

DOI: 10.20103/j.stxb.202404190877

魏冲,董晓华,马耀明,彭涛,喻丹,冷梦辉.多源土地利用数据下景观格局对径流-泥沙影响的不确定性——以鄱阳湖区虎山流域为例.生态学报, 2025,45(3):1102-1115.

Wei C, Dong X H, Ma Y M, Peng T, Yu D, Leng M H. Uncertainty analysis on the effects of landscape pattern on runoff and sediment using multi-source land use data: a case study in the Hushan River Basin of the Poyang Lake Regions. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1102-1115.

多源土地利用数据下景观格局对径流-泥沙影响的不确定性

——以鄱阳湖区虎山流域为例

魏冲^{1,2},董晓华^{1,2,*},马耀明^{3,4,5,6,7,8},彭涛^{1,2},喻丹^{1,2},冷梦辉^{1,2}

1 三峡大学水利与环境学院,宜昌 443002

2 三峡库区生态环境教育工程研究中心,宜昌 443002

3 中国科学院青藏高原研究所青藏高原地球系统与资源环境重点实验室地气作用与气候效应团队,北京 100101

4 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049

5 兰州大学大气科学学院,兰州 730000

6 西藏珠穆朗玛特殊大气过程与环境变化国家野外科学观测研究站,定日 858200

7 中国科学院加德满都科教中心,北京 100101

8 中国科学院中国-巴基斯坦地球科学研究中心,伊斯兰堡 45320

摘要:景观格局是表征土地利用(LUCC)空间分布特征的重要指标,人类活动导致的景观格局变化是改变流域径流-泥沙过程的重要因素之一。现有研究仅采用单一来源的LUCC产品探究景观格局对径流-泥沙过程的影响,忽略了不同LUCC产品给研究带来的不确定性。以鄱阳湖区饶河上游虎山流域为研究对象,基于1963—2022年气象水文数据和3种同分辨率的1990—2020年七期LUCC产品,分析流域降雨、径流、输沙和土地利用的变化特征,并结合相关分析和偏最小二乘回归法(PLSR)探究景观格局变化对径流-泥沙特征的影响及其不确定性。研究发现,1963—2022年,虎山流域年输沙模数(STM)和含沙量(SSC)呈显著增长趋势($P < 0.001$),径流深(RD)呈不显著增长趋势。流域内主要的LUCC为林地和耕地,约占流域面积的(79.57±6.03)%和(15.72±2.36)%。1990—2020年,城镇扩张主要侵占林地和耕地,且存在较多林地-耕地之间的相互转化。不同LUCC产品得到的景观格局指数存在显著的差异($P < 0.05$),主要由于其对灌木和草地的识别差异所导致的。总体来说,研究区景观的最大斑块面积有所减小,景观破碎度有轻微增长,景观多样性有一定的增加。不同LUCC产品下得到的景观格局对径流-泥沙的影响存在差异,所有产品一致的结论是:斑块密度(PD)和蔓延度指数(CONTAG)与RD、STM和SSC呈负相关关系,边缘密度(ED)、Shannon多样性指数(SHDI)和Shannon均匀度指数(SHEI)与STM和SSC呈正相关关系;PLSR模型显示最大斑块占景观面积比例、斑块结合度、景观分割度、SHDI和修正的Simpson均匀度指数(MSIEI)对RD、STM和SSC的变化具有重要意义。选用ED表征面积-边缘特征、选用PD和CONTAG表示聚散度特征以及选用SHDI和SHEI表征多样性特征可以相对减少LUCC产品对研究结果带来的不确定性。通过增加流域内林地与耕地之间的连通性,减少零散分布的耕地,尽可能避免两种景观类型之间的相互转换,可以减少景观破碎化程度,缓解流域土壤侵蚀。研究成果可为鄱阳湖区水土流失防治及生态文明建设提供参考。

关键词:景观格局;多源土地利用数据;土壤侵蚀;偏最小二乘回归;鄱阳湖区

Uncertainty analysis on the effects of landscape pattern on runoff and sediment using multi-source land use data: a case study in the Hushan River Basin of the Poyang Lake Regions

WEI Chong^{1,2}, DONG Xiaohua^{1,2,*}, MA Yaoming^{3,4,5,6,7,8}, PENG Tao^{1,2}, YU Dan^{1,2}, LENG Menghui^{1,2}

基金项目:第二次青藏高原科学考察与研究项目(2019QZKK0103);国家自然科学基金(42401030);三峡大学科研启动基金(2023RCKJ0025)

收稿日期:2024-04-19; 网络出版日期:2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xhdong@ctgu.edu.cn

1 College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

2 Engineering Research Center for the Ecological Environment of the Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China

3 Land-Atmosphere Interaction and its Climatic Effects Group, State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Environment and Resources (TPESER), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

6 National Observation and Research Station for Qomolangma Special Atmospheric Processes and Environmental Changes, Dingri 858200, China

7 Kathmandu Center of Research and Education, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

8 China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Islamabad 45320, Pakistan

Abstract: Landscape pattern is a significant indicator for representing the spatial distribution characteristics of land use and land cover change (LUCC). The landscape pattern changes caused by human activities are important factors that alter the hydrological processes within a watershed. Existing studies on the impact of landscape patterns on runoff-sediment processes only rely on single-source LUCC data, neglecting the uncertainty brought by LUCC data. In this study, the Hushan watershed in the Poyang Lake region was selected as the study area. Based on rainfall, runoff, and sediment data from 1963 to 2022, combined with seven periods of LUCC data from 1990 to 2020 at the same resolution obtained from three LUCC products, the characteristics of rainfall, runoff, sediment, and land use changes in the watershed were analyzed. Correlation analysis and partial least squares regression (PLSR) were used to investigate the impact of landscape pattern changes on runoff-sediment process characteristics and their uncertainty. The results showed that from 1963 to 2022, the annual sediment transport modulus (STM) and suspended sediment concentration (SSC) in the Hushan watershed showed a significant increasing trend ($P < 0.001$), while the Runoff Depth (RD) showed an insignificant increasing trend. The main LUCC types in the watershed were forest land and cultivated land, accounting for approximately $(79.57 \pm 6.03)\%$ and $(15.72 \pm 2.36)\%$ of the watershed area, respectively. From 1990 to 2020, urban expansion mainly encroached on forest land and cultivated land, with significant land conversions between the two. There were significant differences in landscape pattern characteristics among different LUCC types ($P < 0.05$), mainly due to the identification differences of shrub land and grass land by different LUCC products. In general, the maximum patch area of the landscape in the study area decreased, landscape fragmentation increased slightly, and landscape diversity increased to some extent. The influence of landscape patterns obtained under different LUCC products on runoff and sediment varies. The consistent findings across all products indicated that Patch Density (PD) and Contagion Index (CONTAG) are negatively correlated with RD, STM, and SSC, while Edge Density (ED), Shannon Diversity index (SHDI), and Shannon Evenness Index (SHEI) are positively correlated with STM and SSC. The PLSR model indicates that the proportion of the Largest Patch Index (LPI), Patch Cohesion (COHESION), Landscape Division (DIVISION), SHDI, and Modified Simpson Evenness Index (MSIEI) play significant roles in the variations of RD, STM, and SSC. Using ED to represent area-edge characteristics, PD and CONTAG to represent aggregation-dispersion characteristics, and SHDI and SHEI to represent diversity characteristics can relatively reduce the uncertainties caused by LUCC products in research results. By increasing the connectivity between forest land and cultivated land, reducing scattered cultivated land, and avoiding mutual conversions between the two landscape types as much as possible, the degree of landscape fragmentation can be reduced, and soil erosion in the watershed can be alleviated. The findings of this study provide a reference for soil erosion control and ecological civilization construction in the Poyang Lake region.

Key Words: landscape pattern; multi-source land use maps; soil erosion; Partial Least Square Regression model; Poyang Lake region

土地利用(LUCC)变化会显著改变流域水文过程,进而影响流域水文循环^[1-2]。随着改革开放以来,一些不合理的土地利用开发方式,会导致流域土壤侵蚀严重^[3],水资源再分配失衡,显著地改变了流域下垫面条件以及原有的水文循环。学者们针对LUCC变化下的水文响应开展了大量的研究^[4-6]。LUCC变化主要分为LUCC结构变化和景观格局变化,前者表征不同地类数量的变化,后者表征不同地类空间分布的变化^[7]。不同LUCC类型具有不同的产流和固土能力,因此LUCC结构变化会改变流域产流及产沙过程;不同地类的空

间分布特征会影响流域坡面汇流和地表径流的输沙过程,因此景观格局变化会改变流域汇流及输沙过程^[4]。近年来,越来越多的学者开始关注景观格局对流域水沙过程的影响^[8-9]。

学者们开发了多种景观格局指数,来表征区域内的景观格局特征^[10-11]。近年来,学者们发现景观格局对流域径流^[12-13]、土壤侵蚀^[14-15]、水质^[16]及有机物分解有显著影响。陈启慧^[12]等发现伊犁河三角洲地区景观格局指数与巴尔喀什湖年均水位有着高相关性;许文旭^[13]等发现黄土高原地区某小流域内斑块密度(*PD*)、边缘密度(*ED*)和 Shannon 多样性指数(*SHDI*)与径流量存在显著正相关关系($P < 0.05$),聚集指数(*AI*)、蔓延度指数(*CONTAG*)和斑块结合度(*COHESION*)与径流量呈显著负相关关系($P < 0.05$)。田昌园^[14]等发现大别山区 *SHDI*、*ED* 和景观形状指数(*LSI*)与土壤侵蚀量呈显著正相关关系,相似邻近百分比(*PLADJ*)与土壤侵蚀量呈显著负相关关系;候琨^[15]等发现延河流域“源”景观的破碎化程度减小、“汇”景观的邻近度增加且连通性增强时,有助于流域泥沙拦截与调控。徐明珠^[16]等探究了秦岭南麓小流域景观格局对水质的影响,结果表明最大斑块指数(*LPI*)、*SHDI* 和 *PD* 对河流中总氮的累积有较大影响。

在以往的研究中,研究人员大多基于单一来源的 LUC 产品分析 LUC 与水文要素的关系。LUC 解译结果往往会由于样本数量及代表性、分类标准、分类方法和算法的不同而存在一定差异^[17]。因此,不同 LUC 产品对同一区域的景观格局特征的解译结果可能会存在差异,从而给相关研究带来一定的不确定性。目前,尚无学者基于多套 LUC 产品探究景观格局变化对径流-泥沙过程的影响及其不确定性。

鄱阳湖是中国最大的淡水湖,具有极其重要的生态功能,研究鄱阳湖区土壤侵蚀变化因素对湖区可持续发展具有重要意义。已有研究表明,鄱阳湖区降雨侵蚀力呈增长趋势,增加了入湖泥沙量;而诸如水库建设、水土保持和采砂等人类活动减少了入湖泥沙量^[18]。然而,景观格局变化对鄱阳湖区土壤侵蚀的影响目前仍是模糊的。本研究以鄱阳湖东部饶河上游虎山流域为研究对象,基于历史降雨、径流和输沙数据以及三种 LUC 产品,分析流域内径流-泥沙和 LUC 变化情况,探究景观格局对流域径流-泥沙过程的影响及其不确定性。研究结果可以为鄱阳湖区土壤侵蚀防治提供指导依据,促进鄱阳湖区生态经济可持续发展。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

饶河流域位于鄱阳湖东部,介于 $116^{\circ}30' - 118^{\circ}13'E$, $28^{\circ}34' - 30^{\circ}03'N$ 之间,流域面积约 17141 km^2 ,占鄱阳湖区面积的 9.4%。虎山站位于饶河流域上游,控制面积约 6248.66 km^2 ,隶属上饶市、景德镇市和衢州市(图 1)。虎山流域主要以平原为主,少量山地丘陵分布于流域北部、东南部边缘地区,海拔范围为 $-80 - 1612 \text{ m}$ 。研究区位于亚热带季风气候区,年均降雨量约 $1400 - 2600 \text{ mm}$,多年平均气温约 17.5°C 。近几十年来,流域内城镇化发展迅速,导致 LUC 数量和空间分布变化显著。气候变化导致流域内年降雨量发生了较为明显的增长,土壤侵蚀风险增加。

1.2 数据来源及处理

本研究使用的数据主要有降雨、年径流量、年输沙量和 LUC 数据。其中,降雨数据选用缪驰远等人发布的中国逐日降雨数据集(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/e5c335d9-cbb9-48a6-ba35-d67dd614bb8c>),空间分辨率为 0.1° ,资料系列为 1963—2022 年。本文通过研究区的矢量边界提取降雨数据,使用算术平均法计算流域面平均降雨量,统计年尺度面平均降雨量用于后续分析。年径流量和输沙量数据从中华人民共和国水利部发布的《中国河流泥沙公报》获取(<http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zghlnsgb/>),系列长度为 1963—2022 年。

LUC 数据选用中国科学院资源环境科学与数据中心发布的中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUC) (<https://www.resdc.cn/DOI/DOL.aspx?DOIID=54>)、武汉大学发布的中国 30 m 年度土地覆盖产品(CLCD)^[19]和中国科学院空天信息创新研究院发布的全球土地覆被时序动态遥感产品(GLC_FCS)^[20],空间分辨率均为 30 m ,总计 7 期,分别采样于 1990、1995、2000、2005、2010、2015 和 2020 年。三种产品均以美国陆地卫星 Landsat 遥感影像为主要信息源,对遥感影像处理的方法存在些许差异。CNLUCC 通过人工目视解

译构建 LUC 数据集;CLCD 和 GLC_FCS 均基于 Google Earth Engine 平台,前者使用随机森林分类器、失控滤波和逻辑推理等方法构建 LUC 数据集,后者结合全球时空光谱库和局部自适应随机森林模型构建 LUC 数据集。

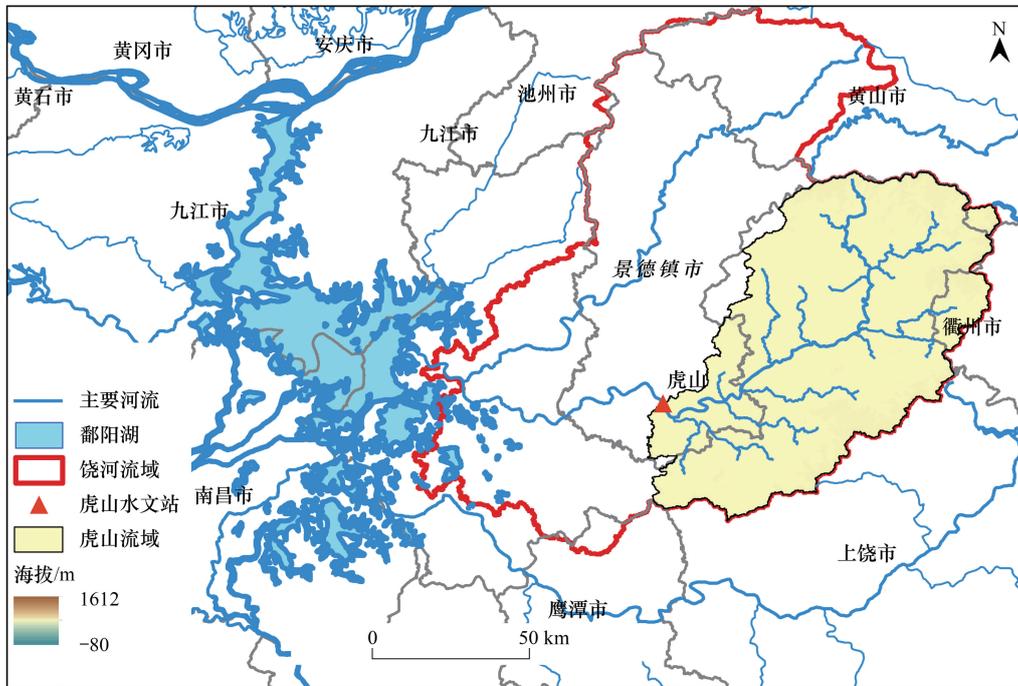


图1 饶河上游虎山流域概况图及其与鄱阳湖的位置关系

Fig.1 The description map of the study regions and its position relevant to the Poyang Lake

2 研究方法

2.1 径流-泥沙特征表征指标选取

本研究选用径流深(Runoff Depth, RD)、输沙模数(Sediment Transport Modulus, STM)、含沙量(Suspended Sediment Concentration, SSC)来表征径流-泥沙特征。其中, RD 表示流域单位面积的产水量(mm), STM 表示流域单位面积的输沙量(t/km^2), SSC 表示流域河道中径流携带泥沙的能力(kg/m^3)。基于上述三个指标,探究景观格局对流域径流-泥沙特征的影响,计算公式见式(1)–(3):

$$RD = \frac{WY_{\text{annual}}}{1000 \times A} \quad (1)$$

$$STM = \frac{SY_{\text{annual}}}{A} \quad (2)$$

$$SSC = \frac{1000 \times SY_{\text{annual}}}{WY_{\text{annual}}} \quad (3)$$

式中, RD 表示径流深(mm); WY_{annual} 表示径流量(m^3); A 表示流域面积(km^2); STM 表示输沙模数(t/km^2); SY_{annual} 表示年输沙量(t); SSC 表示含沙量(kg/m^3)。

2.2 景观格局指数

通过重分类将流域内 LUC 类型划分为耕地、林地、灌木林地、草地、水域、城镇建设用和荒地 7 种,使用 Fragstats4.2 软件计算流域景观格局指数。结合前人研究成果^[21–25],在景观水平上选取表征面积-边缘特征、形状特征、聚散度特征和多样性特征的 10 个景观格局指数进行相关研究,具体为:LPI、ED、周长面积分维

数(PAFRAC)、*PD*、景观分割度(DIVISION)、CONTAG、COHESION、SHDI、Shannon 均匀度指数(SHEI)和修正的 Simpson 均匀度指数(MSIEI),详细信息见表 1。

表 1 景观格局指数生态意义

Table 1 The ecological significance of the landscape pattern metrics

类型 Type	景观格局指数 Landscape pattern metrics	缩写 Abbreviation	生态意义 Ecological significance
面积-边缘指数 Area-edge metrics	最大斑块占景观面积比例	LPI	衡量景观中最大斑块的大小和相对分布。值越高表示景观中最大的斑块相对较大且分布较分散。
	边缘密度	ED	衡量景观中边缘线条的密集程度。值越高表示不同类型的斑块之间的边界较为密集。
形状指数 Shape metrics	周长面积分维数	PAFRAC	用于量化景观格局复杂性的指标。值越高表示景观斑块具有更多的复杂边界和内部结构。
聚散度指数 Aggregation metrics	斑块密度	PD	用于衡量景观中斑块的密集程度的指标。值越高表示景观中斑块之间的分布相对较密集。
	景观分割度	DIVISION	用于衡量景观分割程度的指标。值越高表示景观中存在较多和较复杂的斑块边界
	蔓延度指数	CONTAG	用于衡量景观中斑块的相互连接和交互性的指标。值越高表示景观中斑块之间具有较高的接触概率和连接性。
多样性指数 Diversity metrics	斑块结合度	COHESION	用于衡量景观斑块内部的凝聚性和内聚程度的指标。值越高表示斑块内部的局部区域之间的具有较高的联系和连接性。
	Shannon 多样性指数	SHDI	用于衡量景观中斑块类型多样性的指标。值越高表示景观中不同类型斑块的丰富度分布更均匀。
	Shannon 均匀度指数	SHEI	用于衡量景观中斑块类型均匀程度的指标。值越高表示景观中不同类型斑块的相对丰度分布更均匀。
	修正的 Simpson 均匀度指数	MSIEI	用于衡量景观中斑块类型相对丰度的均匀程度的指标。值越高表示景观中各类型斑块的相对丰度差异较小。

LPI:最大斑块占景观面积比例 Largest Patch Index; ED:边缘密度 Edge Density; PAFRAC:周长面积分维数 Perimeter Area Fractal Dimension; PD:斑块密度 Patch Density; DIVISION:景观分割度 Landscape Division Index; CONTAG:蔓延度指数 Contagion Index; COHESION:斑块结合度 Patch Cohesion Index; SHDI:Shannon 多样性指数 Shannon's Diversity Index; SHEI:Shannon 均匀度指数 Shannon's Evenness Index; MSIEI:修正的 Simpson 均匀度指数 Modified Simpson's Evenness Index

2.3 分析方法

本研究首先使用一元线性回归分析虎山流域 1963—2022 年期间年降雨量(Annual Precipitation, *AP*)、*RD*、*STM* 和 *SSC* 的变化趋势;然后,基于不同 LUC 产品统计了研究区 1990—2020 年 LUC 的数量、空间变化及景观格局指数变化特征;最后,使用相关分析和偏最小二乘回归法(Partial Least Squares Regression, PLSR)探究景观格局对径流-泥沙特征(*RD*、*STM* 和 *SSC*)的影响^[26],厘清它们之间的相关性及各景观格局指数对径流-泥沙特征的影响大小,分析不同 LUC 产品对结果的影响,揭示景观格局的生态效益。

PLSR 是一种集合多元线性回归、典型相关分析及主成分分析的多元回归分析方法^[26]。构建的 PLSR 模型可以包含全部的自变量,从而得到每个自变量对目标变量的贡献度及解释力。为避免模型过度拟合,通过交叉验证来确定主成分个数。一般来说,当构建的 PLSR 模型中 Q^2 (一个成分预测因变量总变异的分数的平方)大于 0.5 时,模型有望具有良好的预测能力^[27]。在本研究中,景观格局指数为自变量,表征径流-泥沙特征的指标为目标变量。

3 结果与分析

3.1 降雨-径流-泥沙变化特征

整体来说,1963—2022 年期间,虎山流域 *AP*、*RD*、*STM* 和 *SSC* 均呈增长趋势(图 2)。多年平均 *AP* 为 1908 mm,最大和最小值分别为 2598 mm(1998 年)和 1217 mm(1978 年),平均增长速率为 4.7 mm/a。多年年均 *RD* 为 1137 mm,最大和最小值分别为 2290 mm(1998 年)和 504 mm(1963 年),平均增长速率为 3.25 mm/a。

年 RD 的增长速率相对降雨量更小,说明流域内下垫面的产流特性有一定程度的变化。

多年年均 STM 为 128 t/km^2 ,最大和最小值分别为 414 t/km^2 (2015 年)和 7 t/km^2 (2007 年),平均增长速率为 $2.74 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。多年年均 SSC 为 0.11 kg/m^3 ,最大和最小值分别为 0.31 kg/m^3 (2022 年)和 0.01 kg/m^3 (2007 年),平均增长速率为 $0.002 \text{ kg m}^{-3} \text{ a}^{-1}$ 。总的来说,流域 STM 和 SSC 均呈显著增长趋势($P < 0.001$)。尤其是自 2007 年起,流域内土壤侵蚀量急剧增长。

2000—2007 年间,虎山流域的 AP 总体偏低,导致该时段内 RD 、 STM 和 SSC 也相对较低。除 2002 年的 AP 与 STM 和 SSC 之间的一致性较差,其他年份一致性较高。侵蚀性降雨是水力侵蚀的主要驱动力,相同的 AP 会因其雨量的年内分配情况及雨强的差异而导致不同的土壤侵蚀结果^[28],可能是导致 2002 年 AP 较高而 STM 和 SSC 较低的原因。气候变化背景下,各地降水模式发生了变化,约 2/3 的地区将面临更加潮湿且多变的水文气候^[29]。高强度的侵蚀性降水,会大大增加土壤侵蚀量。这可能是 2007 年以后流域土壤侵蚀显著增长的原因之一。

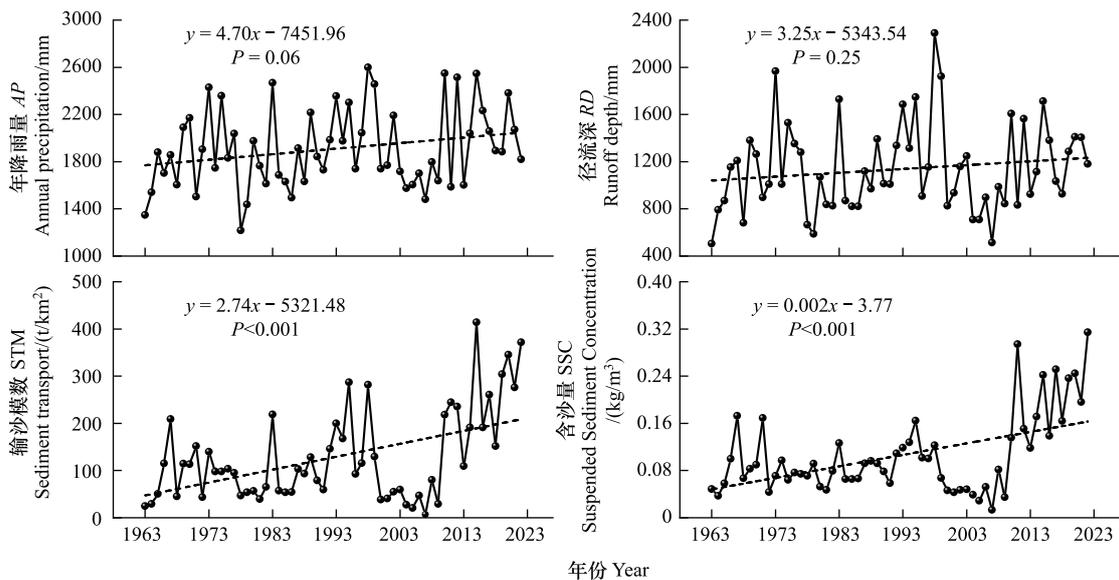


图 2 1963—2022 年虎山流域降雨-径流-泥沙特征历史变化

Fig.2 Historical variations of the precipitation-runoff-sediment characteristics within the Hushan watershed during 1963—2022

AP : 年降雨量 Annual precipitation; RD : 径流深 Runoff depth; STM : 输沙模数 Sediment Transport Modulus; SSC : 含沙量 Suspended Sediment Concentration; x : 年份 Year; y : 水文特征变量 Hydrological indicators

3.2 LUCC/景观格局变化特征

3.2.1 LUCC 变化特征

表 2 统计了基于不同 LUCC 产品统计的虎山流域历史 LUCC 数量变化情况。所有产品均显示流域内主要的 LUCC 类型为林地和耕地,面积分别为 $(4972 \pm 377) \text{ km}^2$ 和 $(982 \pm 147) \text{ km}^2$,占全流域面积的 $(79.57 \pm 6.03)\%$ 和 $(15.72 \pm 2.36)\%$ 。所有产品均显示流域内水域和城镇建设用地的面积有所增加,其他地类的变化趋势则因 LUCC 产品不同而存在差异。总的来说,CLCD 和 GLC_FCS 产品对林地、灌木林地、草地、水域和城镇建设用地的解译结果较为接近。值得注意的是,CNLUCC 产品显示城镇建设用地面积从 1990 年的 64.07 km^2 增加至 2020 年的 129.89 km^2 ,增加比例约为 102.73%;但 CLCD(GLC_FCS) 产品显示,研究区城镇建设用地面积从 1990 年的 $30.35 (36.14) \text{ km}^2$ 增加至 2020 年的 $104.28 (102.75) \text{ km}^2$,增加比例约为 243.59% (184.34%)。上述结果表明,根据不同 LUCC 产品分析 LUCC 变化情况时,结果会有所不同。这些差异主要是由 LUCC 产品在解译过程中的方法及样本差异所导致的^[30],已有研究表明,训练样本的质量对分类结果的影响比分类技术的影响更为显著^[31]。本研究使用的三种 LUCC 产品使用了不同的训练样本及分类技术,使

得其分类结果也存在一定的差异。

表 2 1990—2020 年虎山流域土地利用数量变化统计/km²

Table 2 The statistics of the land use amount changes within the Hushan watershed during 1990—2020

土地利用类型 LUCC Type	CNLUCC			CLCD			GLC_FCS		
	1990	2020	变化量	1990	2020	变化量	1990	2020	变化量
耕地 Cultivated land	1004.56	975.72	-28.85	834.92	909.15	74.23	954.87	1129.61	174.74
林地 Forest land	4594.97	4639.04	44.07	5348.85	5198.62	-150.23	5222.81	4922.23	-300.58
灌木林地 Shrub land	309.37	276.61	-32.75	0.45	0.62	0.17	0.00	48.89	48.89
草地 Grass land	211.90	155.33	-56.57	2.34	0.61	-1.73	0.00	0.29	0.29
水域 Water area	63.33	71.70	8.37	31.74	35.38	3.64	34.85	44.89	10.04
城镇建设用地 Construct land	64.07	129.89	65.81	30.35	104.28	73.93	36.14	102.75	66.62
荒地 Bare land	0.46	0.37	-0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总面积 Total area	6248.66	6248.66	-	6428.66	6248.66	-	6248.66	6248.66	-

图 3 展示了 1990—2020 年研究区内不同 LUCC 产品获取的 LUCC 空间分布。总的来说,三种产品所展示的林地、耕地和城镇建设用地的空间分布较为相似。林地主要集中分布于流域北部及南部地区,耕地主要分布于流域西南及中部偏北地区,而城镇建设用地则主要分布于流域中部及中部偏北地区。CLCD 和 GLC_FCS 产品所展示的不同地类的整体空间分布特征相似度高,而 CNLUCC 产品中地类的空间分布则更为零散。这种差异主要是由不同产品对灌木林地和草地的识别差异所导致的。CNLUCC 产品中,较多灌木林地分散于林地之中,部分草地零散分布于林地和耕地的分界线。而在 CLCD 和 GLC_FCS 产品中,灌木林地和草地的数量远小于 CNLUCC 产品,使其各 LUCC 的空间分布相较于后者更为集中。

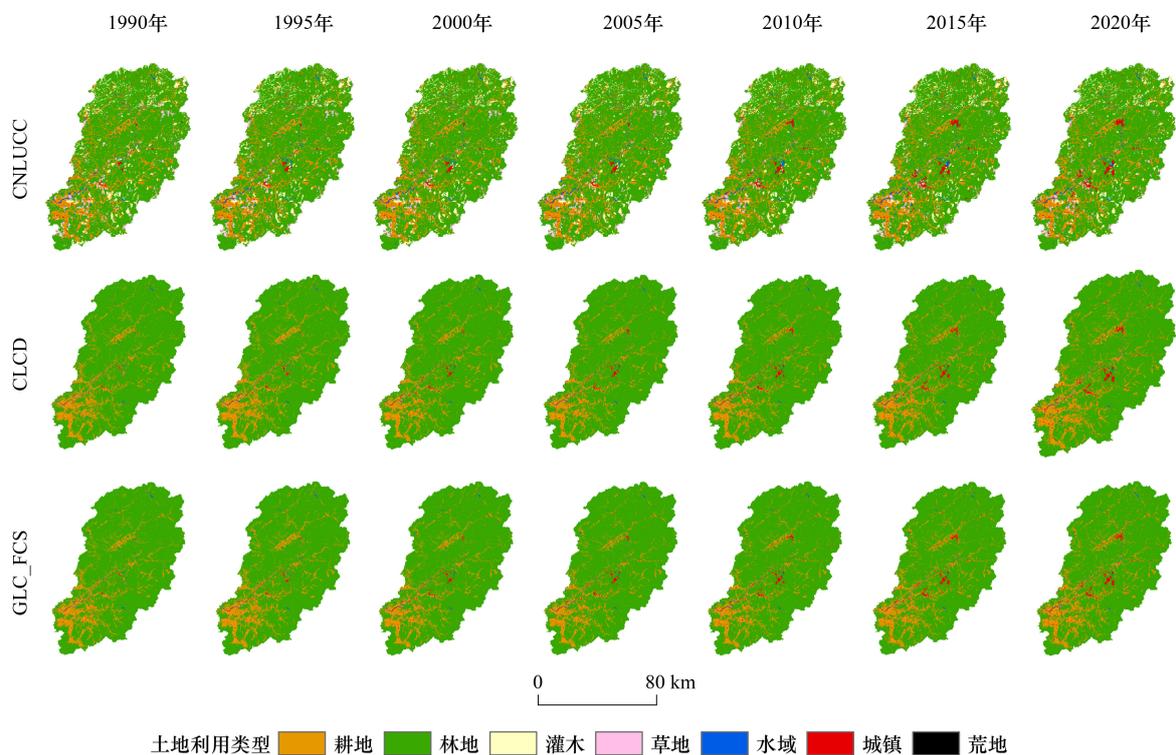


图 3 1990—2020 年虎山流域历史“多源”土地利用图

Fig.3 Historical multi-source land use maps of Hushan watershed during 1990—2020

图 4 统计了不同 LUCC 产品展示的虎山流域 1990—2020 年 LUCC 类型转移情况。所有产品均显示,

1990—2020 年,减少的耕地主要转变为林地和城镇建设用地,减少的林地主要转变为耕地和城镇建设用地。该现象说明流域内城镇建设用地的扩张主要侵占的是耕地和林地。此外,研究区存在大量耕地和林地之间的互相转换现象,可能是由于根据耕地适宜性的空间差异进行地类的动态调整所导致的。其中,CNLUCC 产品识别了大量的灌木林地,且自 1990 到 2020 年间,灌木林地主要转换为了林地。根据 CNLUCC 产品的分类系统,灌木林地指的是郁闭度>40%且高度在 2 m 以下的矮林地和灌丛林地。因此,这种现象可能是由于高度在 2 m 以下的矮林地经过生长发育,高度在超过 2 m 以上后,在遥感解译过程中被识别为林地。

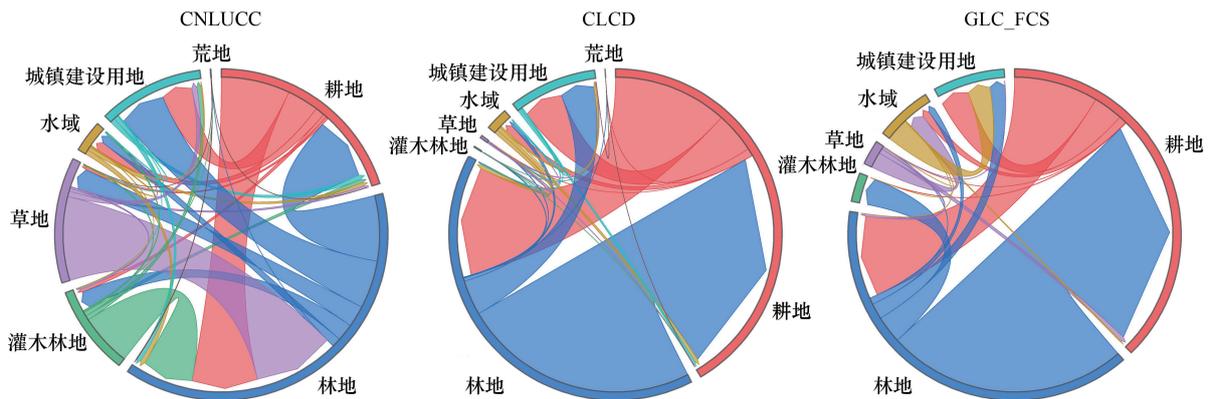


图 4 1990—2020 年虎山流域土地利用转移统计图

Fig.4 Statistical of land use conversion within Hushan watersheds during 1990—2020

3.2.2 景观格局变化特征

图 5 展示了 1990—2020 年虎山流域的景观格局变化情况,不同产品计算得到的景观格局指数大多存在较大的差异。1990—2010 年,CLCD 和 GLC_FCS 的 LPI 明显高于 CNLUCC,除 GLC_FCS 的 LPI 呈现出较为明显的减小趋势,其他产品的 LPI 变化较小。CLCD 和 CNLUCC 的 ED 较为接近,且变化幅度小,而 GLC_FCS 的 ED 则呈较为明显的增加趋势。

对于表征景观形状特征的 PAFRAC,CNLUCC 表现出波动上升的趋势,而 CLCD 和 GLC_FCS 则表现出轻微的减小趋势。整体来说,CNLUCC 和 CLCD 的 PAFRAC 相较于 GLC_FCS 更高。此外,CNLUCC 的 PD 明显低于 CLCD 和 GLC_FCS,2000 年后所有产品均显示 PD 没有发生明显变化。CNLUCC 的 DIVISION 没有明显变化趋势,而 CLCD 和 GLC_FCS 则表现出增长趋势,且 GLC_FCS 的趋势更为显著。三种产品的 CONTAG 均未表现出明显的变化趋势,且整体计算结果表现为 CLCD > GLC_FCS > CNLUCC。三种产品的 COHESION 相近,且近 10 年均表现出减小的趋势。三种产品表征的多样性指数均呈现缓慢上升的趋势,且 SHDI、SHEI 和 MSIEI 的计算结果均表现为 CNLUCC > GLC_FCS > CLCD。对于大多数景观格局指数,GLC_FCS 的结果更接近于三种产品的结果的均值,其更能表示经由多种 LUC 产品得到的平均景观格局指数特征。总的来说,根据对不同 LUC 产品分析可得:虎山流域景观边缘密度较为平稳且有轻微增长,景观的最大斑块面积有所减小,景观破碎度呈轻微增长趋势,不同斑块类型之间的结合度有所降低,景观多样性呈增长趋势。

3.3 不同 LUC 产品下景观格局与径流-泥沙特征指标的相关性

图 6 统计了虎山流域不同 LUC 产品下景观格局与 RD、STM 和 SSC 之间的相关系数。由 CNLUCC 产品得到的所有景观格局指数均与 RD、STM 和 SSC 不存在显著相关性;由 CLCD 产品得到的 LPI 和 COHESION 与 STM 和 SSC 均存在显著负相关关系($P < 0.05$),而 DIVISION 和 SHDI 与 STM 和 SSC 均存在显著负相关关系;由 GLC_FCS 产品得到的 SHEI 和 MSIEI 与 STM 存在显著正相关关系($P < 0.05$),而 PAFRAC 和 SHEI 分别与 SSC 存在显著负相关和正相关关系($P < 0.05$)。此外,本研究还分析了三种产品计算得到的景观格局均值与 RD、STM 和 SSC 之间的关系,结果显示:LPI、CONTAG、COHESION 与 STM 和 SSC 均存在显著负相关关系($P <$

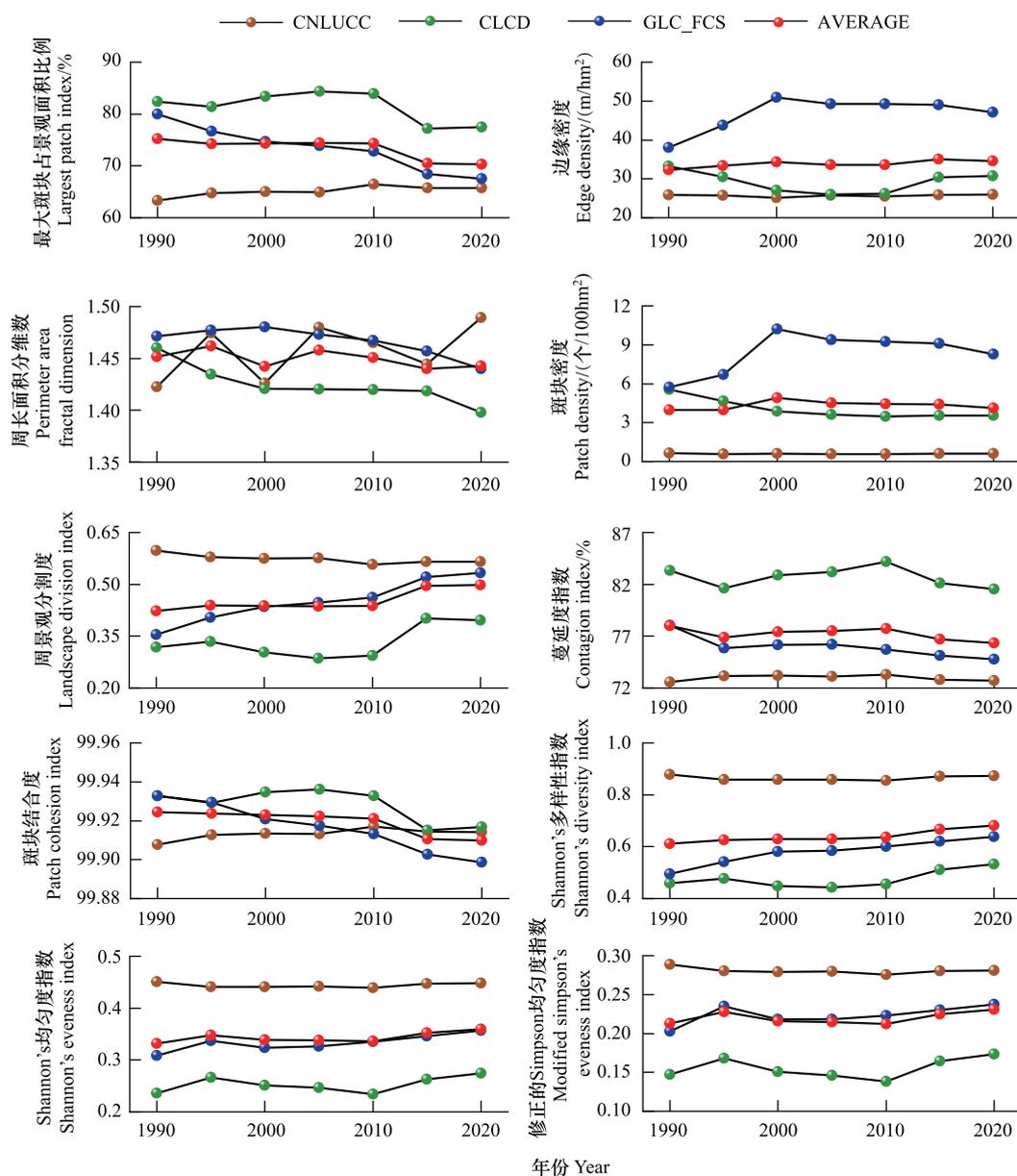


图 5 1990—2020 年虎山流域景观格局指数变化特征

Fig.5 Changes in the landscape pattern metrics within Hushan watershed during 1990—2020

LPI:最大斑块占景观面积比例 Largest Patch Index; ED:边缘密度 Edge Density; PAFRAC:周长面积分维数 Perimeter Area Fractal Dimension; PD:斑块密度 Patch Density; DIVISION:景观分割度 Landscape Division Index; CONTAG:蔓延度指数 Contagion Index; COHESION:斑块结合度 Patch Cohesion Index; SHDI:Shannon 多样性指数 Shannon's Diversity Index; SHEI:Shannon 均匀度指数 Shannon's Evenness Index; MSIEI:修正的 Simpson 均匀度指数 Modified Simpson's Evenness Index; CNLUCC:中国科学院资源环境科学与数据中心发布的中国多时期土地利用遥感监测数据集; CLCD:武汉大学发布的中国 30 m 年度土地覆盖产品; GLC_FCS:中国科学院空天信息创新研究院发布的全球土地覆被时序动态遥感产品; AVERAGE:三种产品的均值

0.05), 而 DIVISION、SHEI 和 MSIEI 与 STM 和 SSC 均存在显著正相关关系 ($P < 0.05$), SHDI 仅与 SSC 存在显著正相关关系 ($P < 0.05$)。

不同情景下计算得到的景观格局指数与各径流-泥沙特征指标之间的相关性存在差异 (图 6)。所有情景的分析结果中, PD 和 CONTAG 与 RD 的相关性是一致的, ED、PD、CONTAG、SHDI 和 SHEI 与 STM 和 SSC 之间的相关性是一致的。在开展景观格局对流域侵蚀过程影响的相关研究时, 选用 ED 表征面积-边缘特征、选

用 PD 和 CONTAG 表示聚散度特征以及选用 SHDI 和 SHEI 表征多样性特征可以相对减小 LUCU 解译对研究结果带来的不确定性。

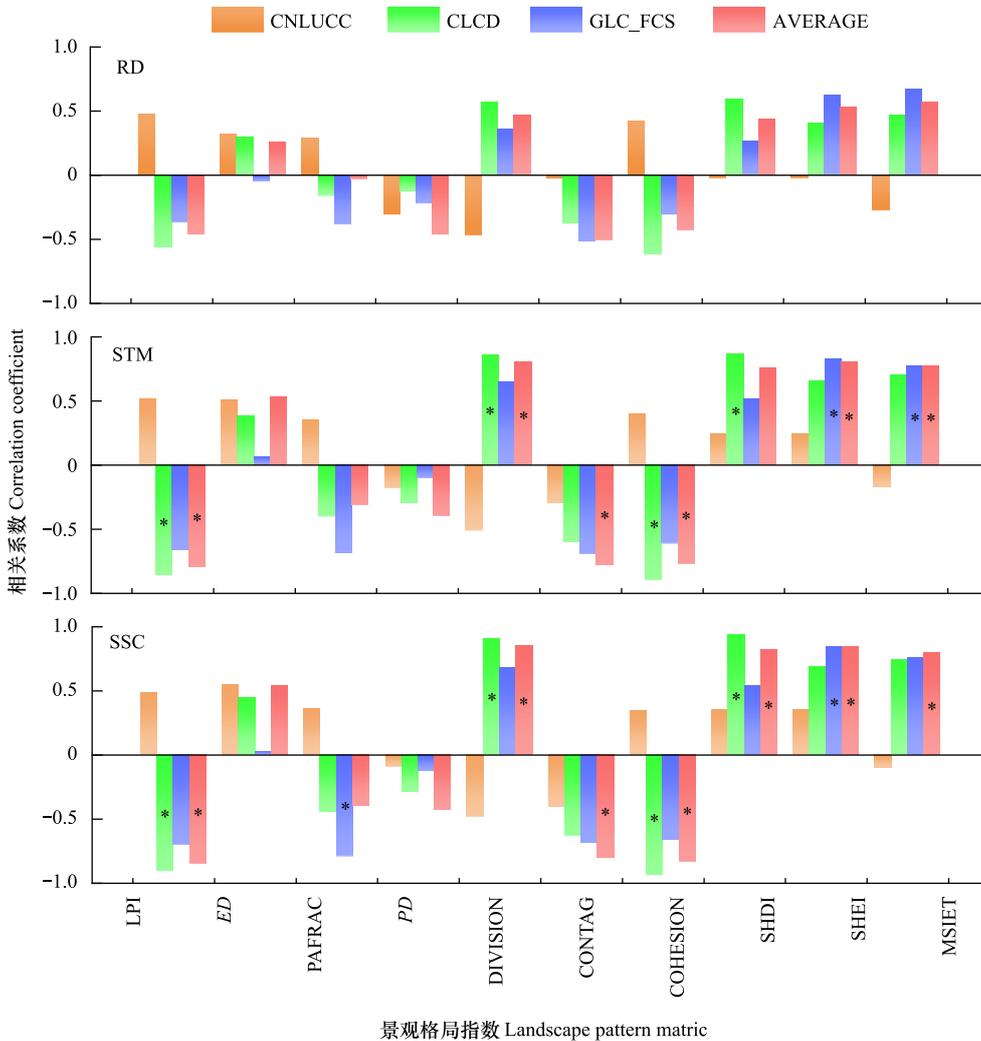


图 6 景观格局指数与 RD、STM 和 SSC 之间的相关系数统计

Fig.6 Statistics of the correlation coefficients between landscape pattern metrics and RD, STM, and SSC

* 表示相关性在 95%置信区间是显著的

3.4 不同 LUCU 产品下景观格局对径流-泥沙特征指标变化的影响差异

由表 3 可知:基于 CNLUCC 产品与 RD、STM 和 SSC 构建的 PLSR 模型均为无效模型, Q^2 小于 0.5。基于 CLCD 产品构建的 PLSR 模型可以较好的解释 RD、STM 和 SSC 的变化,主成分个数均为 1 个;基于 GLC_FCS 产品构建的 PLSR 模型可以较好的解释 STM 和 SSC 的变化,主成分个数均为 2 个;基于三种产品的均值构建的 PLSR 模型可以较好的解释 STM 和 SSC 的变化,主成分个数分别为 1 个和 2 个。其中,基于 CLCD 构建的 PLSR 模型对 RD 和 STM 的解释力度最高,基于 GLC_FCS 构建的 PLSR 模型对 SSC 的解释力度最高。基于 CLCD 产品更容易构建景观格局指数与径流-泥沙特征指标之间的有效 PLSR 模型。

图 7 统计了不同情景下各 PLSR 模型中景观格局指数对 RD、STM 和 SSC 的影响大小及重要程度(VIP),当 VIP 大于 1 时,认为该解释变量对响应变量有重要意义^[27]。基于 CLCD 产品构建的 PLSR 模型显示,对 RD 影响较大的景观格局指数为 LPI、COHESION、DIVISION、SHDI 和 MSIEI;RD 随着 LPI 和 COHESION 的增大而减小,随着 DIVISION、SHDI 和 MSIEI 的增大而增大。基于 CLCD、GLC_FCS 以及均值序列构建的 PLSR 模型

中,不同景观格局指数对 STM 和 SSC 的重要性有一定变化,仅有 MSIEI 在所有模型中均对 STM 和 SSC 有较为显著的重要性。在大多数 PLSR 模型中,对 STM 和 SSC 有重要意义的景观格局指数有 LPI、COHESION、DIVISION、SHDI 和 SHEI。其中,对 STM 和 SSC 有正向影响的景观格局指数有 DIVISION、SHDI、SHEI 和 MSIEI,对 STM 和 SSC 有负向影响的景观格局指数有 LPI 和 COHESION。

表 3 不同数据源下各径流-泥沙特征指标最优 PLSR 模型

Table 3 The fittest PLSR model for characteristic index of runoff-sediment under different land use sources

数据来源 Data sources	RD			STM			SSC		
	R^2	Q^2	主成分个数	R^2	Q^2	主成分个数	R^2	Q^2	主成分个数
CNLUCC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CLCD	0.712	0.548	1	0.796	0.706	1	0.796	0.706	1
GLC_FCS	-	-	-	0.793	0.652	2	0.873	0.784	2
AVERAGE	-	-	-	0.687	0.54	1	0.851	0.751	2

RD:径流深 Runoff depth;STM:输沙模数 Sediment Transport Modulus;SSC:含沙量 Suspended Sediment Concentration;CNLUCC:中国科学院资源环境科学与数据中心发布的中国多时期土地利用遥感监测数据集;CLCD:武汉大学发布的中国 30 m 年度土地覆盖产品;GLC_FCS:中国科学院空天信息创新研究院发布的全球土地覆被时序动态遥感产品;AVERAGE:三种产品的均值

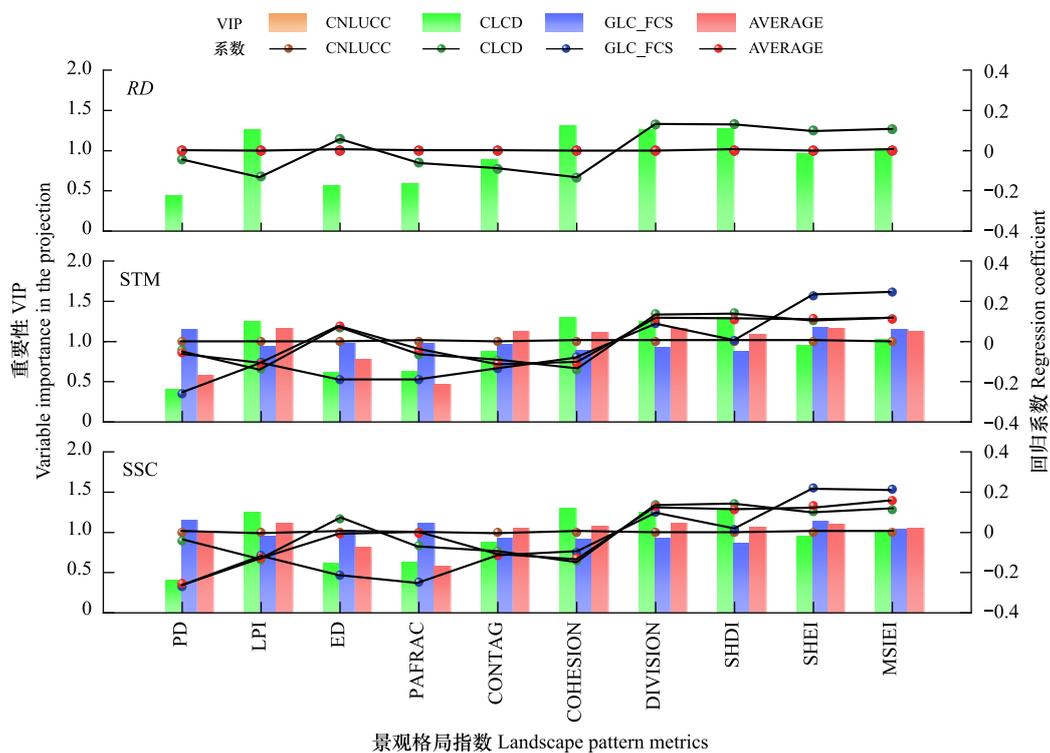


图 7 不同 LUCC 产品下 PLSR 模型中各景观格局对 RD、STM 和 SSC 的重要性及回归方程系数

Fig.7 The VIP value and regression coefficients between landscape pattern metrics and RD, STM, and SSC in the PLSR model under different land use products

4 讨论

本研究分析了 1963—2022 年鄱阳湖区虎山流域 AP、RD、STM 和 SSC 的时程变化特征,基于不同 LUCC 产品分析了研究区土地利用及景观格局变化情况,并进一步结合相关分析和 PLSR 模型探究了景观格局对径流-泥沙特征的影响及其不确定性。受全球气候变化影响,虎山流域的 AP 呈不显著增长趋势^[32](4.7 mm/a),直接导致 RD 也呈增长趋势(3.25 mm/a)。但值得注意的是,虎山流域 STM 和 SSC 均呈显著增长趋势($P <$

0.001), 增长速率分别为 $2.74 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $0.002 \text{ kg m}^{-3} \text{ a}^{-1}$ 。在全球变暖背景下, 研究区降雨量的增加可能是流域内土壤侵蚀加剧的主要原因之一。同时, 下垫面的变化也会导致流域径流及侵蚀过程发生较为明显的改变^[9]。

基于不同 LUC 产品分析得到的 LUC 特征存在差异。比如: CNLUCC 显示 1990—2020 年期间耕地有所减少而林地有所增加, 但 CLCD 和 GLC_FCS 则表现出耕地有所增加而林地有所减少的趋势。土地利用解译是一个基于大量实际观测样本点建立地物类型与遥感影像光谱之间的关系, 来实现通过遥感影像大范围推演地类空间分布的过程^[17]。不同 LUC 产品在制作过程中使用的样本和算法不同, 导致最终得到的 LUC 分布有所差异, 从而给相关研究带来一定的不确定性。表 4 统计了不同 LUC 产品得到的景观格局指数之间的 *t* 检验结果。CLCD 和 GLC_FCS 计算的所有景观格局指数均存在显著差异 ($P < 0.05$), 除 PAFRAC 和 COHESION 以外, CNLUCC 和其他两种产品计算的所有景观格局指数也都存在显著性差异 ($P < 0.05$)。相比 CLCD 和 GLC_FCS, CNLUCC 中各期 LUC 均有大量灌木林地和草地分散于其他地类之中, 从而导致计算得到的景观格局特征存在明显差异。比如: CNLUCC 计算得到的表征景观破碎化的指数 DIVISION 明显高于其他数据(图 5)。这些景观格局计算结果的不确定性会进一步影响景观格局对水文过程影响的相关研究结果。

表 4 研究区不同数据源所得景观格局指数 *t* 检验结果

Table 4 The results of *t*-test for the landscape pattern metrics calculated by different land use map sources within the Hushan watershed

景观格局指数 Landscape pattern metrics	CNLUCC & CLCD	CNLUCC & GLC_FCS	CLCD & GLC_FCS
<i>PD</i>	11.76 *	-12.72 *	-4.94 *
<i>LPI</i>	12.80 *	-4.20 *	6.63 *
<i>ED</i>	3.49 *	-12.15 *	-6.74 *
PAFRAC	-2.11	-0.70	-7.20 *
CONTAG	28.05 *	-7.04 *	17.58 *
COHESION	4.07	-0.58	3.66 *
DIVISION	-12.21 *	4.39 *	-6.46 *
SHDI	-33.69 *	14.92 *	-6.84 *
SHEI	-33.16 *	17.85 *	-20.40 *
MSIEI	-25.07 *	10.38 *	-19.84 *

* 表示两个变量在 95% 置信区间是存在显著差异的

1990—2020 年间, 虎山流域景观边缘密度较为稳定, 景观的最大斑块面积有所减小, 破碎度呈轻微增长趋势, 不同斑块类型之间的结合度有所降低, 景观多样性也呈增长趋势。说明流域内人类活动较为剧烈, 且景观斑块更加趋于离散化。近几十年, 鄱阳湖区降雨量的增加导致湖区的土壤侵蚀更为严重^[33]。图 6 和图 7 结果显示, 研究区内景观格局的变化也对土壤侵蚀也有着较为显著的影响。本研究基于多种 LUC 产品探究景观格局对 *RD*、*STM* 和 *SSC* 的影响, 发现 LUC 产品的选用对研究结果有明显的影响。使用不同 LUC 产品对该问题进行分析时, 仅 *PD* 和 *CONTAG* 对 *RD* 的影响以及 *ED*、*PD*、*CONTAG*、*SHDI* 和 *SHEI* 对 *STM* 和 *SSC* 的影响是一致的。其中, *PD* 和 *CONTAG* 均与 *RD* 呈负相关关系, *PD* 和 *CONTAG* 与 *STM* 和 *SSC* 呈负相关关系, *ED*、*SHDI* 和 *SHEI* 与 *STM* 和 *SSC* 呈正相关关系, 但相关性的显著性水平在不同产品下的分析结果有所不同。当 *CONTAG* 和 *PD* 越高时, 景观类型的分散水平越低, 景观分布更为密集, 流域 *RD* 和 *STM* 也将随之减少^[34], 类似的现象在发生在中国东南部多个流域^[4]。当景观趋于破碎化时, *ED* 将增加, 更容易发生土壤侵蚀。同时, 当景观多样性有所提高时, 同类型景观的分布更加复杂, 破碎度增加, 从而加剧土壤侵蚀^[35]。

此外, 本研究构建了不同情景下景观格局指数与径流-泥沙特征指标之间的 PLSR 模型, 发现对 *STM* 和 *SSC* 变化有重要影响的景观格局指数有 *LPI*、*COHESION*、*DIVISION*、*SHDI*、*SHEI* 和 *MSIEI*。Zhang 等^[36] 人发现川西高原流沙河流域的 *STM* 的变化与 *LPI*、*COHESION* 和 *MSIEI* 密切相关, Zhang 等^[37] 人发现黄河流域中游大理河流域 *RD* 和 *STM* 与 *PD*、*COHESION*、*DIVISION* 和 *SHDI* 呈显著负相关关系, 与上述结论相一致。对

比不同 LUC 产品下的分析结果,在开展景观格局对径流-泥沙过程影响的研究时,选用 *ED* 表征景观面积-边缘特征,选用 *PD* 和 *CONTAG* 表征景观聚散度特征,选用 *SHDI* 和 *SHEI* 表征景观多样性特征,可以有效减少 LUC 产品对研究结果带来的不确定性。

虎山流域是鄱阳湖区饶河流域的重要支流,近二十年来流域内 *STM* 和 *SSC* 呈显著增长趋势,且该增长趋势明显高于 *AP* 和 *RD* 的增长趋势(图 2)。因此,流域内土壤侵蚀的显著加剧可能是由不合理的人类活动及 LUC 方式所引起的。对于土壤侵蚀过程而言,在水土保持功能上存在显著差异的斑块类型的边界才是有意义的景观边界。保土能力差的斑块增加或者保土能力强的斑块破碎化,会影响产流和输沙过程,加剧土壤侵蚀^[38]。此外,大型林地斑块中增加部分耕地小斑块与大型耕地斑块中增加部分林地小斑块,对土壤侵蚀的影响也会存在差异^[4]。耕地作为泥沙的主要“源汇”之一,其零散分布于流域各个区域(图 3),会导致一定的土壤侵蚀风险。根据本研究结果及研究区 LUC 组成特点,可针对以下方面优化流域景观格局来缓解流域土壤侵蚀:(1)增加景观格局的连通性,尤其是林地与耕地之间的景观连通性,可有效减少耕地地表被径流裹挟的泥沙进入河道;(2)减少流域内零散分布的耕地,从而减少流域内泥沙“源汇”,缓解土壤侵蚀;(3)在土地利用规划时尽量减少无意义的土地利用转换,如“耕地转为林地”和“林地转为耕地”,可以减小景观破碎化程度,从而缓解流域土壤侵蚀。

5 结论

本文分析了鄱阳湖区饶河上游虎山流域的水文气象和土地利用变化特征,并结合相关分析和偏最小二乘回归法探究了流域景观格局变化对径流-泥沙特征的影响及其不确定性。研究发现,虎山流域年输沙模数和含沙量呈显著增长趋势($P < 0.001$)。不同土地利用产品得到的景观格局特征存在显著差异($P < 0.05$),经由 *GLC_FCS* 计算的景观格局指数更接近与三种产品的均值。总的来说,流域内景观的最大斑块面积有所减小,景观破碎度有轻微增长,景观多样性有一定的增加。最大斑块占景观面积比例、斑块结合度、景观分割度、Shannon 多样性指数和修正的 Simpson 均匀度指数对径流深、输沙模数和含沙量的变化具有重要意义。在研究景观格局对侵蚀过程影响时,选用边缘密度指数表征面积-边缘特征、选用斑块密度指数和蔓延度指数表示聚散度特征以及选用 Shannon 多样性指数和 Shannon 均匀度指数表征多样性特征可以相对减少土地利用数据对研究结果造成的不确定性。

参考文献(References):

- [1] Gashaw T, Tulu T, Argaw M, Worqlul A W. Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 2018, 619: 1394-1408.
- [2] 毛熙彦, 蒙吉军. 土地利用变化的水文效应研究进展. *北京大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(5): 928-936.
- [3] Yu B, Shi Z H, Zhang Y. Linking hydrological and landscape characteristics to suspended sediment-discharge hysteresis in Wudinghe River Basin on the Loess Plateau, China. *CATENA*, 2023, 228: 107169.
- [4] Wei C, Dong X H, Ma Y M, Leng M H, Zhao W Y, Zhang C Y, Yu D, Su B. Relationships between landscape patterns and hydrological processes in the subtropical monsoon climate zone of southeastern China. *Remote Sensing*, 2023, 15(9): 2290.
- [5] 赵雪岩, 张鑫, 孙媛. 2005—2030 年无定河流域土地利用变化对径流的影响. *人民黄河*, 2023, 45(3): 24-31.
- [6] 张田田, 陈有超, 李潜, 赵铭石, 齐文华, 张全发, 张克荣. 土地利用变化对丹江流域径流和泥沙时空格局的影响. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(8): 1797-1811.
- [7] 黄莹. 植被覆盖和降雨变化对流域水沙过程的影响机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [8] Xiao R, Cao W, Liu Y, Lu B B. The impacts of landscape patterns spatio-temporal changes on land surface temperature from a multi-scale perspective: a case study of the Yangtze River Delta. *Science of the Total Environment*, 2022, 821: 153381.
- [9] 雷泽鑫, 傅健宇, 罗俊杰, 曹磊. 景观格局视角下晋西三川河流域径流变化归因分析. *生态学报*, 2022, 42(12): 4946-4958.
- [10] McGarigal K. FRAGSTATS, spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. [Version 2.0]. Portland, Or.: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1995.
- [11] Shi P, Qin Y L, Li P, Li Z B, Cui L Z. Development of a landscape index to link landscape pattern to runoff and sediment. *Journal of Mountain*

- Science, 2022, 19(10): 2905-2919.
- [12] 陈启慧, 纪璐, 李琼芳, 白浩男, 韩幸焯, 姚佳, 崔罡, 周正模, 杨坤凡. 伊犁河三角洲水资源条件变化对景观格局演变的影响. 水资源保护, 2024, 40(2): 90-99.
- [13] 许文旭, 毕华兴, 王亚娟. 晋西黄土区流域景观格局对径流及其组分的影响. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 118-126.
- [14] 田昌园, 张红丽, 汪军红, 李嘉宁, 张艺, 查同刚. 近 30 年皖西大别山土壤侵蚀时空变化及其对景观格局的响应. 水土保持学报, 2024, 38(3): 37-44.
- [15] 侯琨, 王秀茹, 王计平, 袁普金, 程复. 延河流域产沙过程对“源”“汇”景观格局的响应. 中国水土保持科学, 2022, 20(1): 1-8.
- [16] 徐明珠, 徐国策, 乔海亮, 李占斌, 魏全, 王斌, 谷丰佑, 方康, 万顺. 秦岭南麓小流域不同空间尺度景观格局对水质的影响分析. 环境科学学报, 2023, 43(10): 396-406.
- [17] 张书, 孙超, 胡茗, 郑嘉豪, 刘永超. 基于连续变化检测和分类算法的动态遥感生态指数构建. 生态学报, 2024, 44(2): 497-510.
- [18] 顾朝军, 朱永清, 李仁华, 姚赫. 鄱阳湖流域降雨侵蚀力变化及其对入湖悬移质输沙量的影响. 水土保持学报, 2021, 35(6): 45-54.
- [19] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [20] Zhang, X, Zhao, T T, Xu, H, Liu, W D, Wang, J Q, Chen, X D, Liu, L Y. GLC_FCS30D: the first global 30 m land-cover dynamics monitoring product with a fine classification system for the period from 1985 to 2022 generated using dense-time-series Landsat imagery and the continuous change-detection method. Earth System Science Data, 2024, 16(3): 1353-1381.
- [21] 梅嘉滔, 刘洋, 岳朋芸, 李东, 姜庆虎, 刘峰. 旬河流域景观格局变化对泥沙输出的影响. 水土保持研究, 2020, 27(3): 45-50+56.
- [22] 徐炫清, 陈裕娴, 李青圃, 张正栋. 五华河流域景观格局演变对径流泥沙的影响. 水土保持研究, 2018, 25(1): 231-236+242.
- [23] 高艳丽, 李红波. 汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响. 生态学报, 2021, 41(6): 2248-2260.
- [24] Han Y, Chang D, Xiang X Z, Wang J L. Can ecological landscape pattern influence dry-wet dynamics? A national scale assessment in China from 1980 to 2018. Science of the Total Environment, 2022, 823: 153587.
- [25] 蔡源远, 崔婷婷, 刘政, 魏玉杰. 我国南方典型红壤区景观格局对崩岗侵蚀的影响. 生态学报, 2024, 44(7): 2817-2825.
- [26] 魏冲. 淮河流域水土流失高风险区水沙特征及其对景观格局变化的响应[D]. 宜昌: 三峡大学, 2023.
- [27] 张志敏, 杜景龙, 陈德超, 张飞. 典型网状河网区域土地利用和景观格局对地表季节水质的影响——以江苏省溧阳市为例. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1524-1539.
- [28] 翁薛柔, 叶琰, 叶勇, 曾必顺, 龙训建. 基于多种算法的小安溪流域降雨侵蚀力时空演变特征. 农业工程学报, 2022, 38(4): 143-150.
- [29] Wu Y P, Yin X W, Zhou G Y, Bruijnzeel L A, Dai A G, Wang F, Gentine P, Zhang G C, Song Y N, Zhou D C. Rising rainfall intensity induces spatially divergent hydrological changes within a large river basin. Nature Communications, 2024, 15: 823.
- [30] 厉芳婷, 张过, 石婷婷, 李乐. 耕地“非农化”遥感解译样本分类体系及应用. 农业工程学报, 2022, 38(15): 297-304.
- [31] 朱秀芳, 潘耀忠, 张锦水, 王双, 顾晓鹤, 徐超. 训练样本对 TM 尺度小麦种植面积测量精度影响研究(I)——训练样本与分类方法间分类精度响应关系研究. 遥感学报, 2007, 11(6): 826-837.
- [32] 姬志军, 张连明. 鄱阳湖流域降雨量及降雨侵蚀力时空分布特征. 人民黄河, 2019, 41(6): 81-84.
- [33] 胡江军, 孙宇, 顾朝军. 近 60 年鄱阳湖五河入湖水沙变化及影响因素分析. 人民长江, 2022, 53(S2): 47-51+58.
- [34] Shi Z H, Ai L, Li X, Huang X D, Wu G L, Liao W. Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds. Journal of Hydrology, 2013, 498: 165-176.
- [35] Zhang F, Chen Y, Wang W W, Jim C Y, Zhang Z M, Tan M L, Liu C J, Chan N W, Wang D, Wang Z, Rahman H A. Impact of land-use/land-cover and landscape pattern on seasonal in-stream water quality in small watersheds. Journal of Cleaner Production, 2022, 357: 131907.
- [36] Zhang S H, Fan W W, Li Y Q, Yi Y J. The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. Science of the Total Environment, 2017, 574: 34-45.
- [37] Zhang Y, Bi Z L, Zhang X, Yu Y. Influence of landscape pattern changes on runoff and sediment in the Dali River watershed on the Loess Plateau of China. Land, 2019, 8(12): 180.
- [38] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰. 景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性. 生态学报, 2011, 31(1): 267-275.