

延河流域植被景观格局与水文连通性关系

王利成^{1,2}, 温仲明^{1,2,3}, 逯金鑫³

(1.中科院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学,
北京 100049; 3.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探究延河流域植被景观格局对水文连通性的影响,基于土地利用分类成果和水文连通指数空间分布,探讨了延河流域植被景观和水文连通性的格局特征,并借助 Geoda 软件平台基于空间自相关理论探究了林草植被景观格局与水文连通在空间上的相关性。结果表明:(1) 延河流域草原带、森林草原带和森林带中林草景观与水文连通性都呈现空间自相关性。3 个地带中林地景观的平均斑块面积、聚合度指数和斑块面积百分比都与水文连通性呈现显著的统计学上的正相关性以及空间正相关性;景观分离度和斑块破碎化指数与水文连通性呈显著的统计学上的负相关性以及空间负相关性。(2) 林地景观的优势度和聚集程度的增加并不能带来水文连通性的降低,而其斑块破碎化的增加会带来水文连通性的降低。对于 3 个地带的草地景观,其表现则与林地完全相反,增加草地景观的面积,提高草地植被的优势度,使草地斑块连续集中可以促使水文连通性降低。(3) 在探究水文连通性和植被景观格局相关关系的空间回归模型中,空间滞后模型和空间误差模型拟合效果远好于普通线性回归模型,综合来看,空间滞后模型对植被景观格局与水文连通性的空间关系的解释能力更强。研究结果可为延河流域植被景观格局的设计和规划,提供有效的参考。

关键词:水文连通性; 植被景观格局; 空间自相关; 空间自回归

中图分类号:P332.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0124-07

Relationship Between Vegetation Landscape Pattern and Hydrological Connectivity in Yanhe River Basin

WANG Licheng^{1,2}, WEN Zhongming^{1,2,3}, LU Jinxin³

(1.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the impact of vegetation landscape pattern on hydrological connectivity in the Yanhe River Basin, based on the land use classification results and the spatial distribution of hydrological connectivity index, the pattern characteristics of vegetation landscape and hydrological connectivity in the Yanhe River Basin were discussed. Based on the spatial autocorrelation theory, the spatial correlation between landscape pattern of forest and grass vegetation and hydrological connectivity was explored with the help of GeoDA software platform. The results show that: (1) the spatial distribution of forest-grassland landscape and hydrological connectivity has significant spatial autocorrelation in steppe, forest steppe and forest zones of Yanhe River Basin; the mean patch area, aggregation index and percentage of landscape of forestland in the three zones showed significant statistical and spatial positive correlation with hydrological connectivity; landscape division index and splitting index showed significant statistical and spatial negative correlation with hydrological connectivity; (2) the increase of dominance degree and aggregation degree of forestland landscape does not lead to the decrease of hydrological connectivity, but the increase of patch fragmentation can lead to the decrease of hydrological connectivity; for the grassland landscape of the three zones, its performance is completely opposite to that of forestland; increasing the area of grassland land-

收稿日期:2021-06-22

修回日期:2021-08-26

资助项目:国家自然科学基金“黄土丘陵沟壑区植被水沙拦蓄效率变化与水文连通性响应”(41977077)

第一作者:王利成(1996—),男,河南省淮滨县人,硕士研究生,研究方向:水土资源管理。E-mail:1203112026@qq.com

通信作者:温仲明(1969—),男,陕西省定边人,研究员,博士,研究方向:水土保持植被恢复与重建。E-mail:zwmw@ms.iswc.ac.cn

scape, improving the dominance of grassland vegetation, and continuously concentrating grassland patches can reduce the hydrological connectivity; (3) among the spatial regression models exploring the correlation between hydrological connectivity and vegetation landscape pattern, the fitting effects of spatial lag model and spatial error model are far better than that of ordinary linear regression model. In conclusion, the spatial lag model has a stronger ability to explain the spatial relationship between vegetation landscape pattern and hydrological connectivity. The research results can provide the effective references for the design and planning of the vegetation landscape pattern in the Yanhe River Basin.

Keywords: hydrological connectivity; vegetation landscape pattern; spatial autocorrelation; spatial autoregression

土地利用/覆被变化既是自然因素作用的结果,也受到人类活动的强烈影响,是下垫面特征变化最直观的表现形式。水作为影响土地利用的重要自然因素,同时也受到土地利用变化的影响,两者的交互响应,构成了一个复杂的环境系统。土地利用变化在地表或近地表区域对径流产生影响,其中地形、植被覆盖状况、农业实践和城市化等均可以对水文过程产生重要影响^[1-2]。人为植被变化是解释和监测土地利用/覆被的水文和侵蚀响应的关键因素^[3]。探索植被景观格局与水文生态的相关关系,可为维持生态系统稳定以及优化景观结构和格局提供关键依据。

水文连通性是揭示流域内径流泥沙产生和输移难易程度的重要方法,能够很好地指示径流泥沙输移路径及其对地表景观变化的响应^[4-5]。了解流域内水文连通性在空间维度和时间维度上的动态变化,为监控和预测流域内水沙产生和输移提供理论依据。水文连通性作为下垫面特征的属性之一,极易受到土地利用/覆被变化的影响。延河流域是黄土丘壑区的典型流域,水土流失严重,水土保持工作已连续开展多年^[6]。1999年退耕还林(草)工程实施后,延河流域的景观基质由耕地转变为林草^[7],植被对水沙产生一定的抑制效果但更具体的响应关系仍不清晰^[8-9]。本研究采用空间自相关与自回归模型探究延河流域内不同地带植被空间格局与水文连通性的关系,探究植被格局对水文连通性的影响,为流域内水沙控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

延河流域位于黄土高原中部,是黄河的一级支流,流域总面积约为 7655 km²。延河流域的多年平均降雨量为 504.8 mm 且集中在 6—9 月。流域属于黄土丘陵沟壑区,地形破碎,地势西北高,东南低^[10]。土壤类型以黄绵土为主,抗侵蚀能力差。在水热条件、下垫面特征和土壤等因子的综合影响,延河流域内土壤侵蚀极易发生,水土流失问题相当严重。为解

决水土流失问题,数十年来在该流域实施了类型多样的水土保持措施,在缓解流域水土流失的同时,也显著改善了生态环境,初步形成以林草为基质的景观生态格局。根据生物气候分区,该流域由东南向西北,可一次划分为森林带—森林草原带—草原带。

1.2 数据来源

本文选取 2017 年 6—9 月份的 Landsat 影像,以提取计算水文连通性指数中所需的植被覆盖因子。2017 年的土地利用和覆盖数据来源于清华大学 30 m 土地覆盖数据集 FROM-GLC(Finer Resolution Observation and Monitoring—Global Land Cover)(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn>),经过裁剪和综合分类获得研究区 2017 年土地利用分类图(图 1)。从“地理空间数据云平台”(<http://www.gscloud.cn/>)下载了分辨率为 30 m 的数字高程模型 DEM 数据。所有数据都进行重采样至 300 m 分辨率。

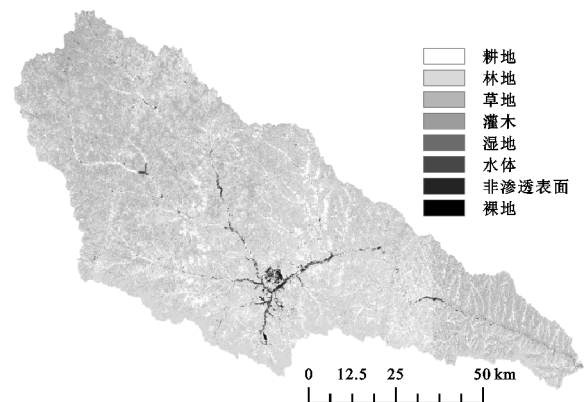


图1 研究区概况

1.3 研究方法

1.3.1 水文连通性指数计算 本研究利用 Borselli 等^[11]提出的水文连通性指数(Index of Connectivity)为理论基础,进行模拟计算。水文连通性指数(IC)的基本思想是位置 A 输移到位置 B 沉积物的量由 A 位置产生物质的能力和位置 A 到 B 传质效率所决定,两者以概率的形式表示。IC 表征了物质运移的潜在可能性,其值越大说明连通性就越大,物质的运移就越容易。公式如下:

$$IC=\lg(\frac{Dup_k}{Ddn_k})=\lg(\frac{\overline{W_k}\overline{S_k}\sqrt{A_k}}{\sum_{i=k,nk}\frac{d_i}{W_iS_i}})$$
 (1)

其中: Dup 代表坡上产生沉积物的潜在可能性; Ddn 代表沉积物通过水流路径到达汇点的可能性。 k 代表流域的栅格单元; $\overline{W_k}$ 是上坡集水区地表特征的权重均值; $\overline{S_k}$ 是上坡集水区的平均坡度; A_k 是上坡集水区的面积; d_i, W_i, S_i 分别是沿着下坡路径运移至汇点的第 i 个栅格单元的运移距离, 权重值和坡度。 IC 的范围为 $(-\infty, +\infty)$ 。

IC 的计算和部分分析是在 ArcGIS 10.6 平台上进行的, 在 IC 计算过程中需要输入的数据包括坡度 S 、汇流面积 A 、径流路径长度 d 和权重因子 W 。坡度 S 、汇流面积 A 和径流路径长度 d 可以根据研究区域数字高程模型 DEM 进行地形计算获得; 权重因子 W 用修正通用水土流失方程 (RUSLE) 中的植被覆盖因子 C 表征^[11]。

表 1 景观格局指数及其生态学意义

种类	指数	缩写	公式	生态学意义
面积指标	斑块面积百分比	PLAND	$PLAND=100\sum_{j=1}^n\frac{a_j}{A}$	景观中某景观类型占据总景观面积的比例, 其值大小反映该景观类型在整个景观中的比重
密度指标	平均斑块面积	AREA_MN	$AREA_{MN}=\frac{A}{N}$	描述斑块大小的变化, 可用于分析景观整体的破碎化程度, 值越小, 景观越破碎
形状指标	形状指数	LSI	$LSI=\frac{0.25E}{\sqrt{A}}$	描述景观的形状特征, 形状越不规则, LSI 越大
结构指标	斑块破碎化指数	SPLIT	$SPLIT=\frac{A^2}{\sum_{j=1}^na_{ij}^2}$	表征景观被分割程度, 值越大, 斑块呈现越强的破碎化, 反映了景观结构的复杂性
聚散性指标	聚合度指数	AI	$AI=\frac{100\ g_{ii}}{\max(g_{ii})}$	考察景观的边缘效应, 其值越高说明景观完整性越好
	景观分离度	DIVISION	$DIVISION=\left[1-\sum_{j=1}^n(\frac{a_{ij}}{A})^2\right]$	表征相邻斑块出现不同属性的概率, 概率越大, 景观聚集的程度越低

注: A 是景观类型总面积; N 是斑块数目; E 是景观中所有斑块边界的总长度; g_{ii} 是相应景观类型的相似邻接斑块数量 a_{ij} 景观类型 i 斑块 j 的面积。

1.3.3 空间自相关分析 空间自相关分析^[16]能展现变量在空间上的分布情况以及这种分布状况是否与邻近空间和邻近变量有关, 结果以 Moran' I 的大小描述相关性强弱。同时, 采用双变量空间自相关分析方法来描述空间变量单元与邻接区域其他变量单元间的空间相关程度。

运用 GeoDa1 18 软件进行空间自相关分析, 全局空间自相关分析用于探究特定空间变量的整体上的聚集特征, 计算公式为

$$I=\frac{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^nW_{ij}(x_i-\overline{x})(x_j-\overline{x})}{S^2\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^nW_{ij}}$$
 (3)

植被覆盖因子 C 的计算采用遥感^[12]的方法:

$$C=0.1(\frac{-NDVI+1}{2})$$
 (2)

本文在计算汇流面积 A 和径流路径长度 d 时选用对径流路径模拟效果较好的多流向算法, 具体计算在 TauDEM 中实现。

1.3.2 景观格局指数 景观格局指数能够识别并归纳景观格局信息, 并且将景观的空间结构定量化, 被广泛用于衡量景观格局特征^[13]。使用 6 个景观格局指数 (表 1) 来表征延河流域的景观格局特征, 并通过 Fragstats 4.2 软件计算了 2017 年延河流域景观格局指数。利用 Fragstats 4.2 软件的移动窗口工具, 设立 $1\text{ km}\times1\text{ km}$ 的正方形窗口, 以固定窗口作为计算不同景观格局指数的最小分析单元, 提取计算结果并赋值给窗口栅格^[14]。为消除量纲的影响, 运用 ArcGIS 10.6 软件, 以各个窗口为基本单元对水文连通指数与景观指数进行标准归一化处理^[15]。

式中: n 代表空间单元总数; x_i 和 x_j 分别是是坐标位置 i 和 j 空间单元的属性值; W_{ij} 是空间权重矩阵; S^2 是样本方差。

局部空间自相关用于探究在局部区域中空间变量的空间相关性, 通过 LISA 图来直观表示局部空间变量高值和低值的聚集状况与空间分异特征, 展现聚集模式在空间中的分布状况, 其计算公式为:

$$LISA=\frac{(x_i-\overline{x})\sum_{j=1}^nW_{ij}(x_j-\overline{x})}{S^2}$$
 (4)

LISA 系数用于描述变量在空间上的集聚性, 当 $LISA>0$ 表征该局部空间单元与邻近单元在空间上的正相关程度, $LISA<0$ 则表征负相关程度。

1.3.4 空间自回归模型 本研究利用 GeoDa1 18 软件基于空间自回归模型对 2017 年水文连通性与不同植被景观指数进行回归分析,公式为

$$y=\rho W_1y+\beta x+\mu+a$$
 (5)

$$\mu=\lambda W_2\mu+\epsilon$$
 (6)

式中: y 代表因变量; x 代表自变量,即各类景观指数; β 是自变量回归系数; a 是截距; μ 是随机误差项; ϵ 指代随机误差^[17]; W_1 和 W_2 分别是因变量与残差的空间权重矩阵; ρ 是空间滞后项 ($W_1 y$) 的回归系数; λ 是空间残差项回归系数。

采用普通线性回归模型(ordinary linear regression, OLS)、空间误差模型(spatial error model, SEM)、空间滞后模型(spatial lag model, SLM)3 类空间自相关回归模型^[18],分别以水文连通性指数和景观格局指数为因变量和自变量,以探究植被景观格局对水文连通性的影响。通过对比极大对数似然值(maximum likelihood logarithm, LIK)、施瓦茨准则(Schwartz criterion,

SC)、赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)以及空间回归模型残差项的 Moran's I 等指标来评价不同模型的拟合效果^[19]。模型极大对数似然值越大,AIC,SC 以及模型残差的 Moran's I 越小,表示模型得到较好的拟合结果^[20]。

2 结果与分析

2.1 延河流域植被景观空间格局分析

依据表 2,延河流域主要土地利用类型为耕地、林地、草地,其中草地所占比重最大,约占区域总土地利用面积的 36.84%,林地次之,约占 32.61%,耕地面积约占 26.03%。草原带草地植被为优势植被类型,约占草原带总面积的 60.45%。森林草原带中林地和草地面积基本相当,分别占森林草原带总面积的 32.34%和 35.45%。而森林带森林植被优势明显,约占总面积的 46.31%,是森林带中占比最高的土地利用类型。

表 2 2017 年延河流域土地利用

土地利用 类型	延河流域		草原带		森林草原带		森林带	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
耕地	1992.78	26.03	382.86	21.14	950.4	26.88	659.52	28.57
林地	2496.33	32.61	283.77	15.67	1143.36	32.34	1069.2	46.31
草地	2820.33	36.84	1094.94	60.45	1253.25	35.45	472.14	20.45
灌木	241.38	3.15	36.36	2.01	146.97	4.16	58.05	2.51
湿地	0.54	0.01	0.09	0.00	0.27	0.01	0.18	0.01
水	8.1	0.11	1.44	0.08	5.04	0.14	1.62	0.07
非渗透表面	81.27	1.06	8.37	0.46	33.39	0.94	39.51	1.71
裸地	14.67	0.19	3.42	0.19	2.79	0.08	8.46	0.37
总计	7655.4	100.00	1811.25	100.00	3535.47	100.00	2308.68	100.00

由此可见,不同植被带分布的植被类型存在明显差异,而不同植被对水文连通性的影响也有较大差异,这种差异与植被景观格局变化关系密切。

比较 3 个植被带林地和草地的景观格局指数(表 3),草原带草地占比最大(60.45%),且草地 AREA_MN,AI 较高,DIVISION 较低,说明草地的景观优势度高,相对集中;森林带中林地面积所占的比例最大,林地斑块的 PLAND,AI 较大,其景观优势和聚集程

度更高;森林草原带中林地和草地景观除 SPLIT 外的各项景观指数差异不大,表明林地和草地整体分布状况类似,而林地的 SPLIT 明显小于草地,则说明林地相较于草地景观更加破碎,草地的集聚程度更高。在空间上,PLAND 能够直观反映特定景观的分布状况,能够衡量景观丰度。结果表明,各植被带的林地和草地景观的 Moran's I 值大于 0.6,呈现明显的空间集聚性。

表 3 植被景观格局指数

类型		PLAND	LSI	AREA_MN	DIVISION	SPLIT	AI	Moran's I
草原带	林地	15.67	41.74	27.71	1.00	10852.22	25.66	0.60
	草地	60.45	38.05	1013.83	0.65	2.89	66.04	0.76
森林草原带	林地	32.34	65.65	78.74	1.00	251.15	41.97	0.69
	草地	35.45	65.99	95.74	0.97	38.57	44.22	0.74
森林带	林地	46.31	45.92	230.43	0.97	29.54	58.40	0.78
	草地	20.45	51.85	34.77	1.00	1420.22	28.74	0.67

2.3 水文连通性格局分析

依据公式(1)计算获得延河流域 2017 年的水文连通指数(图 2),IC 的范围在-11.43~2.63,其值越低表明径流泥沙传输越困难,越不易发生水土流失。在空间上,延河流域东南部水文连通指数(IC)较高,而流域中部和南部 IC 值较低,并且在南部呈现出明显的集聚性。李晶等^[21]在基于监测数据提出,延河流域在东南向西北方向上水土流失量呈现递减态势,这与延河流域水文连通性指数(IC)的空间分布规律基本一致。流域东南部形状窄长,冲沟发育^[22],坡面物质运移到河网沟谷的距离更短,该区域地势低且平坦,物质更易运移,这可能是该区 IC 值较高的主要原因。同时延长县对石油等矿产资源的开采活动也影响植被生长的破坏,也使得该区 NDVI 值较低,水土流失更易发生^[22]。

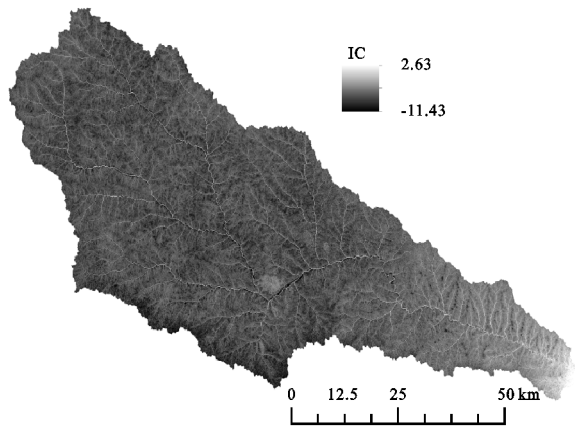


图 2 2017 年延河流域水文连通指数(IC)分布

空间自相关分析表明(图 3),草原带、森林草原带和森林带的全局空间自相关指数分别为 0.128, 0.468, 0.362,且显著性 p 值均小于 0.001,不同植被带的水文连通性具有较强的空间正相关性。草原带的 IC 的低-低集聚区要多于高一高集聚区,且分布较为分散。森林草原带的东南部出现 IC 的高-高集聚区,而 IC 的低-低集聚区分散在其他区域。森林带的中部和南部分布着 IC 的低-低集聚区,而高一高集聚区则分布在东南部。

2.4 植被景观空间格局与水文连通性耦合分析

2.4.1 相关性与双变量空间自相关分析 植被景观格局对水文连通性的影响,受景观优势度、破碎及聚集效应等格局特征的共同作用。不同植被带水文连通性与林草地景观格局指数的 Pearson 相关性 & 双变量空间自相关分析表明(表 4),3 个地带中林地的 AREA_MN, AI 和 PLAND 都与 IC 呈现显著的正相关性,以及空间正相关性; DIVISION 和 SPLIT 与 IC

呈显著的负相关性,以及空间负相关性。林地景观的优势度和聚集程度的增加并不能带来水文连通性的降低,而其斑块破碎化的增加会带来水文连通性的降低。对于 3 个地带的草地景观,其表现则与林地完全相反, AREA_MN, AI 和 PLAND 都与 IC 呈现显著的负相关性; DIVISION 和 SPLIT 与 IC 呈显著的正相关性。增加草地景观的面积,提高草地植被的优势度,使草地斑块连续集中可以促使水文连通性降低。廖凯涛等^[23]通过对赣江上游濂江河流域的研究,得出有林地、疏林地、灌木林和经果林等林地类型的斑块越多,破碎度越高,越有利于阻滞径流泥沙,而草地则相反,该结论与本文结论基本一致。

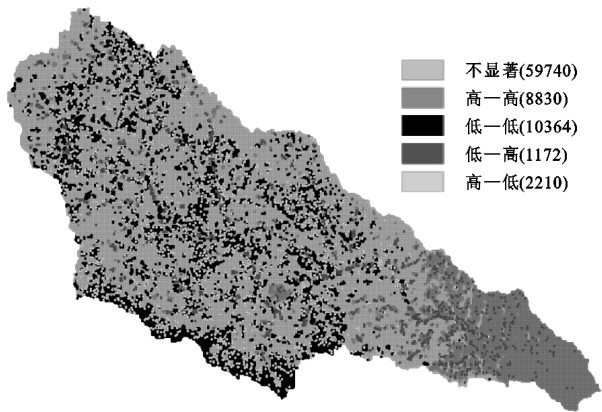


图 3 水文连通性 LISA 分布

草原带中林地和草地的 LSI 与 IC 都呈现显著正相关性,林草地植被斑块的形状越不规则,水文连通性越高;森林草原带中林地的 LSI 与 IC 呈显著正相关性,斑块的不规则形状会导致水文连通性在一定程度上升高,而草地的 LSI 与 IC 呈显著负相关性,草地斑块向不规则发展能够带来水文连通性的降低;森林带中林地和草地的 LSI 与 IC 都呈现显著负相关性,水文连通性随林草斑块形状的不规则发展而降低。

2.4.2 空间自回归分析 植被景观指数与水文连通性具有空间相关性,结果表明(表 5—6),普通线性回归模型(OLS)的 R^2 , LIK 较小, AIC, SC 数值较大,同时 OLS 残差的 Moran's I 均大于空间误差模型(SEM)和空间滞后模型(SLM),因此,OLS 不能有效解释变量间的空间关系。SLM 与 SEM 拟合效果远好于 OLS, SLM 模型和 SEM 模型的效果差异不大,综合来看 SLM 模型要略优于 SEM 模型, SLM 模型对植被景观格局与水文连通性的空间关系的解释能力更强。在 SEM 中, λ 为正且显著,说明模型误差的空间依赖较强;在 SLM 中,回归系数 ρ 始终为正值且通过 1% 的显著性检验,说明局部区域的 IC 受到邻近单元 IC 的正影响。

表 4 植被景观格局指数与水文连通性相关性 & 双变量空间自相关分析

景观格局指数	草原带		森林草原带		森林带	
	Moran's I	相关系数	Moran's I	相关系数	Moran's I	相关系数
AREA_林地	0.096	0.152**	0.100	0.144**	0.202	0.251**
AREA_草地	−0.119	−0.149**	−0.080	−0.104**	−0.063	−0.088**
AI_林地	0.031	0.088**	0.050	0.100**	0.118	0.180**
AI_草地	−0.075	−0.106**	−0.047	−0.070**	−0.025	−0.048**
PLAND_林地	0.109	0.145**	0.100	0.128**	0.207	0.235**
PLAND_草地	−0.127	−0.149**	−0.085	−0.102**	−0.080	−0.090**
DIVISION_林地	−0.101	−0.147**	−0.101	−0.137**	−0.214	−0.248**
DIVISION_草地	0.126	0.150**	0.077	0.100**	0.063	0.077**
SPLIT_林地	−0.100	−0.126**	−0.068	−0.093**	−0.116	−0.143**
SPLIT_草地	0.080	0.100**	0.074	0.092**	0.070	0.090**
LSI_林地	0.061	0.055**	0.014	0.050**	−0.041	−0.088**
LSI_草地	0.040	0.066**	−0.014	−0.080**	−0.045	−0.043**

注:*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$ (显著性检验)。

表 5 3 种空间回归模型参数对比

类型	模型	AI	AREA_MN	DIVISION	LSI	PLAND	SPLIT
草原带	OLS	−0.002	0.012**	0.03	−0.008*	0.019*	−0.004
	林地 SLM	−0.002	0.013***	0.024	−0.018***	0.013	−0.005
	SEM	−0.002	0.018***	0.008	−0.008***	0.016	−0.003
	OLS	0.006***	−0.015*	−0.010	0.012***	−0.023***	0.005
	草地 SLM	0.005**	−0.004***	−0.018**	0.007***	−0.040*	0.008
	SEM	0.005*	−0.050	−0.009*	0.008	−0.007***	0.007
森林草原带	OLS	−0.010*	0.040***	0.100***	−0.020***	0.030***	0.010
	林地 SLM	−0.010***	0.040***	0.050***	−0.014***	0.030***	0.007*
	SEM	−0.003*	0.040***	0.100***	−0.010***	0.040***	0.013**
	OLS	0.003	−0.010**	−0.021*	0.011***	−0.020**	0.010
	草地 SLM	0.004*	−0.014***	−0.014*	0.007***	−0.004	0.010
	SEM	0.002	−0.020***	−0.020*	0.010**	−0.008	0.003
森林带	OLS	−0.002	0.020***	0.010	−0.030***	0.020**	0.030
	林地 SLM	−0.010**	0.030***	0.025**	−0.020***	0.010	−0.010
	SEM	−0.005***	0.034***	0.032***	−0.017***	0.022***	0.004
	OLS	0.003	−0.030***	−0.100**	0.010**	−0.040***	−0.003
	草地 SLM	0.003	−0.020**	−0.040*	0.010*	−0.020	−0.002
	SEM	0.003	−0.020***	−0.042*	0.007*	−0.018	0.001

注:*** 表示 $p < 0.001$; ** 表示 $p < 0.01$; * 表示 $p < 0.05$, 下同。

表 6 3 种空间回归模型误差对比

类型	模型	ρ	λ	常数	R^2	LIK	AIC	SC	Moran's I
草原带	OLS			0.82***	0.17	15006.1	−29998.1	−29950.4	0.093
	林地 SLM	0.264***	0.265***	0.6***	0.25	15092.7	−30169.5	−30114.9	−0.003
	SEM			0.81***	0.24	15092.4	−30170.8	−30123.0	−0.006
	OLS			0.81***	0.15	41276.0	−82538.0	−82483.3	0.110
	草地 SLM	0.32***	0.31***	0.55***	0.26	41618.6	−83221.1	−83158.6	−0.007
	SEM			0.82***	0.26	41612.9	−83211.8	−83157.1	−0.006
森林草原带	OLS			0.76***	0.16	49316.8	−98619.6	−98562.4	0.470
	林地 SLM	0.70***	0.70***	0.19***	0.41	54771.2	−109526.0	−109461.0	−0.059
	SEM			0.74***	0.41	54774.7	−109535.0	−109478.0	−0.062
	OLS			0.83***	0.12	50466.4	−100919.0	−100861.0	0.508
	草地 SLM	0.73***	0.73***	0.23***	0.45	56921.8	−113828.0	−113762.0	−0.065
	SEM			0.82***	0.44	56921.6	−113829.0	−113772.0	−0.066
森林带	OLS			0.80***	0.10	41192.0	−82370.1	−82314.8	0.357
	林地 SLM	0.62***	0.63***	0.28***	0.33	43838.4	−87660.8	−87597.6	−0.042
	SEM			0.78***	0.33	43821.8	−87629.6	−87574.3	−0.044
	OLS			0.87***	0.10	23652.4	−47290.7	−47239.4	0.326
	草地 SLM	0.58***	0.58***	0.38***	0.25	24889.2	−49762.5	−49703.8	−0.039
	SEM			0.85***	0.24	24887.7	−49761.4	−49710.1	−0.040

3 结论

(1) 延河流域的水文连通性整体呈现由东南向西北的递减趋势。延河流域草原带、森林草原带和森林带中林草地景观与水文连通性都具有明显的空间自相关性。

(2) 相关性分析和空间自相关分析表明:3个地带中林地的平均斑块面积、聚合度指数和斑块面积百分比等表示景观比较均匀分布的指数与IC呈现显著的正相关性及空间正相关性;代表景观比较破碎、不连续的指数与IC呈显著的负相关性,以及空间负相关性。林地景观的优势度和聚集程度的增加并不能带来水文连通性的降低,而其斑块破碎化的增加会带来水文连通性的降低。草地景观的表现则与林地完全相反,增加草地景观的面积,提高草地植被的优势度,使草地斑块连续集中可以促使水文连通性降低。

(3) 水文连通指数受景观优势度、破碎度以及聚集程度等因素共同影响。在不同地带的回归模型中,普通回归模型不能有效解释变量间的空间关系。空间滞后模型和空间误差模型拟合效果要更好,综合来看,空间滞后模型对植被景观格局与水文连通性的空间关系的解释能力更强。

参考文献:

- [1] Bronstert A, Niehoff D, Bürger G. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(2): 509-529.
- [2] Li J, Zhou Z X. Coupled analysis on landscape pattern and hydrological processes in Yanhe watershed of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 927-938.
- [3] Nunes A N, De Almeida A C, Coelho C O A. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal[J]. *Applied Geography*, 2011, 31(2): 687-699.
- [4] Wohl E, Brierley G, Cadol D, et al. Connectivity as an emergent property of geomorphic systems[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(1): 4-26.
- [5] 张光辉.从土壤侵蚀角度诠释泥沙连通性[J].*水科学进展*, 2021, 32(2): 295-308.
- [6] 苗连朋,温仲明,张莉.植被变化与水沙响应关系研究:以延河流域为例[J].*干旱区资源与环境*, 2015, 29(5): 75-81.
- [7] 翟婷婷,赵广举,穆兴民,等.黄河中游典型流域极端降雨条件的水沙过程变化[J].*泥沙研究*, 2021, 46(1): 57-63, 41.
- [8] 冉大川,姚文艺,吴永红,等.延河流域 1997—2006 年林草植被减洪减沙效应分析[J].*中国水土保持科学*, 2014, 12(1): 1-9.
- [9] 赵跃中,穆兴民,严宝文,等.延河流域植被恢复对径流泥沙的影响[J].*泥沙研究*, 2014(4): 67-73.
- [10] 刘强,穆兴民,赵广举,等.延河流域水沙变化及其对降水和土地利用变化的响应[J].*干旱区资源与环境*, 2021, 35(7): 129-135.
- [11] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment[J]. *Catena*, 2008, 75(3): 268-277.
- [12] Almagro A, Thome T C, Colman C B, et al. Improving cover and management factor(C-factor) estimation using remote sensing approaches for tropical regions[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, 7(4): 325-334.
- [13] 吴小影,杨山,尹上岗,等.快速城镇化背景下长三角城镇建设用地群态化特征及演变模式[J].*地理研究*, 2021, 40(7): 1917-1934.
- [14] 雷金睿,陈宗铸,吴庭天,等.1989—2015 年海口城市热环境与景观格局的时空演变及其相互关系[J].*中国环境科学*, 2019, 39(4): 1734-1743.
- [15] 王戈,于强, YANG Di, 等.京津冀城市群生态空间格局变化与地表温度关系研究[J].*农业机械学报*, 2021, 52(1): 209-218.
- [16] 李序颖,顾岚.空间自回归模型及其估计[J].*统计研究*, 2004, 21(6): 48-51.
- [17] F. Dormann C, M. McPherson J, B. Araújo M, et al. Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review[J]. *Ecography*, 2007, 30(5): 609-628.
- [18] 沈中健,曾坚,梁晨.闽南三市绿地景观格局与地表温度的空间关系[J].*生态学杂志*, 2020, 39(4): 1309-1317.
- [19] Papadopoulos N T, Katsoyannos B I, Nestle D. Spatial autocorrelation analysis of a *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) adult population in a mixed deciduous fruit orchard in northern Greece[J]. *Environmental Entomology*, 2003, 32(2): 319-326.
- [20] Peakall R, Ruibal M, Lindenmayer D B. Spatial autocorrelation analysis offers new insights into gene flow in the Australian bush rat, *Rattus fuscipes*[J]. *Evolution*, 2003, 57(5): 1182-1195.
- [21] 李晶,周自翔.延河流域景观格局与生态水文过程分析[J].*地理学报*, 2014, 69(7): 933-944.
- [22] 宋敏敏,张青峰,吴发启,等.基于 NDVI 的延河流域时空演变分析[J].*水土保持研究*, 2017, 24(4): 6-11.
- [23] 廖凯涛,胡建民,宋月君,等.南方红壤丘陵区流域植被景观格局变化及水沙响应关系[J].*水土保持学报*, 2019, 33(3): 36-42.