

# 江西省赣州市土壤保持和水源涵养 时空特征及保护空缺

周俊鑫<sup>1,2</sup>, 蔡梅芳<sup>1,2</sup>, 郭福生<sup>1</sup>, 黄志强<sup>1,2</sup>, 翟健程<sup>1,2</sup>

(1.东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013; 2.东华理工大学 自然保护地规划研究院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** [目的] 明晰土壤保持、水源涵养时空格局并标识保护空缺区域,为地区发展规划和生态保护提供科学指导。[方法] 以江西省赣州市为研究区,综合 RUSLE 模型、InVEST 模型等生态评价方法和热点分析、叠加分析等分析工具,结合保护空缺理论,分析 2000—2020 年土壤保持和水源涵养时空演化特征,对比现有保护区域,标识潜在优先保护区。[结果] ①赣州市土壤保持服务空间分布特征总体表现为四周高中心低,极重要区集中分布在四周的罗霄山脉、九连山脉、武夷山脉和庾山山脉,多年平均土壤保持总量为  $8.46 \times 10^8$  t。②水源涵养功能空间特征也表现为周高中低,极重要区集中分布在梅江流域、平江流域、贝岭水流域、犹江流域和桃江流域的上游及绵江流域和湘水流域东侧的武夷山脉,多年平均水源涵养深度为 213.48 mm。③赣州市土壤保持和水源涵养功能显著的区域在空间上具有较强的关联性,对比现有自然保护地后标识保护空缺面积 6 155.54 hm<sup>2</sup>,保护空缺区有几处较为明显且周边无保护地的集中分布区,分别位于兴国县北部、石城县东北部、瑞金市西北部和东南部、全南县中部、安远县东南部和寻乌县西部。[结论] 气候因素、土地利用变化、地形地貌条件是影响赣州市土壤保持和水源涵养功能时空分异的重要因素,针对保护空缺区域和功能退化区域,应采取生态保护和修复策略。

**关键词:** 土壤保持; 水源涵养; 时空特征; 保护空缺; 江西省赣州市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0413-08

中图分类号: S157

**文献参数:** 周俊鑫, 蔡梅芳, 郭福生, 等. 江西省赣州市土壤保持和水源涵养时空特征及保护空缺[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 413-420. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.047; Zhou Junxin, Cai Meifang, Guo Fusheng, et al. Spatiotemporal characteristics of soil conservation and protection vacancies at Ganzhou City of Jiangxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 413-420.

## Spatiotemporal Characteristics of Soil Conservation and Protection Vacancies at Ganzhou City of Jiangxi Province

Zhou Junxin<sup>1,2</sup>, Cai Meifang<sup>1,2</sup>, Guo Fusheng<sup>1</sup>, Huang Zhiqiang<sup>1,2</sup>, Zhai Jiancheng<sup>1,2</sup>

(1.School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi, 330013, China;

2.Planning and Research Institute of Nature Reserves, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi, 330013, China)

**Abstract:** [Objective] The spatiotemporal pattern of soil conservation was studied and the protection vacancy areas were identified in order to provide references for regional development planning and ecological protection. [Methods] The study was conducted with data from Ganzhou City of Jiangxi Province. We used the integrated RUSLE model, the InVEST model, other ecological evaluation methods, hot spot analysis, overlay analysis, and other analysis tools combined with protection vacancy theory to analyze the space-time evolution characteristics of soil and water conservation from 2000 to 2020. We compared the existing protection areas, and identified potential priority protection areas. [Results] ① The spatial distribution of soil conservation services in Ganzhou City generally showed higher in the surrounding areas, and lower in the middle area, The most important areas were concentrated in the Luoxiao Mountains, Jiulian Mountains, Wuyi Mountains, and Yushan Mountains, with an average annual total soil conservation of  $8.46 \times 10^8$  t.

收稿日期: 2022-09-23

修回日期: 2022-11-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“赣粤闽地区丹霞地貌形成与演化过程中岩相控制作用研究”(41772197)

第一作者: 周俊鑫(1998—), 男(汉族), 江西省宜黄县人, 硕士研究生, 研究方向为自然保护地与可持续发展。Email: 2412121584@qq.com。

通讯作者: 黄志强(1975—), 男(汉族), 江西省宜黄县人, 高级工程师, 主要从事自然保护地与生态环境研究。Email: 18771556@qq.com。

② The spatial characteristics of the water conservation function were also generally characterized by higher in surrounding areas, and lower in middle area. The most important areas were concentrated in the upper reaches of Meijiang River basin, Pingjiang River basin, Beiling River basin, Youjiang River basin, and Taojiang River basin, as well as Wuyi Mountains to the east of Mianjiang River basin and Xiangshui River Basin. The water conservation depth averaged over many years was 213.48 mm. ③ The areas with significant soil and water conservation functions in Ganzhou City had strong spatial correlations. Compared with the existing natural reserves, the protection vacancy area was 6 155.54 hm<sup>2</sup>. There were several obvious areas with no protection around them that were located in the north of Xingguo County, the northeast of Shicheng County, the northwest and southeast of Ruijin City, and the middle of Quannan County, the southeast of Anyuan County, and the west of Xunwu County. [Conclusion] Climate factors, land use changes, and topographic and geomorphic conditions were important factors affecting the spatial and temporal differentiation of soil and water conservation functions in Ganzhou City. Ecological protection and restoration strategies should be adopted for the protection of vacant areas and functionally degraded areas.

**Keywords:** soil conservation; water conservation; spatiotemporal pattern; protection vacancies; Ganzhou City, Jiangxi Province

生态系统服务是指生态系统直接和间接给予人类的所有惠益<sup>[1-2]</sup>。社会经济的快速发展使得生态系统愈加退化<sup>[3-4]</sup>,生态系统服务成为了生态系统综合评估的热点和核心内容<sup>[5-6]</sup>。以自然保护区为核心,重点生态功能区、生物多样性保护优先区为重要补充的保护体系对生态文明建设具有重要作用<sup>[7-9]</sup>,明晰生态系统服务时空格局和权衡协同关系有利于保护区域划定和功能定位<sup>[10-13]</sup>。近年来高空间分辨率数据集和数学模型被广泛应用<sup>[14]</sup>,生态系统服务价值的时空分异特征也备受关注<sup>[15]</sup>,但国内研究起步较晚,20世纪末傅伯杰等提出了中国生态区划方案,为《全国生态功能区划》的发布奠定了坚实基础<sup>[16-17]</sup>,不同学者也对水土保持和水源涵养服务时空特征开展了相关研究,通用土壤流失方程和基于水量平衡原理 InVEST 模型 Water Yield 模块因功能相对全面而被广泛应用。王彭涛等利用通用水土流失方程评估了汉江上游的水土保持时空格局<sup>[18]</sup>。包玉斌等利用 InVEST 模型定量评估了黄土高原的水源涵养时空特征<sup>[19]</sup>。然而,目前通过分析生态系统服务时空演化特征和权衡协同关系进行保护空缺分析的研究较少。

江西省是首批国家生态文明试验区,肩负探索生态文明建设典型经验和成熟模式的重任,是中国南方地区重要的生态安全屏障,而赣州市更是长江二级支流赣江流域的上游,生态区位十分重要,研究其生态系统功能时空格局和保护空缺,有利于区域发展规划和构建生态安全格局,对提升人类福祉具有重要意义。因此,本文以赣江流域上游赣州市为例,综合 RUSLE 模型、InVEST 模型等生态评价方法和热点

分析、叠加分析等分析工具,结合保护空缺理论,以 2000—2020 年水土保持和水源涵养服务为例,对比现有的保护体系,标识潜在优先保护区,以期为健全保护体系提供科学依据,并丰富自然保护区空缺领域的研究内容。

## 1 研究区概况

赣州市位于中国东南部、江西省南部、赣江上游,地处 24°29′—27°09′N,113°54′—116°38′E 之间,总面积约 3.94×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,辖管 18 个县级政区,总人口 928.10 万人,是江西省最大的行政区。赣州地势总体周高中低,南高北低,有武夷山、雩山、九连山等山脉环绕,西部多中、低山构造剥蚀地貌,中部多丘陵河谷侵蚀堆积地貌,东北部多低山、丘陵构造剥蚀地貌。赣州市河流纵横,水系呈辐辏状向章贡区汇集,全市大部属于赣江上游区,赣南山区是赣江的发源地,也是东江的源头。区内千余条支流汇成上犹江、章水、梅江、琴江、绵江、湘江、濂江、平江、桃江 9 条较大支流。赣州市属亚热带丘陵山区湿润季风气候,年均降水量 1 580.86 mm。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源与处理

研究数据主要包括通用土壤流失方程(RUSLE)、InVEST 模型中产水量模块和水源涵养修正方程所需的卫星数据、土地利用数据、气象数据、土壤数据及相关辅助数据。2000,2010 和 2020 年 30 m 土地利用数据、基础地理信息数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>)。30 m 数

字高程模型数据 (DEM) 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>)。NDVI 数据、LAI 数据分别来源于 NASA (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>) 的 MODIS 13Q1 产品 (16 d 时间分辨率、250 m 空间分辨率) 和 MCD15A2H 产品 (8 d 时间分辨率, 500 m 空间分辨率), 通过 MRT 软件 (MODIS Reprojection Tools) 批处理, 采用最大合成法形成各年份数据集。2000, 2010 和 2020 年 1 km 逐月降水量、潜在蒸发量数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn>)。土深、含砂量等 1 km 土壤理化性质数据来源于世界地理数据库 (HWSD)。流域数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>)。自然保护地数据来源于江西省林业局。通过 ArcGIS 10.6 软件统一所有空间数据分辨率为 30 m × 30 m, 投影坐标系为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_50N。

## 2.2 研究方法

2.2.1 修正通用土壤流失方程 本文采用修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 计算研究区土壤保持情况, 计算公式为:

$$A = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (1)$$

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-1.5527 + 0.1792 \times Q_i) \quad (2)$$

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 \times S_a \times \left( 1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \times \left[ \frac{S_i}{C_l + S_i} \right]^{0.3} \times \left[ 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[ 1 - \frac{0.7S_p}{S_p + \exp(-5.51 + 22.9S_a)} \right] \quad (3)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & (5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ) \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

$$C = \begin{cases} 1 & (V_f = 0) \\ 0.6508 - 0.3436 \lg V_f & (0 < V_f \leq 78.3\%) \\ 0 & (V_f > 0) \end{cases} \quad (5)$$

$$V_f = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) \quad (6)$$

式中:  $A$  为年平均土壤保持量;  $R$  为采用月降雨模型计算的降雨侵蚀力;  $K$  为土壤可蚀性因子;  $L$  为坡长因子, 利用地形因子计算工具基于坡长法计算;  $S$  为坡度因子;  $C$  为植被覆盖管理因子, 采用像元二分类模型计算;  $P$  为水土保持措施因子;  $Q_i$  为第  $i$  个月降雨量;  $S_a$  为土壤中百分比砂含量;  $S_p$  为  $S_a$  除以 100;  $S_i$  为百分比粉粒含量;  $C_l$  为百分比黏粒含量;  $OC$  为百分比有机碳含量;  $V_f$  为植被覆盖度;  $NDVI$  为归一化植被指数;  $NDVI_{\text{soil}}$  为完全是裸土或无植被

覆盖区的  $NDVI$ ;  $NDVI_{\text{veg}}$  为完全被植被覆盖区的  $NDVI$ 。

2.2.2 水源涵养模型 根据水循环原理, 利用 InVEST 模型中的产水量模块计算年产水量, 再通过流速系数、地形指数、土壤饱和导水率对产水量进行修正, 获得研究区水源涵养量, 计算公式为:

$$R_x = \min \left( 1, \frac{249}{V_i} \right) \times \min \left( 1, \frac{0.9 \times T_l}{3} \right) \times \min \left( 1, \frac{K_{\text{sat}}}{3} \right) \times Y_i \quad (7)$$

$$Y_i = \left( 1 - \frac{\text{AET}_{xj}}{P_x} \right) P_x \quad (8)$$

$$\frac{\text{AET}_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + 1 \div R_{xj}} \quad (9)$$

$$P_{\text{awc}} = 54.509 - 0.132S_a - 0.003S_a^2 - 0.055S_i - 0.006S_i^2 - 0.738C_l + 0.007C_l^2 - 2.688OC + 0.501OC^2 \quad (10)$$

$$T_l = \lg \left( \frac{D_m}{S_d \times P_s} \right) \quad (11)$$

式中:  $R_x$  为年水源涵养量 (mm);  $V_i$  为流速系数;  $T_l$  为地形指数;  $K_{\text{sat}}$  为土壤饱和导水率 (cm/d), 利用 NeuroTheta 软件计算得到;  $Y_i$  为年产水量 (mm);  $\text{AET}_{xj}$  为土地利用类型  $j$  上栅格单元  $x$  的年平均蒸散发量 (mm);  $P_x$  为栅格单元  $x$  的年平均降雨量 (mm);  $R_{xj}$  为像元  $j$  类土地利用类型的像元  $x$  的干燥度指数, 为潜在蒸发量与降水量的比值;  $W_x$  为无量纲土壤性质参数。  $P_{\text{awc}}$  为植被可利用水;  $D_m$  为集水区栅格数量;  $S_d$  为土壤深度 (mm);  $P_s$  为百分比坡度。

2.2.3 热点分析 Getis-Ord  $G_i^*$  可以用来分析赣州市土壤保持和水源涵养功能的时空集聚特征, 能够清晰地可视化土壤保持和水源涵养功能强弱的时空格局。计算公式为:

$$G_i^* (d) = \frac{\sum_j^n W_{ij} (d) X_j}{\sum_j^n X_j} \quad (12)$$

式中:  $d$  为距离;  $W_{ij} (d)$  为以距离规则定义的空间权重;  $X_i, X_j$  分别是  $i$  和  $j$  区域的观测值; 当  $G_i^*$  为正时, 表明高值空间集聚 (热点区), 当  $G_i^*$  为负, 表明低值空间集聚 (冷点区)。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用变化

由表 1 和图 1 可知, 2000—2020 年总体上, 赣州市土地利用面积表现为: 林地 > 耕地 > 草地 > 建设用

地>水域>未利用地。其中,林地以有林地为主,主要集中在四周边界的九连山脉、罗霄山脉、武夷山脉和中部丘陵地区,占赣州市总面积的 1/2 以上;灌木林地和疏林地整体呈减少趋势;其他林地则在 20 a 间快速增加,这与当地发展赣南脐橙等林果经济相关。耕地中水田旱地比保持在约 6.5 : 3.5,主要集中在赣州市区周边、信丰县等地的地势较平坦区域,20 a 间总面积变化较小,退化区域主要在赣州市城区周边转为城市用地等建设用地。草地以高覆盖

度草地和中覆盖度草地为主,多零散分布在各处林地边缘,20 a 间变化幅度较小。水域主要为阳明湖等、赣江等河湖,20 a 间呈缓慢减少趋势。未利用地面积较小,20 a 间变化也较小。建设用地总体呈显著增加趋势,在 2010—2020 年增长最快,增加部分多由位于城区边缘和城市连通线上的和林地和耕地转入。20 a 间,城镇用地、农村居民用地、其他建设用地分别增加 50.03,28.36 和 264.28 km<sup>2</sup>,同比增长 64.23%,10.42% 和 1 561.54%,表明赣州市城市扩张速度较快。

表 1 赣州市 2000—2020 年各土地利用类型面积、比例及变化

Table 1 Proportion and changes of land use types at Ganzhou City from 2000 to 2020

土地利用类型	2000 年		2010 年		2020 年		2000—2020 年变化	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	变化率/%
水田	4 280.18	10.89	4 359.74	11.09	4 284.88	10.90	4.70	0.11
旱地	2 529.44	6.43	2 584.26	6.57	2 527.36	6.43	-2.09	-0.08
有林地	20 602.92	52.40	21 055.24	53.55	20 876.72	53.10	273.80	1.33
灌木林地	1 572.69	4.00	1 354.49	3.44	1 342.89	3.42	-229.80	-14.61
疏林地	7 108.27	18.08	6 568.75	16.71	6 513.54	16.57	-594.73	-8.37
其他林地	235.60	0.60	384.64	0.98	381.72	0.97	146.12	62.02
高覆盖度草地	1 742.73	4.43	1 673.72	4.26	1 808.19	4.60	65.46	3.76
中覆盖度草地	447.95	1.14	442.19	1.12	439.92	1.12	-8.03	-1.79
低覆盖度草地	51.02	0.13	49.97	0.13	50.04	0.13	-0.97	-1.91
河渠	185.25	0.47	186.51	0.47	189.60	0.48	4.35	2.35
湖泊	1.72	0.00	1.73	0.00	1.70	0.00	-0.01	-0.79
水库、坑塘	110.28	0.28	108.27	0.28	109.50	0.28	-0.78	-0.71
滩地	82.16	0.21	85.84	0.22	81.52	0.21	-0.63	-0.77
城镇用地	77.90	0.20	117.13	0.30	127.93	0.33	50.03	64.23
农村居民点	272.14	0.69	282.64	0.72	300.51	0.76	28.36	10.42
其他建设用地	16.92	0.04	59.03	0.15	281.21	0.72	264.28	1 561.54
未利用地	2.19	0.01	2.11	0.01	2.12	0.01	-0.07	-3.16

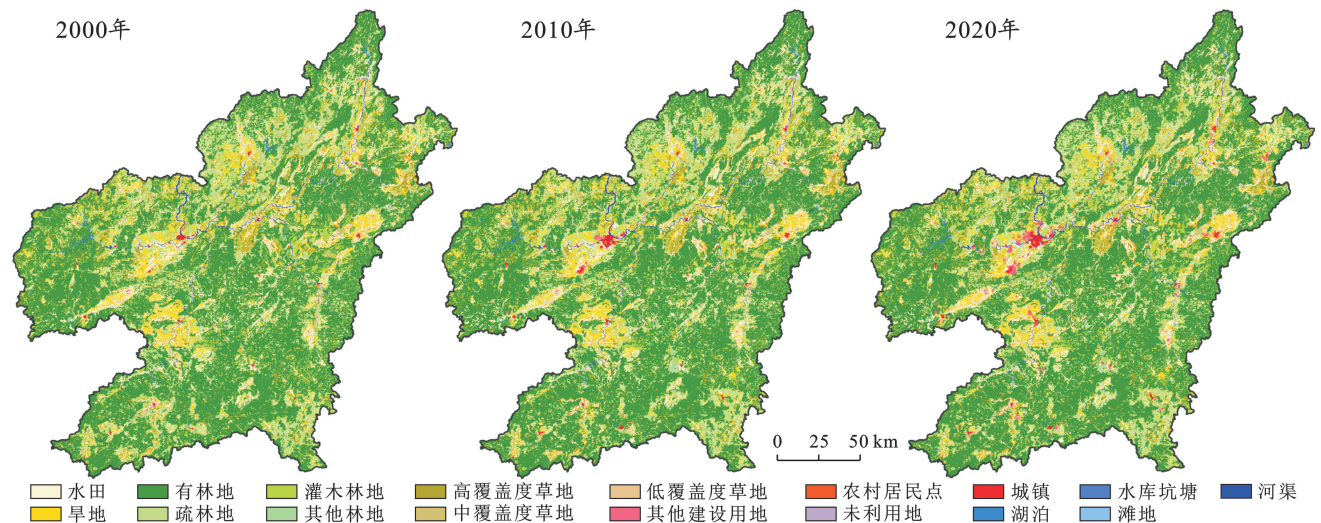


图 1 赣州市 2000—2020 年各土地利用类型空间分布

Fig.1 Spatial distribution of various land use types at Ganzhou City from 2000 to 2020



### 3.2 土壤保持服务重要性分级及时空格局

赣州市 2000, 2010 和 2020 年土壤保持总量分别为  $7.40 \times 10^8$  t,  $8.70 \times 10^8$  t 和  $9.29 \times 10^8$  t, 20 a 间年土壤保持能力持续提升, 其中 2000—2010 年增加了  $1.30 \times 10^8$  t, 同比增长 17.57%, 2010—2020 年增加了  $0.59 \times 10^8$  t, 同比增长 6.78%, 总保持量变化的最主要原因是年降水量和蒸散发量等气候发生变化。为更为直观地展现赣州市土壤保持功能的时空格局和重要性分级, 本文参考前人研究和《国家生态保护红线—生态功能红线划定技术指南》<sup>[20]</sup>, 根据赣州市实际情况, 采用分位数分类方法将研究区土壤保持功能按相对值从低到高依次分为 5 个重要性等级, 即一般重要 ( $0 \sim 50$  t/hm<sup>2</sup>), 较重要 ( $50 \sim 200$  t/hm<sup>2</sup>), 中度

重要 ( $200 \sim 350$  t/hm<sup>2</sup>), 高度重要 ( $350 \sim 500$  t/hm<sup>2</sup>), 极重要 (大于  $500$  t/hm<sup>2</sup>)。根据表 2 和图 2 可知, 2000—2020 年赣州市土壤保持功能一般重要、高度重要区的面积比例上下浮动较小, 较重要区和中等重要区的面积 20 a 间分别持续减少 974.69 和 1 542.71 km<sup>2</sup>, 比例分别持续降低了 2.04% 和 3.94%, 而极重要区的面积 20 a 间持续增加 2 240.29 km<sup>2</sup>, 比例持续提升了 5.75%。在空间上, 2000—2020 年土壤保持功能等级具有相似的分布特征, 总体表现为周高中低, 其中极重要区主要集中分布在西部的罗霄山脉、南部的九连山脉、东部的武夷山脉和北部的庾山山脉, 一般重要区主要分布在赣州市区、信丰县、于都县等县区的城区和连通处。

表 2 赣州市 2000—2020 年各土壤保持服务等级面积及比例

Table 2 Area and proportion of soil conservation service levels at Ganzhou City from 2000 to 2020

年份	一般重要		较重要		中等重要		高度重要		极重要	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
2000 年	12 215.70	31.35	7 601.60	19.51	5 555.41	14.26	3 605.04	9.25	9 988.08	25.63
2010 年	11 862.28	30.44	6 819.93	17.50	5 356.89	13.75	3 334.36	8.56	11 592.36	29.75
2020 年	12 248.00	31.43	6 806.92	17.47	4 012.70	10.30	3 669.84	9.42	12 228.36	31.38

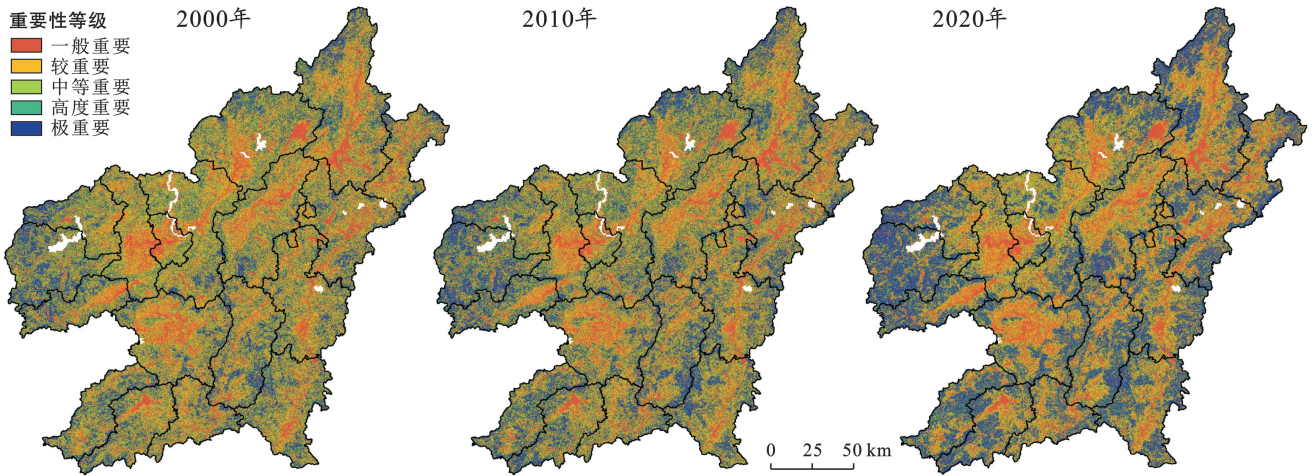


图 2 赣州市 2000—2020 年土壤保持服务等级分布

Fig.2 Distribution of soil conservation service grades at Ganzhou City from 2000 to 2020

### 3.3 水源涵养服务重要性分级及时空格局

赣州市 2000, 2010 和 2020 年水源涵养深度均值分别为 204.49, 255.57 和 180.39 mm, 20 a 间先增后减。降水是生态系统涵养水源最直接的来源, 为更为直观地反映各年份水源涵养功能的实际效率, 以年平均水源涵养深度和年平均降水量的比值作为对照构建水源涵养系数, 值越大表示涵养功能越强。赣州市 2000, 2010 和 2020 年平均降水量 1 619.36, 1 833.34 和 1 536.23 mm, 则水源涵养系数分别为 0.126 3, 0.139 4 和 0.117 4, 表明 2010 年水源涵养效率较高,

2020 年水源涵养效率较低。同样为更为直观地展现赣州市水源功能的时空格局和重要性分级, 采用分位数分类方法对研究区水源涵养功能涵养深度从低到高依次分为 5 个重要性等级, 即一般重要 ( $0 \sim 100$  mm), 较重要 ( $100 \sim 150$  mm), 中度重要 ( $150 \sim 200$  mm), 高度重要 ( $200 \sim 250$  mm), 极重要 (大于  $250$  mm)。根据表 3 和图 3 可知, 2000—2020 年赣州市水源涵养功能一般重要区和较重要区面积持续上升, 20 a 间面积分别增加 737.21 和 2 216.01 km<sup>2</sup>, 比例分别提升 2.00% 和 6.02%。中等重要区、高度重要区的面积则

表现出先减后增。极重要区的面积比例情况发生了较大变化,先由 2000 年的 31.48% 提升到了 2010 年的 35.35%, 原因为 2010 年的年降水量显著高于另外两年,符合水源涵养系数和水量平衡原理。之后再迅速降低为 2020 年的 12.83%, 主要原因为 2020 年的年降水量低于往年,在研究区东侧的梅江流域、绵江流域、湘水流域表现最为明显,导致这些区域水源涵养深度明显降低,功能等级也由极重要转为高度重要

和中等重要。另一原因则与土壤保持功能降低的原因相似,即城市附近和联通处的部分极重要区的土地覆被转变为了建设用地。在空间上,2000—2020 年赣州市水源涵养功能时空格局特征同样表现为周高中低,极重要区主要分布在梅江流域和平江流域上游、桃江流域、贝岭水流域上游、绵江流域和湘水流域东侧的武夷山脉、犹江流域上游,一般重要区则集中在中部的城区和连通处。

表 3 赣州市 2000—2020 年各水源涵养服务等级面积及比例

Table 3 Area and proportion of water source conservation service levels at Ganzhou City from 2000 to 2020

年份	一般重要		较重要		中等重要		高度重要		极重要	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
2000	5 628.37	15.29	3 184.43	8.65	6 202.65	16.85	10 205.06	27.72	11 588.24	31.48
2010	6 379.17	17.33	4 105.03	11.15	4 084.62	11.10	9 229.49	25.07	13 010.45	35.35
2020	6 365.59	17.29	5 400.44	14.67	7 990.80	21.71	12 329.33	33.50	4 722.61	12.83

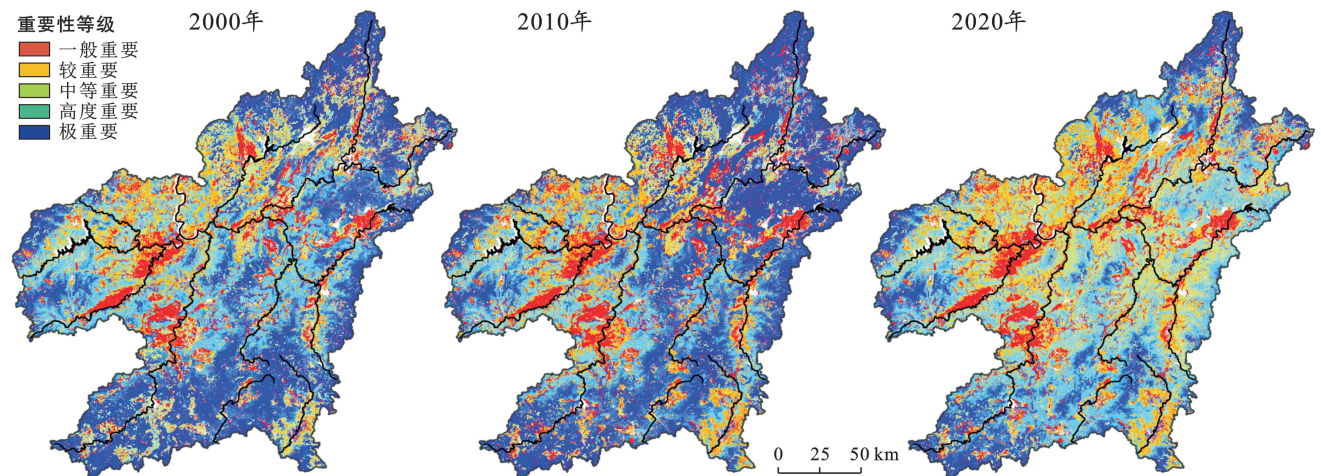


图 3 赣州市 2000—2020 年水源涵养服务等级分布

Fig.3 Distribution of water conservation service grades at Ganzhou City from 2000 to 2020

### 3.4 保护空缺分析

保护空缺分析是在大空间尺度上识别生物多样性和生态系统保护的有效方法之一,是指通过遥感和评价模型等技术手段,结合实地调查资料,通过在空间上叠加目标要素与保护现状进行对比,以此来识别出尚未保护但应保护的区域。本文将赣州市土壤保持和水源涵养功能作为目标要素,为均衡降水量、蒸散发量的变化引起的误差,取 2000, 2010 和 2020 年 3 a 的土壤保持量和水源涵养量的平均值,通过热点分析法分别识别出土壤保持功能和水源涵养功能的冷热点空间分布情况(图 4),并通过叠加分析得到二者热点间的空间分布关系,将重叠区域标识为应保护区的区域,再叠加比对现有保护情况进行保护空缺分析,得到保护空缺区(图 5)。热点分析得到土壤保持功能热点面积 12 622.14 hm<sup>2</sup>, 占赣州市面积的 32.07%。得到水源涵养功能热点面积 12 409.02 hm<sup>2</sup>,

占赣州市面积的 31.53%。二者重叠面积 7 938.80 hm<sup>2</sup>, 占赣州市面积的 20.17%, 分别占土壤保持和水源涵养热点面积的 62.90% 和 63.98%, 表明二者的空间分布情况存在较强的关联性,这与赣州市的地形地貌本底条件和土地利用情况相关,热点区主要位于赣州市四周的山脉,森林覆盖率高,生态条件优越,受人类活动影响较低,土地利用类型多为有林地,冷点区主要位于中部的盆地、低山和丘陵,植被覆盖度较低,与人类生活生产密切相关,土地利用类型多为建设用地、耕地和种植水果的其他林地。赣州市现有保护地面积 5 371.35 hm<sup>2</sup>, 与土壤保持和水源涵养的热点重叠区重叠面积 1 784.26 hm<sup>2</sup>, 保护空缺区面积 6 155.54 hm<sup>2</sup>, 空缺率为 77.53%。空缺率较高的原因是部分空缺区域以生态红线、公益林等为保护形式,未纳入保护地体系中,大空间尺度的国土空间规划三区三线数据、国土“三调”融合数据、天保林、公益



林等数据相对保密,难以获得,另一方面是土壤保持和水源涵养生态系统功能仅是自然保护地的保护对象之一,尽管在评价时考虑了气候、土壤、地形、人为活动等综合因素,但在保护空缺分析时仍会使得空缺率较高。

根据结果,保护空缺区有几处较为明显且周边无保护地的集中分布区,分别位于兴国县北部、石城县东北部、瑞金市西北部和东南部、全南县中部、安远县东南部和寻乌县西部。这些区域理论上可能是今后建立保护区域的潜在优先区。

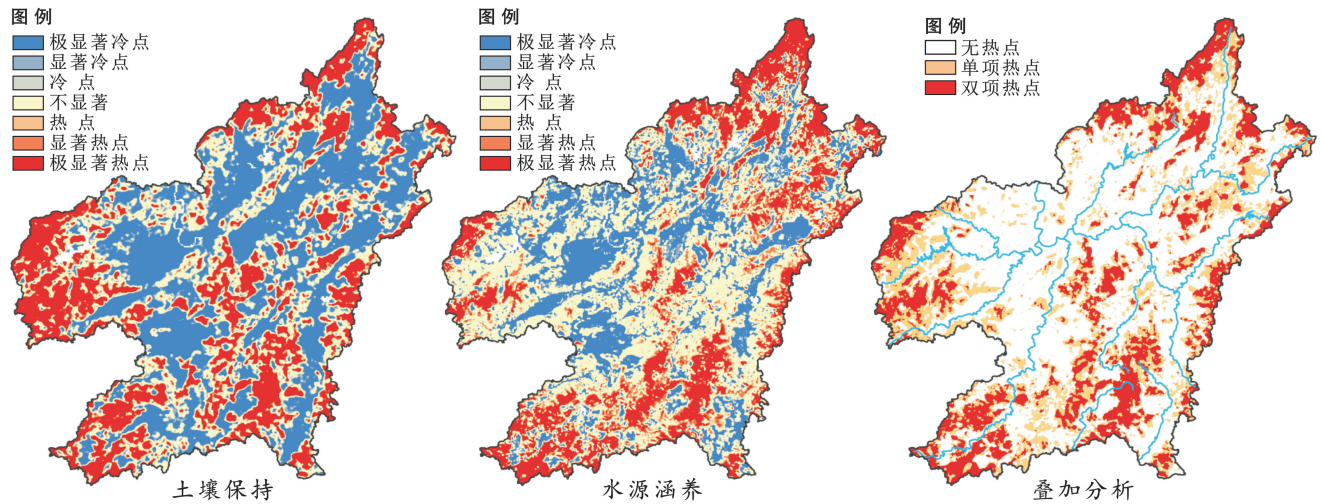


图 4 赣州市热点分析及叠加分析

Fig.4 Hot spot analysis and overlay analysis at Ganzhou City

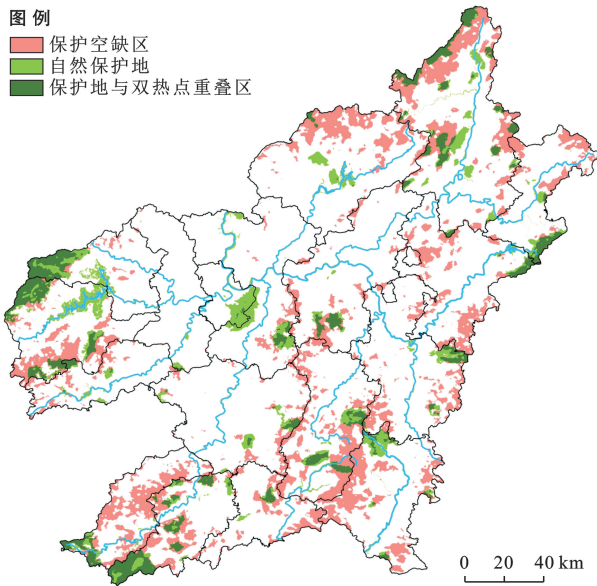


图 5 赣州市保护空缺分析

Fig.5 Analysis of protection vacancies at Ganzhou City

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本文综合 RUSLE 模型、InVEST 模型等生态评价方法和热点分析、叠加分析等分析工具,结合保护空缺理论,选取土壤保持和水源涵养功能为基底,比对现有的保护体系,标识潜在优先保护区域,对政府部门制定区域开发战略,健全保护体系和构建生态安

全格局具有理论和现实意义。根据研究结果,赣州市土壤保持功能和水源涵养功能的时空格局具有明显的分异特征,并且二者间具有较强的关联性。

赣州市土壤保持功能 2000,2010 和 2020 年土壤保持总量分别为  $7.40 \times 10^8$  t,  $8.70 \times 10^8$  t 和  $9.29 \times 10^8$  t, 20 a 间年土壤保持能力持续提升,造成土壤保持总量变化的原因主要是气候变化。本文采用通用土壤流失方程计算土壤保持量,年降水量的减少使得降雨侵蚀力因子减小,降低了形成地表径流的条件和地表径流搬运土壤物质的可能,使得土壤保持总量上升,极重要区的面积比例增加。在空间上,土壤保持功能周高中低,原因为赣州市四周主要为罗霄山脉、九连山脉等山地,森林覆盖率高,土地利用类型多为有林地,而中部多盆地、丘陵和低山,且红层和丹霞地貌较多,植被覆盖度较低,受人类活动影响较大,因此土壤保持功能较弱。

赣州市水源涵养深度 20 a 间则表现为先增后减,变化的主要原因主要为降水量和蒸散量的变化。本文基于水量平衡原理计算产水量,赣州市 2000, 2010 和 2020 年年平均降水量分别为 1 619.36, 1 833.34 和 1 536.23 mm,年平均潜在蒸散量分别为 1 220.94, 1 220.37 和 1 261.44 mm,产水量变化表现为先增后减,水源涵养深度也随之变化。同时,城区周边的水源涵养重要性等级明显降低,主要原因为城市的快速

扩张导致了部分林地、草地和耕地转换为了水源涵养功能差的建设用地。在空间上,水源涵养功能的空间分异和原因与土壤保持功能相似。

综上所述,气候因素、土地利用变化、地形地貌条件是影响赣州市土壤保持和水源涵养功能时空分异的重要因素。此外,土壤保持和水源涵养量的计算是极其复杂的综合性过程,由于数据获取、模型参数设置等原因,计算结果存在一定误差,在今后研究中,可以通过加强野外监测、设置样地验证等方法提高模拟精度。

## 4.2 结论

(1) 2000—2020年,赣州市土壤保持功能空间特征总体表现为周高中低,极重要区集中分布在四周的罗霄山脉、九连山脉、武夷山脉和庾山山脉;多年平均土壤保持总量为  $8.46 \times 10^8$  t,保持总量持续提升,主要原因为降水量和蒸散发量等气候因素的变化。

(2) 20 a 间,赣州市水源涵养功能空间特征也表现为周高中低,极重要区集中分布在梅江流域、平江流域、贝岭水流域、犹江流域和桃江流域的上游及绵江流域和湘水流域东侧的武夷山脉;多年平均水源涵养深度为 213.48 mm,2010 年因降水最为充沛而水源涵养功能最为显著。

(3) 结合生态评价、热点分析、叠加分析等方法和保护空缺理论,发现土壤保持和水源涵养功能显著的区域在空间上具有较强的关联性,热点重叠率约 63%,对比现有保护体系标识保护空缺面积 6 155.54 hm<sup>2</sup>,空缺率达 77.53%,保护空缺区有几处较为明显且周边无保护地的集中分布区,分别位于兴国县北部、石城县东北部、瑞金市西北部和东南部、全南县中部、安远县东南部和寻乌县西部。

## [参 考 文 献]

- [1] Daliy G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington D C: Island Press, 1997.
- [2] Boyd J, Banzhaf S. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units [J]. *Ecological Economics*, 2007, 63(2/3): 616-626.
- [3] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human domination of earth's ecosystems [J]. *Science*, 1997, 277(5325): 494-499.
- [4] Fisher B, Polasky S, Sterner T. Conservation and human welfare: economic analysis of ecosystem services [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2011, 48(2): 151-159.
- [5] 侯鹏,王桥,申文明,等.生态系统综合评估研究进展:内涵、框架与挑战[J].*地理研究*, 2015, 34(10): 1809-1823.
- [6] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(15): 253-260.
- [7] 侯鹏,杨旻,翟俊,等.论自然保护地与国家生态安全格局构建[J].*地理研究*, 2017, 36(3): 420-428.
- [8] 侯鹏,王桥,房志,等.国家生态保护重要区域植被长势遥感监测评估[J].*生态学报*, 2013, 33(3): 780-788.
- [9] Jianguo Liu, Shuxin Li, Zhiyun Ouyang, et al. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105: 9477-9482.
- [10] 李淑娟,高琳.胶州湾北岸滨海地区 4 个时期生态系统服务价值和生态功能区划分研究[J].*湿地科学*, 2020, 18(2): 129-140.
- [11] 张渝萌,李晶,曾莉,等.基于 OWA 多属性决策的生态系统服务最优保护区选择研究:以渭河流域(关天段)为例[J].*中国农业科学*, 2019, 52(12): 2114-2127.
- [12] 祝萍,刘鑫,郑瑜晗,等.北方重点生态功能区生态系统服务权衡与协同[J].*生态学报*, 2020, 40(23): 8694-8706.
- [13] 李奇,朱建华,肖文发.生物多样性与生态系统服务:关系、权衡与管理[J].*生态学报*, 2019, 39(8): 2655-2666.
- [14] 赵筱青,石小倩,李取豪,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.
- [15] 李双成,王珏,朱文博,等.基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架[J].*地理学报*, 2014, 69(11): 1628-1639.
- [16] 傅伯杰,陈利顶,刘国华.中国生态区划的目的、任务及特点[J].*生态学报*, 1999, 19(5): 3-7.
- [17] 傅伯杰,刘国华,陈利顶,等.中国生态区划方案[J].*生态学报*, 2001, 21(1): 1-6.
- [18] 王鹏涛,张立伟,李英杰,等.汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J].*地理学报*, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [19] 包玉斌,李婷,柳辉,等.基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J].*地理研究*, 2016, 35(4): 664-676.
- [20] 潘韬,吴绍洪,戴尔阜,等.基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J].*应用生态学报*, 2013, 24(1): 183-189.