

生态型县域生态系统服务时空格局及其协同关系

——以国家全域旅游示范区江西省武宁县为例

刘尧兰^{1,2}, 温智亮^{1,2}, 郑博福^{1,2}, 黄云^{1,2}, 朱锦奇^{1,2}, 刘忠³, 万炜^{1,2}

(1.南昌大学 资源与环境学院 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西 南昌 330031;

2.南昌大学 江西生态文明研究院, 江西 南昌 330031; 3.中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘要: [目的] 分析生态型县域生态系统服务的时空变化及协同关系, 为促进国家生态文明建设, 实现生态保护和经济社会协调发展提供理论参考。[方法] 以江西省武宁县为例, 结合野外实测数据, 运用InVEST模型评估了该区2000—2020年水源涵养、土壤保持、碳储存和粮食供给4种典型生态系统服务, 在此基础上探讨了生态系统服务间的协同关系及其时空变化特征。[结果] ①2000—2020年, 武宁县单位栅格年平均水源涵养量从173.14 mm提升至283.92 mm, 单位栅格年平均粮食供给量从3.52 kJ提升至5.34 kJ, 两者均呈现增长趋势; 土壤保持功能呈先减少, 后增长, 再减少的波动趋势; 20 a间土壤保持功能下降了15.71%, 而碳储存功能呈现微弱增长的趋势。②武宁县南部和北部的林地是水源涵养、土壤保持和碳储存的高值区; 水域、建设用地及未利用地分布区域是水源涵养、土壤保持和碳储存的低值区; 4种生态系统服务中, 林地和耕地是生态系统服务功能发展的关键用地。③武宁县水源涵养、土壤保持和碳储存3者之间是协同关系, 与粮食供给是权衡关系; “高一高”和“低一低”集聚的协同关系主要分布在高海拔的林地及水域, “高一低”和“低一高”集聚的权衡关系主要分布在耕地。[结论] 2000—2020年武宁县生态系统服务功能整体呈上升趋势, 未来应重点关注生态调节服务功能向资源价值的转化。

关键词: 生态系统服务; 权衡与协同; InVEST模型; 生态型县域; 江西省武宁县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0400-16

中图分类号: X171.1

文献参数: 刘尧兰, 温智亮, 郑博福, 等. 生态型县域生态系统服务时空格局及其协同关系[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 400-415. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.040; Liu Yaolan, Wen Zhiliang, Zheng Bofu, et al. Spatiotemporal patterns of ecosystem services and trade-off/synergistic relationships in ecological counties [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 400-415.

Spatiotemporal Patterns of Ecosystem Services and Trade-off/ Synergistic Relationships in Ecological Counties

—Taking National Comprehensive Tourism Demonstration Zone at Wuning County, Jiangxi Province as an Example

Liu Yaolan^{1,2}, Wen Zhiliang^{1,2}, Zheng Bofu^{1,2}, Huang Yun^{1,2}, Zhu Jinqi^{1,2}, Liu Zhong³, Wan Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of

Education, School of Resources & Environment, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031,

China; 2. Jiangxi Institute of Ecological Civilization, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031,

China; 3. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal changes and trade-off/synergistic relationships of ecosystem services in an ecological county were analyzed in order to provide a theoretical reference for promoting the construction of national ecological civilization and to realize the coordinated development of ecological protection and social economy. [Methods] This study was conducted at Wuning County of Jiangxi Province. Field-measured data were used with the InVEST model to evaluate four typical ecosystem services from 2000 to 2020: water conservation, soil conservation, carbon storage, and food supply. On this basis, the trade-off and synergistic relationships of ecosystem services and their spatiotemporal changes were determined. [Results]

收稿日期: 2023-07-25

修回日期: 2023-08-29

资助项目: 江西省重点研发计划项目“生态型县域碳达峰碳中和评估模型搭建与应用; 江西重要生态功能区生态产品价值实现的数字化技术集成与示范”(20223BBG74S01; 20223BBG71013); 国家自然科学基金青年项目(42301091)

第一作者: 刘尧兰(1981—), 男(汉族), 江西省吉安市人, 硕士, 讲师, 主要从事水土保持与生态系统服务研究。Email: jxstwm@ncu.edu.cn.

通信作者: 万炜(1993—), 男(汉族), 江西省景德镇市人, 博士, 讲师, 主要从事资源环境遥感与土壤侵蚀方面的研究。Email: wanwei@ncu.edu.cn.

① From 2000 to 2020, the average annual water conservation per grid unit at Wuning County increased from 173.14 mm to 283.92 mm, and the average annual food supply per grid unit increased from 3.52 kJ to 5.34 kJ. The soil conservation function showed a fluctuating trend of decreasing, then increasing, and then decreasing. Over the past 20 years, the soil conservation function decreased by 15.71%, while the carbon storage function showed a weak growth trend. ② The forest land at Southern and Northern Wuning County was a high value area of water conservation, soil conservation, and carbon storage. The water areas, construction land, and unused land were the low value areas for water conservation, soil conservation, and carbon storage. Forest land, and farmland were the key land use types for the development of ecosystem service functions. ③ Water conservation, soil conservation, and carbon storage in Wuning County were synergistically related, but the relationships between food supply and the other three ecosystem services were trade-off relationships. The synergies of “high-high” and “low-low” agglomeration were mainly located in high-altitude forest land and water areas, while the trade-off relationships of “high-low” and “low-high” agglomeration were mainly located in farmland. [Conclusion] During 2000—2020, the overall ecosystem service function of Wuning County has shown an upward trend, and the conversion of ecological regulation service functions into resource values should be emphasized in the future.

Keywords: ecosystem services; trade-off/synergistic relationships; InVEST model; ecological counties; Wuning County, Jianxi Province

生态系统服务(ecosystem services, ES)是指自然界中生态系统所提供的各种物质和环境条件,人们可以直接或间接地从生态系统中获得各种好处,维持人类的生存和发展^[1]。联合国千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA)项目对24种生态系统服务进行了评估,发现在过去的50年中,约60%人类赖以生存的生态系统服务功能(如水资源供应、侵蚀控制、洪水调蓄等)都在不断退化^[2]。随着社会经济的快速发展,人们对自然资源的掠夺越来越多,造成不同空间尺度上生态系统服务功能普遍降低,生态系统服务之间的关系动态变化明显。为了降低生态系统服务间的负面影响,增强它们的相互促进作用,生态系统服务的权衡和协同研究成为了当前生态系统服务领域的前沿课题^[3]。

目前,国内外用于评估生态系统服务权衡与协同关系的方法主要有4种,分别是统计描述法^[4]、空间制图法^[5]、模型模拟法^[6]和情景分析法^[7]。从研究对象上看,多集中于干旱半干旱区^[8]、高原^[9]、草地^[10]和山区等^[11]生态敏感区或脆弱区,其研究尺度多集中在大区域尺度^[11]、流域尺度^[12]、省域尺度等^[13],而县域尺度的研究相对少见。与大尺度的宏观评估不同,实现县域尺度的生态系统服务精准评估,往往需要精度更高的实测本地化参数。但以往研究多采用通用模型参数,致使评估结果精度受限,且主要集中在生态系统服务价值量的评估及其相关关系研究^[14]。此外,当前学者主要考虑生态系统的调节服务,而忽略了粮食供给与调节服务功能的权衡协调关系^[12-22]。因此,以往研究通常忽视了物质产品供给的评估,不能全

面、精细地刻画县域尺度生态系统服务。

县域经济是国民经济的基本单元。县域生态环境是国家生态安全建设的关键节点和重要抓手。精准评估县域生态系统服务,科学分析生态系统服务的权衡与协同关系,对县域经济的发展和生态环境的保护具有重要影响。正确认识县域生态系统服务之间的权衡和协同关系,通过定量分析多个生态系统服务的相互作用和影响因素,有助于实现生态系统服务的优化管理,这是生态文明研究领域亟需解决的问题。然而,在生态系统服务间的关系研究中,常见的数据源一般是统计数据或粗分辨率地理遥感数据,将其应用于县域上,前者难以体现最小统计单元内部的空间异质性,后者空间分辨率不够精细,致使目前县域尺度研究较为薄弱。因此,实现生态型县域生态系统服务间关系的精准评估,具有重要的理论价值与现实意义^[15]。

鉴于此,本研究以江西省武宁县为研究区,结合野外实测数据,评估2000—2020年该区域的水源涵养、土壤保持、碳储存和粮食供给等4种典型生态系统服务。分析生态系统服务间权衡/协同关系及其时空演变特征,并进一步探讨其动态性与异质性的驱动机制。研究结果可为生态型县域的社会—经济—生态协调可持续发展提供科学参考,为区域国土空间规划和生态系统服务提升和优化提供理论支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

武宁县位于江西省的西北部,修河中游,湘鄂赣边界(28°52′35″—29°34′29″N, 114°28′17″—115°26′34″E),

国土面积 3 507 km²(图 1)。地形呈“两山夹一谷”的格局,分别从南、北部向中部修河逐级下降。地处亚热带季风气候,温和湿润,四季分明,雨水充沛,年平均气温 16.6℃,年平均降水量 1 488.30 mm。武宁县森林覆盖率 74.04%,森林蓄积量达 1.45×10⁷ m³,水域面积 289.23 km²。该县生态资源丰富,大健康产业、生态旅游、生态农业以及林下经济产业蓬勃发展,2020 年获批国家全域旅游示范区。因此,武宁县作为典型生态型县域,分析该区域生态系统服务时空格局及权衡协同关系具有重要的理论价值与现实意义。

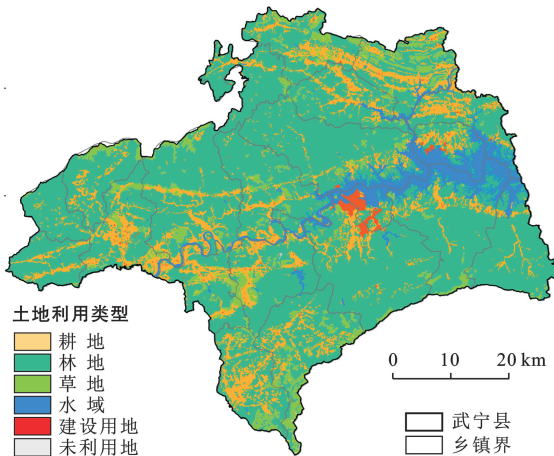


图 1 江西省武宁县土地利用概况

Fig.1 Overview of land use at Wuning County of Jiangxi Province

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 野外实测数据 样点布局是基于武宁县森林资源 2 类调查数据,依据不同地类、林种、龄组和森林类别这 4 种分类的组合,在考虑不同分类组合面积比例的差异的基础上,针对面积较大的组合布设相距较远的多个采样点,并且让采样点整体上均匀分布于研究区。最后获取有效 100 土壤样地(图 2)。每个样地设置 10 m×10 m 的标准样地,在每一块标准样地的四角各选取 1 m×1 m 小样方进行取样。按 0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm 土层深度分层取样。基于上述大样本实测数据,用于构建研究区域碳库数据,并进一步计算分析获得本地化的碳密度参数。

1.2.2 气象数据 降雨、气温、辐射等数据来源于中国气象数据网,通过统计整合武宁县及其周边地区 7 个气象站点的每日降雨、气温、辐射等数据,算出其年降雨量、年蒸散量和降雨侵蚀力^[16],再通过克里金插值得到 30 m×30 m 分辨率的相应气象栅格数据。

1.2.3 地理空间数据 行政边界数据源自国家基本基础信息中心;数字高程模型(DEM)数据来自地理空间数据云 ASTER GDEM,其分辨率为 30 m;土壤

数据来源于世界土壤数据库(HWSD)的中国数据集,来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心,从中提取研究区所需的砂粒、粉粒、黏粒含量比例和有机碳含量,再结合降水量数据,计算出土壤侵蚀量,并重采样至 30 m×30 m 空间分辨率;逐年 30 m 分辨率的 NDVI 数据,由国家生态科学数据中心获取。

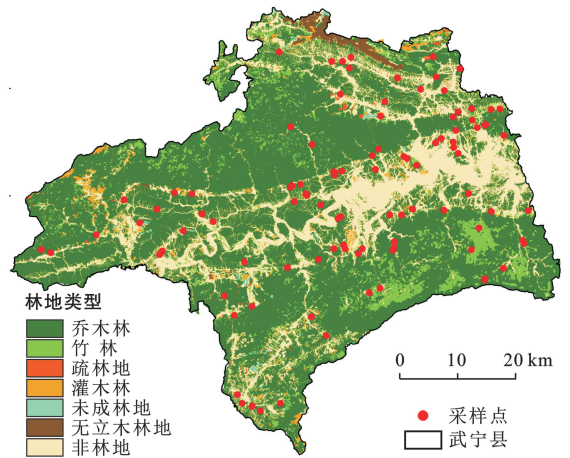


图 2 武宁县野外采样点空间分布

Fig.2 Spatial distribution of field sampling sites at Wuning County

1.2.4 统计数据 粮食产量数据来源于《武宁统计年鉴》。以武宁县乡镇尺度为基本地域单元,结合 NDVI 数据,通过 ArcGIS 软件将粮食供给能量分配至 30 m 分辨率的耕地栅格中。

2 研究方法

InVEST 模型在生态系统服务评估方面应用广泛,但在小区域和复杂的综合生态系统中,其结果和适用性仍存在诸多不确定性。这是由于生态系统的组成和生态过程非常复杂,而 InVEST 模型的输入参数对结果影响很大,需要一定的实测数据校正,以提高评估的精度和可靠性,从而确保模型输出的结果准确反映生态系统服务的实际情况。为此,本研究以野外实测数据为基础,对 InVEST 模型参数进行参数本地化后,开展武宁县生态系统服务的精准评估。

2.1 生态系统服务评估

2.1.1 水源涵养 利用 InVEST 模型的 water yield 模块,即根据水循环原理,结合植物蒸腾、地表蒸发和根系深度等参考计算获得产水量^[16],再利用地形指数、土壤饱和导水率和流速系数对产水量进行修正获得水源涵养量^[17]:

$$\text{Retention} = \min\left(1, \frac{249}{\text{Velocity}}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times \text{TI}}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{\text{Ksat}}{300}\right) \times \text{Yield} \quad (1)$$

式中:Retention 为水源涵养量(mm); Velocity 为流速系数; TI 为地形指数(无量纲),由公式(2)计算; Ksat 为土壤饱和导水率(cm/d),利用 NeuroTheta 软件计算得出; Yield 为产水量(mm);由公式(3)计算。

$$TI = \lg\left(\frac{\text{Drainage_Area}}{\text{Soil_Depth} \times \text{Percent_Slope}}\right) \quad (2)$$

式中:Drainage_Area 为集水区栅格数(无量纲); Soil_Depth 为土层深度(mm); Percent_Slope 为百分比坡度(%)。

$$Y_x = \left(1 - \frac{\text{AET}_x}{P_x}\right) \times P_x \quad (3)$$

式中: Y_x 为栅格 x 的产水量(mm); P_x 表示栅格单元 x 的年降水量(mm); AET_x 表示栅格单元 x 的实际蒸散量(mm)。

2.1.2 土壤保持 利用 InVEST 模型的泥沙输移比(SDR)模块,其原理是修订后的土壤流失方程(RUSLE)^[18-19]:

$$\text{RKLS}_x = R_x \times K_x \times L_x \times S_x \quad (4)$$

$$\text{USLE}_x = R_x \times K_x \times L_x \times C_x \times P_x \quad (5)$$

$$\text{SC}_x = \text{RKLS}_x - \text{USLE}_x \quad (6)$$

式中: SC_x 表示栅格 x 上的土壤保持量[t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]; RKLS_x 代表单位面积单位时间和空间无覆被条件下栅格 x 的土壤侵蚀量[t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]; USLE_x 代表单位面积单位时间和空间有植被覆盖条件下栅格 x 的土壤侵蚀量[t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]; R_x 代表栅格 x 的降水侵蚀性因子[(MJ · mm)/($\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a}$)]; K_x 代表栅格 x 所在的土壤可蚀性因子[(t · $\text{hm}^2 \cdot \text{h}$)/($\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$)]; L_x 代表栅格 x 的坡度、坡长因子(无量纲); C_x 代表栅格 x 的作物覆盖与管理措施因子(无量纲); P_x 代表栅格 x 的水土保持措施因子(无量纲)。

2.1.3 碳储存 碳储存代表陆地生态系统的固碳能力,利用 InVEST 模型的 Carbon Storage and Sequestration 模块,根据不同的土地利用类型数据及其所对应的 4 大碳库的碳密度等数据计算不同时期和不同土地类型的碳储存^[20]。本研究在武宁县野外调研过程中布设了 100 个样地的,对每个样地的地表植被、枯落物、土壤进行收集,通过相关测定方法构建碳库数据。再将碳库数据连接到研究区域,按照不同的土地利用类型提取地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度和死亡碳密度。将处理好碳库数据导入至 InVEST 的碳储存模型,得到碳储存栅格图。其他地类的碳密度取值则参考模型帮助文件及前人成果^[21-23](表 1)。碳存储计算的基本原理为:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (7)$$

式中: C_{total} 表示碳总量(t); C_{above} , C_{below} , C_{soil} , C_{dead} 分别表示地上、地下、土壤和死亡生物碳密度(t/ hm^2)。

表 1 武宁县不同土地利用类型的碳密度参数

Table 1 Carbon density parameters of different land use types at Wuning County t/ hm^2

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡碳密度
水田*	5.46	1.32	82.00	0.04
旱地	4.51	0.60	65.12	0.04
有林地*	134.71	54.00	102.57	7.25
灌木林*	32.94	11.14	34.37	1.20
疏林地*	64.66	5.82	34.22	1.03
其他林地*	28.30	8.69	35.60	1.46
高度盖度草地	2.40	5.96	25.60	3.42
中覆盖度草地*	2.15	5.16	20.05	2.00
低覆盖度草地	1.66	3.41	10.93	1.99
河渠	—	—	—	—
湖泊	—	—	—	—
水库坑塘	—	—	—	—
滩地*	2.30	0.81	0.50	—
城镇用地	—	—	—	—
农村用地	—	—	50.00	—
其他建设用地	—	—	—	—
裸土地	10.00	5.00	20.00	—
裸岩石质地	—	—	—	—

注:* 地类对应的碳密度数据为本研究实测获取。

本研究通过野外采样的方式收集每个样地的乔木信息、灌木信息、草本植物信息、枯落物信息和土壤信息。乔木生物量的测定方法是通过乔木的胸径、树高、冠幅等基础数据,结合已有研究结果,采用生物量相对生长方程测定。灌木生物量的测定方法主要是根据灌木群落特征和植株的大小分别采用平衡木法、相对方程法和收获法。草本生物量的测定采用收获法,其原理是在 65 °C 的条件下,进行烘干后称重。关于土壤生物量的测定,首先在样地的 0—10, 10—20 和 20—40 cm 深度处,采取分层取样的方式。土壤样本在室内自然风干并去除杂物后,经过研磨并筛过孔径 0.015 mm 筛,制成待测土样。土壤有机碳的测定采用重铬酸钾容量法。土壤容重采用环刀称质量法。土壤有机碳储量的计算式为^[24]:

$$S = \sum_{i=1}^n C_i \times \rho_i \times H_i \times (1 - \delta_i) / 10 \quad (8)$$

式中: S 为土壤有机碳储量(t/ hm^2); C_i 为土壤表层有机碳含量(g/kg); ρ_i 为土壤表层容重(g/ cm^3); H_i 为土层深度(cm); i 为土壤 > 2 mm 砾石所占的体积百分比(%)。

每个采样点均记录下经纬度,并详细记录每个样

点地上的乔木、灌木、草本生物量,地下的乔木、灌木、草本的根系生物量,土壤生物量和枯落物生物量。再结合相应的转化系数,得到武宁县碳库数据。

2.1.4 粮食供给 粮食供给是生态系统服务重要的供给服务,与人类生存和区域可持续发展息息相关。由于不同粮食类型的供给能力不同,所以将其转化为能量的形式。研究结合武宁县土地利用数据、统计年鉴数据和归一化植被指数(NDVI),对武宁县各乡镇粮食供给的能量进行统计,并将各乡镇粮食供给的能量在耕地栅格上进行分配。其计算公式为^[25]:

$$P_{ij} = \frac{NDVI_{ij}}{NDVI_{sumij}} \times P_{sumij} \quad (9)$$

式中: P_{ij} 为第 ij 个像元提供的粮食总能量(kJ); P_{sumij} 为个乡镇粮食总能量(kJ); $NDVI_{ij}$ 为第 ij 个像元的NDVI值(无量纲); $NDVI_{sumij}$ 为耕地的NDVI值总和(无量纲)。

2.2 权衡与协同关系分析

2.2.1 时间演变特征 通过运用 SPSS 软件中的 Pearson 相关系数分析,探究武宁县 4 种关键生态系统服务(水源涵养、土壤保持、碳储存和粮食供给服务)之间权衡协同关系的时序演变特征。若相关系数经过显著性检验后为正,则说明它们呈正相关(两者为协同关系);若相关系数经过显著性检验后为负,则说明它们呈负相关(两者为权衡关系)。计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

式中: R_{xy} 为相关系数; n 为样本数; x_i, y_i 分别为 x, y 的第 i 个值; \bar{x}, \bar{y} 分别为 x 和 y 的平均值。

2.2.2 空间集聚特征 在本研究中,使用 GeoDa 软件进行双变量局部空间自相关分析,以探究生态系统水源涵养、土壤保持、碳储存和粮食供给服务之间的权衡和协同关系在空间分布上的特征和情况。双变量全局自相关和局部自相关方法可以反映两个变量在整个研究区的相关关系以及空间关系的局部集聚特征。在本研究中,采用 Moran's I 指数来衡量相关性,其取值范围为 $[-1, 1]$ 。当 Moran's I 值 >0 时,表示两个变量呈正相关;当 Moran's I 值 <0 时,则表示两个变量呈负相关;当 Moran's I 值 $=0$ 时,则表示属性值是随机分布的。通过 Z 值检验($p < 0.05$),本研究使用 GeoDa 软件绘制了 LISA 聚类图,进一步展现了相关性和空间分布的特征,以表征两两生态系统服务在空间上的依赖性和关联性。输出结果包括高值聚类协同区、低值聚类协同区、“高一低”集聚协同区、“低—高”集聚协同区和不显著区。

2.2.3 冷热点分析 任何地区都能够以不同程度提供多种不同的生态系统服务。本研究将武宁县生态系统服务量(水源涵养服务、土壤保持服务、碳储存服务和粮食供给服务)超过各自当年平均值的区域视为该类服务的热点区。其中,“0类、1类、2类、3类和4类热点区”分别指该地区存在0种、1种、2种、3种和4种生态系统服务值超过各自当年平均值的情况。在数据分析中,对这4种生态系统服务进行标准化处理,并利用像元统计法提取每个像元对应4种生态系统服务中的最大值。在此基础上,根据条件筛选出每个像元所主导的生态系统服务类型。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务时空分布格局

3.1.1 生态系统服务的时间变化 2000—2020年,武宁县4种生态系统服务的变化趋势存在差异(图3)。从时间特征来看:①水源涵养功能呈逐渐增长的趋势,2000—2020年武宁县水源涵养每栅格的量介于 $0 \sim 1\ 864.93$ mm,区域栅格年均水源涵养量分别为173.14,215.64,264.24,264.51和283.92 mm,20 a间,年平均水源涵养量增加了63.87%。结合自然间断法划分低值区、中值区、高值区。其中,低值区($0 \sim 200$ mm)的面积所占比例呈现逐渐降低趋势,总共降低了18.68%;而中值区($200 \sim 500$ mm)和高值区(> 500 mm)的面积比例变化趋势与低值区相反,呈明显逐渐增长的趋势。②土壤保持功能呈先减少后增长再减少的波动趋势。2000—2020年武宁县土壤保持每栅格的量介于 $0 \sim 64\ 040$ t,区域栅格年均土壤保持量分别为431.09,295.50,346.73,438.36和363.36 t。20 a间,年平均土壤保持量减少了15.71%。低值区($0 \sim 300$ t)所占面积具有明显的波动,整体上呈波动增加的趋势;中值区($300 \sim 1\ 000$ t)和高值区($> 1\ 000$ t)的面积占比变化趋势与低值区相反,呈波动减少的趋势。③碳储存功能呈略微增长的趋势。2000—2020年,武宁县碳储存每栅格的量介于 $0 \sim 27$ t,区域栅格年均碳储存量分别为14.84 t,15.02 t,15.88 t,15.79 t和15.77 t。20 a间,年平均碳储存增加了6.27%。低值($0 \sim 4.425$ t)、中值($4.425 \sim 9.482$ t)和高值(> 9.482 t)的面积占比呈微弱的波动变化。④粮食供给功能呈增长的趋势。2000—2020年,武宁县粮食供给每栅格的量介于 $0 \sim 362$ kJ,区域栅格年均粮食供给量分别为3.52,4.11,5.44,5.29和5.34 kJ。20 a间,年平均粮食供给增加了51.70%。低值($0 \sim 16$ kJ)的面积比例呈逐渐降低的波动趋势;中值($16 \sim 86$ kJ)的面积比例呈波动减少的趋势;高值(> 86 kJ)的面积比例呈波动增加的趋势。

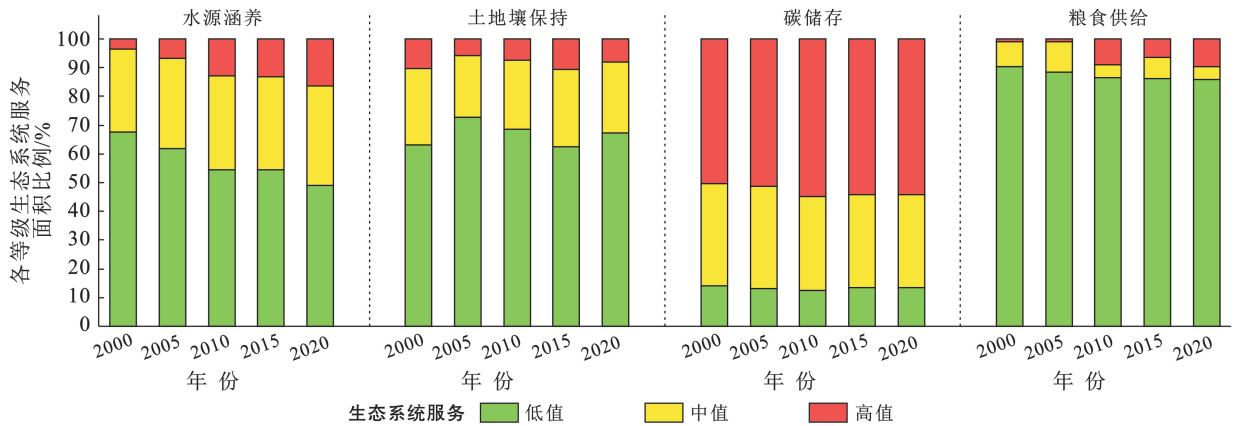


图 3 2000—2020 年武宁县各等级生态系统服务面积比值

Fig.3 Area proportion of ecosystem services at all levels at Wuning County from 2000 to 2020

3.1.2 生态系统服务的空间变化 2000—2020 年,武宁县 4 种生态系统服务空间分布格局如图 4—5 所示。水源涵养功能为东西以及中部低、南北高的空间分布格局。基于武宁县高程数据发现,高值地区主要分布在海拔较高的林地,且随着时间的增长变化趋势比较明显;低值区主要分布在中部,随时间变化微弱增长。土壤保持功能为东西以及中部低、南北高的空间分布格局,土壤保持功能不仅与植被覆盖高低有关,还与地区海拔、坡度有关系。因此,土壤保持功能的高值区主要分布在高海拔和高坡度地区,中值区和低值区主要分布在中部。从多年变化来看,土壤保持在空间上呈现增长的地方,也集中于高海拔高坡度地区。碳储存功能为南北以及中部高,东西低的空间分布格局,空间异质性显著。可以看出碳储存高值区主要分布在林地,中值区主要分布在耕地,低值区主要是水域以及建设用地,耕地上碳储存呈逐年减少的趋势。粮食供给功能则呈现西北和东南部所在乡镇高,中部区域低的空间分布格局(图 5)。

3.1.3 不同地类生态系统服务动态变化 相同土地利用类型的生态系统服务量分布有明显的差异,且同一种生态系统服务在不同土地利用类型上具有不同的特征。本研究采用 5 期土地利用数据对水源涵养、土壤保持、碳储存和粮食供给进行分区统计,并得出了不同土地利用类型上每种生态系统服务的均值。数据经过标准化处理,消除了量纲的影响,同时利用玫瑰图展示了 4 种生态系统服务在不同土地利用类型上多年变化的情况(图 6)。

耕地贡献最大的是粮食供给服务,远超其他 3 种生态系统服务。林地的水源涵养、土壤保持和碳储存 3 种服务的贡献都比较大,其中碳储存服务的贡献是最大的,水源涵养服务和土壤保持服务相近,无粮食供给服务。草地的水源涵养服务和土壤保持服务贡献明显,碳储存服务次之,无粮食供给服务。水域具

有水源涵养服务、土壤保持服务和碳储存服务,都较低且不明显。三者相较而言,水源涵养服务的贡献最高,碳储存服务最低,几乎可忽略不计。建设用地存在除粮食供给服务以外的其他 3 者生态系统服务,但贡献均较小。未利用地则只存在水源涵养服务和碳储存服务(图 6)。2000—2020 年武宁县各用地类型生态系统服务均值变化规律存在一定的差异。耕地上,土壤保持服务和粮食供给服务呈现增长趋势,水源涵养服务呈现波动增长趋势,碳储存呈现波动减弱趋势。林地上,水源涵养服务呈现先增长(2000—2015 年),后降低(2010—2015 年)的趋势,且总体上是增加的;土壤保持服务基本保持稳定;碳储存服务呈现波动减少的趋势。草地上,3 种生态系统服务都呈现波动减少的趋势,其中水源涵养服务的减少量最为明显。水域上,水源涵养服务呈微弱增长的趋势,土壤保持服务基本保持稳定,碳储存服务呈现微弱减少。建设用地上,水源涵养服务呈微弱增长,土壤保持服务呈微弱减少,碳储存服务呈现明显减弱的趋势。未利用地上,水源涵养服务呈现较大波动的增长趋势,土壤保持服务基本没有,碳储存服务则呈现减弱的趋势。水源涵养和土壤保持在不同用地类型中的贡献大小各不相同。水源涵养服务表现为:林地>草地>未利用地>耕地>建设用地>水域;土壤保持服务表现为:林地>草地>耕地>建设用地>水域>未利用地;碳储存服务表现为林地贡献最大,水域贡献最小;粮食供给服务只有耕地上存在。这些都表明在这 4 种生态系统服务中,林地和耕地是研究区域生态系统服务发展十分关键的用地。

3.2 生态系统服务间的权衡与协同关系

3.2.1 权衡与协同关系的时间变化分析 基于武宁县 2000—2020 年的生态系统服务栅格数据,构建 500 m×500 m 的渔网图,再通过 SPSS 软件对分区

统计法得到的 14 534 组大样本数据进行相关性分析,结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,粮食供给与水源涵养、土壤保持、碳储存 3 种生态系统服务间呈现显著权衡的关系($R < 0, p < 0.001$),且相关性逐年增强;水源涵养与土壤保持间呈显著协同关系($R > 0, p < 0.001$),且关系逐年增强;土壤保持与碳储存间

呈显著协同关系($R > 0, p < 0.001$),其关系比其他服务两两间更为密切;水源涵养与碳储存间呈显著协同关系($R > 0, p < 0.001$),相关性逐年增强,且增幅都大于前两者。此外,海拔对 4 种生态系统服务的影响不如坡度对 4 种生态系统服务的影响,其中土壤保持与坡度的相关性最为密切。

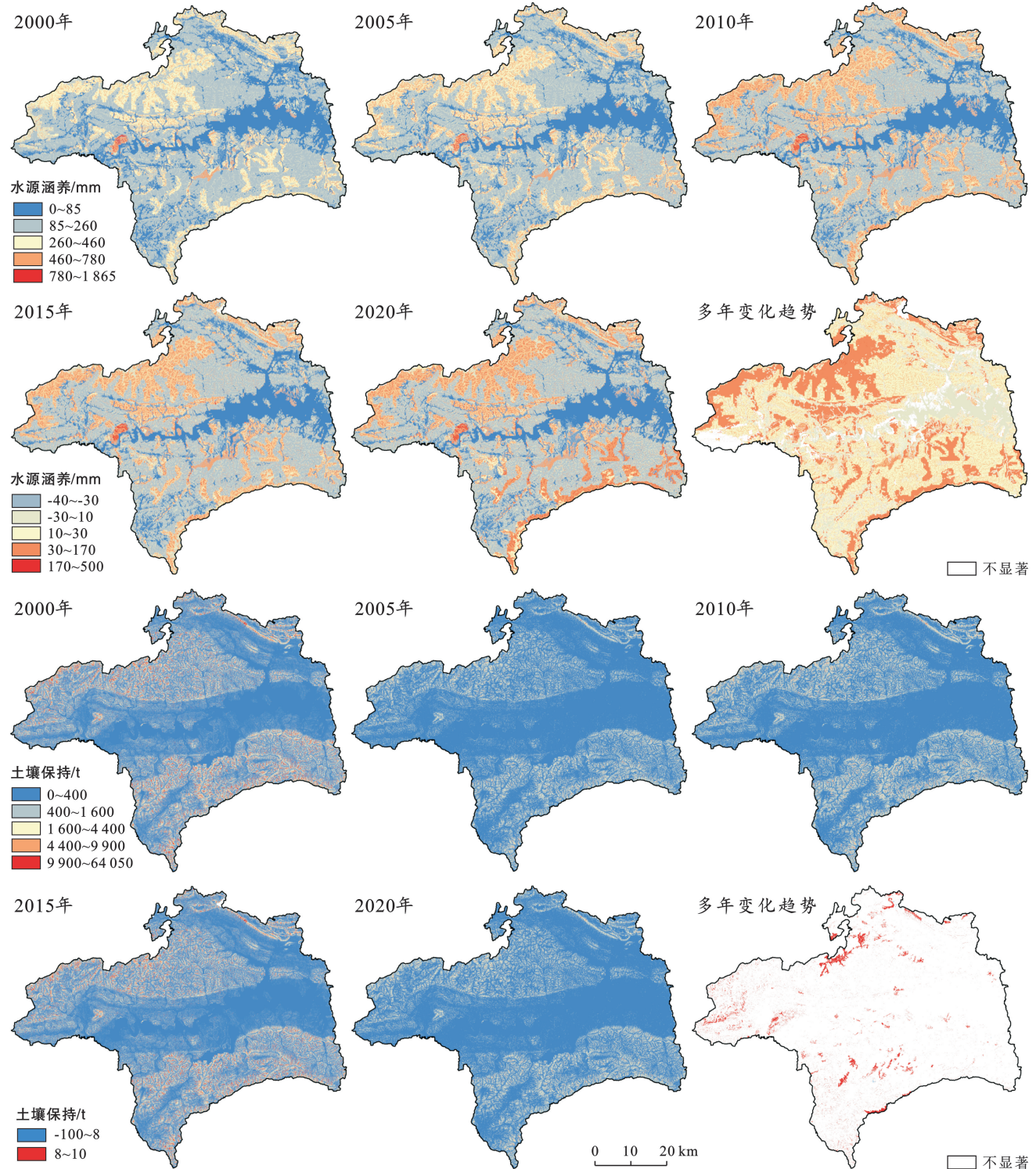


图 4 武宁县不同时期土壤涵养和土壤保持功能空间分布及多年变化趋势

Fig.4 Spatial distribution and multi-year change trend of water conservation and soil conservation function in different periods at Wuning County

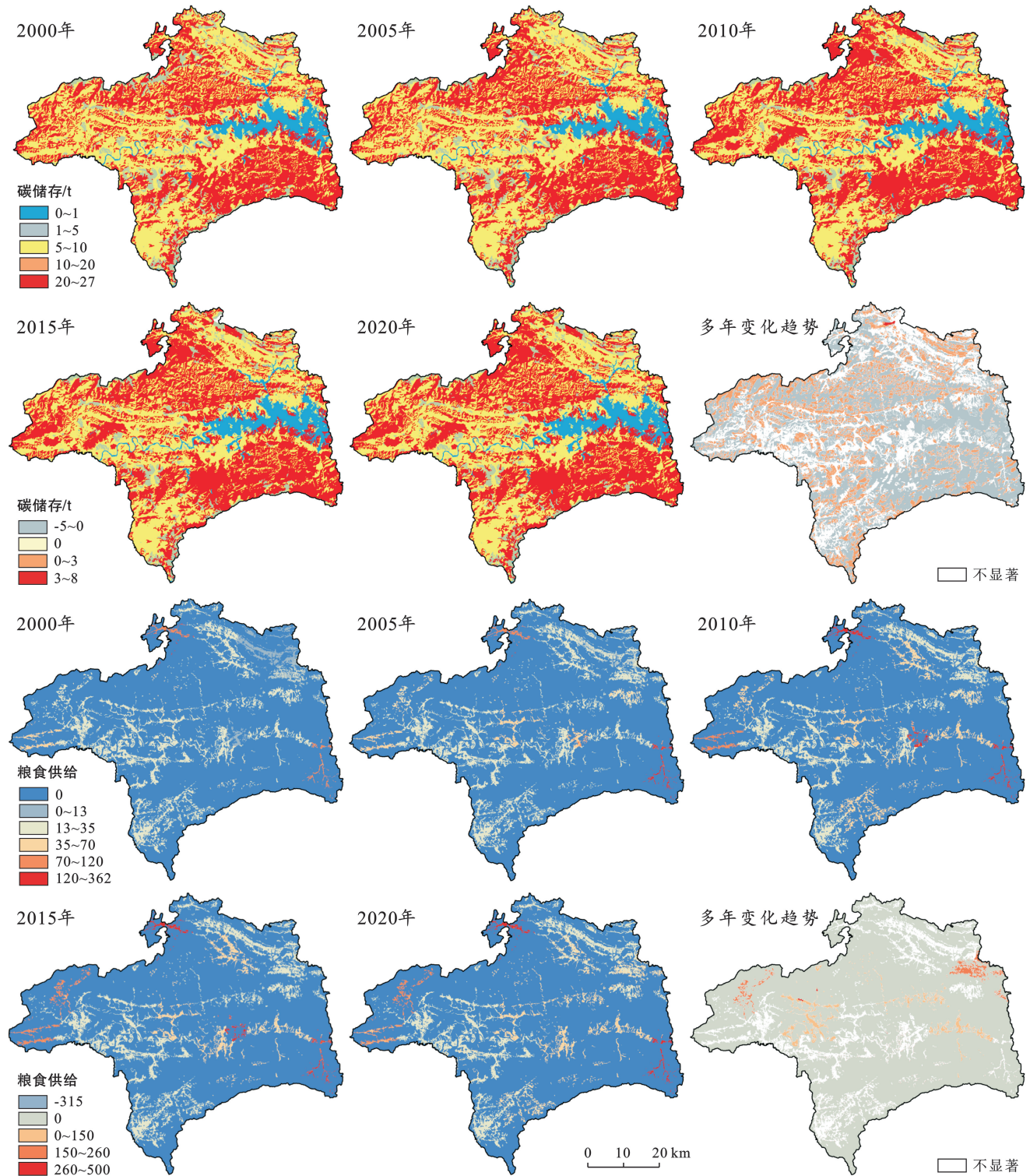


图 5 武宁县不同时期碳存储和粮食供给功能空间分布及多年变化趋势
 Fig.5 Spatial distribution and multi-year change trend of carbon storage and food supply function in different periods at Wuning County

3.2.2 权衡与协同关系的空间变化 借助 GeoDa 软件,对武宁县生态系统水源涵养、土壤保持、碳储存和粮食供给服务进行双变量空间自相关分析,其显著度均高于 95%。

在双变量空间自相关分析中,“高一高”和“低—

低”集聚均表示协同关系,而“高一低”和“低—高”集聚则表示为权衡关系。生态系统水源涵养、土壤保持、碳储存和粮食供给的权衡与协同关系具有较为明显的空间异质性(图 8),其具体表现为:①水源涵养土壤保持的 Moran's I 为 0.306,整体表现为显著协

同关系,其中“高一高”集聚类型(11.13%)的协同关系主要分布在南北部地区,“低—低”集聚类型(25.64%)的协同关系主要分布于中部地区;②水源涵养与碳储存的 Moran's I 为 0.263,整体呈协同关系,其中“高一高”集聚类型(10.39%)的协同关系主要分布在南北部地区,“低—低”集聚类型(19.02%)的协同关系主要分布在中部地区;③水源涵养与粮食供给的 Moran's I 为-0.143,整体呈微弱权衡关系,由于粮食供给仅存在于耕地上,耕地上是以“低—高”集聚类型(13.68%)的权衡关系为主;④土壤保持

与碳储存的 Moran's I 为 0.379,整体呈显著协同关系,其中“高一高”集聚(18.85%)的协同关系主要分布在南北部地区,“低—低”集聚类型(21.46%)的协同关系主要分布于中部地区;⑤土壤保持与粮食供给的 Moran's I 为-0.274,整体呈权衡关系,由于粮食供给仅存在于耕地上,同样耕地上是以“低—高”集聚类型(16.35%)的权衡关系为主;⑥碳储存与粮食供给的 Moran's I 为-0.268,整体呈权衡关系,由于粮食供给仅存在于耕地上,同样耕地上是以“低—高”集聚类型(15.45%)的权衡关系为主。

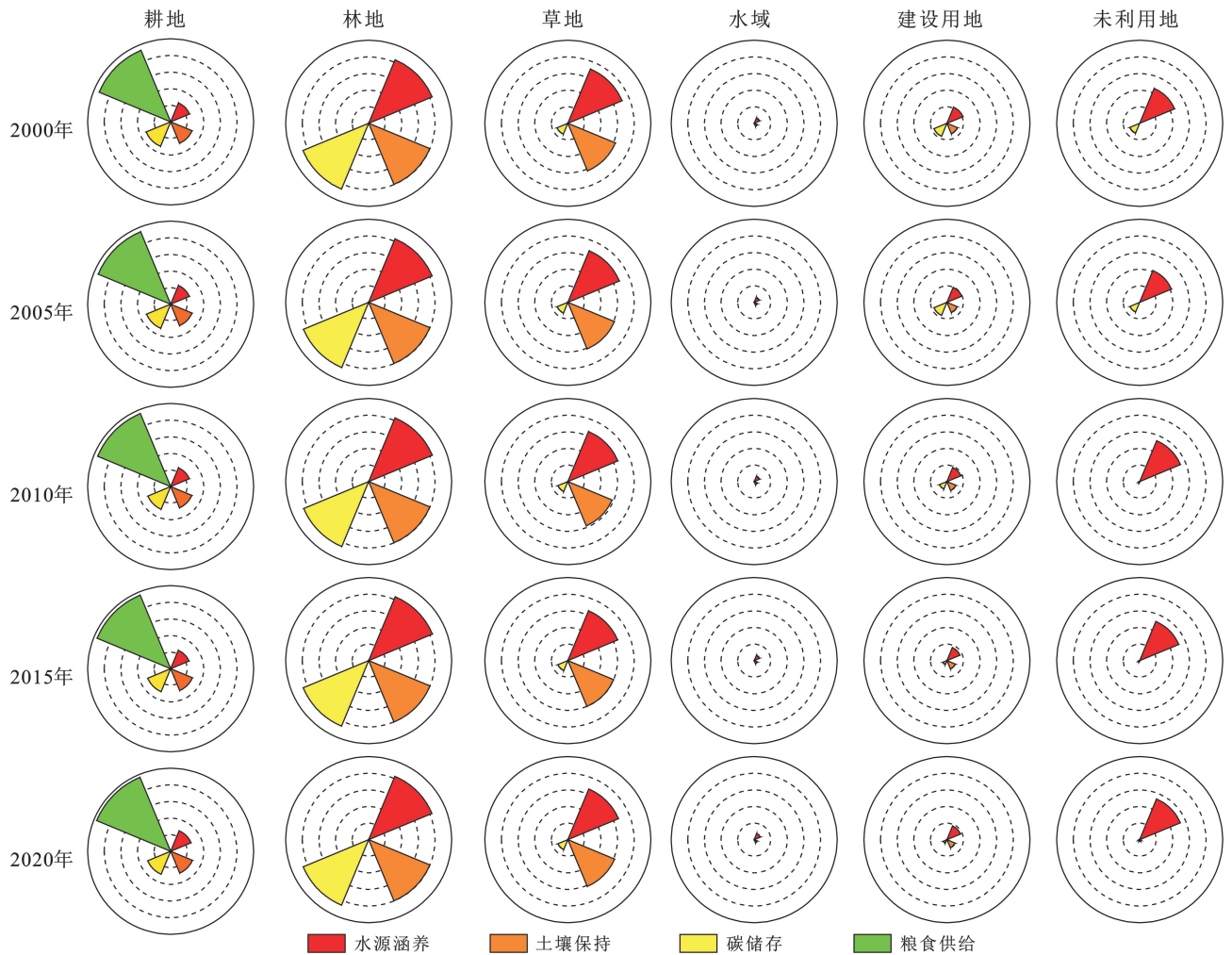


图 6 2000—2020 年武宁县不同土地利用类型生态系统服务变化

Fig.6 Changes in ecosystem services of different land use types at Wuning County from 2000 to 2020

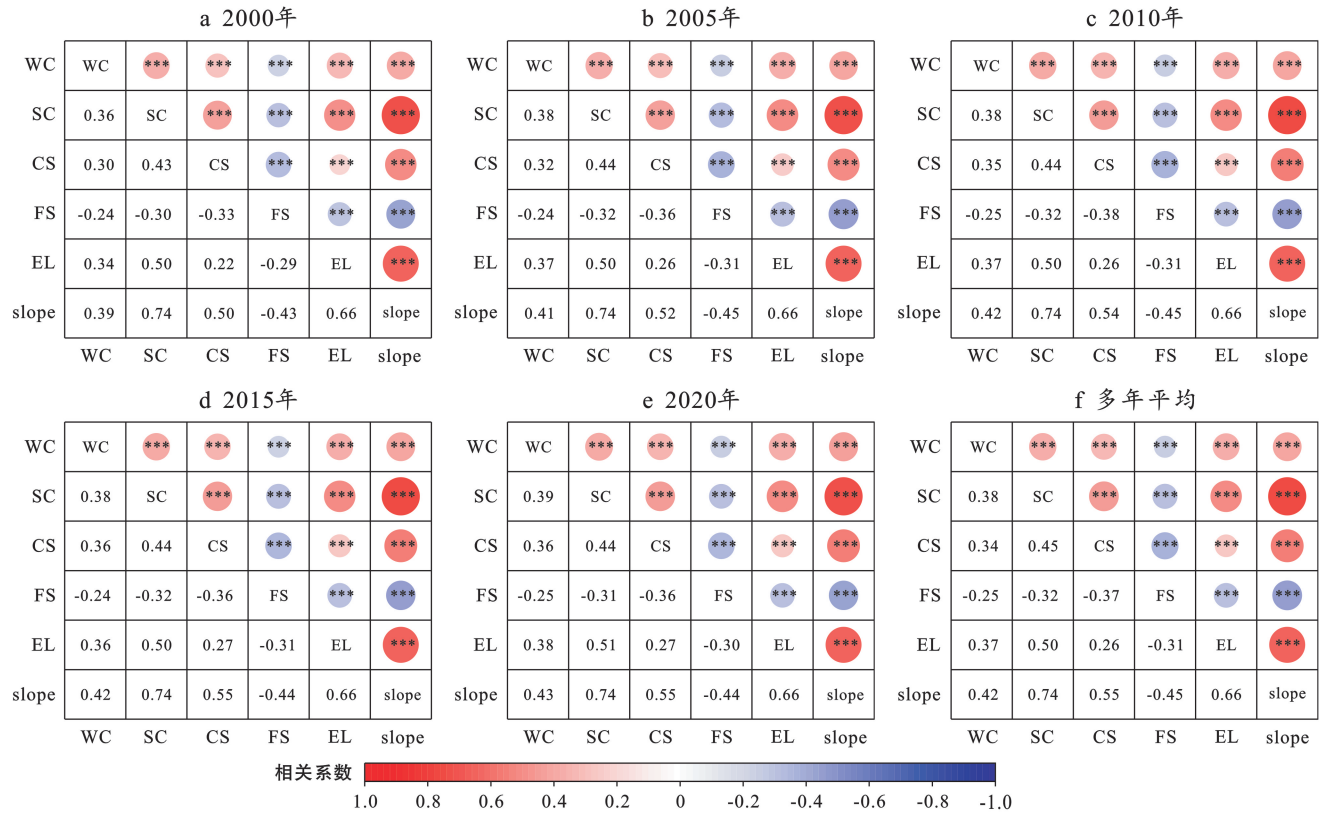
3.2.3 生态系统服务热点区识别 武宁县 2000—2020 年多种生态系统服务热点区的分布情况如图 9 所示。

由图 9 可以看出,2000—2020 年 0 类服务区面积分别占武宁县总面积的 22.14%,22.30%,20.93%,21.36%和 21.54%。武宁县 0 类服务区域面积整体呈逐渐减少的趋势。从空间分布上看,武宁县 0 类服

务主要分布于中部地区,其主要地类为水域。1 类服务区面积比例最高,基本可占据全县 40%的面积。其中 2000—2020 年,1 类服务区面积分别占武宁县总面积的 43.25%,42.77%,42.34%,42.11%和 41.93%,呈逐年减少的趋势。从空间分布上看,武宁县 1 类服务主要分布于东部和西部地区,其主要地类为低海拔的林地、草地和耕地。2 类服务区面积基本占全县面

积的 20% 以上。2000—2020 年,2 类服务区面积分别占武宁县总面积的 26.48%,26.52%,27.56%,27.49%和 27.48%,整体上呈略微增长趋势。3 类服务区面积基本占全县面积的 8% 以上。2000—2020 年,3 类服务区面积分别占武宁县总面积的 8.10%,8.41%,9.17%,9.03%和 9.05%,整体上呈略微增长

的趋势。从空间分布上看,武宁县 3 类服务主要分布于南部和北部地区,其主要地类为高海拔的林地,其中 2005 年武宁县 3 类服务区的分布更为集中。0 类和 1 类服务随时间变化呈现逐渐减少的趋势,而 2 类和 3 类服务面积呈现逐渐增加的趋势,表明武宁县的生态系统服务功能在逐渐提升。



注: * 表示在 0.05 水平上达到显著相关, ** 表示在 0.01 水平上达到非常显著相关, *** 表示在 0.001 水平上极其显著相关; WC 为水源涵养; SC 为土壤保持; CS 为碳储存; FS 为粮食供给; EL 为海拔; slope 为坡度。

图 7 2000—2020 年武宁县生态系统服务间的相关关系

Fig.7 Correlation between ecosystem services at Wuning County from 2000 to 2020

2000—2020 年,武宁县各地区主导生态系统服务热点区的空间格局如图 10 所示。由图 10 可以看出,近 20 a 来武宁县主导服务热点类型基本没有变化,但是空间格局发生了较大的变化。其中,碳储存主导服务区的面积最大且分布最广,而土壤保持主导服务的热点面积最小且接近于没有。水源涵养为主导服务热点区面积变化不大,基本维持在研究区域总面积的 8% 左右,主要分布于东北边缘地区以及西部地区。

2000—2015 年,以粮食供给为主导服务热点区主要分布于东北部和西部地区,比例均在 14%,而到 2020 年则没有以粮食供给为主导服务的热点区。2000—2020 年,以碳储存为主导服务的热点区遍布整个县域,其面积比例整体呈现增长趋势,自 2000 年的 54.70% 增长到 2020 年的 70.54%。

4 讨论

4.1 生态系统服务的规律性分析

武宁县水源涵养功能在时间变化上呈逐渐增长的趋势,这可能与武宁县自 1999 年起实施“退耕还林”“天保工程”和“禁止砍伐,封山育林”等政策有关,致使武宁县植被的覆盖率和郁闭度逐年增加。水源涵养功能在空间格局呈现东西以及中部低、南北高的分布格局,这可能是由于南北海拔高,密林遍布,植被覆盖度高;东西及中部地势相对平缓,建设用地较多,蒸散量高等因素所致。土壤保持功能在时间变化上呈先减少后增长再减少的波动趋势,这可能是因为土壤保持功能不仅与植被覆盖度的变化有关,还受降雨侵蚀力的影响。20 a 来,研究区域的植被覆盖率、郁闭度和降雨侵蚀力逐年增加,从而导致土壤保持功能发生相应变化。该研究结果与王乐志^[26]在鄱阳湖流

域开展水土保持研究结果一致。水土保持功能的空
间格局呈现东西以及中部低、南北高的分布格局,可

能是由于南北海拔高,密林遍布,植被覆盖度高,对土
壤的拦截能力强,能够减少土壤侵蚀量。

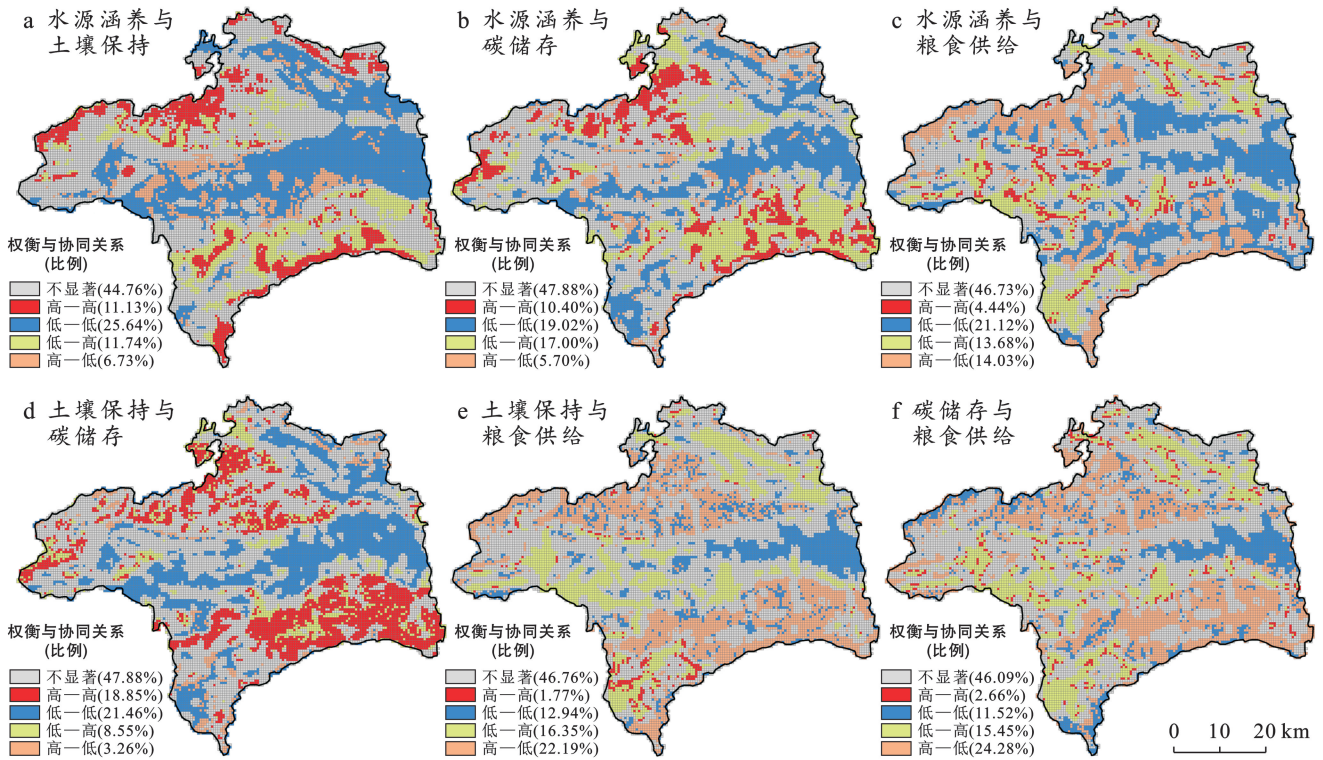
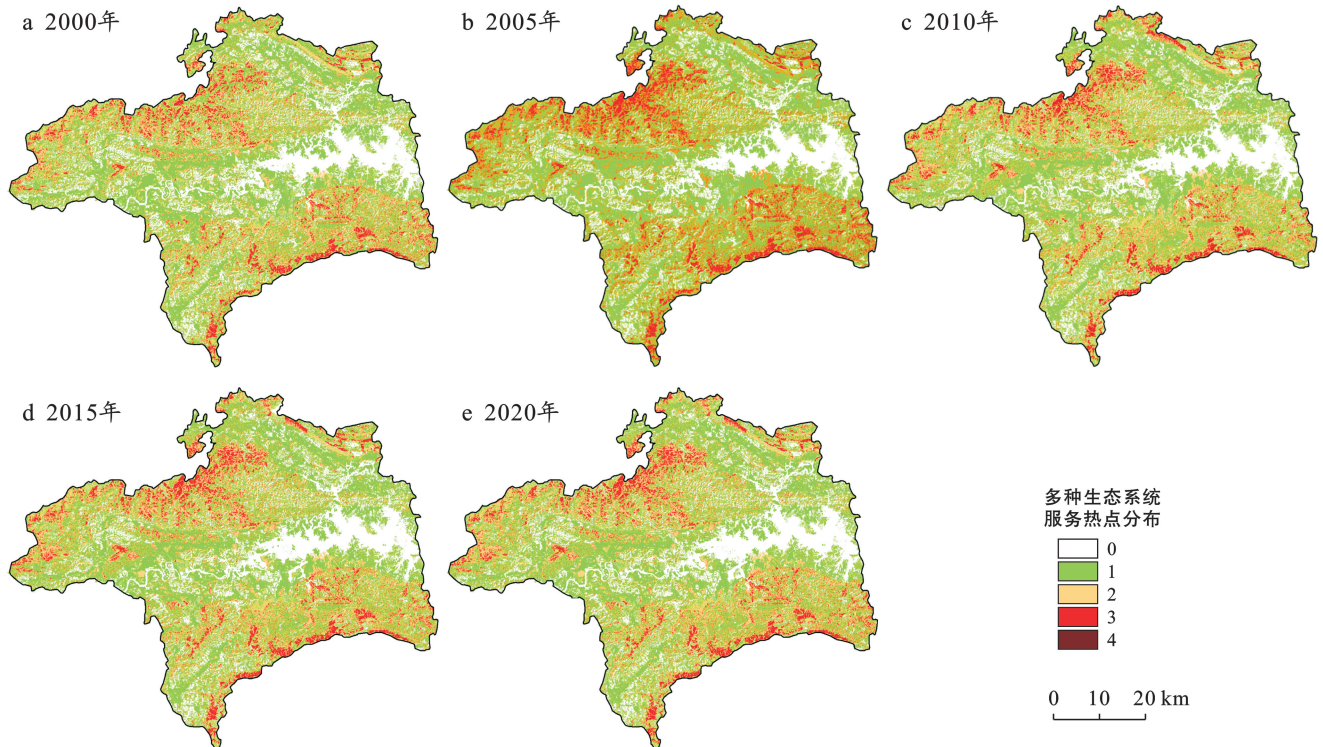


图 8 武宁县生态系统服务多年平均值的权衡与协同空间分布

Fig.8 Spatial distribution of trade-offs and synergies of multi-year average values of ecosystem services at Wuning County



注:0类、1类、2类、3类和4类热点区分别指该地区存在0种、1种、2种、3种和4种生态系统服务值超过各自当年平均值的情况。

图 9 2000—2020 年武宁县多种生态系统服务热点区

Fig.9 Hot spots of multiple ecosystem services at Wuning County from 2000 to 2020

由武宁县各地区主导生态系统服务热点区空间格局可知(图 10),碳储存功能呈现南北以及中部高,东西低的空间的分布格局,这主要可能是海拔高的区域密林遍布,植被覆盖度高;而中部地势相对平缓,建设用地以及水域较多,从而造成植被覆盖度低。

碳储存功能在时间变化上呈略微增加的趋势,可能是因为武宁县近些年围绕“生态立县,绿色崛起”的发展道路,生态环境不断改善,植被覆盖度和长势不断提高。因此,近 20 a 来,武宁县土壤保持功能虽有所下降,而碳储存功能有所增长。

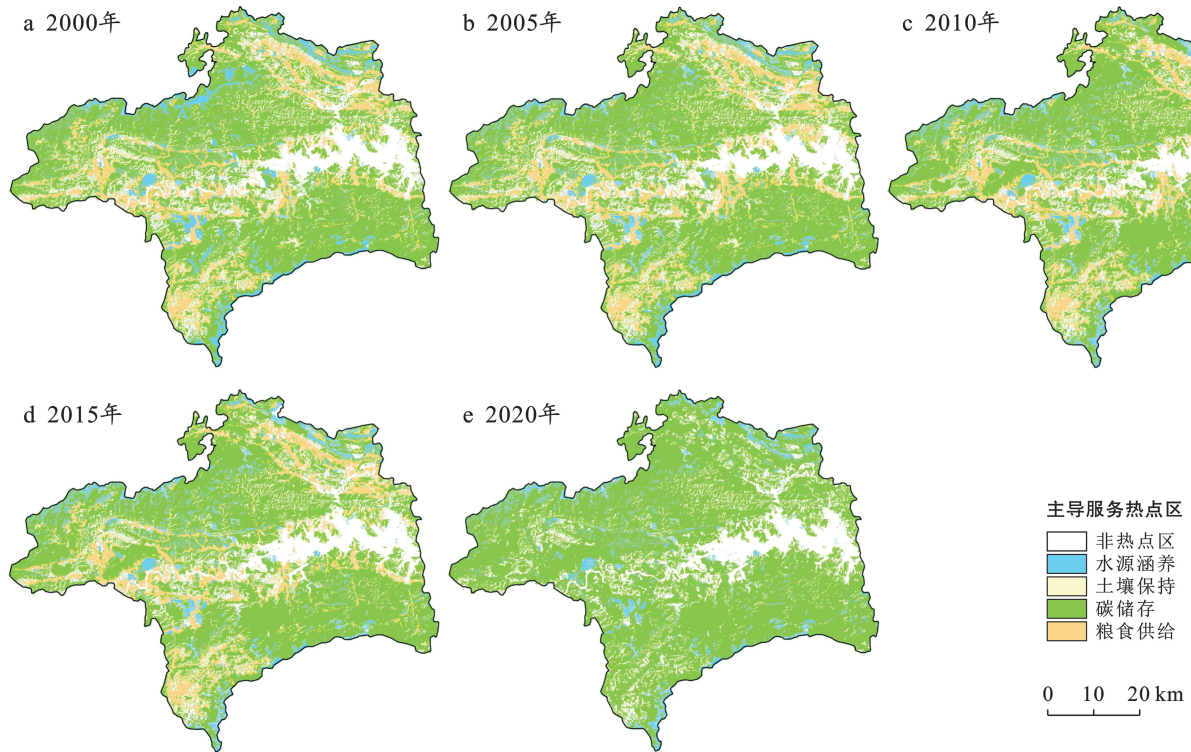


图 10 2000—2020 年武宁县主导生态系统服务热点区

Fig.10 Leading ecosystem service hotspots at Wuning County from 2000 to 2020

4.2 评估结果的不确定性

(1) 粮食供给和水源涵养、土壤保持、碳储存之间存在权衡关系。此结果与温玉玲等^[27]在分析江西省鄱阳湖流域结果一致,表明供给服务和调节服务是呈权衡关系,提高供给服务的过程会引起调节服务的减弱。土壤保持和碳储存呈协同关系,林地植被覆盖度和生物多样性较高,有拦截雨水和保护坡地等作用,使得土壤保持功能较高。方露露等^[28]在对长江流域的研究中也有相同的结论。然而 Benis 等^[29]在南非的研究表明土壤保持和碳储存间为权衡关系,可能是因为该区域地处温带,与武宁县在气候特征及植被类型等方面有所差异,从而导致结果的不一致。水源涵养、土壤保持和碳储存之间的协同关系与 Deng Chuxiong 等^[30]在湘江流域探究的生态系统服务权衡研究其结果一致,表明在鄱阳湖流域的研究区与相邻湘江流域的 3 种生态系统服务在时间上都是呈现协同关系。

(2) 本研究在测算生态系统服务间的权衡与协

同关系时,发现各生态系统服务间的相关系数较低。与其他学者的研究相比,我们发现相似的现象。例如,钱彩云等^[12]研究甘肃省白龙江流域多种生态系统服务间的相关系数在 0.019~0.621。潘竟虎等^[31]研究黄河流域 5 种生态系统服务间的相关系数在 0.062~0.516。李鸿健等^[32]研究银川盆地 4 种生态系统服务间的相关系数在 0.04~0.23。因此,今后的研究重点是探索一种相对科学而全面的测定方法和模型,更加全面地考虑各种生态系统服务的相互作用,从而准确反映它们之间的耦合关系。

(3) 由于武宁县水域面积达 280 km²,占全县总面积的 8.18%。因此,武宁县水质净化及洪水调蓄的功能亦不容小觑。然而,限于水质、水量数据的可获取性,导致本研究未考虑水质净化和洪水调蓄功能的评估。因此,构建完善的生态系统服务评估体系,应是今后研究的重点方向。

(4) 以往区域尺度土壤保持评估的相关研究,其栅格数据多为 1 km 分辨率^[33-34],而小尺度研究多数

采取 30 m 分辨率^[35-36]。本研究中所使用 DEM 数据的空间分辨率为 30 m,与前人开展县域尺度研究一致。因此,土壤保持评估结果较为可信。

(5) 具有植被覆盖的陆地生态系统,其碳汇功能远大于河渠、湖泊、水库等水域^[23]。一方面,水域碳汇能力相对较小;另一方面,其碳源/碳汇机制较为复杂,目前争议较大^[37]。为此,本研究所布设的野外采样是针对陆地生态系统开展碳密度参数的本地化,而河渠、湖泊、水库等水域的碳密度并未测定。因此,本研究的碳储存评估结果虽有一定误差,但总体精度可以得到保障。此外,本文关于耕地的碳储量计算,并未考虑因化肥农药施用、机械翻耕、秸秆焚烧而造成的碳排放过程,故而在本研究中耕地碳储量高于草地碳储量。

4.3 县域尺度生态系统服务的精细刻画

县域是中国生态系统治理和维护的基本单位。以往的研究很难精细刻画县域尺度生态系统服务的时空格局。在量化县域生态系统服务的方法方面,由于数据收集难度的限制,通常很难获得村级以下农作物播种面积的完整数据,这就导致了难以反映更小区域空间分布的差异。尤其在农村地区,由于农户数量众多,农作物种植方式不同等原因,数据的不完整性和不准确性更加突出。针对这一问题,本研究不仅掌握了乡镇实际数据,还通过实地调研收集的方式补充了一些村独有的特色农产业数据。通过使用 ArcGIS 软件,将各乡镇统计并折算后的粮食供给数据连接于对应区域的耕地栅格上,本研究得到了更为详细的粮食供给数据,相对于以往研究,更能体现小区域内部的空间异质性。

气候变化是全球性的重要环境问题,一直以来备受各国政府和国际科学组织的高度关注。森林、草地和湿地等陆地生态系统能够释放和吸收 CO₂ 等温室气体,因此碳储存功能在决定区域碳循环和调节区域气候方面发挥着重要作用。碳储存是生态系统服务的重要组成部分,精确评估碳储存显得尤为关键。查阅前人对碳储存量的研究发现,不同林分结构的碳密度存在显著差异。如丛文翠等^[38]在研究山东省日照市的碳储存量时,其林地的地上碳密度为 2.45 t/hm²,而张凯琪等^[39]在研究桂林市的碳储存量时,其林地的地上碳密度达 105 t/hm²。但目前对碳储存的研究多集中于大区域尺度,且其碳密度数据大都来自 InVEST 模型默认值或是参考其他学者的现有成果,其结果难以体现碳储存的空间异质性和区域代表性。因此,鉴于碳密度参数的重要性及强空间异质性,本研究通过大样本实测数据对其参数本地化,以

构建武宁县精确的碳库数据。此外,将构建好的碳库数据(表 1)与其他学者在周边地区的参数进行比对,发现其在数值上亦较为契合,无明显偏差^[21-23]。因此,本研究所获取的实测本地化碳库数据可信度较高,由此计算的碳储存量是更为精准可靠的。综上所述,本研究不仅采用了更细化的物质产品供给栅格数据,还通过大量样本实测碳库数据提升了碳储存这一关键参数的精度,从而精细刻画了 2000 年以来县域尺度生态系统服务的时空格局。

5 结论

(1) 2000—2020 年,武宁县单位栅格年平均水源涵养量从 173.14 mm 提升至 283.92 mm,单位栅格年平均粮食供给量从 3.52 kJ 提升至 5.34 kJ,两者均呈现增长趋势;土壤保持功能呈先减少后增长再减少的波动趋势,20 a 间下降了 15.71%;碳储存功能呈现微弱增长的趋势。空间上,水源涵养功能是以东西以及中部低、南北高的空间分布格局;土壤保持功能呈东西以及中部低,南北高的空间分布格局;碳储存功能呈南北以及中部高,东西低的空间分布格局;粮食供给功能呈西北和东南部高、中部低的空间分布格局。

(2) 生态系统服务高低值区与土地利用类型有着密切关系。研究区南北部林地分布广泛,植被覆盖度高,是水源涵养、土壤保持和碳储存的高值区。水域、建设用地及未利用地植被覆盖小,是水源涵养、土壤保持和碳储存的低值区。不同用地类型中在各生态系统服务贡献大小不同,粮食供给服务只存在于耕地上。在这 4 种生态系统服务中,林地和耕地是武宁县生态系统服务功能发展的关键用地。

(3) 2000—2020 年,武宁县水源涵养、土壤保持和碳储存 3 者之间是协同关系,且呈现逐渐增强的趋势。其中土壤保持和碳储存的协同度最高,增长最快的是水源涵养与碳储存的相互关系,粮食供给与其他 3 种调节服务之间是权衡关系,且其关系都是逐年增长的趋势,其中关系最为密切的是粮食供给和碳储存,关系最不密切的是粮食供给与水源涵养。“高一高”和“低—低”集聚的协同关系主要分布在高海拔的林地及水域,“高一低”和“低—高”集聚的权衡关系主要分布在耕地。

(4) 2000—2020 年,武宁县主要以 1 类生态系统服务为主,其面积比例达到 40% 以上。其次是 2 类服务,面积达到 26% 以上。0 类服务面积在这 20 a 间占 20%~23%。0 类和 1 类服务随着时间的变化呈现逐渐减少的趋势,而 2 类和 3 类服务的面积则逐渐增加,表明武宁县的生态系统服务功能在逐渐提升。武

宁县近 20 a 来主导生态服务热点类型基本没有变化,但空间格局有较大变化。其中以碳储存为主导服务的热点区遍布整个县域,其面积比例整体上呈现增长的趋势,而土壤保持主导服务的热点面积最小。

县域不仅是生态环境治理的主要战场,而且对中国的碳中和具有独特的功能和贡献,是实现“两山”理论,碳达峰碳中和目标的主要推动力量。通常情况下,生态型县域拥有丰富的林地资源且产业规模较小,一方面碳汇功能较强,另一方面碳排放量也相对较低。因此,武宁县未来的生态保护应重点关注林地质量,以实现林地质量与数量的双向提高。此外,武宁县应将生态调节服务类的产品转化为经济价值,从而实现资源价值最大化转化。

参考文献 (References)

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(6630):253-260.
- [2] Leemans H B J, Groot, R S. *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment (Millennium Ecosystem Assessment)* [M]. Washington, D C: Island Press, 2005.
- [3] Rolo V, Roces-Diaz J V, Torralba M, et al. Mixtures of forest and agroforestry alleviate trade-offs between ecosystem services in European rural landscapes [J]. *Ecosystem Services*, 2021, 50, 101318.
- [4] 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[J].*生态学报*, 2021, 41(20):8003-8015.
Zhang Wenjing, Sun Xiaoyin, Zhou Jun. Spatio-temporal dynamics of tradeoffs between crucial ecosystem services in Nansihu Lake basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20):8003-8015.
- [5] 杨晓楠,李晶,秦克玉,等.关中一天水经济区生态系统服务的权衡关系[J].*地理学报*, 2015, 70(11):1762-1773.
Yang Xiaonan, Ling Jing, Qin Keyu, et al. Trade-offs between ecosystem services in Guanzhong-Tianshui Economic Region [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11):1762-1773.
- [6] 林媚珍,刘汉仪,周汝波,等.多情景模拟下粤港澳大湾区生态系统服务评估与权衡研究[J].*地理研究*, 2021, 40(9):2657-2669.
Lin Meizhen, Liu Hanyi, Zhou Rubo, et al. Evaluation and trade-offs of ecosystem services in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under multi-scenario simulation [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(9):2657-2669.
- [7] 赵文楨,韩增林,闫晓露,等.基于生态系统服务多情景权衡的生态安全格局构建:以大连市瓦房店为例[J].*自然资源学报*, 2020, 35(3):546-562.
- Zhao Wenzhen, Han Zenglin, Yan Xiaolu, et al. Ecological security pattern construction based on multi-scenario trade-off of ecosystem services: A case study of Wafangdian, Dalian [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3):546-562.
- [8] 潘竟虎,李真.干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J].*农业工程学报*, 2017, 33(17):280-289.
Pan Jinghu, Li Zhen. Analysis on trade-offs and synergies of ecosystem services in arid inland river basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(17):280-289.
- [9] 邵主恩,赵西宁,高晓东,等.基于 STICS 模型的黄土高原苹果园生态系统服务评估[J].*生态学报*, 2021, 41(6):2212-2224.
Shao Zhuen, Zhao Xining, Gao Xiaodong, et al. Assessing ecosystem services in apple orchard in the Loess Plateau based on STICS model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(6):2212-2224.
- [10] 仲俊涛,王蓓,米文宝,等.农牧交错带禁牧草地生态系统服务空间权衡与协同关系[J].*农业工程学报*, 2020, 36(12):268-275.
Zhong Juntao, Wang Bei, Mi Wenbao, et al. Spatial trade-offs and synergies of ecosystem services for grazing-prohibited grassland in agro-pasture ecotone [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(12):268-275.
- [11] 郑德凤,万巨影,白丽娜,等.燕山—太行山区生态系统服务价值权衡/协同关系的多尺度分析[J].*生态与环境学报*, 2022, 38(4):409-417.
Zheng Defeng, Wan Juying, Bai Lina, et al. Multi-scale analysis of ecosystem service trade-offs/synergies in Yanshan-Taihang Mountains Area [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(4):409-417.
- [12] 钱彩云,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].*地理学报*, 2018, 73(5):868-879.
Qian Caiyun, Gong Jie, Zhang Jingxi, et al. Change and tradeoffs-synergies analysis on watershed ecosystem services: A case study of Bailongjiang Watershed, Gansu [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5):868-879.
- [13] 耿甜伟,陈海,张行,等.基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J].*自然资源学报*, 2020, 35(7):1714-1727.
Geng Tianwei, Chen Hai, Zhang Hang, et al. Spatio-temporal evolution of land ecosystem service value and its influencing factors in Shaanxi Province based on GWR [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(7):1714-1727.

- [14] 孙艺杰,任志远,郝梦雅,等.黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素:以延安市为例[J].生态学报,2019,39(10):3443-3454.
Sun Yijie, Ren Zhiyuan, Hao Mengya, et al. Spatial and temporal changes in the synergy and trade-off between ecosystem services, and its influencing factors in Yanan, Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(10):3443-3454.
- [15] 周佳宁,秦富仓,邹伟,等.华北农牧交错区 LUCC 对生态系统服务及生态环境质量的影响:以内蒙古自治区多伦县为例[J].水土保持通报,2019,39(4):249-255.
Zhou Jianing, Qin Fucang, Zou Wei, et al. Response of land use/cover change to ecosystem services and ecological environment quality in agro-pastoral transitional zone of northern China: Taking Duolun County of Inner Mongolia Autonomous Region as a case study [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019,39(4):249-255.
- [16] 张悦,张艳,史飞航,等.基于不同模型的黄河中游降雨侵蚀力时空变化分析[J].水土保持通报,2023,43(2):220-229,238.
Zhang Yue, Zhang Yan, Shi Feihang, et al. Temporal and spatial variation of rainfall erosivity in middle reaches of Yellow River based on different models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(2):220-229,238.
- [17] 陈竹安,刘子强,危小建,等.2000—2019 年鄱阳湖生态经济区水源涵养时空变化[J].测绘通报,2022(8):1-6.
Chen Zhu'an, Liu Ziqiang, Wei Xiaojian, et al. Spatio-temporal changes of water conservation in Poyang Lake Ecological Economic Zone from 2000 to 2019 [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(8):1-6.
- [18] 刘小梅,李勇,黄智刚,等.基于 RUSLE 的蔗区小流域土壤侵蚀特征研究[J].水土保持通报,2022,42(3):82-88,397.
Liu Xiaomei, Li Yong, Huang Zhigang, et al. Soil erosion characteristics of sugarcane-growing watershed based on RUSLE [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(3):82-88,397.
- [19] 宁婷,郭新亚,荣月静,等.基于 RUSLE 模型的山西省生态系统土壤保持功能重要性评估[J].水土保持通报,2019,39(6):205-210.
Ning Ting, Guo Xinya, Song Yuejing, et al. Evaluation of soil conservation function importance of ecosystems in Shanxi Province based on RUSLE model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019,39(6):205-210.
- [20] 邓元杰,姚顺波,侯孟阳,等.退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响:以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例[J].自然资源学报,2020,35(4):826-844.
Deng Yuanjie, Yao Shunbo, Hou Mengyang, et al. Assessing the effects of the Green for Grain Program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models: A case study of Zichang County in hilly and gully region of Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020,35(4):826-844.
- [21] 刘丹丹.基于 InVEST 模型江西省土地利用变化的生态效应研究[D].江西 南昌:江西师范大学,2021.
Liu Dandan. Research on Ecological Effects of Land Use Change in Jiangxi Province Based on InVEST Model [D]. Jiangxi Nanchang: Jiangxi Normal University, 2021.
- [22] 李姣,汪杰,李朗,等.洞庭湖生态经济区土地利用变化对碳储量的影响[J].生态学杂志,2022,41(6):1156-1165.
Li Jiao, Wang Jie, Li Lang, et al. Impact of land use change on carbon storage in the Dongting Lake Ecological Economic Zone [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022,41(6):1156-1165.
- [23] 李鑫,欧阳勋志,刘琪璟.江西省 2001—2005 年森林植被碳储量及区域分布特征[J].自然资源学报,2011,26(4):655-665.
Li Xin, Ouyang Xunzhi, Liu Qijing. Carbon storage of forest vegetation and its geographical pattern in China's Jiangxi Province during 2001—2005 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011,26(4):655-665.
- [24] 张晗,欧阳真程,赵小敏.不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J].环境科学学报,2019,39(3):939-951.
Zhang Han, Ouyang Zhencheng, Zhao Xiaomin. Effects of different land use types on ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in farmland soils in Jiangxi Province, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019,39(3):939-951.
- [25] 武文欢,彭建,刘焱序,等.鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J].地理科学进展,2017,36(12):1571-1581.
Wu Wenhuan, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos City [J]. *Progress in Geography*, 2017,36(12):1571-1581.
- [26] 王乐志.基于 InVEST 模型的鄱阳湖流域土壤保持和生境质量变化研究[D].江西 南昌:南昌大学,2022.
Wang Lezhi. Research on soil conservation and habitat quality changes in Poyang Lake basin based on InVEST Model [D]. Nanchang, Jiangxi: Nanchang University, 2022.
- [27] 温玉玲,张小林,魏佳豪,等.鄱阳湖环湖区生态系统服务价值时空变化及权衡协同关系[J].地理科学,2022,42(7):1229-1238.

- Wen Yuling, Zhang Xiaolin, Wei Jiahao, et al. Temporal and spatial variation of ecosystem service value and its tradeoffs and synergies in the peripheral region of the Poyang Lake [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(7): 1229-1238.
- [28] 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.
- Fang Lulu, Xu Dehua, Wang Lunche, et al. The study of ecosystem services and the comparison of trade-off and synergy in Yangtze River Basin and Yellow River Basin [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(3): 821-838.
- [29] Eyoh B, Reyers B, Rouget M, et al. Spatial congruence between biodiversity and ecosystem services in South Africa [J]. *Biological Conservation*, 2009, 142(3): 553-562.
- [30] Deng Chuxiong, Liu Junyu, Nie Xiaodong, et al. How trade-offs between ecological construction and urbanization expansion affect ecosystem services [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107253.
- [31] 潘竟虎, 李磊. 利用 OWA 和电路模型优化黄河流域甘肃段生态安全格局[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(3): 259-268.
- Pan Jinghu, Li Lei. Optimization of ecological security pattern in Gansu section of the Yellow River Basin using OWA and circuit model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(3): 259-268.
- [32] 李鸿健, 任志远, 刘焱序, 等. 西北河谷盆地生态系统服务的权衡与协同分析: 以银川盆地为例[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1731-1738.
- Li Hongjian, Ren Zhiyuan, Liu Yixu, et al. Tradeoffs-synergies analysis among ecosystem services in Northwestern Valley Basin: Taking Yinchuan Basin as an example [J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(6): 1731-1738.
- [33] 钟绍卓, 孙浩源. 不同情景下祁连山国家级自然保护区生态系统服务时空变化及权衡与协同关系[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 358-369.
- Zhong Shaozhuo, Sun Haoyuan. Assessment on spatio-temporal variation and synergies/tradeoffs relationships of ecosystem services in Qilian Mountain National Nature Reserve under different scenarios [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 358-369.
- [34] 牛丽楠, 邵全琴, 宁佳, 等. 西部地区生态状况变化及生态系统服务权衡与协同[J]. *地理学报*, 2022, 77(1): 182-195.
- Niu Linan, Shao Quanqin, Ning Jia, et al. Ecological changes and the tradeoff and synergy of ecosystem services in Western China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 182-195.
- [35] 宁静, 石东伟, 周思宇, 等. 宾县生态系统服务时空格局及权衡协同关系[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 293-300.
- Ning Jing, Shi Dongwei, Zhou Siyu, et al. Spatial and temporal patterns of ecosystem services and trade-off synergistic relationships in Bin County, Heilongjiang Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 293-300.
- [36] 张锦琳, 游巍斌, 蔡新瑜, 等. 武夷山小流域生态系统服务(簇)权衡/协同及对地形起伏度的响应[J]. *生态学报*, 2023, 43(12): 4892-4903.
- Zhang Jinlin, You Weibin, Cai Xinyu, et al. Trade-offs and synergies among ecosystem service Bundles in response to relief degree of land surface in a small watershed of Mount Wuyi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 4892-4903.
- [37] 姚程, 王谦, 姜霞, 等. 湖泊生态系统碳汇特征及其潜在碳中和价值研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(3): 893-909.
- Yao Cheng, Wang Qian, Jiang Xia, et al. Review of lake ecosystem's characteristics of carbon sink and potential value on carbon neutrality [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3): 893-909.
- [38] 丛文翠, 孙小银. 基于 GIS 和 InVEST 模型的日照市固碳能力研究[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 200-205.
- Cong Wencui, Sun Xiaoyin. A study on carbon sequestration capacity based on GIS and InVEST model in Rizhao City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5): 200-205.
- [39] 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 等. 耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2799-2809.
- Zhang Kaiqi, Chen Jianjun, Hou Jiankun, et al. Study on sustainable development of carbon storage in Guilin coupled with InVEST and GeoSOS-FLUS model [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6): 2799-2809.