6,为校正系数,即研究区域与地带性林区干旱指数的比值,根据刘巽浩的研究^[25],森林通常分布在干旱指数小于 1.5 的地方,而研究区的干旱指数为 15.87,因此,黑河流域湿地的干旱指数是地带性林区的 10.6 倍。

2 结果与分析

2.1 物质生产价值

据研究组调查统计,保护区湿地可作为造纸生产原料的芦苇(*Phragmites australis*)面积达 2067 hm^2 ,平均产量为 73.4 t/hm^2 ,芦苇年产量为 151717.8 t 。此外,保护区湿地主要的物质产品还包括:人工养殖鱼类和企业生产盐类。参照公式(3)得出物质生产价值为 1.78×10^8 元(表 3)。

表 3 黑河湿地自然保护区物质生产价值表

Table 3 Material production value of Heihe wetland national nature reserve

物质产品 Material products	总产量/ t Total output	市场价格/(元/ t) Market price	总产值/($\times 10^4$ 元) Total value
芦苇 Reed	151717.80	600.00	9103.10
鱼类 Fish	1858.20	12000.00	2229.80
盐及芒硝 Salt and Mirabilite	144308.00	448.00	6465.00
合计 Total			17797.90

2.2 气候调节功能价值

保护区湿地气候调节功能价值包括研究区水汽蒸发量和湿地植被蒸腾量的总价值。

(1) 保护区湿地年水汽蒸发量

研究区湿地水汽蒸发主要集中在河流湿地、湖泊湿地及人工湿地蓄水区的自由水面蒸发量。根据陈文雄的研究^[26],得出保护区黑河流域多年平均水面蒸发能力为 1532 mm ,由于蒸发器测得的蒸发量要比河流湖泊等实际水体的蒸发量大,必须乘以一个折减系数方能得到天然水体的蒸发量,采用其折减系数 0.8,得到保护区水面蒸发能力为 1226 mm 。据表 1 统计显示,保护区内河流湿地、湖泊湿地及人工蓄水区面积为 1.74×10^4 hm^2 ,因此,保护区年水汽蒸发量为 2.13×10^8 m^3 。

(2) 沼泽湿地植被蒸腾量

沼泽湿地是保护区湿地的主要类型之一,以芦苇和苔草(*Carex tristachya*)为主要植被类型。调查数据显示:芦苇盖度为 70%—100%,苔草盖度为 30%—40%,且散生于浅水处。因此该类型的蒸发量主要以芦苇的植被蒸腾量为典型。在实测样方中,选取 18 个典型的芦苇、苔草样方计算生物量(表 4),得出研究区域芦苇的地上生物量平均为 349.38 g/m^2 ,即 3.5 t/hm^2 (干重),因此,研究区沼泽湿地芦苇的平均年产量(干重)为 3.78×10^4 t 。

研究区湿地芦苇的年产量与其平均蒸腾系数之积,即为研究区沼泽湿地生态系统年水汽蒸腾量。根据苏雨洁的研究^[27],按芦苇的全部生物量计算,其蒸腾系数平均为 372,则保护区沼泽湿地的植被蒸腾量为 1.41×10^7 m^3 。

表 4 张掖黑河湿地自然保护区芦苇生物量统计表

Table 4 The reed biomass of Heihe wetland national nature reserve

地区\样方 Area\ Quadrat	1	2	3	4	5	6	平均/(g/m ²) Average
甘州区	342.50	275.25	421.75	237.50	467.75	153.25	316.33
临泽县	238.50	231.75	984.50	458.50	377.75	543.01	472.33
高台县	327.25	247.75	280.03	195.25	167.50	339.04	259.46
平均 Average/(g/m ²)							349.38

(3) 其它湿地类型的水汽蒸发量

在保护区湿地类型中,以河滩、沙地、盐碱滩为主的其它湿地面积也相当可观,这部分湿地的水汽蒸发量按无植被覆盖区的潜水蒸发量来计算。根据王根绪的研究参数^[28]得到其蒸发量(表 5)。

表 5 黑河湿地自然保护区其它类型水汽蒸发量计算表

Table 5 Calculated evaporation capacity of others in Heihe wetland national nature reserve

湿地类型 Wetland	参数标准 Parameter standard	平均蒸发强度/(mm/a) The average intensity of evaporation	面积/hm ² Area	蒸发量/(10 ⁴ m ³ /a) Evaporation capacity
其他湿地 Other type wetlands	无植被覆盖潜水蒸发量	73.85	7207.56	532.28
盐田 Salt fields	荒区平均蒸发量	229.47	2580.00	592.03
灌溉地 Irrigated lands	灌区平均蒸发量	73.00	3060.00	223.38
合计 Total				1347.69

通过湿地的样方调查、实验测试及参数推算,得到黑河湿地保护区年水汽蒸发量、沼泽湿地的植被蒸腾量以及其它类型湿地的潜水蒸发量为 $2.41 \times 10^8 \text{ m}^3$,将上述数值代入(7)式中,得到保护区湿地气候调节功能价值约为 3.29×10^8 元。

2.3 调蓄洪水功能价值

保护区湿地调蓄洪水功能价值包括河流湿地、沼泽湿地、湖泊湿地、其它类型湿地调蓄洪水价值以及研究去内水库蓄水价值之和。评估采用影子工程法进行计算。

(1) 河流湿地调洪蓄水价值

河流湿地是保护区流域的主要湿地类型,也是区域的汇水中心,其面积为 $1.31 \times 10^4 \text{ hm}^2$,区内水资源较为丰富,主要接纳黑河上游来水。据水文站观测,黑河莺落峡 2005—2010 年平均年径流量为 $19.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ (数据来源于张掖市水务局)。根据刘文等人研究^[29],蓄水的平均价值量取 0.1 元/m^3 ,计算得出保护区河流湿地调洪蓄水价值量约为 1.92×10^8 元。

(2) 沼泽湿地调洪蓄水价值

沼泽湿地是保护区主要湿地类型之一,面积 $1.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$,以芦苇和苔草为主要植被类型,土壤质地以粘土、亚粘土为主,为蓄水提供了良好的环境。根据孟宪民的研究,每 1 hm^2 沼泽湿地能饱和蓄水 8100 m^3 ^[30],得出保护区沼泽湿地总蓄水量约为 $0.89 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。湿地生态系统蓄水功能与水库的作用非常相似,用影子工程法进行计算,将数值代入公式(4)得出:

$$\text{沼泽湿地调洪蓄水的价值量} = 0.89 \times 10^8 (\text{m}^3) \times 5.714 (\text{元}/\text{m}^3) = 5.09 \times 10^8 (\text{元})$$

(3) 湖泊湿地调洪蓄水价值

保护区湖泊较浅,面积为 $0.065 \times 10^4 \text{ hm}^2$,且大小不一,平均水深 1.4 m,保护区湖泊湿地蓄水量约为 $0.091 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。将数值代入公式(4)得到:

$$\text{湖泊湿地调洪蓄水功能价值} = 0.091 \times 10^4 (\text{m}^3) \times 5.714 (\text{元}/\text{m}^3) = 0.000052 \times 10^8 (\text{元})$$

(4) 其它类型湿地调洪蓄水价值

其它类型的湿地面积为 $0.72 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 主要包括河滩、盐碱滩等, 由于土壤质地及结构与沼泽湿地不同, 其土壤蓄水能力也有很大差异, 因此, 按照区域实测的平均含水量 28.6% 进行估算(表 6), 地下水位平均埋深为 1.97 m, 其它类型湿地的蓄水量为 $0.41 \times 10^8 \text{ m}^3$, 代入公式(4)得出, 其调洪蓄水功能价值为 2.34×10^8 元。

表 6 黑河湿地国家级自然保护区土壤含水量/%

Table 6 The soil moisture content in Heihe wetland nature reserve

样带 Belt transect	样方 Quadrat(0—40 cm)												平均 Average
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
甘州区	72.0	30.1	19.4	17.2	28.3	43.9	40.9	42.5	40.6	34.6	58.3	42.3	39.2
临泽县	25.1	20.7	12.5	12.7	10.5	14.6	22.3	21.1	22.0	20.3	21.2	20.7	18.6
高台县	23.5	26.0	29.4	27.6	21.8	28.9	29.4	28.6	47.1	26.2	22.8	26.2	28.1
平均 Average	40.2	25.6	20.4	19.2	20.2	29.1	30.8	30.7	36.5	27.0	34.1	29.7	28.6

2012 年研究组实测数据

(5) 水库调洪蓄水价值

黑河湿地自然保护区现有库容百万以上的小型水库有 9 座, 库容百万以下的水库有 12 座, 水库总蓄水量为 $2943 \times 10^4 \text{ m}^3$, 有效库容为 $2640 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。代入公式(4)得出:

$$\text{水库的调洪蓄水价值} = 2640 \times 10^4 (\text{m}^3) \times 5.714 (\text{元}) = 1.51 \times 10^8 (\text{元})$$

综上所述, 研究区内湿地调洪蓄水总价值为 10.86×10^8 元。

2.4 提供水源功能价值

保护区湿地提供水源的功能价值即: 湿地为中游地区提供的农业、工业、生活、生态用水及下游生态分水总量的货币价值。其中, 黑河中游和下游水资源分配是 1999 年国务院批复实施“黑河流域综合治理工程”时提出的黑河干流省际分水方案, 农业、工业、生活、生态用水为当地实际用量。根据 2010 年当地各种用水类型的成本价格, 得出其提供水源的价值量(表 7), 其中, 下游生态分水按农业用水的成本价格 0.071 元/ m^3 计算, 得出研究区的供水总价值为 3.8×10^8 元。

表 7 黑河湿地国家级自然保护区湿地提供水源价值表

Table 7 Values of water supplies function in Heihe wetland nature reserve

用水类型 Water supplies	年均用水量/ (10^8 m^3) Average water consumption	成本价格/(元/ m^3) Cost price	供水价值量/ (10^8 元) Water supplies value
农业用水 Agricultural water	20.59	0.071	1.46
工业用水 Industrial water	0.65	1.200	0.78
生活用水 Domestic water	0.62	1.200	0.74
生态用水 Ecological water	2.24	0.071	0.16
下游分水 Downstream water	9.02	0.071	0.64
合计 Total			3.80

价格数据来源于张掖市物价局和张掖市统计年鉴

2.5 降解污染物功能价值

降解污染物价值是根据当地污水处理厂处理污水的费用来估算。根据张掖市污水处理厂统计, 现甘州区每天处理污水 $3.8 \times 10^4 \text{ t}$, 甘州区城市人口为 20×10^4 人, 则人均的生活污水量为 $0.19 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由于流入湿地的未经处理的生活污水和工业污水量难以计数, 加之 2003 年污水处理厂建成以前, 研究区内污水均为湿地天然净化处理, 因此, 按照当时区域城镇人口数量来估算向研究区内排放污水的总量。据 2003 年张掖市年鉴统计, 甘州区、临泽县和高台县的人口总数为 79.65×10^4 人, 城镇化水平为 30.9%, 城镇人口共计 24.6×10^4 人。由此推算, 全年生活污水的排放量为 $1706 \times 10^4 \text{ t}$ 。同时, 2003 年工业污水量为 $1385 \times 10^4 \text{ t}$, 则区域全年的污水总量为 $3091 \times 10^4 \text{ t}$ 。目前, 张掖污水处理厂处理污水的平均成本为 0.8 元/t, 运用替代法将污水处理的花费代替湿地净化功能的单位价值, 则湿地降解污染物功能价值为 0.24728×10^8 元。

2.6 生物栖息地功能价值

保护区内基本建设和湿地恢复的国家投资项目经费可作为其生物栖息地功能的基础价值。根据张掖湿

地局提供的资料,统计出自保护区 2010 年成立以来,区内国家投资的基本建设及湿地生态恢复工程项目资金总额为 5360×10^4 元。然而,该值并不能完全代表生物栖息地真正的生态价值,因此需要运用生态价值法对该数值进行修正。

根据张掖市 2011 年国民经济和社会发展统计公报,张掖市居民家庭的恩格尔系数为 0.32,处于小康阶段。自然保护区生态价值也采用该值,代入公式(6),则得出保护区发展阶段系数为 0.53。即受人们支付水平限制,当前基本投资额只占生物栖息总价值的 53%,因此研究区湿地生物栖息地功能的总价值为 1.01×10^8 元。

2.7 湿地固碳释氧价值

研究湿地的固碳价值主要包括区域内湿地植被的固碳量和土壤固碳量两部分,采用碳税法进行计算。根据实际的样方调查,得出各类型湿地植被固碳量(表 8)。

表 8 黑河湿地自然保护区不同湿地类型植被生物量及固碳量

Table 8 Standing biomass and carbon storage of different wetland types in Heihe national nature reserve

湿地类型 Wetland types	面积/hm ² Area	生物量/(t/hm ²) biomass		单位面积生物 量/(t/hm ²) Biomass per unit area	各湿地类型总 生物量/(t/a) Biomass of every type wetland	总固碳量/(t/a) Total carbon sequestration
		地上部分 Aboveground part	地下部分 Underground part			
河流、沼泽湿地 Riverine and marsh wetlands	23946.00	4.30	17.05	21.35	511247.10	224948.72
湖泊湿地 Lake wetlands	645.00	1.95	11.99	13.94	8991.30	3956.17
其他类型湿地 Other type wetlands	7207.56	2.16	10.92	13.08	94274.90	41480.96
合计 Total						270385.85

保护区湿地的土壤类型以盐化沼泽土为主,局部为灰棕荒漠土、盐化草甸土及灰钙土等。参照实验测试分析,得出不同湿地类型的土壤有机碳含量,代入公式(1),得出不同土壤类型的碳密度(表 9)。

表 9 黑河湿地自然保护区不同湿地类型土壤有机碳含量(C_d)和土壤碳密度(C)

Table 9 Carbon storage of different wetland types in Heihe national nature reserve

样方 Quadrat (0—40 cm)	沼泽/ (g/kg) Marsh	河流/(g/kg) Riverine	湖泊/(g/kg) Lake	其他湿地、灌溉地/(g/kg) Other type wetlands and irrigated lands
1	1.551	1.626	1.564	1.793
2	1.850	2.036	1.875	3.557
3	2.180	2.337	3.164	3.510
4	2.780	2.959	1.784	3.752
5	3.905	2.659	2.327	1.637
6	2.064	1.619	2.190	2.028
7	2.158	2.548	1.687	2.149
8	2.132	2.032	2.094	2.966
9	2.712	1.735	1.528	1.432
10	1.761	2.129	1.627	2.679
11	2.148	1.196	2.251	1.944
12	3.411	1.639	3.483	1.896
土壤有机碳含量/(g/kg) Soil organic carbon content	2.215	2.131	3.205	0.842
土壤碳密度/(kg/m ²) Soil carbon density	1.040	1.000	1.500	0.390

经研究区域 8 条样线土壤物理特性的测定显示,土壤容重的变化在 0.61—1.82 g/cm³,平均值取 1.17 g/cm³,同时参照不同类型土壤的碳密度,代入公式(2),得到保护区湿地土壤总固碳量(表 10)。其中,蓄水区及水产池塘的碳密度参照该类型的固碳速率进行计算^[30]。则研究区湿地植被和土壤的固碳总量为 596412.44 t,代入碳税公式(5)得出,黑河湿地自然保护区固碳总价值为 7.41×10⁸元。

表 10 黑河湿地自然保护区不同湿地类型土壤固碳量

Table 10 Carbon storage of different wetland types in Heihe national nature reserve

湿地土壤类型 Wetland soil types	面积/hm ² Area	碳密度 C/(t/hm ²) Fixing carbon rate	固碳量/t Total carbon sequestration
河流 Riverine	13113.00	10.00	131130.00
沼泽 Marsh	10833.00	10.40	112663.20
湖泊 Lake	645.00	15.00	9675.00
其他湿地及灌溉地 Other type wetlands and irrigated lands	10267.56	3.90	40043.50
蓄水区及水产池塘 Aquatic ponds and water reserves	3726.00	4.00	14904.00
共计 Total			308415.68

此外,保护区湿地土壤每年的固碳量需参照不同类型土壤的固碳速率计算^[31-32](表 11)。则研究区每年湿地植被和土壤的固碳总量为 304664.15 t,代入公式(5)得出,黑河湿地自然保护区每年的固碳总价值为 3.78×10⁸元。

保护区湿地的释氧价值则是通过光合作用公式和保护区植物总生物量估算出释氧总量,再采用市场价值法进行价值估算。由表 8 得出保护区各湿地类型总生物量为 614513.3 t/a,总释氧量为 737415.96 t/a。当前工业制氧成本为 400 元/t,则保护区湿地每年释氧价值为 2.95×10⁸元。

综上所述,保护区湿地每年固碳释氧总价值为 6.73×10⁸元。

表 11 黑河湿地自然保护区不同湿地类型每年土壤固碳量

Table 11 Annual carbon storage of different wetland types in Heihe national nature reserve

湿地土壤类型 Wetland soil types	面积/hm ² Area	固碳速率/(t hm ⁻² a ⁻¹) Fixing carbon rate	固碳量/(t/a) Total carbon sequestration
河流、沼泽湿地 Riverine and marsh wetlands	23946	0.671	16067.77
湖泊湿地 Lake wetlands	645	0.303	195.44
其他湿地及灌溉地 Other type wetlands and irrigated lands	10267.56	0.303	3111.07
蓄水区及水产池塘 Aquatic ponds and water reserves	3726	4	14904
共计 Total			34278.3

2.8 教育科研功能价值

对保护区文化科研价值的国家投入即为科研投入的总金额,也可根据科研的实际花费进行估算。张掖湿地保护局自 2006 年成立以来,黑河湿地保护区的科研总经费为 9726.5×10⁴元,则黑河湿地自然保护区的教育科研价值为 0.97×10⁸元。

2.9 旅游休闲功能价值

黑河自然保护区自 2010 年正式成立建设以来,已具备生态旅游的条件,而且逐年成为热点,大部分的观光旅游线路中都包含湿地保护区的“国家级湿地公园”附加景点,也是张掖市力推的旅游产品,但现阶段还没有收取门票。因此,对该项功能价值的研究,是按照其潜在的旅游价值进行计算。

2011 年张掖市全年接待国内外游客 350×10⁴人次(据张掖市年鉴统计)。根据市场调查,张掖各景点的门票价格和旅游产品价格,得出实际的人均消费在 100—140 元之间。取平均值 120 元/人,则保护区湿地旅游休闲功能的潜在价值为每年 4.2×10⁸元。

3 讨论

3.1 与全球及中国生态系统服务价值对比分析

参照 Costanza、陈仲新、谢高地等人^[6,9,33]对生态系统服务功能价值的研究成果,将黑河湿地保护区湿地的功能价值与之做对比分析(表 12)。

表 12 生态系统服务价值对比

Table 12 Ecosystem services value contrast

区域 Region	面积 Area/ (10 ⁶ hm ²)	生态系统服 务价值/(10 ⁸ 元) Ecosystem service value	单位面积生态系统 服务价值/(元/hm ²) Ecosystem service value of unit area		湿地单位面积生态 服务价值(元/hm ²) Wetland ecosystem service value of unit area	
			原价值 The original value	2012 年价值 The value in 2012	原价值 The original value	2012 年价值 The value in 2012
			全球 Global	51625.000	272797.60 ^[6]	5384.00
中国 China	1433.000	77834.50 ^[9]	5432.00	7307.33	55489.00	74645.85
黑河保护区湿地 Heihe wetland reserves	0.041	32.89			80219.00	80219.00
黄河三角洲湿地 Yellow river delta wetland	0.600	14.77 ^[12]			24616.00	27685.91
新疆艾比湖湿地 Ai Bi lake wetlands	0.130	17.93 ^[14]			13792.00	14247.14
青海湖湿地 Qinghai lake wetlands	0.110	61.34 ^[34]			55764.00	57604.21
黑河居延海湿地 JuYanhai wetlands	0.003	1.15 ^[35]			38333.00	38333.00

全球生态系统服务价值数据来源于 Costanza《The Value of the Worlds' Ecosystem Services and Natural Capital》;中国生态系统服务价值和湿地生态系统服务价值分别来源于陈仲新、张新时的《中国生态系统效益的价值》和谢高地《青藏高原生态资产的价值评估》中的相关数据;其中美元兑人民币的汇率按 1997 年 1:8.28 进行转换,原价值经过不同年份贴现率计算至 2012 年

在全球和中国的各种生态系统类型中,对应的湿地单位面积的生态服务功能价值都大于整体生态系统的平均价值。而黑河湿地保护区单位面积的生态功能价值高于我国其它湿地的生态服务价值,这是因为该保护区湿地位于河西走廊的干旱区,具有生态系统的独特性和功能多样性。进一步分析认为,是由于黄河三角洲湿地开发时间较长,人为活动对生态系统的干扰较大,使得湿地生态服务功能受到了一定的影响,进而间接减少了生态功能的经济效益^[12];艾比湖湿地属极端干旱区的代表性湿地,其生态环境更为脆弱,自然条件与保护区湿地相比也有一定的局限性,间接降低了该湿地生态服务功能的价值^[14];黑河湿地保护区与青海湖湿地的地理位置相近,同属大陆性气候,但青海湖高原性更显著些^[34],两者皆开发较晚,受人类活动干预较小,进而保存了其较高的生态功能价值;而位于内蒙古额济纳旗境内、地处黑河流域下游的居延海湿地,由于其湿地属极端干旱区,使得区域内地表水资源贫乏,多风沙天气,生态环境脆弱,而且多年来黑河中上游水资源的不合理利用,下游人为干扰破坏严重,更加剧了下游生态环境的退化^[35],最终导致居延海湿地单位面积生态功能价值较小。

黑河湿地保护区单位面积生态功能价值低于全球湿地的价值,一是该湿地与我国绝大部分湿地一样,或多或少的受到了一定的开发、破坏和污染等,造成了不同程度功能价值的降低与损失,二是黑河湿地保护区还可能有极大的功能潜力来充分显示其生态经济价值^[33]。

综上所述,更加突显了湿地在全球所有生态系统中的重要位置及黑河湿地保护区在全国的重要作用。

3.2 研究方法探讨

研究组通过两年多时间,对植物生物量、土壤等数据开展了大量实地调查与计算,其中,土壤有机碳含量

与赵锐锋等^[20]2012年黑河中游湿地表层土壤有机碳含量的研究结果相符;土壤有机碳密度的结果与张俊华^[21]2007年黑河中游流域有机碳分布的研究结果相符。试验数据为该湿地生态服务功能价值的估算提供了强有力的数据支撑。调蓄洪水是该保护区湿地最重要的生态功能,这与 Costanza、陈仲新及谢高地等人的研究结论相一致^[6-7,33]。

由于受估算方法等方面的限制,本文的计算结果虽在一定程度上反映了该湿地各项生态功能的价值,但仍存在不确定性和相应的误差。如:传统的样带-样线-样方调查法、土钻法及生物量收割法有一定的区域局限性,难以进行较大尺度上的生物量推算;黑河保护区湿地每年提供的本地生态用水和下游生态分水,鉴于没有统一的生态用水单价,本文按照农业用水价格进行了计算;污染物净化功能价值的计算,也只是黑河净化了排入河流的实际数量,与 Costanza 的研究结论相差较大,至于该湿地净化污水以及对固体、气体污染物的降解价值的阈值是多少,也有待进一步计算。同时,在计算单项服务功能价值时只考虑了它的最大价值,忽略了不同服务功能之间的竞争作用。如:当湿地行使提供水源功能时,其固碳释氧功能、蓄水功能、降解污染物功能势必被削弱,但研究过程中并没有将这些因素考虑其中,可能存在重复计算。这些因素都会导致个别价值估算的不准确性。

在未来的研究中,固碳速率可采用数学模型或年纪标记实验法得出固碳速率^[36],进而精确估算出保护区湿地每年的固碳量。气候的调节功能价值计算过程中,应从湿地调温增湿的气候功能价值来研究可能更为完善。计算机和遥感技术的飞速发展生态服务功能的研究提供了新思路。湿地生态服务功能价值的研究重点应放在完善和改进评价方法及手段,使得评价的结果具有更高的准确度,进而为湿地的保护、管理及经济社会的可持续发展提供有利的参考。

4 结论

通过黑河湿地保护区9种生态服务功能的价值评估,得出总价值约为 32.89×10^8 元(表13)。其中,调蓄洪水的功能价值最大,占总价值的33.02%;其次为湿地固碳释氧功能、旅游休闲功能、提供水源功能和气候调节功能,所占比例分别为20.46%、12.77%、11.55%和10.00%,说明黑河湿地自然保护区的生态功能主要以上述的5项为主。调蓄洪水、提供水源功能是该保护区湿地最重要的生态功能,更突显出其在西北干旱区发挥着重要的水源涵养和生态屏障的作用;同时该湿地的旅游休闲功能具有巨大的经济效益。物质生产、生物栖息地及科研教育价值分别占总价值的5.41%、3.07%和2.95%;而降解污染物的功能价值最小,所占比例为0.76%。虽然保护区湿地各项生态服务功能的价值有所差异,但是相互之间是一个统一的整体,彼此之间关系密切。

表13 黑河湿地自然保护区生态系统各项服务功能价值统计表

Table 13 Ecosystem services values of Heihe wetland nature reserve

湿地生态服务功能 Wetland ecosystem service function	价值量/(10^8 元) Value	占全部价值的比例/% Proportion of the total value
物质生产功能 Material production function	1.78	5.41
气候调节功能 Climate regulation function	3.29	10.00
调蓄洪水功能 Adjusting flood function	10.86	33.02
提供水源功能 Water supplies function	3.80	11.55
降解污染物功能 Pollutant degradation function	0.25	0.76
生物栖息地功能 Wildlife habitats function	1.01	3.07
湿地固碳释氧功能 Carbon fixation and oxygen release function	6.73	20.46
教育科研功能 Scientific research function	0.97	2.95
旅游休闲功能 Entertainment function	4.20	12.77
共计 Total	32.89	100.00

2012年张掖市国民生产总值为 291.89×10^8 元,仅占该市总面积1%的黑河湿地自然保护区,无疑为干旱区的张掖市经济发展提供了基本的物质和环境条件,同时为区域经济的发展提供了强大的生态功能。因此,在今后的湿地规划和保护管理中,要充分重视保护区的各项生态功能的保护,同时对有潜力的生态功能进行合理的开发,使得各项功能都发挥最大的经济、生态和社会效益,从而促进区域经济和生态环境的可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 杨永兴. 国际湿地科学研究进展和中国湿地科学研究优先领域与展望. 地球科学进展, 2002, 17(4): 508-514.
- [2] 左平, 宋长春, 钦佩. 从第七届国际湿地会议看全球湿地研究热点及进展. 湿地科学, 2005, 3(1): 66-73.
- [3] Daily G C. Nature's Service: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington: Island Press, 1997: 110-121.
- [4] Bullock A, Acreman M. The role of wetlands in the hydrological cycle. Hydrology and Earth System Sciences, 2003, 7(3): 358-389.
- [5] Acharya G. Approaches to valuing the hidden hydrological services of wetland ecosystems. Ecological Economics, 2000, 35(1): 63-72.
- [6] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the worlds' ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [7] Turner R K, van den Bergh J C J M, Söderqvist T, Barendse A, van der Straaten J, Maltby E, van Lerland E C. Ecological-economic analysis of wetlands: scientific integration for management and policy. Ecological Economics, 2000, 35(1): 7-23.
- [8] Woodward R T, Wui Y S. The economic value of wetland services: a meta-analysis. Ecological Economics, 2001, 37(2): 257-270.
- [9] 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值. 科学通报, 2000, 45(1): 17-22.
- [10] 王伟, 陆健健. 三垌湿地生态系统服务功能及其价值. 生态学报, 2005, 25(3): 404-407.
- [11] 赵同谦. 中国陆地生态系统服务功能及其价值评价研究. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2004.
- [12] 张晓慧, 韩美. 黄河三角洲湿地主导生态服务功能价值估算. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(6): 37-43.
- [13] 王凤珍, 周志翔, 郑忠明. 城郊过渡带湖泊湿地生态服务功能价值评估—以武汉市严东湖为例. 生态学报, 2011, 31(7): 1946-1954.
- [14] 谢正宇, 李文华, 谢正君, 李新琪. 艾比湖湿地自然保护区生态系统服务功能价值评估. 干旱区地理, 2011, 34(3): 532-540.
- [15] 张天华, 陈利顶, 普布丹巴, 黄琼中, 徐建英. 西藏拉萨拉鲁湿地生态系统服务功能价值估算. 生态学报, 2005, 25(12): 3176-3180.
- [16] 牛赆, 刘贤德, 张宏斌, 孟好军. 黑河流域中上游湿地生态功能评价. 湿地科学, 2007, 5(3): 215-220.
- [17] 周全民, 牛赆. 张掖黑河湿地自然保护区湿地资源及保护对策. 湿地科学与管理, 2009, 5(1): 27-28.
- [18] 刘宏军, 周全民, 牛赆. 张掖市黑河流域湿地资源调查与分类. 湿地科学与管理, 2011, 7(1): 56-59.
- [19] 李博, 刘存歧, 王军霞, 张亚娟. 白洋淀湿地典型植被芦苇储碳固碳功能研究. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2603-2607.
- [20] 赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 姜辉, 汪建珍. 黑河中游湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素. 地理科学, 2013, 33(3): 363-370.
- [21] 张俊华. 西北干旱区黑河中游土壤有机碳分布及其变化机制研究. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [22] Song G H, Li L Q, Pan G X, Zhang Q. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation. Biogeochemistry, 2005, 74(1): 47-62.
- [23] 李金昌, 姜文来, 靳乐山, 任勇编. 生态价值论. 重庆: 重庆大学出版社, 1999: 34-45.
- [24] 王继国. 艾比湖湿地调节气候生态服务价值评价. 湿地科学与管理, 2007, 3(2): 38-41.
- [25] 刘巽浩. 森林生态的几个问题. 中国农业资源与区划, 2005, 26(2): 14-16.
- [26] 陈文雄. 黑河流域水文特性. 水文, 2002, 22(6): 57-60.
- [27] 苏雨洁. 芦苇生理需水量的测定. 内蒙古农业科技, 2011, (6): 37-40.
- [28] 王根绪, 程国栋. 干旱内陆流域生态需水量及其估算—以黑河流域为例. 中国沙漠, 2002, 22(2): 129-134.
- [29] 刘文, 王炎痒, 张敦富. 资源水价. 北京: 商务印书馆, 1996: 67-78.
- [30] 孟宪民, 崔保山, 邓伟, 吕宪国. 松嫩流域特大洪灾的警示: 湿地功能的再认识. 自然资源学报, 1999, 14(1): 16-17.
- [31] Dean W E, Gorham E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands. Geology, 1998, 26(6): 535-538.
- [32] 宋洪涛, 崔丽娟, 栾伟, 李胜男, 马琼芳. 湿地固碳功能与潜力. 世界林业研究, 2011, 24(6): 6-11.
- [33] Xie G D, Zhen L, Lu C X, Xiao Y, Li W H. Applying value transfer method for Eco-service valuation in China. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(1): 51-59.
- [34] 卢慧, 陈克龙, 曹生奎, 韩艳莉, 马进. 青海湖流域生态系统服务功能与价值评估. 生态经济, 2011, (11): 145-147.
- [35] 任娟, 肖洪浪, 王勇, 肖生春. 居延海湿地生态系统服务功能及价值评估. 中国沙漠, 2012, 32(3): 39-43.
- [36] 段晓男, 王效科, 逯非, 欧阳志云. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 463-469.