

# 赣南地区土壤保持功能的时空变化特征

罗诚康<sup>1</sup>, 杜思敏<sup>2</sup>, 郑博福<sup>1</sup>, 谢泽阳<sup>1</sup>, 吴之见<sup>1</sup>, 朱锦奇<sup>1</sup>

(1.南昌大学 资源环境与化工学院 江西生态文明研究院, 江西 南昌 330031; 2.江西财经职业学院, 江西 九江 332000)

**摘要:** [目的] 分析赣南地区土壤保持功能时空特征, 为提升该区土壤保持能力和维护南方丘陵生态安全屏障提供科学依据。[方法] 利用 InVEST 模型, 计算 2000, 2010, 2018 年赣南地区不同土地利用类型、不同高程、不同坡度、不同县域的土壤保持强度, 分析土壤保持强度与 NDVI 空间相关性和赣南地区土壤保持功能时空特征。[结果] ① 2000—2018 年, 研究区耕地、灌林地、水域和未利用土地面积都处于减少趋势, 城镇用地和农村居民地面积都有较大的增长。② 土壤保持强度由 189.93 t/(hm<sup>2</sup>·a) 上升为 190.50 t/(hm<sup>2</sup>·a), 其中有林地土壤保持强度最高, 并由 259.85 t/(hm<sup>2</sup>·a) 上升为 262.03 t/(hm<sup>2</sup>·a)。③ 赣南地区土壤保持强度呈现四周高、中部低的分布格局, 随海拔升高先升高再降低, 随坡度升高而升高。④ 土壤保持强度与 NDVI 在双变量局部空间自相关分析中呈现显著正相关( $p < 0.01$ ), 高高集聚区在赣南地区北部、西部及南部; 高低集聚区为中部地区(于都县); 低低集聚区为高经济发展地区(章贡区、赣县区、南康区)。[结论] 赣南地区土壤保持强度与土地利用类型、高程、坡度、NDVI、经济发展水平有着密切关系。为保证土壤保持强度与土壤保持量的稳步提升, 应增加低海拔低坡度地区土壤保护措施, 并提高中低山区土地利用类型的空间变异性, 缓解赣南地区水土流失状况。

**关键词:** 土壤保持功能; 生态系统服务; InVEST 模型; 空间相关性; 赣南地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)03-0057-09

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 罗诚康, 杜思敏, 郑博福, 等. 赣南地区土壤保持功能的时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 57-65. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.009; Luo Chengkang, Du Simin, Zheng Bofu, et al. Temporal and spatial change characteristics of soil conservation function in Southern Jiangxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 57-65.

## Temporal and Spatial Change Characteristics of Soil Conservation Function in Southern Jiangxi Province

Luo Chengkang<sup>1</sup>, Du Simin<sup>2</sup>, Zheng Bofu<sup>1</sup>, Xie Zeyang<sup>1</sup>, Wu Zhijian<sup>1</sup>, Zhu Jinqi<sup>1</sup>

(1.School of Resources, Environmental & Chemical Engineering,

Jiangxi Institute of Ecological Civilization, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi

330031, China; 2.Jiangxi Vocational College of Finance and Economics, Jiujiang, Jiangxi 332000, China)

**Abstract:** [Objective] The temporal and spatial change characteristics of a soil conservation function in Southern Jiangxi Province were analyzed in order to provide a scientific basis for improving soil conservation capacity and maintaining an ecological security barrier in southern hills. [Methods] The InVEST model was used to calculate the soil retention capacity of different land use types, different elevations, different slopes, and different counties in Southern Jiangxi Province using data observed during 2000, 2010, and 2018. The spatial correlations between soil conservation capacity and NDVI, and the temporal and spatial characteristics of soil conservation functions in Southern Jiangxi Province were analyzed. [Results] ① The areas of cultivated land, irrigated forest land, water, and unused land decreased, while the areas of urban land and rural residential land increased. ② The value of soil retention capacity increased from 189.93 t/(hm<sup>2</sup>·yr) to 190.50 t/(hm<sup>2</sup>·yr), and the peak values were observed in forest land, which increased from 259.85 t/(hm<sup>2</sup>·yr) to 262.03 t/(hm<sup>2</sup>·yr). ③ The value of soil retention capacity in the boundary region was higher than in the central region. The value increased first and then decreased with increasing altitude, and increased with

收稿日期: 2021-10-24

修回日期: 2022-01-11

资助项目: 国家重点研发计划课题“南方丘陵山地屏障生态系统服务格局及演变机”(2017YFC0505601)

第一作者: 罗诚康(1996—), 男(汉族), 江西省樟树市人, 硕士, 主要从事土壤保持及生态系统服务方面研究。Email: 2512364392@qq.com。

通信作者: 朱锦奇(1991—), 男(汉族), 江西省九江市人, 博士, 主要从事生态修复及水土保持方面研究。Email: zhujq@ncu.edu.cn。

increasing slope. ④ Soil retention capacity and NDVI were positively correlated ( $p < 0.01$ ). The high-high agglomeration areas were located in the northern, western, and southern regions; the high-low agglomeration area was located in the central region (including Yudu County); and the low-low agglomeration area was located in Zhanggong County, Gan County, and Nankang County. [Conclusion] Soil retention capacity in the Gannan region was highly associated with land use type, elevation, slope, NDVI, and economic development level. To improve the value of soil retention capacity, soil protection measures in low-altitude and low-slope areas should be increased. Additionally, improving soil retention capacity in the middle and low mountainous areas by increasing the spatial variation of land use types in the low and middle mountain areas would reduce soil erosion and ecological risk in mountainous areas.

**Keywords:** soil conservation function; ecosystem service; InVEST model; spatial correlation; Gannan region

水土保持功能不但对土地生产力、土壤肥力、粮食产量产生积极影响<sup>[1]</sup>,还可以保留沉积物,使河流输沙量减少,对下游地区的灌溉、污水处理、水库蓄洪产生一定影响,是生态系统服务调节服务的重要组成部分。水土保持量由土壤潜在侵蚀量与土壤实际侵蚀量决定。江西省作为中国土壤侵蚀最严重的省份之一,2013年全省土壤侵蚀总面积为 26 496.87 km<sup>2</sup>,其中赣州市土壤侵蚀面积为 7 816.67 km<sup>2</sup>,省内占比最大<sup>[2]</sup>。1980年以来,赣州地区开展了大规模的林果业开发,其中2018年果园种植总面积达到 1 402.44 km<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。近年来赣州市的经济快速发展,土地利用情况发生了巨大的变化,2018年建设用地达到 817.11 km<sup>2</sup>。因人为活动导致的土壤侵蚀的加剧成为了该地区林果业发展与生态治理领域迫切需要解决的问题<sup>[4]</sup>,水土保持服务面临严峻挑战<sup>[5]</sup>。

InVEST(integrated valuation of environmental services and tradeoffs)模型通过使用地貌、气候、植被覆盖率和管理实践的信息来估计地块保留沉积物的能力,是在USLE模型<sup>[6]</sup>基础上加以改进,考虑了土壤自身拦截沉积物的能力,并加入了水库数据,使水土保持功能评价得更加合理与准确。目前该模型已经相对成熟,在国内生态系统服务评估中是一个不断发展完善、不断趋于多元化的一个过程<sup>[7]</sup>,早期研究主要是应用于北京山区和长江流域,并探讨了不同森林类型之间水土保持功能的差异<sup>[8]</sup>;2013年之后,InVEST模型在中国的应用区域越来越广泛<sup>[9-10]</sup>。InVEST模型可以快速简便地量化生态系统服务水土保持功能,评估结果直观体现水土保持功能的重要程度和空间格局,使生态系统服务功能综合管理和决策有了坚实的保障<sup>[11]</sup>。

赣南地区是中国典型的南方山地丘陵区,地处南岭山脉、武夷山脉、罗霄山脉三大山脉交界地区,位于鄱阳湖流域赣江源头区和珠江支流东江源头区,具有水源涵养水土保持等生态系统服务功能,是中国“两

屏三带”生态安全战略格局的重要组成部分<sup>[12]</sup>。赣南地区多为酸性红壤,抗侵蚀力较差<sup>[13]</sup>,再加上人为乱砍滥伐,陡坡开荒、植被破坏等不合理操作,造成区域水土流失、土壤肥力降低<sup>[14]</sup>。作为中国重要的南方丘陵生态保护区和脐橙种植地,赣南地区水土保持功能是影响民生与人类福祉的重要服务指标。本研究运用InVEST模型,对赣南地区2000—2018年水土保持功能进行时空变化特征分析,通过GeoDa软件进行空间相关性分析,为当地政府及相关部门的产业布局与生态建设提供理论依据<sup>[15]</sup>。

## 1 研究区概况

赣南地区位于江西南部,主要由地级赣州市下辖的3区13县2县级市组成,地处东经113°54′—116°38′,北纬24°29′—27°09′,总面积约为3.94×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占江西省总面积的23.6%(图1)。赣南地区属于中亚热带,呈亚热带季风性湿润气候,光照充足,雨量充沛,多年平均降雨量1 605.2 mm,多年平均温度18.9℃。地形复杂,以山地、丘陵、盆地为主。

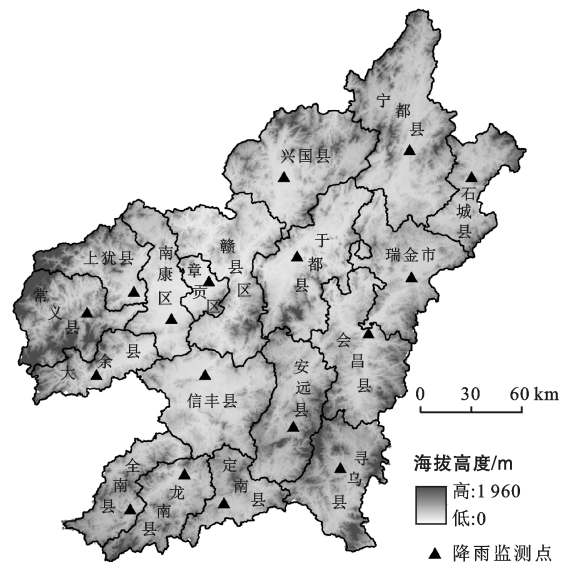


图1 赣南地区地形及降雨监测点分布

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

高程(DEM)数据来自地理空间数据云 ASTER GDEM(<http://www.gscloud.cn/>),分辨率为 30 m。降雨气候数据来源于中国气象数据网在赣南地区的 17 个气象站点多年平均降雨量插值。土壤数据基于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSO)的中国数据集,来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://data.casnw.net>),中国境内数据源为第二次全国土地调查南京土壤所提供 1:100 万土壤数据。土地利用数据和 NDVI 来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。社会经济数据来源于《赣州统计年鉴》。

### 2.2 研究方法

2.2.1 土壤保持功能计算 土壤保持功能采用 InVEST 模型中泥沙输移比模块(SDR)进行计算,该模块以基于像元尺度的 USLE 计算方法为基础,集土地利用数据、土壤属性以及 DEM 数据、降雨数据、植被覆盖因子和水土保持措施因子等数据一起,以栅格为计算单元而实现运行,并产生基于流域及栅格单元的两种评估结果<sup>[16]</sup>。

$$SEDRET_x = RKLS_x - USLE_x + SEDR_x \quad (1)$$

$$RKLS_x = R_x \cdot K_x \cdot LS_x \quad (2)$$

$$USLE_x = R_x \cdot K_x \cdot LS_x \cdot C_x \cdot P_x \quad (3)$$

$$SEDR_x = SE_x \sum_{y=1}^{x-1} USLE_y \prod_{z=y+1}^{x-1} (1 - SE_z) \quad (4)$$

式中:SEDRET<sub>x</sub> 为栅格 x 的土壤保持量(t)。SEDR<sub>x</sub> 为栅格 x 泥沙持留量(t)。RKLS<sub>x</sub> 为栅格 x 的土壤潜在侵蚀量(t)。USLE<sub>x</sub> 和 USLE<sub>y</sub> 分别为栅格 x 及其上坡栅格 y 的实际侵蚀量(t)。R<sub>x</sub> 因子表示降雨侵蚀力因子;K<sub>x</sub> 表示土壤可蚀性因子;L 表示坡长因子;S<sub>x</sub> 表示坡度因子;C<sub>x</sub> 表示植被覆盖因子(无量纲);P<sub>x</sub> 表示保持措施因子(无量纲)。SE<sub>x</sub> 为栅格 x 的泥沙持留效率。

2.2.2 参数选取 降雨是影响土壤侵蚀的一个重要因素,降雨侵蚀力表征了降雨引起土壤发生侵蚀的潜在能力。根据研究区实际情况,R 值计算,选取章文波<sup>[17]</sup>对于全国降雨侵蚀量研究建立的 R 值计算模型,为降低误差,采用多年平均降雨量,将每一个站点逐日降雨量与年平均降雨量进行计算<sup>[17]</sup>,并选用 IDW 插值法得到研究区降雨侵蚀力图<sup>[18]</sup>;土壤可蚀性因子计算,使用 Wischmeier<sup>[6]</sup>建立的土壤可蚀性 K 值计算模型。坡长坡度因子(LS)采取缓坡、陡坡分段计算,坡度阈值默认为 25°<sup>[4]</sup>。对于植被覆盖和

作物管理因子(C),参考赣南地区相关研究成果<sup>[19-20]</sup>,对不同土地利用类型的植被覆盖和作物管理因子进行赋值(表 1)。对于保持措施因子(P),结合赣南地区的相关研究文献和农事活动情况,同时考虑到赣南地区目前不同生态系统的强弱程度,对不同土地利用类型的 P 因子进行本地化赋值<sup>[21]</sup>(表 1)。

表 1 不同土地利用类型 C 值和 P 值

土地利用类型	C	P	土地利用类型	C	P
水田	0.180	0.150	河渠	0	0
旱地	0.228	0.352	湖泊	0	0
有林地	0.005	1	水库坑塘	0	0
灌木林	0.060	1	滩地	0.910	0
疏林地	0.220	1	城镇用地	0	0.001
其他林地	0.180	1	农村居民地	0	0.001
高覆盖度草地	0.240	1	其他建设用	0	0.001
中覆盖度草地	0.150	1	裸土地	1	1
低覆盖度草地	0.800	0.69	裸岩石质地	0	1

2.2.3 数据分析 基于 2000,2010,2018 年 3 期土地利用数据,分析赣南地区土地利用类型变化及驱动因素。利用 InVEST 模型与 ArcGIS 软件,计算赣南地区土壤保持强度与土壤保持量,通过土地利用类型、高程、坡度、县域的尺度进行时间与空间分析。利用 Geo Da 软件中单变量局部 Moran's I 指数分析 2000,2010,2018 年土壤保持强度的空间自相关性。运用全局 Moran's I 指数和双变量局部 Moran's I 指数分析 2000,2010,2018 年土壤保持强度与 NDVI 指数的空间相关性,并绘制 LISA(Local Indicators of Spatial Association)图,分析判断两者空间集聚性和特征性。LISA 集聚图依据评价单元与相邻单元的 Moran's I 指数平均值的关系,把集聚区域划分为高高集聚、高低集聚、低高集聚、低低集聚和不显著 5 种类型<sup>[22-23]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 赣南地区土地利用分布及其变化

林地是赣南地区主要覆盖类型(2000 年林地覆盖率为 74.40%,2010 年为 74.66%,2018 年为 76.20%),其次为水田和旱地,其他土地利用类型占比均较少。在时间变化上,灌林地、疏林地、水田、旱地、水域和未利用土地面积处于减少趋势,有林地、其他林地、草地、湿地、城镇用地和农村居民地面积呈增长趋势,其中疏林地减少面积最高,其次是灌木林,未利用土地减少的面积最低;城镇用地与农村居民点面积增长速率最大(表 2)。随着经济的高速发展,人民对建设的需求增大和城市的急剧扩展,用地量增加,城镇用地

面积的迅速扩张,其中大多由低海拔低坡度的疏林地和水田旱地转化而来;由于自然生长,部分海拔和坡度较大的受人为活动干扰比较小的灌木林和疏林地向有林地转换。水田和旱地由于受到退耕还林还草

政策的影响,向有林地和其他林地进行了转化;但 2010—2018 年之间,部分有林地退化向草地,人为干扰因素导致的毁林开垦、未批先占、少批多占的现象依然存在,使得有林地总面积减小。

表 2 2000—2018 年赣南地区不同土地利用类型面积变化

年份	面积/10 <sup>2</sup> km <sup>2</sup>										
	有林地	灌木林	疏林地	其他林地	草地	水田	旱地	湿地	城镇用地	农村居民点	未利用土地
2000—2010 年	450.53	-218.6	-539.52	149.16	-75.83	79.34	61.08	3.03	81.51	10.56	-0.06
2010—2018 年	-221.72	16.84	-74.45	-5.2	137.66	-118.22	-94.35	1.58	303.02	54.84	0.02
2000—2018 年	228.81	-201.76	-613.97	143.96	61.83	-38.88	-33.27	4.61	384.53	65.4	-0.04

注:变化值为后面年份面积减去前面年份面积。

### 3.2 不同土地利用类型的土壤保持强度与土壤保持量

2018 年赣南地区平均土壤保持强度为 190.50 t/(hm<sup>2</sup>·a),土壤保持总量为 7.47×10<sup>8</sup> t。有林地土壤保持强度为 262.03 t/(hm<sup>2</sup>·a),土壤保持总量为 5.44×10<sup>8</sup> t,均为所有地类中最高(表 3),说明有林地在土壤保持过程中起着重要作用。裸土地没有任何水土保持措施和植被覆盖,土壤保持强度最低。

2000—2018 年期间,赣南地区的各种土地利用类型土壤保持强度均有一定变化,其中疏林地下降了 3.55 t/(hm<sup>2</sup>·a),为 2000 年土壤保持强度的 2.68%;其他林地下降了 17.81 t/(hm<sup>2</sup>·a),为 2000 年土壤保持强度的 10.15%。研究区土壤保持总量变化不大,各种土地利用类型土壤保持总量变化均由面积变化引起。

表 3 2000—2018 年不同土地利用类型的土壤保持强度及土壤保持量变化

土地利用类型	土壤保持强度/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )			土壤保持强度变化值/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	土壤保持强度变化率/%	土壤保持量/(t·a <sup>-1</sup> )			土壤保持量变化值/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	土壤保持量变化率/%
	2000 年	2010 年	2018 年			2000 年	2010 年	2018 年		
水田	63.12	65.85	66.51	3.39	5.37	2.70×10 <sup>7</sup>	2.87×10 <sup>7</sup>	2.82×10 <sup>7</sup>	1.19×10 <sup>6</sup>	4.41
旱地	100.39	101.20	104.10	3.70	3.69	2.53×10 <sup>7</sup>	2.62×10 <sup>7</sup>	2.59×10 <sup>7</sup>	6.08×10 <sup>5</sup>	2.40
有林地	259.85	261.60	262.03	2.18	0.84	5.33×10 <sup>8</sup>	5.49×10 <sup>8</sup>	5.44×10 <sup>8</sup>	1.06×10 <sup>7</sup>	1.98
灌木林	204.35	197.49	201.90	2.46	-1.20	3.21×10 <sup>7</sup>	2.67×10 <sup>7</sup>	2.76×10 <sup>7</sup>	-4.47×10 <sup>6</sup>	-13.94
疏林地	132.43	127.02	128.88	-3.55	-2.68	9.40×10 <sup>7</sup>	8.33×10 <sup>7</sup>	8.36×10 <sup>7</sup>	-1.04×10 <sup>7</sup>	-11.09
其他林地	175.45	156.72	157.64	-17.81	-10.15	4.14×10 <sup>6</sup>	6.01×10 <sup>6</sup>	5.96×10 <sup>6</sup>	1.82×10 <sup>6</sup>	44.02
高覆盖度草地	116.07	115.26	119.98	3.90	3.36	2.01×10 <sup>7</sup>	1.92×10 <sup>7</sup>	2.17×10 <sup>7</sup>	1.57×10 <sup>6</sup>	7.78
中覆盖度草地	130.28	129.07	130.14	-0.13	-0.10	5.79×10 <sup>6</sup>	5.67×10 <sup>6</sup>	5.63×10 <sup>6</sup>	-1.62×10 <sup>5</sup>	-2.80
低覆盖度草地	111.03	110.27	110.92	-0.11	-0.10	5.55×10 <sup>5</sup>	5.42×10 <sup>5</sup>	5.45×10 <sup>5</sup>	-9.97×10 <sup>3</sup>	-1.80
河渠	20.00	19.41	18.76	-1.24	-6.20	3.70×10 <sup>5</sup>	3.61×10 <sup>5</sup>	3.62×10 <sup>5</sup>	-8.40×10 <sup>3</sup>	-2.27
湖泊	55.10	56.67	50.70	-4.40	-7.98	9.42×10 <sup>3</sup>	9.63×10 <sup>3</sup>	8.52×10 <sup>3</sup>	-9.04×10 <sup>2</sup>	-9.59
水库坑塘	34.97	34.47	34.28	-0.69	-1.97	3.86×10 <sup>5</sup>	3.70×10 <sup>5</sup>	3.77×10 <sup>5</sup>	-8.13×10 <sup>3</sup>	-2.11
滩地	17.53	17.34	17.52	-0.01	-0.08	1.44×10 <sup>5</sup>	1.50×10 <sup>5</sup>	1.40×10 <sup>5</sup>	-4.89×10 <sup>3</sup>	-3.38
城镇用地	23.14	21.05	19.62	-3.53	-15.24	1.80×10 <sup>5</sup>	2.46×10 <sup>5</sup>	5.28×10 <sup>6</sup>	3.48×10 <sup>5</sup>	193.17
农村居民点	37.69	37.81	35.15	-2.55	-6.75	1.03×10 <sup>6</sup>	1.07×10 <sup>6</sup>	1.18×10 <sup>6</sup>	1.56×10 <sup>5</sup>	15.21
其他建设用地	69.55	67.95	65.23	-4.32	-6.20	2.48×10 <sup>5</sup>	3.99×10 <sup>5</sup>	1.37×10 <sup>6</sup>	1.12×10 <sup>6</sup>	451.62
裸土地	2.21	1.87	11.18	8.97	405.38	3.56×10 <sup>2</sup>	2.93×10 <sup>2</sup>	1.80×10 <sup>3</sup>	1.44×10 <sup>3</sup>	405.38
裸岩石质地	16.73	12.37	12.80	-3.93	-23.47	9.03×10 <sup>2</sup>	6.31×10 <sup>2</sup>	6.66×10 <sup>2</sup>	-2.38×10 <sup>2</sup>	-26.31

### 3.3 不同海拔的土壤保持变化特征

基于 ArcGIS 10.4 中 DEM 高程分析,将赣南地区分为 6 个梯度,并与土壤保持强度栅格进行叠加分析,得到研究区不同海拔的土壤保持强度分布情况(图 2)。随着海拔的上升,土壤保持强度持续上升。其中在 0—150 m 的海拔高度范围土壤保持强度为最低[27.37 t/(hm<sup>2</sup>·a)],此后土壤保持强度不断增长,

并在海拔处于 1 000—1 500 m 时达到最大值[528.47 t/(hm<sup>2</sup>·a)],在海拔高于 1 500 m 后土壤保持强度降低。其中海拔 150—300 m 区域为赣南地区总面积占比最大,为 39.36%,其土壤保持量为 1.66×10<sup>8</sup> t/a,仅占总土壤保持量的 22.27%;其次是 300—500 m 区域,面积占比为 34.72%,土壤保持量为 3.13×10<sup>8</sup> t/a,占总土壤保持量的 42.10%,为土壤保持量最大海拔

区间。在海拔高度为 300—500 m 区域土壤保持效果为最好。在时间变化上, 在 0—150, 150—300, 300—500 m 区间的土壤保持强度部分升高, 在 500—1000, 1000—1 500, >1 500 m 区间的土壤保持强度有部分降低, 变化并不显著。

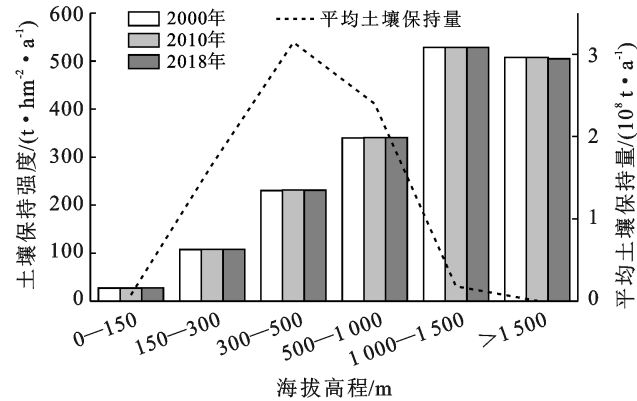


图 2 基于海拔的土壤保持强度及平均土壤保持量变化

### 3.4 不同坡度的土壤保持变化特征

坡度可以直接影响土壤的抗雨滴击打能力以及土壤保持强度, 计算不同坡度的土壤保持强度, 能够清晰地反映赣南地区土壤保持强度的坡度分异规律<sup>[24]</sup>。根据土壤保持坡度等级划分标准<sup>[25]</sup>, 结合赣南地区实际情况, 将研究区坡度分为 6 个等级: 0°~5°为平坡, 5°~15°为缓坡, 15°~25°为斜坡, 25°~40°为陡坡, 40°~45°为急坡, 45°以上为险坡<sup>[26]</sup>。统计各等级坡度的土壤保持强度情况(图 3), 土壤保持强度随着坡度增大而上升。在 0°~5°之间, 土壤保持强度为最低

[26.26 t/(hm<sup>2</sup>·a)], 此后土壤保持强度随坡度增加而快速增长, 并在坡度 > 45°时, 土壤保持强度达到最高值[787.39 t/(hm<sup>2</sup>·a)]。其中坡度 5°~15°区域其面积占总面积 46.01%, 土壤保持量占总量的 35.82%; 其次是 0°~5°区域, 其面积占总面积 23.87%, 土壤保持量占总量的 3.29%, 然后是 15°~25°区域, 其面积占比 23.30%, 土壤保持量占总量的 41.37%。坡度范围在 15°~25°区域土壤保持效果最好。

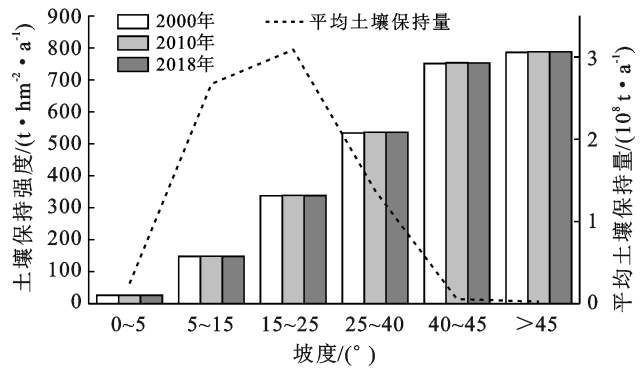


图 3 基于坡度的土壤保持强度及平均土壤保持量变化

### 3.5 2000—2018 年赣南地区各县(市、区)土壤保持时空分布

2000—2018 年赣南地区土壤保持强度整体为增长趋势, 2000 年整个地区平均土壤保持强度为 189.93 t/(hm<sup>2</sup>·a), 2010 年为 190.69 t/(hm<sup>2</sup>·a), 2018 年为 190.51 t/(hm<sup>2</sup>·a)。土壤保持强度空间集聚类型丰富(图 4)。

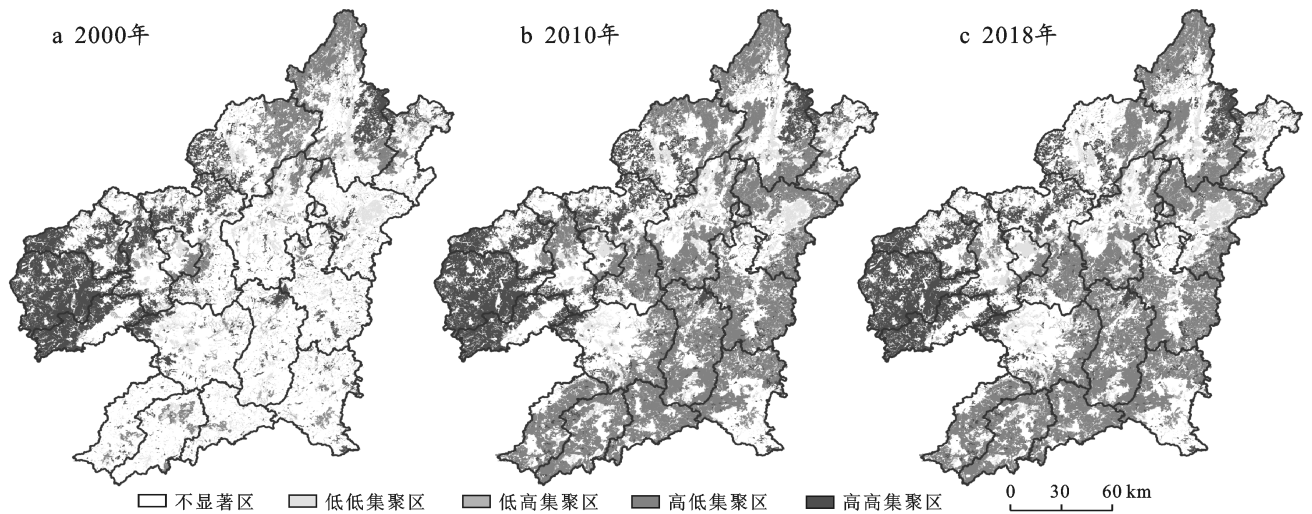


图 4 2000—2018 年赣南地区土壤保持强度变化局部空间自相关 LISA 集聚特征

2000—2018 年期间, 赣南地区土壤保持强度高集聚区分布在崇义县、上犹县、大余县, 土壤保持强度分别为 332.21 t/(hm<sup>2</sup>·a), 266.58 t/(hm<sup>2</sup>·a),

226.00 t/(hm<sup>2</sup>·a), 表明这 3 个县土壤保持强度较高并且具有较好的空间集聚性, 林地占比分别为 88.30%, 76.5%, 76.2%。高低集聚区由兴国县和宁

都县向整个研究区而转变,表明赣南地区土壤保持强度在持续稳步上升。低低集聚区主要分布在章贡区、南康区、信丰县和瑞金市,土壤保持强度分别为  $88.61 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,  $94.54 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,  $117.46 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,  $169.32 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 林地占比分别为  $55.16\%$ ,  $59.5\%$ ,  $70.33\%$ ,  $75.60\%$ 。表明赣南地区各县(市、区)土壤保持强度与林地占比成强协同关系。

对于土壤保持总量,2000—2010 年龙南县、于都县、兴国县土壤保持量均为增长趋势,分别增长了其土壤保持总量的  $2.55\%$ ,  $1.16\%$ ,  $0.83\%$ ;其余各县(市、区)升降效果不明显。2010—2018 年各县(市、区)土壤保持量均为降低趋势,其中大余县、章贡区降低趋势较明显,分别降低了其土壤保持总量的  $0.47\%$ ,  $0.35\%$ 。从整个时间跨度来看,赣南地区土壤保持总量呈现上升趋势,增长了 2000 年土壤总量的  $0.30\%$ ,其中龙南县、于都县、兴国县上升趋势较为明显,分别为其土壤保持总量的  $2.52\%$ ,  $1.11\%$ ,  $0.85\%$ 。

### 3.6 土壤保持强度与 NDVI 空间相关性

通过 ArcGIS 10.4 和 GeoDa 软件计算得到的土壤保持强度与 NDVI 全局自相关性数据(表 4)分析,2000—2018 年赣南地区土壤保持强度与 NDVI 呈现显著正相关。根据空间自相关理论,高高集聚区代表土壤保持强度高的区域,其周围区域 NDVI 值也高,其他空间集聚类型含义与之类似。土壤保持强度与 NDVI 的局部空间集聚效应与显著性结果(图 5—6)显示,2000—2018 年赣南地区发生集聚效果的面积占比分别为  $54.43\%$ ,  $61.39\%$ ,  $62.73\%$ ,其中高高集聚区面积占比和变化均最大,由 2000 年的  $42.04\%$  升至 2018 年的  $49.27\%$ ,其他 4 类集聚区变化不明显。

赣南地区辖区面积广,地形、土壤、降雨因子具有空间差异性,对土壤保持强度空间格局具有一定的控

制作用,并且 NDVI 指数的空间差异性也导致土壤保持强度的空间分布不同。2000 年高高集聚区主要分布在研究区南部和东部;2010 年主要分布在研究区西部、南部和东部;2018 年主要分布在研究区西部、南部和东部。2000—2018 年增加了上犹县、崇义县、大余县,且显著性不断增强,说明 2000—2018 年上犹县、崇义县、大余县植被覆盖度和土壤保持强度同时提升,体现退耕还林还草任务和水土保持措施执行效果较好。上犹县、崇义县、大余县、安远县、会昌县、全南县、龙南县、定南县、寻乌县在 2016 年 9 月入选国家第一批重点生态功能区名单,生态基础较好,为增强生态服务功能,构建国家生态安全屏障提供重要支撑。高低集聚区主要分布在于都县,表明该县在 NDVI 值较低的情况下依然保持高土壤保持强度,于都县虽然林地面积占比较小,但地势平坦,水田旱地面积较大,导致土壤保持强度较高。低低集聚区在章贡区、赣县区、南康区和其他县(市、区)的城区,这些区域多为人为干扰严重的低海拔低坡度高经济区域,植被覆盖度和土壤保持强度较低。

表 4 2000—2018 年赣南地区土壤保持强度与 NDVI 的 Moran's  $I$  指数及显著性检验结果

指标	2000	2010	2018
$I$	0.034 7	0.028 0	0.033 8
$P$	0.002 0	0.001 0	0.001 0
$Z$	8.671 7	7.197 4	8.843 5

注: $I$  值表示 Moran's  $I$  指数; $p$  值即概率,反映某一事件发生的可能性大小, $p < 0.05$  表示有统计学差异, $p < 0.01$  表示有显著统计学差异, $p < 0.001$  表示有极其显著的统计学差异; $Z$  得分表示标准差的倍数,反映数据的离散或者集聚程度, $|Z| > 2.58$ ,表示有显著的统计学差异。

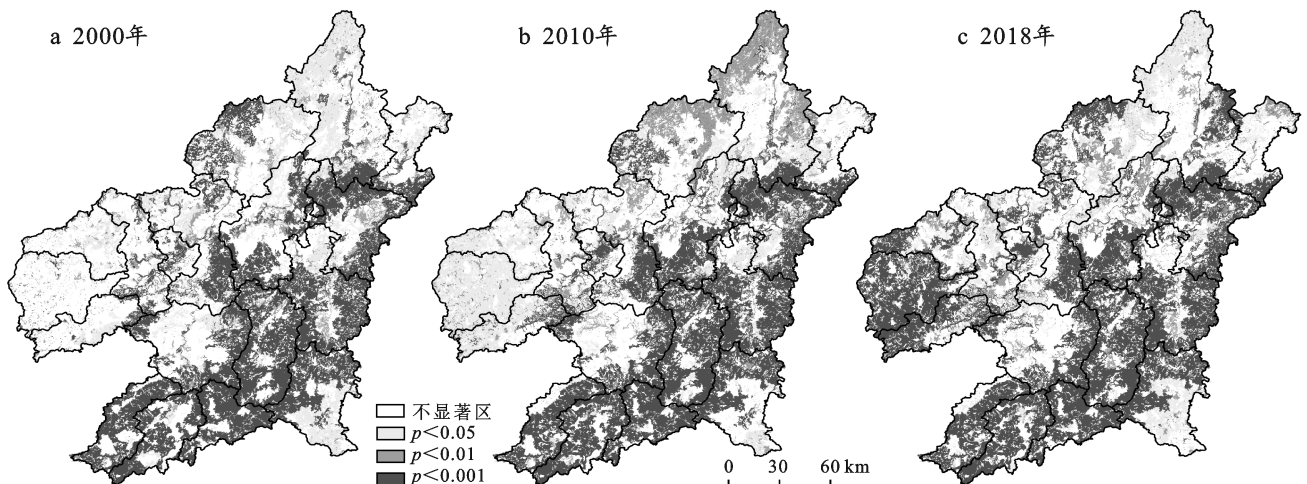


图 5 2000—2018 年赣南地区土壤保持强度与 NDVI 局部空间自相关显著性

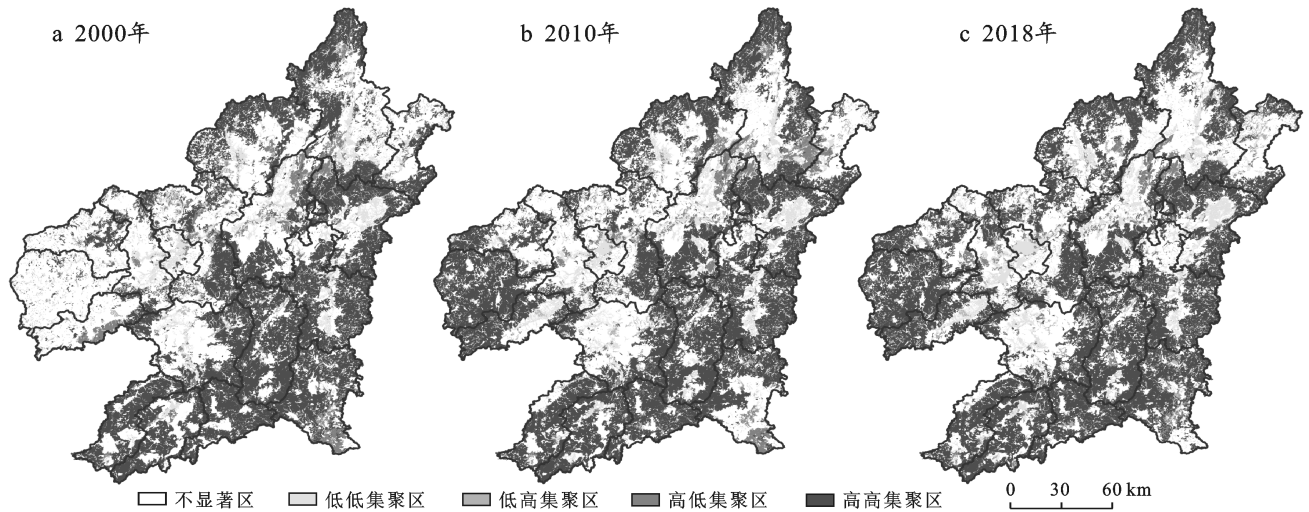


图6 2000—2018年赣南地区土壤保持强度与NDVI局部空间自相关LISA特征

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

2000—2018年赣南地区土壤保持强度和土壤保持量呈上升趋势,与贾芳芳等<sup>[27]</sup>在赣江流域的研究结果基本一致。对海拔高程的土壤保持强度分析,土壤保持强度随海拔高度变化先升高再降低。低海拔地区多为平原丘陵,易于城镇化开发与利用,交通与经济较为发达,市政建设较多,人为活动较为严重且聚集,林地与草地面积分布较少,占比分别为29.77%和12.53%,植被覆盖度较低,对于降雨的截留作用比较弱,土壤侵蚀比较严重,土壤保持强度较弱。随着海拔的升高,城镇化和人为活动逐渐减少,植被覆盖度、土层厚度、物种丰富度都随之升高,在海拔500~1000 m时林地占比达到92.80%,土壤保持强度与土壤保持量均较强。在海拔达到1500 m以上,林地面积减少,草地面积增大,占比高达23.90%,土壤保持强度有所下降。

不同坡度上生态系统土壤保持功能受到不同因素影响,包括重力因素、地类因素、人为活动影响等。坡度越大,坡面受斜坡重力切向分力影响随之增加导致坡面土壤不稳定性增加<sup>[28]</sup>,水土流失概率增大,导致土壤侵蚀越严重;但是随着坡度变大,林地面积由44.29%上升到93.01%,植被冠层对降雨的截留能力和根系对土壤的固结能力也随之增强<sup>[24]</sup>,使地表植被对土壤潜在侵蚀的阻力增强,土壤保持强度也随之增强<sup>[10]</sup>。坡度越大,人为活动越少,对土壤的破坏变小,最后土壤保持强度随着坡度增大。在高坡度地区,生态系统具有多样性,有助于遏制水土保持功能的退化。

由土壤保持强度的空间自相关分析表明,高低集

聚区面积所占比例不断扩大,主要是中国在南方丘陵山地地带实施了各种生态保护工程措施,比如天然林保护工程、长江长治长江上中游水土保持重点防治工程和退耕还林还草政策,使得赣南地区整体土壤保持强度有所提升。高高集聚区崇义、上犹、大余3个县,大部分区域处于高海拔高坡度地区,属于国家重点生态功能区中的南岭山地森林及生物多样性生态功能区,是国家重要的生态安全屏障<sup>[29]</sup>,在水土保持重点建设工程的基础上,实施了更为严格的管理制度,如严格控制开发强度、加强产业发展引导、全面划定生态红线、加强生态功能评估、强化生态环境监管、健全生态补偿机制等。低低集聚区的章贡区、南康区、信丰县和瑞金市,地处海拔较低区域,地势较为平坦,2018年在赣州市GDP排行分别为第一、第二、第四和第九,说明低低集聚区经济建设发展较好,但经济建设带来的负面影响,如建设用地扩张明显、占用草地与林地面积、植被结构单一、土地利用度较高等,降低整体土壤保持强度。上述现象说明各县(市、区)土壤保持强度与其所处的海拔和坡度分布具有一致性。2000—2018年赣南地区土壤保持强度与土壤保持总量均呈上升趋势,其中2000—2010年龙南、于都、兴国县上升趋势比较明显。2005年龙南县提出结合安全生产、矿山资源、新农村建设和和谐创业、全县创建文明公路、城市建设共“6个结合”抓水土流失整治并取得较好成效<sup>[30]</sup>。1998年以来,于都县进入水土保持重点治理第二阶段,并在1999—2001年被列为国家生态环境建设县,综合治理取得显著效果<sup>[31]</sup>。2000年起兴国县第二期水土流失国家重点治理项目实施,通过提升森林生态系统质量及服务功能,提升山区水土流失治理综合效益,遏制山区资源二次开发利用的水土流失风险,创建水土流失综合治理信

息化监管平台与决策支持系统,水土流失治理综合效益逐步显现<sup>[32]</sup>。

与传统的数理相关分析相比,双变量空间自相关分析对识别两个地理要素在空间上的同向/异向分布特征,揭示其空间分布结构具有独特优势<sup>[33]</sup>。大多数研究中,NDVI 值越高,土壤对于沉积物的截留作用越明显,两者具有比较大的关联性<sup>[34-35]</sup>。本研究中土壤保持强度与 NDVI 具有较好的相关关系,LISA 集聚图在空间上验证了上述观点,表明 NDVI 是土壤保持强度的重要影响因子。这与李理等<sup>[36]</sup>在淇河流域所做的研究结果保持一致,也有研究表明 NDVI 对土壤保持强度的影响较小<sup>[37]</sup>,与本研究中高低集聚区的于都县结果一致。在 NDVI 值较低的情况下能够保持较高的土壤保持强度,表明 NDVI 不是影响土壤保持强度的唯一因素。在未来研究中应当考虑更多因子对土壤保持强度的影响,例如 GDP、降雨、人为干扰度、景观破碎度等,并研究不同因子相互之间的影响和对土壤保持强度的影响。

本研究虽采用土地利用二级分类标准,但由于果园区分难度大,未能将脐橙林单独分出,而是根据种植年限和郁闭度不同被划分为疏林地和其他林地,二者土壤保持强度降低表明脐橙林土壤保持强度整体下降。赣南地区果园面积由 2000 年的  $1.01 \times 10^5 \text{ hm}^2$  增长为 2018 年的  $1.65 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,2018 年脐橙林面积占果园总面积 63.14%<sup>[3,38]</sup>,占疏林地和其他林地总面积的 15.39%。大部分果园由于经营方式不同,疏于管理,没有采取一定水土保持措施,在脐橙生长过程中对果树使用大量的肥料,将果树周边的覆盖性草地与其他物种进行铲除,导致果园的物种单一,生物多样性较差,土壤板结,降低植被拦截径流和泥沙效果<sup>[39]</sup>。果园的土壤保持强度提升将是赣南地区水土保持未来主要研究方向之一。

为保证土壤保持强度与土壤保持量的稳步提升,赣南地区应当在保护高海拔高坡度地区土壤保持强度同时,提高低海拔低坡度地区土壤保护措施,提高中低山区土地利用类型的空间变异性,而对于土壤保持强度较低的区域,应当加强水土保持措施,改良地形环境,鼓励大量种林造草,修建拦蓄水工程,进一步缓解赣南地区水土流失保证山区生态安全。

#### 4.2 结论

生态系统土壤保持功能对赣南地区生态平衡的维持具有重要意义,对加强赣南地区生态系统的管理和保护具有重要意义。本研究基于 InVEST 模型,从土地利用类型对土壤保持强度进行横向空间分析,从海拔、坡度对土壤保持强度进行纵向空间分析,并利

用 Moran's *I* 指数对赣南地区 2000—2018 年土壤保持强度和土壤保持量进行空间自相关分析。

(1) 2000—2018 年赣南地区部分草地、水田、旱地转化为林地,而低海拔低坡度的林地转化为城镇用地和农村居民点。不同土地利用类型的土壤保持强度为:有林地>灌木林>其他林地>疏林地>中覆盖度草地>高覆盖度草地>低覆盖度草地>旱地>其他建设用地>水田>湖泊>农村居民点>水库坑塘>城镇用地>河渠>滩地>裸岩石质地>裸土地。有林地的面积占比不断提升,在 2018 年达到 52.93%,土壤保持量占比达到 73.92%,是赣南地区土壤保持总量提升的主要原因。

(2) 土壤保持强度随海拔升高先升高后降低,随坡度升高而一直增强。在 0—150 m 时土壤保持强度为 27.37 t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ),在 1 000—1 500 m 处达到最大值 528.47 t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ),随后在 >1 500 m 时降为 506.75 t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )。在  $0^\circ \sim 5^\circ$  之间,土壤保持量为最低[26.26 t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )],并在坡度 >45° 时,土壤保持量达到最高值[787.39 t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )]。

(3) 在时间分布上,赣南地区土壤保持强度增长比较平缓,土壤保持强度由 2000 年的 189.93 t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ) 增长到 2018 年的 190.50 t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )。在空间分布上,赣南地区土壤保持强度呈现四周高,中部低的分布格局,存在明显的空间集聚现象。从局部空间相关性来看,崇义、上犹、大余县呈现土壤保持强度高集聚区,低低集聚区主要分布在信丰县、南康区、章贡区、瑞金市。

(4) 从全局空间相关性结果看来,赣南地区土壤保持强度与 NDVI 之间存在正相关关系。局部相关性结果表明两者存在极为显著的空间集聚效应,高高集聚的上犹、崇义、大余、安远、会昌、全南、龙南、定南、寻乌县和低低集聚的章贡区、赣县区、南康区能够较好地验证两者相关关系。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 康琳琦,周天财,干友民,等.1984—2013 年青藏高原土壤侵蚀时空变化特征[J].应用与环境生物学报,2018,24(2):245-253.
- [2] 张利超,王辉文,谢颂华.江西省水土流失现状与发展趋势分析[J].水土保持研究,2016,23(1):356-359.
- [3] 赣州市统计局.赣州市统计年鉴[J].中国统计出版社,2019.
- [4] 王敏,阮俊杰,姚佳,等.基于 InVEST 模型的生态系统土壤保持功能研究:以福建宁德为例[J].水土保持研究,2014,21(4):184-189.
- [5] Wall D H, Six J. Give soils their due [J]. Science, 2015,



- 347(6223):695.
- [6] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide To Conservation Planning [J]. United States. Department of Agriculture. Agriculture Handbook(USA), 1978.
- [7] 马良,金陶陶,文一惠,等. InVEST 模型研究进展[J]. 生态经济, 2015, 31(10): 126-131.
- [8] 周彬,余新晓,陈丽华,等. 基于 InVEST 模型的北京山区土壤侵蚀模拟[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 9-13.
- [9] 李婷,刘康,胡胜,等. 基于 InVEST 模型的秦岭山地土壤流失及土壤保持生态效益评价[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(9): 1242-1250.
- [10] 陈童尧,贾燕锋,王佳楠,等. 基于 InVEST 模型的祁连山国家级自然保护区土壤保持现状与功能[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 150-159.
- [11] 刘晓娜,裴厦,陈龙,等. 基于 InVEST 模型的门头沟区生态系统土壤保持功能研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 168-176.
- [12] 徐媛银,孙思琦,薛达元,等. 基于地形梯度的赣南地区生态系统服务价值对人为干扰的空间响应[J]. 生态学报, 2019, 39(1): 97-107.
- [13] 李恒凯,杨柳,雷军,等. 利用 HJ-CCD 影像的红壤丘陵区土壤侵蚀分析: 以赣州市为例[J]. 遥感信息, 2016, 31(3): 122-129.
- [14] 杨洁,汪邦稳. 赣南地区水土流失时空变化和评价研究[J]. 中国水土保持, 2011(12): 10-12.
- [15] 饶恩明,肖焱,欧阳志云,等. 海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 746-755.
- [16] 何莎莎,朱文博,崔耀平,等. 基于 InVEST 模型的太行山淇河流域土壤侵蚀特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 426-439.
- [17] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35-41.
- [18] 田宇,朱建华,李奇,等. 三峡库区土壤保持时空分布特征及其驱动力[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1164-1174.
- [19] 冯强,赵文武. USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4461-4472.
- [20] 许联芳,张海波,张明阳,等. 南方丘陵山地土壤保持功能及其经济价值时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(9): 1599-1605.
- [21] 朱青,国佳欣,郭熙,等. 基于随机森林算法的土壤侵蚀影响因子研究: 以赣江上游流域为例[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 59-68.
- [22] Zhang Chaosheng, McGrath D. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of Southeastern Ireland from two different periods [J]. Geoderma, 2004, 119(3/4): 261-275.
- [23] 高建岗,黄锐. 基于耕地质量指数和空间自相关的苏南地区耕地保护分区[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 213-218.
- [24] 卞鸿雁,庞奖励,任志远,等. 基于土地利用变化的土壤保持效益时空动态: 以黄土高原南部为例[J]. 生态学报, 2012, 31(9): 2391-2396.
- [25] 汤国安,宋佳. 基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 157-160.
- [26] 吴照柏. 森林资源规划设计调查中地形因子自动提取初探[J]. 中南林业调查规划, 2007, 26(3): 51-53.
- [27] 贾芳芳. 基于 InVEST 模型的赣江流域生态系统服务功能评估[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [28] 赵清贺,冀晓玉,徐珊珊,等. 河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 170-178.
- [29] 刘慧明,高吉喜,刘晓,等. 国家重点生态功能区 2010—2015 年生态系统服务价值变化评估[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 1865-1876.
- [30] 赖观路,廖冬梅. 龙南县“六个结合”抓水土流失整治[J]. 中国水土保持, 2005(12): 69-70.
- [31] 温郁胜,谢贵芳,陈保华. 于都县水土保持成效与做法[J]. 中国水土保持, 2001(10): 36-37.
- [32] 于东升,陈洋,马利霞,等. 兴国县水土流失治理历程与新时期重点治理方向及策略[J]. 中国水土保持, 2021(1): 63-67.
- [33] 任频频,黄峰,李保国. 黄淮海平原旱作农田土壤有机质含量的空间分异特征[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 440-450.
- [34] 朱青,周自翔,刘婷,等. 黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究: 以延河流域为例[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2557-2570.
- [35] 焦菊英,王宁,杜华栋,等. 土壤侵蚀对植被发育演替的干扰与植物的抗侵蚀特性研究进展[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 311-318.
- [36] 李理,赵芳,朱连奇,等. 淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7568-7578.
- [37] 燕玲玲,巩杰,徐彩仙,等. 子午岭地区土壤保持服务时空变化及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 188-197.
- [38] 赣州市统计局. 赣州市统计年鉴[J]. 江西省赣州市统计局, 2001.
- [39] 孙永明,叶川,黄欠如,等. 赣南脐橙园不同水保措施应用效果研究[J]. 中国水土保持, 2016(8): 9-12.