

# 赣南地区小流域景观格局对水源涵养功能的影响

张敏<sup>1,2</sup>, 汤崇军<sup>1,3,4</sup>, 伍冰晨<sup>1,3,4</sup>, 常婷婷<sup>2</sup>

(1. 江西省水利科学院, 江西 南昌 330029; 2. 河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心, 江西 南昌 330029; 4. 流域水土保持江西省重点实验室, 江西 南昌 330029)

**摘要:** [目的] 探究景观格局对赣南地区小流域水源涵养量的影响, 为该地区小流域景观格局优化和水资源管理提供科学依据。[方法] 以赣南地区 1 030 个小流域为研究对象, 通过 InVEST 模型计算各小流域的水源涵养量, 运用 Fragstats 4.3 软件, 获取林地覆盖度 (FCR)、斑块数量 (NP)、边界密度 (ED)、平均斑块面积 (AREA\_MN)、景观空间负荷对比指数 (LCI)、蔓延度指数 (CONTAG)、香农多样性指标 (SHDI) 等景观格局指数, 采用 Pearson 相关系数法、响应面分析法分析小流域景观指数对水源涵养量的影响。[结果] ① 景观格局指数中, FCR, AREA\_MN 和 CONTAG 与水源涵养量呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ), LCI, NP, ED 和 SHDI 与水源涵养量呈极显著负相关关系 ( $p < 0.01$ )。② 根据水源涵养量对 FCR 和 LCI 的响应曲面, 当  $LCI < 0.218$ ,  $FCR > 80.65\%$  时, 小流域的水源涵养量随着 FCR 的增加和 LCI 的减小而缓慢提升; 当  $LCI > 0.272$ ,  $FCR < 58.82\%$  时, 小流域的水源涵养量随着 FCR 的增加和 LCI 的减小显著增长。③ 在降水净输入量低 (463~607 mm), 地形指数高 (19~24) 的小流域类型和降水净输入量适中 (607~751 mm) 且地形指数低 (12~19) 的小流域类型中, 水源涵养量对 FCR 和 LCI 的响应较弱。[结论] 通过调整林地占比和景观空间负荷对比指数, 可提升小流域水源涵养量, 但提升幅度与小流域的地形和降水条件密切相关。

**关键词:** 水源涵养功能; 景观格局; 小流域; 赣南地区; InVEST 模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0413-12

中图分类号: P901, X171.1

**文献参数:** 张敏, 汤崇军, 伍冰晨, 等. 赣南地区小流域景观格局对水源涵养功能的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 413-424. Zhang Min, Tangchong Jun, Wu Bingchen, et al. Impacts of landscape patterns in small watersheds of southern Jiangxi Province on water conservation function [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 413-424. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.032; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.032.

## Impacts of landscape patterns in small watersheds of southern Jiangxi Province on water conservation function

Zhang Min<sup>1,2</sup>, Tangchong Jun<sup>1,3,4</sup>, Wu Bingchen<sup>1,3,4</sup>, Chang Tingting<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang, Jiangxi 330029, China;

2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Jiangxi Provincial Technology Innovation Center for Ecological Water Engineering in Poyang Lake Basin, Nanchang, Jiangxi 330029, China; 4. Jiangxi Key Laboratory of Watershed Soil and Water Conservation, Nanchang, Jiangxi 330029, China)

**Abstract:** [Objective] The impacts of landscape patterns on the water conservation capacity of small watersheds in the southern Jiangxi Province were explored to provide a scientific basis for optimizing these patterns and thereby managing water resources. [Methods] The water conservation capacity of 1 030 small watersheds in the study area was calculated using the InVEST model. Fragstats 4.3 software was used to obtain landscape pattern indices, such as forest cover ratio (FCR), number of patches (NP), edge density (ED), mean patch area (AREA\_MN), landscape cumulative index (LCI), contagion index (CONTAG), and Shannon diversity index (SHDI). Pearson correlation coefficients and the response surface analysis method were adopted to analyze how the landscape indices of small watersheds influenced their water conservation capacity. [Results] ① Among the

收稿日期: 2025-03-28

修回日期: 2025-05-13

采用日期: 2025-05-13

资助项目: 江西省技术创新引导类计划项目“赣南水土保持生态治理技术模式优化集成与生态系统服务响应”(2022KSG01010)

第一作者: 张敏(2000—), 女(汉族), 江苏省南通市人, 硕士研究生, 研究方向为农业环境与农村生态。Email: 3509141970@qq.com。

通信作者: 汤崇军(1976—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水土保持方面的研究。Email: tangchongjun@126.com。

landscape pattern indices, FCR, AREA\_MN, and CONTAG showed highly significant positive correlations with water conservation capacity ( $p < 0.001$ ), whereas LCI, NP, ED, and SHDI showed highly significant negative correlations ( $p < 0.001$ ). ② According to the response surface of water conservation capacity to FCR and LCI, when  $LCI < 0.218$  and  $FCR > 80.65\%$ , water conservation capacity increased slowly with increasing FCR and decreasing LCI; when  $LCI > 0.272$  and  $FCR < 58.82\%$ , water conservation capacity increased significantly with increasing FCR and decreasing LCI. ③ In small watersheds with low net precipitation input (463—607 mm) and high terrain index (19—24), and in those with moderate net precipitation input (607—751 mm) and low terrain index (12—19), water conservation capacity showed only weak response to FCR and LCI. [Conclusion] By adjusting forest cover ratio and landscape cumulative index, the water conservation capacity of small watersheds can be improved. However, the improvement range is closely related to the terrain and precipitation conditions of small watersheds.

**Keywords: water conservation function; landscape pattern; small watershed; southern Jiangxi Province; InVEST model**

近年来,中国面临水资源短缺日益加剧、水资源时空分布不均等诸多问题的严峻挑战,这些问题已成为中国经济社会高质量发展的重要瓶颈<sup>[1]</sup>。水源涵养功能是生态系统水量调节服务的直接体现,能够直观反映区域对降水的有效调节与重新分配能力,对维持区域生态系统平衡、调节区域水循环有关键作用<sup>[2]</sup>。以往的研究探讨了降雨<sup>[3]</sup>、土壤类型<sup>[4]</sup>、地形条件等<sup>[5]</sup>因素对水源涵养功能的影响,相关作用机制已较为明确。然而,在南方红壤丘陵区,受人类活动影响,土地利用变化加剧,形成多样的景观格局,给区域水源涵养功能的变化带来诸多不确定性。因此,有必要评价不同景观格局和水源涵养功能之间的定量关系,并以此提出景观格局优化策略。

关于景观格局和水源涵养功能研究主要集中在单个流域或区域尺度,吕乐婷等<sup>[6]</sup>基于 InVEST 模型,研究了太子河流域 2000—2020 年水源涵养时空分布特征,定量评估了研究期土地利用变化及景观格局演变;朱求安等<sup>[7]</sup>研究黄河兰州以上区域草地变化对水源涵养的影响,定量分析了 1980—2020 年水源涵养量的变化趋势和响应特征;陈文华等<sup>[8]</sup>以云南省保山市为例,研究云贵高原西南边缘保山市年均水源涵养量及其涵养功能的空间分布特征。以上的研究结论主要针对研究对象自身的特性,通常难以直接推广至其他流域或区域。而在小流域尺度,由于不同小流域之间的降雨分布和地形条件具有很强的异质性<sup>[9]</sup>,而不同的景观格局造成了小流域下垫面特性的差异,影响截留、下渗、产流等环节,进而影响水源涵养量<sup>[10]</sup>,因此加剧了景观格局对水源涵养功能作用的复杂性,亟需通过多流域、大样本的综合分析,系统解析景观格局与水源涵养功能间的内在关联,为区域生态保护修复与水资源可持续管理提供科学依据。

本研究以赣南红壤丘陵地区 1 030 个小流域为研究对象,采用 InVEST 模型与 Fragstats 软件,结合地理信息系统(GIS)空间分析技术,融合景观生态学理论与方法,对研究区域进行系统性分析,探究赣南各小流域水源涵养量的空间特征,量化景观格局指数对水源涵养量的影响,揭示景观格局变化对水源涵养功能的影响规律,为赣南地区小流域景观格局优化、水资源科学管理及提供理论支撑与实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

赣南地区地处  $24^{\circ}29'—27^{\circ}09'N$ ,  $113^{\circ}54'—116^{\circ}38'$ 。该区域以山地、丘陵以及盆地为主,属中亚热带季风气候,冬夏季风盛行,春夏降水集中,年平均气温  $19.4^{\circ}C$ ,年均降水量  $1\ 548.17\ mm$ 。植被以亚热带常绿阔叶林为主,还有针叶林、竹林、灌丛等多种类型,共同构成了该地区复杂多样的生态系统。

### 1.2 数据来源与处理

赣南地区小流域划分和水源涵养量计算所需数据和分辨率见表 1。为满足模型构建需求,采用 ArcGIS 软件,将所有栅格数据进行重采样处理,统一调整像元大小至  $5\ m \times 5\ m$ ,以确保数据空间分辨率的一致性与模型运算的适配性。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 小流域划分

依据 SL653—2013《小流域划分及编码规范》,以数字高程模型(DEM)为基础,利用 ArcGIS 10.2 软件的水文分析将数据进行填洼、流向、流量、流域分析、流域链接、集水区等处理,结合高分辨率遥感影像、行政界线、水利设施分布等资料,通过设定集雨区面积阈值,依次提取“沟道-河网-小流域”<sup>[11-12]</sup>,最终得到赣南地区小流域划分结果(图 1)。

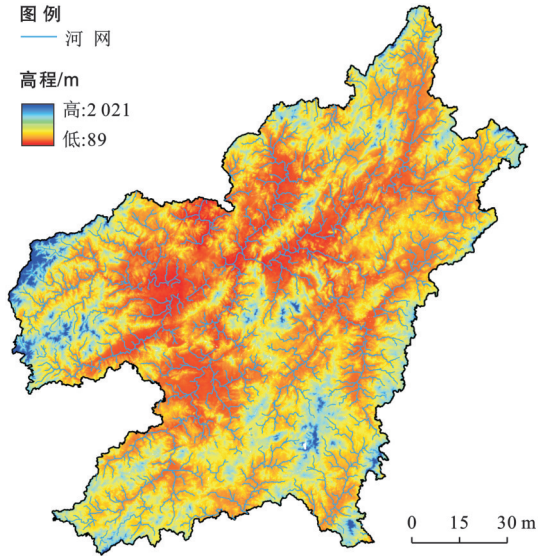


图 1 赣南地区水系图

Fig.1 Water system map of southern Jiangxi Province

1.3.2 产水量计算

产水量通常是指在一定区域和时间内,生态系统或水体所产生或提供的可利用水资源量,在小流域中代表能够为人类提供的可利用水资源量。InVEST 模型中的产水量模块基于水量平衡原理,以

某个栅格单元内的降水量减去实际蒸散量即为产水量,产水量计算公式<sup>[1]</sup>为

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

式中:  $Y_{xj}$  为  $j$  类土地栅格单元  $x$  的产水量 (mm);  $AET_{xj}$  为  $j$  类土地栅格单元  $x$  的年均蒸发量 (mm);  $P_x$  为栅格单元  $x$  年降水量 (mm)。

1.3.3 水源涵养量计算

水源涵养量是在产水量的基础上,结合研究区域的地形指数、土壤饱和导水率和流速系数计算<sup>[3]</sup>得出,计算公式为

$$T_l = \ln\left(\frac{a}{\tan b}\right) \quad (2)$$

式中:  $T_l$  为地形指数;  $a$  为单位等高线长度的上坡集水区面积;  $b$  为局部地段坡度。

$$R_e = \min\left(1, \frac{249}{v}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times T_l}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{sat}}{300}\right) \times Y_{xj} \quad (3)$$

式中:  $R_e$  为水源涵养量 (mm);  $v$  为流速系数;  $K_{sat}$  为土壤饱和导水率 (mm/d)。

表 1 研究数据类型与数据来源  
Table 1 Data types and sources of research

模块	数据类型	数据来源	分辨率
小流域划分	数字高程模型	地理空间数据云平台	30 m
	降水量	国家青藏高原科学数据中心(2020—2023年)	1 km
	蒸散量	国家青藏高原科学数据中心(2020—2023年)	1 km
	根系限制层深度	Globalchange	1 km
产水量	土壤数据	世界土壤数据库	1 km
	植物可用含水量	国家冰川冻土沙漠科学数据中心	1 km
	土地利用类型	GlobeLand30	30 m
	Z 参数	根据赣南水资源公报进行修正	
水源涵养量	流域边界	基于 DEM 和生成的河网提取	
	流速系数	USDA-NRCS 国家工程手册	
	土壤饱和导水率	国家冰川冻土沙漠科学数据中心	1 km

1.3.4 景观格局量化

以小流域划分结果为基础,并结合小流域实际情况,从景观指数分成的斑块水平、斑块类型水平和景观水平中,选取林地占比(FCR)、景观空间负荷指数(LCI)、斑块数量(NP)、平均斑块面积(AREA-MN)、边界密度(ED)、聚集度(AI)、蔓延度指数(CONTAG)以及香农多样性指标(SHDI)等 8 个指数对各小流域的景观格局进行量化(表 2)。

1.4 小流域类别划分

以降水量与蒸散量的差值表征降水净输入量。基于水资源实际空间分布特征,将研究区域内 1 030 个

小流域划分为丰水、中水、少水三大类别。分析小流域降水净输入量分布数据发现,其取值范围为 463~896 mm,且呈现出均匀分布态势。

为了实现精细化分类,依据该分布特性,将降水净输入量区间等间距划分为 3 等份。根据公式(2),利用 GIS 空间分析技术,通过将地形指数分布图与局部坡度分布图叠加进行分析。

研究表明,地形指数为 19 时,其对应的坡度为 25°。即局部坡度超过 25° 时,地形指数大于 19。因此本研究将地形指数分为两类,最终将 1 030 个小流域分成 6 类(详见表 3)。

表 2 研究中选取的景观格局指数

Table 2 Landscape pattern indices selected in study

指数名称	公式	含义	代表性
林地占比	$FCR = \frac{S}{TS} \times 100\%$	FCR取值范围0~100;指特定区域内林地面积与该区域总面积的比值,通常用百分比表示	参考胡信熹等 <sup>[13]</sup> 研究南湾水库土地利用对径流影响的模拟研究成果,林地占比的提升能够有效削减径流量,进而对水源涵养量产生显著影响
斑块数量	$NP = \sum_{j=1}^N N_j$	NP取值大于0;在特定景观或区域内,具有同质特征的不同斑块的总数目,用于直观反映景观的破碎程度	参考李冲等 <sup>[14]</sup> 对京津冀生态屏障区流域的研究,斑块数量的增加会导致景观破碎化程度加剧,景观多样性随之降低,进而使得区域水源涵养量减少
平均斑块面积	$AREA\_MN = \frac{1}{NP} \sum_{j=1}^N A_j$	AREA_MN取值大于0;可用来反映小流域斑块规模的平均水平,还可用来反映景观破碎化程度,体现生态系统功能	参考贾玉雪等 <sup>[15]</sup> 对资江尾闾集水区景观格局与非点源污染过程关系的研究,聚集度指数、斑块平均面积和斑块边界密度是显著影响“源”“汇”景观的共性指标。“源”景观的边界密度越小,斑块面积越大,聚集度越高,水源涵养量越低;而对于“汇”景观而言,较高的斑块连通度则能够提升水源涵养能力
边界密度	$ED = \frac{1}{A} \sum L$	ED取值大于0;可用来反映小流域景观的破碎化程度,用于衡量景观中斑块的破碎程度和边界的复杂程度	
聚集度	$AI = C_{max} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} \ln(G_{ij})$	AI取值范围为0~100;可用来反映景观的非随机性或聚集程度,该指数按比例缩放,以说明给定任何景观构成的最大可能相似邻接数	
景观空间负荷对比指数	$LCI_r = \frac{\sum_{i=1}^m A_{sourcei} \times W_i \times AP_i}{\left( \sum_{i=1}^m A_{sourcei} \times W_i \times AP_i + \sum_{j=1}^n A_{sinkj} \times W_j \times AP_j \right)}$ $LCI = \frac{LCI_{\text{相对距离}} \times LCI_{\text{相对高程}}}{LCI_{\text{相对坡度}}}$	LCI取值范围为0~1;能综合考虑景观中源景观和汇景观的分布、比例及空间配置等因素,量化评估景观格局对水源涵养、土壤侵蚀、面源污染等生态过程的潜在影响	参考王金亮等 <sup>[16]</sup> 和张桐艳等 <sup>[17]</sup> 针对景观空间负荷对比指数的研究成果,在探究流域水土流失及土壤侵蚀问题时发现,景观格局对流域径流与产沙过程存在显著影响,进而间接作用于水源涵养量
蔓延度指数	$CONTAG = 100 \times \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[ P_i \times \left( \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \times \ln m} + 1 \right\}$	CONTAG取值范围为0~100;用于度量景观中不同斑块类型的团聚与延展程度。高蔓延度意味着景观中存在优势斑块类型,且这些斑块形成了良好的空间连续性,彼此紧密相连	参考张忠伟等 <sup>[18]</sup> 和郑博福等 <sup>[19]</sup> 对各地区的水源涵养影响因素研究,蔓延度指数与水源涵养量呈现正相关,其对提高气候调节、水源涵养和土壤形成与保护价值有重要的影响
香农多样性指标	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \times \ln P_i)$	SHDI取值大于0;可用来衡量景观异质性。SHDI值越高,说明景观中的斑块类型越丰富,分布越均匀,景观异质性和生态功能多样性越强	参考王耀鑫等 <sup>[20]</sup> 关于香农多样性指标对喀斯特流域水源涵养功能的研究,该指标值越高,景观破碎化程度越显著,伴随产生的不确定性信息也相应增多。这一变化削弱了生态功能间的协同效应,最终导致水源涵养量下降

注:①表中内容来源于《生态系统格局评价指标》和Fragstats4.3用户手册。②式中:S为林地所占面积(km<sup>2</sup>);TS为生态系统总面积(km<sup>2</sup>);N为生态系统类型个数;N<sub>j</sub>为生态系统中第j个生态类型的斑块数量;A<sub>j</sub>为生态系统中第j个斑块的面积(km<sup>2</sup>);A为生态系统总面积(km<sup>2</sup>);L为相邻生态系统斑块间的边界长度(km);C<sub>max</sub>为G<sub>ij</sub>参数最大值;G<sub>ij</sub>为斑块类型i与j相邻的概率(%);n为各类生态系统斑块总数;r为源汇景观要素类型(相对距离、相对高程和相对坡度);A<sub>sourcei</sub>和A<sub>sinkj</sub>为第i种源景观类型和第j种汇景观类型的面积累积曲线;W<sub>i</sub>和W<sub>j</sub>为相应景观类型的权重;AP<sub>i</sub>和AP<sub>j</sub>为第i种源景观类型和第j种汇景观类型在流域中所占的面积百分比;m为景观类型数量;g<sub>ik</sub>为i类型斑块和k类型斑块毗邻的数目;P<sub>i</sub>为第i类景观类型的面积占景观总面积的比值。

用Origin 2022软件的皮尔逊相关系数法,分析6类小流域景观格局指数与水源涵养量的相关性,筛选出关键影响指数。在此基础上,借助响应面分析法(RSM)构建响应曲面模型,量化关键指数交互作用及其对水源涵养量的协同效应,揭示两者内在关系。

表3 小流域分类情况  
Table 3 Situation of landscape pattern indexes of small watersheds

类型	样本数量/个	降水净输入量/mm	地形指数
A类	220	463~607	11~19
B类	108	463~607	19~24
C类	150	607~751	12~19
D类	218	607~751	19~25
E类	179	751~896	13~19
F类	155	751~896	19~25

## 2 结果与分析

### 2.1 小流域水源涵养量空间分布及景观指数特征

#### 2.1.1 小流域水源涵养量的空间分布特征

图2a为赣南地区小流域划分结果。赣南地区共划分成1 030个小流域,小流域面积为21.19~59.34 km<sup>2</sup>。研究表明,赣南地区水源涵养量存在显著的空间异质性,最小值为1.65 mm,最大值高达1 125.64 mm,多年平均水源涵养量为434.29 mm,占多年平均降水量的28.05%。从空间分布来看,赣南地区水源涵养量呈现出“四周高,中部低”的特征,不同区域间的水源涵养能力存在明显差异;从小流域单元来看,多年平均水源涵养量最低的小流域地处瑞金市中部,其数值为251.73 mm,多年平均水源涵养量最高的小流域地处宁都县北部,其数值为951.05 mm。

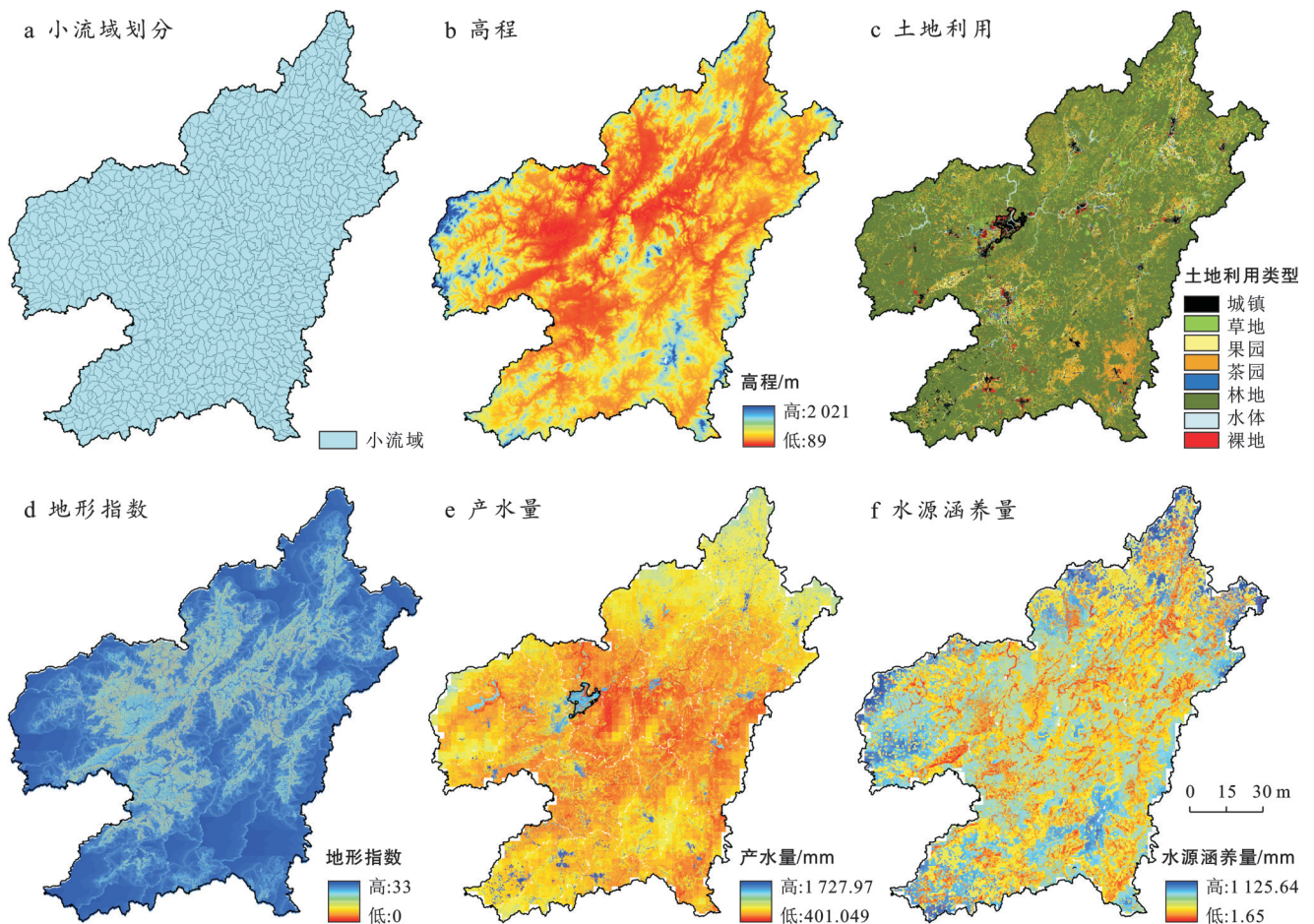


图2 赣南地区水源涵养量计算

Fig.2 Calculation of water conservation capacity in southern Jiangxi Province

#### 2.1.2 小流域景观格局指数与水源涵养量的关系

由表4可知,研究样本涵盖1 030个小流域,各指数的统计特征充分反映出区域景观结构的复杂性与

多样性。图3表明,FCR,LCI,NP,ED,AREA\_MN,CONTAG以及SHDI等变量均与Re呈现显著相关性。具体而言,FCR\_AREA\_MN以及CONTAG与

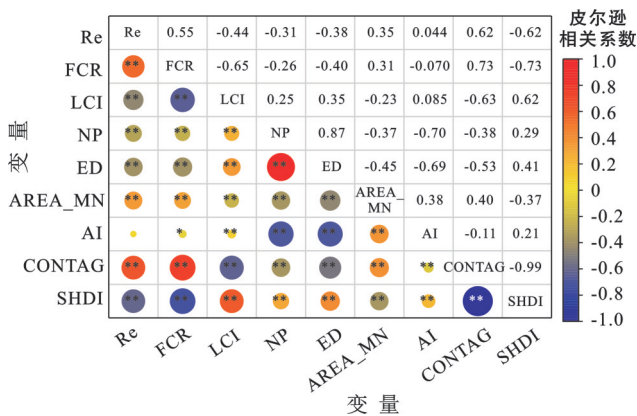
Re 之间呈现极显著的正相关关系 ( $p < 0.01$ ), 即随着林地比例的提升和平均斑块面积的增大, 以及优势斑块空间连续性的增强, 区域水源涵养能力将得到显著提升。LCI, NP, ED 和 SHDI 与 Re 呈极显著的

负相关关系 ( $p < 0.01$ ), 意味着景观空间负荷对比指数的增加、斑块破碎化程度的加剧以及景观异质性的提升, 均可能导致水源涵养量的下降。此外, AI 与 Re 之间并未发现显著的相关性 ( $p > 0.05$ )。

表 4 小流域景观格局指数情况

Table 4 Situation of landscape pattern indexes of small watersheds

项目	样本总数	均值	标准差	最小值	中位数	最大值
FCR	1 030	75.02	16.59	0.00	78.05	100.00
LCI	1 030	0.20	0.07	0.11	0.18	0.69
NP	1 030	728.91	689.65	24.00	471.00	4 591.00
ED	1 030	17.42	10.04	1.25	15.93	50.79
AREA_MN	1 030	30.90	62.35	0.31	12.65	689.38
AI	1 030	95.60	2.23	88.16	95.38	99.36
CONTAG	1 030	72.77	9.52	48.49	72.97	96.08
SHDI	1 030	1.10	0.41	0.15	1.09	2.11



注: \*表示  $p < 0.05$ , \*\*表示  $p < 0.01$

图 3 各个景观格局指数与水源涵养量的皮尔逊相关系数

Fig.3 Pearson correlation coefficients between each landscape pattern index and water conservation capacity

## 2.2 不同类型小流域水源涵养量对景观格局的响应

### 2.2.1 各类小流域景观指数与水源涵养量的相关性

利用皮尔逊相关系数法分析 6 类小流域的景观指数与水源涵养量的相关性。通过对比不同类型小流域水源涵养量和景观指数, 发现各小流域中相同景观指数与 Re 的显著性存在差异 (图 4)。在所有类型小流域中, FCR, CONTAG 与 Re 均呈现极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ), LCI, SHDI 与 Re 则表现出极显著负相关关系 ( $p < 0.01$ )。而其他景观指数与 Re 的相关性在不同小流域表现不同, 部分指数与 Re 无显著相关。如 AI, 仅在 B, D 类小流域中与 Re 存在显著相关关系 ( $p < 0.05$ ), 在其余类型小流域中未表现出明显的相关关系。

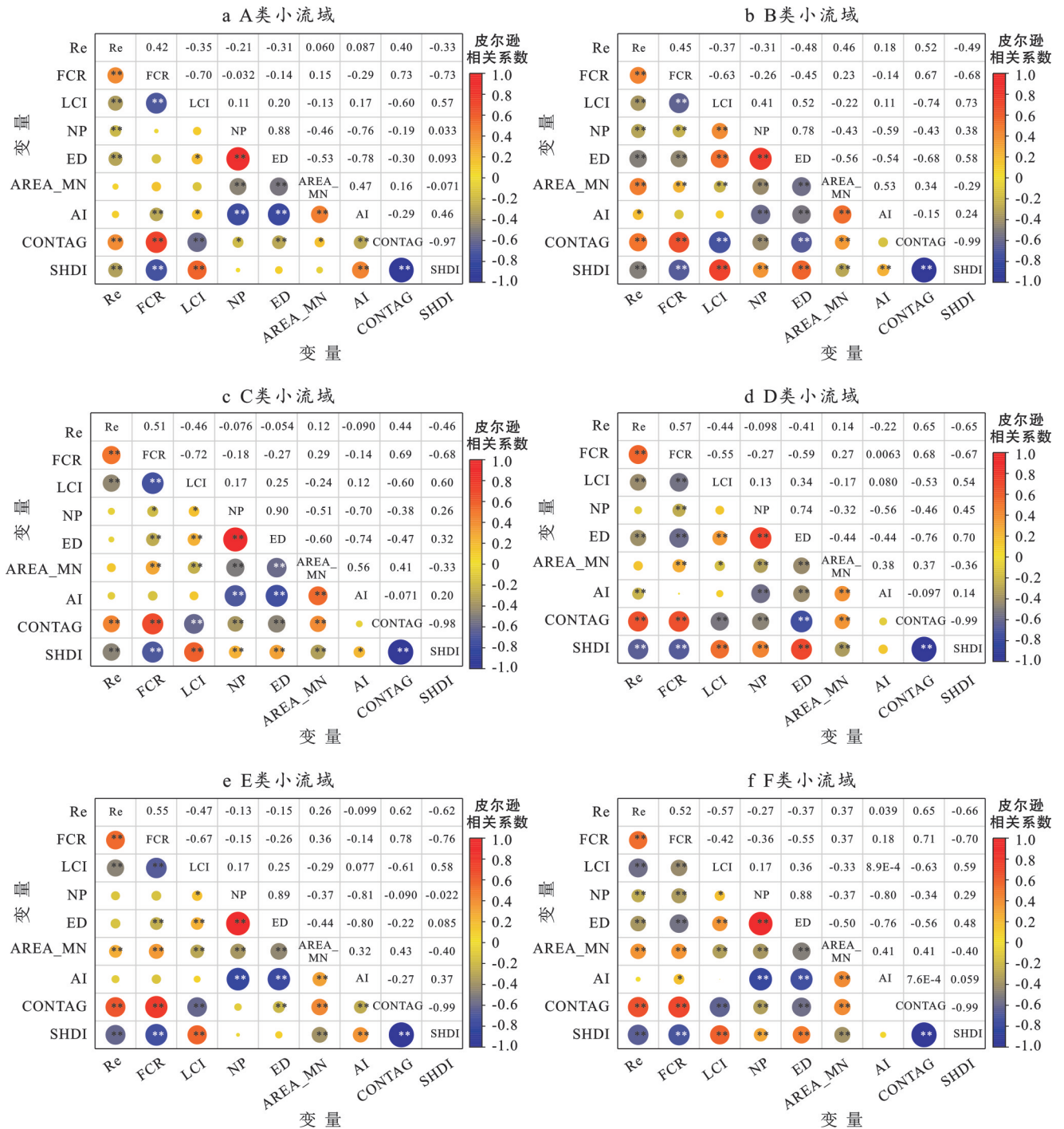
通过对比不同流域各景观指数之间的关系, 发

现它们之间存在着错综复杂的相互作用关系。FCR 与 CONTAG 呈现出显著的极显著正相关关系, 表明 FCR 的提升往往伴随着 CONTAG 的增加, 二者在景观格局中存在协同变化趋势; LCI 与 SHDI 同样表现出极显著的正相关关系, 即 LCI 的变动与 SHDI 的变化具有一致性, 二者在景观结构演变过程中相互影响。

### 2.2.2 各类小流域景观指数对水源涵养量的综合影响

以景观格局优化为核心目标, 基于各景观指数对水源涵养量影响的显著性分析, 为景观格局调整提供更科学的依据, 综合考量景观格局与小流域出口的空间位置关系, 能够显著提升调整工作的针对性与有效性。其中, 林地占比 (FCR) 直接表征生态用地规模, 对水源涵养功能起主导作用; 景观空间负荷对比指数 (LCI) 则量化了景观格局与水系的空间关系, 能够有效反映景观要素对流域生态过程的影响路径。因此, 选取 FCR 与 LCI 作为关键调控指标, 可在统筹生态功能与空间区位的基础上, 为景观格局优化提供科学精准的切入点。

根据上述结论, 采用响应面方法, 对不同类型小流域 FCR, LCI 与 Re 的关系进行综合分析 (图 5)。通过对比分析这 6 类小流域, 发现当 FCR 低于 58.82% 且 LCI 高于 0.272 时, 随着 FCR 的逐渐增加以及 LCI 的逐渐减小, 小流域的水源涵养量呈现显著增长态势, 在不同小流域中分增加了 60.50%, 30.00%, 28.00%, 53.57%, 79.31% 和 54.54%; 而当 FCR 高于 80.65% 且 LCI 低于 0.218 时, 即使 FCR 继续增加或者 LCI 持续减小, 小流域水源涵养量的增量仍显著受限, 其增长趋势趋于平缓。



注:\*表示  $p < 0.05$ , \*\*表示  $p < 0.01$

图 4 各类小流域景观格局指数与水源涵养量的皮尔逊相关系数  
Fig.4 Pearson correlation coefficients between landscape pattern indexes of various types of small watersheds and water conservation capacity

研究表明,当 B 类小流域的 LCI 处于 0.245~0.272 区间,FCR 处于 58.82%~78.33% 区间时,其水源涵养量的变化幅度仅为 12.24%;而在 A 类小流域相同参数区间内,水源涵养量变化幅度则达 32.00%。这表明在降水净输入量处于低值的环境下,地形指数较低的小流域内,景观指数的动态变化对水源涵养量的提升具有显著的促进效应。对降水

净输入量处于适中水平的 C, D 两类小流域进行对比分析发现,当 C 类小流域的 LCI 介于 0.218~0.255, FCR 处于 67.5%~80.65% 区间时,水源涵养量由 327.18 mm 增至 377.36 mm,增幅为 15.34%。但相较于地形指数较高的 D 类小流域,在同等景观指数条件下,C 类小流域的水源涵养量增长显著趋缓。通过对降水净输入量较高的 E, F 两类小流域开展对比研

究发现,在 LCI 低于 0.148 且 FCR 高于 90.01% 的条件下,地形指数较高的 F 类小流域相较于地形指数较

低的 E 类小流域,其水源涵养量呈现出显著的增长态势。

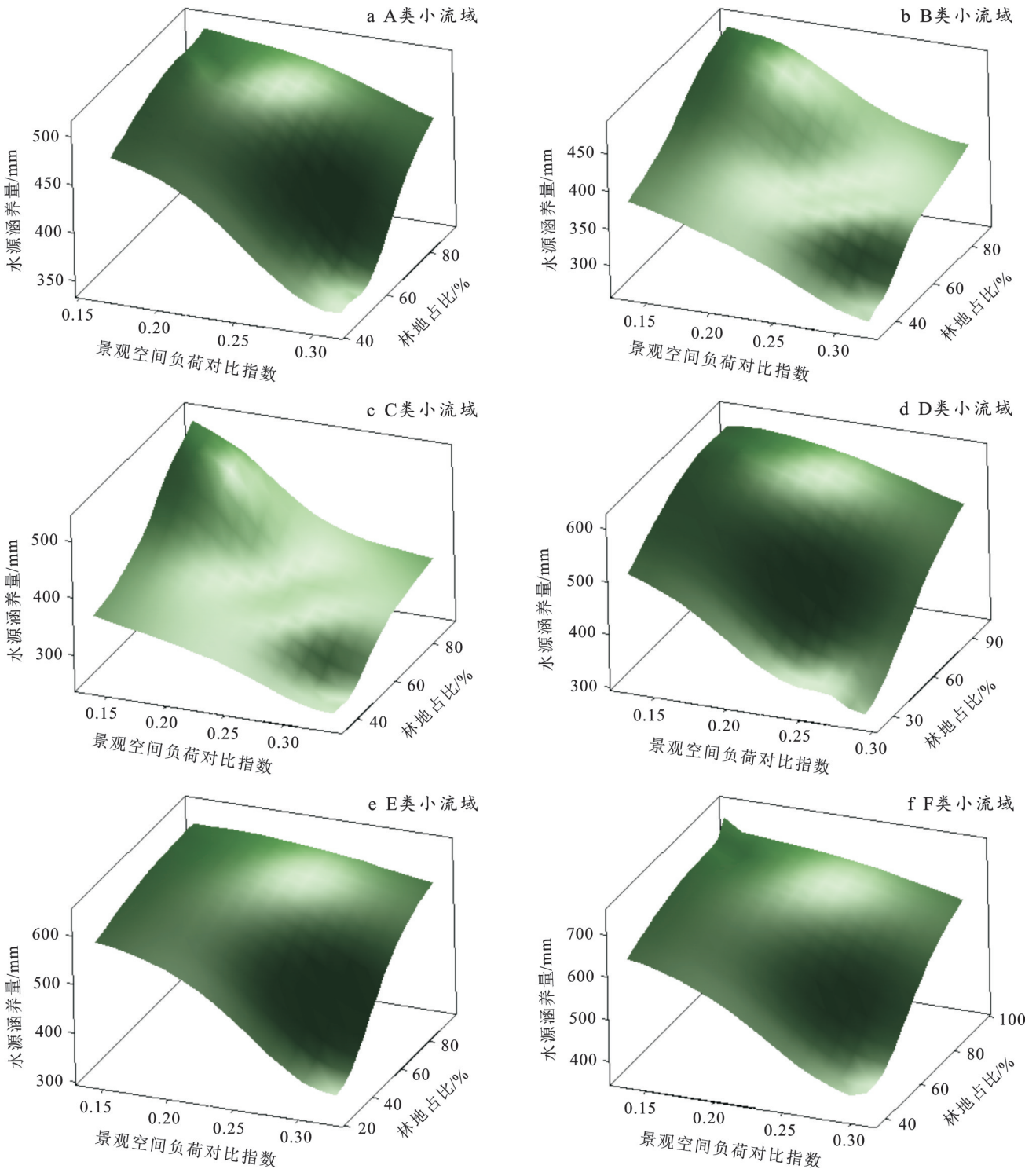


图 5 各类小流域水源涵养量与林地占比、景观空间负荷对比指数曲面图

Fig.5 Curved surface charts of water conservation capacity, forest land proportion and landscape spatial load contrast index of various types of small watersheds

对降水净输入量存在差异的两大类小流域对比分析,结果发现,随着降水净输入量的增加,两类小流域的水源涵养量均呈现出显著的正向响应趋势。在地形指数较低的 A,C,E 3 类小流域中,A 类与 E 类

小流域的水源涵养量在变化趋势上具有较高的趋同性,而 C 类小流域则表现出明显的异质性特征。在降水净输入量处于中等水平的条件下,当 C 类小流域的 LCI 介于 0.218~0.255 之间,FCR 处于

67.5%~80.65%区间时,其水源涵养量虽呈增长态势,但增长速率较为平缓。具体表现为,水源涵养量从327.18 mm提升至377.36 mm,增幅达15.34%。相较于A类与E类小流域在同等条件下的变化趋势,C类小流域的水源涵养量增长曲线更为平缓;在地形指数较高的B,D,F类小流域中,D类与F类小流域的水源涵养量变化趋势呈现出显著的趋同性。而B类小流域的LCI处于0.245~0.272区间,FCR维持在58.82%~78.33%时,其水源涵养量呈现微弱增长,增幅为12.24%。

### 3 讨论

研究表明,斑块数量与水源涵养能力呈显著负相关,而平均斑块面积与之呈显著正相关。李理等<sup>[21]</sup>对淇河流域的研究表明,随着斑块数量的增加,尤其是空间上离散斑块的增多,难以形成连续且完整的生态系统,显著削弱流域对水分的截留与渗透功能,进而导致水源涵养能力降低。较大的平均斑块面积有助于维持景观要素的完整性与连续性,保障生态过程稳定。林地、湿地等水源涵养型景观中,大面积斑块可高效拦截降水、延缓径流,增强土壤水分入渗能力,提升区域水源涵养效能<sup>[22]</sup>。此外,斑块数量的增大意味着平均斑块面积的减少,使得景观趋于破碎化,造成水分在土壤中的流动路径受阻,水分入渗减少,导致地表径流增加,进而降低水源涵养能力<sup>[23]</sup>;基于斑块数量与平均斑块面积对水源涵养能力的显著影响,景观格局的多维特征进一步揭示其复杂作用机制,边界密度作为景观异质性量化指标,其值越高,景观斑块之间的过渡越频繁,生态系统的稳定性相对较差<sup>[24]</sup>,高边界密度往往伴随着景观破碎化,加剧水分交换的复杂性与无序性,提升地表径流风险,削弱水源涵养能力;与边界密度的影响机制类似,香农多样性指数景观中越高,土地利用类型越丰富,斑块破碎化程度加剧,生态功能协同效应减弱,进而导致水源涵养量降低<sup>[25]</sup>;与上述表征破碎化的指数形成对照,景观聚集度指数及蔓延度指数则体现景观要素空间聚合效应,在水源涵养功能方面,林地等功能斑块的高聚集度与蔓延度,可构建高效“水分涵养网络”,强化生态系统服务效能。山区森林生态系统研究显示,高聚集度森林斑块能协同优化林冠截留、枯枝落叶层蓄水及土壤入渗等过程,显著提升水源涵养能力<sup>[6]</sup>。

本研究明确了林地占比和景观空间负荷对比指数对水源涵养量的综合影响。低景观空间负荷对比指数和高林地占比有利于水源涵养量的提升,这一

结论与众多已有的生态水文学理论相契合。景观空间负荷对比指数基于土地利用类型的生态功能属性差异,将建设用地、农田等高人类活动强度的“源景观”与林地、湿地等自然生态主导的“汇景观”进行空间分布对比分析。例如,Jian G<sup>[26]</sup>认为,低景观负荷对比指数的流域出口林地、果园等汇景观集中分布,高植被覆盖与优质土壤形成缓冲带,降水时,植被截留、枯枝滞流、土壤入渗协同作用,削减洪峰、减少侵蚀,优化水文过程,显著增强水源涵养能力。此外,高林地占比促进水源涵养量提升的机制,诸如植被对降水的截留,增强土壤入渗等作用,已获诸多学者的研究验证。如盛菲等<sup>[27]</sup>在针对濂水流域的研究中发现,林地面积增加对径流产生显著影响。林地植被凭借枝叶对大量降水进行截留,有效减缓雨滴对地面的冲击力度;同时,其根系可改良土壤结构,提升土壤入渗能力,进而切实有效地增强水源涵养功能。本研究证实,上述关联模式在不同类型小流域中普遍存在,验证了这些生态过程的基础性与广泛性。然而,各类型小流域对此关联的响应程度存在显著差异,这一现象揭示了生态系统的复杂性,表明其受地形地貌、气候条件、生物群落结构等多因素协同与交互作用的影响<sup>[28]</sup>。

地形和降水作为影响水源涵养两个关键的自然因素,与景观格局交互作用,共同对水源涵养量产生复杂而深远的影响。本研究明确揭示了不同地形指数和降水净输入量影响下的景观格局对水源涵养量的影响,各小流域呈现出独特的响应模式,这与先前诸多研究成果存在一定的关联与呼应。

本研究结果显示,在降水净输入量相对较少且地形指数相对较大的B类小流域,景观格局对水源涵养量的影响具有局限性。这可能与地形对降水再分配以及土壤水分运动的影响密切相关。较高的地形指数导致坡面径流速度加快,在B类小流域降水净输入量较少的前提下,降水在地表停留时间缩短,致使原本就稀少的水分尚未来得及充分渗入土壤就流失,从而限制了水源涵养量的提升幅度。Mohaimen A<sup>[29]</sup>认为,地形起伏较大的区域,地表径流的产生和汇流过程更为迅速,在一定程度上减少了水分向土壤深层渗透和被植被截留的机会,进而对水源涵养功能产生负面影响。黄奕龙等<sup>[30]</sup>研究指出,在低降水条件下,地形因素对土壤水分的空间分布格局具有决定性作用。因此,在降水净输入量相对较少且地形指数相对较大的地区,景观格局对水源涵养量的影响具有局限性。

同样的,在降水净输入量适中且地形指数相对

较低的C类小流域,景观格局对水源涵养量的提升作用有限。这可能是由于平缓地形虽利于汇水,但排水不畅导致土壤通气性差,抑制植被根系呼吸与微生物活性,降低水分吸收利用效率,使得水源涵养量增长趋缓。周云等<sup>[31]</sup>的研究发现,在适中降水条件下,地形平坦且土壤质地黏重的区域,土壤孔隙度较小,水分入渗后容易形成积水,造成土壤缺氧环境,不利于植物根系的生长和发育,从而削弱了植被的水源涵养功能。

此外,地形条件与降水特征显著影响景观破碎化程度,而景观破碎化又对水源涵养量形成反馈调节机制。以A,D,E,F类小流域为例,水源涵养量并非由单一降水或地形要素主导,而是受景观格局与地形、降水要素复杂交互的综合影响。景观破碎化会加剧水土流失,破坏生态连通性,削弱水源涵养功能;而完整连续的景观格局,如连片森林或湿地,可优化水文过程,缓冲地形与降水变化的扰动,保障水源涵养能力的稳定<sup>[32]</sup>。

## 4 结论

(1) 赣南地区小流域的平均水源涵养量为434.29 mm,占年均降水量的28.05%,并且在空间分布上具有较大差异。

(2) 小流域景观格局指数与水源涵养量密切相关,FCR, AREA\_MN和CONTAG与水源涵养量呈正相关,LCI, NP, ED和SHDI与之呈负相关, AI无显著相关关系,且不同类型小流域中各景观指数与水源涵养量的相关性存在差异。

(3) 基于响应面方法分析得出,小流域在低景观空间负荷指数( $LCI < 0.218$ )和高林地占比( $FCR > 80.65\%$ )时,水源涵养量随着FCR的增加和LCI的减小而缓慢增大;在高景观空间负荷对比指数( $LCI > 0.272$ )和低林地占比( $FCR < 58.82\%$ )时,小流域的水源涵养量随着FCR的增加和LCI的减小显著增大。

(4) 对比不同降水净输入量和地形指数的小流域,在相同景观空间负荷对比指数和林地占比条件下,水源涵养量变化趋势存在差异。当 $58.82\% < FCR < 80.65\%$ 且 $0.218 < LCI < 0.272$ 时,在降水净输入量少(463~607 mm)且地形指数高(19~24)的小流域,以及降水净输入量中等(607~751 mm)且地形指数低(12~19)的小流域内,水源涵养量呈现缓慢增长的态势,而其他类型的小流域均有显著增长。

(5) 对林地占比和景观空间负荷对比指数进行调整是提升水源涵养量的一种可行性途径。然而,

本研究中的B,C类型的小流域在特定的参数区内,尽管采取了上述调整措施,但水源涵养量的提升幅度相对有限,未能呈现出显著的增长态势。

## 参考文献(References)

- [1] 高向龙,冯起,李宗省,等.三江源水源涵养价值时空格局及影响因素[J].生态学报,2024,44(16):7074-7086.  
Gao Xianglong, Feng Qi, Li Zongxing, et al. Spatio-temporal pattern and key influencing factors of water conservation value in the three-river source region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(16): 7074-7086.
- [2] 龚诗涵,肖洋,郑华,等.中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J].生态学报,2017,37(7):2455-2462.  
Gong Shihan, Xiao Yang, Zheng Hua, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [3] 刘俸汝,赵俊三,林伊琳,等.基于气候和土地利用变化的云南省水源涵养功能时空演变及驱动力分析[J].水土保持学报,2024,38(5):212-224.  
Liu Fengru, Zhao Junsan, Lin Yilin, et al. Temporal and spatial evolution and driving force analysis of water conservation function in Yunnan Province based on climate and land use change [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5): 212-224.
- [4] 王作泉,贺康宁.祁连山东部地区不同林分水源涵养能力综合评估[J].生态学报,2024,44(17):7662-7672.  
Wang Zuoxiao, He Kangning. Comprehensive assessment of water conservation capacity in different forest stands in the eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(17): 7662-7672.
- [5] 魏雷哈冰,时鹏,魏勇,等.窟野河流域生态系统服务功能变化及其驱动因素分析[J].水土保持学报,2024,38(4):222-235.  
Wei Leihanbing, Shi Peng, Wei Yong, et al. Analysis of ecosystem service function changes and their driving factors in the kuye river basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 222-235.
- [6] 吕乐婷,乔皓,郑德凤,等.太子河流域景观格局时空演变及其对水源涵养的影响[J].水资源保护,2023,39(6):111-120.  
Lyu Leting, Qiao Hao, Zheng Defeng, et al. Spatial-temporal evolution of landscape pattern in the Taizi River basin and its impact on water conservation [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6): 111-120.
- [7] 朱求安,吴晓丽,于冬雪,等.黄河兰州以上区域草地覆盖变化对水源涵养的定量影响分析[J].水科学进展,2024,35(4):543-555.  
Zhu Qiu'an, Wu Xiaoli, Yu Dongxue, et al. Quantitative impact of grassland cover change on water conservation

- in the Yellow River above Lanzhou [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(4): 543-555.
- [8] 陈文华, 徐娟, 李双成. 滇西山地城市水源涵养功能研究: 以保山市为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(6): 1153-1160.  
Chen Wenhua, Xu Juan, Li Shuangcheng. Water conservation function of mountainous city in western Yunnan: A case study of Baoshan City [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, 57(6): 1153-1160.
- [9] 付扬军, 师学义. 基于小流域尺度的县域国土空间生态修复分区: 以山西汾河上游为例[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(5): 1225-1239.  
Fu Yangjun, Shi Xueyi. Ecological restoration zoning of county-level territorial space based on small watershed scale: A case study of the upper Fenhe River in Shanxi [J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(5): 1225-1239.
- [10] 尹思危, 王跃峰, 周琨鸿, 等. 三峡库区小流域景观格局变化洪枯径流效应及归因分析[J]. *生态学报*, 2024, 44(18): 7962-7976.  
Yin Siwei, Wang Yuefeng, Zhou Kunhong, et al. Runoff extreme responses to watershed landscape pattern changes and their attribution analysis in the Three Gorges reservoir area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(18): 7962-7976.
- [11] 孙庆艳, 余新晓, 胡淑萍, 等. 基于 ArcGIS 环境下 DEM 流域特征提取及应用[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(增刊2): 144-147.  
Sun Qingyan, Yu Xinxiao, Hu Shuping, et al. Extraction and application of hydrological information based on DEM in ArcGIS environment [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(Suppl.2): 144-147.
- [12] 蔺彬彬, 张亚琼, 武鹏林. GIS 环境下基于 DEM 的三川河流域特征提取[J]. *中国农村水利水电*, 2013(3): 34-37.  
Lin Binbin, Zhang Yaqiong, Wu Penglin. Extraction of characteristics of Sanchuan River basin based on DEM in GIS environment [J]. *China Rural Water and Hydro-power*, 2013(3): 34-37.
- [13] 胡估熹, 勒先文, 王卫林, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的江西省生态系统碳储量时空演变与预测[J]. *环境科学*, 2024, 45(6): 3284-3296.  
Hu Jixi, Le Xianwen, Wang Weilin, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of ecosystem carbon storage in Jiangxi Province based on PLUS-InVEST model [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(6): 3284-3296.
- [14] 李冲, 张璇, 吴一帆, 等. 京津冀生态屏障区景观格局变化及其对水源涵养的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(6): 2588-2595.  
Li Chong, Zhang Xuan, Wu Yifan, et al. Landscape pattern change of the ecological barrier zone in Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on water conservation [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(6): 2588-2595.
- [15] 贾玉雪, 帅红, 韩龙飞. 资江尾间集水区景观格局与非点源污染过程关系研究[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(4): 833-843.  
Jia Yuxue, Shuai Hong, Han Longfei. Relationship between landscape patterns and non-point source pollution processes in the Zijiang catchment tail, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(4): 833-843.
- [16] 王金亮, 谢德体, 倪九派, 等. 基于源汇景观单元的流域土壤侵蚀风险格局识别[J]. *生态学报*, 2017, 37(24): 8216-8226.  
Wang Jinliang, Xie Deti, Ni Jiupai, et al. Identification of soil erosion risk patterns in a watershed based on source-sink landscape units [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8216-8226.
- [17] 张桐艳, 贺敬滢, 李光录, 等. 基于水土流失风险的流域景观格局识别方法研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 175-179.  
Zhang Tongyan, He Jingying, Li Guanglu, et al. Method of watershed landscape pattern analysis based on the risk of soil and water loss [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(3): 175-179.
- [18] 张忠伟, 郭晋廷, 张军, 等. 基于多源数据的云南省水源涵养能力评估及影响因素研究[J]. *西北林学院学报*, 2025, 40(1): 165-177.  
Zhang Zhongwei, Guo Jinting, Zhang Jun, et al. Assessment of water conservation capacity and influencing factors in Yunnan Province based on multi-source data [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2025, 40(1): 165-177.
- [19] 郑博福, 黄琼瑶, 陶林, 等. 赣南地区景观格局变化及其对生态系统服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(15): 5940-5949.  
Zheng Bofu, Huang Qiongyao, Tao Lin, et al. Landscape pattern change and its impacts on the ecosystem services value in southern Jiangxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(15): 5940-5949.
- [20] 王耀鑫, 高家勇, 张玉珊, 等. 喀斯特流域水源涵养功能时空分异及其对景观格局的响应[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 169-178.  
Wang Yaixin, Gao Jiayong, Zhang Yushan, et al. Spatial and temporal differentiation of water conservation function in karst basin and its response to landscape pattern [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 169-178.

- [21] 李理,朱连奇,朱文博,等.生态系统服务价值与人类活动强度关联性分析及权衡:以淇河流域为例[J].中国环境科学,2020,40(1):365-374.  
Li Li, Zhu Lianqi, Zhu Wenbo, et al. The correlation between ecosystem service value and human activity intensity and its trade-offs: Take Qihe River basin for example [J]. China Environmental Science, 2020, 40(1):365-374.
- [22] 温永斌,韩海荣,程小琴,等.不同幅度景观格局与水分利用效率耦合研究:以千烟洲为例[J].北京林业大学学报,2019,41(12):88-95.  
Wen Yongbin, Han Hairong, Cheng Xiaoqin, et al. Coupling of landscape pattern and water use efficiency with different amplitudes: A case study of Qianyanzhou in Eastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(12):88-95.
- [23] 柳冬青,曹二佳,张金茜,等.甘肃白龙江流域水源涵养服务时空格局及其影响因素[J].自然资源学报,2020,35(7):1728-1743.  
Liu Dongqing, Cao Erjia, Zhang Jinxi, et al. Spatiotemporal pattern of water conservation and its influencing factors in Bailongjiang watershed of Gansu [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(7):1728-1743.
- [24] 陈明霞,巩娟霄,苑煜思.兰白经济区城市群景观生态系统格局演变及驱动因素分析[J].西北林学院学报,2023,38(1):10-17.  
Chen Mingxia, Gong Juanxiao, Yuan Yusi. Changes in landscape ecosystem pattern and driving factors in the urban agglomeration of Lanzhou-Baiyin economic zone [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(1):10-17.
- [25] 徐建英,樊斐斐,刘焱序,等.汶川县生态系统服务对景观格局及其变化的响应[J].生态学报,2020,40(14):4724-4736.  
Xu Jianying, Fan Feifei, Liu Yanxu, et al. Response of ecosystem services to landscape pattern and its changes in Wenchuan County, Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14):4724-4736.
- [26] Jian G, Jianxin Y, Wenwu T. Spatially explicit landscape-level ecological risks induced by land use and land cover change in a national ecologically representative region in China [J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2015, 12(11):14192-14215.
- [27] 盛菲,刘士余,戴余典,等.濂水流域景观生态风险变化对洪水的影响[J].中国环境科学,2023,43(10):5466-5474.  
Sheng Fei, Liu Shiyu, Dai Yudian, et al. Impact of landscape ecological risk change on flood in Lianshui watershed [J]. China Environmental Science, 2023, 43(10):5466-5474.
- [28] 张昌顺,谢高地,刘春兰,等.基于水源涵养参照系的中国生态系统水源涵养功能优劣评估[J].生态学报,2022,42(22):9250-9260.  
Zhang Changshun, Xie Gaodi, Liu Chunlan, et al. Evaluation of water conservation of China's ecosystems based on benchmark [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22):9250-9260.
- [29] Mohaimen A, Nath B, Hasan M R. Geospatial-based tectono-morphometric analyses of the drainage system in the Chengi and Myinee River basins in the Chittagong Hill Tracts, Bangladesh [J]. Geosystems and Geoenvironment, 2024, 3(1):100224, <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100224>.
- [30] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域土壤水分空间格局及其影响因素[J].自然资源学报,2005,20(4):483-492.  
Huang Yilong, Chen Liding, Fu Bojie, et al. Spatial pattern of soil water and its influencing factors in a gully catchment of the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(4):483-492.
- [31] 周云,黎建强,高朗,等.林下三七不同管理措施对坡面产流产沙和土壤特性的影响[J].水土保持学报,2024,38(5):20-30.  
Zhou Yun, Li Jianqiang, Gao Lang, et al. Effects of different management measures of cultivation *Panax notoginseng* under forest on runoff and sediment yield and soil characteristics on slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5):20-30.
- [32] 王世清,冀正欣,卢龙辉,等.张家口市林地与水源涵养功能时空变化及其耦合关系[J].农业工程学报,2023,39(10):131-140.  
Wang Shiqing, Ji Zhengxin, Lu Longhui, et al. Spatiotemporal changes and coupling relationship between forestland and water conservation function in Zhangjiakou City of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(10):131-140.