

doi: 10. 6046/zrzyyg. 2021409

引用格式: 李博,林文鹏,李鲁冰. 面向 SDG15 的钱江源国家公园生态系统服务时空分析[J]. 自然资源遥感,2022,34(4):243 – 253. (Li B,Lin W P,Li L B. SDG15 – oriented analysis on the spatiotemporal dynamics of ecosystem services in Qianjiangyuan National Park[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2022,34(4):243 – 253.)

面向 SDG15 的钱江源国家公园生态系统服务时空分析

李 博, 林文鹏, 李鲁冰
(上海师范大学环境与地理科学学院,上海 200234)

摘要: 生态系统服务是连接生态与人类福祉的桥梁,快速、准确地评估其变化对实现区域可持续发展具有重要意义。SDG15 也为生态系统服务的计算提供了新的思路方向。钱江源为钱塘江发源地、长三角地区当前唯一的国家公园试点区域,目前却对该区域生态系统服务时空分布及变化缺乏深入认识。本研究基于试点区 2010—2020 年 4 期土地覆被遥感监测数据,利用 InVEST 模型,结合单、双变量 Moran’s I 空间自相关方法,面向 SDG15 指标,定量评估钱江源国家公园生态系统服务的时空变化特征。结果表明:①2010—2020 年,生态系统服务价值呈不断增加趋势,期间共增加了 15. 21%。文化服务增长最快,增长了 19. 70%,调节服务增长了 16. 27%,供给服务减少了 1. 72%;②生态系统服务价值空间分布均呈现出从东北与西南逐渐向中部减小的空间变化趋势;③土地覆被类型的时空变化导致在无法增加土地利用率的现状下,生态系统服务增长缓慢,湿地和水体等面积与生态质量的减少导致了部分生态系统服务空间聚集度与可提供价值的下降;④生态系统服务可以成为衡量 SDG15 的指标。研究结果能为钱江源国家公园建设提供理论依据和技术支撑,实现区域生态环境的可持续发展。

关键词: 钱江源国家公园; 生态系统服务; Moran’s I 指数; InVEST 模型; SDG15

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097 – 034X(2022)04 – 0243 – 11

0 引言

国家公园是由国家批准并主导管理以保护具有国家代表性的自然生态系统,是实现自然资源的科学保护与合理利用的特定海陆区域^[1]。建立国家公园体制并明确保护地体系有利于提高保护效率,是生态文明建设的具体途径之一^[2],也能推动自然资源和文化古迹保护、促进自然资源保育和游憩使用^[3]。国家公园作为我国生态文明制度建设的重要内容,其良性的可持续发展与 2015 年联合国颁布的全球可持续发展目标(SDGs)有着密不可分的关系。

其中 SDG15 针对陆地生态系统,内涵为保护、恢复和促进陆地生态系统的可持续利用,可持续管理森林,防治荒漠化,制止和扭转土地退化,制止生物多样性丧失(<https://www.un.org/>)。生态系统服务作为连接生态系统结构、过程与人类福祉之间的桥梁,可以有效促进生态系统保护和生态文明建设

设^[4]。SDG15 与气候调节、生物多样性等生态系统服务密切相关^[5]。SDGs 作为全球性的指导性指标,具有复杂性,在不同的研究区与研究实际情况下,需要利用其他方法进行评计算,SDG15. 9 指出“到 2020 年,把生态系统和生物多样性价值观纳入国家和地方规划、发展进程、减贫战略和核算”,这表明生态系统服务是实现 SDG15 的关键核心,可用于国家规划和未来的可持续发展^[6]。因此生态系统服务物质量和价值量的计算,可以作为 SDG15 的计算指标进行评估。

1997 年,Costanza 等^[7]对全球生态系统服务价值进行了评估,之后国内外学者在森林^[8–9]、河流湿地^[10–12]、荒漠绿洲^[13–14]、城市^[15–17]和经济区^[18–19]等不同区域和尺度上进行估价。以国家公园为核心的自然保护地是实现绿色中国的关键,但目前针对国家公园的生态系统服务研究还较为缺乏。郑德凤等^[20]基于当量因子法定量分析了三江源国家公园生态系统服务的时空变化及生态系统服务间的权衡与协同关系;何思源等^[21]以武夷山国家公园试点

收稿日期: 2021 – 11 – 30; 修订日期: 2022 – 03 – 24

基金项目: 国家自然科学基金项目“城市植物滞尘效应高光谱遥感探测方法与模型研究”(编号: 41571047)资助。

第一作者: 李 博(1999 –),女,研究生,主要从事城市生态与环境遥感。Email: 2660812135@qq. com。

通信作者: 林文鹏(1973 –),男,博士,教授,博士生导师,主要从事环境遥感方面研究。Email: linwenpeng@shnu. edu. cn。

为研究对象,认为可以依据生态系统服务需求制定生态保护目标、对策。国家公园的生态环境对中国的生态文明建设至关重要,其生态系统服务的评估结果可以是对陆地生态系统可持续性的综合反映,可被视为联合国可持续发展目标中的 SDG15 指标的特征。

基于此,本研究以钱江源国家公园体制试点区为研究对象,面向 SDG15 指标,利用 InVEST 模型计算生境质量、碳储存量、年水产量及土壤保持等 4 类生态系统服务物质质量并评估生态系统服务价值量的时空变化,以期为研究区的可持续发展管理与自然资源的科学保护提供科学依据与理论基础。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

钱江源国家公园位于浙江省开化县西北部,是钱塘江的发源地,面积约 252 km²。这里不仅是长三角经济发达地区唯一的国家公园体制试点区,也是浙江乃至华东地区的生态屏障和水源涵养区,主要植被有常绿落叶阔叶混交林和亚热带常绿阔叶林等,属于亚热带季风性湿润气候。清晰的边界和明确的功能分区是有效保护和游憩规划管理的基础^[22]。根据生态敏感性、物种濒危程度,结合原著居民生产生活与社会发展需要,研究区被划分为 4 个功能区:核心保护区、生态保育区、游憩展示区和传统利用区。

1.2 数据源与处理

由 Landsat7 与 GF-1 卫星遥感产品数据进行目视解译与数据整合,得到 2010 年、2013 年、2017 年^[23]以及 2020 年^[24]30 m 分辨率的研究区土地利用数据。利用 DEM 数据(30 m 分辨率)获取研究区

地形起伏度和坡度等(图 1)。

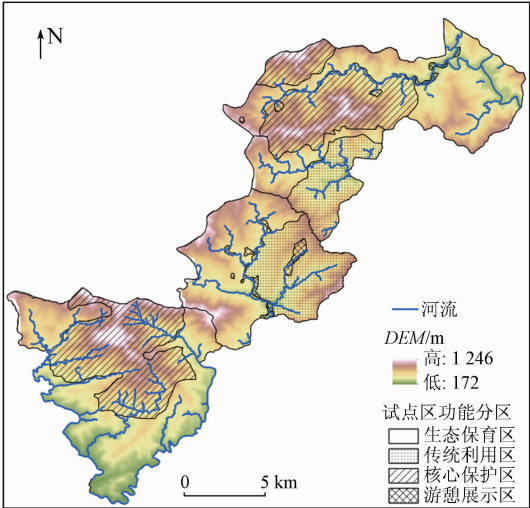


图 1 研究区区位图
Fig.1 Research area map

土壤类型和质地等数据来自于世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSD)。土壤碳含量数据、2000—2010 年中国典型陆地生态系统实际蒸散量和水分利用效率数据集来自于国家生态系统观测研究网络 (CNERN) 科技资源服务系统以及 CDIAC 数据档案库。降水与气温数据使用了中国气象数据网站数据,并对以上数据进行空间插值的预处理。

2 研究方法 with 指标

2.1 可持续发展目标 SDG15 核算

SDG15 中包含 9 个子数字指标 3 个字母指标, 12 个二级指标又分为 14 个三级指标。由于研究区域的特殊性,本研究主要关注 SDG15.1 与 SDG15.2 并据此进行评估(表 1),数据源于 <https://www.un.org/>。

表 1 SDG15 指标选取与分类

Tab.1 Selection and classification of SDG15

一级指标	指标含义	二级指标	指标含义	三级指标	指标含义	数据表达
SDG15	保护、恢复和促进可持续利用陆地生态系统,可持续管理森林,防治荒漠化,制止和扭转土地退化,遏制生物多样性的丧失	SDG15.1	保护、恢复和可持续利用陆地和内陆的淡水生态系统及其服务,特别是森林、湿地、山麓和旱地	SDG15.1.1	森林面积占陆地总面积的比例	公式(1)
				SDG15.1.2	保护区内陆地和淡水生物多样性的的重要场地所占比例,按生态系统类型分列	公式(3)
		SDG15.2	推动对所有类型森林进行可持续管理,停止毁林,恢复退化的森林,大幅增加全球植树造林和重新造林	SDG15.2.1	实施可持续森林管理的进展	公式(2)

1)SDG15.1.1 计算公式为:

$$P = \frac{S_{Forest}}{S_{Totalland}} \times 100 \quad , \quad (1)$$

式中: S_{Forest} 为森林面积; $S_{Totalland}$ 为不包括内陆水体覆盖面积在内的总土地面积。

2)SDG15.2.1 中包含多个分级计算指标,选取年森林面积变化率公式进行计算。森林复合变化率指通过检查最近一段时间的森林面积变化率值来确定森林面积变化方向,负值表示森林面积减少,零值表示森林面积稳定,正值表示森林面积增加。计算公式为:

$$r = \left[\left(\frac{A_{t2}}{A_{t1}} \right)^{\frac{1}{t2-t1}} - 1 \right] \times 100 \quad , \quad (2)$$

式中: r 为 $t1-t2$ 期间的复合年变化率; ti 为时间(年); A_{ti} 为在 ti 年的森林面积。

2.2 生态系统服务物质质量核算

生态系统服务是人类从生态系统中获得的各种效益,不同土地利用类型会带来不同的生态系统服务类型^[25]。InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型可以结合土地利用类型在地理和经济尺度上检测生态系统服务功能供给的潜在变化以及服务间的权衡^[26],是目前发展最成熟、应用最多的生态系统服务价值评估模型^[27]。本文将从生境质量(支持服务)、碳储量(调节服务)、年水产量(供给服务)以及土壤保持(调节服务)等4个方面进行计算与分析。

1)生境质量。Habitat Quality 模块可以识别能够使自然系统和人类经济受益的区域,也能够在未来土地利用变化的不同情况下分析生物多样性与生态系统服务之间的权衡,可以用生境质量对 SDG15.1.2 进行指标量化,计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \quad , \quad (3)$$

式中: Q_{xj} 为土地利用数据 j 中栅格 x 的生境质量; D_{xj}^z 为土地利用数据或生境类型 j 栅格 x 的生境胁迫水平; H_j 为土地利用方式 j 的生境适宜性; k 为半饱和常数,取值为 D_{xj} 最大值的一半; z 为归一化常量,取值 2.5。

2)碳储量。生态系统通过二氧化碳等温室气体的排放来调节气候,会随着时间的推移和土地利用的变化在土壤和植物中存储碳,从而增加了碳的含蓄量。碳储量 C 评估公式为:

$$C = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad , \quad (4)$$

式中: C_{above} 为地上生物量的碳储量; C_{below} 为地下生

物量的碳储量; C_{soil} 为土壤中的碳储量; C_{dead} 为死物质中的碳储量,其单位均为 t/hm^2 。

3)年水产量。淡水供应也是生态系统服务功能之一,易在水文循环,影响蒸散、渗透和保水方式等过程中受到土地利用变化的影响。本文基于 Budyko 曲线和年平均降水量对年水产量进行计算评估,计算公式为:

$$Y(x) = \left[1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right] P(x) \quad , \quad (5)$$

式中: $Y(x)$ 为年水产量; x 为景观中单个像素; $AET(x)$ 为像素的年度实际蒸散量; $P(x)$ 为像素的年降水量; $\frac{AET(x)}{P(x)}$ 为水平衡的蒸散量。

4)土壤保持。河流流域尺度上的泥沙动力学主要取决于气候(特别是降雨强度)、土壤性质、地形和植被以及人为因素。本文采用修正通用水土流失方程(RUSLE)的水土保持服务模型开展评估,土壤流失量 $USLE_i$,计算公式为:

$$USLE_i = R_i K_i LS_i C_i P_i \quad , \quad (6)$$

式中: R_i 为降雨侵蚀力; K_i 为土壤易蚀性; LS_i 为坡度长度梯度因子; C_i 为作物管理因素; P_i 为支持实践的因素。

2.3 生态系统服务价值量核算

本文在千年生态系统评估(millennium ecosystem assessment,MA)的分类基础上,结合研究区土地利用现状,参照前人^[28-29]研究中直接引用的方法,根据谢高地等^[30]研究结果,计算生态系统服务功能的价值量。

3 结果分析

3.1 基于土地覆被与 SDG15 的生态系统服务时空变化

3.1.1 生态系统服务物质质量时空变化分析
2010—2020 年间,林地大幅扩张,耕地和建筑用地等其他用地类型面积收缩(图 2)。其中,2010 年耕地为 4 470.2 hm^2 ,2020 年时减少为 564.6 hm^2 。共有 99.4% 的耕地重新变为林地,61.61% 的耕地转变为常绿阔叶林,11.24% 变为落叶阔叶林,27.85% 变为常绿针叶林,0.107% 耕地成为灌木林林地。SDG15.1.2 指保护区内陆地和淡水生物多样性的重要场地所占比例,生境质量越好,则 SDG15.1.2 分值越高。InVEST 模型计算结果显示,2010—2020 年间,研究区生境质量有明显改善。生境质量数值越高,栖息地质量相对于其余景观的栖息

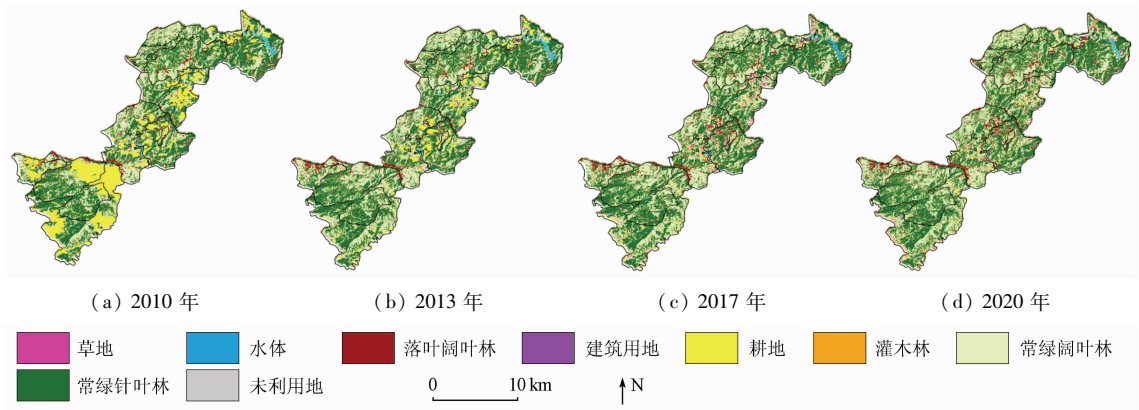


图2 2010—2020 年研究区土地利用类型分布
Fig.2 Distribution of land use types in the study area from 2010 to 2020

地质量分布越好,即更加利于物种多样性的保护与实现;碳储量越多表示该地区可释放的氧气量越多,可以有效改善气候的变化,对于保护物种、涵养水源和防风固沙等生态效益有显著帮助,有助于实

现“双碳”的战略目标。因此,本研究用生境质量和碳储量对 SDG15.1.2 进行评价,可以看到研究区内的生境质量在不断提高且空间分布更为均匀,碳储量也呈逐年增加趋势(图3)。

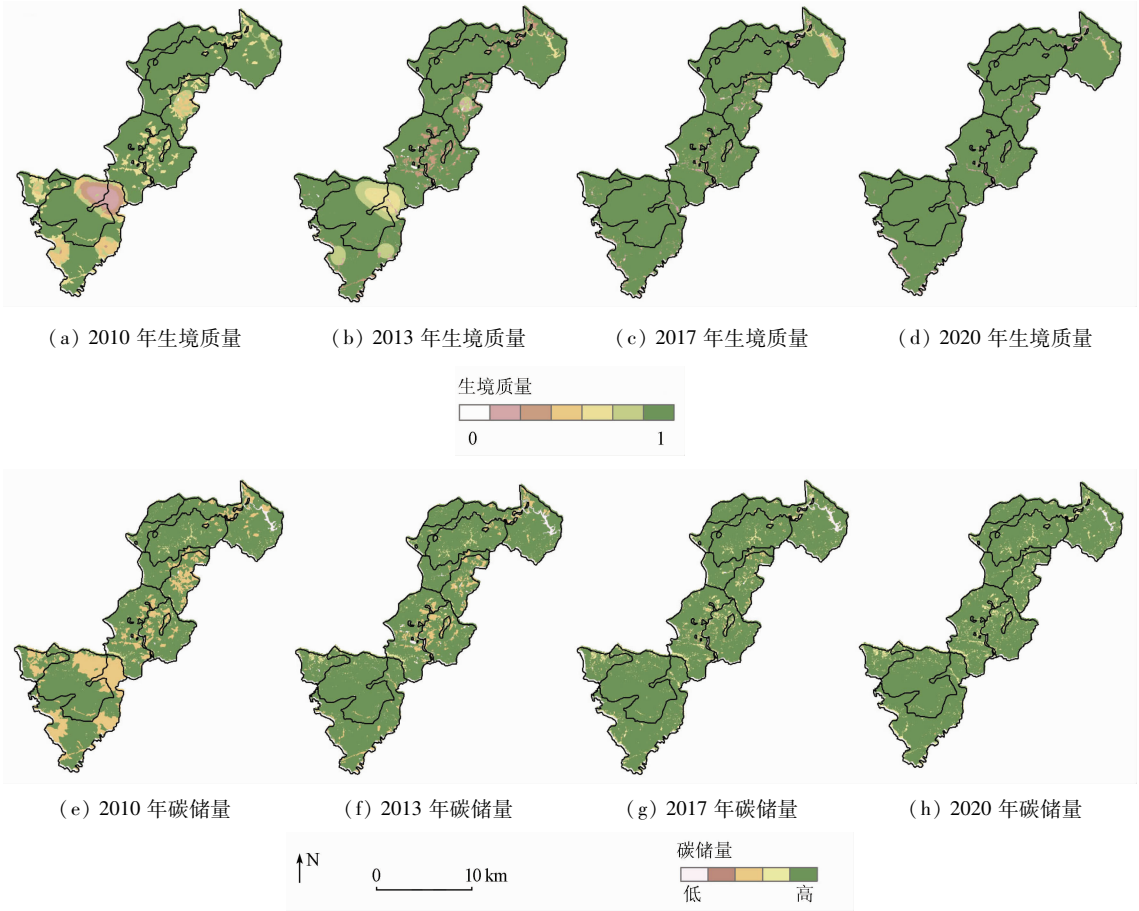


图3 生境质量(上)与碳储量(下)变化
Fig.3 Habitat quality (above) and carbon stock (below) changes

利用 Water Yield 模块计算可知,2010—2020 年研究区年实际损失降水量不断减少,损失量减少了 8.52%,减少量为 2 317.47 mm。2013 年时,大量的耕地变为林地导致水产量上升,同时实际损失的降水量也在减少。自 2010 年起,分水岭潜在土壤流失

量在不断下降,土壤沉积量在缓慢减少,向河流输出的总量在缓慢增加。2020 年时分水岭潜在土壤流失总量为 23 926 921.27 t,比 2010 年减少了 77.94%(图4)。

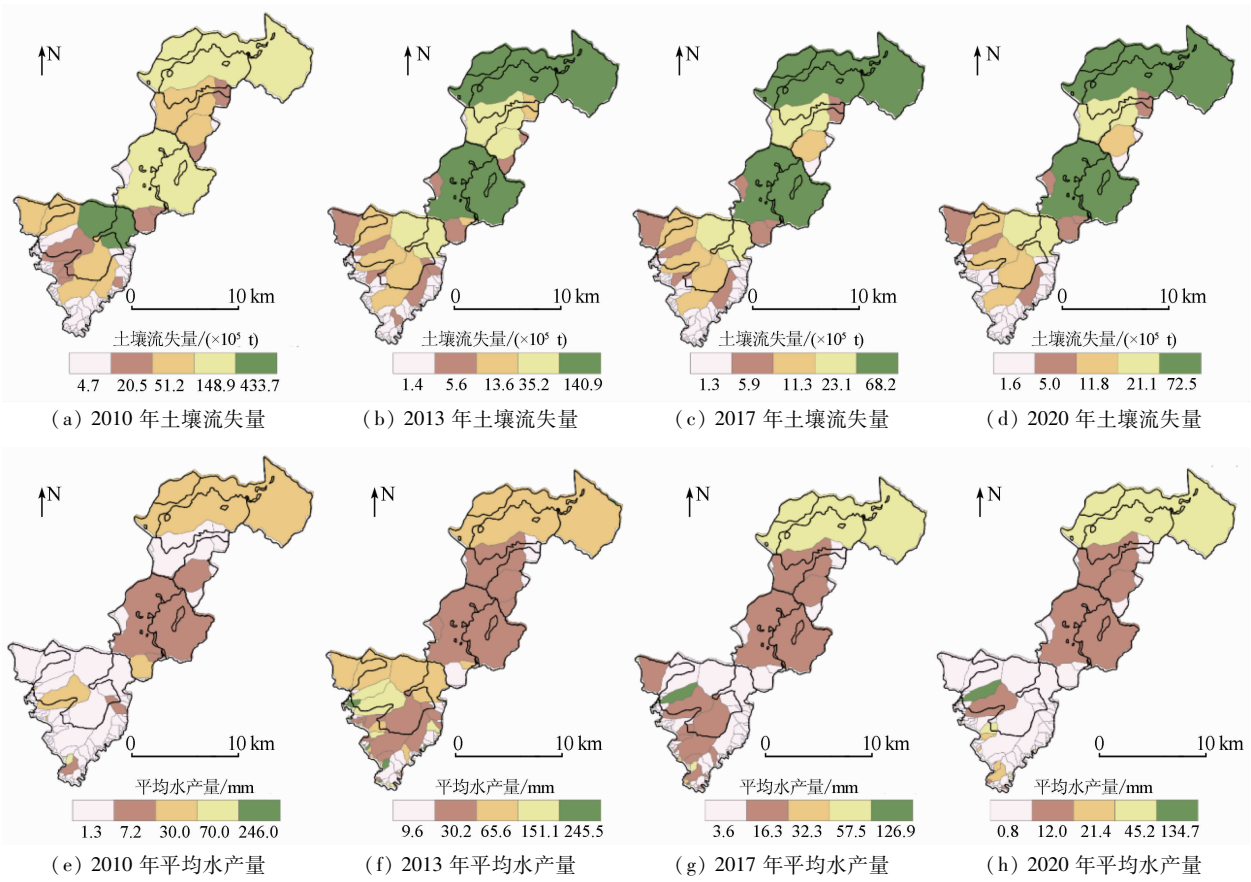


图 4 分水岭单位上潜在土壤流失量以及平均水产量
Fig. 4 Potential soil loss and average water yield in watershed units

利用双变量空间自相关分析法,分析 2010—2020 年生境质量、碳储量、年产水量和土壤流失量两两之间的相互关系见图 5 和表 2,其计算结果均通过了显著性检验。

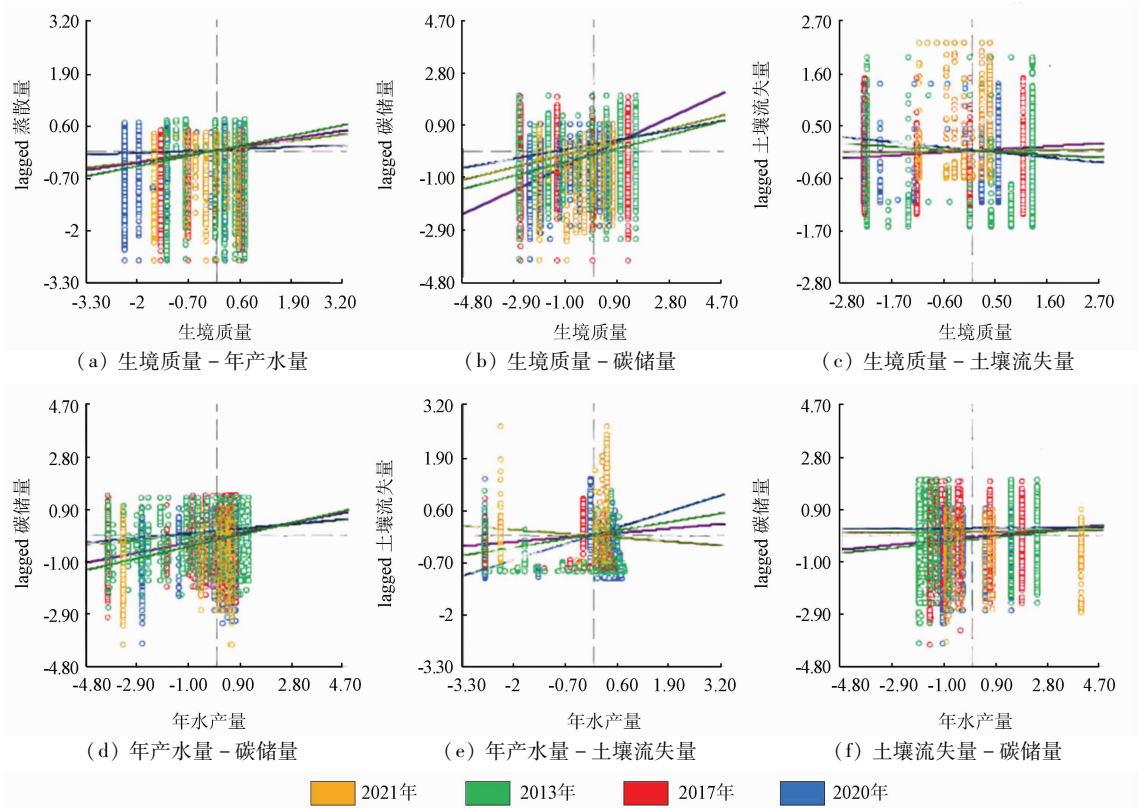


图 5 4 类单项指标之间双变量空间自相关 Moran's I 散点图
Fig. 5 Moran's I scatter plot of bivariate spatial autocorrelation between four single indicators

表 2 4 类生态系统服务单项指标双变量空间自相关 Moran's I 指数

Tab.2 Moran's I index of bivariate spatial autocorrelation for single index of four types of ecosystem services						
年份	生境质量/ 年产水量	生境质量/ 碳储量	生境质量/ 土壤流失量	年产水量/ 碳储量	年产水量/ 土壤流失量	土壤流失量/ 碳储量
2010 年	0.196 *** ^①	0.261 ***	-0.055 ***	0.231 ***	0.162 ***	0.102 ***
2013 年	0.038 ***	0.178 ***	-0.098 ***	0.092 ***	0.311 ***	0.009 ***
2017 年	0.131 ***	0.246 ***	0.013 ***	0.099 ***	-0.078 ***	0.016 ***
2020 年	0.154 ***	0.465 ***	0.058 ***	0.198 ***	0.084 ***	0.098 ***

①*** 表示通过 1% 显著性水平检验。

生境质量与年产水量、碳储量均为正相关关系,2010 年和 2013 年生境质量和土壤流失量呈负相关关系,之后变为正相关;年产水量与碳储量、土壤流失量基本均呈正相关关系,但 2017 年,为负相关关系。土壤流失量与碳储量呈正相关关系。研究可知,生境质量越高,则年产水量越大,土壤中的碳储量越多,同时土壤流失量越少。年产水量越多表明土壤质量越高,则碳储量越多,土壤流失量越少。结合时间变化来看,4 个变量在研究区内呈现正向的良性循环,与 SDGs 的可持续发展理论相统一。

3.1.2 生态系统服务价值量时空变化分析

利用谢高地等^[30]提出的单位面积当量法进行评估计算,结果显示各用地类型为生态系统可提供的服务主要为调节服务,文化服务可提供价值最少。2010—2020 年,研究区生态系统服务价值缓慢增加(表 3),共增加了 15.21%,其中文化、调节、支持服务分别增长了 19.70%,16.27% 和 15.46%,供给服务减少了 1.72%。

表 3 生态系统服务可提供价值总量

Tab.3 Proportion of value of different ecosystem services (\$)				
服务类型	2010 年	2013 年	2017 年	2020 年
供给服务	29 709.15	30 259.10	29 407.93	29 196.93
调节服务	287 691.83	335 299.07	337 081.44	334 508.44
支持服务	98 628.30	109 463.70	111 994.37	113 873.32
文化服务	19 091.79	22 017.21	22 581.78	22 852.93

研究区内常绿阔叶林与常绿针叶林占地面积广,根系发达的林地的气候调节、水文调节、土壤保持方面作用显著,也十分利于维持生物多样。并且林地不断扩张,有利于涵养水源、防止水土流失,促进整个生态系统物质的循环与利用。然而,2013 年耕地的大量减少导致供给服务中的食物生产价值量锐减。总体来看,生态系统服务功能均呈上升趋势,但 2013 年之后,水体与湿地的减少导致水文调节功能可提供价值减少,除此之外,其他各服务功能在 2010—2020 年呈逐年上升趋势(图 6)。

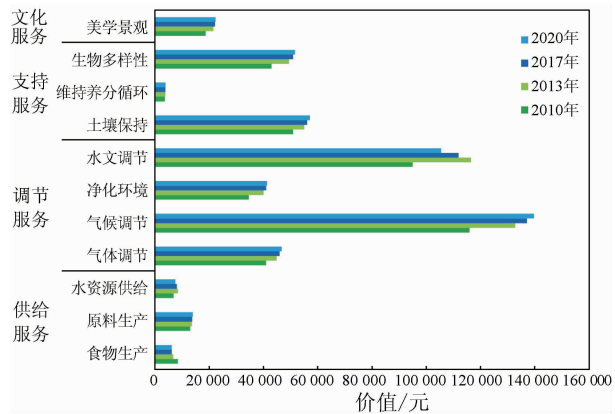


图 6 2010—2020 年生态系统服务可提供价值量
Fig.6 Amount of value that ecosystem services can provide from 2010 to 2020

利用 ArcGIS10.2 软件计算 2010—2020 年的生态系统服务价值,发现这 10 a 间生态系统服务价值空间分布均呈现出从东北与西南逐渐向中部减小的空间变化趋势(图 7)。

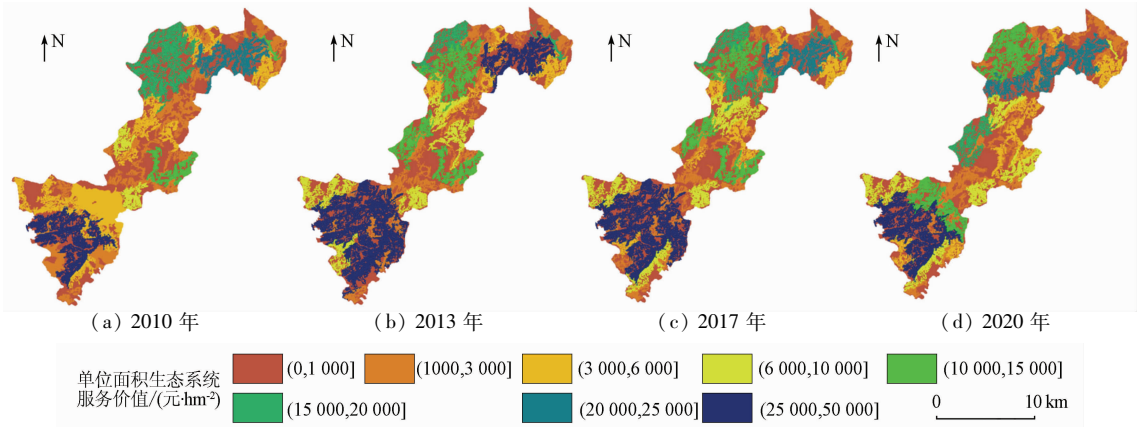


图 7 生态系统服务价值空间分布

Fig.7 Spatial distribution of ecosystem service value

基于 GeoDa 软件对研究区生态系统服务价值进行空间自相关分析,结果见图 8,图中所有 Moran's I 显著性检验 P 值均为 0.001。研究发现 2013 年研究区存在空间正相关关系的区域范围最少,且空间分布较为分散。2017 年研究区存在空间正相关

的地区最多,主要分布于研究区东北部与西南部即核心保护区与生态保育区,中部传统利用区为空间负相关关系。2020 年存在正相关关系的地区主要分布于西南部即核心保护区,传统利用区内生态系统服务价值无较大变化。

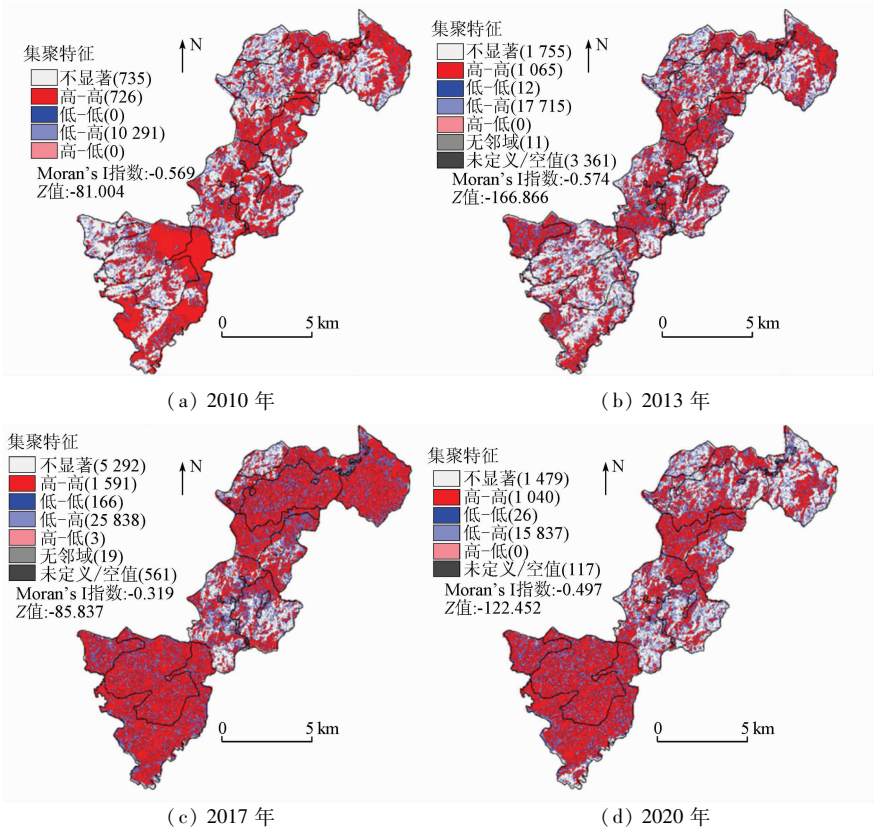


图 8 生态系统服务价值 LISA 显著性聚集团

Fig.8 Significance cluster map of ecosystem service value of Lisa

利用经典贝叶斯比率标准化的 Moran's I 工具 到不同生态系统服务之间的相关关系,结果均通过
对 4 类典型生态系统服务进行空间自相关分析,得 了显著性检验(表 4 和图 9)。其中供给/文化服务

表 4 生态系统服务 4 类典型服务双变量空间自相关 Moran's I 指数

Tab.4 Moran's I index of bivariate spatial autocorrelation of four typical ecosystem services						
年份	供给/支持服务	供给/调节服务	供给/文化服务	支持/调节服务	调节/文化服务	支持/文化服务
2010 年	0.018 ***①	-0.049 ***	-0.039 ***	0.058 ***	0.079 ***	-0.062 ***
2013 年	0.002 ***	0.082 ***	-0.049 ***	0.096 ***	0.091 ***	-0.013 ***
2017 年	-0.043 ***	0.040 ***	-0.005 ***	0.061 ***	-0.001 ***	-0.005 ***
2020 年	-0.176 ***	-0.085 ***	-0.157 ***	0.116 ***	-0.192 ***	0.012 ***

① *** 表示通过 1% 显著性水平检验。

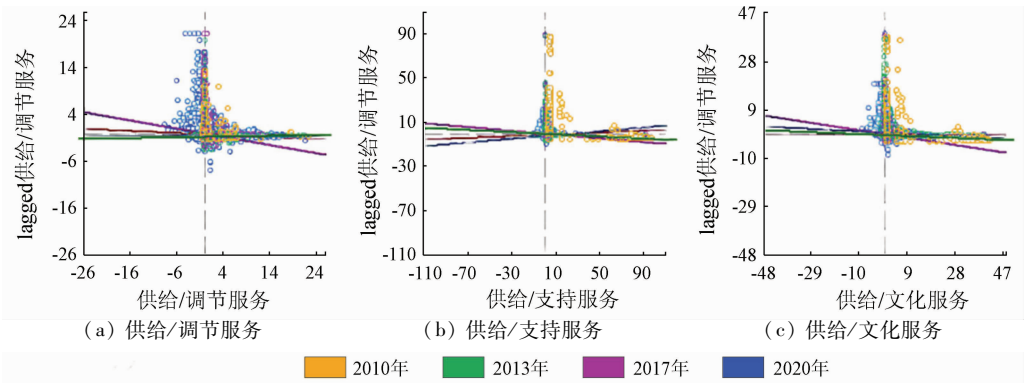


图 9-1 4 类典型生态系统服务功能 Moran's I 空间自相关散点图

Fig.9-1 Moran's I spatial autocorrelation scatter diagram of four typical ecosystem services

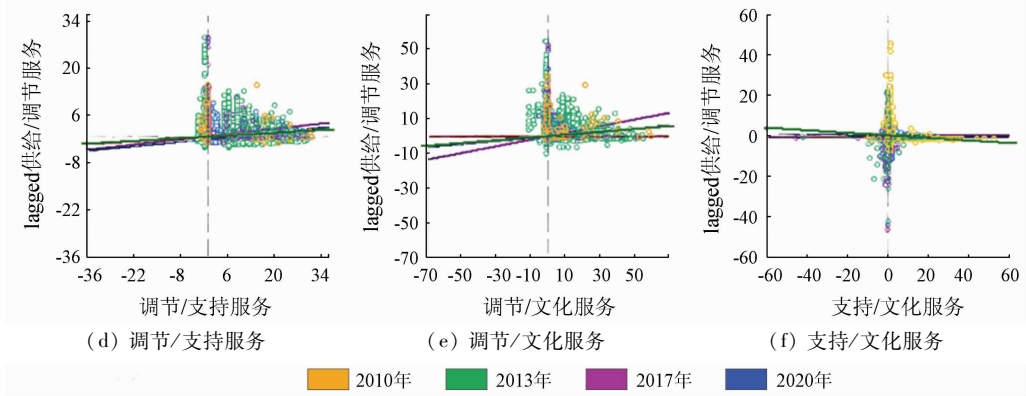


图 9-2 4 类典型生态系统服务功能 Moran's I 空间自相关散点图
Fig. 9-2 Moran's I spatial autocorrelation scatter diagram of four typical ecosystem services

均为负相关关系、支持/调节服务均为正相关关系，其他服务之间相关关系不稳定，供给/支持服务、调节/文化服务均为先正相关后负相关关系，供给/调节服务为先负相关再正相关最后负相关关系，支持/文化服务为先负相关后正相关关系。

3.1.3 面向 SDG15 的生态系统服务变化分析

研究区内林地为主要用地类型，为分析可持续发展目标下林地的时空变化，利用 SDG15. 1. 1 与 SDG15. 2. 1 对研究区进行衡量。其中，SDG15. 2. 1 既考虑了森林面积变化的方向（森林面积增加或减少），也考虑了森林面积损失率的变化，该指标可以表明正在损失森林面积但设法降低损失率的区域之间的进展。

SDG15. 1. 1 计算结果见图 10，结果表明研究区的森林占地面积逐年增加。2010—2013 年，SDG15. 2. 1 最大，表示森林面积的大幅度增加且面积损失率最小，2013—2017 年 SDG15. 2. 1 值最小，表示这 4 a 内森林变化最稳定。2010—2020 年内森林总体的复合变化率为 1.90%，表明森林面积的变化方向为面积的增加，这是研究区可持续发展的正向表现。SDG15. 1 与 SDG15. 2 设定的目标均需 在 2020 年实现，即在 2020 年需要达到一个可持续发展的良性循环，由于 SDG15. 1 和 SDG15. 2 与计算得到的生态系

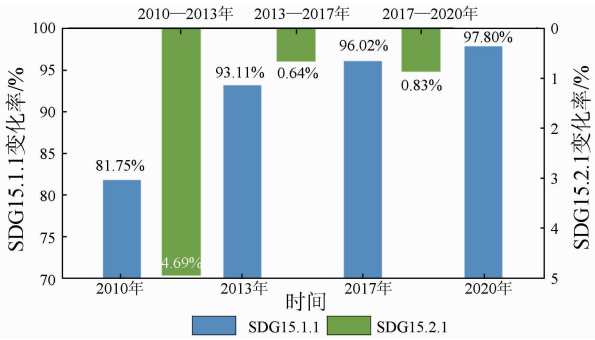


图 10 SDG15.1.1 与 SDG15.2.1 时间变化
Fig. 10 Time change diagram of SDG15.1.1 and SDG15.2.1

统服务物质质量以及价值量的变化趋势相符合，可以证明研究区为可持续发展的保护区，其良好的生态系统可以为周围地区提供生态系统服务，实现了 SDG15. 1 与 SDG15. 2 的目标要求。同时，说明生态系统服务的计算结果可以作为 SDG15 的区域状态，突破了 SDGs 指标以国家等单位的大范围计算的限制，进而将可持续发展目标这一概念运用到小尺度研究区内。

3.2 生态系统服务变化特征及原因分析

对 2010—2020 年生态系统服务 4 类典型服务与 4 类物质质量双变量空间自相关 Moran's I 指数数值进行图表表达与分析（图 11）。结合土地利用类

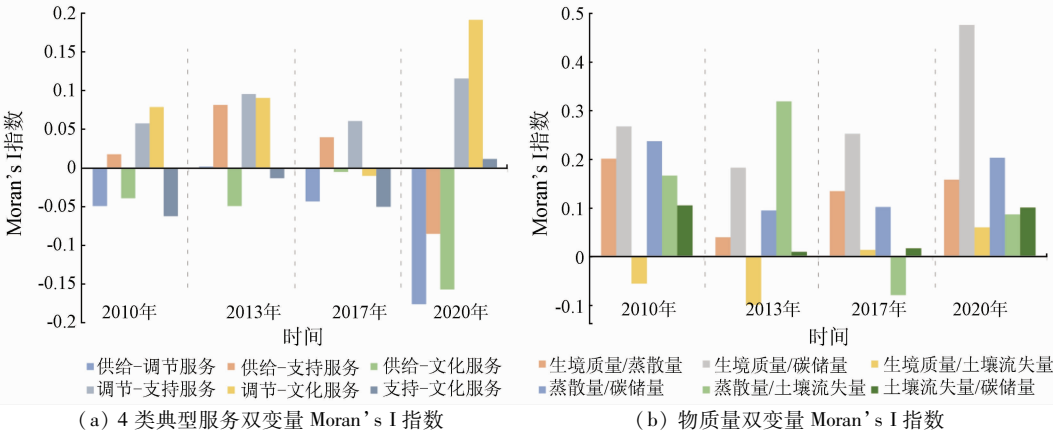


图 11 生态系统服务空间自相关 Moran's I 指数变化
Fig. 11 Moran's I index change of Spatial autocorrelation of ecosystem services

型变化、不同土地类型所提供的不同生态系统服务价值以及生态系统提供的物质量总结分析。

2010—2013 年,除供给 - 文化服务外,其他价值量双变量 Moran's I 指数均呈上升趋势,这是由于林地面积大幅增加导致,林地主要提供了生态系统的调节服务、支持服务。同样,林地大幅增加,植物的蒸散作用导致生态系统中蒸散量和年水产量的增加,发达根系群避免了土壤的流失,这导致 2010—2013 年物质量 Moran's I 指数的增加。此外,水体在 2010—2013 年,可提供调节服务占比从 5.45% 增加至 7.71%。供给 - 文化服务指数的减少与耕地面积的大量减少有关,耕地是仅次于林地的第二大生态系统服务来源,在 2010 年提供了 19.12% 的供给服务,但到 2013 年迅速减少到 6.04%。由于耕地可带来的碳储量的减少导致物质量空间聚集度下,并且新种植的林地生态系统中还无法带来良好的生态循环效应,林地生境质量也有所下降,单位生境质量值从 0.897 减少到 0.891。

2013—2017 年,除供给 - 文化服务外,其他双变量 Moran's I 指数均呈下降趋势。其中,草地在 2013—2017 年,可提供供给服务减少,而供给服务价值量的上升导致供给 - 文化服务指数的上升。由于耕地与湿地可提供生态系统服务价值不断下降,且湿地主要提供调节与支持服务,导致其他变量指数呈下降趋势。从物质量 Moran's I 指数来看,水体生态环境的优化,水体生境质量值有小幅提升,从 0.764 增加到 0.785。同时,林地有了充分的生长时间,弥补了耕地减少而损失的碳储量。

2017—2020 年,除供给 - 支持、供给 - 调节、供给 - 文化外,其他 3 个变量呈上升趋势。这是由于林地面积在缓慢增加,因此调节服务、支持服务与文化服务同样在增加,从而导致 Moran's I 指数的上升。而草地可提供的供给服务占比从 0.726% 下降至 0.000 35%,灌木地可提供的供给服务从 0.163 8% 下降至 0.095 4%,草地与灌木地可提供服务较少且呈减少趋势,归因于其他用地类型变化较小或可提供生态系统服务价值已达到饱和,于是剩余用地类型对于整个生态系统服务的影响更大。2017 年之后,生态环境在不断优化,因此,生态系统中各用地类型可提供物质量均在上升,可以在生态系统中形成一个良性循环,为整个生态环境提供不同的服务功能。

4 结论与讨论

本文从 2010—2020 年的土地利用时空变化入

手,通过生态系统服务的物质量以及价值量的计算,结合空间自相关方法,探讨了钱江源国家公园生态系统服务的时空变化以及其相互之间的关系,同时联系 SDG15 进行分析。研究表明:

1) 耕地面积在 2010—2013 年内快速减少,其中 99.4% 的耕地重新变为林地,其中生境质量越高,则年水产量越大,土壤中的碳储量越多,同时土壤流失量越少。

2) 2010—2020 年,研究区生态系统服务价值共增加了 15.21%。4 类典型生态系统服务提供价值排序为调节服务 > 支持服务 > 供给服务 > 文化服务。

3) 2010—2020 年生态系统服务价值空间分布均呈现出从东北与西南逐渐向中部减小的空间变化趋势。其中,供给/文化服务均为负相关关系、支持/调节服务均为正相关关系,其他服务之间相关关系不稳定。

4) 研究区内生态系统服务在 2013 年之后增长速度减慢,呈均匀增长趋势。这与研究区土地利用率达到饱和有关,在无法增加土地利用率的现状下,湿地、水体、草地、灌木林的面积与生态质量的减少导致了部分生态系统服务空间聚集度下降。生态系统服务的价值量和物质量均可对生态系统进行评估,但由于二者侧重点不同,因此可能产生结果略有差异,可以接受。

5) 研究区在 2020 年达到了 SDG15.1 与 SDG15.2 的目标要求。2010—2020 年,SDG15.1.1 表明森林占地面积呈增加趋势,SDG15.2.1 表明研究区内森林复合变化率稳定,森林损失率为负。

本研究聚焦 SDGs 于小尺度范围并进行评估与测量,将生态系统服务作为衡量 SDG15 的指标。结果显示 2010—2020 年间钱江源国家公园的生态环境质量不断提高,这与政府政策的推行、公园的规范化管理以及公民环保意识的提升有关。建议基于土地利用现状着重保护湿地与水体,同时适当减少人类活动干扰,以科学保护自然资源为基本原则实现生态环境的可持续发展。在国家公园的建设上,除了关注国家公园内部的生态环境,还应重视国家公园内社区居民的生活质量问题,促进人与环境和谐共生。

参考文献 (References):

[1] 国务院. 国务院办公厅印发《建立国家公园体制总体方案》[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2017-09/26/content_5227713.htm.
State Council. The General Office of the State Council issued the "Overall Plan for Establishing the National Park System" [EB/

- OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2017-09/26/content_5227713.htm.
- [2] 何思源, 苏杨, 闵庆文. 中国国家公园的边界、分区和土地利用管理——来自自然保护区和风景名胜区的启示[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1318–1329.
- He S Y, Su Y, Min Q W. Boundary, zoning, and land use management of the China National Parks: Learning from nature reserves and scenic areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(4): 1318–1329.
- [3] 虞虎, 陈田, 钟林生, 等. 钱江源国家公园体制试点区功能分区研究[J]. 资源科学, 2017, 39(1): 20–29.
- Yu H, Chen T, Zhong L S, et al. Functional zoning of the Qianjiangyuan National Park system pilot area[J]. *Resources Science*, 2017, 39(1): 20–29.
- [4] 殷楠, 王帅, 刘焱序. 生态系统服务价值评估: 研究进展与展望[J]. 生态学杂志, 2021, 40(1): 233–244.
- Yin N, Wang S, Liu Y X. Ecosystem service value assessment: Research progress and prospect[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(1): 233–244.
- [5] Yang S Q, Zhao W W, Liu Y X, et al. Prioritizing sustainable development goals and linking them to ecosystem services: A global expert's knowledge evaluation[J]. *Geography and Sustainability*, 2020, 1(4): 321–330.
- [6] Peng K F, Jiang W G, Ling Z Y, et al. Evaluating the potential impacts of land use changes on ecosystem service value under multiple scenarios in support of SDG reporting: A case study of the Wuhan urban agglomeration[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 307: 127321.
- [7] Costanza R, d'Arge R, Groot R de, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253–260.
- [8] Li X, Guo J, Qi S. Forestland landscape change induced spatiotemporal dynamics of subtropical urban forest ecosystem services value in forested region of China: A case of Hangzhou City[J]. *Environmental Research*, 2021, 195: 110926.
- [9] Grammatikopoulou I, Vačkářová D. The value of forest ecosystem services: A meta-analysis at the European scale and application to national ecosystem accounting[J]. *Ecosystem Services*, 2021, 48: 101262.
- [10] 赵亮, 刘吉平, 田学智. 近 60 年挠力河流域生态系统服务价值时空变化[J]. 生态学报, 2013, 33(10): 3169–3176.
- Zhao L, Liu J P, Tian X Z. The temporal and spatial variation of the value of ecosystem services of the Naoli River Basin ecosystem during the last 60 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(10): 3169–3176.
- [11] Perosa F, Fanger S, Zingraff – Hamed A, et al. A meta-analysis of the value of ecosystem services of floodplains for the Danube River Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 777: 146062.
- [12] 亢红霞, 那晓东, 臧淑英. 1980—2010 年松嫩平原湿地生态服务功能价值评估[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(2): 193–200. doi:10.6046/gtzyyg.2017.02.28.
- Kang H X, Na X D, Zang S Y. Research on the evaluation of wetland ecosystem services of Songnen Plain during 1980—2010[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2017, 29(2): 193–200. doi:10.6046/gtzyyg.2017.02.28.
- [13] 马依拉·热合曼, 买买提·沙吾提, 尼格拉·塔什甫拉提, 等. 基于遥感与 GIS 的渭库绿洲生态系统服务价值时空变化研究[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5938–5951.
- Mayila R H M, Mamat S W T, Nigela T X P L T, et al. The ecosystem service value spatial-temporal changes in the Ugan – Kuqa River Delta Oasis based on RS and GIS[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16): 5938–5951.
- [14] 张瑜, 赵晓丽, 左丽君, 等. 黄土高原土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 132–139. doi:10.6046/gtzyyg.2019.03.17.
- Zhang Y, Zhao X L, Zuo L J, et al. The impact of land use change on ecosystem services value in Loess Plateau[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2019, 31(3): 132–139. doi:10.6046/gtzyyg.2019.03.17.
- [15] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等. 城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2565–2576.
- Hu H B, Liu H Y, Hao J F, et al. Spatio-temporal variation in the value of ecosystem services and its response to land use intensity in an urbanized watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(8): 2565–2576.
- [16] Aziz T. Changes in land use and ecosystem services values in Pakistan, 1950—2050[J]. *Environmental Development*, 2021, 37: 100576.
- [17] 汪清川, 奚砚涛, 刘欣然, 等. 生态服务价值对土地利用变化的时空响应研究——以徐州市为例[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 219–228. doi:10.6046/zrzyyg.2020305.
- Wang Q C, Xi Y T, Liu X R, et al. Spatial-temporal response of ecological service value to land use change: A case study of Xuzhou City[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, 33(3): 219–228. doi:10.6046/zrzyyg.2020305.
- [18] 李晶, 李红艳, 张良. 关中—天水经济区生态系统服务权衡与协同关系[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 3053–3062.
- Li J, Li H Y, Zhang L. Ecosystem service trade-offs in the Guanzhong – Tianshui economic region of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 3053–3062.
- [19] 胡毅, 乔伟峰, 何天祺. 江淮生态经济区土地利用格局及生态系统服务价值变化[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(11): 2450–2461.
- Hu Y, Qiao W F, He T Q. Land use pattern and ecosystem service value changes in the Jianghuai Ecological Economic Zone[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(11): 2450–2461.
- [20] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 等. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡—协同关系[J]. 地理研究, 2020, 39(1): 64–78.
- Zheng D F, Hao S, Lyu L T, et al. Spatiotemporal changes and trade-off – synergy relationship of ecosystem services in the Three Rivers Source National Park[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(1): 64–78.
- [21] 何思源, 苏杨, 王蕾, 等. 构建促进保护地社区资源使用与保护目标协调的社会情境分析工具——武夷山国家公园试点区实践[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3861–3870.
- He S Y, Su Y, Wang L, et al. Developing a social context analysis tool to facilitate communities' conservation behavior in protected areas: An experiment in the Wuyishan National Park pilot[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 3861–3870.
- [22] 肖练练, 钟林生, 虞虎, 等. 功能约束条件下的钱江源国家公园体制试点区游憩利用适宜性评价研究[J]. 生态学报, 2019,

39(4):1375–1384.

Xiao L L,Zhong L S,Yu H,et al. Assessment of recreational use suitability of Qianjiangyuan National Park pilot under the zoning constraints[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(4):1375–1384.

[23] Gong P,Liu H,Zhang M,et al. Stable classification with limited sample;Transferring a 30–m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10–m resolution global land cover in 2017[J]. Science Bulletin,2019,64(6):370–373.

[24] Liu L Y,Zhang X,Chen X D,et al. GLC_FCS30–2020:Global land cover with fine classification system at 30 m in 2020(v1.2) [DB/OL]. Zenodo, 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4280923>.

[25] 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.

Fu B J,Zhang L W. Land–use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress [J]. Progress in Geography,2014,33(4):441–446.

[26] 李屹峰,罗跃初,刘 纲,等. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例[J]. 生态学报,2013,33(3):726–736.

Li Y F,Luo Y C,Liu G,et al. Effects of land use change on ecosystem services:A case study in Miyun reservoir watershed[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(3):726–736.

[27] 李 丽,王心源,骆 磊,等. 生态系统服务价值评估方法综述[J]. 生态学杂志,2018,37(4):1233–1245.

Li L,Wang X Y,Luo L,et al. A review of ecosystem service value evaluation methods[J]. Chinese Journal of Ecology,2018,37(4):1233–1245.

[28] 高 星,杨刘婉青,李晨曦,等. 模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应[J]. 生态学报,2021,41(20):7974–7988.

Gao X,Yang L W Q,Li C X,et al. Land use change and ecosystem service value measurement in Baiyangdian Basin under the simulated multiple scenarios[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(20):7974–7988.

[29] Lin W P,Xu D,Guo P P,et al. Exploring variations of ecosystem service value in Hangzhou Bay Wetland, Eastern China[J]. Ecosystem Services,2019,37:100944.

[30] 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 G D,Zhang C X,Zhang L M,et al. Improvement of the method of valuing ecosystem services based on unit area value equivalent factors[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(8):1243–1254.

SDG15 – oriented analysis on the spatiotemporal dynamics of ecosystem services in Qianjiangyuan National Park

LI Bo, LIN Wenpeng, LI Lubing

(School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: Ecosystem services are the bridge between ecology and human well – being, hence rapid and accurate assessment of their changes is very important for regional sustainable development. Sustainable Development Goal 15 (SDG15) also provides a new direction for the calculation of ecosystem services. The Qianjiangyuan is the origin of the Qiantang River and the only pilot national park in the Yangtze River Delta region at present. However, it is necessary to further clarify the spatiotemporal distribution and changes of the ecosystem services in Qianjiangyuan. Based on the 2010—2020 remote sensing monitoring data of land cover in the pilot area and oriented to the SDG15 indicators, this study quantitatively assessed the spatiotemporal variation characteristics of ecosystem services in Qianjiangyuan National Park using the InVEST model and the univariate and bivariate Moran’s I spatial autocorrelation methods. The results are shown as follows. ① From 2010 to 2020, the values of ecosystem services gradually increased by 15.21%. Specifically, cultural services grew the fastest by 19.70%, regulating services grew by 16.27%, and supply services decreased by 1.72%. ② The spatial distribution of ecosystem service values showed a gradually decreasing trend from the northeast and the southwest to the center. ③ The spatiotemporal changes in land cover types slowed the growth of ecosystem services under the land development restriction. The reduced areas of wetlands and water bodies and ecological quality led to declined spatial aggregation and value of some ecosystem services. ④ Ecosystem services can be regarded as an indicator of SDG15. The study results are expected to provide a theoretical basis and technical support for the construction of Qianjiangyuan National Park and support the sustainable development of the regional ecological environment.

Keywords: Qianjiangyuan National Park; ecosystem services; Moran’s I index; InVEST model; SDG15

(责任编辑: 李 瑜)