

国家重点生态功能区生态系统服务价值对 土地利用变化的时空响应

孟雪源, 陈刚, 郑志元

(合肥工业大学 建筑与艺术学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 【目的】研究国家重点生态功能区用地结构转变对生态系统服务功能的影响, 对编制地方经济社会发展计划和调整国土资源合理配置有重大参考价值。【方法】利用安徽省太湖县 2000、2010、2020 年 3 期土地利用数据, 建立转移矩阵分析土地利用变化规律, 在 600 m×600 m 格网尺度下计算生态系统服务价值的空间定量, 并运用空间自相关探究生态系统服务价值对土地利用变化的时空聚集特征与冷热点分异规律。【结果】①2000—2020 年太湖县土地利用面积变化的速度总体缓慢, 建设用地增长了 1.43%, 耕地减少了 1.00%, 草地、林地、耕地面积逐年下降, 建设用地逐年增加; ②土地利用综合变化指数高于 0, 全县的土地利用变化结构正处于成长期; ③20 a 来, 太湖县各土地利用类型的生态系统服务价值均出现一定程度的下降, 其中水域和林地对研究区生态系统服务价值总量的贡献率最高; ④土地利用变化对生态系统服务价值空间分布呈正相关, 以低-低聚集区和高-高聚集区为主, 随着土地利用结构的改变, 集聚的相关度也随之增加。从冷热点分布状况看, 太湖县生态系统服务价值变化量在总体上呈现“中热北冷, 南部冷热分异明显”的分布特征。【结论】太湖县不同土地利用类型生态系统服务价值的数量和空间分布差异明显, 需要关注水体面积保护与南部建设用地扩张两者的土地资源优化配置问题, 加强对土地利用结构的优化和生态用地空间格局的提升。图 4 表 7 参 31

关键词: 土地利用变化; 生态系统服务价值; 空间相关性分析; 太湖县

中图分类号: F290

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2024)04-0830-11

Spatiotemporal response of ecosystem service value to land use changes in national key ecological functional areas

MENG Xueyuan, CHEN Gang, ZHENG Zhiyuan

(School of Architecture and Art, Hefei University of Technology, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: 【Objective】 This study, with an investigation into the impact of land use structure transformation in national key ecological functional areas on ecosystem service functions, is aimed to provide reference for the formulation of local economic and social development plans as well as the rational and effective allocation of land resources. 【Method】 With land use data collected of Taihu County in 2000, 2010, and 2020, a land use transfer matrix was established to analyze the law of land use changes whereas spatial quantitative calculations were performed based on the ecosystem service value (ESV) at the 600 m×600 m grid scale. Afterwards, spatial autocorrelation was employed to explore the spatiotemporal aggregation characteristics and hot and cold hot spot differentiation rules of ecosystem service value on land use changes. 【Result】 (1) The change in land use area in Taihu County from 2000 to 2020 was generally gradual with the proportion of construction land increasing by 1.43%, and the proportion of cultivated land decreasing by 1.00%; the area of grassland, forestland, and cultivated land from 2000 to 2020 was on the decline year by year while the construction land

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2024-01-17

基金项目: 中国科协项目 (KX2023ZGKX0003)

作者简介: 孟雪源 (ORCID: 0009-0000-3976-310X), 从事景观规划设计、土地利用研究。E-mail: 1974336886@qq.com

increased year by year. (2) The comprehensive land use change index was higher than 0 and the county's land use change structure was in the growth stage. (3) The past 20 years witnessed a decline in the ecosystem service value of all land use types in Taihu County with waters and forestland having the highest contribution rate to the total ecosystem service value of the study area. (4) Land use changes were positively correlated with the spatial distribution of ESV, mainly in low-low agglomeration areas and high-high agglomeration areas and such a correlation is enhanced with the changes in the land use structure, and in terms of the distribution of cold and hot spots in Taihu County, hot spots were mainly in the middle area while the cold ones are distributed in the northern area, with noticeable differentiation in the southern part. [Conclusion] Different land use types would cause significant differences in the quantity and spatial distribution of ESV in Taihu County, therefore, it is necessary to focus on the protection of water body area and the optimization of land resource allocation in the expansion of construction land in the south, and strengthen the optimization of land resource allocation for the sake of sustainable and effective ecological development of Taihu County. [Ch, 4 fig. 7 tab. 31 ref.]

Key words: land use change; ecosystem service value (ESV); spatial correlation analysis; Taihu County

在自然和人为因素的共同作用下, 土地利用结构在不断发生变化^[1]。土地利用变化是影响全球气候的重要成因之一, 对生态系统的结构、功能和过程产生深远的影响, 从而对人类及自然环境的变化产生至关重要的作用^[2]。随着人类对生态环境保护的日益重视, 土地利用变化与生态系统间的相互关系已成为多学科研究的热点之一^[3]。生态系统服务是指人类通过生态系统直接或间接得到的收益, 通常分为供给服务、调节服务、支持服务及文化服务^[4]。研究表明: 土地利用变化对生物^[5]、气候^[6]、土壤^[7]、水文^[8]等生态环境产生负面影响, 在不同尺度下改变了生态系统结构与功能, 导致生态系统发展失衡、功能变弱等问题。生态系统服务价值定量评估有利于实现土地集约化高效配置, 提升土地利用效率, 实现土地利用与生态环境的协调可持续发展^[9-11]。近年来, 土地利用变化对生态系统服务价值影响的定量研究已成为国内外研究热点。生态系统服务价值作为最普遍的衡量标准, 能够直接反映人类活动对自然环境的影响。为了更好地研究生态资源优化与可持续发展的关系, COSTANZA 等^[12]首次提出了生态系统服务价值评估原则、功能分类和具体方法, 并对全球范围内 16 个生物群落的 17 项生态系统服务价值进行了评估, 这为相关领域奠定了理论基础。由于生态保护意识的提高和国家政策导向的影响, 国内对生态系统服务价值的研究逐渐深入。谢高地等^[13-15]依据中国区域生态特点, 以专家知识问卷调查形式构建了中国陆地单位面积生态系统服务价值当量因子表, 这对国内生态系统服务价值的评估与测算具有一定的借鉴意义。

安徽省太湖县作为国家重点生态功能区, 承担着区域生态安全与生态保护的重任。生态系统服务价值评估方法是构建生态补偿机制的重要理论依据, 是确立生态补偿标准的价值基础^[16]。鉴于此, 本研究基于太湖县 2000、2010、2020 年 3 期土地利用数据, 分析土地利用变化与生态系统服务价值的空间关联性, 探讨生态系统服务价值变化量的冷热点分异规律, 为国家重点生态功能区生态服务功能的发生机制和评价方法提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

太湖县(30°09'~30°46'N, 115°45'~116°30'E)地处安徽省西南部、安庆市西南部、大别山南麓, 县域总面积为 2 040 km²。该县地势西北高、东南低, 属于丘陵低山地形。气候属典型的北亚热带季风气候, 四季分明, 降水丰富, 平均降水量为 1 368 mm, 水热资源充足。该区域的土地利用性质以林地居多, 农田次之, 建筑用地面积相对较小。2020 年太湖县户籍人口为 577 972 人, 比 2010 年户籍人口数量增加了 2.03%。从 2000—2020 年整体人口变化趋势来看, 户籍人口总量增加了约 13 472 人, 增长率为 2.39%, 城市化进程发展迅速, 城市化水平提高了 18.2%, 农村人口不断迁往城市地区。县域国内生产总值(GDP)从 2000 年的 16.87 亿元增至 2020 年的 198.12 亿元, 20 a 间增加了 10.7 倍。太湖县在人口和

经济方面呈现增长趋势,为太湖县带来了更多的旅游业发展机会,促进生态产业增长。2018年太湖县已成为安徽省内第1个“全国森林旅游示范县”,属于国家划定的重点生态功能区,具有生态保护、可持续发展方面的生态研究价值。

1.2 数据来源

研究数据包括了安徽省土地利用遥感影像解译数据和中国土地数据等。其中,太湖县2000、2010和2020年3期空间分辨率为30m的土地利用数据,土地利用遥感监测数据集来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>),并参照其土地利用分类体系,将太湖县土地利用划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地与未利用地。太湖县未利用地面积积极小,未被纳入研究范围。太湖县社会经济数据来自《安庆市统计年鉴》《中国农产品价格调查年鉴》等。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵表示某一时期不同土地利用类型的转化趋势和范围^[17],其表示如下:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中: S_{ij} 表示转移前*i*地类转换成转移后的*j*地类的面积(hm^2);*n*为土地利用的类型总数;*i*,*j*分别对应研究开始与结束的土地利用类型。

1.3.2 单一土地利用动态度 土地利用动态变化可用来表示土地流转的速度^[18],单一土地利用动态度反映某个地区或某个时期区域的某种土地利用总量变化的快慢与程度^[19-20]。公式如下:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中:*K*为土地利用的单一动态度; U_a 、 U_b 分别表示研究初期*a*和末期*b*的生态系统面积;*T*则为研究期时长(*a*)。

1.3.3 生态系统服务价值系数 通过计算太湖县1个标准单位生态系统服务价值当量因子的价值量,结合太湖县实际情况修正了生态系统服务价值系数,最终得到太湖县各土地利用类型单项生态系统服务与总价值量(表1)。

表1 太湖县单位面积生态系统服务价值当量及生态系统服务价值

Table 1 Ecosystem service value equivalent per unit area and ecosystem service value coefficient of Taihu County

| 一级分类 | 二级分类 | 太湖县单位面积生态系统服务价值当量 | | | | 太湖县单位面积生态系统服务价值/(元· hm^{-2}) | | | |
|------|---------|-------------------|-------|-------|-------|----------------------------------------|-----------|-----------|------------|
| | | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 |
| 供给服务 | 食物生产 | 1.00 | 0.33 | 0.43 | 0.45 | 2 158.41 | 712.28 | 928.12 | 960.49 |
| | 原材料生产 | 0.39 | 2.98 | 0.36 | 0.30 | 841.78 | 6 432.06 | 777.03 | 636.73 |
| | 气体调节 | 0.72 | 4.32 | 1.50 | 1.46 | 1 554.06 | 9 324.33 | 3 237.62 | 3 151.28 |
| 调节服务 | 气候调节 | 0.97 | 4.07 | 1.56 | 14.58 | 2 093.66 | 8 784.73 | 3 367.12 | 31 469.62 |
| | 水文调节 | 0.77 | 4.09 | 1.52 | 16.09 | 1 661.98 | 8 827.90 | 3 280.78 | 34 728.82 |
| | 废物处理 | 1.39 | 1.72 | 1.32 | 14.63 | 3 000.19 | 3 712.47 | 2 849.10 | 31 566.75 |
| 支持服务 | 保持土壤 | 1.47 | 4.02 | 2.24 | 1.20 | 3 172.86 | 8 676.81 | 4 834.84 | 2 590.09 |
| | 维持生物多样性 | 1.02 | 4.51 | 1.87 | 3.56 | 2 201.58 | 9 734.43 | 4 036.23 | 7 683.94 |
| 文化服务 | 提供美学景观 | 0.17 | 2.08 | 0.87 | 4.57 | 366.93 | 4 489.49 | 1 877.82 | 9 853.14 |
| | 总计 | 7.90 | 28.12 | 11.67 | 56.82 | 17 051.45 | 60 694.50 | 25 188.66 | 122 640.86 |

说明:由于建设用地当量因子系数为0,因此在计算生态系统服务价值过程中未纳入考虑。

1个标准单位生态系统服务价值当量(简称标准当量)是指农田每年单位面积土地内所产生的经济价值,可衡量各项生态系统产生的社会贡献水平^[21]。根据已有研究^[22],确定1个标准粮食当量的实际经济

价值量，等于当年全国平均粮食单产市场价值的 1/7。计算公式如下：

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i q_i p_i}{M} \quad (3)$$

式 (3) 中： E_a 为单位农业生态系统生产经营过程中的经济效益 ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$)； i 为作物种类； p_i 为 i 种作物的全国平均价格 ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$)； q_i 为 i 种作物总产量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)； m_i 为 i 种作物种植面积 (hm^2)； M 为 n 种作物总种植面积 (hm^2)。参考《安徽统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》，确定太湖县年标准粮食当量的经济效益与借鉴价值为 $2\,158.41 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

根据谢高地等^[15] 制定的单位面积生态系统服务价值当量因子表，划分出了供给服务、调节服务、支持服务、文化服务 4 个一级类型和 11 个二级类型的分类体系，并根据太湖县实际情况，对各项生态系统服务价值类型进行了调整。表 1 为经过修正，更符合研究区实际情况的太湖县生态系统服务价值系数。

GIS 格网尺度法以格网点状单元作为数据载体，以指标因子为基础评价分析单元^[23]。基于格网尺度下的生态系统服务价值研究，尺度的缩小和精度的提升为土地利用空间特征提供了新思路^[24]。根据太湖县的地形、面积与海拔等情况，利用 ArcGIS 采用 Great Fishnet 工具构建 $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ 格网。通过对各格网土地利用类型生态系统服务价值进行加权，从而获得整个研究区生态系统服务价值总值。公式如下：

$$E_{SV} = \sum_{m=1}^x \sum_{n=1}^y A_m E_{mn} (m = 1, 2, \dots, x; n = 1, 2, \dots, y) \quad (4)$$

式 (4) 中： E_{SV} 为生态系统服务价值； A_m 为格网内第 m 类生态系统的面积； E_{mn} 为格网内第 m 类生态系统的第 n 类生态系统功能单位面积的价值当量。 x 和 y 分别表示生态系统及服务功能的总类别数。

1.3.4 空间统计分析 空间自相关 (Moran's I) 一般用来表示某地理事物或现象在某区域不同位置的空间相关程度^[25]，可以评估土地利用与生态系统服务价值空间分布的集聚性，局部自相关可描述生态系统服务价值可能存在的空间关联模式^[26]，其中 LISA 聚类图能清晰反映各区域的关联属性^[27]。冷热点分析用以衡量生态系统服务价值空间变化的聚集与分异特征，探究生态系统服务价值的空间变化是否具有高值集聚 (热点) 和低值集聚 (冷点) 的现象。通过热点分析，可以确定生态系统服务价值高值区或低值区在空间上发生聚类的位置^[28]，空间自相关分析采用 Geoda 1.18 软件，冷热点分析采用 ArcGIS 热点分析空间统计工具完成。计算公式^[29] 为：

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{S^2} \quad (5)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$

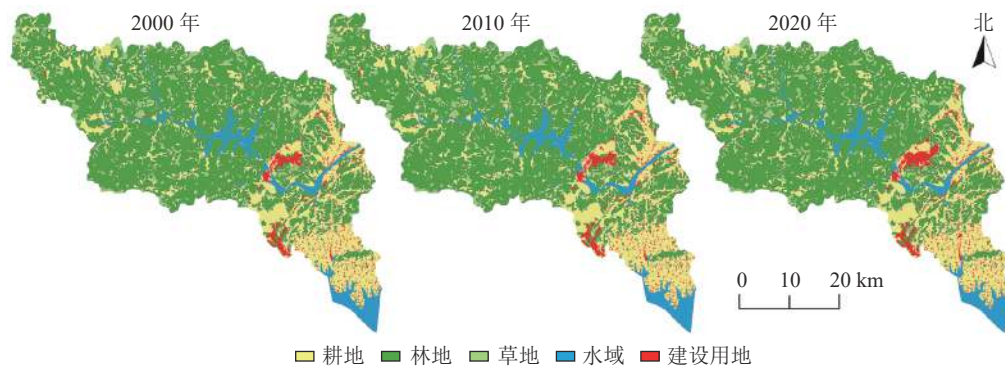
式 (5)~(6) 中： I_i 表示局部空间自相关指数； n 为格网单元数量； x_i 和 x_j 分别表示格网单元 i 和格网单元 j 的测度值； $(x_i - \bar{x})$ 是第 i 个格网单元上测度值与平均值的偏差； w_{ij} 表示空间权重的矩阵； S^2 表示方差。

2 结果与分析

2.1 太湖县土地利用变化分析

如图 1 和表 2 所示：2000—2020 年，太湖县林地占县域总面积的 59.57%，是太湖县最重要的土地利用形式；耕地是太湖县第二大土地利用形式，占比达 26.58%；其次是水域和草地，占总面积的比例分别为 6.18% 和 4.92%，县域的水资源和湿地草地等自然资源得到了一定程度的保护。规模最小的则为城市建设用地，仅为总面积比例的 2.75%。

建设用地和耕地分别是增长最多和减少最多的土地利用类型。2000—2020 年，建设用地增长了 $2\,926.80 \text{ hm}^2$ ，动态度为 3.72%，占比增加了 1.43%，耕地共减少了 $2\,040.39 \text{ hm}^2$ ，动态度为 -0.18%，占比减少了 1.00%。研究期间建设用地面积在逐年上升，耕地、林地和草地面积逐年下降，而水域面积总



基于自然资源部标准地图服务网站庆 S(2022)018 号的标准地图制作, 底图边界无修改。

图 1 2000—2020 年太湖县土地利用时空变化示意图

Figure 1 Schematic diagram of spatiotemporal changes in land use in Taihu County from 2000 to 2020

表 2 2000—2020 年太湖县土地利用变化

Table 2 Land use change in Taihu County from 2000 to 2020

| 土地利用类型 | 2000年 | 2010年 | 2020年 | 2000—2010年 | | 2010—2020年 | | 2000—2020年 | |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|
| | 面积/hm ² | 面积/hm ² | 面积/hm ² | 面积变化/hm ² | 动态度/% | 面积变化/hm ² | 动态度/% | 面积变化/hm ² | 动态度/% |
| 耕地 | 55 380.78 | 53 811.27 | 53 340.39 | -1 569.51 | -0.28 | -470.88 | -0.09 | -2 040.39 | -0.18 |
| 林地 | 121 758.90 | 121 458.20 | 121 040.10 | -300.70 | -0.02 | -418.10 | -0.03 | -718.80 | -0.03 |
| 草地 | 10 136.61 | 10 006.83 | 9 966.42 | -129.78 | -0.13 | -40.41 | -0.04 | -170.19 | -0.08 |
| 水域 | 12 608.64 | 12 543.03 | 12 616.02 | -65.61 | -0.05 | 72.99 | 0.06 | 7.38 | 0.00 |
| 建设用地 | 3 930.21 | 5 997.51 | 6 857.01 | 2 067.30 | 5.26 | 859.50 | 1.43 | 2 926.80 | 3.72 |

体呈上升态势, 面积共计增长了 7.38 hm²。

如表 3~5 所示: 2000—2010 年, 太湖县耕地主要转为了建设用地及林地, 占转移总面积的 97% 以上, 这主要受退耕还林政策的影响。林地面积在逐渐减少, 主要转为了耕地与建设用地。这与后 10 a 的变化趋势基本一致; 水域减少的面积不大, 仅部分转为了林地和建设用地, 占转移总面积的 68% 以上。2010—2020 年, 草地和耕地主要转为了林地和建设用地, 分别占转出总面积的 95% 和 98%; 而水域和林地面积均出现了一定程度的减少, 这与在此期间太湖县城市化加快, 城区面积扩张, 建设用地面积增加有一定的关联。2000—2020 年, 转入草地和水域的面积很小, 大部分土地向城乡建设用地转化, 且耕地、建设用地与林地转移面积占比在 90% 以上, 耕地与林地面积在减少, 建设用地面积在增加, 表明太湖县建设用地增长以耕地与林地转换为主。林地的主要转出地类是耕地与建设用地, 占总转出土地的 80% 以上, 其中多数区域成为耕地和林地。

表 3 2000—2010 年太湖县土地利用变化转移矩阵

Table 3 Land use change transition matrix in Taihu County from 2000 to 2010

| 2000年土地利用类型 | 2010年各土地利用类型转移面积/hm ² | | | | | 总计/hm ² |
|-------------|----------------------------------|-----------|----------|------------|-----------|--------------------|
| | 草地 | 耕地 | 建设用地 | 林地 | 水域 | |
| 草地 | 9 845.41 | 11.63 | 130.25 | 131.58 | 3.38 | 10 122.25 |
| 耕地 | 15.64 | 52 969.10 | 1 670.66 | 658.73 | 42.28 | 55 356.41 |
| 建设用地 | 0.95 | 101.28 | 3 798.04 | 28.13 | 1.09 | 3 930.50 |
| 林地 | 125.20 | 647.96 | 338.60 | 120 500.69 | 81.69 | 121 694.14 |
| 水域 | 4.76 | 56.63 | 59.29 | 73.31 | 12 404.98 | 12 598.97 |
| 总计 | 9 991.96 | 53 786.61 | 5 996.83 | 121 392.45 | 12 533.41 | 203 701.27 |

2.2 生态系统服务价值的时空变化特征

2.2.1 太湖县生态系统服务价值变化总量 如表 6 所示: 2000—2020 年太湖县生态系统服务价值总量呈递减趋势, 从 2000 年的 1 013 607.8 万元, 到 2020 年的 1 005 427.8 万元, 20 a 间共减少了 8 180.1 万

表 4 2010—2020 年太湖县土地利用变化转移矩阵

Table 4 Land use change transition matrix in Taihu County from 2010 to 2020

| 2010年土地利用类型 | 2020年各土地利用类型转移面积/hm ² | | | | | 总计/hm ² |
|-------------|----------------------------------|-----------|----------|------------|-----------|--------------------|
| | 草地 | 耕地 | 建设用地 | 林地 | 水域 | |
| 草地 | 9 552.98 | 36.01 | 62.11 | 319.51 | 11.51 | 9 982.12 |
| 耕地 | 30.79 | 51 150.11 | 744.13 | 1 643.18 | 204.04 | 53 772.24 |
| 建设用地 | 8.83 | 301.16 | 5 581.00 | 98.87 | 6.73 | 5 996.60 |
| 林地 | 337.48 | 1 689.69 | 463.08 | 118 664.63 | 202.57 | 121 356.45 |
| 水域 | 9.92 | 124.09 | 5.37 | 212.90 | 12 171.88 | 12 524.15 |
| 总计 | 9 940.00 | 53 300.05 | 6 856.69 | 120 939.09 | 12 596.74 | 203 631.56 |

表 5 2000—2020 年太湖县土地利用变化转移矩阵

Table 5 Land use change transition matrix in Taihu County from 2000 to 2020

| 2000年土地利用类型 | 2020年各土地利用类型转移面积/hm ² | | | | | 总计/hm ² |
|-------------|----------------------------------|-----------|----------|------------|-----------|--------------------|
| | 草地 | 耕地 | 建设用地 | 林地 | 水域 | |
| 草地 | 9 563.09 | 34.04 | 185.47 | 317.64 | 10.44 | 10 110.69 |
| 耕地 | 33.68 | 51 221.11 | 2 250.08 | 1 640.01 | 194.96 | 55 339.84 |
| 建设用地 | 2.05 | 249.33 | 3 617.36 | 57.29 | 3.25 | 3 929.28 |
| 林地 | 329.52 | 1 663.42 | 743.11 | 118 714.39 | 200.40 | 121 650.85 |
| 水域 | 10.21 | 129.64 | 56.65 | 202.55 | 12 187.31 | 12 589.36 |
| 总计 | 9 938.55 | 53 297.54 | 6 855.68 | 120 931.88 | 12 596.36 | 203 620.01 |

元，变化率为-0.81%。其中：2000—2010年，各土地利用类型生态系统服务价值均呈下降趋势，耕地的生态系统服务价值下降幅度最大，共减少了2 676.2万元；2010—2020年，除了水域外，其他土地利用类型生态系统服务价值均呈下降趋势，林地的下降幅度最大，降低率为0.59%，下降了4 362.7万元，其次是耕地，降低率为3.68%，减少总量为3 479.2万元，再次是草地，降低率为1.68%，减少了428.7万元，水域则增加了90.5万元，变化率为0.06%。2000—2020年太湖县土地利用类型的生态系统服务价值总量呈减少态势，但占比结构相对稳定，从大到小依次为林地、水域、耕地和草地，其中，耕地、林地和水域之和占比均超95%以上。

表 6 2000—2020 年太湖县不同土地利用类型生态系统服务价值 (ESV)

Table 6 Ecosystem service value (ESV) of different land use types in Taihu County from 2000 to 2020

| 土地利用类型 | 2000年 | | 2010年 | | 2020年 | | ESV变化量/万元 | | |
|--------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|------------|------------|------------|
| | ESV/万元 | 占比/% | ESV/万元 | 占比/% | ESV/万元 | 占比/% | 2000—2010年 | 2010—2020年 | 2000—2020年 |
| 耕地 | 94 432.2 | 9.3 | 91 756.0 | 9.1 | 90 953.0 | 9.0 | -2 676.2 | -802.9 | -3 479.2 |
| 林地 | 739 009.4 | 72.9 | 737 184.3 | 73.1 | 734 646.7 | 73.1 | -1 825.1 | -2 537.6 | -4 362.7 |
| 草地 | 25 532.7 | 2.5 | 25 205.8 | 2.5 | 25 104.1 | 2.5 | -326.9 | -101.8 | -428.7 |
| 水域 | 154 633.4 | 15.3 | 153 828.8 | 15.3 | 154 723.9 | 15.4 | -804.6 | 895.2 | 90.5 |
| 总计 | 1 013 607.8 | 100.0 | 1 007 974.9 | 100.0 | 1 005 427.8 | 100.0 | -5 632.9 | -2 547.2 | -8 180.1 |

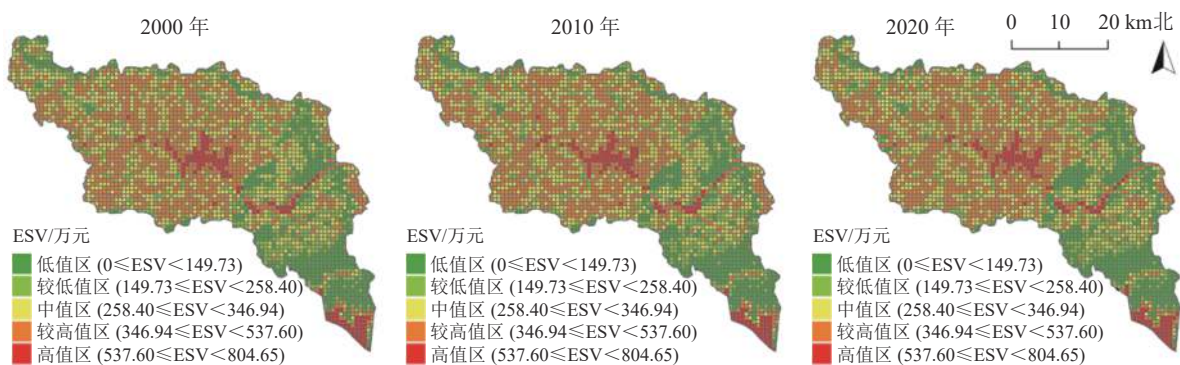
2.2.2 太湖县生态系统服务价值单项变化 2000—2020年对太湖县各单项生态系统的综合评价中，食物生产、原材料生产等所有二级分类指标的生态系统服务价值，都呈波动递减态势；通过表2和表6可以看出，各土地利用类型面积的下降会引起生态服务价值总量的变化。由于耕地与林地面积下降，建设用地面积扩大，保持土壤、维持生物多样性的功能价值量减少最多，共减少了2 563.3万元。2000—2020年在太湖县的各项生态系统服务价值中，以水文调节、气候调节以及维持生物多样性等的生态系统服务价值较高，其中水文调节的服务价值量最大，占总功能价值的16.19% (表7)。综上可知，太湖县生态系统服务以气体、气候、水文调节服务为主，因此保持湿地与水体面积不被转换，同时守住林地生态红线对县域生态水循环与森林自然生态功能的增强具有关键作用。

表7 2000—2020年太湖县单项生态系统服务价值(ESV)变化

| 生态系统服务功能 二级分类 | ESV/万元 | | | 比例/% | | | ESV变化量/万元 | | |
|------------------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|--------|------------|------------|------------|
| | 2000年 | 2010年 | 2020年 | 2000年 | 2010年 | 2020年 | 2000—2010年 | 2010—2020年 | 2000—2020年 |
| 食物生产 | 22 777.9 | 22 399.3 | 22 271.2 | 2.25 | 2.22 | 2.22 | -378.5 | -128.2 | -506.7 |
| 原材料生产 | 84 568.4 | 84 228.6 | 83 921.5 | 8.34 | 8.36 | 8.35 | -339.8 | -307.1 | -646.8 |
| 气体调节 | 129 393.7 | 128 806.7 | 128 353.6 | 12.77 | 12.78 | 12.77 | -587.0 | -453.1 | -1 040.1 |
| 气候调节 | 161 648.8 | 160 805.8 | 160 556.0 | 15.95 | 15.95 | 15.97 | -842.9 | -249.8 | -1 092.7 |
| 水文调节 | 163 805.6 | 163 008.8 | 162 801.7 | 16.16 | 16.17 | 16.19 | -796.7 | -207.1 | -1 003.9 |
| 废物处理 | 104 507.3 | 103 680.6 | 103 603.0 | 10.31 | 10.29 | 10.30 | -826.6 | -77.6 | -904.2 |
| 保持土壤 | 131 386.1 | 130 547.4 | 130 034.6 | 12.96 | 12.95 | 12.93 | -838.6 | -512.8 | -1 351.4 |
| 维持生物多样性 | 144 497.6 | 143 756.6 | 143 285.7 | 14.26 | 14.26 | 14.25 | -741.1 | -470.9 | -1 211.9 |
| 提供美学景观 | 71 022.6 | 70 741.0 | 70 600.3 | 7.01 | 7.02 | 7.02 | -281.6 | -140.7 | -422.3 |
| 总计 | 1 013 607.8 | 1 007 974.9 | 1 005 427.8 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | -5 632.9 | -2 547.2 | -8 180.1 |

2.2.3 太湖县生态系统服务价值空间分异 为了更好量化表达空间信息的精准性与差异化,使用 ArcGIS 10.2 软件选择适合研究区范围尺度大小为 600 m×600 m 的单元格网,对耕地、草地、林地、水体和建设用地的生态体系服务资源加以汇总,分别将 2000、2010 与 2020 年的生态系统服务价值从低到高分分为 5 个等级。

由图 2 可知:太湖县生态系统服务价值的空间分布呈现“南部与中部水体区域高—中北部林地区域较高—东南部耕地和草地区域为低值”的分异特征;从生态系统服务价值空间格局分布看,高值区主要分布于中部花凉亭水库和南部泊湖区域,水域是该区域主要的土地利用类型,生态系统服务价值系数较高。较高值区集中在中北部林地区域,生态环境优良,具体分布在李杜乡、寺前镇、天华镇、汤泉乡、大山乡、刘畈乡、塔镇的林地区域,低值区分布于城镇化水平高、地形较为平坦的耕地与建设用地集中区域,人类活动作用较为明显。城镇郊区林地外围分布的耕地与草地,自然生态环境良好,为中值与较低值分布区域。2000—2020 年生态系统服务价值变动集中在中高值区与低值区,且生态系统服务价值总量逐年略有下降,这是由于城镇化进程的加快使得生态系统受到一定破坏,后续应以林地和水域生态系统保护为重点,严守生态底线,在未来土地利用上进一步改善用地结构。



基于自然资源部标准地图服务网站庆 S(2022)018 号的标准地图制作,底图边界无修改。

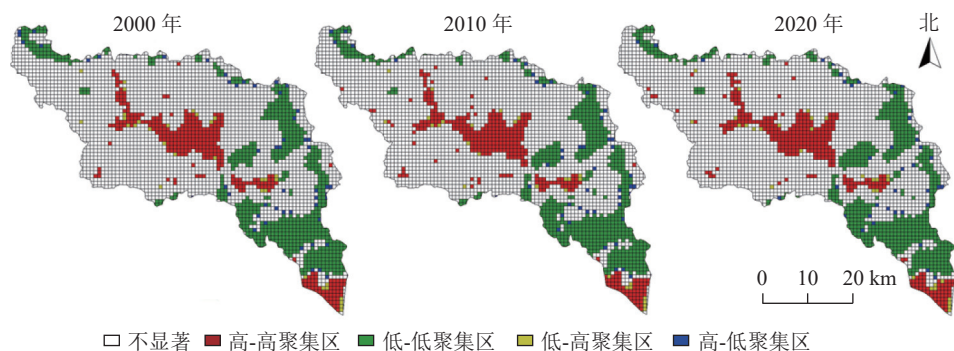
图 2 2000—2020 年太湖县生态系统服务价值(ESV)空间分异

Figure 2 Spatial differentiation of ecosystem services value (ESV) in Taihu County from 2000 to 2020

2.3 土地利用变化对生态系统服务价值空间分布的相关性分析

从图 3 可知:太湖县生态系统服务价值在研究土地利用变化的区间内,局部的聚集特征主要以高-高区域和低-低区域居多,而低-高和高-低区域为零星的分布特征。低-低区域地势相对平缓,是新型城市化较集中的地方,土地变化类型不明显,人类活动对生态系统干扰强度较高,因而生态系统服务价值也相应较低,而北部和中部水体流经的区域大多为高-高聚集区域。从现实情况分析,上游多是林地、

草地分布区，生态优势明显且脆弱性较高，因而水体面积的适当增加也会带动生态系统服务价值总量的上升，而低-高聚集区域大多集中于水域、湿地以及水陆缓冲带附近。受地形、交通的限制，这类区域较少受到人类干扰，用地类型基本保持不变，水域的高生态系统价值系数很大程度促进该区域形成了低土地利用-高生态系统服务价值的聚集格局。



基于自然资源部标准地图服务网站庆 S(2022)018 号的标准地图制作，底图边界无修改。

图 3 2000—2020 年太湖县生态系统服务价值 LISA 聚类图

Figure 3 LISA clustering of ecosystem service value in Taihu County from 2000 to 2020

图 4 所示：2000—2020 年冷、热点集聚效应明显，太湖县生态系统服务价值在总体上呈现“中热东冷，南部冷热分异明显”的分布特征，生态系统服务价值变化热点主要分布在中部的百里镇、牛集镇、弥陀镇、天华镇、寺前镇的交界带与大石乡南部，也是水域集中片区；生态系统服务价值变化冷点主要分布在北石镇东北部，小池镇与晋熙镇中部，江塘乡西部，徐桥镇大部分区域与大石乡的北部。2000—2020 年太湖县生态系统服务价值变化热点分布格局基本保持稳定，热点数量从 2000 年的 18.29% 上升到 2010 年的 18.65%，2020 年减至 18.23%，整体变化数量不大。冷点在晋熙镇、徐桥镇和大石乡有所增加，主要是受林地转为耕地、建设用地的影响。且冷点比例从 2000 年的 8.81% 下降到 2010 年的 8.69%，至 2020 年又增加到了 8.84%，冷点数量总体呈现波动上升的态势。2000—2020 年冷热点空间分布的区域及数量密度表明，生态系统服务价值变化幅度和区域分布呈现明显的集聚现象，这也进一步预测了已经发生变化的区域在今后更容易产生变化。

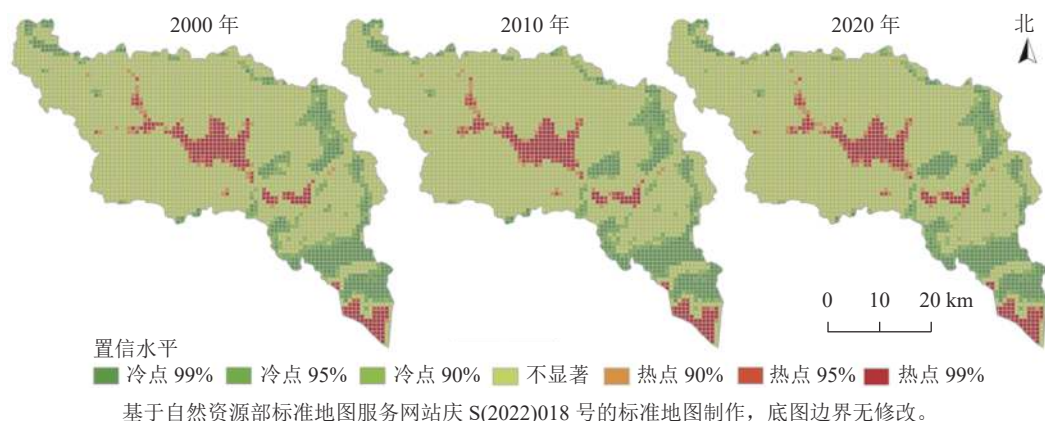


图 4 2000—2020 年太湖县生态系统服务价值变化量冷热点分析

Figure 4 Analysis of hot and cold spots of ecosystem service value change in Taihu County from 2000 to 2020

3 讨论

随着社会发展及人类需求的不断提升，在人地关系作用下，人们更倾向于通过技术进步和效率提升优化生产活动空间，并不断改善生态空间的规模、结构和功能。合理的城市空间发展布局和生态环境保护政策对生态系统服务价值具有提升作用^[30]。因此，在土地利用规划管理方面，通过分析生态系统服务价值对土地利用的响应，可以更加全面了解不同土地利用方式对生态系统功能的影响，有助于优化土地

利用结构。根据生态系统服务价值的变化情况,合理划分各类土地用途。针对国家重点生态功能区,应充分考虑生态系统服务功能,合理划定生态保护区、发展协调区、水源涵养区等重要区域,确保生态系统服务的持续供给和生态环境的可持续利用。

生态补偿为失去自我恢复能力的生态系统提供物质、经济和法律等一系列的补偿措施,也是确保和完善国家重点生态服务功能的根本保障和有效手段^[31]。准确评估不同土地利用类型对生态系统服务价值的影响,可确定合理的生态补偿标准,确保补偿金额与生态系统服务价值的损失相匹配,有助于为国家重点生态功能区生态补偿政策的制定提供科学依据,也有助于及时发现太湖县生态系统受损严重的地区,从而有针对性地实施生态补偿措施,促进生态环境的修复,保障生态系统功能的完整性和稳定性。在未来的研究中,可以基于生态系统稳定性评估、自然和人为活动的影响,建立相应的风险指标体系,采用数学模型和遥感工具分析生态风险的空间分布、趋势和程度,并根据县域范围进行不同生态风险指标的分区,以便进一步评估和管控生态风险,降低风险数值与生态系统遭受破坏的可能性,保障生态系统服务的稳定供给,从而推动国家重点生态功能区的建设实现平稳、可持续发展。

4 结论

2000—2020年,太湖县的土地利用类型以林地和耕地为主,耕地、草地和林地面积均有所减少,而建设用地和水域面积则有所增加。耕地减少最多,大部分转化为建设用地,其次为草地,转变为林地和建设用地。太湖县的新型城镇化进程导致城区土地利用面积快速增加,水体的增长主要来自农田。生态系统服务价值在总体平稳的趋势下略有减少,其中气体调节和水文调节的功能对生态系统服务价值影响最大。太湖县的生态系统服务价值空间分布呈现中部和南部水体较高、东部和东南部较低、北部相对较高的特点。中部低的建设用地和南部耕地平原区的生态系统服务价值总量较低并逐年下降,表明太湖县用地规模在扩大,处于城镇化进程不断推进的阶段。生态系统服务价值冷热点分布在空间格局上主要表现为高-高聚集和低-低聚集,表明生态系统服务价值变化高值区由北部向中部和东部偏移,冷点主要位于县城南部。

5 参考文献

- [1] 张合兵,于壮,邵河顺.基于多源数据的自然生态空间分类体系构建及其识别[J].中国土地科学,2018,32(12):24-33.
ZHANG Hebing, YU Zhuang, SHAO Heshun. Construction of classification system and identification of ecological spatial based on multi-sources data [J]. *China Land Science*, 2018, 32(12): 24-33.
- [2] 宋小青.论土地利用转型的研究框架[J].地理学报,2017,72(3):471-487.
SONG Xiaoqing. Discussion on land use transition research framework [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(3): 471-487.
- [3] 刘永强,龙花楼.长江中游经济带土地利用转型时空格局及其生态服务功能影响[J].经济地理,2017,37(11):161-170.
LIU Yongqiang, LONG Hualou. Study on the spatio-temporal patterns of land use transition and its impact on ecological service function of the middle of Yangtze River economic belt [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(11): 161-170.
- [4] Millennium Ecosystems Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: a Framework for Assessment* [M]. Washington D C: Island Press, 2003.
- [5] 吴卓,戴尔卓,葛全胜,等.土地利用和气候变化对森林地上生物量的影响模拟:以江西省泰和县为例[J].地理学报,2017,72(9):1539-1554.
WU Zhuo, DAI Erfu, GE Quansheng, et al. Modelling the integrated effects of land use and climate change scenarios on forest aboveground biomass: a case study in Taihe County of China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9): 1539-1554.
- [6] 田晶,郭生练,刘德地,等.气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J].地理学报,2020,75(11):2307-2318.
TIAN Jing, GUO Shenglian, LIU Dedi, et al. Impacts of climate and land use/cover changes on runoff in the Hanjiang River basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2307-2318.
- [7] 王国兵,赵小龙,王明慧,等.苏北沿海土地利用变化对土壤易氧化碳含量的影响[J].应用生态学报,2013,24(4):921-

- 926.
- WANG Guobing, ZHAO Xiaolong, WANG Minghui, *et al.* Effects of land use change on soil readily oxidizable carbon in a coastal area of northern Jiangsu Province, east China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(4): 921 – 926.
- [8] 魏兆珍, 李建柱, 冯平. 土地利用变化及流域尺度大小对水文类型分区的影响[J]. *自然资源学报*, 2014, **29**(7): 1116 – 1126.
- WEI Zhaozhen, LI Jianzhu, FENG Ping. The impacts of land use change and watershed scale on hydrologic type regions [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(7): 1116 – 1126.
- [9] 王志刚, 韩培, 周耀华, 等. 超大城市水土流失空间分布格局及其防治策略——以武汉市为例[J]. *水土保持通报*, 2018, **38**(5): 122 – 126, 353.
- WANG Zhigang, HAN Pei, ZHOU Yaohua, *et al.* Spatial distribution pattern of soil and water loss and its conservation strategies in megacity: a case study in Wuhan City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, **38**(5): 122 – 126, 353.
- [10] 焦菊英, 贾燕锋, 景可, 等. 自然侵蚀量和容许土壤流失量与水土流失治理标准[J]. *中国水土保持科学*, 2008, **6**(4): 77 – 84.
- JIAO Juying, JIA Yanfeng, JING Ke, *et al.* Natural soil erosion, soil loss tolerance and criterion of soil and water conservation [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, **6**(4): 77 – 84.
- [11] 余新晓, 吴岚, 饶良懿, 等. 水土保持生态服务功能评价方法[J]. *中国水土保持科学*, 2007, **5**(2): 110 – 113.
- YU Xinxiao, WU Lan, RAO Liangyi, *et al.* Assessment methods of ecological functions of soil and water conservation measures [J]. *Chinese Soil and Water Conservation Science*, 2007, **5**(2): 110 – 113.
- [12] COSTANZA R, D'ARGE R, GROOT D R, *et al.* The value of ecosystem services: putting the issues in perspective [J]. *Ecological Economics*, 1998, **25**(1): 67 – 72.
- [13] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, **13**(3): 10 – 13.
- XIE Gaodi, XIAO Yu, ZHEN Lin, *et al.* Study on ecosystem services value of food production in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, **13**(3): 10 – 13.
- [14] 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.* Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, **23**(5): 911 – 919.
- [15] 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 the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(8): 1243 – 1254.
- [16] 俞海, 任勇. 流域生态补偿机制的关键问题分析——以南水北调中线水源涵养区为例[J]. *资源科学*, 2007, **39**(2): 28 – 33.
- YU Hai, REN Yong. Key issues of watershed eco-compensation mechanism: a case study in water source areas of south-to-north water transfer [J]. *Resources Science*, 2007, **39**(2): 28 – 33.
- [17] 乔伟峰, 盛业华, 方斌, 等. 基于转移矩阵的高度城市化区域土地利用演变信息挖掘——以江苏省苏州市为例[J]. *地理研究*, 2013, **32**(8): 1497 – 1507.
- QIAO Weifeng, SHENG Yehua, FANG Bin, *et al.* Land use change information mining in highly urbanized area based on transfer matrix: a case study of Suzhou, Jiangsu Province [J]. *Geographical Research*, 2013, **32**(8): 1497 – 1507.
- [18] 段彦博, 雷雅凯, 马格, 等. 郑州市生态系统服务价值时空变化特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, **34**(3): 511 – 519.
- DUAN Yanbo, LEI Yakai, MA Ge, *et al.* Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in Zhengzhou [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2017, **34**(3): 511 – 519.
- [19] 蒋晶, 田光进. 1988年至2005年北京生态服务价值对土地利用变化的响应[J]. *资源科学*, 2010, **32**(7): 1407 – 1416.
- JIANG Jing, TIAN Guangjin. Responses of ecosystem service value to land use change in Beijing from 1998 to 2005 [J]. *Resources Science*, 2010, **32**(7): 1407 – 1416.
- [20] 彭文甫, 周介铭, 杨存建, 等. 基于土地利用变化的四川省生态系统服务价值研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(7): 1053 – 1062.

- PENG Wenfu, ZHOU Jieming, YANG Cunjian, *et al.* Research on ecosystem service values based on land use change in Sichuan Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(7): 1053 – 1062.
- [21] 姜哈, 吴群. 基于LUCC的江苏省生态系统服务价值评估及时空演变特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, **30**(11): 2712 – 2725.
- JIANG Han, WU Qun. Ecological service value evaluation and temporal-spatial evolution characteristics in Jiangsu Province based on LUCC [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(11): 2712 – 2725.
- [22] 陈万旭, 李江风, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J]. *自然资源学报*, 2019, **34**(2): 325 – 337.
- CHEN Wanxu, LI Jiangfeng, ZHU Lijun. Spatial heterogeneity and sensitivity analysis of ecosystem services value in the Middle Yangtze River region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, **34**(2): 325 – 337.
- [23] 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 of ecological service value in Yan'an City at the grid scale based on sloping land conversion program [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, **34**(3): 539 – 552.
- [24] 杨光宗, 吕凯, 李峰. 基于格网尺度的南昌市土地利用变化及生态系统服务价值时空相关性分析[J]. *中国土地科学*, 2022, **36**(8): 121 – 130.
- YANG Guangzong, LÜ Kai, LI Feng. Spatial and temporal correlation analysis of land use change and ecosystem service value in Nanchang City based on grid scale [J]. *China Land Science*, 2022, **36**(8): 121 – 130.
- [25] 公云龙, 张绍良, 章兰兰. 城市地价空间自相关分析——以宿州市为例[J]. *经济地理*, 2011, **31**(11): 1906 – 1911.
- GONG Yunlong, ZHANG Shaoliang, ZHANG Lanlan. Spatial autocorrelation of urban land price: a case study of Suzhou [J]. *Economic Geography*, 2011, **31**(11): 1906 – 1911.
- [26] 刘玉卿, 张华兵, 张云峰. 盐城海岸带生态系统服务价值时空分异[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(4): 774 – 782.
- LIU Yuqing, ZHANG Huabing, ZHANG Yunfeng. Spatio-temporal variation of ecosystem services value in Yancheng coastal zone [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(4): 774 – 782.
- [27] 李子杰, 高沪宁, 丁琪洵, 等. 基于Moran's *I*的安徽省太湖县耕地质量时空格局分析[J]. *水土保持通报*, 2021, **41**(3): 350 – 356.
- LI Zijie, GAO Huning, DING Qixun, *et al.* Analysis on temporal and spatial patterns of cultivated land quality based on Moran's *I* in Taihu County, Anhui Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, **41**(3): 350 – 356.
- [28] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 基于InVEST模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析[J]. *生态学杂志*, 2016, **35**(10): 2783 – 2792.
- WANG Bei, ZHAO Jun, HU Xiufang. Spatial pattern analysis of ecosystem services based on InVEST in Heihe River Basin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(10): 2783 – 2792.
- [29] 赵晓慧, 朱明畅, 雷军成, 等. 东江源区生态系统服务价值时空变化及驱动力研究[J]. *水生态学杂志*, 2023, **44**(2): 26 – 33.
- ZHAN Xiaohui, ZHU Mingchang, LEI Juncheng, *et al.* Spatio-temporal changes and driving forces of ecosystem service value in the headwater region of Dongjiang river [J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, **44**(2): 26 – 33.
- [30] 乔蕻强. 兰州市城市化与生态系统服务价值的耦合关系定量研究[J]. *水土保持通报*, 2017, **37**(4): 333 – 337,344.
- QIAO Hongqiang. Quantitative coupling between urbanization of Lanzhou City and its ecosystem service value [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, **37**(4): 333 – 337,344.
- [31] 吴健, 郭雅楠. 生态补偿: 概念演进、辨析与几点思考[J]. *环境保护*, 2018, **46**(5): 51 – 55.
- WU Jian, GUO Ya'nan. Analysis and some observations on the evolution of eco-compensation related concepts [J]. *Environmental Protection*, 2018, **46**(5): 51 – 55.