

DOI: 10.5846/stxb202205241459

王启名, 杨昆, 李立晓, 朱彦辉, 樊贤. 滇池流域水文生态系统服务权衡与协同时空异质性及其归因分析. 生态学报, 2023, 43(12): 4876-4891.

Wang Q M, Yang K, Li L X, Zhu Y H, Fan X. Spatio-temporal heterogeneity and attribution analysis of hydrological ecosystem services tradeoffs and synergies in Dianchi Lake Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 4876-4891.

滇池流域水文生态系统服务权衡与协同时空异质性及其归因分析

王启名^{1,2,3}, 杨 昆^{1,2,*}, 李立晓¹, 朱彦辉^{1,2}, 樊 贤^{1,2}

1 云南师范大学地理学部, 昆明 650500

2 西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心, 昆明 650500

3 百色学院人文与公共管理学院, 百色 533000

摘要: 城市化扩张影响流域水文生态系统服务供给, 导致水文生态环境压力增加。明晰滇池流域水文生态系统服务权衡与协同关系及归因, 对于滇池流域社会经济发展与生态可持续管理的双赢具有重要意义。基于 InVEST 模型估算了滇池流域 2000、2010、2018 年碳存储、氮输出、土壤保持和产水量 4 种水文生态系统服务, 分析了水文生态系统服务时空格局变化, 利用双变量 Moran's *I* 指数分析了滇池流域水文生态系统服务间时空异质性, 通过冗余分析和条件效应分析等方法识别水文生态系统服务归因。结果表明: (1) 水文生态系统服务的高值分布与土地利用覆盖有密切关系。(2) 水文生态系统服务空间变化主要体现在滇池周边人类活动干扰强烈的区域, 表现为氮输出、土壤保持和产水量增加, 碳存储减小。(3) 水文生态系统服务权衡与协同关系变化明显。碳存储和土壤保持为协同; 氮输出和产水量先呈协同后呈权衡; 产水量、氮输出均与碳存储和土壤保持为权衡, 前者空间变化不明显, 后者协同范围扩大, 权衡范围缩小。(4) 水文生态系统服务主要受多个因素共同影响, 主要包括: 高程、耕地比例、林地比例、建设用地比例。研究结果可为研究区水文生态系统环境治理和土地利用优化配置提供科学依据和决策支持。

关键词: 水文生态系统服务, 冗余分析, 条件效应分析, 双变量 Moran's *I* 指数, 权衡与协同, 滇池流域

Spatio-temporal heterogeneity and attribution analysis of hydrological ecosystem services tradeoffs and synergies in Dianchi Lake Basin

WANG Qiming^{1,2,3}, YANG Kun^{1,2,*}, LI Lixiao¹, ZHU Yanhui^{1,2}, FAN Xian^{1,2}

1 Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China

2 The Engineering Research Center of GIS Technology in Western China of Ministry of Education of China, Kunming 650500, China

3 School of Humanities and Public Administration, Baise University, Baise 533000, China

Abstract: Urbanization expansion affects the supply of hydrological ecosystem services in the basin, which leads to the increase of hydrologically ecological environment pressure. It is of great significance to clarify tradeoffs and synergies relationship and attribution of hydrological ecosystem services for the win-win of socio-economic development and ecological sustainable management in the Dianchi Lake Basin. Based on the InVEST model, this paper estimated four key hydrological ecosystem services: carbon storage, nitrogen output, soil rendition and water yield in the Dianchi Lake Basin in 2000, 2010, and 2018, and analyzed the changes in the temporal and spatial patterns of hydrological ecosystem services. The spatio-temporal heterogeneity between hydrological ecosystem services in the Dianchi Lake Basin was analyzed by bivariate

基金项目: 国家自然科学基金(42071381); 云南师范大学研究生科研创新重点基金项目(ydsbs184); 广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目(2020KY19018)

收稿日期: 2022-05-24; **网络出版日期:** 2022-10-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kmdcynu@163.com

Moran's I index, and the attribution of hydrological ecosystem services was identified by redundancy analysis and conditional effect analysis. The results showed that: (1) the high value distribution of hydrological ecosystem services was closely related to land use cover. (2) The spatial change in hydrological ecosystem services were mainly reflected in the areas with strong disturbance of human activities around Dianchi Lake, showing a trend of increasing nitrogen export, soil conservation and water yield, and decreasing carbon storage. (3) The trade-offs and synergies of hydrological ecosystem services changed significantly. Carbon storage and soil conservation were synergistic; nitrogen export and water yield were synergistic at first and then trade-off; both water yield and nitrogen export were trade-offs with carbon storage and soil conservation. The former had no obviously spatial change, while the latter expanded synergy and narrowed trade-off range. (4) The hydrological ecosystem services were mainly affected by multiple factors, including DEM, proportion of cultivated land, proportion of forest land, and proportion of construction land. The research results can provide scientific basis and decision support for the environmental governance of the hydrological ecosystem and the optimal allocation of land use in the study area.

Key Words: hydrological ecosystem services; redundancy analysis; conditional effect analysis; bivariate Moran's I index; trade-offs and synergies; Dianchi Lake Basin

生态系统服务是指人们直接或间接、有意或无意从生态系统结构、功能和过程获得的各种惠益^[1-2],具体包括供给、调节、文化和支持四个类型服务^[3-4]。生态系统不仅连接了自然环境和人类福祉,而且提供了相关学术研究和政策制定的框架^[5]。具体而言,水文生态系统服务是与水有关的生态系统服务对人类产生的益处,主要包括产水量、土壤保持、水质净化、气候调节和生物多样性^[6]。随着人口的增长和社会经济的快速发展,人类从水文生态系统服务中获得供给需求日益增加,比如淡水、食物、材料,但随之而来,导致其他水文生态系统服务供给能力减弱^[7],比如生态用水量减少^[8]、水污染增加^[9]、水土保持能力减弱^[10]、生物多样性不稳定^[11]、碳存储减少^[12]。据千年生态系统服务评估显示,大约有 60% 的生态系统服务功能正在退化或不可持续地利用^[3],尤其是与水有关的调节服务下降明显,直接威胁人类的福祉和健康。因此,厘清水文生态系统服务评估、管理、保护成为政府、决策者和相关利益者关注的重要课题^[13]。

生态系统服务种类多样性、功能复杂性、空间异质性和不均衡性^[14-15],使得生态系统服务之间的关系在空间上呈非线性关系、在时间上呈现动态演变。近年来,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、利益相关者关注的热点,多聚焦在流域^[16-17]、行政区^[18-19]、生态保护区^[20-21]尺度上,但与水有关的生态系统服务权衡与协调研究较少。生态系统服务权衡与协同相关性的研究,多利用随机采样^[22]、子流域^[13]和渔网^[23]采样进行分区统计提取相应的生态系统服务栅格值进行相关性分析,得出生态系统服务间的总体权衡与协同。但对生态系统服务关系的空间异质相关性研究较少,相关学者尝试空间叠置分析法^[24]、差异比较法^[25]、均方根误差法^[26]、逐像元相关分析法^[27]测算了生态系统服务间的权衡与协同的局部差异性,取得了一些成就,但也存在一些不足,叠加法对未变化和正向变化或负向变化的关系不能很好界定,差异比较法忽略了同一年份生态系统服务间的空间关系,使得生态系统服务间权衡与协同空间关系减弱或发生相反转化,均方根误差不能反映生态系统服务间协同关系,逐像元相关性未能考虑变量之间的空间权重。为了克服上述方法不足,本文引入局部双变量 Moran's I 指数法,它考虑了生态系统服务间的空间权重,很好地表达了生态系统服务的空间关联和依赖特征^[28]。滇池流域是典型的城市化流域,人口集聚和城市化发展,导致与水有关的生态系统服务压力增加,如氮磷输出增加、生态用水量减少、水土保持水平降低、碳存储降低,因此有必要厘清子流域水文生态系统服务间的空间异质性关系,为子流域生态系统的可持续管理提供理论依据,也有助于深入理解不同服务类型相互关联的作用机制^[29]。

生态系统服务驱动机制研究近年来一直是生态系统服务研究的热点^[30],但驱动机制研究比较薄弱,多采用一种或几种特定的自然或人为影响因素进行定性或相关分析,缺少多种影响因素综合进行分析,未能很好

地识别出关键驱动因子^[24,31]。目前,生态系统服务驱动机制研究方法多采用相关分析^[32]、线性回归^[33]、多元线性回归分析^[24]、地理探测器^[34]等方法分析驱动因素对生态系统服务的影响,却很少考虑多种驱动因素和多种生态系统服务间相互影响的驱动机制,未能准确分析驱动因素对生态系统服务间影响和解释程度。因此,本文引入冗余分析和条件效应分析更好地解释上述问题,冗余分析考虑了影响因素之间的关系对生态系统服务间关系的影响,明晰了生态系统服务关系的复杂机制^[13],条件效应分析可以量化影响因素对生态系统服务的解释率。只有明晰了生态系统服务的影响因素及其解释率,才能针对具体水文生态系统服务影响因素、因地制宜制定针对性的生态保护对策。

滇池流域是云贵高原最大的高原湖泊流域,也是我们国家生态系统评估与生态安全保护划定的重要水源涵养生态功能区,对于维持生态用水供给、水质净化、生态用水质量、渔业和生物多样性等具有非常重要的生态功能。但人口集聚、工业发展和城市扩张,滇池流域经济快速发展,出现了许多与水有关的生态环境问题,如水质污染加重、生态用水量下降、洪涝灾害频发、生物多样性减少、碳存储下降等。如何协调社会经济发展、保护与水有关的生态环境成为滇池流域生态管理的一大挑战。本文以滇池流域为例,基于 2000 年、2010 年和 2018 年土地利用变化数据,结合气象、土壤、DEM 等数据及辅助参数,使用 InVEST3.7.0 模型测算了与水有关的 4 种关键生态系统服务,即产水量、氮输出、碳存储、土壤保持,分析了滇池流域水文生态系统服务分布及其时空变化特征,通过全局和局部双变量 Moran's *I* 指数分析了水文生态系统服务权衡与协同总体和空间异质性特征,最后通过冗余分析法和条件效应法量化了生态系统服务归因,并根据不同影响因素因地制宜提出了针对性生态保护策略。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

滇池流域地处云南省中东部,位于 102°29'—103°1'E,24°29'—25°28'N,流域总面积约 2900km²,由昆明市的核心辖区组成,包括五华区、盘龙区、官渡区、西山区和呈贡区 5 个区大部分,以及周边嵩明县、寻甸回族彝族自治县、晋宁区 3 个县的部分^[35-36]。该流域海拔东北高西南低,最低海拔为 1753 m,最高海拔可达 2825 m(图 1)。气候类型属于亚热带低纬度高原山地季风气候,流域年平均气温 15℃,年均降水量 1000 mm,气候宜人,有“春城”之称^[37]。作为典型的城市流域,滇池流域农业和城市面源污染加剧,城市扩张较快,导致与水有关系统服务功能退化,氮磷输出集中且增多,水环境质量恶化,洪涝灾害增加,碳存储量降低,土壤保持力下降^[38]。

1.2 数据来源与处理

研究区数据主要包括土地利用变化数据、高程、坡度、降水量、气温、土壤、潜在蒸散发和模型的物理参数。土地利用变化监测数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>),土地利用变化数据包括 2000 年、2008 年和 2018 年三个时期的二级分类数据,空间分辨率 30m,验证精度均达到 85%以上,根据土地利用一级分类标准和滇池流域用地实际情况进行合并,包括耕地、林地、草地水域、建设用地,降水量、气温数据采用 2000—2018 年的年降水量和年均气温数据,空间分辨率 1 km,数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)。土壤数据包括土壤类型和土壤质地数据,来自中国科学院南京土壤研究所(<http://www.issas.ac.cn/>)。潜在蒸散发数据来自于全球干旱指数和潜在蒸散气候数据库第二版本(<https://cgiaresi.community/data/global-aridity-and-pet-database/>)。降水侵蚀力数据来源于中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所(<http://www.imde.ac.cn/>)。人口密度和 GDP 数据来源于昆明市统计年鉴。文中数据坐标系统统一转化为 WGS_1984_UTM_Zone_48N。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务模型

本文根据滇池流域实际情况选取了与水有关生态系统服务,包括产水量、氮输出、土壤保持和碳存储 4 个

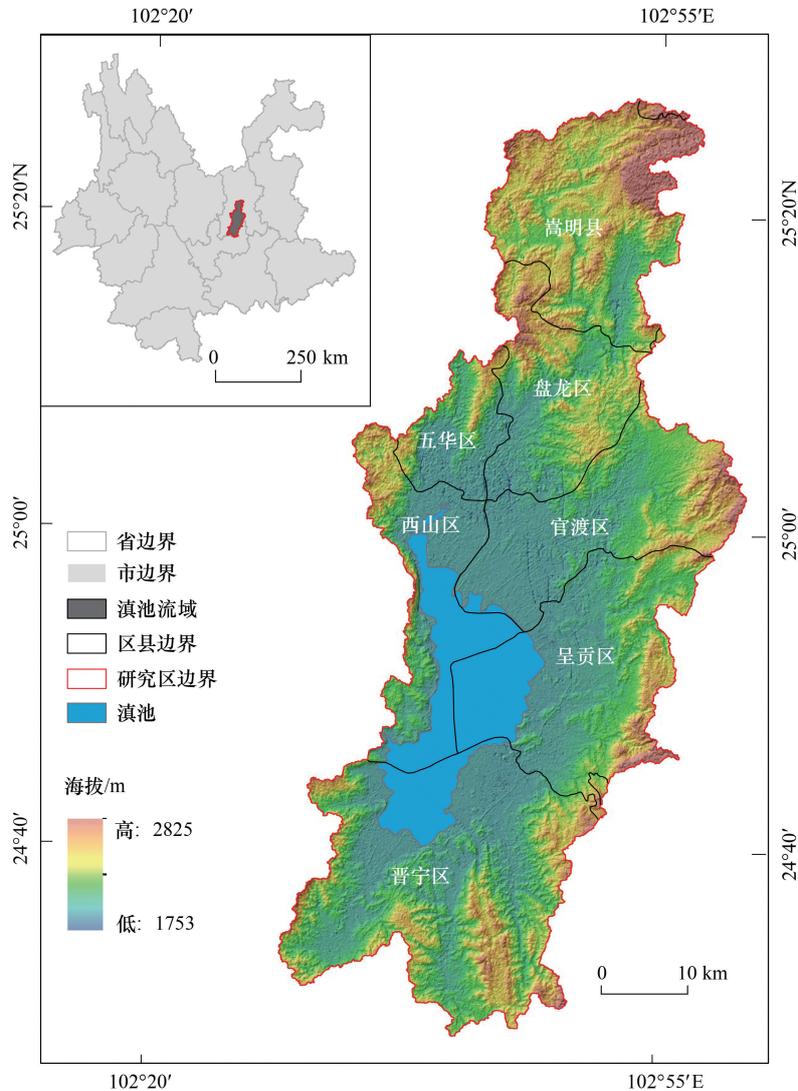


图 1 研究区域位置

Fig.1 Location of the study area

关键指标,并结合 InVEST 模型对应的 4 个模块计算了 4 个生态系统服务值。

(1) 产水量

产水量是生态用水量主要标志,产水量越大,生态用水量越小^[8]。InVEST 模型中产水量模块 (Water Yield) 是基于水量平衡原理^[29],同时考虑不同土地利用类型、地形、平均降水量、平均潜在蒸散热、土壤质地、植被覆盖地类进行计算,模型参数参考 InVEST 用户指南^[39]和已有相似研究^[37]。计算公式如下:

$$Y_{(x)} = \left(1 - \frac{AET_{(x)}}{P_{(x)}}\right) \times P_{(x)} \quad (1)$$

式中, $Y_{(x)}$ 表示某种土地利用类型在栅格 x 上的年产水量 (mm/a), $AET_{(x)}$ 为某种土地利用类型在栅格 x 上的年实际蒸散发量 (mm/a), $P_{(x)}$ 为栅格 x 上的年降水量 (mm/a)。

(2) 氮输出

InVEST 模型中营养输送比模块 (Nutrient delivery ratio, NDR) 是基于简单的质量平衡方法,描述大量营养物质在空间上的流动^[39]。氮输出是水质净化的重要标志,氮输出量越大,水质净化能力越低^[13]。单位像素上的氮输出量是基于单位像素上地表氮载荷量和地下氮载荷量分别与各自氮输出比乘积之和,所有像素上氮

输出量之和即为整个地块的氮输出量。计算公式如下:

$$X_{\text{export}_i} = \text{load}_{\text{surf},i} \times \text{NDR}_{\text{surf},i} + \text{load}_{\text{subs},i} \times \text{NDR}_{\text{subs},i} \quad (2)$$

$$X_{\text{export}_{\text{tot}}} = \sum_i X_{\text{export}_i} \quad (3)$$

式中, $X_{\text{export}_{\text{tot}}}$ 表示某地块上的氮输出总量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), X_{export_i} 表示单位像素 i 上的氮输出量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), $\text{load}_{\text{surf},i}$ 和 $\text{load}_{\text{subs},i}$ 表示单位像素上的地表和地下氮载荷量, $\text{NDR}_{\text{surf},i}$ 和 $\text{NDR}_{\text{subs},i}$ 表示单位像素上的地表和地下氮输出载荷因子。其中模型所需参数参考 InVEST 用户指南^[27] 和相似区域的研究成果^[28, 30]。

(3) 土壤保持

土壤保持量根据 InVEST 模型中泥沙输送比模块 (Sediment Delivery Ratio, SDR) 进行的计算, 是在通用土壤流失方程的基础之上, 考虑了特定气候和地形在实际情况下拦截上游沉积物的能力, 使得计算结果更加真实可靠。其计算公式如下:

$$SD = \text{RKLS} - \text{USLE} = R \times K \times LS - R \times K \times LS \times P \times C \quad (4)$$

式中, SD 代表土壤保持量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), RKLS 表示特定气候地形下的潜在土壤侵蚀量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), USLE 表示管理和工程措施下的实际土壤侵蚀量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), R 表示特定气候地形下的平均降雨侵蚀力 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$), K 表示土壤可侵蚀性因子 ($\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$), LS 表示坡度坡长因子, P 表示水土保持措施因子, C 表示植被覆盖和管理因子。其中土壤可侵蚀性因子来源于水利部《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-27), 生物物理属性表参数来自于 InVEST 用户指南^[39] 和相似区域的研究成果^[8, 32]。

(4) 碳存储

一个地块上的碳存储很大程度上取决于四个碳库的大小: 地上生物量、地下生物量、土壤和死亡有机质^[39]。评估 InVEST 模型的碳存储以各土地利用类型为栅格单元, 分别计算不同土地利用类型下的四个碳库之和。计算公式如下:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (5)$$

式中, C_{tot} 表示总碳存储量 (t/hm^2), C_{above} 表示地上碳存储, C_{below} 表示地下碳存储, C_{soil} 示土壤碳存储, C_{dead} 表示死亡有机质碳存储。滇池流域不同土地利用类型的四个碳库密度依据参考文献进行定义^[40-42]。

1.3.2 双变量空间自相关

双变量 Moran's I 指数是单变量 Moran's I 指数在空间统计方法的拓展, 可以揭示两个地理要素或现象的空间单元和相邻空间单元的空间关联和依赖特征^[28]。双变量 Moran's I 指数包括双变量全局 Moran's I 指数和双变量局部 Moran's I_i 指数, 前者用于探究研究区生态系统服务间总体相关性, 后者用于探究研究区生态系统服务间局部相关性^[29]。

双变量全局 Moran's I 指数的范围为 $[-1, 1]$, 当 Moran's $I > 0$ 时, 表示研究区生态系统服务间呈正相关, 表现为协同, 当 Moran's $I < 0$ 时, 表示研究区生态系统服务间呈负相关, 表现为权衡, 当 Moran's $I = 0$ 时, 表示研究区生态系统服务间不相关^[43]。双变量局部 Moran's I_i 指数通过双变量局部空间关联指数 (LISA) 聚类图来表达, 双变量 LISA 聚类图可划分为四种集聚特征, 对四种集聚特征进行重新组合可得到双变量局部 Moran's I_i 指数的相关性, 即高高集聚和低低集聚属于协同关系, 高低集聚和低高集聚属于权衡关系^[29, 43]。

1.3.3 冗余分析

冗余分析 (RDA) 是一种典范排序分析, 很好地分析了响应变量与解释变量矩阵之间多元多重线性回归拟合值矩阵的主成分分析 (PCA), 并通过统计检验反映响应变量与解释变量之间的显著性^[44]。本文采用 R 4.1.3 中 `vegan` 包分析水文生态系统服务间关系的自然环境、社会经济的响应机制。响应变量为水文生态系统服务指标, 包括碳存储、氮输出、土壤保持和产水量。影响滇池流域水文生态系统的因素很多, 包括自然、社会经济因素。本文选取地形因子 (高程 (DEM)、坡度 (Slope))、气象因子 (年均降雨量 (Precipitation)、年均温度 (Temperature))、土地利用变化因子 (耕地比例 (Cultivated land ratio)、林地比例 (Forestland ratio)、草地比例 (Grass land ratio)、建设用地比例 (Construction land ratio) 和社会经济因子 (人口密度 (Population

density)、GDP)作为解释变量。在进行 RDA 分析之前,首先对水文生态系统服务指标和自然社会经济因子进行标准化,然后进行 RDA 分析,最终进行置换检验以判断 RDA 结果的显著性。

1.3.4 条件效应分析

条件效应分析是在 RDA 分析基础之上,依据置换检验的显著性 (F 值)对影响因素进行重要性的排位,然后按影响因素高低顺序依次进行 RDA 分析,剔除前变量影响因素后的环境变量对响应变量的影响^[45],即每运行一次所获得校正 R^2 减去前一次运行的校正 R^2 ,就是当前影响因素的条件效应。通过条件效应分析,可以得到每个影响因素对生态系统服务的解释率,很好地解释了不同影响因素对生态系统服务的不同影响程度。

2 结果

2.1 滇池流域土地利用时空格局分布和变化

土地利用变化时空分布和结构及其变化差异明显(图 2 和图 3)。从空间上看,耕地主要呈条状和片状分布于滇池东部和南部以及城市周边,草地呈条状主要分布在滇池流域北部和东南部耕地周边,林地呈片状分布在滇池流域东部、北部及流域边界海拔较高的地方,建设用地主要分布在滇池东北部。2000—2010 年,建设用地向东和南扩张,侵占了东部、南部大量耕地和草地,2010—2018 年,滇池流域东部林地转为建设用地,滇池东部草地减少明显,主要转化为建设用地、耕地和林地。从结构上看,主要土地利用类型由 2000 年的林地、草地和耕地(占比 72.33%)转变为 2018 年的林地、建设用地和草地(占比 73.47%),建设用地增加明显,增加了 152.22 km²,耕地减少最多,减少了 95.71 km²,其次是草地,减少了 41.26 km²,林地减少最少,减少了 14.68 km²,水域基本保持不变。人口向城市集聚、社会经济活动加强、城市化扩张,增加了建设用地需求,导致建设用地侵占了城市周边的耕地、草地和少量林地,改变了流域土地利用的结构和空间分布,影响水文生态系统服务的时空变化和相互关系。

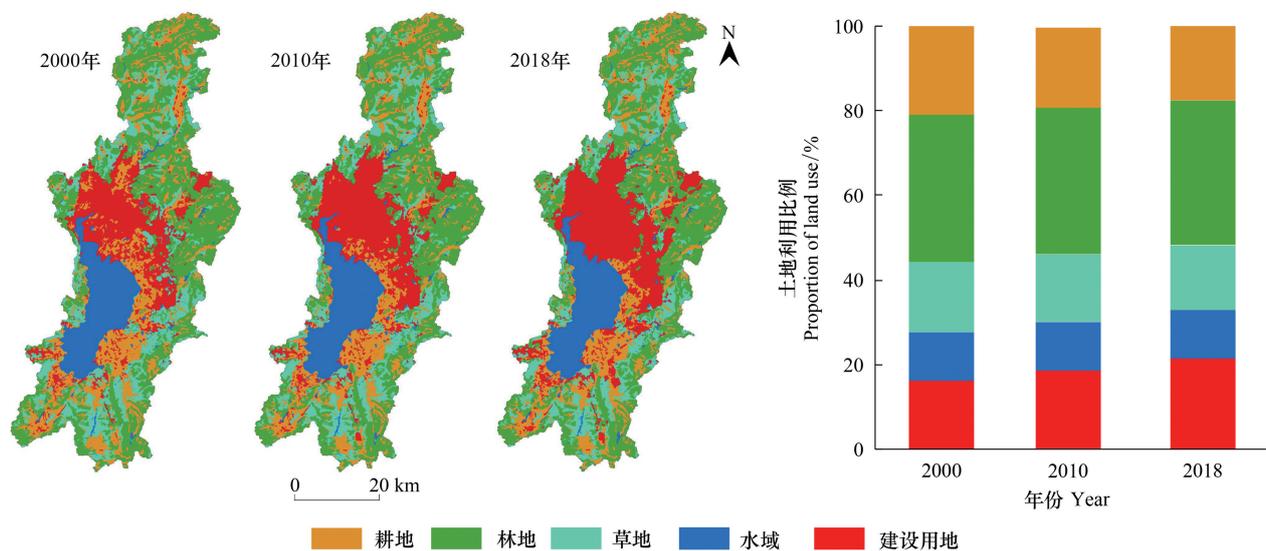


图 2 滇池流域土地利用变化空间分布及结构比例

Fig.2 Spatial distribution and structural ratio of land use change in the Dianchi Lake Basin

2.2 滇池流域水文生态系统服务的时空异质性

碳存储、氮输出、土壤保持、产水量高值和低值空间差异显著(以 2018 年为例)(图 4)。对比滇池流域土地利用空间分布(图 2)发现,水文生态系统服务空间差异受土地利用覆盖影响较大。碳存储高值主要成片状分布在滇池流域北部、南部和东部林草覆盖较高的地方,而低值区主要分布在滇池流域建成区;氮输出量高

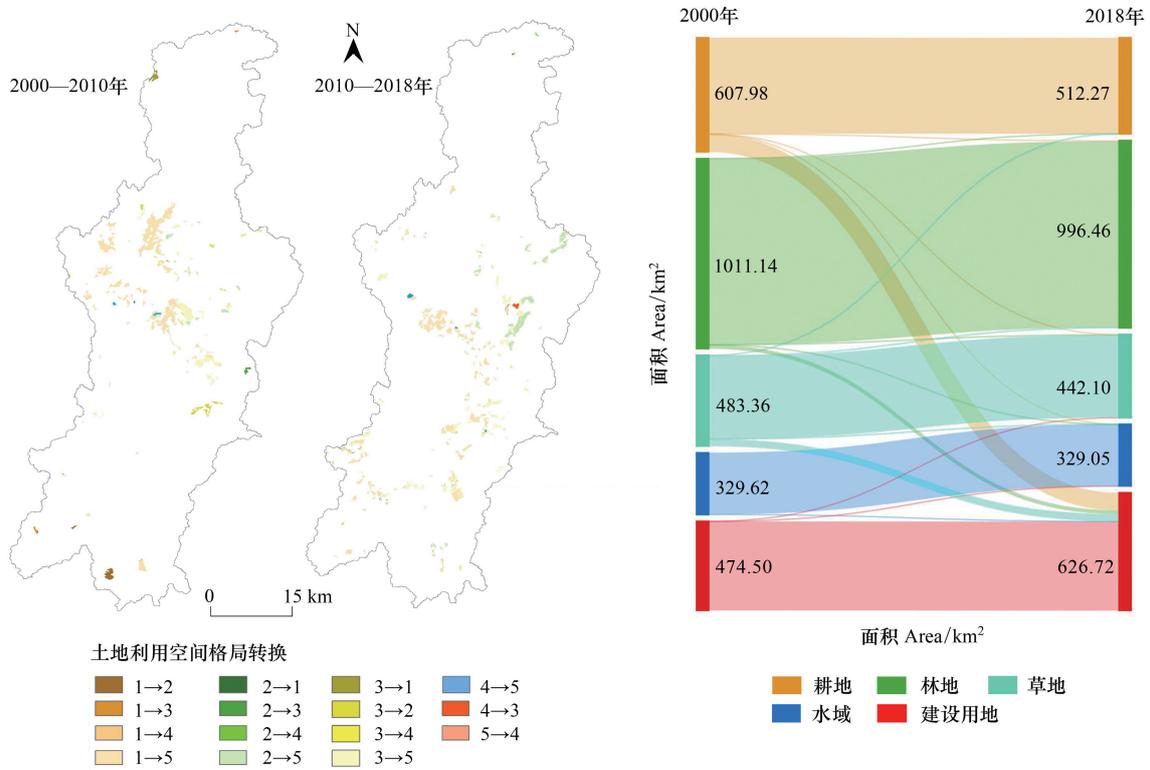


图3 滇池流域土地利用空间格局和结构变化

Fig.3 Spatial pattern and structural change of land use in the Dianchi Lake Basin

1:耕地,2:林地,3:草地,4:水域,5:建设用地

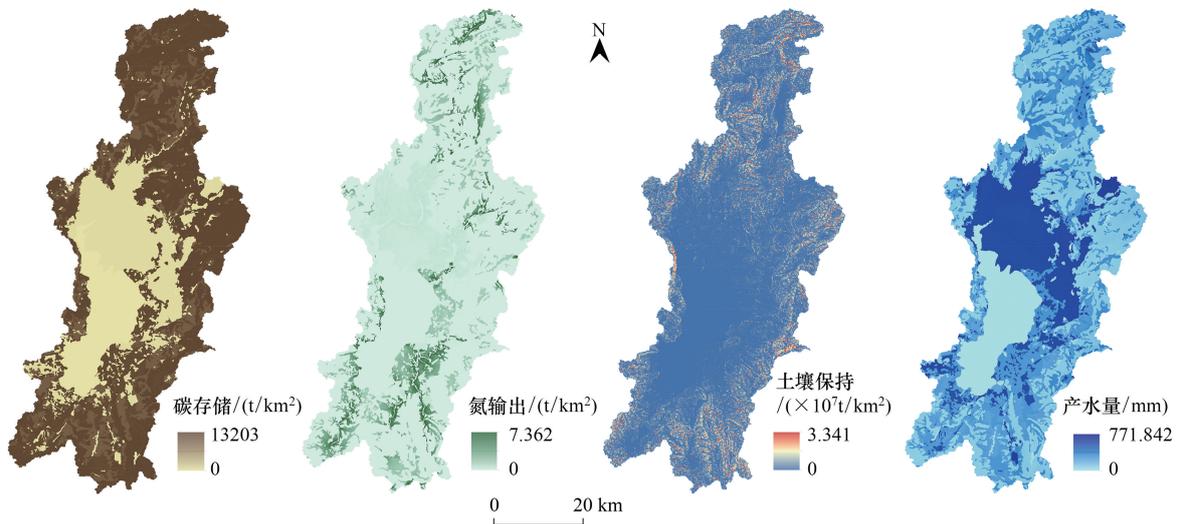


图4 2018年滇池流域水文生态系统服务分布格局特征

Fig.4 Distribution patterns of hydrological ecosystem services in the Dianchi Lake Basin in 2018

值主要成条状和带状分布在滇池周边,尤其是滇池南部、北部耕地和乡村居民点较多的地方,而其低值主要成片状分布在滇池流域周边林草地分布较多的区域;土壤保持量高值主要成细条状和点状分布在滇池流域周边林草地密集区域,而其低值主要分布在滇池周边城市建成区和耕地覆盖区;产水量高值主要呈大片分布在城市建成区建设用地密度较高的地方,由于建设用地渗水能力差,有利于降水的汇集;产水量低值区主要分布在滇池周边林地连片分布区域。

水文生态系统服务变化主要分布在滇池周边人类干扰活动强烈的区域,氮输出、土壤保持、产水量增加,碳存储减小,且氮输出和产水量增加较多(图5)。随着城市向东南部、南部扩张,城市周边耕地和草地转化为建设用地,固碳能力降低,碳存储量减少;碳存储量增加主要呈点状或小斑块状零星分布在滇池流域东部和南部,由于当地政府注重水库周边生态建设,增加了碳存储量。氮输出量增加主要分布在滇池流域城市中心周边,主要由于耕地和城市周边乡村居民点的非点源污染所致;氮输出量减少主要分布在滇池东部和南部,主要由于耕地转化为林地,林地具有较强的固氮能力。土壤保持量减少主要分布在滇池流域的东部,主要由于城市蔓延,使得草地和林地转化为建设用地,建设用地水土保持能力较低;土壤保持量增加主要分布在中心城市周边建设用地扩张区域并向南迁移,主要由于耕地转为建设用地所致,建设用地水土保持能力较耕地强。产水量增加主要分布在中心城市周边的城市连片扩张区,由于城市建设用地成片增加导致,产水量减少主要呈块状零星分布在滇池流域东部和南部,主要由于该区域生态公园和湿地公园的建设增加了地表的水源涵养能力。

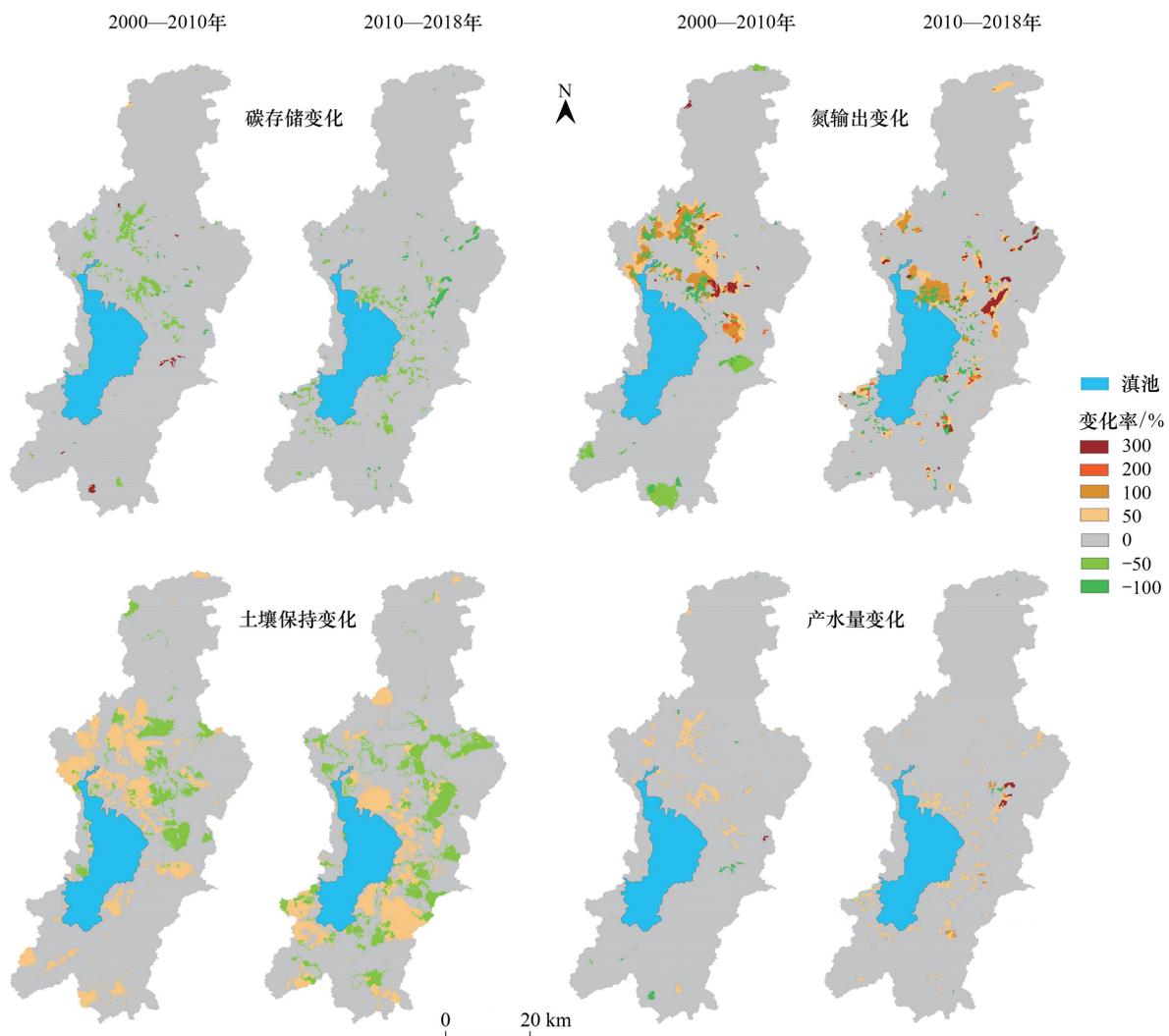


图5 滇池流域水文生态系统服务时空格局变化

Fig.5 Temporal and spatial patterns of hydrological ecosystem services in the Dianchi Lake Basin

2.3 滇池流域水文生态系统服务权衡与协同变化

从2000到2018年,滇池流域水文生态系统服务权衡与协同的双变量 Moran's I 指数相关性显著 ($P < 0.05$) (图6)。氮输出与碳存储和土壤保持双变量 Moran's I 指数小于0,表现出权衡关系,且权衡关系减弱,主要由于城市扩张侵占城市周边和城乡结合部耕地和草地,使得氮输出量增加,碳存储和土壤保持能力降低,

后期城市排水管网的增加减少了地表径流中氮输出量。碳存储和土壤保持双变量 Moran's *I* 指数大于 0, 表现为协同作用, 且协同作用增强。产水量与碳存储和土壤保持双变量 Moran's *I* 指数小于 0, 表现为权衡作用, 产水量与碳存储的权衡作用增强, 与土壤保持的权衡作用减弱, 主要由于建设用地增加, 使得地表径流增强, 产水量增加, 建设用地不断侵占耕地、林地和草地, 使得碳存储不断减少; 且建设用地不易被侵蚀, 水土保持能力有所提高。氮输出和产水量双变量 Moran's *I* 指数先大于 0 后小于 0, 表明两者先呈协同后呈权衡, 前期主要由于农田大量化肥使用和粗放式管理、建设用地扩张和城市生活污水乱排放, 导致氮输出和产水量均呈增加趋势, 使两者表现为协同作用; 后期农田集约化管理、有机肥使用和城市生活污水经地下管道流入滇池, 使得地表氮输出量减少, 但城市继续扩张, 地表径流增加, 使产水量不断增加, 使两者表现为权衡作用。

双变量 Moran's *I* 指数反映水文生态系统服务间权衡与协同关系及其显著性与 Pearson 相关系数保持一致 (图 6), 验证了全局 Moran's *I* 指数可以正确地反映生态系统服务间的权衡与协同关系; 双变量 Moran's *I* 指数反映的相关性普遍比 Pearson 相关系数的值低, 主要是因为计算全局 Moran's *I* 指数过程中纳入了空间权重矩阵 W_{ij} , 使得水文生态系统服务间权衡与协同关系在空间上存在一定的滞后性, 却真实地反映了生态系统服务的空间相关性。

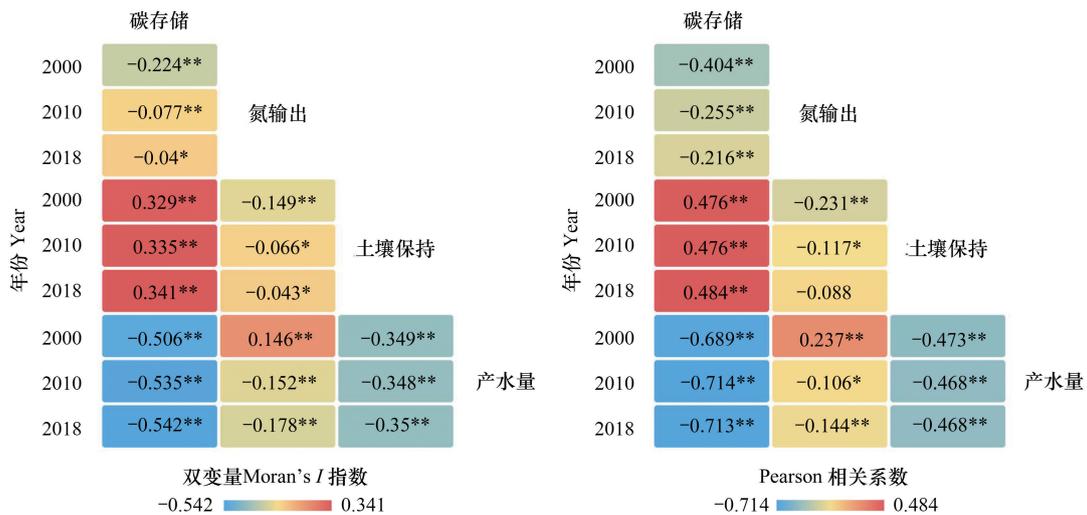


图 6 滇池流域水文生态系统服务权衡与协同变化分析

Fig.6 Analysis on tradeoffs and synergistic changes of hydrological ecosystem services in the Dianchi Lake Basin

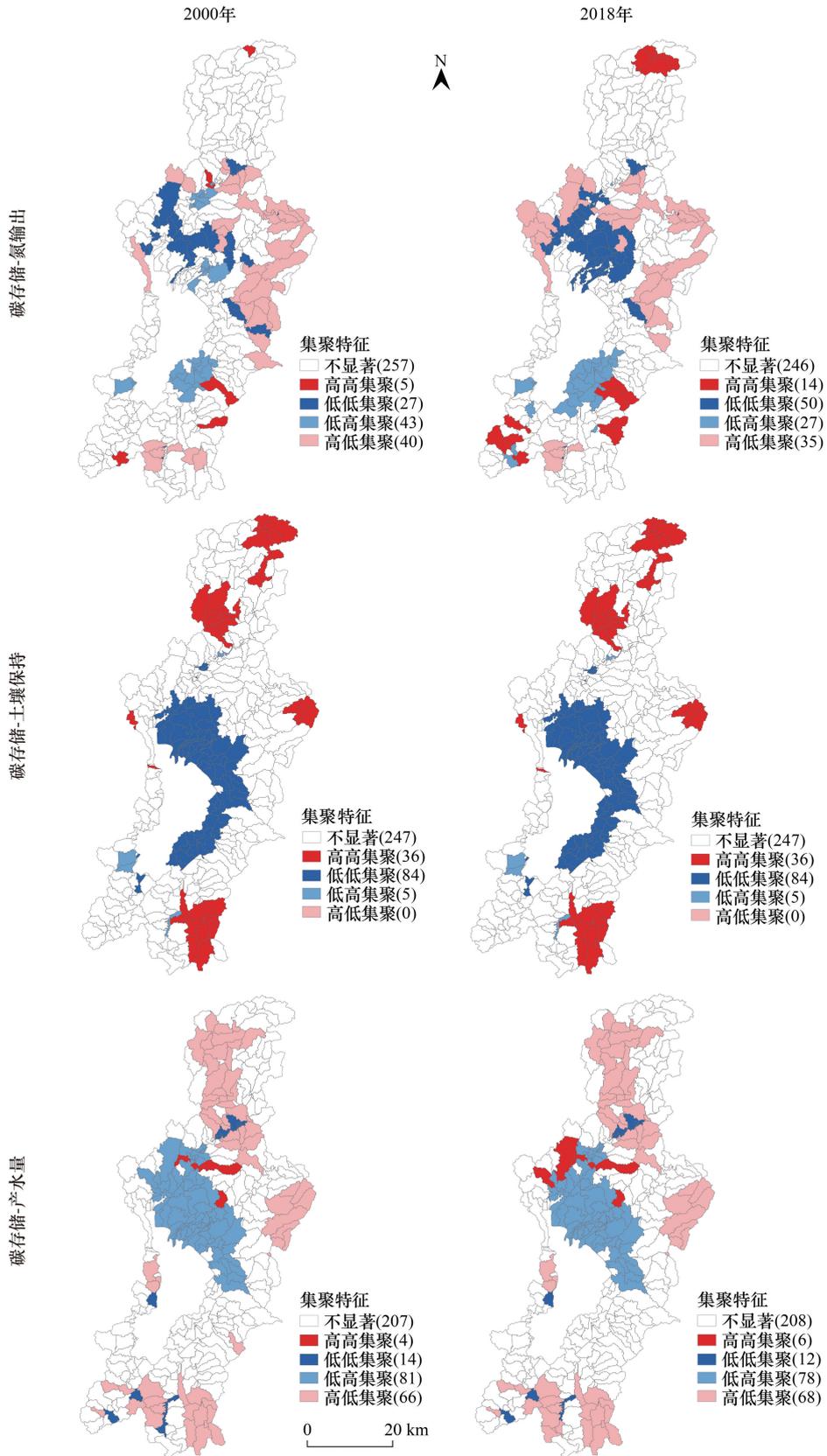
** 和 * 表示在 0.01 和 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

滇池流域水文生态系统间双变量 LISA 集聚特征均通过的 95% 显著性检验, 空间上权衡与协同分布异质性明显 (图 7)。碳存储与氮输出协同表现在城市中心区和流域南部, 权衡表现在城市中心区周边和流域东边, 协同子流域数增加, 权衡子流域数减小, 权衡占优势; 碳存储与土壤保持主要表现为协同, 且空间变化不显著, 主要分布在滇池东部建设用地和耕地分布区, 以及流域北部和西南部林草覆盖区; 产水量与碳存储和土壤保持主要表现为权衡关系, 且空间变化不显著, 主要分布在城市建成区和滇池流域北部、东部、南部林地和草地覆盖区; 氮输出和土壤保持协同主要分布在城市建成区, 权衡主要分布在滇池东部草地和流域东南部 and 北部林地分布区, 权衡范围减少, 协同范围增加; 氮输出和产水量权衡分布在滇池流域北部、东部、南部林地和草地覆盖区, 协同分布在城市建成区, 协同范围减少, 权衡范围扩大。

2.4 滇池流域水文生态系统服务关系归因分析

R 语言 vegan 包中使用 decorana 函数判断响应变量因子适合线性模型 (主成分分析 (PCA)、冗余分析 (RDA)) 还是单峰模型 (对应分析 (CA)、典范对应分析 (CCA)), 若前四个轴的轴向长度 (Axis length) 小于 3 选择线性模型较好, 本研究 4 个生态系统服务指标的轴向长度均小于 3, 采用 RDA 模型。本文选取了 4 个

生态系统服务指标和 10 个自然和社会经济影响因素分别作为响应变量和解释变量,首先利用 ArcGIS10.7 分区统计工具分别提取 372 个子流域 2000 年和 2018 年的生态系统服务、地形气象、社会经济因素指标的平均值,并对其进行标准化,并计算了每个子流域的耕地、林地、草地和建设用地比例,最后进行 RDA 分析。



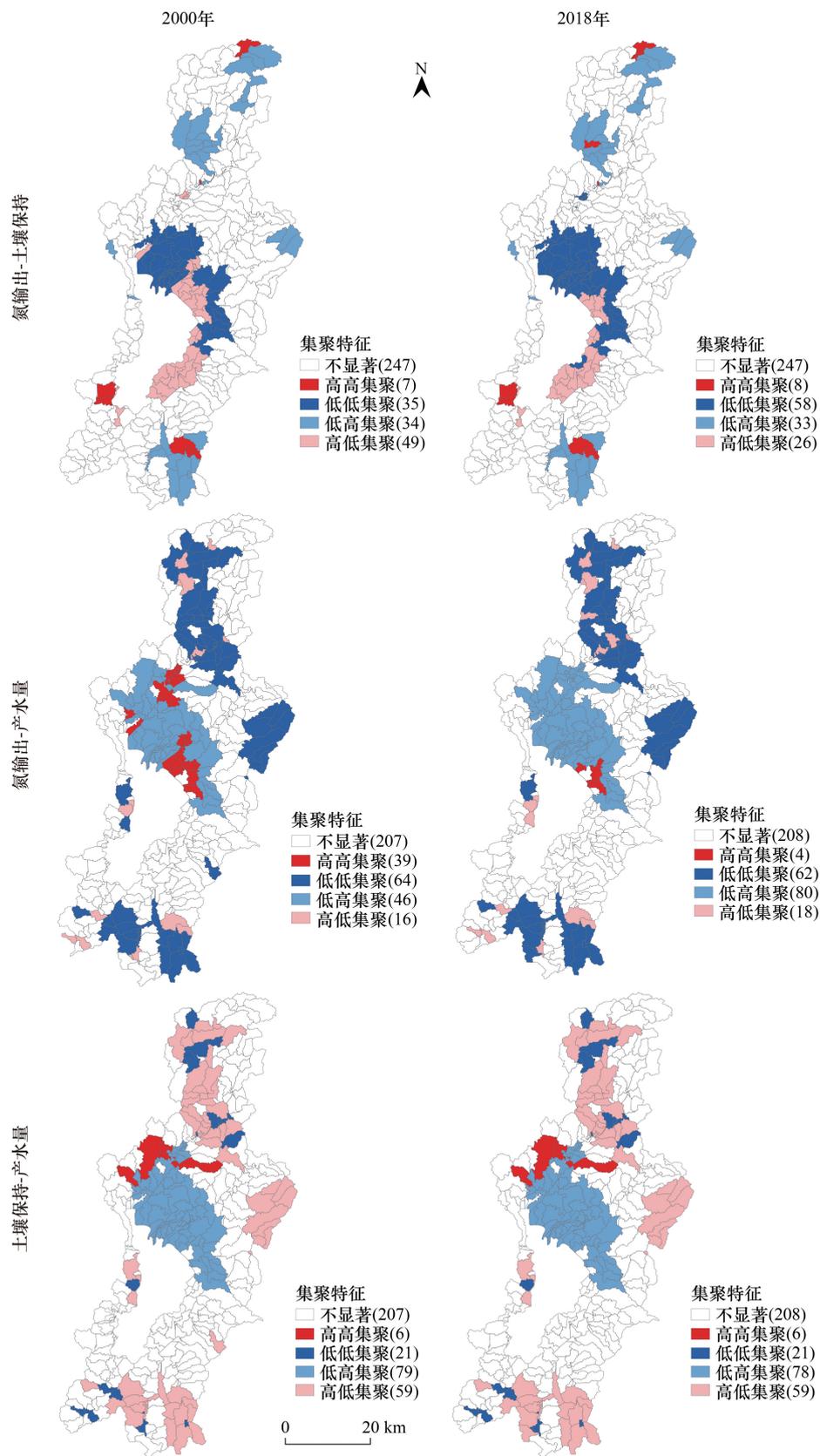


图7 滇池流域水文生态系统服务权衡与协同空间异质性

Fig.7 Spatial heterogeneity of hydrological ecosystem service tradeoffs and synergy relationship in Dianchi Lake Basin

结果表明,在 2000 年和 2018 年,RDA 置换检验在前 3 轴和前 4 轴都分别表现出明显的显著性 ($P < 0.001$),且 2000 年和 2018 年第一个约束排序特征根($RDA1_{2000} = 0.06276$ 和 $RDA1_{2018} = 0.06428$) 分别远大于第一个非约束特征根($PC1_{2000} = 0.00767$ 和 $PC1_{2018} = 0.00567$),表明水文生态系统服务主要结构趋势已被驱动因素解释。驱动因素分别无偏估计地解释了水文生态系统服务的 85.75% 和 88.52%,前两个轴能够解释响应变量的 81.84% 和 84.66%。

不同驱动因子对水文生态系统的影响程度不同(图 8)。驱动因子与水文生态系统服务之间的夹角反映它们之间的相关性,当夹角为锐角,变量之间呈正相关,表现为协同,夹角越小,协同作用越强;当夹角为钝角,变量之间呈负相关,表现为权衡,夹角越大,权衡作用越强;当夹角为 90° ,变量之间不相关。带箭头的线段长度代表了解释变量对响应变量贡献率。从图 8 看出,林地比例、高程、坡度、降水量和草地比例对碳存储和土壤保持表现为协同影响,对氮输出和产水量表现为权衡影响,林地比例、海拔、坡度对碳存储和土壤保持能力

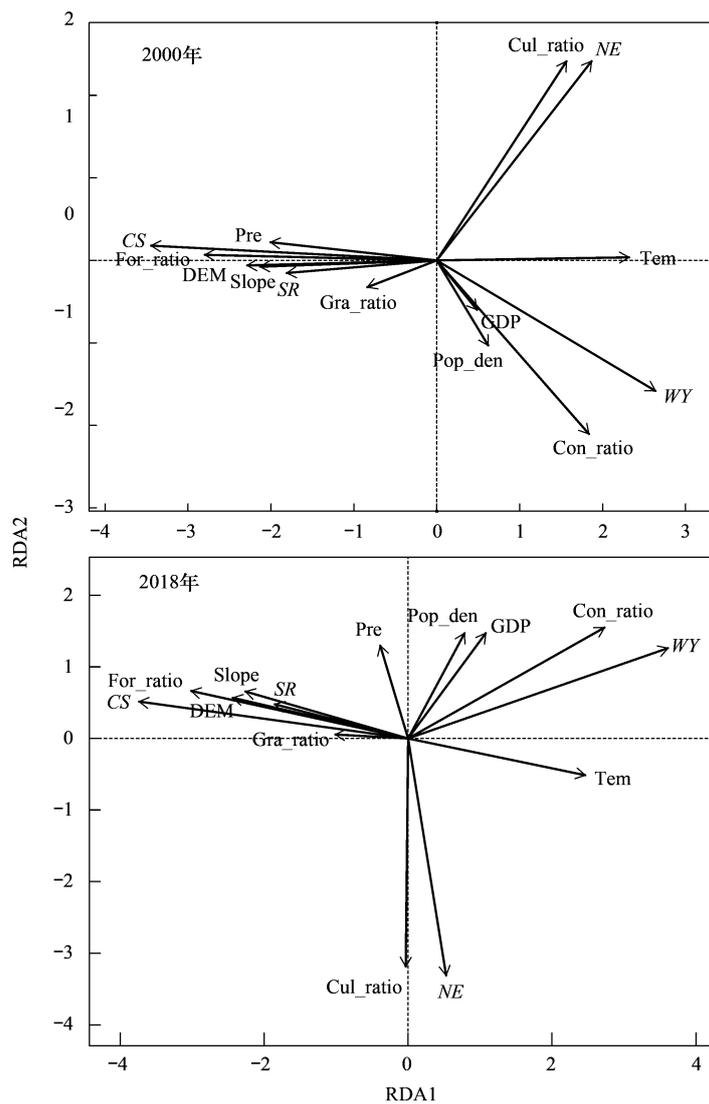


图 8 2000 年和 2018 年水文生态系统服务与驱动因子的 RDA 双序图

Fig.8 RDA biplot of hydrological ecosystem services and drivers in 2000 and 2018

SR: 土壤保持 Soil Retention; NE: 氮输出 Nitrogen Export; CS: 碳存储 Carbon Storage; WY: 产水量 Water Yield; Cul_ratio: 耕地比例 Cultivated land ratio; For_ratio: 林地比例 Forestland ratio; Gra_ratio: 草地比例 Grass land ratio; Con_ratio: 建设用地比例 Construction land ratio; DEM: 高程 Digital Elevation Model; Slope: 坡度; Pre: 降水量 Precipitation; Tem: 温度 Temperature; Pop_ratio: 人口密度 Population density; GDP: 国内生产总值 Gross Domestic Product

影响较强。与 2000 年相比,2018 年林地比例、高程、坡度、降水量与碳存储夹角变大,对碳存储协同影响减弱,林地比例、高程、坡度与土壤保持夹角变大,对土壤保持协同影响减弱,草地比例和降水量箭头变短,对碳存储和土壤保持的贡献率降低。耕地比例和温度对氮输出表现为协同影响,对碳存储和土壤保持表现为权衡影响,与 2000 年相比,2018 年,耕地比例箭头变短,且与氮输出的夹角变大,对氮输出协同影响降低,主要由于城市周边耕地转为建设用地,农业集约化管理和有机肥的使用,使得耕地上的氮输出降低。建设用地比例、人口密度、GDP、温度对产水量表现为协同影响,对碳存储和土壤保持表现为权衡影响,与 2000 年相比,2018 年建设用地比例与产水量夹角变小,对产水量协同影响增加,主要由于城市扩张导致建设用地比例增加所致。

不同影响因素对水文生态系统服务的解释率不同(表 1)。在 2000 年和 2018 年,高程、耕地比例和林地比例对生态系统服务的解释率较高,分别高达 75.26% 和 78.26%,其次是建设用地比例、坡度、草地比例,解释率分别为 9.99% 和 8.55%,降水量、人口密度的解释率不高。与 2000 年相比,2018 年高程和建设用地比例解释率下降较多,减少了 6.59%,说明建设用地的扩张不利于生态系统服务关系的稳定,耕地比例、林地比例和草地比例解释率上升较多,增加了 8.53%,说明生态和生产用地有利于维持生态系统服务关系的稳定。

表 1 2000 和 2018 年各影响因素对水文生态系统服务的解释率/%

Table 1 Explanation rate of each influencing factor on hydrological ecosystem services in 2000 and 2018

驱动因子 Driving factors	2000	2018	2000—2018 变化率 Change rate from 2000 to 2018
高程 DEM	36.92	34.23	-2.69
坡度 Slope	2.32	2.55	0.23
降水量 Precipitation	0.27	0.93	0.66
温度 Temperature	0.01	-0.02	-0.03
耕地比例 Cultivated land ratio	19.91	24.03	4.12
林地比例 Forestland ratio	18.43	20.61	2.18
草地比例 Grass land ratio	0.91	3.14	2.23
建设用地比例 Construction land ratio	6.76	2.86	-3.90
人口密度 Population density	0.21	0.17	-0.04
国内生产总值 GDP	0.02	0.02	0.00
总和 Sum	85.75	88.52	2.77

3 讨论

3.1 滇池流域水文生态系统权衡与协同变化

本文基于子流域尺度,采用双变量 Moran's I 指数分析了滇池流域水文生态系统服务的权衡与协同关系及其空间变化。研究表明,滇池流域 4 种水文生态系统服务的权衡大于协同,且权衡与协同关系与他人研究结果^[13,29]基本一致。其中,氮输出与碳存储和土壤保持呈权衡关系,且关系减弱,表明农业用地与生态用地(林地和草地)之间竞争减弱,说明水质净化与生态保护之间矛盾下降,主要由于耕地、林地、草地的面积不断减少。氮输出与碳存储和土壤保持呈权衡关系,且关系增强,表明建设用地与生态用地之间竞争不断加剧,说明生态用水量与生态环境保护之间矛盾不断提升,主要由于建设用地不断侵占生态用地。碳存储与土壤保持的关系在不同的区域结论不同,白杨^[46]和戴路炜^[47]在白洋淀区域和多伦多县的研究中表明这两者呈协同关系,而 Ego^[48]在南非研究中表明这两者呈较强的权衡关系;林世伟^[49]和张文静^[22]在“三江并流”区和南四湖流域的研究中表明两者相关性不显著;本文研究中显示两者呈较强权衡关系,并且权衡关系增强,这可能是由于自然和社会经济环境的差异性导致两者关系不同。氮输出与产水量先呈协同后呈权衡关系,前期主要由于农田的粗放式管理和化肥的大量使用,建成区的扩张和城市生活污水乱排放,导致氮输出和产水量均呈增加趋势,两者表现为协同关系;后期农田集约化管理、有机肥使用,城市生活污水随地下管道流入滇池,使

得地表氮输出量轻微减少,但城市继续扩张,地表径流增加,使产水量不断增加,两者表现为权衡关系。

3.2 基于归因因素影响下的生态系统管理

研究表明(表 1),DEM、坡度和土地利用比例对滇池流域水文生态系统权衡与协同的解释率高达 75%以上,根据地形和土地利用变化因素提出切实可行的对策,对于缓解流域水环境问题和生态系统退化具有重要意义。

首先,DEM 和坡度是影响滇池流域水文生态系统服务的重要自然因素,其解释率高达 36%,尤其对碳存储和土壤保持影响较大。地形分布决定了土地利用结构、功能在方向和方式上的选择,应该根据滇池流域地形分布特点合理进行土地利用优化和配置。如在中高、高海拔区域宜林则林、宜草则草,提高碳存储和水土保持水平;在中低、低海拔区域建立农田防护林,增加植被覆盖,提高土壤保持力,增加碳存储,减少氮输出。在 $>25^\circ$ 坡度上,继续推行严格的“退耕还林还草政策”,建立符合滇池流域地形特点的可持续土地利用发展模式。

其次,土地利用比例是影响滇池流域水文生态系统服务的重要社会经济因素,其解释率高达 46%,尤其对产水量、氮输出影响明显。我们发现建设用地比例增加了 5.23% (图 1),对水文生态系统的解释率却下降了 3.9%,由于建设用地比例提高,增加了城市建成区产水量,导致城市生态用水量减少,使生态系统服务稳定性下降。对此应该严格控制建设用地比例在一定阈值范围内,在建成区周边划定严格的城镇发展边界,有效利用建成区空地,提高建设用地利用效率,避免盲目扩张,降低流域产水量,提高生态用水质量。林地、草地、耕地比例减少了 5.39% (图 1),水文生态系统解释率却提高了 8.53%,因为林地和草地可以提高氮滞留率,减少氮输出量,具有净化水质的作用,耕地集约化利用和有机化肥的使用减少了氮输出量,说明生态和生活用地有利于提高生态系统的稳定性。对此应严格划定生态保护红线,保护林地和草地比例,在流域南部和北部耕地比例高的区域划定基本农田保护范围,防止耕地被建设用地侵占,在滇池湖滨带建立 100 m 生态缓冲带,有效减少氮输出,提高整个流域的水文生态系统服务稳定性。

3.3 优势和局限

本文的创新之处是利用双变量全局和局部 Moran' I 指数从总体和空间上识别了滇池子流域水文生态系统权衡与协同变化,利用 Pearson 相关系数验证了其准确性,并发现 Moran' I 指数计算的相关性具有一定的滞后性,更加真实反映了生态系统服务权衡与协同关系,双变量 Moran' I 指数为分析生态系统服务权衡与协调提供了一种思路。为了分析滇池流域水文生态系统权衡与协调的影响因素,本文构建了冗余分析及条件效应分析,量化了滇池流域水文生态系统服务的影响因素及其解释率,针对主要影响因素提出针对性对策,为滇池流域水文生态环境治理、人类福祉和健康提供借鉴。

同时,本研究也存在 2 个不足,在未来的研究中需要进一步解决,以拓宽生态系统服务研究的广度和深度。(1) 该研究只计算了碳存储、氮输出、土壤保持、产水量,但驱动因子也会引起其他生态系统服务变化,如建设用地比例增加会降低生物多样性、增加城市热岛现象,耕地草地减少会降低作物授粉和生产。通过考虑更多生态系统服务权衡与协调的响应机制,更有利于实现社会经济发展和生态可持续管理的权衡。(2) 没有考虑不同情景下未来土地利用变化对生态系统服务的影响。未来研究应设置不同发展模式和政策情景,预测未来土地利用变化对生态系统服务供给的影响,寻求社会经济和生态保护双赢的发展模式,为当地政府制定切实可行的生态规划策略。

4 结论

本文基于滇池流域生态功能区特征,利用 InVEST3.7.0 评估了碳存储、氮输出、土壤保持、产水量 4 种水文生态系统服务并进行时空格局变化分析,在流域和子流域尺度上分析了滇池水文生态系统服务权衡与协同的总体和异质性变化,构建冗余分析和条件效应分析方法量化生态系统服务影响因素,主要结论如下:

(1) 水文生态系统服务的高值分布与土地利用覆盖有密切关系。流域建设用地分布区,属于产水量高值

区;流域北部、东部和南部林地和草地覆盖区,属于碳存储和土壤保持高值区,滇池南部和流域北部耕地和农村居民点分布集中区,属于氮输出高值区。

(2)水文生态系统服务格局变化主要体现在滇池周边人类活动干扰强烈的区域,呈现氮输出、土壤保持和产水量增加,碳存储减小的趋势。

(3)水文生态系统服务权衡与协同关系变化明显。碳存储与土壤保持为协同关系;氮输出与产水量先呈协同后呈权衡;氮输出与碳存储和土壤总体为权衡,协同范围扩大,权衡范围缩小;产水量与碳存储和土壤保持为权衡关系。

(4)水文生态系统服务主要受地形、气象和社会经济活动的共同作用。主要表现为:林地比例、高程、坡度、降水量比例对碳存储和土壤保持呈显著正向影响,对氮输出和产水量呈负向影响;耕地比例和温度对氮输出呈正向影响,对碳存储和土壤保持呈负向影响;建设用地、人口密度、GDP、温度对产水量呈正向影响,对碳存储和土壤保持呈负向影响。

参考文献(References):

- [1] Daily G C. *Nature's Services; Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington: Island Press, 1997.
- [2] Costanza R, de Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment (MEA). *Ecosystems and Human Well-being*. Washington: Island Press, 2005.
- [4] 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. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [5] 申嘉澍, 梁泽, 刘来保, 李德龙, 张亚彤, 李双成. 雄安新区生态系统服务簇权衡与协同. *地理研究*, 2020, 39(1): 79-91.
- [6] Yang S L, Bai Y, Alatalo J M, Wang H M, Jiang B, Liu G, Chen J Y. Spatio-temporal changes in water-related ecosystem services provision and trade-offs with food production. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286: 125316.
- [7] Díaz S, Settele J, Brondízio E S, Ngo H T, Guèze M, Agard J, Arneth A, Balvanera P, Brauman K A, Butchart S H M, Chan K M A, Garibaldi L A, Ichii K, Liu J, Subramanian S M, Midgley G F, Miloslavich P, Molnár Z, Obura D, Pfaff A, Polasky S, Purvis A, Razzaque J, Reyers B, Chowdhury R R, Shin Y J, Visseren-Hamakers I J, Willis K J, Zayas C N. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn: IPBES secretariat, 2019.
- [8] Wang R B, Xu X J, Bai Y, Alatalo J M, Yang Z B, Yang W, Yang Z Q. Impacts of urban land use changes on ecosystem services in Dianchi Lake Basin, China. *Sustainability*, 2021, 13(9): 4813.
- [9] Gounand I, Little C J, Harvey E, Altermatt F. Cross-ecosystem carbon flows connecting ecosystems worldwide. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4825.
- [10] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, Meusburger K, Modugno S, Schütt B, Ferro V, Bagarello V, Van Oost K, Montanarella L, Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 2013.
- [11] Schuldt A, Assmann T, Brezzi M, Buscot F, Eichenberg D, Gutknecht J, Härdtle W, He J S, Klein A M, Kühn P, Liu X J, Ma K P, Niklaus P A, Pietsch K A, Puhang W, Scherer-Lorenzen M, Schmid B, Scholten T, Staab M, Tang Z Y, Trogisch S, von Oheimb G, Wirth C, Wubet T, Zhu C D, Bruehlheide H. Biodiversity across trophic levels drives multifunctionality in highly diverse forests. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2989.
- [12] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [13] Sun X Y, Shan R F, Liu F. Spatio-temporal quantification of patterns, trade-offs and synergies among multiple hydrological ecosystem services in different topographic basins. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 122338.
- [14] 谢高地, 肖玉, 鲁春霞. 生态系统服务研究: 进展、局限和基本范式. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 191-199.
- [15] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379-1390.
- [16] Liang J, Li S, Li X D, Li X, Liu Q, Meng Q F, Lin A Q, Li J J. Trade-off analyses and optimization of water-related ecosystem services (WRESs) based on land use change in a typical agricultural watershed, southern China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123851.
- [17] Li J H, Zhou K C, Xie B G, Xiao J Y. Impact of landscape pattern change on water-related ecosystem services: comprehensive analysis based on heterogeneity perspective. *Ecological Indicators*, 2021, 133: 108372.
- [18] Bai Y, Ochuodho T O, Yang J. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 51-64.
- [19] Sintayehu D W. Impact of climate change on biodiversity and associated key ecosystem services in Africa: a systematic review. *Ecosystem Health and*

- Sustainability, 2018, 4(9): 225-239.
- [20] Wen X, Théau J. Spatiotemporal analysis of water-related ecosystem services under ecological restoration scenarios: a case study in northern Shaanxi, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 720: 137477.
- [21] Xia H J, Kong W J, Zhou G, Sun O J. Impacts of landscape patterns on water-related ecosystem services under natural restoration in Liaohe River Reserve, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 792: 148290.
- [22] 张文静, 孙小银, 周俊. 南四湖流域关键生态系统服务的时空权衡关系. *生态学报*, 2021, 41(20): 8003-8015.
- [23] Hou Y, Li B, Müller F, Fu Q, Chen W P. A conservation decision-making framework based on ecosystem service hotspot and interaction analyses on multiple scales. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 277-291.
- [24] 刘洋, 毕军, 吕建树. 生态系统服务权衡与协同关系及驱动力——以江苏省太湖流域为例. *生态学报*, 2019, 39(19): 7067-7078.
- [25] 张紫怡, 刘艳芳, 张扬, 刘耀林, 陆砚池, 任其然. 生态系统服务协同权衡对影响因子的空间响应——以福建省生态功能区为例. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2022, 47(1): 111-125.
- [26] 李成, 赵洁, 庄智程, 顾思浩. 长三角城市群生态系统服务权衡强度时空演变及影响因素. *生态学报*, 2022, 42(14): 5708-5720.
- [27] 陈心盟, 王晓峰, 冯晓明, 张欣蓉, 罗广祥. 青藏高原生态系统服务权衡与协同关系. *地理研究*, 2021, 40(1): 18-34.
- [28] 沈中健, 曾坚. 闽南三市城镇发展与地表温度的空间关系. *地理学报*, 2021, 76(3): 566-583.
- [29] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 柳冬青, 马学成. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系. *地理学报*, 2018, 73(5): 868-879.
- [30] 黄木易, 方斌, 岳文泽, 冯少茹. 近 20a 来巢湖流域生态服务价值空间分异机制的地理探测. *地理研究*, 2019, 38(11): 2790-2803.
- [31] Guo M, Ma S, Wang L J, Lin C. Impacts of future climate change and different management scenarios on water-related ecosystem services: a case study in the Jianghuai ecological economic Zone, China. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107732.
- [32] Li J H, Bai Y, Alatalo J M. Impacts of rural tourism-driven land use change on ecosystems services provision in Erhai Lake Basin, China. *Ecosystem Services*, 2020, 42: 101081.
- [33] 杨文杰, 巩前文, 林震. 北京市生态涵养区生态资产时空格局及驱动因素. *生态学报*, 2021, 41(15): 6051-6063.
- [34] 张弛, 李枝坚, 曾辉. 基于小波变换的生态系统服务权衡尺度效应与影响因素研究——以珠江三角洲为例. *地理研究*, 2022, 41(5): 1279-1297.
- [35] 王启名, 杨昆, 许泉立, 李鸣蝉, 肖茜. 滇池流域土地利用变化图谱的地形梯度效应. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 237-244.
- [36] 陆文涛, 代超, 郭怀成. 基于 Dyna-CLUE 模型的滇池流域土地利用情景设计与模拟. *地理研究*, 2015, 34(9): 1619-1629.
- [37] Wang R B, Bai Y, Alatalo J M, Yang Z Q, Yang Z B, Yang W, Guo G M. Impacts of rapid urbanization on ecosystem services under different scenarios - A case study in Dianchi Lake Basin, China. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108102.
- [38] Huang C C, Yao L, Zhang Y L, Huang T, Zhang M L, Zhu A X, Yang H. Spatial and temporal variation in autochthonous and allochthonous contributors to increased organic carbon and nitrogen burial in a plateau lake. *Science of the Total Environment*, 2017, 603-604: 390-400.
- [39] Sharp R, Douglass J, Wolny S, Arkema K, Bernhardt J, Bierbower W, Chaumont N, Denu D, Fisher D, Glowinski K, Griffin R, Guannel G, Guerry A, Johnson J, Hamel P, Kennedy C, Kim C K, Lacayo M, Lonsdorf E, Mandle L, Rogers L, Silver J, Toft J, Verutes G, Vogl A L, Wood S, Wyatt K. *INVEST 3.7.0 User's Guide*. Stanford: Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2018.
- [40] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981~2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(6): 804-812.
- [41] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. *土壤学报*, 2004, 41(5): 687-699.
- [42] 张剑, 罗贵生, 王小国, 朱波. 长江上游地区农作物碳储量估算及固碳潜力分析. *西南农业学报*, 2009, 22(2): 402-408.
- [43] 徐冬, 黄震方, 黄睿. 基于空间面板计量模型的雾霾对中国城市旅游流影响的空间效应. *地理学报*, 2019, 74(4): 814-830.
- [44] Borcard D, Gillet F, Legendre P. *数量生态学——R 语言的应用(第二版)*. 赖江山, 译. 北京: 高等教育出版社, 2020.
- [45] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, Ding J Y, Wang S. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: a case study in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 1250-1263.
- [46] Bai Y, Zhuang C W, Ouyang Z Y, Zheng H, Jiang B. Spatial characteristics between biodiversity and ecosystem services in a human-dominated watershed. *Ecological Complexity*, 2011, 8(2): 177-183.
- [47] 戴路炜, 唐海萍, 张钦, 崔凤琪. 北方农牧交错带多伦县生态系统服务权衡与协同关系研究. *生态学报*, 2020, 40(9): 2863-2876.
- [48] Egoh B, Reyers B, Rouget M, Bode M, Richardson D M. Spatial congruence between biodiversity and ecosystem services in South Africa. *Biological Conservation*, 2009, 142(3): 553-562.
- [49] 林世伟. “三江并流”区生态系统服务空间权衡与协同关系研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016.