

南四湖湿地景观格局变化的生态系统服务价值响应

许吉仁^{1,2}, 董霁红^{1,2①} (1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 利用 1987—2010 年 5 期卫星遥感影像监测南四湖湿地景观格局变化, 并且采用市场比较法、影子工程法、工业制氧成本法、碳税法和价值替代法等多种评估方法对南四湖湿地景观格局变化的生态系统服务功能价值响应进行深入探讨。结果表明, 南四湖湿地中大量芦苇、荷田等自然湿地景观转化为养殖水域、水稻田等人工湿地, 景观格局趋于破碎化; 湖泊湿地景观格局变化对于湿地的供给功能、调节功能、文化功能和支持功能均有影响, 其中对供给功能和调节功能影响最大。以 2010 年不变价计算, 南四湖湿地景观格局变化导致 2010 年湿地生态系统服务功能价值比 1987 年减少 3.06 亿元, 其中大气成分调节功能价值损失 11.7 亿元, 净化功能价值损失 3.77 亿元, 涵养水源功能损失 0.65 亿元, 物质生产功能价值增加 13.06 亿元, 其他功能价值对湿地景观格局变化的响应不明显。

关键词: 生态系统服务功能; 湿地; 景观格局; 响应; 南四湖

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2013)04-0471-07

Response of Ecosystem in Service Value to Changes in Landscape Pattern of the Nansi Lake Wetland. XU Ji-ren^{1,2}, DONG Ji-hong^{1,2} (1. College of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Changes in landscape pattern of the Nansi Lake wetland were monitored with the fifth round of satellite remote-sensing images (1987–2010). Response of the ecosystem of the wetland in service value to the changes were analyzed, using the market comparison approach, shadow project approach, industrial oxygen generation cost method, carbon tax method and value substitution method. Results show that large tracts of reed- and lotus-dominated natural wetlands had been converted into artificial wetlands, such as aquacultural farms, paddy fields, etc., thus promoting the enhancement of landscape fragmentation. Impacts of the changes on supply function, regulatory function, cultural function and support function were quite obvious, especially on supply function and regulatory function. Calculation based on the constant prices of 2010 shows that the changes caused decreases in service value of the ecosystem, which included the decrease of atmospheric element regulation function by 1 170 million yuan (RMB), the purification function by 377 million yuan, and the water conservation function by 65 million yuan. While the changes did increase materials and food product function of the ecosystem by 1 306 million yuan. Ultimately, a decrease of 306 million yuan were caused by the changes from 1987 to 2010. Responses of the ecosystem in other functions, including mitigation of flood, conservation of soil, habitats, biodiversity, entertainment, culture and science functions, etc. were not so obvious.

Key words: ecosystem service value; wetland; landscape pattern; response; Nansi Lake

生态系统服务功能指自然生态系统及其组成对人类生存和发展的支持作用, 即维持和生产对人类生存和发展有支持和满足作用的产品、资源和环境^[1]。生态系统服务功能的概念由 SCEP^[2]于 1970 年首次提出, 这标志着生态系统服务功能研究的开端, 而后生态系统服务功能研究逐步完善并成为生态学研究的前沿和热点^{[3],[4]34-58}。近年来国内也有许多学者对湿地、森林、草地和海洋等典型生态系统的服务功能进行了研究^[5-6]。然而, 这些研究主要集中在生态系统服务价值的评估方面, 对景观格

局变化的生态系统服务价值响应缺乏深入研究, 难以量化区域经济发展的生态环境成本。

为此, 选择山东省南四湖湿地生态系统作为研究区, 分析南四湖湿地景观格局空间变化的动态过程, 并以此为基础研究区域快速经济增长背景下湖

收稿日期: 2013-01-05

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划 (IRT0865); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (SZBF2011-6-B35)

① 通信作者 E-mail: dongjihong@cumt.edu.cn

泊湿地景观格局变化的生态系统服务功能价值 (ESVs) 响应机制, 以期为湖泊湿地生态补偿和湿地生态系统管理提供参考依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

南四湖是南阳湖、独山湖、昭阳湖和微山湖这4个相连湖泊的总称, 位于山东省西南部, $34^{\circ}27' \sim 35^{\circ}20' N$, $116^{\circ}34' \sim 117^{\circ}21' E$ 之间, 是山东省乃至华北地区最大的淡水湖泊, 也是著名的浅水型堰塞湖。南四湖南北长 126 km, 东西宽 5~25 km, 湖盆呈西北—东南方向延伸, 南北两端较开阔, 中段略为狭窄, 状如哑铃。湖泊平均水深 1.46 m, 最大湖水面积 1 266 km², 集流总面积 3 543 km²。已记录到湖泊浮游植物 46 科 116 属, 水生维管束植物 108 科 538 种, 鸟类 205 种, 其中国家一、二级重点保护鸟类主要有大鸨、大天鹅、白枕鹤、灰鹤和鸳鸯等 26 种^{[7]123-137}。目前, 微山湖湿地公园为国家级湿地公园。

1.2 数据来源与预处理

遥感影像包括 1987、1995、2002、2006 和 2010 年的 Landsat TM 影像。影像轨道行列号为 P122R36, 影像的云量较少, 图像清晰, 包含 6 个波段 (选择覆盖可见光和近红外的 1~5、7 波段), 空间分辨率为 30 m。影像均经过系统辐射校正和地面控制点几何校正, 并且通过数字高程模型 (DEM) 进行地形校正, 投影坐标系统为 WGS_1984_UTM_Zone_50N。根据南四湖湿地的边界范围对遥感影像进行裁剪并建立掩膜, 对影像文件进行增强处理, 并将剔除第 6 波段 (热红外) 后的原影像文件, 主成分分析的第一主成份, NDVI 图像, 穗帽变换的亮度、绿度、湿度波段叠加成新的影像文件, 可通过不同波段加载以突出特定地物特征, 便于目视解译。

1.3 研究方法

选取 6 个相关性较小的景观格局指数分析研究区的景观格局特征: 斑块数量 (NP)、斑块密度 (PD)、景观形状指数 (LSI)、香农多样性指数 (SHDI)、香农景观优势度 (SHEI) 和景观蔓延度指数 (CONTAG)。

根据《全国湿地资源调查与监测技术规程》^[8] 及南四湖湿地的实际情况, 将研究区分为自然湿地 (湖泊及自然水域、芦苇地)、人工湿地 (水稻田、河流沟渠、水库坑塘、养殖水面) 和非湿地 (其他用地) 3 个类型, 并建立南四湖区湿地分类系统。由于湖泊湿地中自然水域、养殖区域和河流沟渠等地类存

在“同谱异物”的现象, 但是其在纹理和空间位置上有较大差异, 而面向对象的分类方法可以对纹理及空间位置进行有效区分, 因此使用 ENVI Zoom 软件的 ENVI 特征提取模块 (ENVI Feature Extraction), 采用 K 临近监督分类方法 (K Nearest Neighbor), 对南四湖湿地进行面向对象的遥感信息提取。

2 生态服务功能价值计算

根据南四湖湿地空间格局特征及其服务功能类型的特点, 将南四湖湿地生态系统服务类型划分为物质生产、大气成分调节、涵养水源、调蓄洪水、污染净化、保持土壤、栖息地、生物多样性、休闲娱乐和文化科研共 10 项主要服务功能。

2.1 物质生产功能

物质生产功能采用市场价值法进行估算。南四湖湿地的物质产品主要包括四鼻孔鲤鱼、鲫鱼、鳊鱼、鳖、水稻、芦苇、菖蒲、菱、菰、芡实等, 可将其划分为鱼类、水稻和芦苇 3 类。

鱼类: 鱼类价格制定参照文献^{[9]6-7}中的鱼类产品产量和现时单价。由表 1 可知, 南四湖鱼类单价为 1.19×10^4 元 $\cdot t^{-1}$ 。鱼类产品的生产面积分为自然生产和人类养殖面积, 自然生产面积参照沈吉等^[9]的研究结果, 南四湖天然渔产总计约 $31.5 t \cdot km^{-2}$, 即湖泊及自然水面产鱼 $31.5 t \cdot km^{-2}$; 由于南四湖平均水位小于 1.5 m, 养殖区域产量按淡水浅水鱼塘计算, 以养殖区域渔产 $225 t \cdot km^{-2}$ 计, 计算 2006 和 2010 年水产品产量, 结果与统计年鉴中的水产品总产量大致相当。

水稻: 通过查阅 2005—2010 年济宁市相关资料, 得到微山县平均水稻单产为 $860.1 t \cdot km^{-2}$, 水稻价格为 2.9×10^3 元 $\cdot t^{-1}$ 。

芦苇: 根据文献^{[9]8-9}, 并参考博湖县芦苇产量, 结合南四湖湿地实际情况, 确定芦苇单产为 $400 t \cdot km^{-2}$, 通过市场调查得到目前芦苇市场价格为 $500 元 \cdot t^{-1}$ 。

表 1 南四湖湿地鱼类价值

Table 1 The value of fish in the Nansi Lake wetland

鱼类	产量/($t \cdot a^{-1}$)	单价/(元 $\cdot t^{-1}$)	产品价值/元
四鼻孔鲤鱼	1.3×10^4	8.6×10^3	1.12×10^8
鲫鱼	1.6×10^4	1.16×10^4	1.86×10^8
鳊鱼	500	4.90×10^4	2.45×10^7
鳖	40	6.7×10^4	2.68×10^6
合计	2.95×10^4		3.25×10^8
平均单价		1.10×10^4	

评价方法采用市场价值法, 公式为

$$V_t = \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n S_i \times Y_i \times P_i \quad (1)$$

式(1)中, V_t 为物质生产总价值,元; V_i 为某类产品价值,元; S_i 为某类产品生产面积, km^2 ; Y_i 为某类产品单产, $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$; P_i 为物质产品单价,元 $\cdot \text{t}^{-1}$ 。

2.2 大气成分调节功能

湿地对于大气成分调节的正效应主要是通过自然湿地中的浮游植物、水生植物和人工湿地中水稻田的光合作用固定大气中的 CO_2 ,并释放 O_2 。根据植物光合作用过程: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2$,植物每生产1.0 g干物质能固定1.63 g CO_2 ,折合纯碳约0.44 g,释放1.191 g O_2 。

南四湖湿地浮游植物的年平均生物量为 $1.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均水深按照1.46 m计算,则单位面积生物量为 $2.48 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$;根据文献[9]¹⁵⁷⁻¹⁸⁹,南四湖水生植物的单位面积生物量为 $2.58 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。采用碳税法 and 工业制氧法评估南四湖湿地植被吸收 CO_2 和排放 O_2 的经济价值。根据国际和我国对 CO_2 排放的收费标准,将生态指标换算成经济指标,得出固定 CO_2 的经济价值。目前,国际上通用的碳税率通常为瑞典的碳税率,即 $150 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1}$ (按纯碳质量计),该税率对于我国偏高,故采用中国造林成本($250 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$)和国际碳税标准的平均值,即 $770 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$;湿地释放 O_2 的经济价值采用工业制氧成本法估算,我国工业制氧成本为 $0.4 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,即 $400 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

刘晃等^[10]研究表明淡水池塘养殖每生产1 t水产品的 CO_2 排放量为0.54 t。研究区养殖区域渔产 $225 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,故南四湖湿地淡水池塘养殖的 CO_2 排放量为 $121.5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,淡水池塘养殖的碳排放价值为 $2.56 \times 10^4 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

李文华^[4]³¹³⁻³²⁶研究表明水生植物群落排放的 CO_2 平均通量为 $15.65 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。沿用COSTANZA等^[11]提出的 CH_4 经济价值,即 $0.11 \text{ 美元} \cdot \text{kg}^{-1}$,折合人民币 $0.69 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。故水生植物群落释放 CH_4 的负效益为 $9.46 \times 10^4 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。根据肖玉等^[12]的研究结果,稻田气体调节功能包括释放 O_2 、吸收 CO_2 和排放 CH_4 等,其综合气候调节功能价值为 $5.47 \times 10^3 \sim 12.84 \times 10^3 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,笔者取其平均值 $9.16 \times 10^5 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

综上所述,南四湖湿地大气成分调节功能价值分别为:浮游植物, $2.02 \times 10^3 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;水生植物(芦苇地、荷田), $2.01 \times 10^6 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;水稻田, $9.16 \times 10^5 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;鱼类(养殖区域), $-2.56 \times 10^4 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.3 涵养水源功能

涵养水源功能价值采用影子工程法测算。南四湖流域1950—2003年多年平均地表径流深750 mm,最大水域面积 1266 km^2 ,首先量算当年湖泊水面面积(S),据此推算南四湖涵养水源量(V),计算公式为 $V = (1266 - S) \times 750$ 。

根据南水北调东线工程管理局公布的2006年价格数据,建设 1 m^3 库容需投入成本约1.02元,折现率取6%,折现为2010年的价格约为 $1.34 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$,据此可计算得到南四湖湿地涵养水源价值。1987年湖泊水面面积为 355.12 km^2 ,则当年研究区涵养水源功能价值为 $9.15 \times 10^8 \text{ 元}$ 。

2.4 调蓄洪水功能

采用影子工程法计算南四湖调蓄洪水价值。根据王苏民等^[13]的数据,南四湖可调蓄洪水量为 $2.56 \times 10^9 \text{ m}^3$,据此用储存单位库容水的工程造价求得南四湖调蓄洪水价值为 $3.56 \times 10^9 \text{ 元}$ 。

2.5 净化功能

湿地具有减少环境污染的作用,尤其是对氮、磷等营养元素以及重金属元素具有吸收、转化和滞留作用,能有效降低其在水体中的浓度。南四湖湿地内芦苇承担大部分的净化作用,根据COSTANZA等^[11]的估算结果,芦苇净化价值为 $1.05 \times 10^6 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-2}$,再乘以芦苇面积,即可得到净化功能价值。

2.6 保持土壤功能

2.6.1 减少土壤养分流失价值

湿地减少土壤养分流失价值(V)的计算公式为

$$V = S \times h \times R_1 \times R_2 \times P \quad (2)$$

式(2)中, S 为湿地面积, km^2 ,研究区湿地总面积为 1208.20 km^2 ; h 为无植被土壤中等程度的侵蚀深度, $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$,采用草地中等程度侵蚀深度的平均值来代替,即 $25 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; R_1 为土壤容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,南四湖湿地土壤容重为 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; R_2 为土壤养分平均含量,% ,土壤N、P和K的平均含量 w 为1.96%; P 为我国化肥平均价格,元 $\cdot \text{t}^{-1}$,2010年山东省尿素、磷酸二铵和钾肥价格分别为1980、2850和2700元 $\cdot \text{t}^{-1}$,平均化肥价格为 $2510 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。由此计算得到南四湖湿地减少土壤养分流失的价值为 $19.32 \times 10^8 \text{ 元} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.6.2 营养循环价值

在计算南四湖湿地生态系统的养分保留量时,采用文献[14]中的中国陆地生态系统营养物质储存及固定量数据。在计算南四湖湿地营养循环价值时,平水期和丰水期间的变化区域按草地类型计算,即单位面积固定量为氮 $128.78 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,磷

0.88 kg · km⁻², 钾 86.33 kg · km⁻², 平水期被淹没湿地按沼泽类型计算, 即单位面积固定量为氮 132.73 kg · km⁻², 磷 1.82 kg · km⁻², 钾 155.46 kg · km⁻²。已有研究表明, 南四湖平均水位湖面面积为 1 097.60 km², 滩地和岛屿等面积为 168.40 km²[7]13-15。由此计算得到南四湖湿地生态系统的氮、磷、钾年固定总量为 35 468.77 t · a⁻¹, 平均化肥价格为 2 510 元 · t⁻¹, 故营养循环价值为 89.03 × 10⁶ 元 · a⁻¹。

南四湖湿地保持土壤功能价值为湿地减少土壤养分流失价值和营养循环价值之和, 即 20.21 × 10⁸ 元 · a⁻¹。

2.7 栖息地功能

南四湖区大面积的苇田、滩涂和水域为野生动物提供了良好的生存环境, 这既是众多物种的区域性栖息地和越冬场所, 同时又是候鸟主要迁徙通道和中途食物补给地。湿地范围内建有微山湖国家湿地公园和南四湖省级自然保护区。采用 COSTANZA 等[11]的研究成果, 即全球湿地生态系统中单位面积的湿地功能和自然资本价值为 1.92 × 10⁵ 元 · km⁻², 据此推算南四湖的生物栖息地功能价值, 得到生物栖息地价值为 2.32 × 10⁸ 元 · a⁻¹。

2.8 生物多样性功能

南四湖湿地野生动植物资源共计约 1 037 种, 丰富的动植物资源是南四湖湿地生物多样性和典型性的具体表现。按每一物种潜在年生态收益 40 000 元计算, 南四湖湿地生物多样性价值为 4.14 × 10⁷ 元 · a⁻¹。另外, 按 COSTANZA 等[11]对全球湿地生物多样性价值的估算结果 (3 512 元 · hm⁻²), 计算得到南四湖湿地生物多样性功能价值为 4.24 × 10⁸ 元 · a⁻¹。由于全球湿地生物多样性价值参数并不一定完全适用于南四湖, 对于两种方法计算得到的生物多样性价值取平均值, 故南四湖湿地生物多样性功能价值为 2.33 × 10⁸ 元 · a⁻¹。

2.9 休闲娱乐功能

采用费用支出法估算休闲娱乐功能价值, 用旅游者费用支出的总和 (包括交通费、食宿费等一切用于旅游方面的消费) 作为该景观旅游功能的经济价值 (P), 其计算公式为

$$P = V_T(t) + P_a(t) + P_b(t) + P_c(t) \quad (3)$$

式(3)中, V_T 为旅游费用支出, 元; P_a 为旅游时间价值, d; P_b 为消费者剩余, 元; P_c 为其他消费, 元; t 为年度。

由于较早年份的数据难以获取, 旅行费用支出、旅游时间价值和其他消费数据采用南四湖自然保护管理局 2002—2010 年统计资料的平均值。据

统计资料, 南四湖湿地平均每年接待游客 3.6 × 10⁵ 人次, 其中国内游客 3.59 × 10⁵ 人次, 海外游客 8.23 × 10³ 人次, 可计算得到南四湖湿地的休闲娱乐功能价值为 4.52 × 10⁸ 元 · a⁻¹。

2.10 文化科研功能

由于南四湖湿地相关科研工作开展较少, 科研经费投入也较少, 若采用科研经费来评价南四湖湿地文化科研功能价值, 将导致评估结果偏低。故采用陈仲新等[15]估算的我国生态系统平均科研价值 (382 元 · hm⁻²) 以及 COSTANZA 等[11]估算的全球湿地生态系统科研文化功能价值 (861 美元 · hm⁻²) 的平均值, 即 2.90 × 10⁵ 元 · km⁻², 作为南四湖湿地生态系统的单位面积科研价值, 计算得到南四湖湿地文化科研功能价值为 3.50 × 10⁸ 元 · a⁻¹。

3 结果与分析

3.1 南四湖湿地景观格局变化

运用 FRAGSTATS 景观格局分析软件和 ArcGIS 软件对 1987、1995、2002、2006 和 2010 年的湿地景观格局指数进行计算, 并计算南四湖湿地不同景观类型的面积变化量及变化速度 (图 1, 表 2)。利用 ENVI 软件将 1987 和 2010 年的南四湖湿地景观类型图进行叠加计算及统计整理, 得到湿地各景观类型间的转移矩阵 (表 3)。

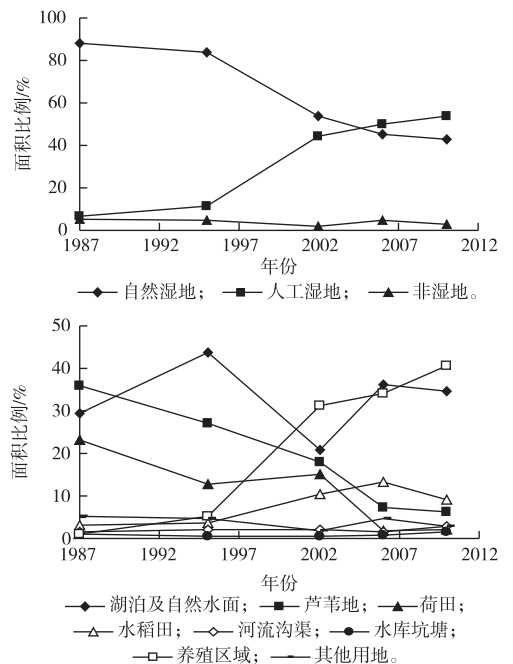


图 1 1987—2010 年南四湖湿地各景观类型的面积比例变化
 Fig. 1 Variation of the proportion of various types of landscapes in the Nansi Lake wetland from 1987 to 2010

表2 1987—2010年南四湖湿地景观格局指数

Table 2 The landscape pattern indices in the Nansi Lake wetland from 1987 to 2010

年份	斑块数量	斑块密度	景观形状指数	香农多样性指数	香农景观优势度	蔓延度指数
1987	483	0.40	11.19	1.48	0.71	50.81
1995	413	0.34	9.56	1.51	0.73	51.60
2002	640	0.53	14.26	1.70	0.82	40.82
2006	621	0.52	12.18	1.52	0.73	47.93
2010	719	0.60	12.82	1.48	0.71	48.31

由图1可见,1987—2010年南四湖自然湿地(湖泊及自然水面、芦苇地、荷田)面积呈逐年下降趋势,人工湿地(水稻田、河流沟渠、水库坑塘、养殖区域)面积呈逐年上升趋势,特别是在20世纪90年代变化明显,非湿地面积变化幅度较小。湖泊及自然水面面积波动明显,其中1987和2002年水域面积明显低于其他年份,其原因在于1987年降水量少于往年,属于干旱年份,而2002年更是遭遇特大旱灾,以至于从徐州引水入湖,此外当年建湖西、湖东大堤,也对水域面积造成一定影响。总体而言,剔除特殊年份,南四湖的湖泊及自然水面面积总体呈下降趋势。湿地内芦苇地面积逐年下降,占湿地面积比例从1987年的35.84%下降至2010年的6.12%。大片芦苇地转化为养殖区域,转化面积为239.05 km²,占1987年芦苇地总面积的55.20%;有77.82 km²的芦苇地转化为水稻田,占1987年芦苇地总面积的17.97%。荷田面积也呈下降趋势,其占湿地面积比例从1987年的23.08%降至2010年的2.17%,仅2002年时有小幅上升。有155.73 km²

表3 1987—2010年南四湖湿地景观类型转移矩阵

Table 3 Landscape type transition matrix of the Nansi Lake wetland from 1987 to 2010

景观类型	湖泊及自然水面	芦苇地	荷田	水稻田	河流沟渠	水库坑塘	养殖区域	其他用地
湖泊及自然水面	287.26	34.54	92.43	0.48	1.31	1.10	1.09	1.71
芦苇地	1.26	36.88	9.00	4.79	1.79	0.10	2.64	17.46
荷田	0.32	12.30	10.96	0.44	0.09	0.09	0.07	1.85
水稻田	0.48	77.82	1.29	20.10	0.18	0.51	0.92	7.75
河流沟渠	0.80	14.14	5.83	0.54	12.21	0.33	0.62	0.68
水库坑塘	0.46	7.09	0.64	0.73	0.26	6.87	0.23	2.03
养殖区域	62.37	239.05	155.73	9.46	1.71	2.69	6.22	12.34
其他用地	2.14	11.19	3.00	0.62	0.09	0.15	1.13	17.65
变化统计	64.84	-359.10	-252.76	71.90	17.54	6.47	476.64	-25.53

某一行数据表示1987年某景观类型转化为2010年其他各景观类型的面积。

3.2 南四湖湿地景观格局变化的生态系统服务响应

1987—2010年南四湖湿地生态系统服务价值变化见表4。由表4可知,南四湖湿地生态系统服

的荷田转化为养殖区域,占1987年荷田总面积的55.84%;另外有33.14%的荷田转变为湖泊及自然水面。水稻田面积稳中有升,其增加面积主要来自于芦苇地的转化。养殖区域面积逐年上升,其占湿地面积比例从1987年的1.06%增至2010年的40.54%,面积增长近40倍,共有239.05 km²芦苇地、155.73 km²荷田和62.37 km²湖泊及自然水面转化为养殖区域。河流沟渠的增加面积大部分来自于河边芦苇地的转化,其原因有两点:一方面,芦苇地中新挖掘了水渠;另一方面,茂密的芦苇地将部分河流和沟渠遮挡,导致遥感影像分类时将这一部分河流沟渠误划分为芦苇地,以至于计算得出的河流沟渠面积小于真实面积。南四湖湿地内水库坑塘和其他用地的变动幅度较小。

由表2可知,1987—2010年南四湖湿地的斑块数量、斑块密度和景观形状指数增加,蔓延度指数减少,多样性指数和均匀度指数先增后减。近30 a来,南四湖湿地景观趋于破碎化,形状越来越复杂,且景观连通度降低。这些景观格局指数的变化趋势表明,研究区湿地景观异质性增加,单一组分对景观的控制作用增加,人类对景观的管理程度增强,由此导致湿地景观抗干扰能力和维持自我稳定的能力降低。香农多样性指数和香农景观优势度的变化趋势(基本在1.48和0.71附近波动)表明,南四湖湿地多样性较低,各湿地景观类型面积所占比例存在一定差异,各斑块类型在景观中的均衡化分布不明显。

务价值呈波动变化趋势,由1987年的100.12亿元下降到1995年的94.55亿元,之后上升至2002年的103.83亿元,2002年之后又呈下降趋势,2010年为97.06亿元。2002年南四湖湿地生态系统服务

价值达最大,其原因在于2002年山东大旱导致湖区大面积干枯,南四湖湿地生境濒临灭绝,政府动用大量财力、人力和物力挖生态水塘,并从长江和黄河紧急调水来解决危机。围垦缩小湖区沼泽地带的植被面积,挖塘则减少浅水植物生长面积,破坏鱼类自然繁殖、食物来源和洄游场所,同时破坏鸟类的栖息活动地。这些人为活动对南四湖湿地生态系统造成的破坏具有时滞性,在当年并不会完全体现出来。因此,按照遥感测算方法测算当年的湿地生态系统服务价值,就会出现如南四湖湿地“适当、合理”开展水产养殖和粮食种植的表象,从而导致当年的生态系统服务价值估算结果偏高。但在之后的几年内,由于南四湖水位一直处于低位,加之人们盲目追求经济利益,以环境破坏换取经济增长,延续2002年之后的景观生态模式,过度开垦和养殖使得2006和2010年南四湖湿地生态系统服务价值明显下降。总体而言,南四湖湿地生态系统服务价值整体趋于减少,1987—2010年平均每年减少1330.43万元。

由表4还可知,南四湖湿地生态系统总服务价值的波动主要是由物质生产、大气调节、涵养水源和净化功能价值的变化所致,说明外界干扰(自然界能量输入和人类活动)对上述几类功能具有直接影响。从各项服务功能价值变化来看,南四湖湿地物质生产功能价值逐年上升,大气调节、涵养水源

和净化功能价值呈下降趋势,尤其是大气调节功能和净化功能价值下降幅度十分明显。

基于南四湖湿地景观格局和生态系统服务价值分析结果,评价南四湖景观格局变化对生态系统服务价值的影响,结果见表5。南四湖湿地提供的主要供给服务包括食品生产(如海产品、畜产品、水稻、莲藕等)、原材料生产(如芦苇等)、氧气生产和水资源供给。与1987年相比,2010年南四湖湿地养殖区域增加476.64 km²,水稻田面积增加71.90 km²,芦苇地和荷田分别减少359.10和252.76 km²。南四湖湿地物质生产功能价值由1987年的3.34亿元上升到2010年的16.4亿元。

表4 1987—2010年南四湖湿地生态系统服务价值变化
Table 4 Variation of the ecosystem in services value in the Nansi Lake wetland from 1987 to 2010 亿元

生态服务功能	1987年	1995年	2002年	2006年	2010年
物质生产	3.34	5.12	13.80	15.90	16.40
大气成分调节	14.60	10.10	9.08	3.64	2.90
涵养水源	9.15	7.41	10.20	8.34	8.50
调蓄洪水	35.60	35.60	35.60	35.60	35.60
净化	4.55	3.44	2.27	0.93	0.78
保持土壤	20.21	20.21	20.21	20.21	20.21
栖息地	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32
生物多样性	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33
休闲娱乐	4.52	4.52	4.52	4.52	4.52
文化科研	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
合计	100.12	94.55	103.83	97.29	97.06

表5 1987—2010年南四湖湿地景观变化对生态系统服务功能的影响

Table 5 Impacts of changes in the landscape of Nansi Lake wetland on its ecosystem service function from 1987 to 2010

生态系统服务功能	湖泊及自然水面	芦苇地	荷田	水稻田	河流沟渠	水库坑塘	养殖区域	其他用地
供给功能								
物质生产	+	+	+	+			+	
调节								
大气成分调节	+	+	+	+			-	
涵养水源	-							
调蓄洪水	+	+			+	+		
净化	+	+				+	-	
保持土壤	+	+		+				
文化功能								
休闲娱乐	+	+	+					
文化科研	+	+	+	+				
支持功能								
栖息地	+	+	+	+	+	+	-	
生物多样性	+	+	+	+	+		-	

+表示景观格局变化与服务功能价值间呈正相关;-表示景观格局变化与服务功能价值间呈负相关;空格表示影响不明显或未予考虑。

南四湖湿地提供的主要调节服务包括浮游植物、水生植物和水稻通过光合作用固定大气中的

CO₂以及湿地水生植物释放的CH₄和水产养殖的碳排放所带来的大气成分调节,湿地内芦苇的净化

功能以及保持土壤功能。由于湖泊及自然水面、养殖区域、芦苇地和水稻田等景观格局发生变化,1987—2010年南四湖湿地生态系统的大气成分调节功能和净化功能价值分别下降 11.7×10^8 和 3.77×10^8 元。

南四湖湿地提供的主要文化功能包括休闲娱乐和文化科研。由于各年份的文化功能难以单独计量,将文化功能服务价值设定为一个固定估算值。但是,1987—2010年南四湖湿地芦苇和荷田面积减少、斑块数量持续增加、蔓延度减少导致的景观破碎度增加,很可能对南四湖湿地文化功能造成负面影响。

南四湖湿地提供的主要支持功能包括物种多样性维持、初级生产和营养物质循环。尽管难以计量,但是南四湖湿地湖泊、河流、芦苇地等景观结构和香农多样性指数、香农均匀度指数的波动会威胁濒危物种的生存和繁衍,另外景观类型之间的剧烈转化也会改变生态系统的初级生产力 and 营养物质循环速率,从而对湿地生态系统服务价值造成影响。

4 结论与讨论

南四湖湿地景观格局变化来自于自然气候变化以及人类改造自然的能力和利用自然的方式变化,从而导致湿地整体生态系统服务功能变化。由于大面积的自然湿地被人工湿地所替代,湿地的调节功能明显降低,最终导致湿地生态系统服务功能整体降低。针对南四湖湿地景观格局变化导致生态服务价值降低,笔者认为可以从2个方面进行改进:一,调整产业结构,发展水产品深加工。大量的自然湿地(芦苇地、自然水面、荷田)被养殖水域所替代,其驱动因素主要是水产养殖业带来的经济收益。优化产业结构,发展水产品深加工,扩大品牌影响力,可以使单位水产品的价值得到大幅度提升,同时深加工产业链可以为当地居民提供就业条件。在不更多侵占自然湿地的基础上提高水产养殖业的经济效益,从而达到提高生态系统服务价值的目的。二,完善生态补偿机制。在不破坏或较少破坏原有湿地生态系统自然结构的基础上,合理利用湿地的物质资源和旅游资源,开展水产养殖、粮食种植和生态旅游,可以提高湿地生态系统服务价值。但是目前的自然湿地面积明显低于最佳保有面积,因此政府必须采取相应的“退耕还湖”和“退渔还湿”政策以保障自然湿地面积。而这一政策的

实施将会损害农民利益,故需要完善生态补偿机制,适当对农民和渔民进行经济补贴,确保其能从政府的环境保护措施中获得与增加的生态系统服务价值相接近的个人收益。

在对南四湖湿地生态系统调节功能的估算中,关于南四湖湿地对区域气候——温度(特别是夏季高温和冬季低温)和湿度的调节作用研究不足,湖泊湿地主要通过蒸散影响区域小气候,其年蒸发量主要取决于年气温和降水,同时蒸发又会影响温度和降水,这是一个相互循环影响的过程,其决定因素复杂多样,需要对这一问题开展更为深入的研究。

参考文献:

- [1] 虞依娜,彭少麟.生态系统服务价值评估的研究进展[J].生态环境学报,2010,19(9):2246-2252.
- [2] SCEP.Man's Impact on the Global Environment;Study of Critical Environmental Problems[M].Massachusetts,USA:MIT Press,1970:196-225.
- [3] HOLDREN J P,EHRLICH P R.Human Population and the Global Environment[J].American Scientist,1974,62(3):282-292.
- [4] 李文华.生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用[M].北京:中国人民大学出版社,2008.
- [5] 林倩,张树深,刘素玲.辽河口湿地生态系统健康诊断与评价[J].生态与农村环境学报,2010,26(1):41-46.
- [6] 陈能汪,王龙剑,鲁婷.流域生态系统服务研究进展与展望[J].生态与农村环境学报,2012,28(2):113-119.
- [7] 沈吉,张祖陆,杨丽原,等.南四湖:环境与资源研究[M].北京:地震出版社,2008.
- [8] 国家林业局.全国湿地资源调查与监测技术规程[M].北京:中国林业出版社,1997:3-4.
- [9] 济宁市南四湖自然保护区管理委员会.山东南四湖自然保护区综合考察报告[M].济南:山东科学技术出版社,2006.
- [10] 刘晃,车轩.中国水产养殖二氧化碳排放量估算的初步研究[J].南方水产,2010,6(4):77-80.
- [11] COSTANZA R,DARGE R,GROOT R.The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital[J].Nature,1997,387(6630):253-260.
- [12] 肖玉,谢高地,鲁春霞,等.稻田生态系统气体调节功能及其价值[J].自然资源学报,2004,19(5):617-623.
- [13] 王苏民,窦鸿身,陈克造,等.中国湖泊志[M].北京:科学出版社,1998:24-25.
- [14] 《中国生物多样性国情研究报告》编写组.中国生物多样性国情研究报告[M].北京:中国环境科学出版社,1998:96-123.
- [15] 陈仲新,张新时.中国生态系统效益的价值[J].科学通报.2000,45(1):17-22.

作者简介:许吉仁(1990—),男,福建厦门人,硕士生,主要研究方向为土地利用与覆盖变化。E-mail:jirenxu@126.com