

快速城镇化地区景观格局变化对水生态系统服务的影响

王 飞¹, 陶 芹¹, 程宪波¹, 陶 宇^{1,2}, 欧维新^{1,2}, 刘敬杰^{1,3}

(1.南京农业大学土地管理学院,南京 210095;2.农村土地资源利用与整治国家地方联合工程研究中心,南京 210095;3.滁州学院地理信息与旅游学院,安徽 滁州 239099)

摘要: 探究快速城镇化流域景观格局变化的水生态系统服务响应机制,对流域景观规划和生态系统服务提升具有重要意义。以太湖流域为研究区,基于土地利用数据,综合景观格局指数、应用 SCS 与 InVEST、偏相关分析等模型与方法,在刻画景观格局以及雨洪调节、水土保持、水质净化 3 种典型水生态系统服务的空间分异特征基础上,重点探讨子流域尺度上水生态系统服务对不同景观格局特征的响应关系。结果表明:景观组成和配置对 3 类典型水生态系统服务的影响中,大部分结论与现有研究结论或认识一致,但也发现太湖流域耕地、林地景观斑块形状复杂程度均能改善河流水质,子流域中的湿地稀少斑块有利于减少面源污染。控制耕地规模、优化耕地与水体距离、减少坡耕地可以有效提升 3 种水生态系统服务;增加滨水地带林地面积并提高其斑块边缘密度、增加子流域湿地、草地比重有利于更好地控制水体污染;湿地、草地这类关键少量的景观类型的增加是提高水质净化服务最有效的途径。为更全面准确地刻画格局与水生态系统服务的响应关系,还需在生态系统服务流、非线性关系和阈值、不同格局特征对服务的相对贡献等方面开展深化研究。

关键词: 景观格局; 水生态系统服务; 空间分异; 响应关系; 太湖流域

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)01-0159-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.01.022

Influence of Landscape Pattern Change on Water Ecosystem Service in Rapidly Urbanization Areas

WANG Fei¹, TAO Qin¹, CHENG Xianbo¹, TAO Yu^{1,2}, OU Weixin^{1,2}, LIU Jingjie^{1,3}

(1.College of Land Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095;

2.National & Local Joint Engineering Research Center for Rural Land Resources Use and Consolidation,

Nanjing 210095; 3.College of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239099)

Abstract: Exploring the response mechanism of water ecosystem services to the change of watershed landscape pattern in rapidly urbanization is of great significance to watershed landscape planning and ecosystem service improvement. This study took the Taihu Lake Basin as the research area, based on land use data, models and methods such as comprehensive landscape pattern index, SCS and InVEST model, and partial correlation analysis were applied. On the basis of depicted the landscape pattern and the spatial differentiation characteristics of three typical water ecosystem services, which were stormwater regulation, soil and water conservation and water quality purification, the response relationship of water ecosystem services to the characteristics of different landscape patterns at sub-watershed scale was mainly discussed. The results showed that: among the impact of the composition and configuration of the landscape on the three typical water ecosystem services, most of the conclusions were consistent with existing research conclusions or understanding. However, it was also found that the complexity of the shape of cultivated land and woodland landscape patches in Taihu Lake basin could improve the river water quality, and the wetland rare patches in the sub-basin were conducive to reducing non-point source pollution. The three kinds of water ecosystem services could be effectively improved by controlling the scale of cultivated land, optimizing the distance between cultivated land and water body and reducing slope cultivated land. Increasing forestland area in waterfront area and improving the density of patch edge, increasing the proportion of wetland and

grassland in sub-basin were conducive to better control water pollution. Increasing the key landscape types such as wetlands and grasslands was the most effective way to improve water purification services. In order to more comprehensively and accurately depict the response relationship between pattern and water ecosystem service, it is also necessary to carry out in-depth research on ecosystem service flow, non-linear relationship and threshold, and the relative contribution of different pattern characteristics to service.

Keywords: landscape pattern; water ecosystem services; spatial differentiation; response relationship; Taihu Lake basin

快速工业化、城市化背景下,土地利用和景观格局变化改变生态过程,从而改变生态系统功能及生态系统服务供给水平,造成水源涵养功能减退、水土流失加剧,以及水环境污染等水生态系统服务退化现象普遍,严重威胁到人类福祉^[1-4]。生态系统服务作为地理学、生态学以及环境科学等领域的前沿和热点^[5-7],受到越来越多学者和组织的关注^[8-9]。

围绕土地利用变化或景观格局变化的水生态系统服务响应,国内外学者开展大量研究工作,主要关注不同尺度下景观组成和空间配置对水生态系统服务的影响。从景观组成与水生态系统服务指标之间的统计分析来探究景观格局变化对水生态系统服务影响是最为典型的方式^[10-11],其次是采用 SWAT (soil and water assessment tool) 模型和 InVEST (integrate valuation of ecosystem services and tradeoffs tool) 模型等评估不同景观组成和配置变化情景下的水生态系统服务响应^[12-14]。相比景观组成对水生态系统服务的影响,水生态系统服务对景观配置的响应关系仍存在诸多分歧,不同区域以及同一区域不同研究尺度下,景观配置指数与水质净化服务的相关性强弱都存在差异,未能得到统一论断,仍需要补充更多的案例研究来增加对该科学问题的理解和认识。以水质净化服务为例,在长江中下游典型湖泊流域的研究中发现,大而聚合(相比小而分散)的建设用地与耕地斑块对湖泊水质的影响更大^[15];在韩国典型水库流域的研究^[16-17]也发现,建设用地与耕地的斑块密度越高,水库的水质越差,增加林地、草地或湿地等生态用地的边缘密度可显著改善河流水质。但也有研究^[18]表明,破碎化的林地斑块不利于改善水质,林地越破碎,斑块密度越高,发挥水质净化功能的效用越不显著;不同景观类型之间交叉与并列指数越高、景观多样性水平越高,则水质越差^[19];然而 Qiu 等^[20]研究表明,提高不同土地利用类型之间的散布水平可显著降低流域的氮、磷污染负荷。此外,不少研究对景观格局指数的选择也存在随意性,所选取的指数之间存在较强的相关性,未能很好地控制多变量的交互影响,导致重复计算^[20],这也是未来研究需要重点考虑的问题。

太湖流域是生态系统服务研究的热点地区,相关

研究多强调流域或典型地区生态系统服务的变化及其驱动力^[21-23],或从行政区、格网等尺度探讨土地利用类型变化和景观水平下格局指数变化的生态系统服务响应^[21],进而分析两者之间的相关性^[24];或模拟城镇扩展和土地利用变化下生态系统服务的变化以及协同与权衡关系^[25-27]。现有研究对景观组成和景观配置下的水生态系统服务响应关注较少,且尺度上多以行政区和栅格为主,未突出子流域尺度上景观格局与水生态系统服务之间的相互作用。

鉴于此,本研究以太湖流域为研究区,遴选代表性的景观组成和配置指数,在刻画其格局特征的基础上,运用 SCS 和 InVEST 模型定量评估太湖流域雨洪调节、水质净化、土壤保持 3 种典型水生态系统服务的空间分异特征,采用偏相关分析方法,通过控制其他变量的交互影响来探究子流域尺度上水生态系统服务对不同景观格局特征的响应关系,以期深化对太湖流域景观格局与典型水生态系统服务关系的理解,为指导流域土地和景观优化配置提供科学支撑。

1 研究区概况

太湖流域地处长三角地区中心区域,是中国经济最具活力,开放程度最高,创新能力最强的区域之一,地跨江苏、浙江、安徽、上海,总面积 3.69 万 km² (图 1)。2020 年,太湖流域总人口约 6 755 万,常住人口城镇化率达到 84%,远超全国平均水平,城镇化进程持续加快,地区生产总值为全国经济总量的 9.8%。太湖流域景观类型以耕地和建设用地为主,是中国主要的粮食产区,近年来,耕地数量持续减少,建设用地面积不断增加,林草地有减少趋势,水域面积增加。农业面源污染和城市点源污染问题突出,经济社会保持高质量发展的同时,也造成入河(湖)污染物总量远超水体纳污能力,湖体藻型生境形成等水生态系统服务退化问题严重。因此,提高对景观格局与水生态系统服务关系的理解和认识,是从根本上治理水环境问题、保障太湖流域高质量发展的首要科学问题。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

(1)景观数据:基于中国科学院资源环境科学数据中心 2015 年 30 m 空间分辨率的栅格数据,采用中

国土地利用/土地覆盖遥感监测数据分类系统得到耕地、林地、草地、水域、湿地、建设用地和未利用土地等景观类型数据(图 1)(<http://www.resdc.cn>);

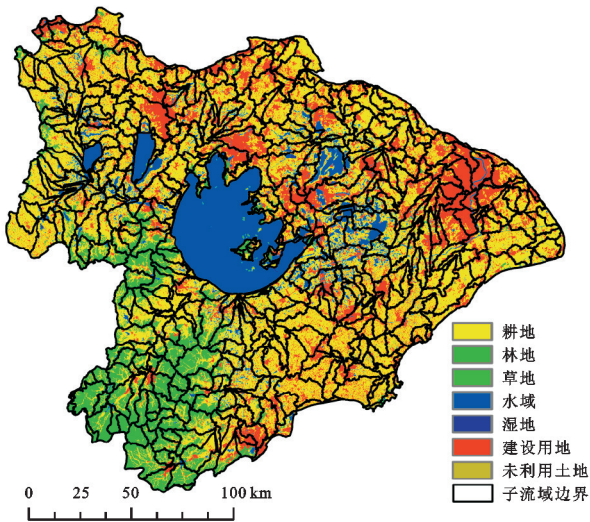


图 1 太湖流域景观类型

(2)DEM(digital elevation model)数据:借助地理空间数据云平台获取太湖流域 30 m 分辨率 DEM 数据,对数据进行裁剪、填注等预处理,提取坡度数据

- (www.gscloud.cn);
- (3)土壤类型数据:采用基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1),分辨率为 1 km,对所需属性字段进行提取换算(FAO 全球土壤数据库);
- (4)气象数据:资源环境科学与数据中心申请获取 2015 年降雨数据(www.resdc.cn);
- (5)其他生态水文参数:参考模型帮助文件及相关研究文献,合理选取与水生生态系统服务评估有关的模型参数;
- (6)子流域数据:采用中国科学院南京地理与湖泊研究所根据河网水系、DEM 及人工水利设施(如圩区、水库)等提取的太湖流域子流域数据,共计 490 个子流域(图 1)。
- 以上数据在统一投影坐标后,通过 3 次卷积内插重采样到 30 m 分辨率。

2.2 研究方法

2.2.1 景观格局分析 以子流域为单元,从景观组成和配置上选取代表景观形状复杂程度、破碎度、聚集度和多样性等方面的景观格局指数(表 1)^[28-29],表征太湖流域的景观格局特征。

表 1 代表性景观格局指数

景观指数		指数描述	生态意义
景观组成	斑块类型面积百分比(percentage of landscape,PLAND)	某一斑块类型面积占景观总面积的百分比	确定优势景观
景观配置	斑块密度(patch density,PD)	每平方千米的斑块数	景观破碎程度
	平均斑块面积(mean patch area,AREA_MN)	景观或各类型中斑块的平均面积	
	平均形状指数(mean shape index,SHAPE_MN)	斑块边长与同面积圆形/正方形斑块周长比,表征景观形状的不规则程度	景观斑块规整度
	欧几里得最邻近距离(euclidean nearest neighbor distance,ENN_MN)	从某一类型斑块到同类型斑块的最近距离之和除以具有最邻近距离的斑块总数,景观级别上 ENN_MN 之和除以具有最邻近距离的斑块总数	景观离散程度
	蔓延度指数(contagion,CONTAG))	景观中各斑块类型所占面积乘以各斑块类型之间相邻的格网单元数目占总相邻格网单元数目的比例,乘以该值自然对数之后的总和,除以 2 倍的斑块类型数的对数加 1 后转为百分比	
	香农多样性指数(shannon's diversity index,SHDI))	各斑块类型的面积比乘以其值的自然对数后和的负值,对各斑块类型非均衡分布状况较为敏感	景观多样性
	平均高程	子流域内不同地类的平均高程	景观地理位置
	距离水体的平均距离	子流域内不同地类到水体的平均距离	

2.2.2 典型水生生态系统服务评估 运用 SCS、InVEST 模型,定量评估 2015 年太湖流域各子流域雨洪调节、水质净化、土壤保持 3 项水生生态系统服务。具体模型构建为:

雨洪调节服务选择 SCS 模型对流域降雨—径流过程进行模拟,并将降雨与径流的差值作为地表径流截留量^[30-31]。地表径流量与降水量的定量关系为:

$$Q=\begin{cases} \frac{(P_{\text{降雨}}-0.2S)^2}{P_{\text{降雨}}+0.8S} & P_{\text{降雨}}\geq 0.2S \\ 0 & P_{\text{降雨}}< 0.2S \end{cases} \quad (1)$$

式中:Q 为地表径流量(mm); $P_{\text{降雨}}$ 为流域总降水量(mm);S 为当时可能的最大滞留量,这里引入无量纲参数 CN 值(曲线数,curve number),其与 S 的关系为:

$$S=\frac{25400}{CN}-254 \quad (2)$$

本研究参考相关学者在长江三角洲等地区基于 SCS 模型的应用案例中对 CN (curve number)值的修正^[30-31],同时,引入坡度因子对 CN 值进行修正:

$$CN_{\text{修}}=\frac{(CN_3-CN)}{3}\times [1-2\times \exp(-13.86\times \text{slope})]+CN \quad (3)$$

$$CN_3 = CN \times \exp [0.00673 \times (100 - CN)] \quad (4)$$

式中: $CN_{修}$ 为修正后的中等前期土壤湿润程度下的曲线值; CN_3 为湿润前期土壤湿润程度下的曲线值; slope 为坡度值。基于此获得研究区 $CN_{修}$ 值空间分布, 从而确定径流分布格局, 最后计算 P 减 Q 得到研究区暴雨—径流模式下的径流消减量。

采用 InVEST 模型, 水质净化模型通过估算植被和土壤对径流中氮、磷等营养元素的滤除量及子流域的最终输出量来反映景观在水质净化中的贡献: 氮、磷输出量越大, 水质净化服务越低; 相反, 氮、磷输出量越小, 水质净化服务越高^[23,32]。计算公式为:

$$\text{Exp}_x = \text{ALV}_x \prod_{y=x+1}^X (1 - E_y) \quad (5)$$

$$\text{ALV}_x = \text{HSS}_x \cdot \text{pol}_x \quad (6)$$

$$\text{HSS}_x = \frac{\lambda_x}{\lambda_{\bar{w}}}, \lambda_x = \log(\sum_U Y_u) \quad (7)$$

式中: Exp_x 为栅格 x 最终到达水体的磷(氮)输出量; E_y 为其输移路径上栅格 y 的磷(氮)持留效率; X 为栅格下游输移路径上的栅格总数; ALV_x 为栅格 x 的磷(氮)污染负荷值; pol_x 为栅格 x 的磷(氮)输出系数; HSS_x 为水文敏感分值; λ_x 为栅格 x 的径流系数; $\lambda_{\bar{w}}$ 为子流域的平均径流系数; $\sum_U Y_u$ 为栅格 x 及最后汇入该栅格的所有上游栅格的总产水量。

土壤保持利用 InVEST 模型基于通用土壤流失方程和流域水文过程分别计算侵蚀减少量和泥沙持留量。前者反映各地块对自身潜在侵蚀的减少, 以潜在侵蚀与实际侵蚀的差表示; 后者表示该地块对进入它的上坡来沙的持留, 以来沙量与泥沙持留效率的乘积表示。两部分之和即为生态系统土壤保持量^[33-34], 公式为:

$$\text{Sret}_x = (\text{RKLS}_x - \text{USLE}_x) + \text{Ups}_{\text{retain}_x} \quad (8)$$

$$\text{Ups}_{\text{retain}_x} = SE_x \sum_{y=1}^{x-1} \text{USLE}_y \prod_{z=y+1}^{x-1} (1 - SE_z) \quad (9)$$

$$\text{RKLS}_x = R_x \cdot K_x \cdot \text{LS}_x \quad (10)$$

$$\text{USLE}_x = R_x \cdot K_x \cdot \text{LS}_x \cdot C_x \cdot P_x \quad (11)$$

式中: Sret_x 为栅格 x 的土壤保持量; RKLS_x 为潜在土壤侵蚀量; USLE_x 为实际土壤侵蚀量; $\text{Ups}_{\text{retain}_x}$ 为栅格 x 对上坡来沙的泥沙持留量; R_x 为降雨侵蚀力因子, 采用 Wischmeier 提出的相关公式计算得到^[35]; K_x 为土壤可蚀性因子, 通过 EPIC 模型计算^[34]; LS_x 为地形坡长因子, 依据坡长和坡度因子获取; C_x 为植被与管理因子, 采用蔡崇法求取^[35]; P_x 为土壤保持措施因子, 范围在 0~1.0, 0 表示实施水土保持措施后不发生侵蚀, 1.0 表示未进行相应水土保持措施, 本研究建设用地、湿地和水面取值 0, 林地、草地以及未利用土地取值 1, 耕地具有一定水土保持措施, 根据水田、旱地等类别综合取值^[35]; USLE_x 和 USLE_y 分别为栅格 x 及其上坡栅格 y 的实际侵蚀

量; SE_x 为栅格 x 的泥沙持留效率。

2.2.3 偏相关分析 为揭示太湖流域景观格局与水生生态系统服务的作用特征, 本研究采用偏相关分析, 以水生生态系统服务为因变量, 景观格局指数为自变量, 采取控制多个附加变量效应的方式, 探究水生生态系统服务和单一景观格局特征两两之间的显著性关系, 综合判定水生生态系统服务对景观格局的响应。偏相关系数计算公式为:

$$R_{12(3)} = \frac{R_{12} - R_{13}R_{23}}{\sqrt{(1 - R_{13}^2)} \sqrt{(1 - R_{23}^2)}} \quad (12)$$

式中: $R_{12(3)}$ 为控制变量 3 后变量 1 与变量 2 之间的偏相关系数; R_{12} 、 R_{23} 、 R_{13} 分别为变量 1 与变量 2、变量 2 与变量 3、变量 1 与变量 3 的相关系数。

考虑到研究区中草地、湿地和未利用土地占比非常小且在大部分流域呈缺失状态, 为保证偏相关分析的样本量和准确性, 暂不探讨这 3 种地类与水生生态系统服务的作用关系(各个子流域景观水平上的指数仍然考虑这几个地类的信息)。最终, 317 个有效子流域参与偏相关分析。

3 结果与分析

3.1 太湖流域景观格局特征

流域景观组成上, 耕地是太湖流域景观基底, 面积占比 49.57%; 建设用地面积次之, 占比达到 23.34%。林地和水面面积差距不大, 分别为 4 904.79, 4 800.64 km²。草地、湿地和未利用土地面积较小, 分别为 0.52%, 0.20%, 0.04%。空间分布上, 耕地分布广泛, 除太湖流域西南部占比较少外, 其他地区均有分布。建设用地在太湖流域北部、东部等经济发展快、城市化水平高的地区密集分布。林地和草地主要位于太湖流域地势较高的西南部, 湿地和未利用土地则散布在湖泊河岸带(图 1)。

由表 2 可知, 景观配置方面, 整个太湖流域景观破碎度较高, 景观斑块密度 1.41 个/km², 明显高于各景观类型斑块密度; 耕地和建设用地是各景观类型中破碎化程度最高的 2 种景观地类, 两者的斑块数量占到整个流域的 80.35%, 少量大斑块与上万户的小斑块并存的格局, 使得其斑块密度(分别为 0.59, 0.55)是其他景观类型斑块密度的 3~60 倍; 水面斑块密度也较大, 太湖流域大小湖泊星罗密布的格局明显; 林地平均斑块面积最大, 斑块相对集中分布。景观复杂度上, 耕地斑块形状表现最为规整, 林地、草地等景观斑块形状复杂程度最高。景观离散度上, 草地、湿地、未利用土地因面积小且分散而呈高度离散, 同类型斑块之间距离远, 与其他地类邻接概率随机性大; 而其他景观类型呈现相对集中分布的特征, 集中连片耕地、高度蔓延的中心城区和面积太湖水体、山区林地, 产生较小的欧氏最

邻近距离。整个太湖流域以耕地和建设用地为主,景观离散度小,耕地形成优势类型,使得景观连接性好,蔓延度指数达到 62.40%。在地理空间分布上,耕地

和建设用地平均高程都在 14 m,地势平坦,距离水体的平均距离相对较近;林地和草地分布在高程较高的地区,距离水体较远。

表 2 太湖流域景观配置指数

景观指数	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用土地	景观
$PD/(\text{个} \cdot \text{km}^{-2})$	0.59	0.07	0.02	0.18	0.01	0.55	0	1.41
AREA_MN/hm ²	83.94	199.22	26.20	72.67	21.67	42.78	15.27	70.73
SHAPE_MN	1.17	1.57	1.58	1.50	1.51	1.51	1.47	1.37
ENN_MN/m	129.31	470.86	1217.88	457.63	1600.28	236.33	3038.39	258.70
CONTAG/%	—	—	—	—	—	—	—	62.40
SHDI	—	—	—	—	—	—	—	1.26
平均高程/m	14.95	196.14	247.86	10.20	13.08	12.67	125.02	39.17
距离水体的平均距离/m	3460.09	4543.27	4640.83	—	3213.23	3906.99	6407.66	3863.03

子流域尺度上,各地类景观组成占比差异较大(图 2),耕地、林地、水体和建设用地作为太湖流域主要用地类型,在各子流域分布范围从 0~99%不等,湿地和未利用土地最大面积占比仅为 16.14%,9.54%,大部分子流域面积占比小于 1%,草地面积占比最大值为 57.46%。景观配置上,由于子流域各地类斑块数量的差异,平均斑块面积变化较大,其中水体最大平均斑块面积达到 16 598.28 hm²,耕地、林地、建设用地从几平方千米到几千平方千米不等,其他 3 种地类平均斑块面积较小,未利用土地的最大值仅为 54.15 hm²。不同子流域各地类的平均形状指数差距不大,取值范围集中在 1~2,当子流域地类数量较多时,各地类平均形状指数增大。未利用地、草地和湿地零散分布,在各子流域面积占比小,每平方千米斑块数不足 1 个,且同类型斑块之间距离较远。耕地和建设用地分布广泛,斑块密度相对较大,除个别子流域的零散斑块外,2 种地类的欧氏最邻近距离相对较小。林地和水体斑块密度在 0~2 个/km²,山区林地和大面积湖泊、河流分布的子流域内同类型斑块间最邻近距离较小,而疏林地、迹地以及水库坑塘等地类存在的子流域,相对较远。太湖流域河网水系发达,各地类距水体的距离差异不大,其中部分湿地和未利用土地主要分布在水体周围,距离水体较近,林地距离水体最远。各子流域中林草地以及未利用地等分布高程较高,其他地类大部分位于地势平坦的平原区。景观层面上,各子流域平均斑块面积集中在 0~200 m²,平均形状指数变化不大,蔓延度指数均在 40%以上,优势斑块特征显著,一些子流域由于斑块类型少,占主导地位的景观类型面积大,蔓延度指数可以达到 95%以上。各子流域面积较小,所包含的用地类型差距不大,香农多样性指数分布范围集中在 0.5~1.2。

3.2 水生生态系统服务空间分异特征

太湖流域雨洪调节服务空间分异特征明显,高值区主要集中在太湖流域西部和西南部,其下垫面以林地为

主,截留降水能力强;低值区处于太湖流域东部等土地城镇化较高的区域。水质净化服务则与土地利用覆被类型分布保持较好的吻合性,且氮、磷污染分布在空间上具有一致性,林地和草地对氮、磷污染物起到较强的消纳作用,输出量低,而耕地、建设用地分布广泛的地区成为氮、磷污染的“源”景观,这些地区地势平坦,人口分布密集,经济发展较快,氮、磷污染物输出量高。水土保持服务的空间分布与雨洪调节服务保持较高的一致性,高值集中在西部和西南部丘陵山地区,低值则位于高程和植被盖度较低的太湖流域下游区域(图 3)。

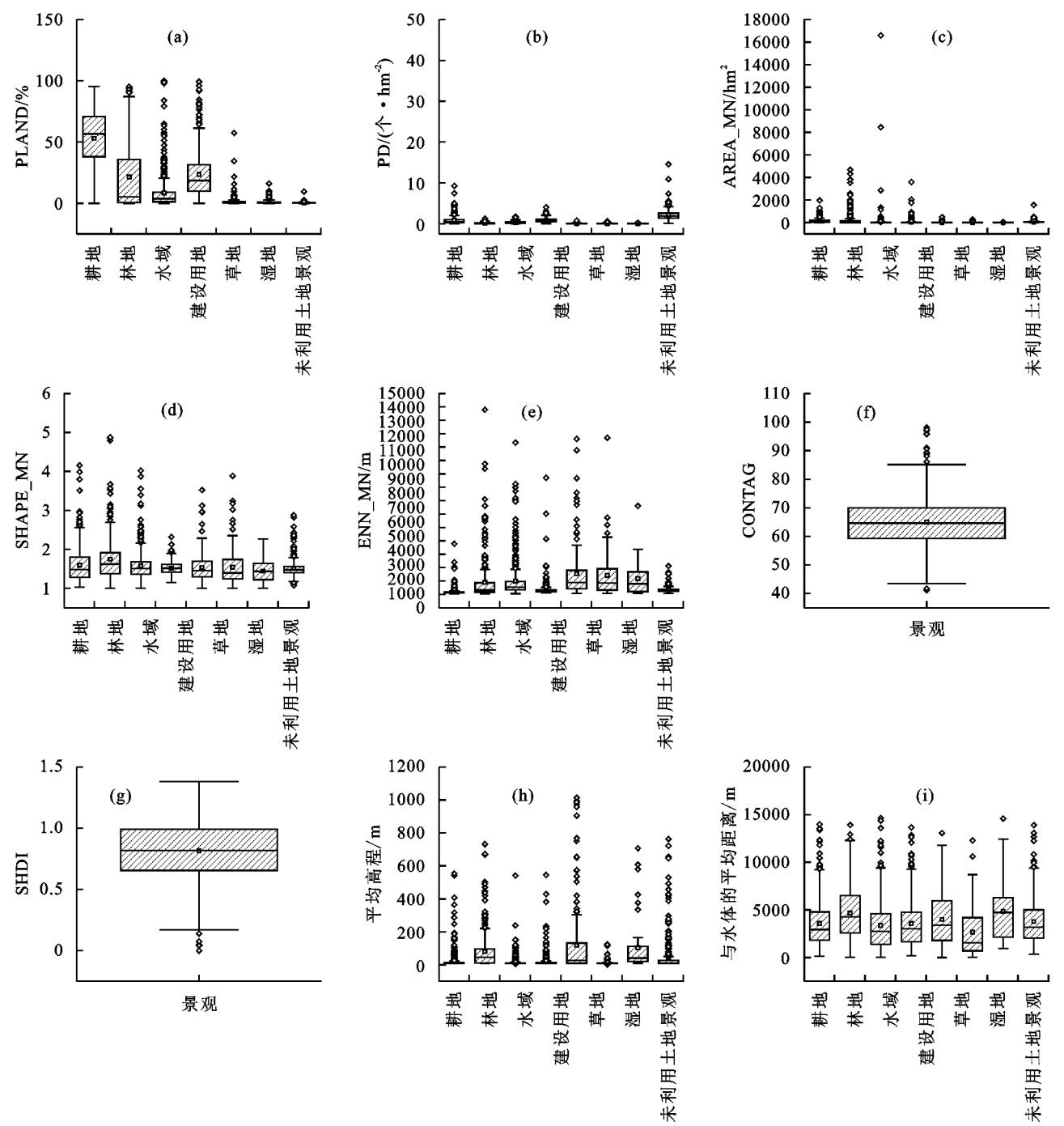
3.3 景观格局与典型水生生态系统服务的响应关系

3.3.1 景观格局与雨洪调节服务的关系 由表 3 可知,景观组成上,林地面积占比与雨洪调节服务正相关,林地能够促进水与土壤和植被的相互作用,增加水的渗透,涵养水源。耕地和建设用地面积占比与地均涵养量负相关,研究结果与相关研究^[30-31]一致。景观配置方面,雨洪调节服务与景观离散度和景观类型所处地理位置关系密切。其中,与耕地、林地的欧氏距离显著相关,耕地斑块越分散、林地斑块越集中分布则雨洪调节服务越高;子流域整体景观的蔓延程度对雨洪调节有显著促进作用,优势斑块类型形成良好的连接度,且以林地为优势斑块的子流域数目增多,径流截留量增加。耕地和林地景观类型的空间位置同样也显著影响雨洪调节服务:分布在地形较高处的耕地则不利于径流的截留;林地距离水体越近,滨水林地对径流调节作用越显著。

3.3.2 景观格局与水质净化服务的关系 2015 年,太湖总磷为Ⅳ类、总氮为Ⅴ类,总氮浓度已达到《总体方案修编》确定的 2015 年近期目标,总磷尚未达标,与 2007 年和 2014 年相比,除总磷外,其他指标浓度基本都有不同程度的下降。同时,本研究中对氮、磷污染物输出量分析表明,两者在空间分布上具有一致性,偏相关分析结果差距不大,故以磷污染物输出为例来探究景观格局与水质净化服务的关系。景观组

成上(表 3),仅林地面积占比与水质净化服务显著相关,占比越大,能够促进水与土壤和植被的相互作用,

吸附污染,子流域地均输出的磷污染物越少,对水质净化服务有着明显的促进作用。



注:框图中—为下/下限值;——为中位数;□为平均值;▨为 20%~75%数值区间;◇为异常值。

图 2 子流域尺度下景观格局指数分布特征

景观配置方面(表 3),子流域中的耕地、林地和整体景观空间构型特征对水质净化有显著影响。其中,耕地平均斑块面积增加,是导致磷输出增加的主要污染源,农药、化肥、杀虫剂的大量使用,造成土壤磷含量增加,成为水质净化服务负效应的主要影响源;耕地和林地斑块的形状越复杂,因可增加污染输出地块和净化地块与其他景观类型斑块的接触面,有利于抑制面源污染物的排放;耕地距水体距离增大,则污染物消减距离增加,产生的磷污染通过输移途中

不同地类的拦蓄、吸附和净化等作用,能够降低磷的输出,林地距水体距离越小,滨水地带污染物消纳地类增加,污染物减少;小流域景观多样性特征,尤其是拥有林、草、湿地等生态用地类型的小流域相较于仅有耕地和建设用地类型的小流域,其对水质净化服务促进作用更为明显。

3.3.3 景观格局与土壤保持服务的关系 由表 3 可知,偏相关分析表明,除建设用地占比外,各地类面积占比与土壤保持服务的相关性不显著。建设用地面

积占比增加,能够通过不透水面固定土壤,减少水土流失,提高土壤保持量。景观配置指数中,林地在水土保持服务中影响最大,结果显示,林地斑块面积越大、形状越复杂,则其土壤保持量越大。其次,各景观类型分布的地形高度对该服务也有显著抑制作用,反映相较于地势平坦地区,分布在丘陵山地的同景观类型更不利于土壤保持,但其促进土壤流失的作用强度

依然与其景观属性有关,如坡地上的耕地,因对土壤层的频繁扰动以及农田土壤的季节性裸露使其成为侵蚀产沙的重要来源,不利于农田水土保持^[35-36],其土壤流失影响最大,而林地和建设用地次之。子流域作为一个景观整体,其地势越高往往林地面积越多,因而子流域景观整体的高程越高,相较于地势平坦的子流域更具土壤保持的能力。

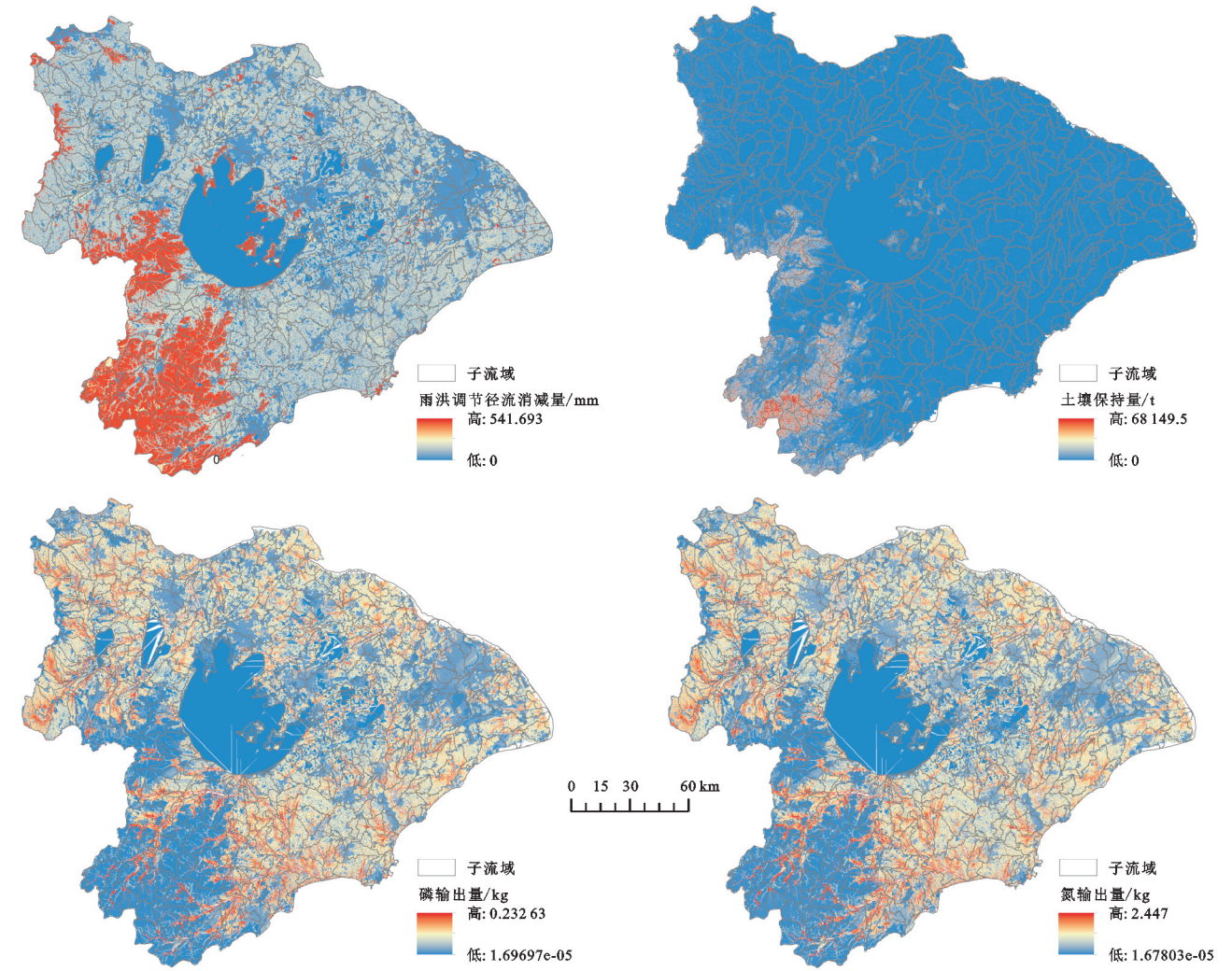


图 3 水生生态系统服务空间分布格局

4 讨论

通常情况下,雨洪调节、土壤保持和水质净化 3 种服务存在协同关系,但由于各子流域景观异质性特征差异,影响 3 种生态系统服务的景观组成与景观配置特征因子也不尽相同,因而在优化或调整流域景观格局时,仍需有针对性分析各特征因子的互作关系。

景观组成对水生生态系统服务有着显著的影响。其中,耕地和建设用地面积增加不利于雨洪调节服务;林地面积增加可提高流域的雨洪调节和水质净化服务,这与相关学者^[11,31]在长江流域的研究结论一致;增加建设用地面积有利于土壤保持服务,这也与北京和张家口—承德等地区的研究^[12,37]结论相同,其原因是建设用地增加,土壤被不透水面覆盖,不易发生水土流失。

本研究中的景观配置特征对不同水生生态系统服务影响,大部分与现有研究^[10-13,15,30-31]相吻合。如林地和耕地的离散度对雨洪调节服务有着相反的作用方向,其空间分布位置亦表现出不同的影响,坡耕地相较平原耕地不利于径流截留,滨水林地则显著促进雨洪调节服务^[30-31];土壤保持服务与地形高程显著相关^[10];林地和耕地距离水体的距离表现出不同的水质净化影响、耕地破碎化与水质净化服务正相关等^[11-13,15]。与已有研究结论有差异的是:(1)与Clement 等^[17]在韩国水库流域研究结论“增加林地等生态用地的边缘密度可显著改善河流水质”不同的是,本研究中耕地和林地斑块形状的高复杂程度均能改善河流水质,其可能原因是这 2 种污染物的源汇景

观类型因其边缘发达,与其他景观类型接触面大,在斑块边缘效应影响下,2 类形状复杂的景观分别增加污染物进入水体前的排放和消纳距离。(2)子流域景观香农多样性对水质净化服务有显著的促进作用,与 Lee 等^[19]的研究结论相反;其可能原因是子流域中少量的湿地、草地等景观类型起到至关重要的促进作用,这也与香农多样性指数强调稀有斑块对信息贡献这一生态学含义相吻合。

表 3 子流域各景观格局指数与水生态系统服务相关性分析

	景观格局	地均径流	地均磷	地均土壤
	指数	截留量	输出量	保持量
景观组成	耕地 PLAND	-0.365 **	—	—
	林地 PLAND	0.545 **	-0.117 *	—
	建设用地 PLAND	-0.630 **	—	0.125 *
	耕地 AREA_MN	—	0.198 **	—
	耕地 SHAPE_MN	—	-0.122 *	—
	耕地 ENN_MN	0.129 *	—	—
	耕地距水体的平均距离	—	-0.154 **	—
	耕地平均高程	-0.126 *	—	-0.564 **
景观配置	林地 AREA_MN	—	—	0.216 **
	林地 SHAPE_MN	—	-0.180 **	0.131 *
	林地 ENN_MN	-0.193 **	—	—
	林地距水体的平均距离	-0.124 *	0.151 *	—
	林地平均高程	—	—	-0.242 **
	建设用地平均高程	—	—	-0.141 *
	景观 CONTAG	0.140 *	—	—
	景观 SHDI	—	-0.144 *	—
	景观平均高程	—	—	0.880 **

注: ** 表示相关性在 0.01 水平上显著(双尾); * 表示相关性在 0.05 水平上显著(双尾);—表示不相关。

从流域景观优化配置和水生态系统服务提升方面的研究启示来看,首先,要合理控制流域耕地规模、适当优化耕地与水体的距离,减少坡耕地,以控制水土流失和降低水质污染风险;其次,要进一步优化林地等的配置,增加河岸带林地面积、增加人工林斑块的边缘密度,维护流域水生态保护;最后,要增加湿地、草地这类关键少量的景观类型保护和建设,通过退耕还湿工程或建设河口人工湿地等方式,增强流域水质净化服务 and 功能。

本研究仍然存在一些不足之处,一方面,景观格局通过影响一种或多种相互关联的生态过程而引致生态系统功能和服务的变化,本研究缺乏对相关生态过程的具体表征,如生态(系统服务)流;另一方面,景观格局指数与生态系统服务之间有线性和非线性关系并存的可能,本研究仅基于线性分析选择某一时间数据在一定程度上表征两者之间的相关关系,还需从多角度、多方法、多时段、多手段出发,深化其非线性关系及突变阈值等方面的探索。此外,研究在子流域尺度上发现景观组成和配置的典型指数与 3 类水生态系统服务存在显著影响关系,但并未就这些指数对水生态系统服务的相对贡献度大小展开研究,这也是将来需要重点关注的课题。

5 结论

(1)太湖流域景观以耕地和建设用地为主,且广泛分布于太湖流域北部和东部,两者呈此消彼长的关系;林地主要分布在太湖流域上游的山地丘陵区。景观配置方面,流域整体受耕地和建设用地基底控制,景观破碎度较高,景观离散度小,耕地形成优势类型,使得景观连接性好。子流域尺度上,除景观类型斑块的平均形状指数和距离水体距离等差距不大外,其他各地类景观组成占比、平均斑块面积等格局特征差异较大,优势斑块特征明显。

(2)太湖流域水生态系统服务空间分异特征主要表现为雨洪调节服务和水土保持服务有较高的一致性,其高值集中在西部和西南部林地占比较大地区,低值则位于高程相对较低的下游区域;水质净化服务则与土地利用覆被类型分布保持较好的吻合性,高值区在具有污染消纳作用的林、草地分布区,而耕地、建设用地分布广泛的地区成为氮、磷污染的“源”景观。

(3)景观的组成和配置对 3 类典型水生态系统服务有显著影响,太湖流域耕地、林地景观斑块形状复杂程度均能改善河流水质;子流域中的湿地稀少斑块有利于减少面源污染。控制耕地规模、优化耕地与水体距离、减少坡耕地可以有效提升 3 种水生态系统服务;增加滨水地带林地种植并提高其边缘密度有利于更好地控制水体污染;增加湿地、草地这类关键少量的景观类型是提高水质净化服务最有效的途径。为全面准确地刻画格局与水生态系统服务的响应关系,还需在生态系统服务流、非线性关系和阈值、不同格局特征对服务的相对贡献等方面开展深化研究。

参考文献:

[1] 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究[J].地理研究,2021,40(3): 821-838.

[2] 成超男,胡杨,赵鸣.城市绿色空间格局时空演变及其生态系统服务评价的研究进展与展望[J].地理科学进展, 2020,39(10):1770-1782.

[3] Gomez-Creutzberg C, Lagisz M, Nakagawa S, et al. Consistent trade-offs in ecosystem services between land covers with different production intensities[J].Biological Reviews,2021,96(5):1989-2008.

[4] 周宏春,江晓军.习近平生态文明思想的主要来源、组成部分与实践指引[J].中国人口·资源与环境,2019,29 (1):1-10.

[5] Duarte G T, Santos P M, Cornelissen T G, et al. The effects of landscape patterns on ecosystem services: Meta-analyses of landscape services[J].Landscape Ecology, 2018,33(8):1247-1257.

[6] 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.

[7] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、

- 方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.
- [8] 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.
- [9] 张静静,朱文博,朱连奇,等.伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析[J].地理学报,2020,75(5):975-988.
- [10] Gomes L C, Bianchi F J J A, Cardoso I M, et al. Land use change drives the spatio-temporal variation of ecosystem services and their interactions along an altitudinal gradient in Brazil[J].Landscape Ecology, 2020, 35(7):1571-1586.
- [11] 刘怡娜,孔令桥,肖焱,等.长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系[J].生态学报,2019,39(3):844-852.
- [12] Gao J, Li F, Gao H, et al. The impact of land-use change on water-related ecosystem services: A study of the Guishui River Basin, Beijing, China[J].Journal of Cleaner Production,2017,63:148-155.
- [13] Sun X, Crittenden J C, Li F, et al. Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta Metropolitan area, USA[J].Science of the Total Environment,2018,622:974-987.
- [14] 夏沛,宋世雄,刘志锋,等.中国内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务的影响评价研究进展[J].生态学报,2020,40(17):5884-5893.
- [15] Liu W Z, Zhang Q F, Liu G H. Influences of watershed landscape composition and configuration on lake-water quality in the Yangtze River basin of China[J].Hydrological Processes,2012,26(4):570-578.
- [16] Ouyang W, Skidmore A G, Toxopeus A G, et al. Long-term vegetation landscape pattern with non-point source nutrient pollution in upper stream of Yellow River Basin[J].Journal of Hydrology,2010,389(3/4):373-380.
- [17] Clement F, Ruiz J, Rodriguez M A, et al. Landscape diversity and forest edge density regulate stream water quality in agricultural catchments[J].Ecological Indicators,2017,72: 627-639.
- [18] Shen Z Y, Hou X S, Li W, et al. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in a typical urbanized watershed in the municipality of Beijing[J].Landscape and Urban Planning,2014,123:96-107.
- [19] Lee S W, Hwang S J, Lee S B, et al. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics[J].Landscape and Urban Planning,2009,92(2):80-89.
- [20] Qiu J X, Turner M G. Importance of landscape heterogeneity in sustaining hydrologic ecosystem services in an agricultural watershed[J].Ecosphere,2015,6(11):1-19.
- [21] 孙小祥,桂杨山,欧维新,等.太湖流域耕地变化及其对生态服务功能影响研究[J].自然资源学报,2014,29(10):1675-1685.
- [22] 刘璐璐,曹巍,吴丹,等.国家重点生态功能区生态系统服务时空格局及其变化特征[J].地理科学,2018,38(9):1508-1515.
- [23] 刘洋,吕建树,毕军.流域陆地生态系统水体净化服务表征及驱动力分析[J].地理科学进展,2019,38(4):588-599.
- [24] Bai Y, Chen Y Y, Alatalo J M, et al. Scale effects on the relationships between land characteristics and ecosystem services-a case study in Taihu Lake Basin, China[J].Science of the Total Environment, 2020,716:e137083.
- [25] Gu Y Y, Qiao X N, Xu M J, et al. Assessing the impacts of urban expansion on bundles of ecosystem services by Dmsp-Ols nighttime light data[J].Sustainability,2019,11(21):e5888.
- [26] Wu Y, Tao Y, Yang G S, et al. Impact of land use change on multiple ecosystem services in the rapidly urbanizing Kunshan City of China: Past trajectories and future projections[J].Land Use Policy,2019,85:419-427.
- [27] Liu Y, Bi J, Lü J S. Future impacts of climate change and land use on multiple ecosystem services in a rapidly urbanizing agricultural basin, China[J].Sustainability, 2018,10(12):e4575.
- [28] 刘希朝,李效顺,蒋冬梅.基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估[J].农业工程学报,2021,37(4):265-274.
- [29] 唐建军,杨民安,周亮,等.高原环湖城镇聚落的景观格局及空间形态演变特征:以滇池为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(10):2274-2284.
- [30] 杨丽韞,李文华,彭奎,等.太湖流域城镇绿地系统水生生态服务功能研究[J].资源科学,2011,33(2):217-222.
- [31] 彭建,魏海,武文欢,等.基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估:以深圳市茅洲河流域为例[J].生态学报,2018,38(11):3741-3755.
- [32] 张建,雷刚,漆良华.南水北调中线水源区丹江口市域景观格局变化及氮磷净化能力[J].生态学报,2021,41(6):2261-2271.
- [33] 邵雅静,杨悦,员学锋.黄河流域城镇化与生态系统服务的时空互动关系[J].水土保持学报,2022,36(3):86-93,99.
- [34] Xu X B, Yang G S, Tan Y S, et al. Ecosystem services trade-offs and determinants in China's Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015[J].Science of the Total Environment,2018,634:1601-1614.
- [35] 黄婷,于德永,乔建民,等.内蒙古锡林郭勒盟景观格局变化对土壤保持能力的影响[J].资源科学,2018,40(6):1256-1266.
- [36] 何莎莎,朱文博,崔耀平,等.基于 InVEST 模型的太行山淇河流域土壤侵蚀特征研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):426-439.
- [37] 许丁雪,吴芳,何立环,等.土地利用变化对生态系统服务的影响:以张家口—承德地区为例[J].生态学报,2019,39(20):7493-7501.