

黄河中游河龙区间侵蚀产沙对景观特征的非线性响应

黄 萱¹, 丁继辉¹, 邹钰文¹, 王 玥¹, 余冬立^{1,2}

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 211100;

2. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为明确退耕还林(草)工程期间景观特征变化对侵蚀产沙过程的非线性影响机制, 以 2006—2016 年黄河流域河龙区间 33 个水文站控制子流域为研究对象, 采用增强回归树方法分析了河龙区间子流域产沙模数时空差异的景观驱动因子, 定量评价了各景观特征与产沙模数的非线性关系。结果表明, 林地和耕地面积比例对产沙模数变异贡献最大, 分别贡献 22.0% 和 16.9% 的变异; 林地面积的增加和耕地面积的减少可以减少产沙模数, 但当林地面积 > 15%, 耕地面积 < 20% 时, 对产沙模数的影响减弱; 增加林地和草地的植被覆盖度对水土流失的减缓作用也存在阈值, 草地和林地植被覆盖度的阈值分别为 0.5 和 0.3, 当超过该阈值后, 其对侵蚀产沙过程的减缓作用趋于弱化; 适当减少边界密度数量有利于控制流域土壤侵蚀, 当边界密度 < 60 m/100 hm² 时, 边界密度对产沙模数影响不大, 当超过阈值后, 产沙模数随着边界密度的增加急剧增大。当边界密度维持在 60 m/100 hm² 之内时, 可以达到适宜的水土流失防治效果。研究结果揭示了河龙区间流域尺度上景观因子对侵蚀产沙过程的阈值效应, 可以为黄河流域植被合理恢复提供重要参考。

关键词: 黄河中游多沙粗沙区; 产沙模数; 景观指数; 增强回归树; 阈值

中图分类号: P931.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0088-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.013

Nonlinear Responses of Sediment Yield Modulus to Watershed Landscape Characteristics in Hekouzhen Longmen Section of the Middle Reaches of Yellow River

HUANG Xuan¹, DING Jihui¹, ZOU Yuwen¹, WANG Yue¹, SHE Dongli^{1,2}

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: To clarify the non-linear influence mechanism of landscape feature on the sediment yield during the “Grain for Green” project, our study selected 33 hydrological station-controlled sub-basins in the in Hekouzhen Longmen Section of the middle reaches of Yellow River during 2006—2016. We used the boosting regression tree method to analyze the non-linear relationships between landscape drivers and sediment yield modulus of the selected sub-basin. The results showed that the proportion of forest and agricultural land contributed the most to the variation of the sediment yield modulus, which contributing 22.0% and 16.9% respectively. Increasing the proportion of forest land or decreasing the proportion of agricultural land can reduce the sediment yield modulus, but when the proportion of forest land area exceeds 15% or the agricultural land area is less than 20%, the increasing rate of sediment yield modulus becomes stable. Increasing the vegetation coverage of forest land and grass land also has a threshold for mitigating soil erosion, and the threshold value of normalized difference vegetation index (NDVI) in grass land and forest land is 0.5 and 0.3 respectively. When the NDVI value below the threshold, the sediment yield modulus decreases rapidly with increase in NDVI, but the effect of vegetation improvement in grass land and forest land on sediment yield modulus is stable when exceeded the thresholds. Reducing the number of edge density (ED) appropriately is conducive

收稿日期: 2021-07-24

资助项目: 中国科学院“西部之光”计划项目; 国家自然科学基金青年项目(42007053)

第一作者: 黄萱(1992—), 女, 讲师, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: xuan@hhu.edu.cn

通信作者: 余冬立(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农田水土过程与侵蚀控制研究。E-mail: shedongli@hhu.edu.cn

to controlling soil erosion, when the ED maintained at 60/100 hectares can achieve the prevention and control of soil erosion effect. The research reveals the non-linear relationships between landscape characteristics and sediment yield at watershed scale, which can provide an important reference for the reasonable vegetation restoration in the Yellow River.

Keywords: the middle reaches of the Yellow River; sediment yield modulus; landscape metrics; boosting regression tree; threshold

流域侵蚀产沙过程取决于降雨、地形、土壤等因素外,与流域景观时空格局也密切相关^[1-2]。但由于景观要素的空间变异及其格局的复杂性,景观因子对流域侵蚀产沙的作用不是简单的线性叠加^[3-4],而是具有高度非线性的复杂系统^[5],研究流域侵蚀产沙过程与景观因子的非线性关系对阐明流域土壤侵蚀过程具有重要意义。黄土丘陵沟壑区是我国乃至世界上水土流失最为严重的地区之一,土壤侵蚀模数一般在 5 000~10 000 t/(km²·a),局部地区高达 20 000 t/(km²·a) 以上^[6]。退耕还林(草)工程实施后,黄土高原地区大量耕地转化为林地和草地,各类土地利用结构和景观格局发生变化^[7]。此外,黄土高原地区植被的生长状况也有较大改变,草地和林地的 NDVI 值呈显著增加趋势^[8]。退耕还林(草)以来,黄土高原地区植被覆盖得到极大改善^[9]。黄土高原坡耕地是土壤侵蚀的主要来源,林草地面积增加是土壤强度降低的主要原因^[10]。已有研究^[11]通过在黄土高原小流域建立产沙量和归一化植被指数(NDVI)之间的关系发现,植被覆盖度能显著影响土壤侵蚀产沙过程。近年来,景观格局指数与流域侵蚀产沙过程的研究增多,斑块的空间配置对土壤侵蚀影响显著^[1]。然而,流域侵蚀产沙过程是高度非线性的复杂系统,景观特征变化对侵蚀产沙过程的非线性影响机制仍不明确。为了解决这一问题,最近发展起来的增强回归树方法不仅处理高度相关、噪声污染的数据集,而且还可以用阈值模式拟合变量间复杂的非线性关系^[12-13]。本研究以 2006—2016 年黄河流域河龙区间 33 个水文站控制子流域为研究对象,采用增强回归树方法分析了河龙区间子流域产沙模数的时空差异及其景观驱动因子,定量评价了各景观因子的贡献份额,并探讨了景观特征与产沙模数的非线性关系,旨在为黄河流域植被合理恢复提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河中游多沙粗沙区由河口镇到龙门区间(河龙区间)支流以及泾河支流马莲河等流域构成,绝大部分处于河龙区间(图 1)。由于区间黄土层深厚,土质疏松,地形破碎,起伏较大,以黄土丘陵沟壑侵蚀地貌为主,该区域是黄河>0.1 mm 粗泥沙的集中来源地

区^[14]。地表组成物质抗蚀性、抗冲性差,易遭侵蚀,风沙堆积与土壤侵蚀在年内交互进行且相互促进,水土流失十分强烈。

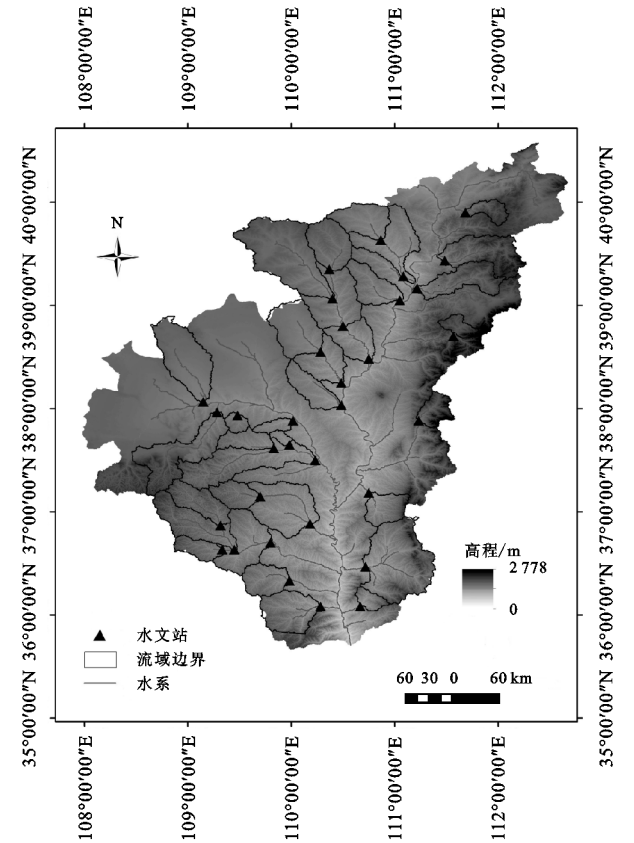


图 1 研究区地理位置

河龙区间地理位置在 35°25′02″—40°39′22″N, 107°13′48″—112°53′49″E, 海拔 1 100~1 500 m。地处吕梁山以西、北洛河以东,西北至鄂尔多斯高原,西南与白于山、崂山、黄龙山为邻,面积约为 11.3 万 km²(图 1)。研究区属于干旱半干旱气候,四季明显,年均气温 6~14℃,多年平均降水量 300~580 mm,由东南向西北递减。河龙区间植被以草原为主,从东南森林草原向西北荒漠草原过渡。本研究根据流域设站及其水文监测记录连续情况,选择区间主要水系中 33 个水文站控制流域作为样本开展研究(表 1),各个流域地理位置见图 1。

1.2 基础数据收集与处理

流域景观特征变量主要有土地利用组成变量包括耕地面积比例(X1)、林地面积比例(X2)、草地面积比例(X3)、水域面积比例(X4)、城镇面积比例(X5)

和荒地面积比例(X6);植被覆盖度变量包括林地植被覆盖度(X7)和草地植被覆盖度(X8);景观格局变量包括斑块密度(X9)、最大斑块指数(X10)、边界密度(X11)、景观形状指数(X12)、平均斑块面积(X13)、蔓延度(X14)、散布与并列指数(X15)、斑块连通度指数(X16)、香农多样性指数(X17)和聚集度指数(X18)在内的 18 个景观指数。其中黄土高原河龙区间 2005 年、2010 年和 2015 年土地利用数据以

Landsat-TM 遥感数据为信息源,通过目视解译获得,分辨率 30 m。林地和草地植被覆盖度数据为 NDVI,采用 Landsat 影像,通过在 Google Earth Engine 平台上传解译后的土地利用数据和流域边界,利用最大合成法获得各水文站点控制的子流域的逐年林地 NDVI 和草地 NDVI。各水文站点控制的子流域的景观指数通过景观格局分析软件包 Fragstats 4.2 计算获得^[15]。

表 1 黄河中游多沙粗沙区主要水系、子流域及其水文站

编号	水系—子流域	水文站	编号	水系—子流域	水文站	编号	水系—子流域	水文站
1	黄河—清水川	清水河	12	黄河—秃尾河	高家堡	23	无定河—岔巴沟	曹坪
2	黄河—偏关河	偏关	13	黄河—秃尾河	高家川	24	黄河—清涧河	子长
3	黄河—纳林川	沙圪堵	14	黄河—芦佳河	申家湾	25	黄河—清涧河	延川
4	皇甫川—皇甫川	皇甫	15	黄河—北川河	圪洞	26	黄河—昕水河	大宁
5	县川河—县川河	旧县	16	黄河—屈产河	裴沟	27	黄河—延河	安塞
6	黄河—孤山川河	高石崖	17	无定河—海流兔河	韩家峁	28	黄河—延河	延安
7	岚漪河—东川河	岢岚	18	无定河—芦河	横山	29	黄河—延河	甘谷驿
8	窟野河—窟野河	王道恒塔	19	无定河—黑木头川	殿市	30	黄河—延河	枣园
9	窟野河—窟野河	神木	20	无定河—马湖峪河	马湖峪	31	黄河—汾川河	临镇
10	窟野河—窟野河	温家川	21	无定河—大理河	绥德	32	黄河—仕望川	大村
11	窟野河—特牛川	新庙	22	无定河—小理河	李家河	33	州川河—州川河	吉县

采用表 1 所列的 33 个水文站 2006—2016 年共 11 年实测日径流数据和日输沙数据。数据来自河海大学馆藏,在使用过程中,对数据进行核查以确保数据的正确性。

1.3 分析方法

增强回归树方法结合统计和机器学习技术,通过建立大量相对简单的决策树来优化预测性能。增强回归树的优势在于无需进行数据转换即可处理不同类型的解释变量和缺失数据,可以有效地拟合复杂非线性关系,并自动对变量之间交互作用进行建模,克服模型多重共线性问题,并防止过拟合^[12-13]。

增强回归树模型结果可以提供每个解释变量的相对重要性,用来评估每个预测变量对最终模型的贡献,并进行缩放,使得总和达到 100%^[13]。此外,增强回归树模型可以计算每个变量的边际效应,每个预测变量的边际效应是通过依赖函数计算得到,在考虑模型中其余预测变量的平均影响后评估预测变量对响应变量之间的非线性关系^[12]。

增强回归树分析是在程序 R 中使用“gbm”包运行的。模型性能由学习效率、分割比例、决策树复杂度和交叉验证决定^[12]。每棵树对生长模型的贡献由学习率控制,每一步用于模型构建的数据比例由袋子分数决定。树复杂度表示树中节点的数量,并在增强回归树模型中调节交互水平。交叉验证方法确定了增强回归树模型中的最佳树数量^[12]。通过反复试错,本研究最优增强回归树模型的学习率为 0.005,袋

子分数为 0.5,树复杂度为 5,交叉验证为 10 倍。采用 80%的数据来训练增强回归树模型,20%的数据用于准样本外模型测试。

2 结果与分析

2.1 产流产沙时空分布特征

黄土高原河龙区间子流域产沙模数 2006—2016 年动态变化见图 2。产沙模数总体上呈波动趋势,年内差异大。结果分析表明,2006 年、2012 年、2013 年子流域产沙模数均值大且在空间上存在较大差异。其中 2006 年流域平均产沙模数最大,达到 2 073.6 t/km²,位于皇甫川流域的沙圪堵小流域产沙模数达到 16 377.8 t/km²,同年位于秃尾河的高家川小流域产沙模数仅为 3.1 t/km²,这可能与该年份降雨量大有关。不同流域由于土壤、地形、景观等特征差异大,流域侵蚀产沙过程对降雨过程的响应各异。

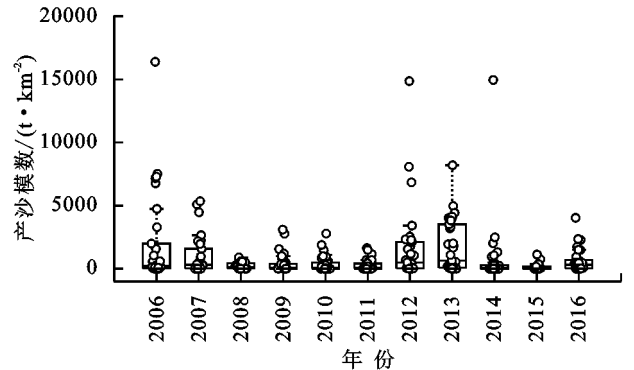


图 2 2006—2016 年黄河中游多沙粗沙区子流域产沙模数动态变化

分别统计了研究区内各子流域 2006—2016 年产沙模数(表 2),位于皇甫川流域的沙圪堵小流域平均产沙模数最大,为 3 424.8 t/km²,皇甫川流域泥沙主要来自沙圪堵以上,流域属于黄土丘陵沟壑区,区内分布大量砒砂岩,抗蚀能力低,皇甫川流域是黄河中游多沙粗沙区的一条主要支流,在河龙区间诸多支流中来沙组成最粗^[16]。位于延河的枣园、安塞、延安、甘谷驿等小流域产沙模数也较高,分别为 1 646.2, 1 429.1,1 232.6,855.1 t/km²。延河流域大部分分布在黄土丘陵沟壑区,且延河流域多年平均降水量超过

500 mm,多阵雨且具有强度大、来势猛的特点。尽管延河流域近年来植被生长状况呈现改善趋势,植被覆盖较好,但总体来看,延河流域产沙模数仍然较高。研究区西北方向的窟野河流域产沙模数值相对较小,王道恒塔、温家川、神木小流域产沙模数分别为 22.4, 146.1,170.4 t/km²。

各子流域产沙模数的变异系数各异,特别是位于研究区西南方向的临镇和大村,变异系数分别达到 256.5%和 239.1%,表明这些流域不同年份间产沙模数差异较大。

表 2 黄河中游多沙粗沙区各子流域产沙模数统计描述

水文站	平均值/ (t·km ⁻²)	变异 系数/%	水文站	平均值/ (t·km ⁻²)	变异 系数/%	水文站	平均值/ (t·km ⁻²)	变异 系数/%
清水河	114.5	157.1	高家堡	103.4	79.4	曹坪	1273.0	171.4
偏关	637.8	140.5	高家川	329.3	150.0	子长	1676.6	120.5
沙圪堵	3424.8	151.1	申家湾	2328.7	182.4	延川	1337.3	120.2
皇甫	1995.9	132.3	圪洞	123.3	152.3	大宁	198.5	164.8
旧县	183.5	121.4	裴沟	931.6	124.3	安塞	1429.1	70.3
高石崖	458.4	136.2	韩家峁	25.5	172.5	延安	1232.6	88.4
岢岚	37.5	104.5	横山	61.2	184.2	甘谷驿	855.1	137.9
王道恒塔	22.4	155.8	殿市	1205.2	124.7	枣园	1642.2	140.9
神木	170.4	104.8	马湖峪	2284.9	192.8	临镇	440.4	256.5
温家川	146.1	112.7	绥德	170.4	104.8	大村	258.6	239.1
新庙	392.4	171.6	李家河	2737.5	70.1	吉县	15.5	145.2

2.2 流域景观特征描述性统计

从表 3 可以看出,用于分析的研究区内 33 个子流域的景观格局特征变化明显,相差较大。土地利用组成中林地面积比例变异系数相对耕地和草地面积比例变异系数较大,整个研究区耕地面积比例占比平均值为 28.5%,林地和草地面积比例占比平均值分别为 14.0%和 50.0%。植被覆盖度指标中,林地平均植被覆盖度为 74.0%,略高于草地植被覆盖度的 70.3%,两者变异系数分别为 32.8%和 32.4%。景观指数中最大斑块指数、景观形状指数、散布与并列指数、平均斑块面积和边界密度的变异系数较大,分别为 89.3%,50.6%,90.9%和 74.2%,表现出比其他景观指数更明显的变异。相比之下,斑块连通度指数、聚集度指数和蔓延度指数的变异系数相对较小,分别为 0.1%,2.7%和 6.5%。

研究区选取的景观格局指数中许多指数之间均为高度相关。土地利用变化是一个典型的共线性问题,一种类型增加,必然导致另外一种或几种减少。由于面积和边界类型的指数,如斑块密度、最大斑块指数、边界密度、平均斑块面积等均为景观指数中最基本的指数,它们与许多其他类型的景观指数均有相关关系。表 4 列出了用于本研究增强回归树分析不同景观格局指数的皮尔逊相关系数,例如,边界密度

和聚集度指数、斑块密度和平均斑块面积、蔓延度和香农多样性指数之间的相关性系数均达到极显著水平($P<0.01$)。

表 3 景观指数统计描述

景观 指数	最小值	最大值	平均值	变异 系数/%
耕地面积比例/%	4.4	57.2	28.5	60.5
林地面积比例/%	0.5	64.4	14.0	103.0
草地面积比例/%	12.0	71.3	50.0	25.6
水域面积比例/%	0	3.5	0.7	133.2
城镇面积比例/%	0	11.0	1.5	144.7
荒地面积比例/%	0	46.3	5.2	216.3
林地植被覆盖度	16.8	42.1	74.0	32.8
草地植被覆盖度	10.2	35.1	70.3	32.4
斑块密度/(n·100 hm ⁻²)	0.3	1.3	0.8	30.8
最大斑块指数/%	5.3	62.7	28.7	50.6
边界密度/(m·100 hm ⁻²)	24.0	78.0	49.4	34.1
景观形状指数	21.4	134.7	53.8	47.9
平均斑块面积/hm ²	76.1	396.6	147.7	36.2
蔓延度/%	52.5	68.1	61.7	6.5
散布与并列指数/%	5.8	75.4	40.2	47.9
斑块连通度指数	99.2	99.9	99.7	0.1
香农多样性指数	0.7	1.3	1.0	15.7
聚集度指数/%	88.2	96.4	92.6	2.7

表 4 流域景观格局因子之间的相关关系

景观格局因子	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18
X9		0.11	0.63**	0.29**	-0.89	-0.31	-0.30**	-0.18**	-0.09	-0.63**
X10			0.07	-0.12	-0.18	0.46	-0.24**	0.67**	-0.51**	-0.08
X11				0.38**	-0.59**	-0.05	-0.82**	-0.09	-0.55**	-1.00**
X12					-0.33**	-0.18**	-0.16**	0.34**	0.09	-0.38**
X13						0.28**	0.23**	0.06	0.07	0.59**
X14							-0.35**	0.47**	-0.69**	0.04
X15								-0.12	0.78**	0.82**
X16									-0.28**	0.09
X17										0.55**
X18										

注：* * 表示显著性关系水平达 $P<0.01$ 。

2.3 产沙模数时空变化景观驱动因子分析

利用增强回归树方法分析了景观因子(土地利用类型比例、植被覆盖度、景观因子)对产沙模数的影响(图 3)。结果表明,林地面积比例(X2)对产沙模数影响最大,与产沙模数大小呈极显著负相关($P<0.001$),决定其变异的 22.0%。相反,耕地面积比例(X1)和产沙模数呈正相关关系,贡献 16.9%的变异。边界密度(X11)是斑块类型水平指数,代表单位面积上的斑块边界数量,对产沙模数的贡献率为 11.4%。其他景观因子对黄土高原粗沙区产沙模数的贡献率由大到小为草地植被覆盖度(X8)(9.0%)>城镇面积比例(X5)(7.0%)>林地植被覆盖度(X7)(4.8%)。

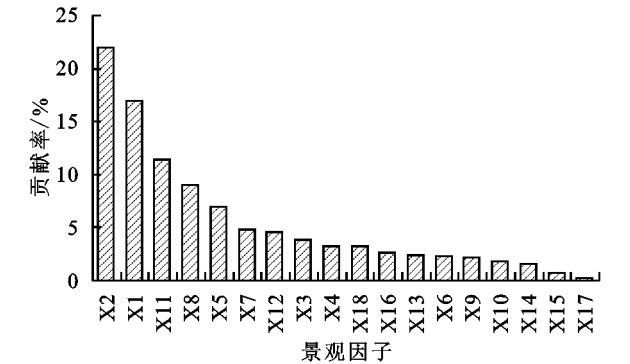


图 3 景观因子对产沙模数的贡献率

边际效应能够反映产沙模数与各景观因子间的非线性变化关系。由图 4 可以看出,林地面积比例对产沙模数的影响总体上呈负相关,当林地面积比例在 15%以下,产沙模数随林地面积比例增大呈指数下降趋势,但当林地面积比例超过 15%的阈值时,增大林地面积比例对减缓该区水土流失的功能趋于减弱。农地面积比例越大,产沙模数也相应增大,当农地面积约小于 20%时,农地面积增大产沙模数基本不变,当农地面积比例在 20%~45%条件下,产沙模数随之缓慢增加,而当农地面积>45%时,产沙模数呈指数倍增加。城镇面积比例越大,产沙模数则越小。产

沙模数随草地和林地植被覆盖度的增加而减少,当草地的植被覆盖度<0.5 时,产沙模数与植被覆盖度呈反比,当草地植被覆盖度>0.5 时,继续提高草地的植被覆盖度对产沙模数影响较小。林地植被覆盖度对产沙模数的影响与草地植被覆盖度相似,在 0.3 的阈值之内,林地的植被覆盖度越高,产沙模数越小,但当林地植被覆盖度>0.3 的阈值时,对产沙模数的影响降低。当边界密度<60 m/100 hm²时,边界密度对产沙模数影响不大,当超过阈值后,产沙模数随边界密度的增加急剧增大。

3 讨论

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区,为了治理该区严重的水土流失,国家在该区实施了一系列生态工程,特别是 1999 年开始实施的退耕还林(草)工程,对水土流失控制、生态环境改善等均取得显著成效^[17]。退耕还林(草)工程不仅改变黄土高原的土地利用结构,改善植被覆盖度,也进一步影响植被景观格局^[18]。本研究以黄河流域中游河龙区间 33 个子流域为研究对象,系统地分析流域景观特征与产沙模数之间的非线性关系,为深入认识黄土高原林草植被变化对流域产沙的调控机制提供视角。

景观特征对流域侵蚀产沙过程的影响已有大量研究^[19-20]成果,本文参考前人研究选取土地利用组成、植被覆盖度和景观格局水平的 18 个指数计算分析,通过增强回归树方法系统分析不同景观因子和产沙模数的非线性关系。结果表明,当林地面积比例>15%、耕地面积比例<20%时,两者面积比例对产沙模数的影响减弱。植被覆盖度的增加可以增强降雨的截留作用,降低雨滴动能,减弱降雨侵蚀力,改进土壤团聚体稳定性和渗透,从而减少土壤流失^[10]。在黄土高原河龙区间,当林地植被覆盖度>0.5、草地植被覆盖度>0.3时,继续增加林草地的植被覆盖度对产沙模数影响较小。已有研究^[21]表明,黄土高原植

被覆盖度对土壤侵蚀同样存在阈值效应,当植被覆盖度在 60%~70% 的范围内可以有效减少坡面产沙,造成差异的主要原因是因为土壤侵蚀过程存在尺度依赖性,不同尺度的主导因素不同。

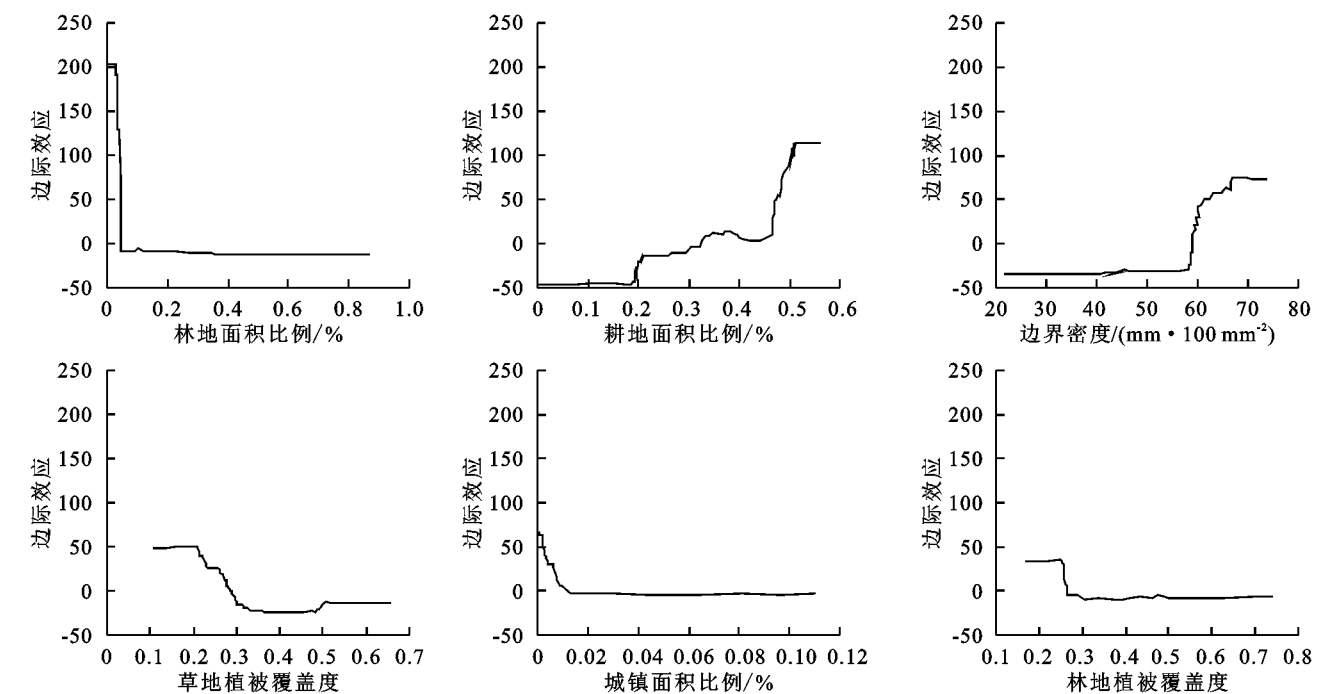


图4 景观因子对产沙模数的边际效应

在景观格局层面,产沙模数与边界密度呈正相关。根据边界密度的定义,当许多小块土地覆盖类型占据流域时,边界密度将增加,边界密度反映景观破碎化的程度^[19],斑块边缘常常是水土流失的引发或严重之处^[1];同时,高度分散的森林和草地斑块可能无法有效地增加渗透并减少地表径流和侵蚀。水土保持功能存在明显差异斑块类型间的边界是造成流域斑块间连通性增加,进而侵蚀产沙加剧的原因。因此,当流域边界密度维持在适度的范围时,可以有效控制流域侵蚀产沙^[19]。分析流域产沙与景观特征的非线性关系,定量识别可基本遏制流域产沙的林草覆盖度阈值,提出合理的土地利用组成和景观配置,可以为黄土高原粗沙区后续退耕还林还草工程规划和实现高效水土流失防治目标提供科学支撑。

4 结论

(1)河龙区间子流域在研究期内(2006—2016年)产沙模数时空差异大,其中2006年流域平均产沙模数最大,达到2 073.6 t/km²;位于皇甫川流域的沙圪堵小流域产沙模数达到16 377.8 t/km²,同年位于秃尾河的高家川小流域产沙模数仅为3.1 t/km²,不同子流域侵蚀产沙过程对降雨过程的响应各异。

(2)林地和耕地面积比例和产沙模数大小呈极显著负相关,两者对产沙模数变异贡献最大,分别贡献22.0%和16.9%的变异。其他景观因子对黄河流域粗沙区的贡献率由大到小为边界密度(11.4%)>草

地植被覆盖度(9.0%)>城镇面积比例(7.0%)>林地植被覆盖度(4.8%)。

(3)当林地面积>15%、耕地面积<20%时,两者对产沙模数的影响减弱。林地植被覆盖度>0.5和草地植被覆盖度>0.3时,两者对水土流失的减缓作用减弱。适当减少边界密度有利于控制流域土壤侵蚀,当边界密度维持在60 m/100 hm²时,可以达到适宜的水土流失防治效果。

参考文献:

[1] 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[J].生态学报,2011,31(1):267-275.

[2] 傅伯杰.地理学综合研究的途径与方法:格局与过程耦合[J].地理学报,2014,69(8):1052-1059.

[3] 史志华,王玲,刘前进,等.土壤侵蚀:从综合治理到生态调控[J].中国科学院院刊,2018,33(2):198-205.

[4] de Vente J, Poesen J, Verstraeten G, et al. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand? [J].Earth-Science Review,2013,127:16-29.

[5] 刘晓燕,党素珍,高云飞,等.黄土丘陵沟壑区林草变化对流域产沙影响的规律及阈值[J].水利学报,2020,51(5):505-518.

[6] 高照良,付艳玲,张建军,等.近50年黄河中游流域水沙过程及对退耕的响应[J].农业工程学报,2013,29(6):99-105.

[7] 冯舒,赵文武,陈利顶,等.2010年来黄土高原景观生态研究进展[J].生态学报,2017,37(12):3957-3966.

- [8] 赵安周,张安兵,刘海新等.退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J].自然资源学报,2017,32(3):449-460.
- [9] 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.
- [10] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
- [11] Ouyang W, Hao F H, Skidmore A K, et al. Soil erosion and sediment yield and their relationships with vegetation cover in upper stream of the Yellow River[J].Science of the Total Environment,2010,409:396-403.
- [12] Wang L, Huang X, Fang N F, et al. Selective transport of soil organic and inorganic carbon in eroded sediment in response to raindrop sizes and inflow rates in rainstorms[J].Journal of Hydrology,2019,575:42-53.
- [13] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].水利水电技术,2020,51(1):1-11.
- [14] Lamine S, Petropoulos G P, Singh S K, et al. Quantifying land use/land cover spatio-temporal landscape pattern dynamics from Hyperion using SVMs classifier and FRAGSTATS ©[J].Geocarto International,2018,33(8):862-878.
- [15] 高玄娜,肖培青,张攀,等.复合侵蚀作用下砒砂岩坡面侵蚀泥沙颗粒特征[J].水土保持学报,2021,35(1):44-49.
- [16] 山仑,徐炳成.新时期黄土高原退耕还林(草)有关问题探讨[J].水土保持通报,2020,39(6):295-297.
- [17] Zhao G J, Mu X M, Wen Z, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China[J].Land Degradation and Development,2013,24:499-510.
- [18] 刘宇.景观指数耦合景观格局与土壤侵蚀的有效性[J].生态学报,2017,37(15):4923-4935.
- [19] Zhou Z X, Li J. The correlation analysis on the landscape pattern index and hydrological processes in the Yanhe watershed, China[J].Journal of Hydrology,2015,524:417-426.
- [20] Shi Z H, Ai L, Li X, et al. Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds[J].Journal of Hydrology,2013,498:165-176.
- [21] Liu J B, Gao G Y, Wang S, et al. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics[J].Journal of Geographical Sciences,2018,28:59-78.

(上接第 87 页)

- [12] Ji X D, Cong X, Dai X Q, et al. Studying the mechanical properties of the soil-root interface using the pull-out test method[J].Journal of Mountain Science,2018,15(4):882-893.
- [13] 郑力文,刘小光,陈丽华,等.油松根系直径对根—土界面摩擦性能的影响[J].北京林业大学学报,2014,36(3):90-94.
- [14] 赵东晖,冀晓东,张晓,等.冀西北地区白桦根系—土壤界面摩擦性能[J].农业工程学报,2021,37(3):124-131.
- [15] 刘亚斌,余冬梅,胡夏嵩,等.黄土区灌木柠条锦鸡儿根—土间摩擦力学机制试验研究[J].农业工程学报,2017,33(10):198-205.
- [16] 张兴玲,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原东北部黄土区护坡灌木柠条锦鸡儿根系拉拔摩擦试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增刊 2):3739-3745.
- [17] 管世烽,夏振尧,张伦,等.水平荷载作用下多花木蓝根系拉拔试验研究[J].长江科学院院报,2016,33(6):24-28.
- [18] 蒋明镜,朱云刚.重塑黄土与植物根系界面摩擦离散元分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(2):210-215,221.
- [19] 邢会文,刘静,王林和,等.柠条、沙柳根与土及土与土界面摩擦特性[J].摩擦学学报,2010,30(1):87-91.
- [20] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍.根系与土体接触面相互作用特性试验[J].中国水土保持科学,2006,4(2):62-65.
- [21] 朱宏慧.4 类土根—土界面摩阻特性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [22] 夏振尧,刘琦,许文年,等.多花木蓝根系与土体界面摩阻特征[J].水土保持学报,2018,32(1):128-134.
- [23] 胡宁,刘静,姚喜军,等.快剪条件下柠条根对 3 种土壤土工特性的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):106-111.
- [24] 栗岳洲,付江涛,胡夏嵩,等.土体粒径对盐生植物根—土复合体抗剪强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):403-412.