

温玉玲, 张小林, 魏佳豪, 等. 鄱阳湖环湖区生态系统服务价值时空变化及权衡协同关系 [J]. 地理科学, 2022, 42(7): 1229-1238. [Wen Yuling, Zhang Xiaolin, Wei Jiahao et al. Temporal and spatial variation of ecosystem service value and its trade-offs and synergies in the peripheral region of the Poyang Lake. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(7): 1229-1238.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.07.010

鄱阳湖环湖区生态系统服务价值时空 变化及权衡协同关系

温玉玲¹, 张小林¹, 魏佳豪^{2,3}, 王晓龙^{2,3}, 蔡永久^{2,3}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所/湖泊与环境
国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于修订的当量因子表, 结合 1988—2020 年 7 期土地利用数据, 运用 GIS 数据处理和空间分析等方法探究了鄱阳湖环湖区生态系统服务价值的时空演变特征, 同时引入生态系统服务权衡协同度模型对食物生产、水文调节、土壤保持等 7 项生态服务功能进行权衡与协同分析。结果表明: ① 1988—2020 年鄱阳湖环湖区生态系统服务价值从 577.95 亿元增至 592.50 亿元, 呈先增后减再增的波动变化特征。② 生态系统服务价值的空间分布表现为明显的不均衡性, ESV 显著减少的区域为南昌市区、九江市区以及其它各区县的城镇建成区, 生态系统服务价值增加的区域均匀分布在研究区东北和西北地区以及靠近研究区外侧的东南和西南地区。③ 协同关系为生态系统服务之间的主导关系, 权衡关系较少且主要存在于食物生产与其他服务之间。

关键词: 生态系统服务价值; 生态系统服务权衡协同度; 权衡与协同; 鄱阳湖环湖区

中图分类号: K90 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2022)07-1229-10

生态系统服务(ecosystem services)是指生态系统所形成和维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用, 为人类从生态系统中直接或间接获取的所有收益, 包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务 4 个方面^[1]。20 世纪 90 年代, Daily 和 Costanza 等工作使生态系统服务研究取得了里程碑式的进展^[2]; 此后国内学者欧阳志云等评估了中国陆地生态系统服务功能^[3]; 谢高地基于中国国情通过生物量参数对当量因子表进行多次修正, 制定出“中国陆地生态系统服务价值当量因子表”, 为中国学者研究区域生态系统服务价值提供计算基础, 并在国内得到广泛运用^[4,5]。生态系统服务价值(ecosystem services value, ESV)研究一直以来都是生态学、地理学等相关学科的研究热点, 作为生态安全的重要表征指标, 科学评估生态系统的服务价值, 量化表述其时空演变特征, 对于新时代生态文明建

设、生态安全格局构建有重要意义^[6,7]。

各类生态系统服务之间存在着权衡或协同关系。“权衡”是指不同生态系统服务之间此消彼长, 而“协同”则是指不同生态系统服务同时增强或减少的情形^[8]。正确认知生态系统服务之间的权衡协同关系, 有助于开展多种生态系统服务可持续管理决策, 提高生态管理效率^[9]。近年来有关生态系统服务权衡与协同研究的成果逐渐增多, 在理论研究方面, 研究成果有生态系统服务竞争与协同的基本内涵和主要类型、基于地理学视角的生态系统服务权衡与协同主要议题, 以及生态系统服务权衡的模型方法与研究框架^[10,11]。实证研究方面, 国内外学者多采用统计分析、空间制图、情景模拟等方法, 借助 InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型、CASA(Carnegie-Ames-Stanford approach)模型、ARIES(artificial intelligence

收稿日期: 2021-10-11; **修订日期:** 2021-12-28

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23040203)、国家自然科学基金项目(32071572)资助。[Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA23040203), National Natural Science Foundation of China (32071572).]

作者简介: 温玉玲(1997-), 女, 江西赣州人, 硕士, 主要研究方向为城乡发展与土地利用。E-mail: 1932968186@qq.com

通讯作者: 蔡永久。E-mail: caiyj@niglas.ac.cn

for ecosystem services)模型等对生态系统服务权衡/协同关系的尺度效应、空间格局和作用机制等方面进行研究^[12-17]。系列研究成果主要处于理论分析与模型模拟阶段,从科学认知转化到决策应用的成果案例较少。

部分学者对鄱阳湖地区的生态系统服务评估开展过一定研究,涉及的时间尺度较短,且较少考虑多种生态服务功能间的关系^[18-20]。鉴于此,本研究选取鄱阳湖环湖区为研究对象,采用修订的当量因子表以及 1988—2020 年 7 期土地利用数据,运用 GIS 空间分析技术研究其生态系统服务价值时空演变特征,并利用生态系统服务权衡协同度模型对 7 项生态服务功能进行权衡与协同分析,研究结果以期为鄱阳湖环湖区生态环境保护、可持续发展等提供参考依据。

1 研究区与数据来源

鄱阳湖位于江西省北部、长江中下游南岸,是中国第一大淡水湖,也是长江流域一个重要的过水性、吞吐型、季节性的大型通江湖泊,承担着调洪蓄水、调节气候、降解污染、保护生物多样性等多种生态功能^[21]。鄱阳湖地区属亚热带湿润季风区,气候温和、雨量充沛,年平均降水量 1 542 mm,年平均气温 16.5~17.8℃^[22]。本文的研究区为除鄱阳湖外,包括滨湖的九江市市区、永修县、德安县、共青城市、庐山市、湖口县、都昌县、鄱阳县、余干县、南昌县、进贤县、新建区、南昌市区等 13 区县(市),即确定为“鄱阳湖环湖区”(图 1)。研究区域总面积为 16 931.04 km²,占江西省总面积的 10.14%。

本研究选取 1988 年、1993 年、1999 年、2004 年、2009 年、2014 年、2020 年 7 期 Landsat 系列卫星遥感影像,空间分辨率为 30 m×30 m,影像数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)和美国地质调查局官网(<http://www.usgs.gov/>)。为保证研究内容的准确性,选择的遥感影像对应时间段为 9~11 月份,且云覆盖量均小于 10%。所有影像均经过辐射校正和几何校正、裁剪等数据预处理步骤^[23]。根据中国科学院土地利用覆盖分类体系(<https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=347>),结合研究区实际情况建立耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 个地类。采用支持向量机法(SVM)对研究区进行监督分类以提取土地利用信息,结合 Google Earth 高分辨率遥感影像进行人工

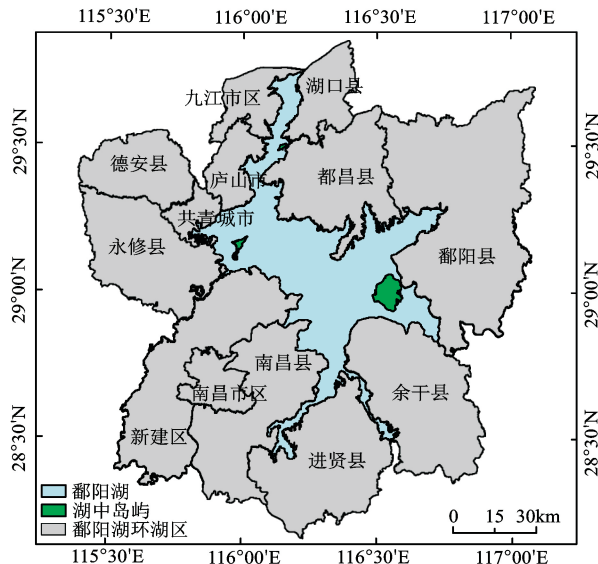


图 1 鄱阳湖环湖区地理位置

Fig.1 Location of the peripheral region of the Poyang Lake

判读,最终获得 7 个年份土地利用分类结果,7 期数据的分类总体精度均高于 92%,能够达到研究要求^[24]。研究区行政边界数据来源于江西省地理信息公共服务平台(<http://www.jx3s.com/>);研究区和全国的粮食价格、单位面积粮食产量等社会经济数据来源于各年份《江西统计年鉴》^[25]、《中国统计年鉴》^[26]和江西省粮食和物质储备局网站(<http://lswz.jiangxi.gov.cn/>)。

GIS 格网尺度法是指用格网点状单元作为指标因子的数据载体和基本评价分析单元的方法^[27]。利用 ArcGIS 软件将 1988 年、1993 年、1999 年、2004 年、2009 年、2014 年和 2020 年 7 期研究区土地利用栅格数据转换为矢量数据,采用 Greate Fishnet 工具构建 1 km×1 km 的格网单元,并将创建的格网与不同时期土地利用类型分布图进行裁剪、相交等工作,最终得到 18 131 个格网单元,统计每个网格中各类土地利用类型的面积、计算得到各网格单元的 ESV,此方法实现了格尺度下土地利用类型空间数据的微观重构,突破了行政尺度的限制^[28]。

2 研究方法

2.1 生态系统服务价值估算

基于谢高地的“中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表”,结合鄱阳湖地区实际生产能力,采用粮食产量修正方法进行修订,将当量基准

由全国农田平均粮食产量调整为研究区的农田平均粮食产量^[5,29]。在没有人力投入情况下, 自然生态系统提供的经济价值是现有农田单位面积提供食物生产服务经济价值的 1/7^[30]; 根据江西省 1988—2020 年主要粮食作物(稻谷、大豆、薯类等)产量、播种面积以及 2020 年江西省主要粮食收购价格, 最终得出研究区 1 个当量因子的经济价值量为 1848.4 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)。将土地利用类型中的耕地、林地、草地、水域、未利用地分别与农田、森林、草地、水体及荒漠 5 类生态系统一一对应, 得到鄱阳湖环湖区单位面积生态系统服务价值系数表(表 1)。

2.2 生态系统服务权衡协同度

生态系统服务权衡协同度(Ecosystem services trade-off degree, ESTD)是建立在数据线性拟合的基础之上, 反映生态系统服务之间相互关系的方法^[31]。计算公式如下:

$$ESCI_i = (ES_{ia} - ES_{ib}) / ES_{ib} \quad (1)$$

$$ESTD_{ij} = (ESCI_i / ESCI_j + ESCI_j / ESCI_i) / 2 \quad (2)$$

式中, ES_{ia} 、 ES_{ib} 分别为 a 、 b 时刻第 i 种生态系统服务的值; $ESCI_i$ 是第 i 种生态系统服务的变化指数(ecosystem services change index, ESCI); $ESCI_j$ 为第 j 种生态系统服务的变化指数; $ESTD_{ij}$ 表示第 i 、 j 种生态系统服务之间的权衡协同度, $ESTD$ 为负值表示第 i 与 j 种生态系统服务为权衡关系, $ESTD$ 为正值表示两者之间为协同关系, $ESTD$ 绝对值的大小反映了权衡/协同水平。

3 生态系统服务价值时空变化

3.1 土地利用类型面积变化

由图 2 可知, 1988—2020 年研究区耕地面积占总面积比例稳居第一, 其中 1993—1999 年耕地面积锐减, 降幅为 14.15%, 主要因为 1998 年长江流域特大洪涝灾害发生后对耕地造成了大量的毁坏, 总体上耕地面积在研究时段内呈波动变化趋势, 共减少了 10 977.11 hm^2 , 变化幅度较小。林地面积在研究时段内增加了 162 459.67 hm^2 , 增幅为 53.44%; 由于江西省政府在鄱阳湖流域实施“封山育林、退耕还林”等政策, 林地面积在 1999—2004 年间增幅高达 65.48%。草地面积总体上在减少, 研究时段内共减少 276 727.46 hm^2 , 减幅为 76.44%。建设用地面积呈逐年增加趋势, 自 2009 年起鄱阳湖生态经济区上升为国家战略以来, 研究区内建设面积增加了 79 091.15 hm^2 , 增幅高达 65.40%。

3.2 生态系统服务价值时间变化

鄱阳湖环湖区生态系统服务价值从 1988 年的 577.95 亿元增至 2020 年的 592.50 亿元, 增幅为 2.52%, 研究期内呈先增后减再增的波动变化特征(表 2)。从生态系统服务价值总体组成来看, 整个研究时段内水域的 ESV 最大, 其次是林地和耕地。从 ESV 变化来看, 整个研究时段 ESV 变化的主要贡献因子为水域, 其次为草地和林地。1988—1999 年研究区总 ESV 增加 101.58 亿元, 主要由于水域和林地 ESV 分别增加 67.19 亿元和 23.16 亿元;

表 1 鄱阳湖环湖区各类土地生态系统服务价值系数(ESV)/[元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]

Table 1 Ecosystem service value coefficients of land in the peripheral region of the Poyang Lake/[yuan/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]

一级类型 服务功能	二级类型 服务功能	土地利用类型				
		耕地	林地	草地	水域	未利用地
供给服务	食物生产	2042.49	466.72	554.52	1478.72	0.00
	原料生产	452.86	1072.07	822.54	425.13	0.00
	水资源供给	-2412.16	554.52	452.86	15323.24	0.00
调节服务	气体调节	1645.08	3525.82	2874.27	1423.27	36.97
	气候调节	859.51	10549.74	7606.17	4232.84	0.00
	净化环境	249.53	3091.45	2513.82	10258.62	184.84
	水文调节	2763.36	6903.77	5572.93	188980.4	55.45
支持服务	土壤保持	961.17	4292.91	3502.72	1719.01	36.97
	维持养分循环	286.50	328.09	268.02	129.39	0.00
	生物多样性	314.23	3909.37	3188.49	4713.42	36.97
文化服务	美学景观	138.63	1714.39	1404.78	3493.48	18.48
合计		7301.18	36408.86	28761.10	232177.50	369.68

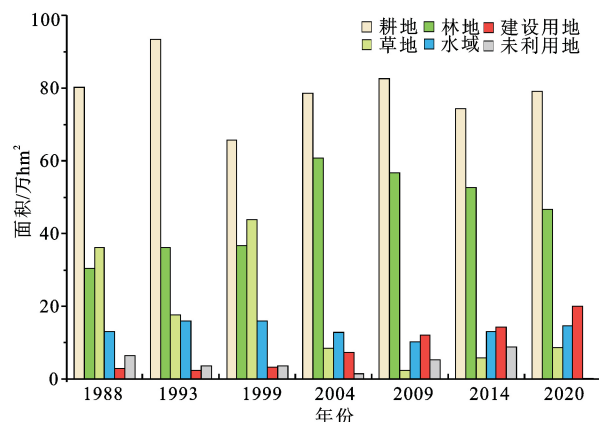


图2 1988—2020年鄱阳湖环湖区各类用地面积

Fig.2 Area of various types of land in the peripheral region of the Poyang Lake from 1988 to 2020

1999—2009年总ESV出现显著下降, 主要原因为草地和水域的ESV大量减少; 2009—2020年受水域和草地ESV持续增加的影响, 总ESV出现显著增加。

分析各单项生态系统服务价值及变化(表3), 结果表明, 研究时段内鄱阳湖环湖区提供的调节服务功能最大, 占总ESV比例均大于77%, 其次为支持服务功能, 历年间占比在12%左右, 供给服务功能占比稳定在6%左右, 文化服务功能最小, 占比不足3%。其中, 调节服务功能主要来源于水文调节, 支持服务功能主要来源于水土保持及生物多样性, 供给服务功能主要来源于食物生产。1988—1999年, 除食物生产的生态系统服务价值减少, 其

表2 1988—2020年鄱阳湖环湖区各地类生态系统服务价值及变化

Table 2 Variation of ecological service value in the peripheral region of the Poyang Lake from 1988 to 2020

土地利用类型	ESV/亿元							变化幅度/%
	1988年	1993年	1999年	2004年	2009年	2014年	2020年	1988—2020年
耕地	58.60	68.27	47.90	57.29	60.35	54.32	57.80	-1.37
林地	110.69	131.64	133.85	221.50	206.11	191.85	169.84	53.44
草地	104.12	50.84	126.13	24.30	6.74	16.83	24.53	-76.44
水域	304.31	368.85	371.50	296.96	240.44	304.62	340.33	11.84
未利用地	0.24	0.14	0.14	0.06	0.19	0.33	0.01	-96.08
合计	577.95	619.74	679.53	600.11	513.83	567.95	592.50	2.52

注: ESV为生态系统服务价值。

表3 1988—2020年鄱阳湖环湖区单项生态系统服务价值变化/亿元

Table 3 Changes of secondary ecological service value in the peripheral region of the Poyang Lake from 1988 to 2020/100 million yuan

生态系统一级服务功能	生态系统二级服务功能	ESV						
		1988年	1993年	1999年	2004年	2009年	2014年	2020年
供给服务	食物生产	21.76	24.11	19.91	21.23	21.19	19.92	20.99
	原料生产	10.43	10.24	11.20	11.31	10.45	10.06	9.91
	水资源供给	4.05	4.60	12.72	4.43	-0.82	5.34	6.34
调节服务	气体调节	36.22	35.48	38.65	38.61	35.72	34.40	34.01
	气候调节	72.05	66.35	84.55	82.77	72.99	71.99	68.71
	净化环境	34.07	34.32	40.51	36.04	30.87	33.24	33.58
	水文调节	311.07	360.90	370.36	310.11	258.96	308.20	335.84
支持服务	水土保持	35.72	33.44	40.21	38.82	34.87	34.11	33.14
	维持养分循环	4.44	4.54	4.47	4.64	4.42	4.19	4.22
	生物多样性	32.15	30.21	37.97	34.98	30.38	31.02	30.35
文化服务	美学景观	16.00	15.53	18.97	17.18	14.81	15.49	15.41

注: ESV为生态系统服务价值。

余 10 项的生态服务价值均增加,与总 ESV 变化趋势一致。1999—2009 年各单项生态服务功能变化趋势与前一时段相反,食物生产的生态系统服务价值增加了 6.34%,其它单项生态服务价值与总 ESV 变化一致,按不同程度减少。2009—2020 年,原料生产、气体调节、气候调节、土壤保持和维持养分循环提供的 ESV 显著减少,受研究区水域面积扩张的影响,水文调节和水资源供给服务价值大幅增加,最终研究区总 ESV 明显增加。

3.3 生态系统服务价值空间变化

基于每个格网的 ESV 进行 Kriging 插值,得到 1988 年、1993 年、1999 年、2004 年、2009 年、2014 年和 2020 年 7 期生态服务价值空间分布情况(图 3)。由图可知,1988—2020 年研究区生态系统服务价值的空间分布特征与土地利用类型的关系极为密切。5 河(赣江、抚河、修水、饶河、信江)水系主干道、研究区北部的长江以及大型湖泊水库(军山湖、康山湖、珠湖等)的生态服务价值远远高于其他地区,其原因因为水域的单位面积生态服务价值最大,直接导致了在单个格网范围内总生态服务价值的增大;其中,水文调节、水资源供给和净化环境功能为军山湖、康山湖、珠湖等区域的主要生态服务

功能,三者之和占区域总生态服务功能比例均在 92% 以上。研究区外围的东部和西部山地丘陵地区,这里土地利用类型多以林地、草地为主,生态服务价值也较高。低值区主要出现在研究区内侧滨湖平原地区以及研究区外围的南部地区,滨湖平原地区土地利用类型以耕地占主导,生态服务价值较低;研究区南部区域形成了以南昌为核心的都市区,土地利用类型以建设用地为主,故生态服务价值最低。

计算 1988—2020 年鄱阳湖环湖区生态系统服务价值变化指数(ESCI),对比 1988 和 2020 年 2 期土地利用类型图,以分析生态系统服务增益($ESCI > 0$)和减损($ESCI < 0$)的空间分布特征(图 4)。大部分区域的 ESV 变化指数大于 0,生态系统服务价值呈增加状态,主要位于研究区北部的滨湖岸带,均匀分布在研究区东北和西北地区,以及靠近研究区外侧的东南和西南地区,ESV 增加的区域主要为林地、草地面积增加的位置。ESV 显著减少的区域为建设用地扩张强度最大的地区,包括研究区北部九江市区、西南部南昌市区以及其他城镇建成区,受城镇化影响大量耕地、草地、未利用地转化为建设用地,导致这些区域的生态服务价值显著减少。研究区内侧新建区和南昌县的北部生态系统

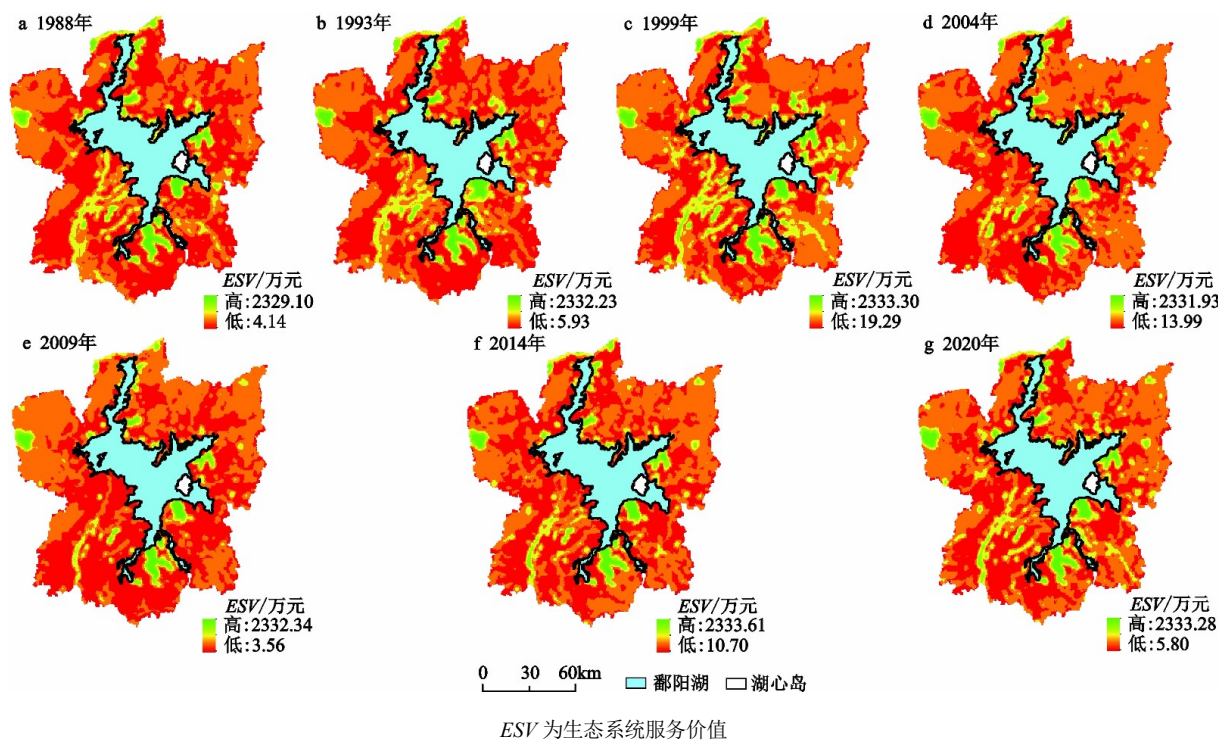


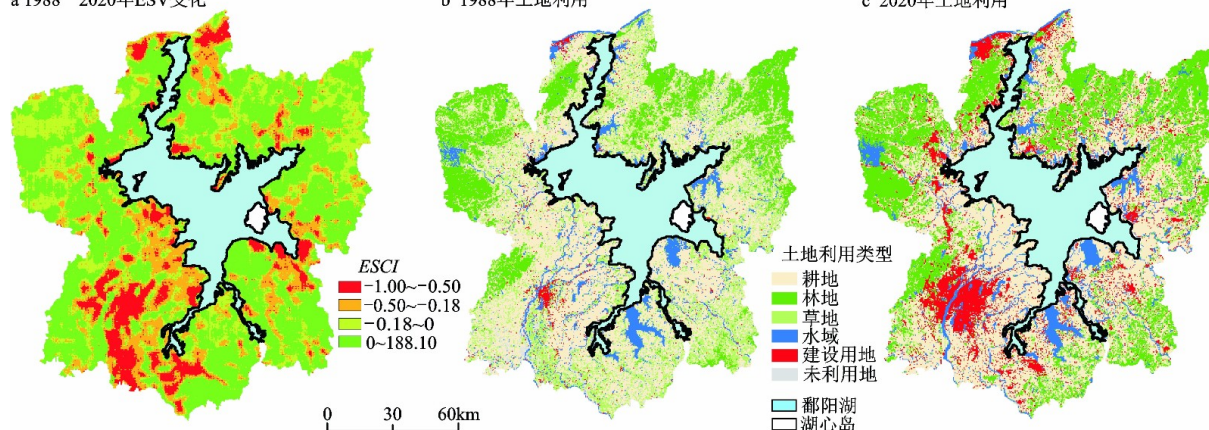
图 3 1988—2020 年鄱阳湖环湖区生态系统服务价值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem service value in the peripheral region of the Poyang Lake from 1988 to 2020

a 1988—2020年ESV变化

b 1988年土地利用

c 2020年土地利用



ESCI 为态系统服务价值变化指数

图 4 1988—2020 年鄱阳湖环湖区 ESV 变化指数及土地利用类型

Fig.4 ESV change rate and land use type of the peripheral region of the Poyang Lake from 1988 to 2020

服务价值也呈减少状态,究其原因发现这些地方大量的草地转化为了耕地,而耕地的单位面积 ESV 小于草地单位面积 ESV,表现为 ESV 的减少。

4 生态系统服务权衡协同关系分析

选取占总生态服务功能比重较大的 7 项生态服务功能(食物生产、气体调节、气候调节、净化环境、水文调节、水土保持、生物多样性)

境、水文调节、水土保持、生物多样性)进行权衡与协同分析,以量化不同时间段内单项生态服务功能之间相互作用的程度和方向。

结果表明(图 5),1988—1999 年各生态系统服务之间组成 21 组值,其中 6 组值为负,15 组值为正,协同关系占 71.43%,表明该时段内协同关系为鄱阳湖环湖区生态系统服务之间的主导关系。协同

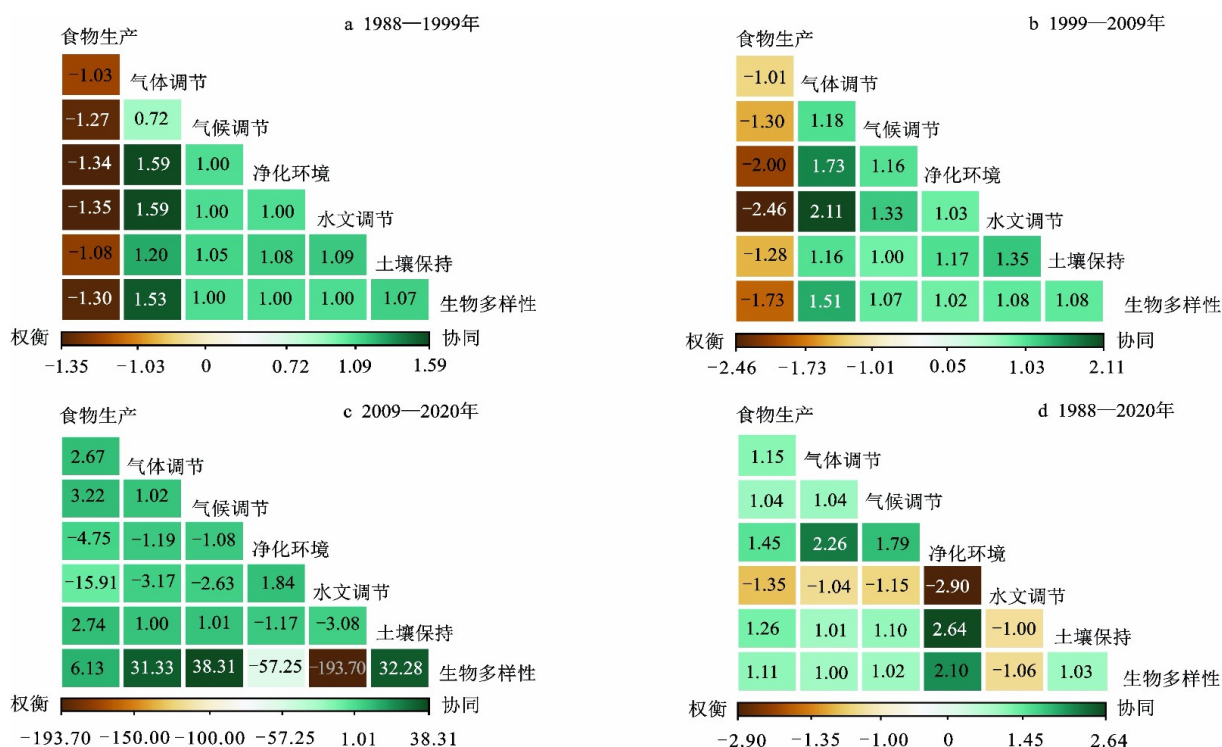


图 5 1988—2020 年各生态系统服务权衡与协同关系

Fig.5 Trade-offs and synergies between ecosystem service from 1988 to 2020

关系存在于调节服务、支持服务内部及调节服务与支持服务之间,权衡关系存在于食物生产与其余项生态系统服务功能之间。1999—2009 年,研究区生态系统服务之间的权衡协同关系与 1988—1999 年一致,权衡关系仍存在于食物生产与其余 6 项生态系统服务功能之间。协同关系中,气体调节与水文调节的协同度最高(2.11),气候调节与土壤保持的协同度最低(1.00)。2009—2020 年研究区生态系统服务之间相互作用的程度和方向均有所改变,权衡关系增至 10 组,协同关系为 11 组。生态系统服务权衡协同度的极值增大,其中水文调节与生物多样性、净化环境与生物多样性、食物生产与水文调节均表现为强权衡关系;协同关系中生物多样性功能与气候调节、气体调节、土壤保持功能均表现为强协同关系。1988—2020 年,除水文调节功能外,其余生态系统服务功能之间均为协同关系,权衡协同关系较弱,极值较小。

近 32 a 来食物生产提供的生态服务功能价值较高,然而受人类扰动的影响,在地表裸露、不合理的耕作方式下易形成水土流失,导致生态系统的调节能力较低,因此 1988—1999 年和 1999—2009 年 2 个时段内食物生产功能与调节服务功能、土壤保持和生物多样性功能均表现为权衡关系。水体起净化环境和调节气候等作用,2009—2020 年研究区水域面积大幅增加,从而提高了水文调节和净化环境的生态服务功能价值,从而表现为二者与其余生态服务功能间为强权衡关系。水体通过蒸发成为水蒸气,然后又以降水的形式降到周围地区,起到了调节气候的作用,自然降雨又会促进植被的生长,进而保持水土、涵养水源,因此气候调节与生物多样性、土壤保持间呈较强的协同关系。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文基于修订的当量因子表探讨了鄱阳湖环湖区 1988—2020 年 ESV 时空变化及生态系统服务之间的权衡协同关系,结果表明:

1) 1988—2020 年鄱阳湖环湖区生态系统服务价值从 577.95 亿元增至 592.50 亿元,呈先增后减再增的波动变化特征。整个研究时段内水域的 ESV 最大,其次是林地和耕地。从单项生态服务功能来看,研究时段内调节服务功能最大,占总 ESV

比例均大于 77%。

2) 研究区生态系统服务价值的空间分布特征与土地利用类型的关系极为密切。水资源丰富区域的生态服务价值最高,建设用地集中连片区的生态服务价值最低。在空间变化上,ESV 显著减少的区域为建设用地扩张强度最大的地区,主要为以南昌市为核心的城市圈、九江市区、以及其它各区县的城镇建成区;ESV 增加的区域均匀分布在研究区东北和西北地区、以及靠近研究区外侧的东南和西南地区。

3) 权衡协同关系表明,研究时段内协同关系为生态系统服务之间的主导关系,权衡关系较少且主要存在于食物生产与其他服务之间。1988—1999 年和 1999—2009 年 2 个时段内除食物生产功能外,其余 6 项生态系统服务功能间均表现为协同关系,2009—2020 年各项生态系统服务之间相互作用的程度和方向有所改变,权衡协同度的极值增强。

5.2 讨论

生态系统服务间的权衡协同关系深刻影响着区域生态环境保护与经济的平衡发展,对于协调多元目标、最大化人类福祉、支撑社会-生态系统可持续利用具有重要的作用^[32]。制定科学、合理、具有实践指导作用的决策来避免消极的权衡关系、促进积极的协同关系具有重要的现实意义。建议未来生态系统服务管理需突破行政区划限制,实施鄱阳湖地区生态系统服务一体化管理,限制主要河湖水域周边的农业开发利用,保护其主导性的调节服务和生物多样性功能。研究区内城镇建成区周边的用地类型主要为耕地,应考虑保护其重要农作物生产服务功能,严格限制城镇建设用地扩张对农业用地的占用。此外,需要加强生态资源保护和修复,通过科技进步提高耕地产粮效率,大力发展绿色农业,走农业生产活动与生态环境保护协调发展之路,同时应加强生态补偿,强化区域粮食安全与生态安全责任。

参考文献(References):

- [1] Daily G C. Nature's service: Societal dependence on natural ecosystems (4th ed)[M]. Washington D C: Island Press, 1997: 49-68.
- [2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [3] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.

- [Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. A preliminary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607-613.]
- [4] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919. [Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia et al. An expert knowledge-based approach to ecosystem service valuation. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919.]
- [5] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming et al. Improvement of ecosystem service value method based on unit area value equivalent factor. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [6] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 等. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式[J]. *地理学报*, 2011, 66(12): 1618-1630. [Li Shuangcheng, Liu Jinlong, Zhang Caiyu et al. Dynamics of ecosystem services research and geographical research paradigm. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(12): 1618-1630.]
- [7] 魏强, 席增雷, 苏寒云, 等. 曹妃甸滨海湿地生态系统支持服务价值空间分异研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(5): 890-899. [Wei Qiang, Xi Zenglei, Su Hanyun et al. Spatial differentiation of support service value of coastal wetland ecosystem in Caofeidian. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(5): 890-899.]
- [8] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架[J]. *地理研究*, 2016, 35(6): 1005-1016. [Dai Erfu, Wang Xiaoli, Zhu Jianjia et al. Ecosystem service tradeoffs: methods, models and research frameworks. *Geographical Research*, 2016, 35(6): 1005-1016.]
- [9] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 等. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策[J]. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973. [Peng Jian, Hu Xiaoxu, Zhao Mingyue et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(6): 960-973.]
- [10] 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 等. 生态系统服务竞争与协同研究进展[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 5219-5229. [Li Peng, Jiang Lu-guang, Feng Zhiming et al. Research progress on competition and synergy of ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5219-5229.]
- [11] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J]. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379-1390. [Li Shuangcheng, Zhang Caiyu, Liu Jinlong et al. Advances in ecosystem service tradeoffs and synergies and issues in geography. *Geographical Research*, 2013, 32(8): 1379-1390.]
- [12] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 等. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. *地理学报*, 2017, 72(11): 2064-2078. [Wang Pengtao, Zhang Liwei, Li Yingjie et al. Temporal and spatial characteristics of ecosystem service tradeoffs and synergies in the upper reaches of the Han River. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 2064-2078.]
- [13] Butler J R A, Wong G Y, Metcalfe D J et al. An analysis of trade-offs between multiple ecosystem services and stakeholders linked to land use and water quality management in the Great Barrier Reef, Australia[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 180: 176-191.
- [14] Meehan T D, Gratton C, Diehl E et al. Ecosystem-service trade offs associated with switching from annual to perennial energy crops in riparian zones of the US Midwest[J]. *PLoS One*, 2013, 8(11): e80093.
- [15] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9. [Fu Bojie, Yu Dandan. Ecosystem services tradeoff and integration approach. *Resources Science*, 2016, 38(1): 1-9.]
- [16] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 等. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达[J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5465-5477. [Yu Yuyang, Li Jing, Zhou Zixiang et al. Expression of multi-scale ecosystem service tradeoff synergistic relationship in Qinling-Bashan Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5465-5477.]
- [17] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J]. *地理学报*, 2018, 73(5): 868-879. [Qian Caiyun, Gong Jie, Zhang Jinqian et al. Changes, tradeoffs and synergies of ecosystem services in Bailong River Basin, Gansu Province. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 868-879.]
- [18] 涂小松, 龙花楼. 2000-2010年鄱阳湖地区生态系统服务价值空间格局及其动态演化[J]. *资源科学*, 2015, 37(12): 2451-2460. [Tu Xiaosong, Long Hualou. Spatial pattern and dynamic evolution of ecosystem service value in Poyang Lake region from 2000 to 2010. *Resources Science*, 2015, 37(12): 2451-2460.]
- [19] 赵志刚, 余德, 韩成云, 等. 2008-2016年鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值的时空变化研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(2): 198-208. [Zhao Zhigang, Yu De, Han Chengyun et al. Temporal and spatial changes of ecosystem service value in Poyang Lake Ecological Economic Zone from 2008 to 2016. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(2): 198-208.]
- [20] 冉凤维, 罗志军, 吴佳平, 等. 鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 995-1004. [Ran Fengwei, Luo Zhijun, Wu Jiaping et al. Spatial and temporal patterns of ecosystem service tradeoffs and synergies in Poyang Lake region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 995-1004.]
- [21] 万荣荣, 杨桂山, 王晓龙, 等. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(1): 1-8. [Wan Rongrong, Yang Guishan, Wang Xiaolong et al. Research progress on the relationship between lakes and lakes in the middle reaches of the Yangtze River. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(1): 1-8.]
- [22] 陈旻坤, 徐昔保. 近30年来鄱阳湖生态系统服务变化[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(1): 309-318. [Chen Minkun, Xu Xibao. Changes of ecosystem services in Poyang Lake in recent 30 years. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(1): 309-318.]

- [23] Zhu Zhe, Woodcock C E, Holden C et al. Generating synthetic Landsat images based on all available Landsat data: Predicting landsat surface reflectance at any given time[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162: 67-83.
- [24] 邓书斌, 陈秋锦, 社会建, 等. ENVI遥感图像处理方法(第2版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 134-147. [Deng Shubin, Chen Qiujing, She Huijian et al. ENVI remote sensing image processing method. Beijing: Higher Education Press, 2014: 134-147.]
- [25] 江西省统计局. 江西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1989-2021. [National Bureau of Statistics of Jiangxi Province. Jiangxi statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press, 1989-2021.]
- [26] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999-2021. [National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press, 1999-2021.]
- [27] 侯孟阳, 姚顺波, 邓元杰, 等. 格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征——基于退耕还林工程的实施背景[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 539-552. [Hou Mengyang, Yao Shunbo, Deng Yuanjie et al. Spatial-temporal evolution pattern and differentiation characteristics of ecological service value in Yan'an City at grid scale—Based on the implementation background of the project of converting farmland to forest. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(3): 539-552.]
- [28] 乔斌, 祝存兄, 曹晓云, 等. 格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1660-1672. [Qiao Bin, Zhu Cunxiong, Cao Xiaoyun et al. Spatial autocorrelation analysis of land use and ecosystem service value in Maduo County, Qinghai Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(5): 1660-1672.]
- [29] 徐丽芬, 许学工, 罗涛, 等. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法——以渤海湾沿岸为例[J]. *地理研究*, 2012, 31(10): 1775-1784. [Xu Lifen, Xu Xuegong, Luo Tao et al. An equivalent revision method of ecosystem services value based on land use: A case study of Bohai Bay Coast. *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1775-1784.]
- [30] 刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(12): 3311-3319. [Liu Guilin, Zhang Luocheng, Zhang Qian. Effects of spatial-temporal change of land use on ecosystem service value in the Yangtze River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3311-3319.]
- [31] Gong Jie, Liu Dongqing, Zhang Jinxi et al. Tradeoffs/synergies of multiple ecosystem services based on land use simulation in a mountain-basin area, western China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 283-293.
- [32] 张碧天, 闵庆文, 焦雯珺, 等. 生态系统服务权衡研究进展与展望[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 1-16. [Zhang Bitian, Min Qingwen, Jiao Wenjun et al. Progress and prospects of ecosystem service tradeoffs. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 1-16.]

Temporal and Spatial Variation of Ecosystem Service Value and Its Trade-offs and Synergies in the Peripheral Region of the Poyang Lake

Wen Yuling¹, Zhang Xiaolin¹, Wei Jiahao^{2,3}, Wang Xiaolong^{2,3}, Cai Yongjiu^{2,3}

(1. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment/Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: It is of great significance to study the temporal and spatial variation characteristics of ecosystem services value (ESV) and the trade-offs and synergies among various services to realize the coordinated development of regional ecology and economy. Based on the revised equivalent factor table and combined with the land use data of 7 periods from 1988 to 2020, the study of spatio-temporal evolution characteristics of ecosystem services value (ESV) in the peripheral region of the Poyang Lake is explored by data processing and spatial analysis of GIS technology. At the same time, the ecosystem service trade-offs and synergies model is introduced to analyze the trade-offs and synergies of seven ecosystem service functions. The results show that: 1) From 1988 to 2020, the ecosystem service value in the peripheral region of the Poyang Lake increased from 57.79 billion yuan to 59.25 billion yuan, showing the fluctuation characteristics of first increasing, then decreasing and then increasing. During the whole study period, ESV of water area is the largest, followed by woodland and arable land. The main contributing factors of ESV change are water area, grassland and woodland. From the perspective of single ecological service value, the regulation service value is the largest during the study period, accounting for more than 77% of the total ESV. 2) The spatial distribution characteristics of ecosystem service value in the study area are closely related to land use types. In recent 32 years, the spatial distribution of ecological service value in the study area has shown obvious imbalance. The area with the highest ecological service value is the area with abundant water resources, and the area with the lowest ecological service value is the contiguous area with concentrated construction land. ESV significantly decreased in areas with the greatest intensity of construction land expansion, including Nanchang urban area, Jiujiang urban area, and urban built-up areas of other districts and counties. The areas with increased ESV are evenly distributed in the northeast and northwest of the study area, as well as the southeast and southwest near the outside of the study area. 3) In the study period, the synergistic relationship is the dominant relationship among ecosystem services, while the number of the trade-off's relationship is small and mainly existed between food production and other services. The results indicate that there is conflict between food production and environmental protection, and there is competition between cultivated land and other land use patterns in the study area. During 1988-1999 and 1999-2009, the other six ecosystem services showed synergistic relationship except for food production service. From 2009 to 2020, the degree and direction of interaction among ecosystem services have changed, and the maximum value of trade-offs and synergies have increased. The trade-offs and synergies between ecosystem services has a profound impact on the balanced development of regional ecological environment protection and economy. Moreover, trade-offs and synergies play an important role in coordinating multiple goals, maximizing human well-being and supporting the sustainable use of social-ecosystems. The research results can provide reference information for promoting the coordinated development of ecological environment protection and economy in the peripheral region of Poyang Lake.

Key words: ecosystem services value (ESV); ecosystem services trade-off degree (ESTD); trade-offs and synergies; the peripheral region of the Poyang Lake