

多情景模拟下南四湖流域生态系统服务权衡变化研究

王冰玉¹, 孙小银^{1,2}, 单瑞峰^{1,3*}, 田文¹, 黄茹婷¹

¹曲阜师范大学地理与旅游学院, 山东 日照

²南四湖湿地生态与环境保护山东省高校重点实验室, 山东 日照

³济宁市陆地生态修复重点实验室, 山东 日照

收稿日期: 2024年1月4日; 录用日期: 2024年2月23日; 发布日期: 2024年2月29日

摘要

南四湖是中国第六大湖, 也是南水北调东线工程的重要调水区。本文利用InVEST模型、生态效益评估方法和情景模拟法, 通过分析区域典型生态系统服务间的相互关系, 模拟多种生态管理情景下的土地利用变化, 以预测其对生态系统服务价值及其作用关系的影响。研究表明: 五种模拟情景下, 生境质量和授粉服务的变化程度最大; 城市自然增长情景与四种生态保护情景下生态系统服务间的相互关系变化相差较大, 但是在四种生态保护情景里各服务间的相互关系相差较小; 滨岸带退耕还林生态保护情景下总体效益最佳, 南四湖流域未来规划应偏向滨岸带退耕还林生态保护情景。

关键词

南四湖流域, 土地利用, 情景分析, 生态系统服务, 相互关系

Study on Ecosystem Service Trade-Offs Change in Nansihu Lake Basin under Multi-Scenario Simulation

Bingyu Wang¹, Xiaoyin Sun^{1,2}, Ruifeng Shan^{1,3*}, Wen Tian¹, Ruting Huang¹

¹College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao Shandong

²Key Laboratory of Nansihu Lake Westland Ecological Conservation & Environmental Protection (Shandong Province), Rizhao Shandong

³Key Laboratory of Terrestrial Ecological Remediation in Jining City, Rizhao Shandong

Received: Jan. 4th, 2024; accepted: Feb. 23rd, 2024; published: Feb. 29th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 王冰玉, 孙小银, 单瑞峰, 田文, 黄茹婷. 多情景模拟下南四湖流域生态系统服务权衡变化研究[J]. 地理科学研究, 2024, 13(1): 57-69. DOI: 10.12677/gser.2024.131007

Abstract

Nansi Lake is the sixth largest lake in China, and it serves as a crucial water diverting lake for the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project. This study utilizes the InVEST model, ecological benefit assessment methods, and scenario simulation to analyze the interrelationships among typical ecosystem services in the region, simulating land use changes under various ecological management scenarios to predict their impact on the value of ecosystem services and their interrelationships. The results show that habitat quality and pollination services change the most under five simulated scenarios; the interrelationship changes among ecosystem services under the urban natural growth scenario and four ecological protection scenarios are significantly different, but the differences in interrelationships among services within the four ecological protection scenarios are minor; the overall benefits are best under the scenario of returning farmland to forest in the riparian zone, suggesting that future planning for the Nansi Lake basin should favor this ecological protection scenario.

Keywords

Nansihu Lake Basin, Land Use, Scenario Analysis, Ecosystem Services, Interrelationships

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

生态系统服务是人类直接或间接地从生态系统中获得的各种惠益，是连接自然系统与人类社会的桥梁[1] [2]。研究发现，受区域内气候要素、立地条件和人类活动的共同影响，各种生态系统服务之间表现出正向或负向的相关性。例如，吕乐婷等人[3]运用 InVEST 模型的产水量模块，对 1980 年至 2015 年期间的气候、土地利用等因素对产水量的影响进行了探究，发现产水量的变化是受到气候变化和土地利用的交互影响。此外，生态系统服务间存在着复杂而相互依赖的关系，即此消彼长的权衡或共同增益的协同作用[4] [5] [6]。例如，生境质量与粮食生产之间普遍存在权衡关系[7]，植被净初级生产力与土壤保持普遍为协同关系[8]。生态系统服务间存在着类似的复杂关系，不合理的生态管理和政策制度可能会加剧生态系统的退化[9] [10]，如农业生产中大量使用杀虫剂或化肥来提高粮食生产的同时，往往会导致生物多样性丧失与水质污染等问题[11]；在山地农业区开垦坡地种植农作物，粮食产量的提高常常会以土壤侵蚀的加剧为代价[12]。因此，厘清多个生态系统服务间的交互关系及其影响要素有助于实施生态系统服务优化和管理[13] [14]，对促进区域多种生态系统服务总体效益最优、实现区域社会经济协调发展具有重要意义[15]。此外，社会经济和生态的稳定在促进区域协调和可持续发展方面具有深远的意义。如今，生态系统服务之间权衡和协同关系成为生态学家、地理学家、利益相关者等共同关注的研究议题，国内外学者借助 InVEST [16]、CA-Markov [17]、SWAT [18]等模型，采用统计分析法、空间分析法及情景模拟法等多样化的研究方法探讨生态系统服务权衡与协同关系在尺度效应[19] [20]、空间格局[21]、驱动机制[22]和场景模拟[23]等方面的复杂性。

南四湖位于中国华北地区，是该地区最大的内陆淡水湖，同时也被誉为山东省最大的淡水渔业宝库。南四湖的生态服务不仅限于为当地提供丰富的渔业资源，同时在调节水文、净化环境、供给水资源等方

面具有显著的效益[24]。然而,快速城镇化的不断推进,导致南四湖流域的土地利用结构发生了重大变化,这一变化致使该地区生态系统服务价值发生改变,同时也凸显了人地矛盾的逐渐加深[25]。因此,基于土地利用类型和结构的变化,深入研究南四湖流域生态系统服务间相互关系的变化,采用模拟方法探讨在不同情景下各类生态系统服务的表现,从而为决策者提供清晰而直观的信息,提高决策的准确性和可行性,为南四湖流域的可持续发展提供有力的指导。

2. 研究区概况与数据来源

2.1. 研究区概况

南四湖位于山东省西南部,北纬 $34^{\circ}15' \sim 34^{\circ}53'$ 和东经 $114^{\circ}50' \sim 117^{\circ}48'$ 之间,全流域跨山东省、河南省、江苏省和安徽省四个省份。作为华北地区最大的淡水湖,南四湖在地区生态系统中扮演着重要的角色,同时也是山东省的关键水源地和生态宝库。南四湖流域作为典型的农业流域,耕地面积占比高达 69%,是流域内主要的土地利用类型。地形上,南四湖流域呈现出多样的特征,地势东高西低(图 1)。气候方面,该流域属于暖温带半湿润地区,表现出明显的暖温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同期。南四湖流域是我国重要的湿地保护区,其丰富湿地环境为各类生物提供了良好的栖息地。流域地下矿产资源丰富,在能源需求方面发挥着关键作用。此外,南四湖流域还以其广泛的耕地面积和适宜的气候条件成为粮棉生产基地,农业活动的发展不仅为当地经济注入活力,也为国内粮食和棉花产量做出了贡献。总之,南四湖流域多元化的资源特征使其在湿地保护、农业生产、渔业和能源方面发挥着重要的战略作用。

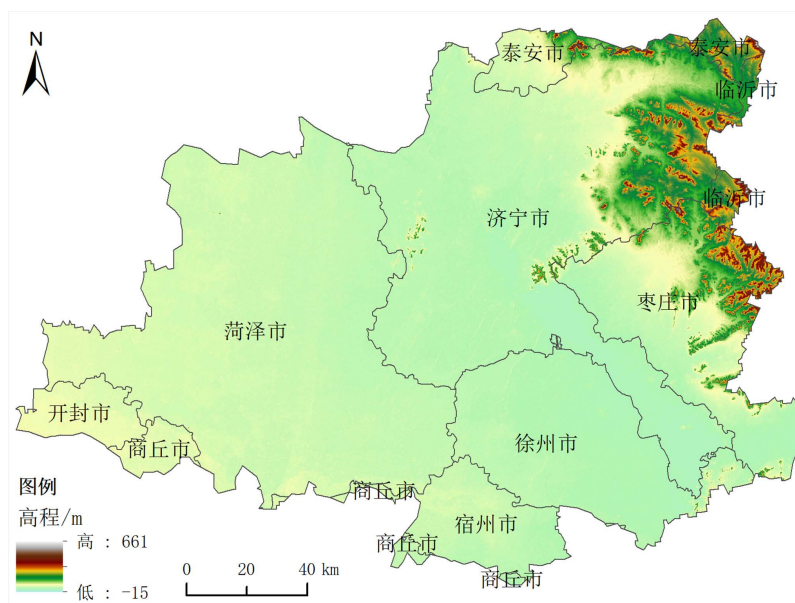


Figure 1. Overview of the the Nansihu Lake basin study area

图 1. 南四湖流域研究区概况

2.2. 数据来源

本研究所采用的数据涵盖多个方面,包括土地利用地图、气象数据、土壤分布数据、数字高程模型(DEM)等社会数据(表 1)。研究采用的流域 2018 年土地利用数据(1:10 万),分辨率为 30 m,由中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)提供。本研究参考刘纪远提出的中国土地资源分类系统,将土地利用划为六个一级地类。数字高程模型(DEM)数据的来源是美国马里兰大学全球土地覆被数据库

(<https://glad.umd.edu/>), 分辨率为 30 m。气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。土壤数据包括了最大根系深度、土壤沙粒、粉粒、黏粒和有机质含量等参数, 来自世界土壤数据库(HWSD)中的中国土壤数据集(1:100 万)。行政区划矢量数据来自全国基础地理数据(1:400 万)。

Table 1. Data source in this study

表 1. 本研究数据来源

名称	类型	分辨率/比例	数据来源
2018 年土地利用数据	矢量	30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/)
DEM 数据	栅格	30 m	美国马里兰大学全球土地覆被数据库 (https://glad.umd.edu/)
气象数据	栅格	30 m	中国气象数据网(http://data.cma.cn/)
土壤数据	栅格	1 km	世界土壤数据库(HWSD)
行政区划数据	矢量	1 km	全国基础地理数据
社会经济数据	文本	-	中国统计年鉴

3. 研究方法

3.1. 生态系统服务分类和价值评估

在 InVEST 模型中测算南四湖流域的六种生态系统服务, 评价方法见表 2。参数的设置和校验参照了 InVEST 模型使用手册和课题组前期成果[6]。通过合理的参数设置, 确保了模型对于南四湖流域的适用性和准确性。

Table 2. Selected ESs and their evaluation indicators in this study

表 2. 本研究选取的生态系统服务及其评价指标

生态系统服务	指标	单位	评价方法
产水量	产水量	mm	InVEST - Water Yield
水质净化(N 输出)	氮输出	kg	InVEST - Nutrient delivery ratio model
水质净化(P 输出)	磷输出	kg	InVEST - Nutrient delivery ratio model
土壤保持	泥沙输出	t	InVEST - Sediment export
碳存储	碳存储	Mg	InVEST - Carbon storage and sequestration
生物多样性维持	生境质量		InVEST - Habitat quality
授粉	相对授粉潜力		InVEST - Crop pollination

3.2. 生态效益评估方法

为了深入了解生态系统服务对区域可持续发展的贡献, 本研究构建了一套流域生态系统服务效益评估方法。即对数据进行标准化, 这一步骤有助于消除不同生态系统服务数据之间的单位差异, 使得评估更具科学性, 为决策者提供更为可靠的信息。

3.3. 2050 年城市自然增长模拟

本研究考虑到城市化进程和现有土地政策的影响, 故而采用 CLUE-S 模型进行土地利用的模拟。基

于研究区 1975 年和 2018 年的土地利用数据, 预测了南四湖流域在城市自然扩张背景下 2050 年的土地利用情况。

3.4. 情景模拟分析

本研究采用多种土地利用情景模拟, 设定 2050 年社会经济发展现状和生态保护目标, 通过模拟相应的土地利用情景作为背景变量, 进行五种情景的设定, 旨在更为全面地考虑不同土地利用决策对生态系统服务的潜在影响, 进而深入了解各种土地利用模拟情景下生态系统服务之间的相互作用关系, 情景设定见表 3。

Table 3. Selected five scenarios and their simulation methods

表 3. 五种情景的设定及模拟方法

情景模拟		情景介绍
情景 1	城市自然增长场景	自然增长情景下城市扩张的预测基于 1975 年至 2015 年土地利用发展趋势以及当前土地利用政策信息。
情景 2	山区耕地退耕还林生态保护情景	水土保持法规定, 对于 25° 以上的陡坡地区, 禁止开垦耕种农作物。因此, 对 25° 以上的陡坡地区的耕地进行提取, 并替换为林地。
情景 3	滨岸带退耕还林生态保护情景	根据相关研究[26], 在河流两侧 1000 m 的缓冲区范围内, 植被能够有效截留和减少地表径流中的营养盐和沉积物。因此, 为了改善湖泊水域的生态环境, 利用 ArcGIS 对 2018 年研究区的湖区进行了 1000 m 的缓冲区划定。在缓冲区范围内, 将现有耕地全面转换为林地。
情景 4	滨岸带退耕还湿生态保护情景	为了减缓人类活动对湿地生态系统的破坏, 利用 ArcGIS 对 2018 年研究区的湖区进行了 1000 m 的缓冲区划定。在缓冲区范围内, 将现有耕地全面转换为水域。
情景 5	滨岸带建设用地还林生态保护情景	城市扩张通常伴随着大规模的土地开发和建设活动, 这可能会对生态环境造成不可逆转的破坏。因此, 利用 ArcGIS 对 2018 年研究区的湖区进行了 1000 m 的缓冲区划定。在缓冲区范围内, 将现有建设用地全面转换为林地。

4. 结果与分析

4.1. 五种情景下的土地利用情况

本研究模拟了五种土地利用情景, 其土地利用分布如图 2 所示。表 4 介绍了五种情景下的土地利用结构。

Table 4. Land use patterns under five scenarios (km²)

表 4. 五种情景下的土地利用结构(km²)

土地利用类型	2018 年	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5
耕地	21712.67	21282.88	21701.96	21530.92	21530.92	21712.67
林地	699.19	707.86	709.90	880.94	699.19	739.32
草地	1281.97	1271.54	1281.97	1281.97	1281.97	1281.97
水域	1888.51	1826.92	1888.51	1888.51	2070.26	1888.51
建设用地	5962.13	6505.96	5962.13	5962.13	5962.13	5922.00
未利用地	113.53	62.84	113.53	113.53	113.53	113.53

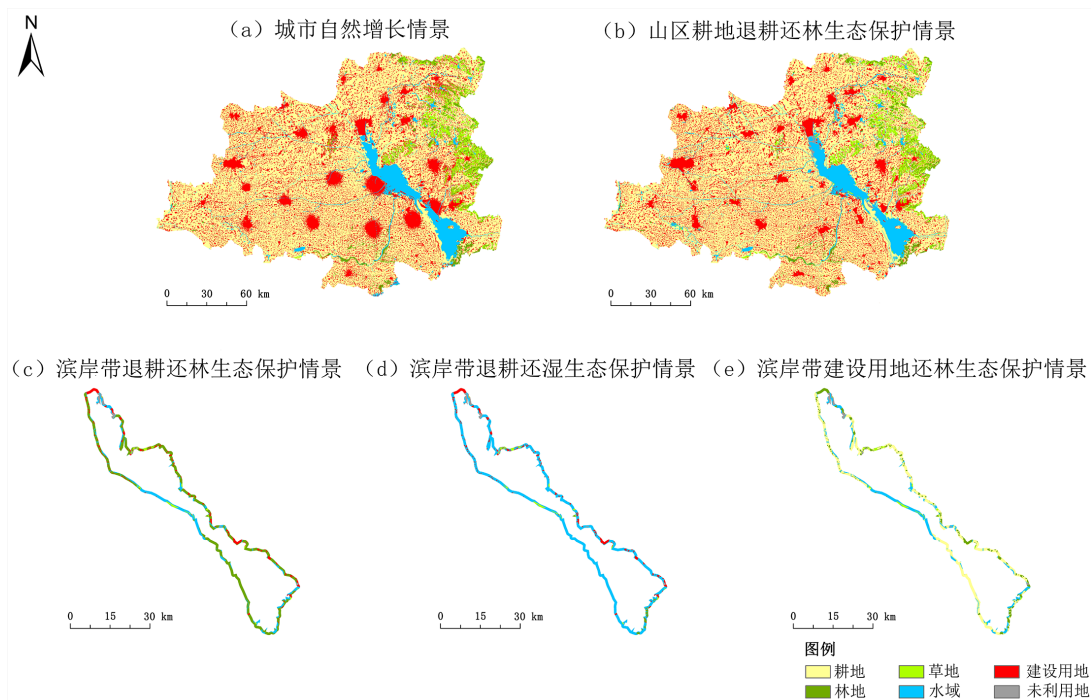


Figure 2. Land use patterns of the Nansihu Lake basin under five scenarios
图 2. 五种情景下土地利用分布图

基于 CLUE-S 模型, 我们模拟了 2050 年的土地利用模式(情景 1)。在这一情景中, 耕地作为流域内主要的用地类型, 在情景 1、情景 3 和情景 4 下被大量用作补充其他用地, 因而相比 2018 年呈现大幅下降趋势。林地占地面积在情景 3 和情景 5 下呈现明显的上升趋势, 分别增加了 181.75 km^2 和 40.13 km^2 。林地在情景 1 和情景 2 下有所上升, 但增加量较少。草地和湿地在情景 1 下主要用于弥补其他用地需求, 导致这两种地类的面积分别减少了 10.43 km^2 、 61.59 km^2 。此外, 在情景 1 下, 由于城市化的推进, 越来越多的土地被开发为建设用地, 建设用地面积相较 2018 年增加了 543.83 km^2 。在情景 4 下, 专门针对湿地的生态保护政策导致湿地面积大幅度增加, 增加了 181.75 km^2 。

4.2. 五种情景下生态系统服务的变化

使用 InVEST 模型预测上述五种情景下六种生态系统服务的变化, 结果见图 3 和图 4。在情景 1 下, 产水量增加, 而水质净化服务下降, 说明水体中存在较多农业化学物质、工业废水或城市污水等, 降低了水体的自净能力; 碳存储和授粉服务的下降与林地转化为其他用途、土地退化、生境破坏有关。情景 2 与情景 3 下的变化相似, 其中授粉服务和生境质量变化最为显著。具体而言, 在情景 2 和 3 下, 生境质量的值分别增加了 11.50% 和 12.50% (图 3(f)), 由此可见, 退耕还林、保护自然植被等措施有助于区域生境质量的提高; 与此相反, 授粉服务则呈现出下降趋势。在情景 4 下, 产水功能、碳存储和授粉呈现下降趋势, 这与湿地恢复过程中植被减少和花粉传播者的栖息地减少有关; 而水质净化、土壤保持和生境质量出现了不同程度的提高, 退耕还湿导致湿地面积增加, 有助于改善生境的多样性; 生境质量的变化最为显著, 增加了 13.50%, 是五种情景中增加最多的(图 3(f)), 而授粉服务减少了 23.76% (图 3(g))。在情景 5 下, 产水量、土壤保持和授粉服务下降, 这与建设用地特征、土地利用结构变化等因素有关; 而水质净化、碳存储和生境质量有所改善, 说明植被的增加和多样性的提高可以提高碳的储存能力, 并为各种生物提供更适宜的生存条件。

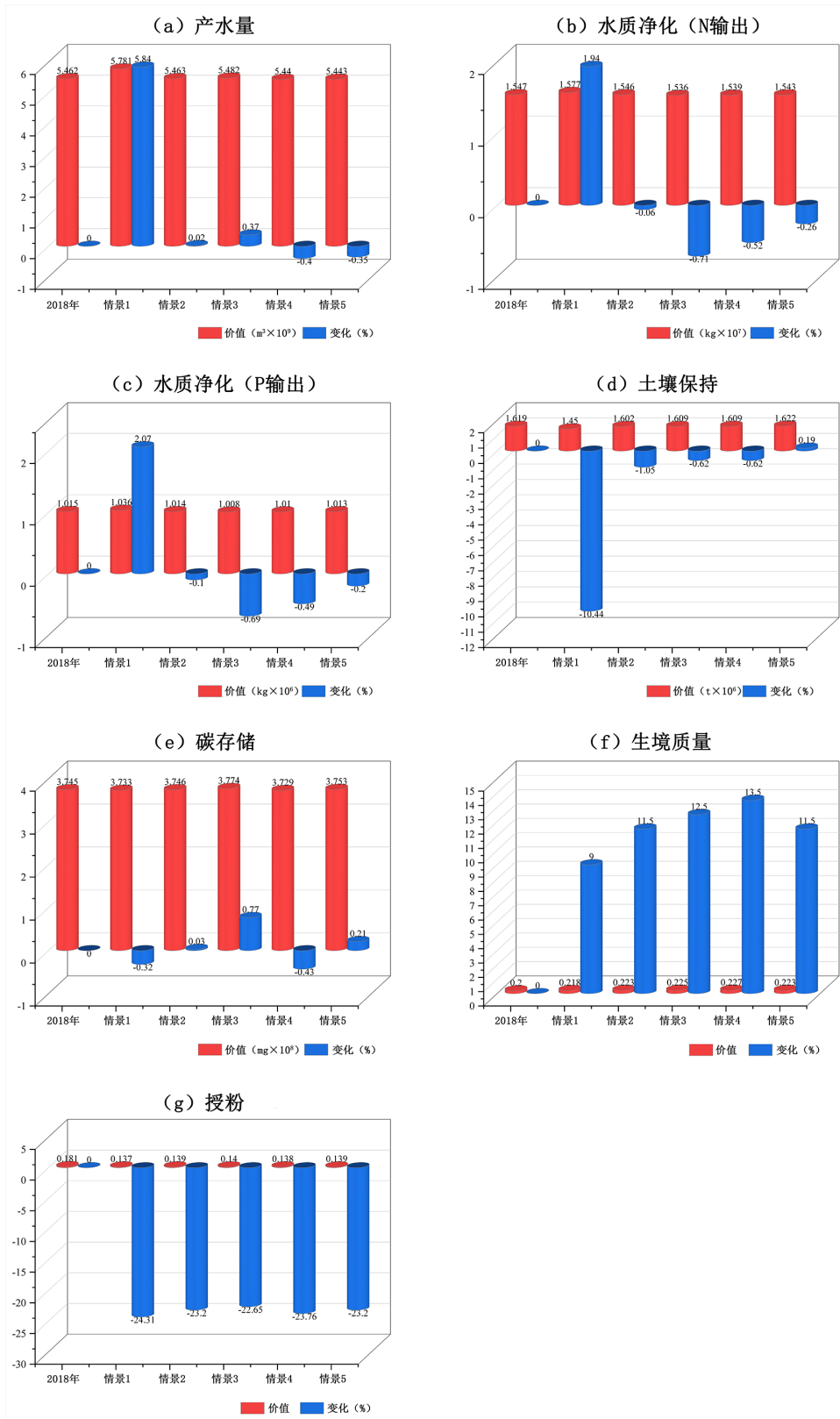


Figure 3. Values of various ESs under five scenarios and their changes compared with that in 2018
图 3. 五种情景下的各类生态系统服务价值及其变化情况

总之，在这五种情景下，与其他生态系统服务相比，生境质量和授粉服务的变化更加显著。此外，生境质量在各个情景下都有明显的改善(图 3(f))，而授粉服务则显著下降(图 3(g))。此外，在情景 1 下，产水量和土壤保持服务变化显著，然而，除了授粉服务和生境质量之外，其他生态系统服务的变化方向并不一致。

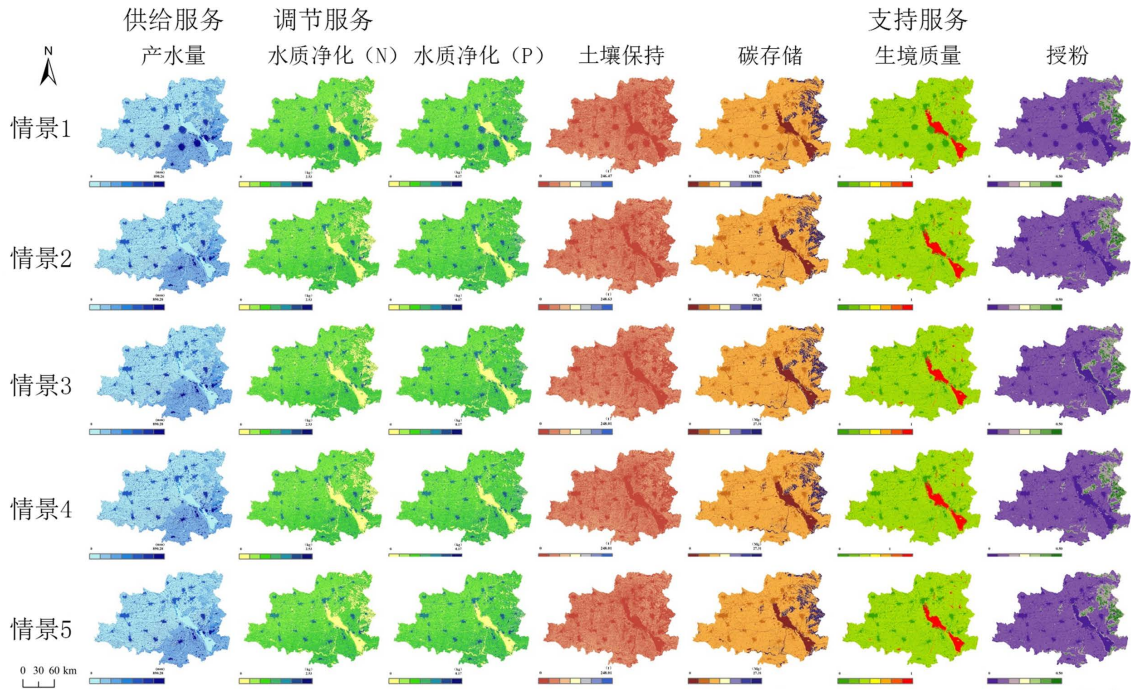
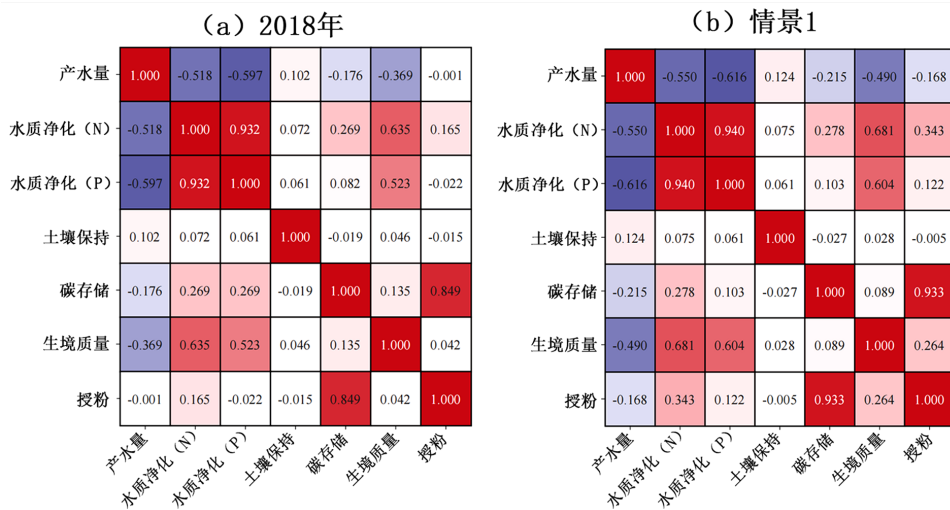


Figure 4. Spatial distribution of ESs under five scenarios
图 4. 五种情景下生态系统服务分布

4.3. 五种情景下生态系统服务的相互关系

通过相关分析，获得五种模拟情景下研究区生态系统服务相关性热图(图 5 和图 6)。两幅图展示了在不同土地利用模拟情景下，六种生态系统服务之间的相互关系及其强度，并与 2018 年的情况进行了比较。



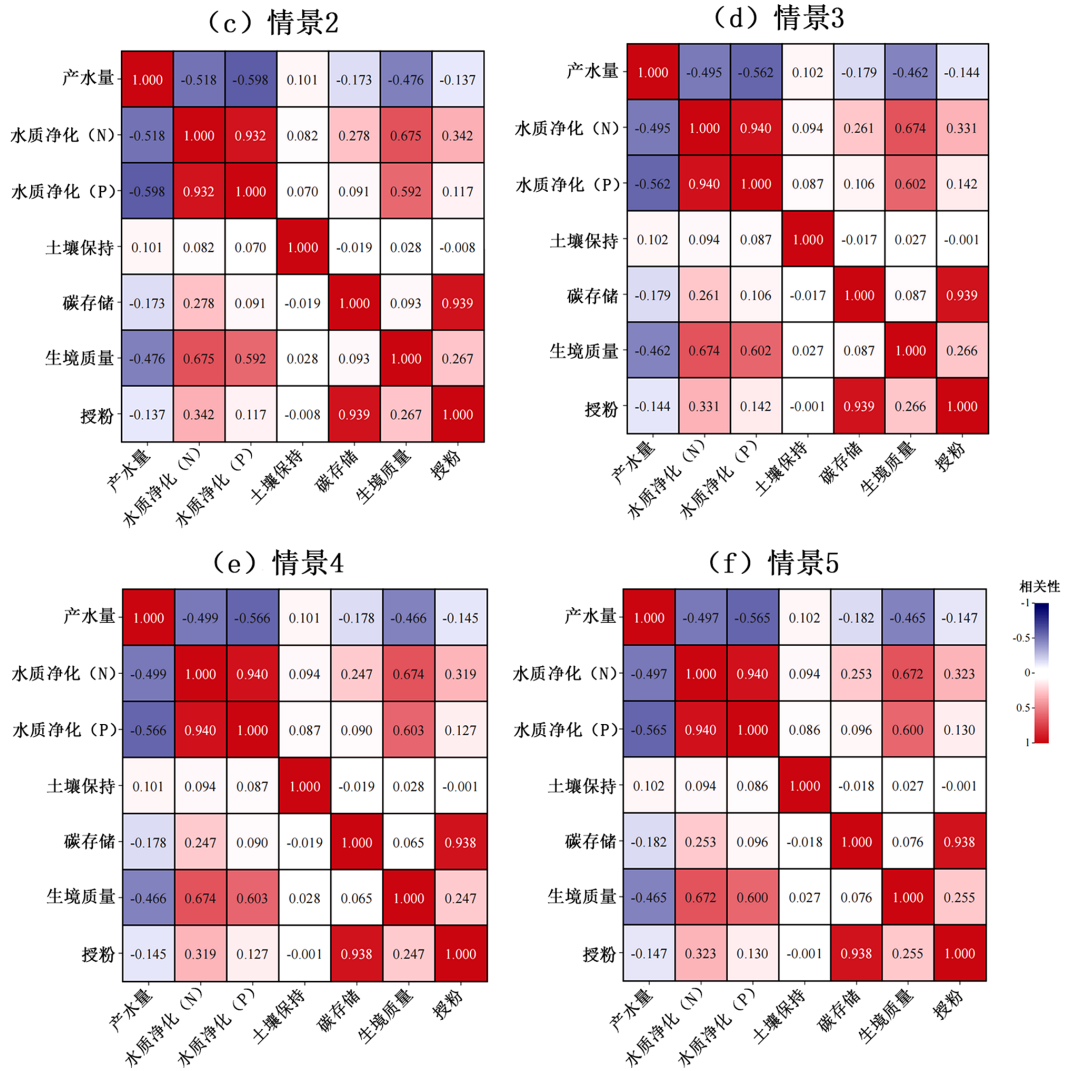


Figure 5. Interactions of ESs in 2018 and five scenarios
 图 5. 2018 年及五种情景下各类生态系统服务相关性

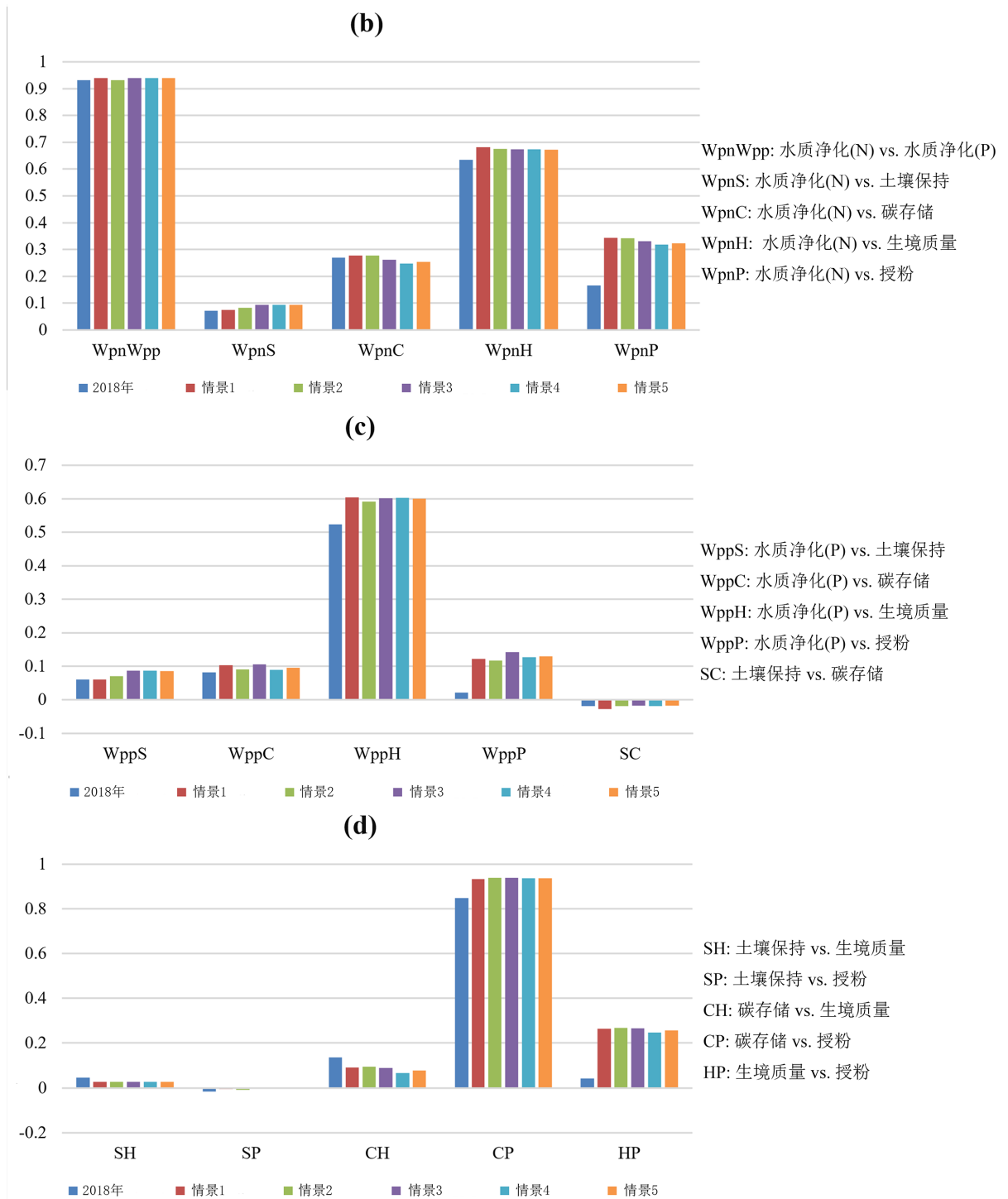


Figure 6. Variation of ESs correlations under five scenarios
图 6. 五种情景下各类生态系统服务相关性变化

根据 2018 年以及五种不同情景下的数据，我们观察到水质净化(N 输出)与水质净化(P 输出)(WppWpn, 图 6(b))、水质净化(N 输出)与生境质量(WpnH, 图 6(b))、水质净化(P 输出)与生境质量(WppH, 图 6(c))、碳存储与授粉(CP, 图 6(d))之间存在着明显的协同作用，且这些生态系统服务之间的相关系数

都高于 0.5 (图 5)。另外, 在 2018 年以及五种不同情景下, 产水量与土壤保持(WyS, 图 6(a))、水质净化(N)与碳存储(WpnC, 图 6(b))、水质净化(P 输出)与授粉(WpnP, 图 6(b))、水质净化(P 输出)与碳存储(WppC, 图 6(b))、碳存储与生境质量(CH, 图 6(d))之间协同关系较弱, 相关系数约为 0.1 (图 5)。然而, 在 2018 年以及五种不同情景下, 产水量与水质净化以及产水量与生境质量之间权衡关系较强(图 6(a)), 相关系数均处于 0.4~0.5 之间。值得注意的是, 其他生态系统服务之间的相关性很弱, 且不显著。

综上所述, 城市自然增长情景与四种生态保护情景相比, 各服务间的相互关系情况存在显著差异, 但是在四种生态保护情景下差别相对较小。此外, 在城市自然增长情景下, 大多数生态系统服务之间的权衡作用更强, 而协同作用相对更弱。

4.4. 生态系统服务的总体效益

将五种情景下的生态系统服务数据进行标准化, 处理结果见表 5。通过比较总体效益, 得出以下排名: 情景 3 > 情景 5 > 情景 2 > 情景 4 > 2018 年 > 情景 1。此外, 相对于情景 1 而言, 各种生态保护情景均呈现出较高的总体效益, 生态保护情景的高效益可能与其有助于改善水质、提高生境质量、增加碳存储等生态系统服务相关。相反, 城市自然增长情景可能受到城市扩张、资源开发等负面因素的影响, 导致生态系统服务效益的降低。

Table 5. Benefits of the ESs under different scenarios

表 5. 不同情景下的生态系统服务效益

	产水量	水质净化(N)	水质净化(P)	土壤保持	碳存储	生境质量	授粉	总体效益
2018 年	0.065	0.732	0.750	0.017	0.356	0.000	1.000	2.919
情景 1	1.000	0.000	0.000	1.000	0.089	0.667	0.000	2.756
情景 2	0.067	0.756	0.786	0.116	0.378	0.852	0.045	3.001
情景 3	0.123	1.000	1.000	0.076	1.000	0.926	0.068	4.193
情景 4	0.000	0.927	0.929	0.076	0.000	1.000	0.023	2.954
情景 5	0.009	0.829	0.821	0.000	0.533	0.852	0.045	3.090

5. 讨论与结论

5.1. 讨论

近年来, 通过制定生态环境保护政策和调整土地利用规划, 人们希望能最大化地提高生态系统服务对人类社会的效益在管理生态系统时, 必须要考虑多种生态系统服务间的相互作用, 以避免偏好某一服务导致其他服务的损害和丧失[20]。然而, 许多研究过于强调生态系统服务之间的相互作用或土地利用对生态系统服务的影响, 而忽略了在不同生态政策下预测多个生态系统服务之间相互作用以优化某一地区土地利用的研究[27] [28]。本研究的独特之处在于不仅考虑了生态系统服务之间的相互作用, 还关注了在不同土地利用情景下, 生态政策对多个生态系统服务的影响。这一综合性的研究设计旨在更全面地评估土地利用的优化可能性, 为制定有效的生态政策提供科学依据。

根据土地利用的潜在变化, 本文提出了 5 种土地利用情景, 以便为南四湖流域土地利用的未来发展提供一个框架, 而不是侧重于单一的预测结果。研究结果表明, 在各生态保护情景下, 生态系统服务之间的权衡协同关系呈现出健康的发展趋势。因此, 决策者进一步落实生态保护政策, 更有利于城市生态系统的健康发展, 有利于生态安全问题的解决。

本研究通过深入研究生态系统服务、土地利用情景和相互关系的变化,旨在为制定更有效的生态保护和可持续发展战略提供指导。然而,由于本人专业知识以及研究水平等方面有限,论文存在一定局限性。例如,本研究仅构建了五种场景来研究生态系统服务,最优场景仅限于这五种场景之中。随着城市化的快速发展,有必要构建大量的方案,以分析未来不同土地利用结构下生态系统服务之间的权衡和协同效应,进一步提高研究的深度和广度,以便根据地区发展的需要,选择最为适宜的方案,为未来的规划提供坚实的基础。

5.2. 结论

(1) 在五种模拟的情景中,生境质量和授粉服务的变化最为显著。与其他四种生态保护情景相比,在城市自然增长情景下,除了碳存储和生境质量外,其他四种生态系统服务的变化程度不如前者大。

(2) 在城市自然增长情景下,生态系统服务之间的相互关系表现出比其他四种情景更为错综复杂的变化。在该情景下,大多数生态系统服务之间的权衡作用呈上升趋势,而协同作用则显示减弱的趋势,这意味着城市扩张可能对流域内的生态平衡和生态系统服务产生负面影响。

(3) 四种生态保护情景的整体效益均高于城市自然增长情景。此外,在五种情景中,滨岸带退耕还林生态保护情景下总体效益最佳,这表明这一情景对提高生态系统服务效益具有显著的正面影响。因此,为了可以更有效地平衡经济发展和生态环境保护的关系,未来规划应偏向滨岸带退耕还林生态保护情景,优化土地利用结构,切实保护好研究区的生态用地资源。

致 谢

感谢山东省自然科学基金项目“南四湖流域地表水农药污染对土地利用机器景观格局的响应机制研究”(ZR2021MD088)资助。在行文过程中,许多专家、老师提出了大量富有建设性的意见与建议,在此一并感谢。

基金项目

山东省自然科学基金项目“南四湖流域地表水农药污染对土地利用机器景观格局的响应机制研究”(ZR2021MD088)。

参考文献

- [1] Robert, C., Ralph, D., Rudolf, D., *et al.* (1997) The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*, **387**, 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- [2] Robert, V.O.O. (1998) Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. *Ecology*, **79**, 1118-1119.
- [3] 吕乐婷, 任甜甜, 李赛赛, 等. 基于 InVEST 模型的大连市产水量时空变化分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 144-150, 157.
- [4] Elena, M.B., Garry, D.P. and Line, J.G. (2009) Understanding Relationships among Multiple Ecosystem Services. *Ecology Letters*, **12**, 1394-1404. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x>
- [5] 冯漪, 曹银贵, 李胜鹏, 等. 生态系统服务权衡与协同研究:发展历程与研究特征[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 11-25.
- [6] Sun, X.Y., Ye, D.Y., Shan, R.F., *et al.* (2022) Effect of Physical Geographic and Socioeconomic Processes on Interactions among Ecosystem Services Based on Machine Learning. *Journal of Cleaner Production*, **359**, Article ID: 131976. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131976>
- [7] 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.
- [8] 方露露, 许德华, 王伦澈, 等. 长江, 黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研 [J]. 地理研究, 2021, 40(3): 821-838.

- [9] Anna-Lena, R., Verena, B., Christian, D., *et al.* (2020) Temporal Patterns in Ecosystem Services Research: A Review and Three Recommendations. *Ambio*, **49**, 1377-1393. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01292-w>
- [10] Zhao, Y.N., Wang, M., Lan, T.H., *et al.* (2023) Distinguishing the Effects of Land Use Policies on Ecosystem Services and Their Trade-Offs Based on Multi-Scenario Simulations. *Applied Geography*, **151**, Article ID: 102864. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102864>
- [11] Alison, G.P. (2010) Ecosystem Services and Agriculture: Tradeoffs and Synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **365**, 2959-2971. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0143>
- [12] Shaikh, S.H., Lin, Z., Giashuddin, M., *et al.* (2020) Impact of Land Use Change on Ecosystem Services: A Review. *Environmental Development*, **34**, Article ID: 100527. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100527>
- [13] Francesc, B., Erik, G. and Dagmar, H. (2017) Ecosystem Service Bundles along the Urban-Rural Gradient: Insights for Landscape Planning and Management. *Ecosystem Services*, **24**, 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.02.021>
- [14] Alejandra, M.O., Aitor, A., Miquel, D.C., *et al.* (2020) Future Trade-Offs and Synergies among Ecosystem Services in Mediterranean Forests under Global Change Scenarios. *Ecosystem Services*, **45**, Article ID: 101174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101174>
- [15] Chen, S.L., Liu, X.T., Li, Y., *et al.* (2023) Variations in Ecosystem Service Value and Its Driving Factors in the Nanjing Metropolitan Area of China. *Forests*, **14**, Article 113. <https://doi.org/10.3390/f14010113>
- [16] da Silva Anjinho, P., Guimarães Araujo Barbosa, M.A. and Mauad, F.F. (2022) Evaluation of InVEST's Water Ecosystem Service Models in a Brazilian Subtropical Basin. *Water*, **14**, Article 1559. <https://doi.org/10.3390/w14101559>
- [17] Yi, Y., Zhang, C., Zhu, J.Q., *et al.* (2022) Spatio-Temporal Evolution, Prediction and Optimization of LUCC Based on CA-Markov and InVEST Models: A Case Study of Mentougou District, Beijing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article 2432. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042432>
- [18] Zhang, X.Q., Chen, P., Dai, S.N., *et al.* (2022) Assessment of the Value of Regional Water Conservation Services Based on SWAT Model. *Environmental Monitoring and Assessment*, **194**, Article No. 559. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10247-w>
- [19] Zhang, J.G., Zhu, W.B., Zhu, L.Q. and Li, Y.H. (2022) Multi-Scale Analysis of Trade-Off/Synergistic Effects of Forest Ecosystem Services in the Funiu Mountain Region, China. *Journal of Geographical Sciences*, **32**, 981-999. <https://doi.org/10.1007/s11442-022-1981-x>
- [20] Sun, X.Y., Shan, R.F. and Liu, F. (2020) Spatio-Temporal Quantification of Patterns, Trade-Offs and Synergies among Multiple Hydrological Ecosystem Services in Different Topographic Basins. *Journal of Cleaner Production*, **268**, Article ID: 122338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122338>
- [21] Li, G.Z. and Cai, J. (2022) Spatial and Temporal Differentiation of Mountain Ecosystem Service Trade-Offs and Synergies: A Case Study of Jieshi Mountain, China. *Sustainability*, **14**, Article 4652. <https://doi.org/10.3390/su14084652>
- [22] Zhang, X.L., Jin, X.B., Liang, X.Y., *et al.* (2022) Implications of Land Sparing and Sharing for Maintaining Regional Ecosystem Services: An Empirical Study from a Suitable Area for Agricultural Production in China. *Science of the Total Environment*, **820**, Article ID: 153330. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153330>
- [23] Chen, T.T., Li, P. and Wang, Q. (2022) Response and Multiscenario Simulation of Trade-Offs/Synergies among Ecosystem Services to the Grain to Green Program: A Case Study of the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration, China. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 33572-33586. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18336-y>
- [24] Sun, Z.X., Liu, Y. and Sang, H.B. (2023) Spatial-Temporal Variation and Driving Factors of Ecological Vulnerability in Nansi Lake Basin, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **20**, 2653-2653. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032653>
- [25] Sun, X.Y., Jiang, Z., Liu, F., *et al.* (2019) Monitoring Spatio-Temporal Dynamics of Habitat Quality in Nansihu Lake Basin, Eastern China, from 1980 to 2015. *Ecological Indicators*, **102**, 716-723. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.041>
- [26] Irina, H. and Juha, H. (2008) Agricultural Drainage Ditches, Their Biological Importance and Functioning. *Biological Conservation*, **141**, 1171-1183. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.03.005>
- [27] Samantha, S.K.S., Astrid, J.A.V. and Peter, H.V. (2015) Integrating Socio-Cultural Perspectives into Ecosystem Service Valuation: A Review of Concepts and Methods. *Ecological Economics*, **114**, 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.03.007>
- [28] Liu, L.M. and Wu, J.G. (2022) Scenario Analysis in Urban Ecosystem Services Research: Progress, Prospects, and Implications for Urban Planning and Management. *Landscape and Urban Planning*, **224**, Article ID: 104433. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104433>