

云贵高原岩溶区生态系统服务功能 重要性空间分异研究

肖玖军^{1,2}, 吴凯³, 张蓝月^{1,2}, 李可相^{1,2}, 陈阳^{1,2}, 谢刚^{1,2}

(1.贵州科学院山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001; 2.贵州省土地绿色整治
工程研究中心, 贵州 贵阳 550001; 3.贵州省黔西南州自然资源局, 贵州 兴义 562400)

摘要: [目的] 探索云贵高原岩溶区生态系统服务功能重要性的空间分异规律, 为保障岩溶区生态系统有效管理和生态安全格局构建提供科学参考。[方法] 借助地理信息技术测算 2019 年黔西南州水源涵养、水土保持和生物多样性维护三项生态系统服务功能, 分析其空间格局, 在此基础上用空间自相关揭示黔西南州生态系统服务重要性的空间异质性规律。[结果] ①黔西南州生态水平整体较好, 生态系统服务功能较高重要性的国土比例大, 为区域提供了较好的生态服务, 其中水源涵养功能和生物多样性维护功能的重要以上面积比例比水土保持功能突出。②以村为单位, 单项功能和总体功能的各级重要全局 Moran's I 指数均在 0.65 以上, 空间分布呈现较高的空间聚集特性, 表现出条带或区块分布, 具体各功能的不同等级重要性又表现出差异性。③生物多样性维护功能分别与水源涵养功能、水土保持功能的空间自相关聚类结果存在相似性。④生态系统服务功能重要性与水土流失和石漠化存在耦合性, 空间分异特征受水热条件、地质背景、人为等因素综合作用。[结论] 研究区生态系统服务功能供给能力较好, 同时表现出较强的空间集聚性和异质性。在生态系统管理和生态治理政策制定时, 应当考虑生态系统服务功能空间分异特征, 科学划定分区, 实现分区管理。

关键词: 生态系统服务; 岩溶; 空间分异; 生物多样性维护; 水源涵养; 水土保持; 云贵高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0332-11

中图分类号: X171.1

文献参数: 肖玖军, 吴凯, 张蓝月, 等. 云贵高原岩溶区生态系统服务功能重要性空间分异研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 332-342. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20221028.001; Xiao Jiujun, Wu Kai, Zhang Lanyue, et al. Spatial differentiation of importance of ecosystem services in karst area of Yunnan-Guizhou Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 332-342.

Spatial Differentiation of Importance of Ecosystem Services in Karst Area of Yunnan-Guizhou Plateau

Xiao Jiujun^{1,2}, Wu Kai³, Zhang Lanyue^{1,2}, Li Kexiang^{1,2}, Chen Yang^{1,2}, Xie Gang^{1,2}

(1. Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang,

Guizhou 550001, China; 2. Guizhou Research Center for Land Green Remediation Engineering,

Guiyang, Guizhou 550001, China; 3. Natural Resources of Qianxinan Prefecture, Xingyi, Guizhou 562400, China)

Abstract: [Objective] The spatial variation pattern of ecosystem service importance in karst area of the Yunnan-Guizhou Plateau was examined to provide statistical support for effective management of the ecosystem and maintenance of an ecologically safe pattern in the area. [Methods] The values of three ecosystem services (water conservation, soil and water conservation, and biodiversity conservation) within Qianxinan Prefecture in 2019 were calculated using geographic information technology, and the spatial variation pattern was identified. Spatial heterogeneity of the ecosystem service importance in the region was pinpointed by spatial

收稿日期: 2022-03-21

修回日期: 2022-05-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“石漠化地区 AM 真菌促进桑树根系摄取土壤氮的调控机制”(32060377); 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2021]一般 496 号); 贵州省林业科研课题(黔林科合[2017]08 号); 贵州省科技成果应用及产业化计划项目(黔科合成果[2021]一般 130 号); 贵州省基础研究计划项目(黔科合基础-ZK[2021]一般 100 号); 贵州科学院资助项目(黔科院人才[2019]07 号); 贵州省发展和改革委员会项目(黔发改投资[2019]886 号); 贵阳国家高新区科技计划项目(GXYF-2017-003; GXYF-2018-003)

第一作者: 肖玖军(1983—), 男(汉族), 四川省营山县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事土地规划与信息技术等方面研究。Email: xiaojiujun0504@163.com。

通讯作者: 吴凯(1983—), 男(汉族), 贵州省金沙县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事自然资源利用方面研究。Email: 634638587@qq.com。

autocorrelation analysis. [Results] ① The overall ecological health of Qianxinan Prefecture was good. There was a large proportion of land with high ecosystem service importance, providing good ecological services for the region. The proportion of land providing water conservation function and biodiversity conservation function were larger than the proportion of land providing soil and water conservation function. ② Taking the village as a unit of measurement, the Moran's I index was significantly high (0.65) in valuing the three ecosystem services both individually and aggregately. The study revealed that the research region featured strong spatial clustering with either "strip-shaped" or "block-shaped" ecosystem service clusters, and the functions and values of each cluster differed. ③ Spatial autocorrelation and clustering analyses of biodiversity conservation, water conservation, and soil and water conservation showed similar results. ④ Ecosystem service importance was coupled with soil and water erosion and rocky desertification. Hydrothermal conditions, geological processes, human impacts, and other factors contributed to such spatial variation. [Conclusion] The researched region possesses strong ecosystem service supply capacity with strong spatial clustering and heterogeneity. Such features should be considered in adopting ecosystem management and governance policies. The region should be subcategorized based on the spatial variation patterns of its ecosystem service values, and governed with tailored policies.

Keywords: ecosystem services; karst; spatial variation; biodiversity conservation; water conservation; soil and water conservation; Yunnan-Guizhou Plateau

生态系统形成和维持了人类赖以生存和发展的自然环境条件^[1-2],生态系统服务(ecosystem service)支持了现代社会日益增长的需求^[3]。2000年,联合国开展了迄今为止对地球生态系统健康状况最大规模的“新千年生态系统评估”(millennium ecosystem assessment, MEA)^[4],从此生态系统服务的关注度直线上升,人们也越来越认识到生态系统服务的重要性^[5]。然而由于人为干扰,地球上的大多数生态系统服务能力都在下降^[6],MEA研究指出全球近60%的生态系统服务正在退化和不可持续利用^[4],其主要原因之一是缺乏对生态系统服务的有效管理。如何加强生态系统服务功能管理、引导和规范人类活动,进而协调生态系统服务功能保护与社会经济发展的关系是人类发展面临的一个重要议题^[7]。生态系统服务的空间分异是空间决策的基础^[8-9],是生态退化和管理的核心问题之一^[10],有证据表明,许多生态产品的分布很可能呈现出诸如聚集的空间模式^[11-12]。

云贵高原地势起伏大、山地众多、土地利用结构复杂,导致地理环境差异显著^[13-15],形成了丰富的生物多样性资源以及复杂多样的生态系统^[16],由于其开发时间短、范围小和程度浅,至今仍保存较好的生态环境,为长江和珠江中下游提供了重要的生态功能产品^[17-18]。但在近现代开发进入了高潮,生态行为和资源利用模式发生了紊乱,生态问题日益突出^[19]。我国是世界岩溶大国,岩溶面积总和达 $3.44 \times 10^6 \text{ km}^2$,与北方岩溶主要为覆盖型岩溶地貌相比,南方岩溶则主要为裸露型岩溶地貌^[20],其丰富的自然生态系统以及多雨的气候特点为该区域提供了水源涵养、土壤

保持等多种重要生态系统服务^[21-22],同时该区域生态承载力总体偏小^[23]、土地退化问题严重,是典型的生态脆弱区^[24]。石漠化是生态退化的重要表象,会引起水土流失加剧、土壤肥力下降、生物多样性降低等生态问题^[25],减少和损失了生态系统服务^[25-26],降低了生态系统容量,加剧了生态系统脆弱性,不利于区域经济社会可持续发展^[27]。目前,学者们围绕生态系统服务功能的种类和价值化测算^[28-29]等方面开展了卓有成效的研究,如谢高地等^[30]基于扩展的劳动价值论原理对中国生态系统提供的11种生态服务类型价值进行核算;对云贵高原岩溶区的生态系统研究多集中于石漠化的形成原因、发生机制以及治理等方面^[18, 23, 27, 31-32]。如何在云贵高原岩溶区从生态系统服务功能重要性角度出发推进生态保护,来构建生态安全格局方面,较少受到关注。云贵高原岩溶区兼具高原大地貌和岩溶地质背景的普遍性和特殊性,根据欧阳志云等^[33]研究,该区域在水源涵养、土壤保持、生物多样性维护等功能表现突出。基于此,本研究以云贵高原岩溶区典型代表贵州省黔西南州为对象,测算该区域主要生态系统服务功能,评价单项功能重要性,探求研究区生态系统服务功能重要性空间分异规律及影响因素,为云贵高原岩溶区的生态系统有效管理、生态恢复治理和生态安全格局构建等提供参考^[34-35]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黔西南州($104^{\circ}35' - 106^{\circ}32' \text{ E}$, $24^{\circ}38' - 26^{\circ}11' \text{ N}$)

在贵州、云南和广西 3 省(区)交界处,位于云贵高原向广西丘陵山地的斜坡过渡地带;出露地层以三叠系和二叠系为主,石炭系、泥盆系、第三系、第四系、白垩系也有少量零星分布;成土母岩主要有砂页岩、碳酸盐岩、泥页岩、砂岩、紫色岩、玄武岩及第四纪黏土等;山岭纵横,河谷深切,地形错综复杂,乌蒙山支脉马鞍山自西向东延伸经盘州市南部后再折向东南直抵南盘江畔,苗岭支脉巴东头经紫云县向南直插望谟县,形成绵亘北部的马鞍山,中部的龙头大山和西部的七捧高原及东南部的河谷地带;地形西高东低,北高南低,低中山地面积最广,约占全州国土总面积的 60%,低山地仅分布在南、北盘江和红水河的河谷地带;地貌以侵蚀地貌和溶蚀地貌两大类型为主;属亚热带季风性湿润气候,气候温和、雨量充沛,水热同季;主要有红壤、黄壤、石灰土和水稻土等土壤^[36];2020 年末户籍总人口 301.51 万人^[37],人口密度 179.39 人/km²。

研究区植被过渡性突出,地带性明显,主要以亚热带常绿阔叶林、亚热带常绿阔叶和落叶混交林为主。同时,生态系统多样,其中森林、灌丛、草地、湿地分别占研究区面积的 35.21%, 28.64%, 2.64%, 0.15%^[38]。生物种类繁多,植物种类达 3 913 种以上,其中珍稀植物 300 多种,有中草药资源近 2 000 种;有野生动物 12 纲 542 种 11 亚种以上,其中 6 种被列入国家一级保护动物,36 种被列入国家二级保护动物^[36],目前已划定有自然保护区 9 个、森林公园 4 个、风景名胜区 7 个、地质公园 1 个、湿地公园 6 个,自然保护区体系面积占全州土地总面积的 8.48%,主要分布在乌蒙山苗岭生态安全屏障带、西部水源涵养—水土保持区及南北盘江、红水河生态保护带,对我国乃至世界的生物多样性及物种种质资源保护具有不可替代的作用。

根据 2016 年第 3 次石漠化监测结果,黔西南州石漠化面积占土地总面积的 18.07%,其中轻度、中度、重度和极重度 4 个等级的石漠化面积分别占总石漠化面 19.30%, 60.56%, 17.31% 和 2.84%,呈现类型多样、面积大、范围广、程度重、治理难等特点,是西南地区石漠化等级程度较严重、代表性最强、综合治理任务最艰巨的地区^[25,39]。根据 2020 年全国水土流失动态监测成果显示,2020 年黔西南州水土流失面积占土地总面积的 29.03%,其中轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈 5 个等级的水土流失面积分别占总流失面积 62.85%, 16.41%, 13.75%, 5.95% 和 1.04%^[40]。

1.2 数据来源

研究所用的数据主要有:①植被覆盖度采用由中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所公

开 的 中 国 2019 年 年 度 归 一 化 植 被 指 数 (NDVI) 数 据 集 进 行 测 算 。 ② DEM 获 取 自 地 理 空 间 数 据 云 的 GDEM V2(30 m) 数 字 高 程 数 据 。 ③ 土 壤 属 性 、 土 壤 渗 流 等 数 据 来 源 于 中 科 院 全 国 土 壤 数 据 和 世 界 粮 农 组 织 (HWSD 数 据 集) 。 ④ 光 热 条 件 数 据 来 源 于 黔 西 南 州 气 象 局 和 国 家 生 态 系 统 观 测 研 究 网 络 科 技 资 源 服 务 系 统 。 ⑤ 石 漠 化 和 水 土 流 失 数 据 来 源 于 省 级 石 漠 化 、 水 土 流 失 监 测 成 果 。 ⑥ 自 然 保 护 地 、 林 地 等 数 据 来 源 于 黔 西 南 州 林 业 局 林 业 数 据 库 。 ⑦ 生 态 系 统 类 型 数 据 来 源 于 黔 西 南 州 第 三 次 国 土 调 查 数 据 库 。 为 了 便 于 空 间 运 算 , 所 有 数 据 均 统 一 转 换 成 2000 国 家 大 地 坐 标 系 , 3 度 分 带 , 带 号 35 号 , 高 斯 克 吕 格 投 影 的 栅 格 (grid) 数 据 参 与 运 算 。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务功能重要性评价 本文主要采用《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(试行)》^[41]和《生态保护红线划定指南》^[42]对 3 项生态系统服务单项功能进行测算并评价其重要性,后集成出生态系统服务综合功能重要性。

(1) 水源涵养功能。用水量平衡法^[43]来计算生态系统水源涵养量,以此评价生态系统水源涵养功能的相对重要程度。降水量大于蒸散量较多且地表径流量相对较小的区域,水源涵养功能重要性较高。优先将前 50% 累积水源涵养区确定为水源涵养极重要区。

$$TQ = \sum_{i=1}^j (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^3 \quad (1)$$

式中: TQ 为总水源涵养量 (m³); P_i 为降雨量 (mm); R_i 为地表径流量 (mm); ET_i 为蒸散发 (mm); A_i 为 i 类生态系统面积 (km²); i 为研究区第 i 类生态系统类型; j 为研究区生态系统类型数。

(2) 水土保持功能。植被覆盖度 ≥ 80% 的森林、灌丛和草地且坡度 ≥ 25° 优先确定为水土保持极重要区域;在此范围外,植被覆盖度 ≥ 60% 的森林、灌丛和草地且坡度 ≥ 15° 优先确定为水土保持重要区域。

植被覆盖度:

$$C_i = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (2)$$

式中: NDVI_{veg} 为完全植被覆盖地表时的信息; NDVI_{soil} 为无植被覆盖地表时的信息。

(3) 生物多样性维护功能。采用生物多样性维护服务能力指数表征生物多样性维护功能重要性,计算公式为:

$$S_{bio} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt}) \quad (3)$$

式中: S_{bio} 为生物多样性维护服务能力指数; NPP_{mean} 为年均植被净初级生产力; F_{pre} 为年均降水量; F_{tem} 为年均气温; F_{alt} 为海拔因子。

(4) 生态系统服务功能重要性集成。集成参考林子雁等^[44]方法,在 ArcGIS 中叠加分析上述 3 项单项服务功能重要性结果,得到研究区生态系统服务功能重要性等级。计算公式为:

$$ES_i = \max(D_{1i}, D_{2i}, \dots, D_{mi}) \quad (4)$$

式中: ES_i 为 i 空间单元上的生态服务功能重要性等级; $D_{1i} - D_{mi}$ 为 i 空间单元上单项服务功能重要性等级。

1.3.2 空间自相关分析 地理学第一定律(Tobler's first law, TFL)指出事物间相互联系,且近物比远物具有更强关联性^[45]。生态系统服务功能既是生态问题,也是地理问题,其水平高低不仅受到自身发展影响,同时受到周围事物影响,因此,将生态系统服务功能重要性比例与空间属性相结合,建立空间模型,可有效分析数据的空间关联性,这种关联性主要表现在空间数据的相互作用与扩散作用上^[46]。现今对生态系统服务空间异质性研究主要体现为两方面^[47],一是空间分化程度测量或生态系统服务空间差异分析^[48];二是探讨生态系统服务驱动力及驱动机制^[49]。本研究主要采用全局和局部的两类空间自相关来进行空间异质性分析。

(1) 构建空间权重矩阵。本文在 Geoda 软件中选择采用基于距离空间权重标准定义空间矩阵,采用几何中心为变量,方法为 K -近邻法(邻居数取 4)。

(2) 全局自相关。全局自相关主要是用来度量某一空间数据在整体上表现出来的空间特征,本文采用 Moran's I 指数表征整体空间特征,反映相邻数据在空间上的相似程度与关联性。

Moran's I 指数的计算公式为:

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

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

式中: $i \neq j$, I 为 Moran's I 指数,其值 -1 到 1 之间; n 为村域个数; x_i, x_j 为村域 i 和村域 j 的指标值; \bar{x} 为指标平均值; S^2 为指标方差。计算完后并进行显著性检验。

(3) 局部自相关。用局部自相关来刻画空间关联的异质性和不稳定性,特别是局部地区空间关联模式,测度方法包括 LISA (local indicators of spatial association), G 统计和散点图。本文主要采用局部 Moran's I 指数法,计算公式为:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

$$= \frac{nz_i \sum_{j=1}^n w_{ij} z_j}{z'_T z'} = z'_i \sum_{j=1}^n w_{ij} z'_j$$

式中: z'_i, z'_j 分别表示指标标准化值,其余指标含义与前文一致。检验方式也与全局自相关一致。

同时,将 Moran 散点图划分为 4 个象限,其中第 1 象限表示指标高的村域被指标高的村域包围,第 2 象限表示指标低的村域被指标高的村域包围,第 3 象限表示指标低的村域被指标低的村域包围,第 4 象限表示指标高的村域被指标低的村域包围。绘制出 Moran LISA 显著水平图 ($\alpha = 0.05$), I_i 显著 > 0 且 $Z_i > 0$ 时为“高一高”(H-H)类型区, I_i 显著 > 0 且 $Z_i < 0$ 为“低—低”(L-L)类型区; I_i 显著 < 0 且 $Z_i > 0$ 为“高一低”(H-L)类型区; I_i 显著 < 0 且 $Z_i < 0$ 为“低—高”(L-H)类型区。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务功能重要性空间分布分析

2.1.1 水源涵养功能 水源涵养功能极重要区有 4 498.68 km² (面积比例为 26.76%, 图 1), 主要分布在望谟西北—贞丰中部—安龙西北—兴义一线以北和望谟与册亨邻近红水河的区域, 具体涉及普安、晴隆、兴仁、兴义的大部, 贞丰北部, 安龙、册亨和望谟的局部。水源涵养功能重要区有 5 357.92 km² (面积比例 31.88%), 主要分布在望谟西北—贞丰中部—安龙西北—兴义一线以南的区域, 具体涉及安龙、册亨和望谟的大部, 贞丰和兴义南部, 普安、晴隆和兴仁的小部。

2.1.2 水土保持功能 水土保持功能极重要区有 782.67 km² (面积比例 4.66%, 图 1), 主要分布在望谟、册亨、贞丰、兴义东部与西南部、兴仁西南部、普安南部与中北部、晴隆南部。水土保持功能重要区有 5 133.21 km² (面积比例 30.54%), 主要分布在除晴隆西部—贞丰中部—兴仁中部—安龙中部—兴义中部的 S 条形带之外的区域。

2.1.3 生物多样性维护功能 生物多样性维护功能极重要区有 2 053.70 km² (面积比例 12.22%, 图 1), 呈片块状分布, 主要有南部哑铃状的清水河自然保护区—仙鹤坪自然保护区、册亨北部、望谟中北部、贞丰东部、兴仁南部、晴隆北部、普安的楼下、地瓜、新店、罐子窑等区域。生物多样性维护功能重要区有 7 945.08 km² (面积比例 47.27%), 分布在全州大部分区域, 主要涉及望谟、册亨、贞丰和晴隆大部, 普安北部, 兴仁东部、东北部和西南部, 安龙东部、南部与

西部,兴义东南部与白龙山。

2.1.4 生态系统服务功能重要性集成评价 生态系统服务功能极重要区有 6 569.14 km² (面积比例 39.08%,图 1),分布在全州大部区域,主要在除兴义南部、安龙中部大部区域、册亨南部、望漠西南部

之外的广大区域。生态系统服务功能重要区有 7 152.13 km² (面积比例 42.55%),分布在全州大部区域,兴义主要分布在南部和白龙山,其余县(市)主要在除安龙东南部和西南部、望漠中部、贞丰中部、兴仁中部和普安中南部之外的广大区域。

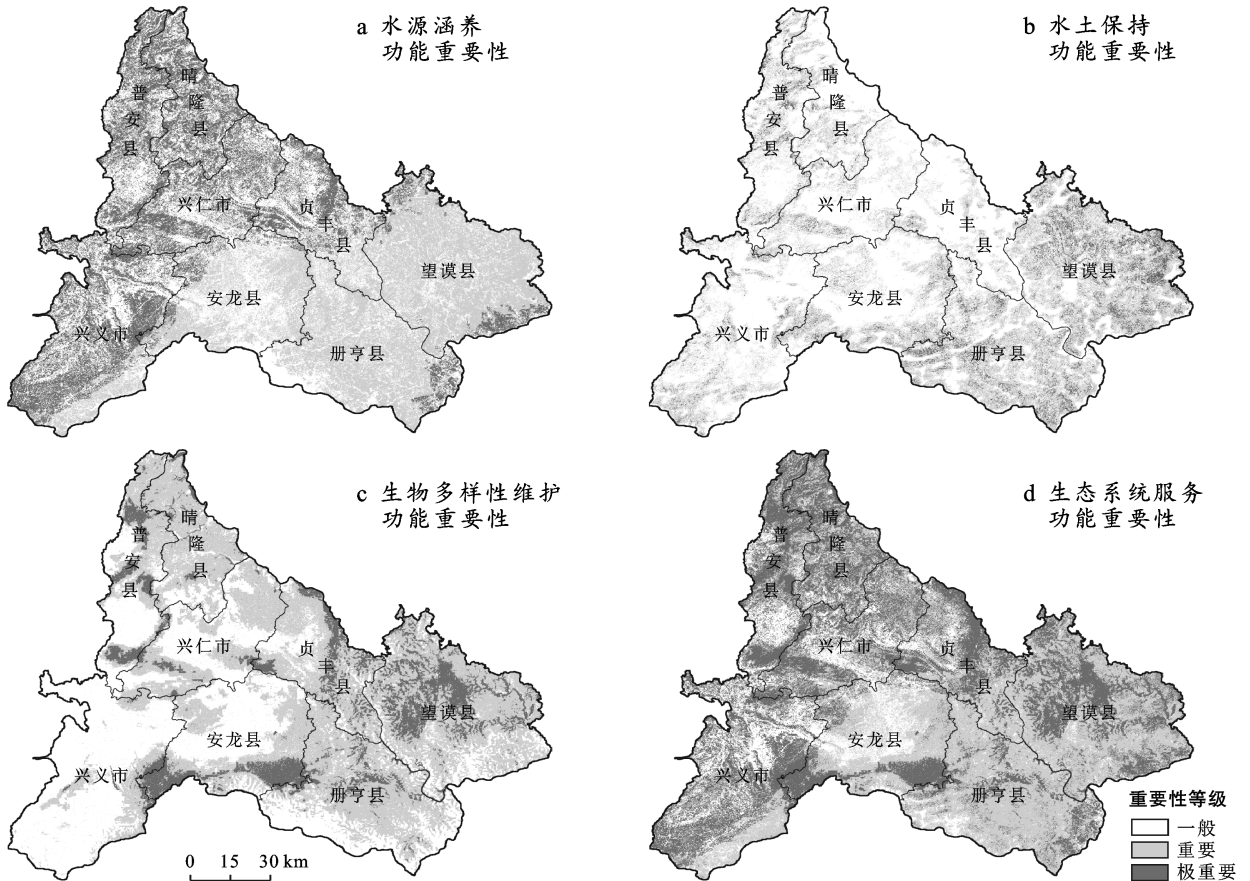


图 1 生态系统服务功能重要性单项及集成分布

2.2 生态系统服务功能重要性空间自相关分析

以村为单位统计其生态系统服务功能重要性面积,计算重要性等级面积比例,然后在 GeoDa 软件中进行分析。

2.2.1 全局空间自相关分析 由表 1 可知,在研究期内,1 189 个村级单位生态系统服务功能重要性比例呈正的空间自相关,各功能其重要性的全局 Moran's *I* 指数均在 0.65 以上,表明各村生态系统服务功能重要性比例的空间分布并不是完全随机状态,而表现出空间聚集特性,即具有较高比例的村与具有较高比例的村相邻或者具有较低比例的村与具有较低比例的村相邻。

为了检验 Moran's *I* 是否显著,在 Geoda 中采用 Monte Carlo 模拟 999 次检验,均通过了显著性检验 ($\alpha=0.01$)。

表 1 全局 Moran's *I* 指数

功能类型	重要性程度	Moran's <i>I</i> 指数
水源涵养功能	一般重要	0.705
	重要以上	0.705
	其中重要	0.936
	极重要	0.837
水土保持功能	一般重要	0.770
	重要以上	0.770
	其中重要	0.733
	极重要	0.737
生物多样性维护功能	一般重要	0.843
	重要以上	0.843
	其中重要	0.771
	极重要	0.689
生态系统服务功能	一般重要	0.818
	重要以上	0.818
	其中重要	0.829
	极重要	0.715

2.2.2 单变量空间自相关分析 为了更加直观地看出空间分布情况,进行了局部相关分析(图 2—5)。

(1) 水源涵养功能。①一般重要。一般重要比例的空间自相关聚类主要有 3 种类型(图 2),分别为:高一高聚集类型,主要有 2 个条带,条带一包括兴义西峰林—兴义东峰林—安龙德卧—册亨巧马,条带二包括区块二包括普安青山—兴仁城区—贞丰者相—兴仁百德;低—低聚集类型,有 2 个条带和 1 个区块,条带一包括兴义三江口—兴义东峰林—安龙德卧,条带二包括安龙笃山—册亨百口,区块包括北盘江以东的广大区域;不显著类型涉及区域较广,主要分布在黔西南州北部、中部和西南部。②重要。重要比例的空间自相关聚类主要有三种类型(图 2),分别为:高一高聚集类型,主要分布在黔西南州西部的册亨和望谟 2

县;低—低聚集类型,主要分布在贞丰、兴仁、普安和兴义;不显著类型主要分布在黔西南州东北至西南一线和晴隆中部。③极重要。该比例的空间自相关聚类结果与重要比例的聚类结果除高一高聚集类型与低—低聚集类型分布相反外,其他总体上较为类似。

(2) 水土保持功能。该类型功能的 3 级重要性比例空间自相关聚类结果呈现较大的趋同性(图 3),总体上一般重要的高一高聚集类型和低—低聚集类型与重要的低—低聚集类型和高一高聚集类型相对应,呈反向结果,极重要的高一高和低—低 2 个聚集类型主要分布在重要的对应 2 中聚集类型中。其中重要比例的高一高聚集类型主要分布在册亨和望谟 2 县;低—低聚集类型主要分布在贞丰北部、兴仁北部、晴隆东部、兴义中部—安龙东部。

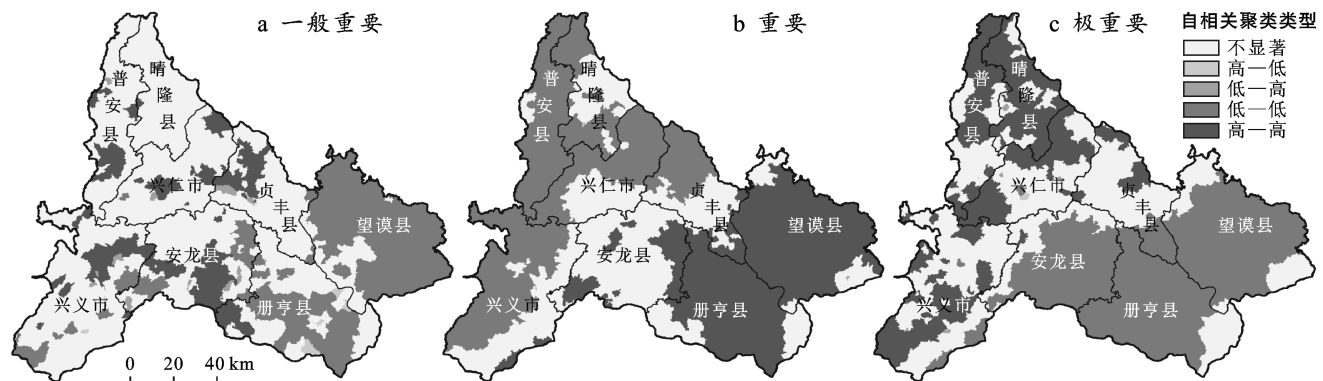


图 2 水源涵养功能重要性变量局部 Moran's I 聚类图

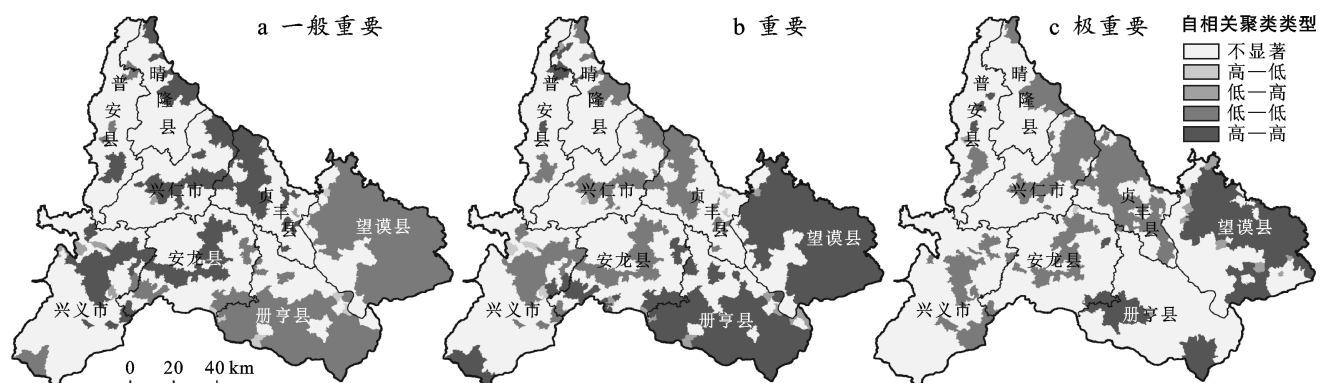


图 3 水土保持功能重要性变量局部 Moran's I 聚类图

(3) 生物多样性维护功能。该类型的一般重要与重要 2 比例的空间聚集类型呈相反分布(图 4)。由图 4 可以看出,研究区重要比例的高一高聚集类型主要分布在普安北部—晴隆—贞丰北部、望谟北部—东部—南部、册亨北部—中部—东部;低—低聚集类型

主要分布在兴义除东南的大部—安龙北部—兴仁中部—普安南部。极重要比例的低—低聚集类型大体与重要比例聚类结果相似,高一高聚集类型主要分布在安龙西南部和东南部、贞丰中东部、望谟西部、普安中部。

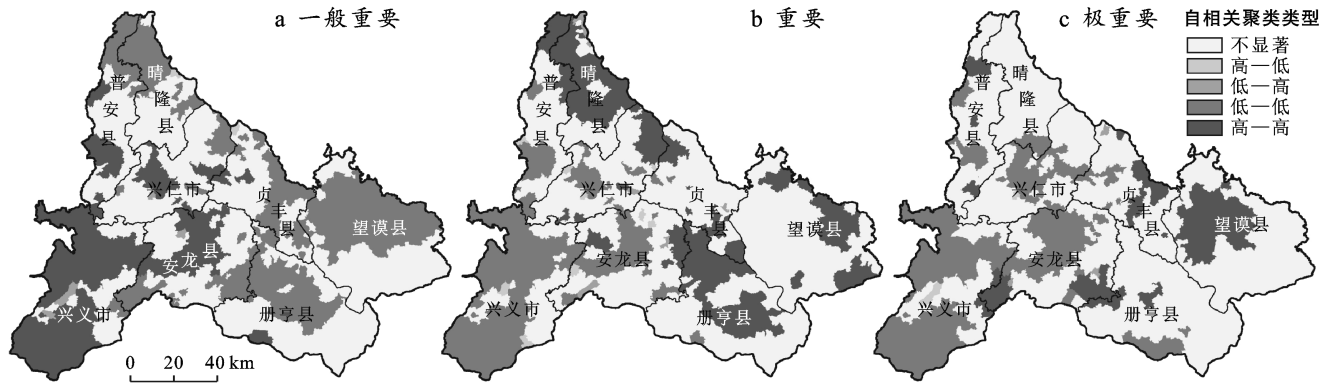


图 4 生物多样性维护功能重要性变量局部 Moran's I 聚类图

(4) 生态系统服务功能。总服务功能与水源涵养在空间聚集上呈较高相似性(图 5),亦存在一定变化,一般重要的高一高聚集类型和低一低聚集类型比水源涵养功能有一定的扩大,高一高聚集类型主要增

加了兴义西部和北部,低一低聚集类型则增加了普安北部和晴隆北部;而总服务功能的重要和极重要高一高聚集类型和低一低聚集类型则比水源涵养功能有一定缩小。

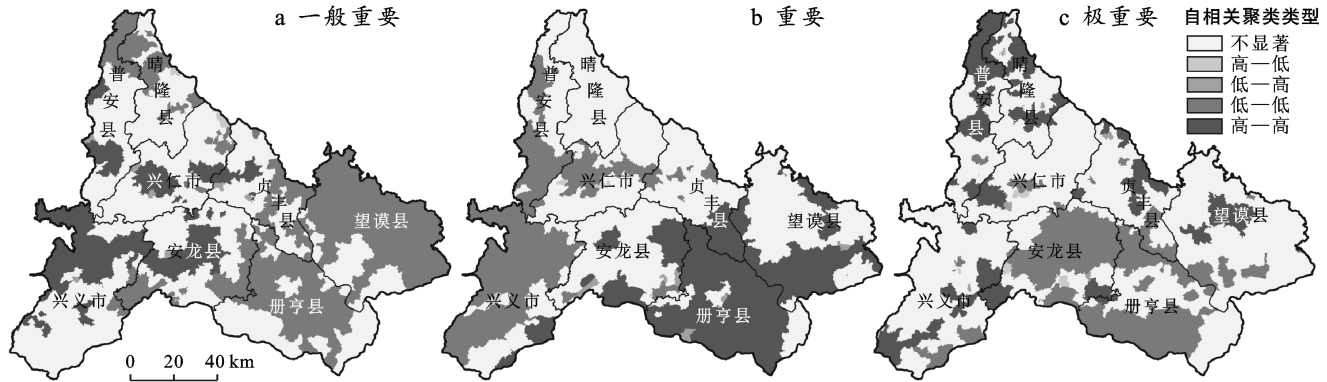


图 5 生态系统服务功能重要性变量局部 Moran's I 聚类图

无论是生态系统服务的单功能还是总功能,各级重要性均表现出较强的空间自相关,总体来说,一般重要的高一高聚集类型均分布在黔西南州的中西部,低一低聚集类型分布在东部和北部;重要性则与前者成反向分布;水源涵养功能和生态系统总服务功能的极重要分布与水土保持功能和生物多样性维护功能的分布相反,前两者高一高聚集类型分布在北部、西部与西南部,低一低聚集类型分布在南部和东部。

2.2.3 双变量空间自相关分析 对重要以上单功能进行双变量空间自相关分析(图 6)。生物多样性维护功能分别与水源涵养功能、水土保持功能的聚类结果存在相似性,高一高聚集类型主要分布在东部的册亨和望谟、北部的普安和晴隆以及兴义东峰林,低一低聚集类型主要分布在兴义—安龙—贞丰—兴仁—普安一带,高一低聚集类型主要分布西南部的兴义,低一高聚集类型主要分布望谟以北的北盘江沿线。水源涵养功能与水土保持功能空间自相关表现为高一高聚集类型主要分布在册亨和望谟,低一低聚集

类型主要分布在兴义—安龙—贞丰—兴仁—普安一带,低一高聚集类型主要分布册亨和安龙临近南盘江一线,高一低聚集类型则零星分布在兴义、贞丰、晴隆等区域。

2.3 地质地貌和环境变化对生态系统服务功能重要性的影响

2.3.1 生态问题对生态系统服务功能重要性的影响

(1) 石漠化。生态系统服务功能重要性等级与石漠化等级耦合程度略呈差异(图 7),从潜在石漠化到极重度石漠化,一般重要和重要的生态系统服务功能比例逐渐增加,极重要的生态系统服务功能比例逐渐降低,非岩溶区的一般重要比例相对较高,极重要比例相对较低。表明石漠化在一定程度上造成生态系统服务功能重要性下降,这与石漠化带来的生态退化相符,由于一些内因和外因,致使植被破坏,水源涵养能力下降,水土流失加剧,而造成基岩裸露,成为石漠化,生物多样性亦随之下降,李阳兵等^[21]研究表明石漠化会使土地生产力严重下降,地表缺水

缺土少林草, 章维鑫等^[50]研究表明生态系统服务对不同土地利用方式下的石漠化和非石漠化区的响

应不一样, 石漠化区的产水服务和固碳服务均小于非石漠化区。

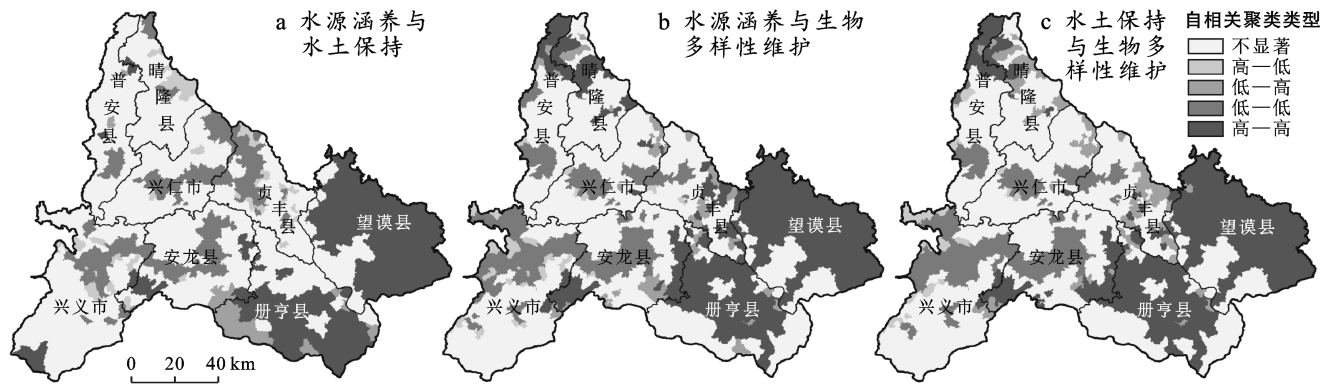


图 6 双变量局部 Moran's I 聚类图

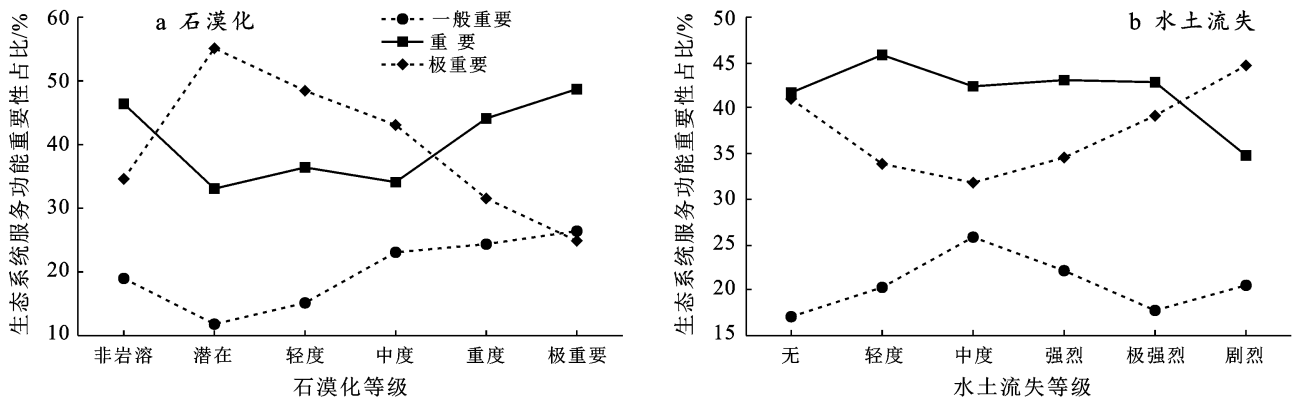


图 7 生态系统服务功能重要性与生态问题耦合图

(2) 水土流失。水土流失对重要和一般重要等级的生态系统功能影响不大(图 7), 极重要等级随着水土流失等级增加呈先减少后增加趋势, 这主要是无水土流失、轻度水土流失和中度水土流失面积较大, 较为明显地降低了生态系统功能中的水土保持功能, 并在生态系统服务综合功能上得到体现, 强烈及以上的 3 个水土流失等级面积较小, 其影响结果被水源涵养功能和生物多样性维护功能所掩盖而不突出。

2.3.2 生态系统服务功能重要性分布集聚性受地质背景影响 由图 8 可知, 随着坡度的增加, 极重要等级生态系统服务功能面积比例从 24.43% 逐渐增加到 68.70%, 重要等级面积比例则是先增加, 在 20°~25° 达到最大值 49.91% 后逐渐下降到 26.95%, 而一般重要等级则是在 0°~5° 时面积比例最大, 达到 43.77%, 在 2°~10° 就降到重要和极重要比例之下, 后不断下降, 最后比例在 5% 以下。

从母岩方面看, 泥质岩类、红色风化壳上的重要以上生态系统服务功能面积比例相对较小, 比例最高的为基性岩类和石英岩类, 极重要面积比例较大的为

基性岩类、石英岩类和紫色岩类; 地貌成因对生态系统服务功能影响较为明显, 侵蚀—剥蚀类型的重要以上生态系统服务功能面积比例最高, 溶蚀—侵蚀类型面积比例最低; 地貌形态对生态系统服务功能重要性等级比例影响较为明显, 重要以上生态系统服务功能面积比例在中盆地处于最低水平, 仅为 27.38%, 地貌类型向丘陵、山地变化时, 重要以上面积比例逐渐增加, 在低中山达到最大(91.44%); 山地不同切割深度对生态系统服务功能重要性等级比例影响不大。

坡度、母岩、地貌成因、地貌形态、切割深度等地质背景对生态系统服务功能分布有较强的影响, 地质背景是环境条件的重要影响因子, 对水热再分配、土壤发育、人为活动范围等都具有较大的影响, 同时地质背景在空间上亦呈现突出的集聚性和异质性, 一定程度上也促使生态系统服务功能重要性具有集聚性和异质性。赵筱青等^[51]对滇东南喀斯特山区研究也表明土地利用类型、自然环境状况是造成生态系统服务综合供给能力差异的主要因素。

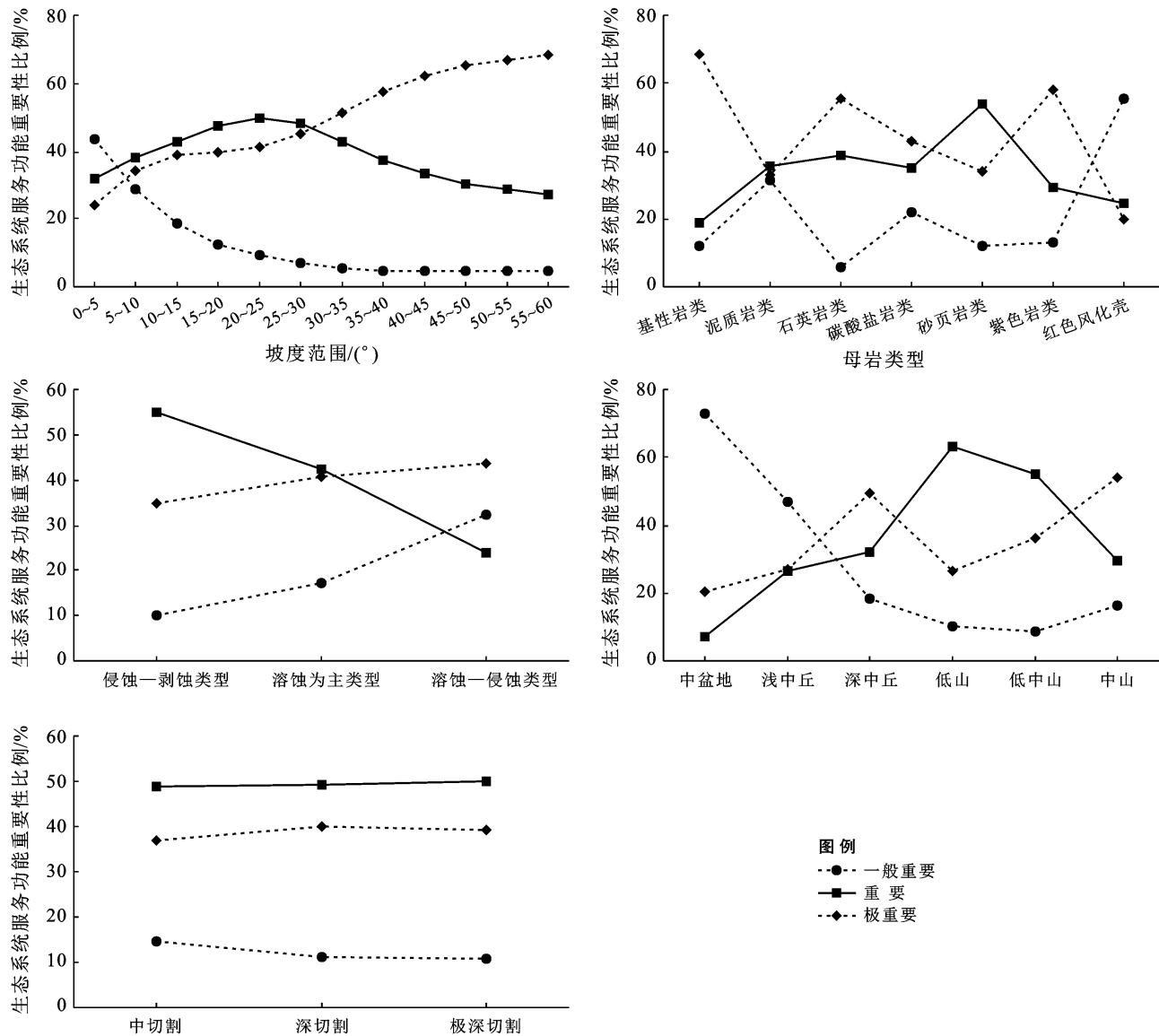


图 8 生态系统服务功能重要性与地质背景耦合图

3 讨论与结论

(1) 研究区整体水平较高生态系统提供了较好的生态系统服务功能。研究区生态系统整体水平较高,较高重要性的面积比例高,其中水源涵养功能和生物多样性维护功能重要以上的面积比例在 55% 以上,水土保持功能在重要以上的面积比例为 35.20%,生态系统服务总体功能在重要以上的面积比例达到 81.63%。从功能大小来看,生物多样性维护功能 > 水源涵养功能 > 水土保持功能。不同的环境及社会本底特征形成生态系统服务供给种类和供给量的不同^[34]。研究区生物多样性丰富,加上经济社会发展欠发展和原生态文化等原因对生态系统的人为干扰相对较弱,较多原生植被得到保护,同时大量人员外出务工,降低了人地矛盾,受损生态系统也得到不断

恢复,形成了较好的生物多样性维护功能。杨渺等对四川省生物多样性与生态系统多功能性进行了分析,表明水源涵养能力与植被状况和降水均有直接关系,与多样性指标景观丰度及邻近距离呈极强正相关,而与景观丰度密度则呈极强负相关关系^[52],本研究区亦体现了这个规律,较好的生物多样性和水热条件为水源涵养功能提供基础条件。

(2) 研究区生态系统服务功能重要性表现出较强的空间集聚性和异质性。无论是单项功能还是总体功能,均表现出较强的空间集聚性,整体表现出条带或区块分布,生物多样性维护功能分别与水源涵养功能、水土保持功能的聚类结果存在相似性,具体各功能其各重要性等级又表现出差异性。这与以往研究结果一致,景海超等^[34]对青藏高原典型区研究表明各生态系统服务功能之间主要为协同关系,赵雪雁

等^[53]对黄土高原研究也表明生态系统服务功能供给具有较强的空间集聚性。

(3) 生态系统服务功能重要性与石漠化和水土流失等生态问题存在耦合性,空间分布集聚性受水热条件、地质背景、人为等因素综合作用的结果,在空间分异上,整体来讲东部和东南部为高一高聚集类型的情况较多,该区域母岩主要为砂页岩,且处于河谷地带,积温较高,发育的土壤厚度较大,同时人口压力较小,故而保持了较好的植被和具备较快的植被恢复能力。

综上所述,云贵高原岩溶区有较好的生态系统服务功能供给能力,同时生态保护与发展存在较为突出的矛盾,科学合理地构建生态保护安全格局是生态保护与发展的重要基础,而精准地识别生态系统服务功能、评估重要性程度以及其演变趋势是划定生态功能区的前提。本文受数据获取的限制,采用了多种比例尺的基础数据,总体上能够满足中大尺度的规律分析,但对岩溶区生态系统服务功能机理研究还不够深入、实证研究也还很不充分,要做到实施级的评估,可进一步丰富数据来源、提高数据精度,以系统辨识区域生态系统服务功能空间分异影响原因以及变化驱动机制。同时村级单元存在面积不规则、大小不均衡等现象,可尝试以大格网为单元,进行空间分异研究,以进行交互验证。

[参 考 文 献]

[1] Assessment M E. Ecosystems and human well-being: A framework for assessment [M]. Washington D C: Island Press, 2003.

[2] 杨洁.黄河流域草地生态系统服务功能及其权衡协同关系研究[D].甘肃 兰州:甘肃农业大学,2021.

[3] Munns Jr W R, Rea A W, Mazzotta M J, et al. Toward a standard lexicon for ecosystem services [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2015, 11(4):666-673.

[4] Assessment M E. Ecosystems and human well-being: synthesis [M]. Washington D C: Island Press, 2005.

[5] Vihervaara P, Kumpula T, Tanskanen A, et al. Ecosystem services: A tool for sustainable management of human-environment systems. Case study Finnish Forest Lapland [J]. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3):410-420.

[6] Ash N, Blanco H, Brown C, et al. Ecosystems and human well-being: A manual for assessment practitioners [M]. Washington D C: Island Press, 2010.

[7] 郑华,李屹峰,欧阳志云,等.生态系统服务功能管理研究进展[J].*生态学报*,2013,33(3):702-710.

[8] Guerry A D, Polasky S, Lubchenco J, et al. Natural capital and ecosystem services informing decisions:

From promise to practice [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(24):7348-7355.

[9] Hu Yi'nan, Peng Jianan, Liu Yanxu, et al. Integrating ecosystem services trade-offs with paddy land-to-dry land decisions: A scenario approach in Erhai Lake basin, southwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625:849-860.

[10] 兰安军,张百平,熊康宁,等.黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析[J].*地理研究*,2003,22(6):733-741.

[11] De Valck J, Rolfe J. Spatial heterogeneity in stated preference valuation: Status, challenges and road ahead [J]. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 2018, 11(4):355-422.

[12] Glenk K, Johnston R J, Meyerhoff J, et al. Spatial dimensions of stated preference valuation in environmental and resource economics: Methods, trends and challenges [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2020, 75(2):215-242.

[13] 许开鹏,王晶晶,迟妍妍,等.基于综合生态风险的云贵高原土地利用优化与持续利用对策[J].*生态学报*, 2016, 36(3):821-827.

[14] 高照忠,黄雅君,魏海霞,等.近30年云贵高原水蚀荒漠化遥感监测及影响因子时空分异规律[J].*测绘通报*, 2021(10):117-122.

[15] 郭晓芳,李旭东,程东亚.云贵高原气温与降水空间分布特征及其影响因素[J].*水土保持研究*, 2021, 28(1): 159-163.

[16] 马东旭,殷晓洁,周斯怡,等.基于中国植被图的西南地区主要乔木物种丰富度格局[J].*福建农林大学学报(自然科学版)*,2022,51(2):249-257.

[17] Peng Jian, Tian Lu, Zhang Zimo, et al. Distinguishing the impacts of land use and climate change on ecosystem services in a karst landscape in China [J]. *Ecosystem Services*, 2020, 46:101199.

[18] 韩会庆,苏志华.喀斯特生态系统服务研究进展与展望[J].*中国岩溶*,2017,36(3):352-358.

[19] 马国君.近三十年来云贵高原生态变迁研究综述:兼论民族地方性生态知识的价值[J].*贵州民族研究*, 2010, 31(6):108-115.

[20] 宋艳,仕玉治,邸燕,等.基于土地变化模型的中国北方喀斯特盆地国土空间预测[J].*济南大学学报(自然科学版)*,2021,35(3):205-210.

[21] 李阳兵,谭秋,王世杰.喀斯特石漠化研究现状、问题分析与基本构架[J].*中国水土保持科学*,2005,3(3): 27-34.

[22] Xiong Y J, Qiu G Y, Mo D K, et al. Rocky desertification and its causes in karst areas: A case study in Yongshun County, Hunan Province, China [J]. *Environmental Geology*, 2009, 57(7):1481-1488.

- [23] 杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 等. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5798-5808.
- [24] 张军以, 戴明宏, 王腊春, 等. 生态功能优先背景下的西南岩溶区石漠化治理问题[J]. 中国岩溶, 2014, 33(4): 464-472.
- [25] 顾羊羊, 徐梦佳, 杨悦, 等. 喀斯特石漠化区生态保护红线划定: 以贵州省威宁县为例[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3462-3474.
- [26] Quine T, Guo D L, Green S M, et al. Ecosystem service delivery in karst landscapes: anthropogenic perturbation and recovery [J]. *Acta Geochimica*, 2017, 36(3): 416-420.
- [27] 苏维词, 杨华, 李晴, 等. 我国西南喀斯特山区土地石漠化成因及防治[J]. 土壤通报, 2006, 37(3): 447-451.
- [28] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [29] 于书霞, 尚金城, 郭怀成. 生态系统服务功能及其价值核算[J]. 中国人口·资源与环境, 2004, 24(5): 44-46.
- [30] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [31] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 等. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [32] Qiu Sijing, Peng Jian, Dong Jianquan, et al. Understanding the relationships between ecosystem services and associated social-ecological drivers in a karst region: A case study of Guizhou Province, China [J]. *Progress in Physical Geography (Earth and Environment)*, 2021, 45(1): 98-114.
- [33] 欧阳志云, 徐卫华, 肖焱, 等. 中国生态系统格局、质量、服务与演变[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [34] 景海超, 刘颖慧, 贺佩, 等. 青藏高原典型区生态系统服务空间异质性及其影响因素分析: 以那曲市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(7): 1-17.
- [35] 李双成, 谢爱丽, 吕春艳, 等. 土地生态系统服务研究进展及趋势展望[J]. 中国土地科学, 2018, 32(12): 82-89.
- [36] 黔西南布依族苗族自治州综合农业区划编写组. 黔西南自治州卷(黔西南布依族苗族自治州综合农业区划)[M]. 贵州 贵阳: 贵州人民出版社, 1989.
- [37] 黔西南州统计局, 黔西南州第七次全国人口普查领导小组办公室. 黔西南州第七次全国人口普查公报[EB/OL] (2021-11-18). http://www.qxn.gov.cn/zwgk/zfjg/ztjj_5135341/bmxxgkml_5135344/tjgb_5135353/202111/t20211118_71714900.html.
- [38] 黔西南州第三次全国国土调查领导小组办公室, 黔西南州自然资源局, 黔西南州统计局. 黔西南州第三次全国国土调查主要数据公报[EB/OL] (2021-12-31). http://www.qxn.gov.cn/zwxx/bmdt/202112/t20211231_72176153.html.
- [39] Tong Xiaowei, Brand T M, Yue Yuemin, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering [J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [40] 贵州省水利厅. 贵州省水土保持公告(2016—2020)[EB/OL] (2021-12-17) [2022-07-02]. https://www.guizhou.gov.cn/zwgk/zdlygk/jjgzlfz/sljs/stbc/202112/t20211217_72074305.html.
- [41] 自然资源部. 自然资源部办公厅关于印发《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)》的函[EB/OL]. http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200121_2498502.html.
- [42] 环境保护部, 国家发展和改革委员会. 关于印发《生态保护红线划定指南》的通知[EB/OL] (2017-07-06) [2022-02-02]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm.
- [43] 侯元兆, 王琦. 中国森林资源核算研究[J]. 世界林业研究, 1995, 8(3): 51-56.
- [44] 林子雁, 肖焱, 史雪威, 等. 西南地区生态重要性格局研究[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8667-8675.
- [45] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit Region [J]. *Economic Geography*, 1970, 46: 234-240.
- [46] 吕韬, 曹有挥. “时空接近”空间自相关模型构建及其应用: 以长三角区域经济差异分析为例[J]. 地理研究, 2010, 29(2): 351-360.
- [47] Toledo-Gallegos V M, Long J, Campbell D, et al. Spatial clustering of willingness to pay for ecosystem services [J]. *Journal of Agricultural Economics*, 2021, 72(3): 673-697.
- [48] Zhai Tianlin, Wang Jing, Jin Zhifeng, et al. Did improvements of ecosystem services supply-demand imbalance change environmental spatial injustices? [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106068.
- [49] Ajaz Ahmed M A, Abd-Elrahman A, Escobedo F J, et al. Spatially-explicit modeling of multi-scale drivers of aboveground forest biomass and water yield in watersheds of the Southeastern United States [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 199: 158-171.
- [50] 章维鑫, 吴秀芹, 于洋, 等. 2005—2015年小江流域生态系统服务供需变化及对石漠化的响应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 139-150.
- [51] 赵筱青, 石小倩, 李驭豪, 等. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J]. 地理学报, 2022, 77(3): 736-756.
- [52] 杨渺, 肖焱, 欧阳志云, 等. 四川省生物多样性与生态系统多功能性分析[J]. 生态学报, 2021, 41(24): 9738-9748.
- [53] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 等. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2780-2796.