

景观格局类型对土壤侵蚀的影响

宋爽^{1,2}, 王韶晗^{1,2}, 石梦溪^{1,2}, 胡珊珊^{1,2}, 许大为^{1,2}

(1.东北林业大学 园林学院, 哈尔滨 150040;

2.黑龙江省寒地园林植物种质资源开发与景观生态修复重点实验室, 哈尔滨 150040)

摘要:在景观格局特征尺度上讨论景观格局类型与土壤侵蚀的关系,为具有减缓土壤侵蚀效果的景观格局提出优化的方向。以挠力河流域为研究区,利用 3S 技术、USLE 模型、移动窗口法与半变异函数、有序多元 logistic 回归等方法,从特征尺度上量化了分析景观格局类型对土壤侵蚀的影响。结果表明:(1) 2010—2018 年研究区景观格局破碎化程度增加,景观格局类型有向散布型转化的趋势。(2) 2010 年、2018 年研究区的景观格局特征尺度分别为 4 500 m、4 250 m,后者景观格局更为丰富。(3) 2010—2018 年研究区土壤侵蚀总量增加。(4) 研究区土壤侵蚀强度主要取决于现状土地利用斑块特征,在景观格局特征尺度下网状型景观格局类型对土壤侵蚀的缓解效果最好,网状型、指状型和棋盘型与散布型景观格局类型相比,土壤侵蚀强度至少高一个等级的概率分别为 0.53、0.74、0.88。研究结果可为景观格局优化和水土保持管理提供参考。

关键词:景观格局; 土壤侵蚀; 特征尺度; 有序多元 logistic 回归; 挠力河流域

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0085-08

Influence of Landscape Pattern Type on Soil Erosion

SONG Shuang^{1,2}, WANG Shaohan^{1,2}, SHI Mengxi^{1,2}, HU Shanshan^{1,2}, XU Dawei^{1,2}

(1.College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040,

China; 2.Heilongjiang Province Key Laboratory of Germplasm Resources Development and

Landscape Ecological Restoration of Cold Area Garden Plants, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to discuss the relationship between landscape pattern types and soil erosion at the scale of landscape pattern characteristics, and suggest directions for optimizing landscape patterns with soil erosion mitigation effects, taking the Naolihe basin as study area, we used 3S technology, USLE model, moving window method and semi-variogram, ordered multiple logistic regression to quantify the impact of analyzing the landscape pattern type on soil erosion from the characteristic scale. The results showed that: (1) the fragmentation of the landscape pattern in the study area increased from 2010 to 2018, and the landscape pattern type tended to shift towards a dispersed type; (2) the characteristic scales of the landscape pattern in the study area in 2010 and 2018 were 4 500 m and 4 250 m, respectively, with the latter having a more abundant landscape pattern; (3) from 2010 to 2018, the total amount of soil erosion in the study area increased slightly; (4) soil erosion intensity in the study area mainly depended on the characteristics of the current land use patches, the reticular landscape pattern type was the most effective in mitigating soil erosion at the characteristic scale, the probabilities of soil erosion intensity of reticular, finger-like, and checkerboard types were 0.53, 0.74, and 0.88 times higher than that of the dispersed landscape pattern. These results can provide the references for landscape pattern optimization and soil and water conservation management.

Keywords: landscape pattern; soil erosion; characteristics of the scale; ordered multiple logistic regression; Naolihe Basin

收稿日期:2021-08-08

修回日期:2021-08-17

资助项目:中央高校基本科研业务费专项资金“快速城市化背景下资源型城市生态安全格局构建研究:以大庆市为例”(2572018CP06)

第一作者:宋爽(1992—),女,黑龙江绥化人,博士研究生,主要从事景观规划与生态修复。E-mail:2607306452@qq.com

通信作者:许大为(1962—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,主要从事景观规划与生态修复。E-mail:xdw_ysm@126.com

土壤侵蚀是当今人类面临的最普遍和持续的地质灾害,也是我国最主要的生态环境问题之一^[1-2]。黑土区是我国 6 大水力侵蚀区之一,根据国家水利调查,黑土区有 29.57 万条侵蚀沟,全国每年的土壤流失量为 49.8 亿 t,有机质流失量为 1.63 亿 t,氮,磷,钾的总流失量为 1.18 亿 t^[3],土壤环境脆弱不断加剧。黑龙江是世界三大黑土区之一,水土流失直接威胁其土地资源的保护与可持续发展,除水力侵蚀以外,风力侵蚀和冻融侵蚀也是黑龙江省土壤侵蚀主要的类型,所占比例分别为 77.2%, 8.8%, 14.0%。黑龙江省土壤侵蚀的成因是自然和人为因素共同作用的结果,自然因素主要由于年降雨集中,地貌坡缓坡长、受蚀土壤抗冲性能低,易发生水力侵蚀,此外,该省春季多风,风蚀危害也较为突出。人为因素主要在于长期以来对生态环境不合理利用,导致森林、草原和农业生态系统持续退化,加剧了土壤侵蚀强度^[4]。作为中国黑龙江省典型流域,学者们过去一直对挠力河流域的水土流失存在一定偏颇的认识,认为其地形相对平坦,水土流失甚微,因而研究相对薄弱^[5],实际上由于长期缺乏科学合理的规划利用,它已成为中国最严重的水土流失地区之一,黑土层已由开垦之初的 60—70 cm 减少到 20—30 cm,并以年均 0.3—1 cm 的速度减少,若不及时治理,再过 50 a 大部分黑土层将流失殆尽^[6-7]。

景观格局与生态过程的关系是景观生态学理论的核心^[8],随着 3S 技术的发展,景观格局和水土流失的研究逐步开展。刘晓光以辽宁省东部苏子河流域为研究对象,选择了 7 个典型的景观格局指数,利用 SPSS 多元线性回归模型进行景观格局变化对土壤侵蚀模数影响的研究^[9]。孙天成等采用 Markov 模型研究王家桥流域景观格局时空变化,建立出景观格局指数与产沙量之间的关系,分析了景观格局对流域侵蚀产沙的影响^[10]。郭思琪等基于秦岭地区遥感解译数据,运用 RUSLE 模型分析出 5 个流域土壤侵蚀量的时空变化特征,探讨了土壤侵蚀、土地覆被及地形因子之间的关系,并对流域景观格局演化进行分析^[11]。张金茜等以子流域作为研究单元,应用 InVEST 模型对土壤保持服务进行评估,并借助 Fragstats 表征景观格局现状,同时从景观生态学角度研究土壤保持量与景观格局指数的空间相关和回归关系^[12]。综合现有相关研究,学者们多次强调土壤侵蚀受到景观格局的一定影响,但大多数研究目前只停留在土壤侵蚀和景观格局指数的单纯计算与分析,未见细化讨论景观格局对土壤侵蚀影响的研究且对于景观格局优化实践的指导意义不大。另外,尽管越来越多学者关注到景观格局

的尺度效应,但在研究中却仍旧将景观格局本身和时空变化作为研究的立足点,对于景观格局尺度的实际应用与分析较为鲜见^[13-15]。

景观格局是一个抽象的概念,肖笃宁根据景观结构特点,将景观格局划分为散布型、网络型、指状型和棋盘型 4 种类型^[16],这为景观格局与土壤侵蚀强度的细化研究提供了理论依据。本研究首先探讨挠力河流域 2010 年、2018 年景观格局与土壤侵蚀的变化表现。其次应用移动窗口法与半变异函数,以景观格局指数变化稳定为依据,确定研究区景观格局的特征尺度,以拓展景观格局尺度的应用。最后尝试借助有序多元 Logistic 回归模型,量化分析流域景观格局类型对土壤侵蚀的影响情况。研究从特征尺度上讨论景观格局类型与土壤侵蚀的关系,为景观格局优化和水土保持管理提供参考。

1 研究区概况

挠力河流域是黑龙江省三江平原最大的流域,面积为 22 542.88 km²,约占整个三江平原面积近 1/4。是乌苏里江中国境内的一级支流,东南部以完达山脉为界,东部与乌苏里江连接,河流全长 596 km。流域行政区划包括饶河县、宝清县、友谊县全部、双鸭山市、富锦市、七台河市、集贤县部分区域^[17]。流域南部为山区,海拔在 200~845 m,北部为平原,高程在 100 m 以下,地形自西南向东北倾斜。属寒温带大陆性湿润季风气候,年平均降水量约 518 mm,降水年内分配不均,6—9 月降水量占年降水量的 70%以上。年平均气温在 3℃左右,年平均相对湿度为 66%,夏季在 70%~80%^[18]。研究区资源丰富,雨热同季,适宜水稻、小麦、玉米、大豆等多种作物生长,植被种类组成属长白植物区系,植物种类达 230 余种,分属为沼泽化草甸、沼泽植被和沼泽水生植被 3 种植被类型,流域内土壤以棕壤土、草甸土和沼泽土为主^[19]。

2 研究方法

2.1 数据源与预处理

本研究选用研究区 2010 年 9 月和 2018 年 8 月的 Landsat TM/OLI 影像为数据源,影像下载自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),对其 2,3,4 波段,3,4,5 波段进行标准假彩色合成。利用 ENVI5.3 对遥感影像进行辐射定标、大气校正等预处理,参考《土地利用分类》(GB/T21010-2007)标准^[20],运用人机交互解译对研究区土地利用类型进行分类,并基于 Google Earth 高分辨率影像,在两景影像中分别均匀随机选取 80

个样点将解译结果与验证点叠加进行精度检验,分类精度结果分别为 88.75%,86.25%,可满足本研究的分析要求。归一化植被指数(NDVI)与气象数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。高程来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)的 ASTER GDEM 数据集,从中提取坡长、坡度。土壤数据来自世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)。

2.2 景观格局信息提取与特征尺度确定

景观格局指数描述了景观斑块类型和排列的复

杂性,包含诸如斑块形状、大小、数量和空间组合。采用单一指数不能全面地分析景观生态格局特征,同时景观指数之间往往存在相关性。因此,研究选择类型水平和景观水平内常用于土壤侵蚀研究的 9 个典型景观格局指数,分析确定研究区景观格局及其特征尺度,类型水平景观格局指数主要描述景观中单个拼块的结构特征,可反映研究区景观格局的变化特征。景观水平的景观格局指数则能诠释流域景观的整体结构特征,在本研究中用于研究区景观格局特征尺度的明确,景观指数及意义见表 1^[21]。

表 1 景观格局指数及意义

指数	指数意义
斑块类型面积(CA)	能够反映出斑块间物种、能量和养分等信息流的差异
斑块密度(PD)	考察景观整体的异质性与破碎度以及某一斑块类型的破碎化程度
最大斑块指数(LPI)	决定着景观中的优势斑块、内部种的丰度等景观特征
斑块结合度指数(COHESION)	反映某一斑块类型的景观连接性程度
周长—面积分维数(PAFRAC)	表示某一斑块类型的景观形状复杂程度
香农多样性指数(SHDI)	能够反映景观异质性,特别对景观中各斑块类型非均衡分布状况较为敏感
面积加权平均斑块分维度(FRAC-AM)	可反映出不同空间尺度的景观斑块性状的复杂性
景观分割指数(DIVISION)	对景观整体空间结构的描述,反映出人类活动对景观格局的干扰程度
平均形状指数(SHAPE_MN)	通过计算区域内斑块形状与相同面积的圆或方形之间的偏离程度来表示研究区景观斑块整体形状的复杂程度

研究采用 Fragstats 4.2 移动窗口法与半变异函数模型对景观水平的景观格局指数进行拟合,确定挠力河流域景观格局特征尺度。半变异函数模型中有 4 个重要参数,分别是块金值(C_0)、偏基台值(C)、基台值(C_0+C)和变程(A),四者的关系可反映景观格局的变异情况,其中块基比 $C_0/(C_0+C)$,即块金值比基台值^[22-24],可用来判断不同尺度下的景观格局指数的稳定程度,其值越小,说明空间自相关性越显著,对应尺度的景观格局空间变异程度越低^[25-27]。研究以 1 500 m 为起始移动窗口尺度,尺度间隔 250 m,根据各个景观格局指数的块基比 $C_0/(C_0+C)$ 值的变化规律,分析不同指数的空间变异特征对尺度变换的响应。当比值达到稳定状态时,说明景观指数在空间的变异趋于稳定,即得出研究区景观格局变化的稳定尺度,该尺度即为细化景观格局研究的特征尺度。

2.3 土壤侵蚀强度与等级划分

本研究拟应用景观生态学理论与方法,选用迄今为止适用性最广的 USLE (Universal Soil Loss Equation)土壤侵蚀模型,其需要数据较少,并已与 GIS、RS 集成^[28],可实现快速、有效地对研究区土壤侵蚀状况实行动态监测。此外,黑龙江省水土保持研究所于 1985—1992 年在对该省克山和宾县进行土壤侵蚀径流小区的试验研究,获得了适合中国东北黑土区的一些因子算法,并实测检验证明因子取值的合理

性,为挠力河流域土壤侵蚀量的估算具有良好的研究基础(表 2)。USLE 的模型表达式如下:

$$A=R\times K\times LS\times C\times P\tag{1}$$

式中: A 为单位面积土壤流失量 $[\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})]$; R 为降雨和径流因子,单位为 $[(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{km}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})]$; K 为土壤可蚀性因子 $[(\text{t}\cdot\text{h})/(\text{MJ}\cdot\text{mm})]$; LS 为坡长坡度因子,无量纲。 C 为植被覆盖因子,无量纲; P 为水土保持措施因子,无量纲^[29-30]。挠力河流域土壤侵蚀强度分级标准参照水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007),并结合流域实际情况,将研究区土壤侵蚀分为无明显侵蚀($200<$)、轻 I ($200\sim800$)、轻 II ($800\sim1\,500$)、轻 III ($1\,500\sim2\,500$)、中度侵蚀 ($2\,500\sim5\,000$)、强烈侵蚀 ($5\,000\sim8\,000$) 和极强烈侵蚀 ($>8\,000$) 共 7 个等级^[3,12]。

2.4 有序多元 Logistic 回归分析

有序多元 Logistic 回归分析是一种适用于分析因变量为多分类有序变量且各类变量间存在等级次序关系的非线性概率回归方法,其方程的参数可以生成优势比,可以做出定性和定量的判定,目前被广泛应用于社会科学领域中^[29-30]。有序多元 Logistic 回归模型如下:

$$\text{Logistic}(P)=\ln\frac{P(y\leq j)}{1-P(y\geq j)}=\alpha_j+\sum_{i=1}^k\beta_{ij}x_{ij}\tag{2}$$

$$P(y \leqslant j | x_j) = \exp(\alpha_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_{ij}) / [1 + \exp(\alpha_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_{ij})] \quad (3)$$

式中: y 回归因变量; x 为 k 个影响因变量的自变量; α_j 为截距参数; β 是与 x 对应的回归系数; $P = (y \leqslant j | x_j)$ 为因变量 y 在各级别 j 下的累计概率。

表 2 USLE 的模型各参数计算公式及说明

因子	计算公式	参数说明
R : 降雨和径流因子	$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10 (1.5 \lg P_i^2 / P_j - 0.08188)$	P_i 为各月平均降雨量(mm); P_j 为年降雨量(mm)
K : 土壤可蚀性因子	$K = 0.1317 \times \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 S_{AN} (1 - S_{IL} / 100)]\} \times [S_{IL} / (C_{LA} + S_{IL})]^{0.3} \times \{1.0 - 0.25 C_i / [C_i + \exp(3.72 - 2.95 C_i)]\} \times \{1.0 - 0.7 S_{N1} / [S_{N1} + \exp(-5.51 + 22.9 S_{N1})]\}$	S_{AN} 为砂粒含量(%); S_{IL} 为粉粒含量(%); C_{LA} 为黏粒含量(%); C_i : 有机碳含量(%); $S_{N1} = 1 - S_{AN} / 100$
LS : 坡长坡度因子	$S = \begin{cases} 10.8 \sin(s_{lope}) + 0.036 & s_{lope} < 5.1428 \\ 16.8 \sin(s_{lope}) - 0.5 & 5.1428 \leqslant s_{lope} < 14.0362 \\ 21.9 \sin(s_{lope}) - 0.96 & s_{lope} \geqslant 14.0362 \end{cases}$ $L = \begin{cases} (\lambda / 22.1)^m & \\ m = \beta / (\beta + 1) & \\ \beta = [\sin(s_{lope}) 0.0896] / 3 \sin(s_{lope})^{0.8} + 0.56 & \end{cases}$	S 为坡度因子; s_{lope} 为坡度的弧度形式; L 为坡长因子, m 为坡长指数; λ 为水平坡长(m); β 为细沟和细沟间侵蚀的比率
C : 植被覆盖因子	$C = \begin{cases} 1 & 0 \leqslant c \% < 0.096 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg(c \%) & 0.096 \leqslant c \% < 78.3 \\ 0 & c \% > 78.3 \end{cases}$ $c \% = NDVI - NDVI_{min} / NDVI_{max} - NDVI_{min}$	C 无量纲因子, 取值范围为[0, 1], NDVI 为归一化植被指数 ^[6]
P : 水土保持措施因子	研究区多水田, P 值取 0.03; 其他自然植被区和用地类型, P 值取 1 ^[6]	P 无量纲因子

3 结果与分析

3.1 景观格局分析

2010 年、2018 年挠力河流域的类型水平景观格局指数计算结果如下(表 3):CA 显示,流域土地利用以农田和林地为主,占流域总面积的 80% 以上,农田与建筑用地面积明显增加,水域与灌丛面积显著降低。PD 变化趋势与 CA 大致相同,农田该指数上升较大,破碎化程度更明显。农田和建筑用地 LPI 有所增加,表明两类斑块内部或存在聚集效应,其中,农田最大斑块指数最高,表明农田是研究区的绝对优势景观类型,且在研究区内呈片状分布,其次是林地。PAFRAC 方面,林地、建设用地指数上升,剩余类型斑块该指数降低,一般来说,该指数降低表示该类斑块周长随面积增大而增长的速率变慢,斑块趋向简单,而破碎度上升。农田、水域、灌丛和裸地斑块的 COHESION 下降,即斑块的内部孔隙度升高,连通性降低,当孔隙度达到一定数值时,斑块内部失去连接逐渐分散。综合以上指数变化特征,反映出近十年间挠力河流域景观格局更加破碎、复杂。这主要与流域 2010—2018 年出现了大量的湿地及疏林地开垦为耕地、水利工程修建和农业结构调整等现象^[31],导致

景观结构破坏和功能退化,林地分布趋于离散化,水稻面积和结构比率持续上升有直接关系^[32]。

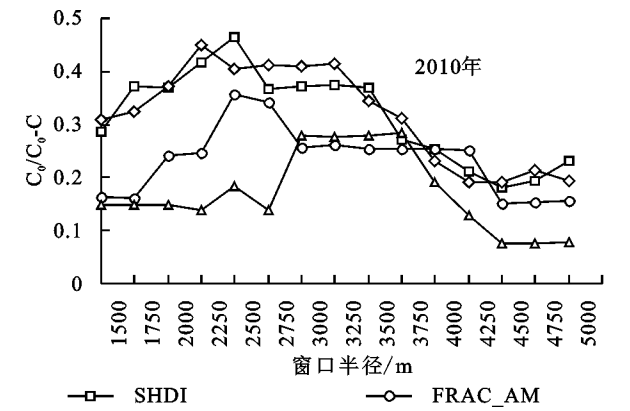
表 3 研究区类型水平景观格局指数

斑块类型	年份	CA	PD	LPI	PAFRAC	COHESION
农田	2010	1099663	1.563	37.939	1.454	98.883
	2018	1248882	1.935	42.513	1.446	98.719
林地	2010	725632	1.674	10.817	1.414	96.152
	2018	721865	1.653	10.775	1.425	97.034
水域	2010	358621	2.255	9.184	1.382	94.127
	2018	223783	2.157	3.478	1.356	87.077
灌丛	2010	22515	0.442	0.084	1.336	46.284
	2018	7106	0.232	0.019	1.280	12.302
建筑用地	2010	36384	1.332	0.038	1.255	15.113
	2018	40836	1.247	0.162	1.287	32.886
裸地	2010	342	0.022	0.015	1.274	26.240
	2018	685	0.031	0.008	1.120	7.698

3.2 景观格局特征尺度

根据景观水平的景观格局指数空间变异特征值变化趋势(图 1),图中横轴代表不同尺度的移动窗口半径,纵轴代表半变异函数的块基比 $C_0 / (C_0 + C)$ 。块基比值越小,空间变异程度越低,空间自相关性越明显,景观格局越稳定^[25-27]。景观水平的 6 个指数稳定性随着移动窗口半径的增加大致呈现先上升后下降最后稳定的趋势,因此可以进行特征尺度的判定。

结果表明:2010 年的景观格局指数在 4 500 m 窗口位置表现稳定,2018 年景观格局指数的稳定窗口则



为4 250 m,即该尺度是能够反映研究区景观格局空间变异的特征尺度。

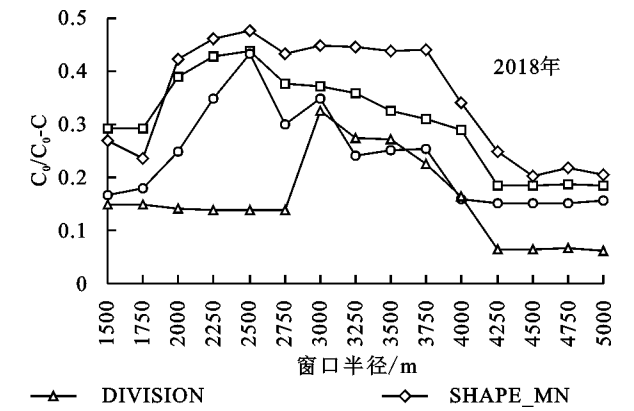


图 1 不同尺度下景观格局指数变异值趋势

3.3 土壤侵蚀强度

在 ArcGIS 10.7 的支持下,实现土壤侵蚀各计算参数的采集、处理、各因子层的生成,最终对各因层进行栅格叠加运算,取得 2010 年、2018 年挠力河流域土壤侵蚀强度等级分布(图 2),2018 年土壤侵蚀等级分布趋势与 2010 年大致相同。土壤侵蚀较高等级主要分布于研究区南部及友谊县和集贤县境内,呈带状分布。其中,中度及以上等级侵蚀,在研究区呈面线结合状分布。强度及以上等级侵蚀零散分布于宝清县、双鸭山市及挠河县西南部。

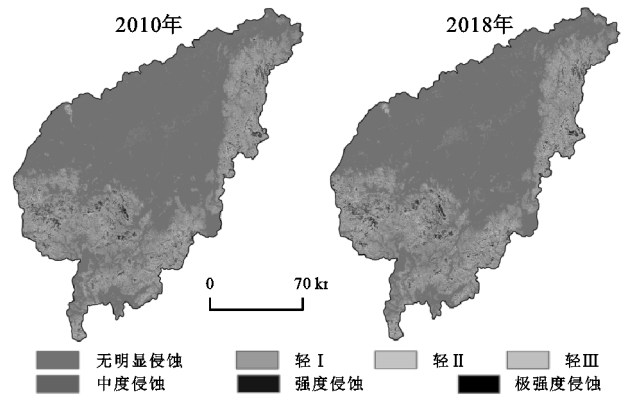


图 2 土壤侵蚀等级分布

根据 2010—2018 年研究区土壤侵蚀强度等级转移矩阵见(表 4),2010—2018 年研究区土壤侵蚀总面积由 6 883.81 km² 上升至 7 297.56 km²。2010 年轻度侵蚀等级中,轻Ⅲ等级面积最大,面积为 1 175.08 km²,轻Ⅱ等级占比最小,面积为 739.31 km²。2018 年轻度侵蚀等级中,轻Ⅲ等级面积上升为 1 542.27 km²,轻Ⅱ等级面积上升为 1 149.40 km²。2010 年中度及以上等级侵蚀占总侵蚀面积的 55.51%,约 3 821.10 km²,2018 年中度及以上等级侵蚀占总侵蚀面积的 48.83%,约 3 563.18 km²,其中,中度侵蚀等级面积增加最明显,研究期间由 1 194.80 km² 增至 1 381.67 km²。将

2010 年、2018 年土壤侵蚀强度进行等级转化运算后,显示整个挠力河流域土壤侵蚀总量略微增加。

3.4 景观格局类型对土壤侵蚀的影响

3.4.1 不同土壤侵蚀强度下的景观格局分析 根据土壤侵蚀强度等级,研究中分别提取各等级范围内的斑块类型占比,观察到各类斑块占比引起不同土壤侵蚀强度的规律。土壤侵蚀强度越高,林地斑块占比越大,农田斑块占比越小。中度及以上侵蚀强度等级均有很高的林地斑块面积占比,轻度及无明显侵蚀等级则相反,随着侵蚀等级的降低,林地斑块占比减少。轻度及无明显侵蚀等级中农田斑块均占 50% 以上(图 3)。这与研究区现状土地利用斑块特征有直接关系,林地生态系统是陆地最为重要的生态系统之一,在涵养水源和调节地表水土过程中有着重要作用。研究发现挠力河流域林地斑块主要分布在东部及南部高程略高、坡度稍大的区域,且研究区林地斑块树种单一,大部分林地为地表裸露的单层纯林或疏林,这就造成了土壤大团聚体有机碳含量偏低,土壤的黏结性和粘着性受到破坏,土壤结构稳定性、入渗性能降低及土壤质量下降,最终造成土壤侵蚀的天然因素抵御能力较弱,水土流失、沙化渐趋严重^[31]。另外,流域从 20 世纪 90 年代起,当地政府大力推行以稻治涝农业结构调整政策,大量低洼旱地改造为水田,水田具有良好的水保功能,旱地采取玉米—小麦的轮作方式^[4],这也能一定程度上抑制土壤侵蚀,这与研究区其他相关研究结论相一致,挠力河流域土壤侵蚀主要与现状土地利用斑块特征直接相关。

3.4.2 特征尺度上的景观格局类型的土壤侵蚀响应 优化景观格局指数对缓解土壤侵蚀具有一定作用,但景观格局指数众多且实践中较难把握。为使研究更具实践指导意义,本研究选择探索景观格局类型对土壤侵蚀的影响效果。

表 4 2010—2018 年土壤侵蚀等级转移矩阵 km²

侵蚀等级	2018 年							
	无明显侵蚀	轻 I	轻 II	轻 III	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀	共计
2010 年	无明显侵蚀	14675.86	303.42	351.78	199.34	94.28	24.06	15659.07
	轻 I	412.29	512.36	64.56	52.36	64.24	28.23	1148.32
	轻 II	31.02	30.63	598.87	25.03	20.87	24.36	739.31
	轻 III	24.89	20.31	23.53	774.89	267.05	25.39	1175.08
	中度侵蚀	54.26	76.20	34.78	168.72	745.54	54.88	1194.80
	强烈侵蚀	33.61	35.32	25.48	186.52	65.91	838.10	1500.00
	极强烈侵蚀	13.40	64.48	50.41	135.42	123.79	116.08	1126.30
	共计/km ²	15245.32	1042.71	1149.40	1542.27	1381.67	1111.09	22542.88

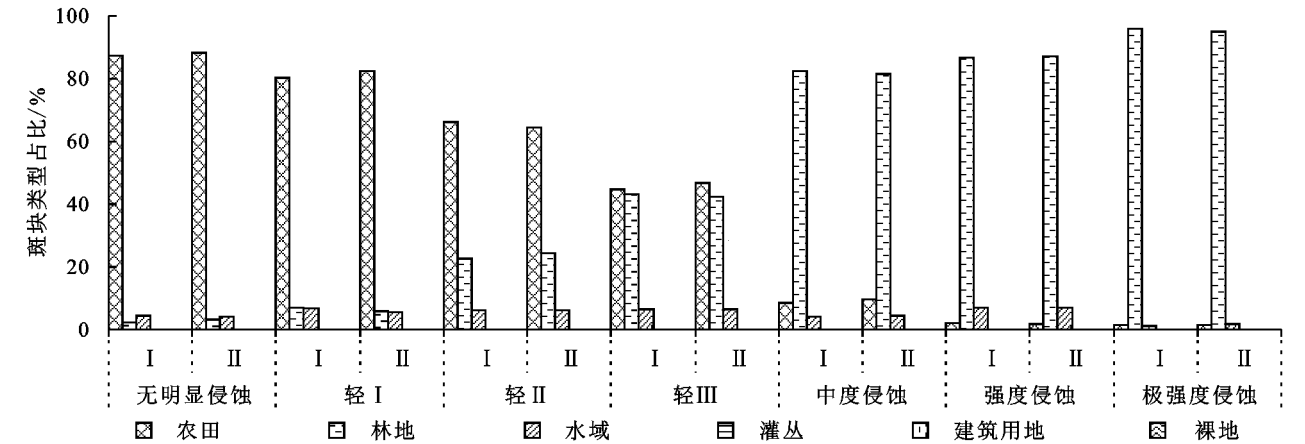


图 3 不同土壤侵蚀等级下各类斑块面积占比

景观格局类型参照肖笃宁提出的散布型、网络型、指状型和棋盘型 4 种景观格局^[16]。已知挠力河流域土壤侵蚀同现状土地利用斑块特征存在明显关联,研究分别提取 2010 年、2018 年具有不同景观格局类型及不同林地斑块占比(0~25%,25%~50%,50%~75%,75%~100%)的特征尺度样地,探索景观格局类型对土壤侵蚀的影响。各样地景观格局指数与单位面积土壤流失量情况如下(表 5)。

2010 年区域一是本底为农田的散布型格局,农田受到外界作用出现不规则且分散的孔隙。2018 年区域一为农田本底林地指状型格局,两区域根本差别是 2018 年指状型结构的 SHAPE_MN 偏高,斑块类型在景观中更趋于不规则,对土壤侵蚀缓解作用要优于散布型格局。2010 年区域二是林地、耕地相处穿插,水域零散分布的指状格局,2018 年区域二为农田本底水域网状型景观格局,网状型结构表现出的 DIVISION 更低,FRAC_AM 更高,对土壤流失的抑制作用更好。2010 年区域三为林地本底水域网状结构,2018 年区域三为林地本底水域、农田棋盘型结构,网状型结构表现出的 DIVISION 较棋盘型更低,FRAC_AM,SHAPE_MN 更高,减缓土壤流失作用

更加明显。2010 年区域四林地本底水域、农田棋盘型结构,2018 年区域四为林地本底水域为主的指状型结构,指状型结构对土壤侵蚀的减缓效果更佳。

综上,现状土地利用斑块特征是影响研究区土壤侵蚀强度变化的根本原因,优化景观格局类型会在一定程度上缓解土壤侵蚀,却未能逆转由现状土地利用斑块特征造成的影响。在景观格局特征尺度下,景观格局类型对土壤侵蚀的缓解作用可排序为:网状型>指状型>棋盘型>散布型。

表 5 样地景观格局指数与单位面积土壤流失量

年份	样地	SHDI	FRAC_AM	DIVISION	SHAPE_MN	A/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)
2010	I	1.047	1.261	0.727	1.187	126.87
	II	1.134	1.203	0.773	1.134	653.60
	III	1.073	1.258	0.763	1.127	1428.95
	IV	1.224	1.140	0.903	1.012	3763.86
2018	I	1.043	1.263	0.726	1.243	83.58
	II	1.186	1.250	0.753	1.046	484.52
	III	1.179	1.153	0.792	1.082	1849.37
	IV	1.203	1.146	0.850	1.028	3285.25

在研究区土壤侵蚀强度的有序多元 Logistic 回归分析模型中,以土壤侵蚀强度等级为因变量,景观格局类

型为自变量,明确量化景观格局类型对土壤侵蚀的差异化影响。研究扩大样本数量,将 2010 年、2018 年土地利用及土壤侵蚀强度数据划分为上述标准的特征尺度样地,随机选取栅格总数的 10%作为样本,避免空间自相关性,统计其景观格局类型及平均土壤侵蚀强度等级数据。因在特征尺度上研究区平均土壤侵蚀强度最高等级为中度侵蚀,因此,在分析中因变量的变化范围为无明显侵蚀至中度侵蚀 5 个等级。

有序多分类 Logistic 回归分析结果如表 6 所示:似然比检验 (Model Fitting Information) 显示 $p < 0.001$,说明至少一个变量具有统计学显著性。对变量进行平行线假设检验 (Test of Parallel Lines), p 值为 0.051,不拒绝原假设,证明应用有序多元 Logistic 回

归分析具有合理性^[33-34],即土壤侵蚀等级与景观格局类型有关 $p < 0.05$ 。根据有序多分类 Logistic 回归 b 值计算可得:网状型、指状型和棋盘型与散布型景观格局相比,土壤侵蚀高至少一个等级的概率分别为 $0.53(\exp b = -0.633)$, $0.74(\exp b = -0.304)$, $0.88(\exp b = -0.138)$ 。

因此,在挠力河流域今后的土壤流失治理中,应重点对现有的林地成分进行改造,营造复合型林分,增加树种多样性及底层植被盖度;景观格局特征尺度可以作为格局优化的参考单元,在此基础上结合不同类型景观格局进行优化,使其向指状型、网状型景观格局类型发展,以达到更好的减缓土壤侵蚀的效果。

表 6 有序多元 Logistic 回归分析结果

影响 因素	赋值	优势比 Exp(<i>b</i>)	标准 误差	瓦尔德 Wald	自由度 df	显著性	Exp(<i>b</i>)置信区间 95%CI	
							下限	上限
土壤侵蚀等级	土壤侵蚀=1	-5.97	0.495	145.245	1	0.000	-6.932	-4.993
	土壤侵蚀=2	-4.46	0.398	125.364	1	0.000	-5.238	-3.677
	土壤侵蚀=3	-2.63	0.317	69.148	1	0.000	-3.255	-2.014
	土壤侵蚀=4	-0.961	0.271	12.615	1	0.000	-1.491	-0.431
景观格局类型	网状型=1	-0.633	0.740	0.732	1	0.000	-1.383	-0.484
	指状型=2	-0.304	0.551	0.304	1	0.015	-0.865	-0.170
	棋盘型=3	-0.128	0.318	0.162	1	0.029	-1.480	0.233
	散布型=4	0			0			

4 结 论

(1) 2010—2018 年,挠力河流域土地利用以农田和林地为主,占流域总面积的 80%以上,农田与建筑用地面积明显增加,水域与灌丛面积显著降低。研究区景观格局破碎化程度增大,景观格局类型有向散布型转化的趋势。

(2) 研究通过移动窗口法与半变异函数判断得出,2010 年、2018 年挠力河流域的景观格局特征尺度分别为 4 500 m、4 250 m,表明后者的景观格局更为丰富和复杂。

(3) 运用 USLE 模型土壤计算挠力河流域侵蚀强度,结果显示 2018 年挠力河流域土壤侵蚀强度等级分布 2010 年大致相同,2010—2018 年研究区土壤侵蚀总量略微增加。

(4) 挠力河流域土壤侵蚀强度主要取决于现状土地利用斑块特征。景观格局类型优化会一定程度上缓解土壤侵蚀强度,却不能逆转由现状土地利用斑块特征造成的影响。在景观格局特征尺度下,景观格局类型对土壤侵蚀的缓解作用可排序为:网状型>指

状型>棋盘型>散布型。网状型、指状型和棋盘型与散布型景观格局相比,土壤侵蚀强度至少高一个等级的概率分别为 0.53,0.74,0.88。

参考文献:

[1] 卓志清,李勇,兴安,等.东北旱作区土壤碳氮磷生态学计量特征及其影响因素[J].农业机械学报,2019,50(10):259-268,336.

[2] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.土地退化/恢复中土壤可蚀性动态变化[J].农业工程学报,2009,25(2):56-61.

[3] 史长婷,王恩姮,陈祥伟.典型黑土区水土保持林对土壤可蚀性的影响[J].水土保持学报,2009,23(3):25-28,33.

[4] 刘彦辉,杨洪丽,李兴华.黑龙江省水土流失现状及防治措施探讨[J].黑龙江水利科技,2010,38(3):21-23.

[5] 周浩,雷国平,杨雪昕,等.RCPs 气候情景下三江平原典型流域耕地动态模拟[J].农业机械学报,2017,48(10):121-133.

[6] 孙善良,张小平.陕西省土地利用转型时空演变及其生态环境效应分析[J].水土保持研究,2021,28(6):356-363.

[7] 张宪奎,许靖华,卢秀芹,等.黑龙江省土壤流失方程的研究[J].水土保持通报,1992,12(4):1-10.

- [8] Renzo R, Baldassare B, Paolo L B. Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks [J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(3): 381-387.
- [9] 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.
- [10] 孙天成, 刘婷婷, 褚琳, 等. 三峡库区典型流域“源”“汇”景观格局时空变化对侵蚀产沙的影响 [J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7476-7492.
- [11] 郭思琪, 韩磊, 赵永华, 等. 秦岭地区土壤侵蚀时空变化及景观格局 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(7): 2167-2176.
- [12] 张金茜, 柳冬青, 钱彩云, 等. 流域景观格局对土壤保持服务的影响 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(3): 1164-1172.
- [13] 周雯, 曹福亮, 张瑞, 等. 绿地格局对城市地表热环境调节作用的多尺度分析 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2020, 44(3): 133-141.
- [14] 王璐, 袁艳斌, 董恒, 等. 土地利用景观格局空间尺度效应研究: 以武汉市为例 [J]. *世界地理研究*, 2020, 29(1): 96-103.
- [15] 张韧瓔, 刘学录. 天水市土地利用景观格局的幅度效应研究 [J]. *生态学报*, 2019, 38(3): 80-89.
- [16] 陈龙, 谢高地, 张昌顺, 等. 澜沧江流域土壤侵蚀的空间分布特征 [J]. *资源科学*, 2012, 34(7): 1240-1247.
- [17] 宋爽, 许大为, 石梦溪, 等. 挠力河流域景观生态健康时空演变 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2021, 45(2): 177-186.
- [18] 宫兴龙, 杜树平, 付强, 等. 挠力河流域丘陵—平原—湿地区径流变化驱动力分析 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(16): 114-124.
- [19] 刘曼红, 孟瑶, 曹晶晶, 等. 挠力河湿地大型底栖动物功能特性 [J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(1): 76-82.
- [20] 陈正发, 史东梅, 何伟, 等. 1980—2015 年云南坡耕地资源时空分布及演变特征分析 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(15): 256-265.
- [21] 邬建国. *景观生态学: 格局、过程、尺度与等级* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [22] 薛冬冬, 余光辉, 温小荣, 等. 基于地统计分析的南京钟山风景区景观格局尺度效应分析 [J]. *西南林业大学学报*, 2012, 32(1): 30-35, 111.
- [23] 刘建华, 于强, YANG Di, 等. 磴口县地下水空间异质性分析及其对景观格局变化的响应 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 205-212.
- [24] 李栋科, 丁圣彦, 梁国付, 等. 基于移动窗口法的豫西山地区丘陵地区景观异质性分析 [J]. *生态学报*, 2014, 34(12): 3414-3424.
- [25] 王辉, 宋长春. 三江平原湿地区域生态风险评价研究 [J]. *地理科学展*, 2019, 38(6): 872-882.
- [26] 赵梦溪, 李丹. 城市地表温度和植被覆盖度的空间动态性: 以佳木斯为例 [J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(12): 45-49.
- [27] 陈昭, 罗小波, 高阳华, 等. 基于半变异函数的重庆市地表温度空间异质性建模及多尺度特征分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(7): 1051-1060.
- [28] 原立峰, 杨桂山, 李恒鹏, 等. 基于 GIS 和 USLE 的鄱阳湖流域土壤侵蚀敏感性评价 [J]. *水土保持通报*, 2013, 33(5): 196-201, 209, 30.
- [29] Zhang T W, Yuan Y J, Wei W H, et al. Tree-ring-based temperature reconstruction for the northern Greater Higgan Mountains, China, since A. D. 1717 [J]. *International Journal of Climatology*, 2012, 33(2): 422-429.
- [30] 李玉新, 魏同洋, 靳乐山. 牧民对草原生态补偿政策评价及其影响因素研究: 以内蒙古四子王旗为例 [J]. *资源科学*, 2014, 36(11): 2442-2450.
- [31] 周浩, 金平, 夏卫生, 等. 耕地利用下挠力河流域水分平衡效应研究 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(7): 313-322.
- [32] 丁杰, 杨新兵, 朱辰光, 等. 崇礼清水河流域土壤侵蚀空间格局及其影响因素研究 [J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 73-80.
- [33] 祝新明, 李莉, 吕升, 等. 2014—2018 年桐乡市环境空气质量评价研究 [J]. *环境科学与管理*, 2020, 45(5): 179-183.
- [34] 杜彦彦, 黄青. 河南省 PM_{2.5} 时空分布特征及其与植被覆盖度的关系 [J]. *生态环境学报*, 2019, 28(11): 2257-2265.