

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.008.

赵彦博, 赵广举, 穆兴民, 等. 渭河流域植被变化调控输沙的覆盖度阈值[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 96-102, 108.

Zhao Yanbo, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Influence and Threshold of Vegetation Change on Sediment Load in the Weihe River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 96-102, 108.

渭河流域植被变化调控输沙的覆盖度阈值

赵彦博¹, 赵广举^{1,2}, 穆兴民¹, 田鹏², 耿韧², 毕博²

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2.南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029)

摘要: [目的] 分析渭河流域植被覆盖度时空变化特征, 探究流域尺度下植被覆盖度与输沙模数相关关系, 揭示渭河输沙量变化背景下基于减沙效益的植被覆盖度阈值。 [方法] 选取黄河一级支流渭河流域为研究对象, 采用一元线性回归法、F 检验与分段线性回归方法分析了渭河流域植被变化, 量化植被对输沙量的调控作用, 识别了渭河流域植被的输沙调控阈值。 [结果] 2000—2019 年渭河流域植被覆盖度整体呈显著增加趋势, 年均植被覆盖度增长率为 0.005 5/a; 研究区年均输沙模数呈北高南低的空间分布, 除沮河外整体随时间变化呈降低趋势, 主要产沙区位于马莲河上游、洛河上游所处黄土丘陵沟壑区; 输沙模数随植被覆盖度增加而减少, 呈负相关的指数关系, 植被覆盖度达 45% 时可有效遏制流域输沙; 渭河流域植被覆盖度依据其减沙效率可划分为 4 个覆盖度区间: 低覆盖度区间 (0~20%)、过渡覆盖度区间 (20%~45%)、高覆盖度区间 (45%~70%) 与极高覆盖度区间 (70%~100%), 随着覆盖度提升, 植被减沙效率逐级降低, 极高覆盖度区间植被减沙效率仅为低覆盖度区间与过渡覆盖度区间的 1.9% 和 6.0%。 [结论] 黄土高原未来植被恢复不仅要考虑植被覆盖度阈值在不同区域的差异性, 同时需兼顾植被恢复的结构、功能, 提升区域植被生态系统的多样性、稳定性。

关键词: 渭河流域; NDVI; 植被覆盖度阈值; 输沙量

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0096-07

Influence and Threshold of Vegetation Change on Sediment Load in the Weihe River Basin

Zhao Yanbo¹, Zhao Guangju^{1,2}, Mu Xingmin¹, Tian Peng², Geng Ren², Bi Bo²

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. National Key Laboratory of Water
Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to analyze the spatiotemporal variation characteristics of vegetation coverage in the Weihe River Basin, to explore the correlation between vegetation coverage and sediment yield at the watershed scale, and to reveal the threshold of vegetation coverage based on sediment reduction benefits under the background of sediment load changes in the Weihe River. [Methods] The Weihe River Basin, a first-level tributary of the Yellow River, was selected. The vegetation change was analyzed, and the regulation effect of vegetation on sediment transport in the Weihe River Basin was quantified by using linear regression, F-test and piecewise linear regression. [Results] The vegetation coverage of Weihe River Basin showed a significant increasing trend from 2000 to 2019, and the average annual vegetation coverage growth rate was 0.005 5/a. The average annual sediment yield in the study area was higher in the north and lower in the south, and showed a decreasing trend except Juhe River. The main sediment source area was

收稿日期: 2023-12-20

修回日期: 2024-02-18

资助项目: 国家自然科学基金 (U2243211; 42177323; 42077076)

第一作者: 赵彦博 (2000—), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: zyb15835666218@nwafu.edu.cn

通信作者: 赵广举 (1980—), 男, 河南驻马店人, 博士, 研究员, 主要从事流域水沙过程研究。E-mail: gjzhao@nhri.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

located in the upper reaches of Malian River and Beiluo River in the loess hilly and gully region. The sediment yield decreased with the increase of vegetation coverage, showing a negative exponential correlation, when the vegetation coverage reached to 45%, it could effectively control sediment load in the watershed. Vegetation coverage in Weihe River Basin could be divided into four coverage zones: low coverage zone (0~20%), transition coverage zone (20%~45%), high coverage zone (45%~70%) and very high coverage zone (70%~100%). The vegetation sediment reduction efficiency decreased stepwise with the increase of the coverage zone, and the vegetation sediment reduction efficiency in the very high coverage zone was only 1.9% and 6.0% of that in the low coverage zone and transition coverage zone. [Conclusion] The future vegetation restoration of the Loess Plateau should not only consider the difference of threshold of vegetation coverage in different regions, but also take into account the structure and function of vegetation restoration, so as to improve the diversity and stability of regional vegetation ecosystem.

Keywords: Weihe River Basin; NDVI; vegetation threshold; sediment loads

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,在调节区域气候,调控径流泥沙,稳定生态系统方面有不可替代的作用,同时也是区域生态环境指示性指标之一^[1-2]。植被在不同程度上影响着土壤颗粒分离,泥沙起动、沉积等土壤侵蚀过程。植被冠层及枯枝落叶能够降低雨滴动能,减少对地表土壤的击溅、植物根系可固结土壤颗粒,增加地表粗糙度,拦蓄地表径流,降低挟沙能力,进而起到减少水土流失的作用^[3]。利用不同的植被指数分析植被变化趋势,并研究其对气候变化及人类活动的响应,揭示植被对土壤侵蚀的影响,明确地表生态系统演变过程机理及其驱动机制,研究结果对提升生态系统服务质量具有重要意义。

黄河是世界上著名的高含沙河流,中游流经的黄土高原是入黄泥沙的主要贡献区。已有研究表明,近年来黄河输沙量锐减接近 90%,大规模的水土保持措施是导致这一现象的主要原因^[4],2000 年之前输沙量降低主要受淤地坝等工程措施影响,而 2000 年之后输沙量减少与大规模植被恢复措施关系密切^[5]。特别是 1999 年开始的退耕还林(草)工程,极大改变了黄土高原土地利用/覆被状况,植被覆盖度已由 1978 年的不足 18%提高至 2018 年的超过 60%^[6]。渭河作为黄河第一大支流,多年平均入黄泥沙达 5.8 亿 t,约占入黄总输沙量的 1/3,进入 21 世纪以来,渭河流域生态环境持续改善,输沙量显著减少,渭河干流咸阳站年均输沙量较 20 世纪 90 年代降低约 50%,而泾河作为入黄泥沙贡献最大的黄河二级支流,其干流张家山站年均输沙量降幅达 60%^[7-8]。

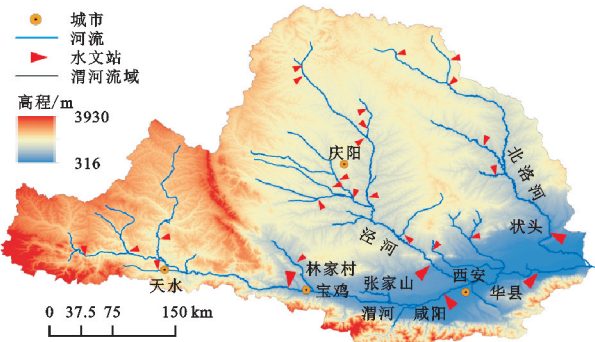
渭河流域近几十年的植被建设大大提升了该区域的植被覆盖度,植被状况显著改善,但流域地处干旱半干旱区,在区域水资源严重不足的背景下,大规

模植被建设不可避免地加剧流域水资源负担,生态需水亏缺、水资源日趋紧张^[9]。侵蚀产沙量是流域水土流失状况的关键指标,研究其与植被覆盖度相关关系对水土保持效益的评价与未来生态建设布局有着重要意义。目前研究多集中于坡面尺度,关注植被对坡面侵蚀产沙影响,而流域尺度下的输沙量与植被覆盖度相关关系研究较少。本研究收集渭河流域 2000—2019 年 NDVI 数据,选取具有代表性的 22 个水文站,分析渭河流域植被变化特征,探求流域植被覆盖度与流域输沙模数相关关系,明确渭河输沙量变化背景下的植被盖度阈值,为渭河流域植被建设与高质量发展提供理论依据。

1 研究区概况

渭河是黄河第一大支流,其发源于甘肃省渭源县鸟鼠山北侧,于陕西省潼关县汇入黄河,干流全长 818 km,渭河流域位于北纬 104°00′—110°20′,东经 33°50′—37°18′,流域面积达 13.5 万 km²。泾河与北洛河是渭河两大支流,其中泾河流域面积 4.54 万 km²,河长 455.1 km,北洛河流域面积 2.7 万 km²,河长 680 km。流域年降水量 400~800 mm,降雨南多北少且集中于夏季,地貌类型主要为黄土高原沟壑区,丘陵沟壑区及关中平原区。流域土壤侵蚀严重,侵蚀类型以水力侵蚀为主,年平均输沙量达 4.31 亿 t。

本文选取渭河林家村、泾河张家山、北洛河状头以上及淳化站、耀县站、千阳站共 22 个支流水文站,总面积达 7.4 万 km²,主要位于黄土高原沟壑区及丘陵沟壑区,是渭河主要产沙区,生态环境脆弱,是黄河中上游水土保持的重点防治区域。淤地坝及水库等沟道工程措施较其他流域少,植被恢复效果明显^[10-11]。研究区概况见图 1。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)4345 号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图 1 渭河流域高程及水文站点分布

Fig. 1 Distribution of elevation and hydrological stations in the Weihe River Basin

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文采用遥感影像数据为归一化植被指数(NDVI),数据来源于 Google Earth Engine 平台提供的 MOD13Q1 数据,该数据已经过几何纠正、辐射校正、大气校正等图像预处理,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,采用最大值合成法,并根据渭河流域边界裁剪得到研究

区 2000—2019 年 NDVI 数据。渭河流域 DEM 数据来源于国家地球系统科学数据共享服务平台—黄土高原科学数据中心(<http://loess.geodata.cn>)。根据渭河流域水文站分布状况,结合流域侵蚀产沙特点、水库、淤地坝及农业灌溉区域分布,选取受上述因素影响较小的水文站控制单元,搜集获取 22 个支流水文站 2000—2019 年输沙资料,数据来源于《中华人民共和国水文年鉴—黄河流域水文资料》,各个站点的基本状况见表 1。

2.2 研究方法

2.2.1 植被覆盖度 采用最大值合成法获取渭河流域 2000—2019 年逐年 NDVI 数据,并使用像元二分法计算流域逐年植被覆盖度。

VC= (NDVI-NDVIsoil) / (NDVIveg-NDVIsoil) (1)

式中:VC 为植被覆盖度;NDVIsoil 为裸土像元的 NDVI 值;NDVIveg 为纯植被像元的 NDVI 值。裸土和纯植被覆盖像元的理论值应分别接近 0 与 1,但由于年内大气状况、植被类型等因素的影响,两者并非定值,在本研究计算过程中,为切合渭河流域年内实际植被情况,NDVIsoil 和 NDVIveg 分别取从小到大累积率为 0.5% 和 99.5% 的像元值。

表 1 水文站概况

Table 1 Information of hydrological stations

河名	水文站名	集水面积/km²	年均输沙模数/(t·km⁻²·a⁻¹)	河名	水文站名	集水面积/km²	年均输沙模数/(t·km⁻²·a⁻¹)
渭河	武山	8080	1273	柔远川	悦乐	528	3804
散渡河	甘谷	2484	2304	三水河	芦村河	1294	449
葫芦河	秦安	9805	630	泾河	杨家坪	14124	907
藉河	天水	1019	956	马莲河	雨落坪	19019	3753
千河	千阳	2935	329	马莲河	贾桥	2988	3839
沮河	耀县	797	351	马莲河	庆阳	10603	4115
冶峪河	淳化	282	104	北洛河	吴旗	3408	2238
泾河	泾川	3145	803	周河	志丹	774	1344
洪河	红河	1307	1144	葫芦河	张村驿	4715	253
蒲河	毛家河	7189	1331	沮河	黄陵	2266	153
马莲河	洪德	4640	5138	北洛河	刘家河	7325	2201

采用一元线性回归方程的斜率表征植被覆盖度年际变化率,斜率变换的计算公式如下:

slope= (n * sum(i * Vi) - sum(i) * sum(Vi)) / (n * sum(i^2) - (sum(i))^2) (2)

式中:n 为监测年数(n=20);i 为监测时序;Vi 为第 i 年植被覆盖度。

采用 F 检验判断趋势显著性,F 检验公式如下:

F= (sum(Li * A)^2 / sum(Vi * Li)^2) / (n-2) (3)

式中:Li 为 i 与变量 Vi 的线性回归值;A 为变量 Vi 的 n 年平均值;本研究中 F 检验回归自由度为 1,残差自由度(n-2)为 18。结合斜率计算结果将植被恢复情况分为 5 类,分别为:极显著减少(slope≤0, p<0.01)、显著减少(slope≤0, p<0.05)、无显著变化(p>0.05)、显著增加(slope>0, p<0.05)与极显著增加(slope>0, p<0.01)。

2.2.2 植被减沙效率 采用植被减沙效率(VSRE)评价植被覆盖度对输沙模数的影响,VSRE 表示流域输沙模数减少量与植被覆盖度增加量的比值,即植被覆盖度每增加 1%,输沙模数相应减少的值。计算公式为:

$$VSRE = \frac{STM_i - STM_j}{VC_i - VC_j} \quad (4)$$

式中:VSRE为植被减沙效率; STM_i 与 STM_j 分别为恢复后期和恢复前期的输沙模数; VC_i 和 VC_j 分别为恢复后期和恢复前期的植被覆盖度。

为了减少降雨及其他气候因素影响,将2000—2019年划分为恢复前期(2000—2009年)与恢复后期(2010—2019年),输沙模数及植被覆盖度都采用两段时期内均值进行函数拟合。通过对拟合方程求导函数得到斜率曲线,其代表植被减沙效率,对此斜率曲线进行分段线性回归,回归从0%开始,以5%为步长,线性回归分析必须满足回归方程的决定系数大于等于0.95($R^2 \geq 0.95$),依据线性回归结果划分阈值带^[12]。

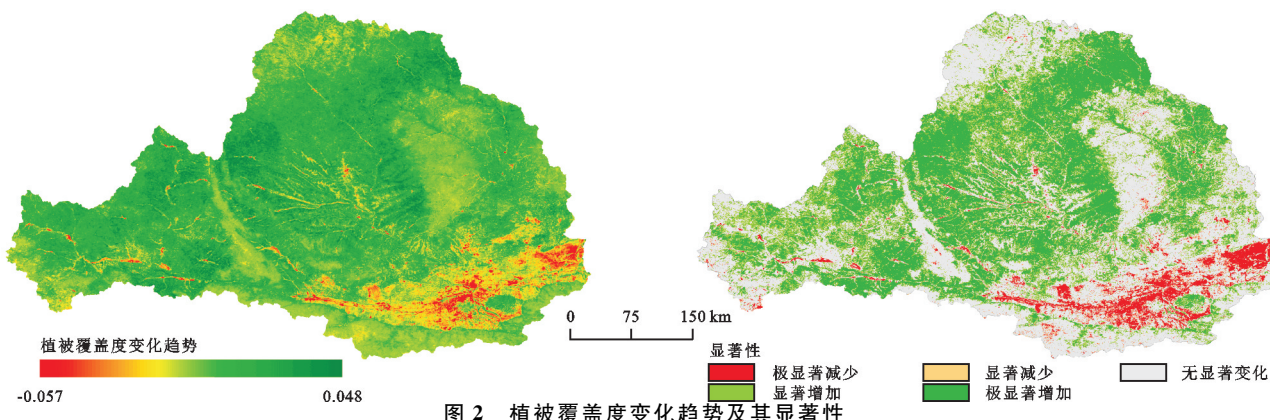


图2 植被覆盖度变化趋势及其显著性

Fig. 2 Trend and significance of vegetation coverage

3.2 输沙模数时空变化特征

对研究区22个水文站年均输沙模数进行对比分析,评估各区间输沙模数阶段性变化情况,结果如图3所示,除黄陵站外研究区各站点输沙模数随时间变化呈下降趋势,输沙模数较高区域位于渭河流域北部,主要集中在马莲河上游(洪德以上),洛河上游(吴旗以上)及柔远川流域(贾桥以上),该区域植被类型主要为稀疏草地,属黄土丘陵沟壑区,植被覆盖度较低,水土流失严重,恢复前期输沙模数均值达3400 t/(km²·a),恢复后期输沙模数均值降至2768.13

3 结果与分析

3.1 渭河流域植被覆盖度年际变化特征

2000—2019年渭河流域植被覆盖度变化趋势如图2所示。流域植被覆盖度增长率为0.0055/a,整体呈显著增长趋势。植被覆盖度呈极显著增加区域主要集中在泾河流域及北洛河中上游,面积达5.1万km²,占渭河流域37.66%;显著增加区域占12.21%,面积为1.4万km²;植被覆盖度无明显变化区域占43.37%,主要集中在马莲河及洛河上游的丘陵沟壑区及关中平原城市群周边,六盘山分水岭及子午岭林区植被覆盖度亦无显著变化;呈减少区域仅占6.75%,主要集中在关中平原城市扩张区。

t/(km²·a),其中洪德以上恢复前期达到6258.62 t/(km²·a),恢复后期降至4016.38 t/(km²·a)。泾河作为渭河水沙的主要来源,其主要支流的输沙模数均有减少,洪河流域恢复后期年均输沙模数较前期降幅达80.9%;在渭河上游,年均输沙模数属甘谷站主控的散渡河流域最大,恢复前期年均输沙模数为3392.3 t/(km²·a),恢复后期输沙模数降至1214.96 t/(km²·a),武山站及秦安站年均输沙模数降幅达33.9%与63.3%。植被覆盖度较高的子午岭与六盘山林区输沙模数较低,年均输沙模数在400 t/(km²·a)以下。

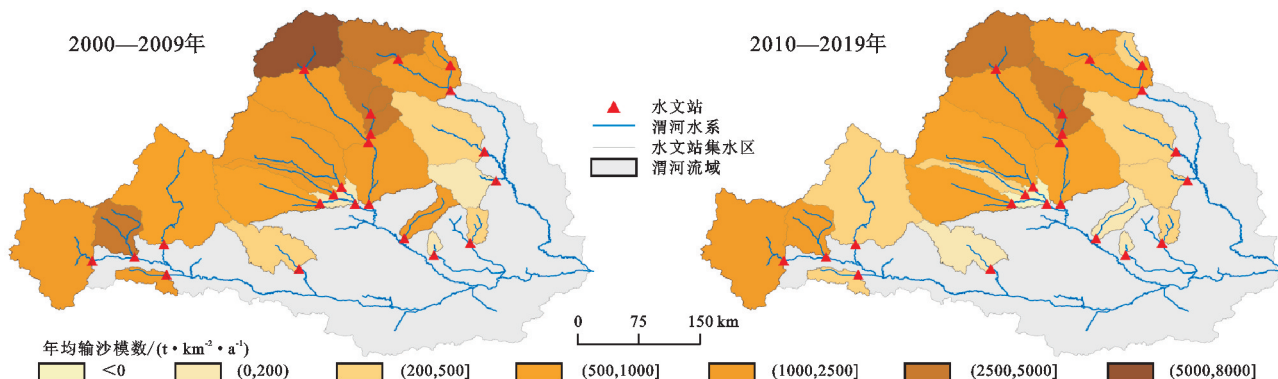


图3 输沙模数时空变化分布

Fig. 3 Spatiotemporal variation distribution of sediment transport modulus

3.3 植被变化对流域输沙影响

图 4 为 22 个水文站控制流域恢复前后期植被覆盖度与其对应输沙模数的回归分析,结果表明植被覆盖度与输沙模数呈显著负相关的指数函数关系($y = 13208e^{-0.053x}$)。植被覆盖度 $< 20\%$ 时,曲线斜率最大,表明植被覆盖度变化对输沙模数的影响较大;植被覆盖度为 $20\% \sim 45\%$ 时,输沙对植被变化的响应有减弱趋势;植被覆盖度为 $45\% \sim 70\%$ 时,植被对输沙模数的影响能力逐渐降低;植被覆盖度 $> 70\%$ 时,随着植被覆盖度增加输沙模数趋于稳定,此时植被覆盖度的增加对输沙模数影响并不明显。

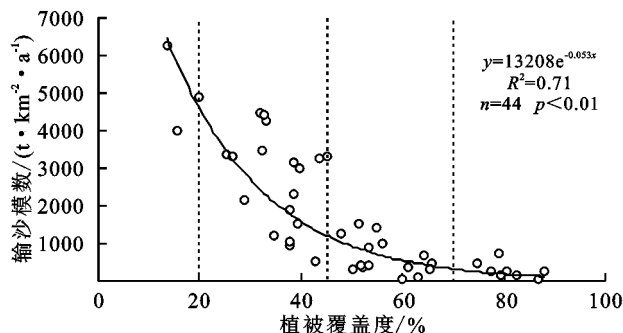
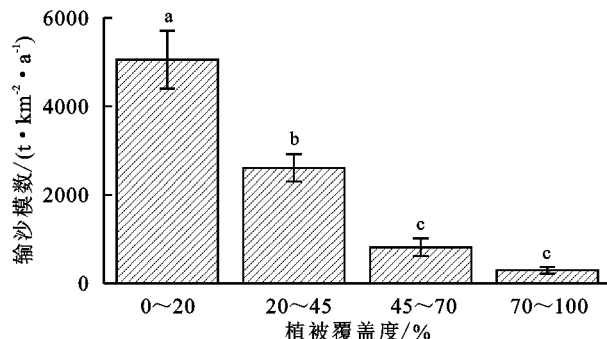


图 4 植被覆盖度与输沙模数相关关系

Fig. 4 Correlation between vegetation coverage and sediment transport modulus

将流域的植被覆盖度按照上述区间进行分类,并分析植被覆盖度与输沙模数之间关系(图 5)。研究结果表明流域植被覆盖度与输沙模数具有显著的负相关关系,植被覆盖度在 $0 \sim 20\%$, $20\% \sim 45\%$, $45\% \sim 70\%$, $70\% \sim 100\%$ 区间,年均输沙模数存在显著差异,当植被覆盖度进一步提升, $45\% \sim 70\%$ 区间与 $70\% \sim 100\%$ 区间已无显著差异,但是随植被覆盖度增加输沙模数仍有降低趋势。总体来看,随植被覆盖度的增加,输沙模数呈下降趋势,且由急剧下降过渡到缓慢下降最后趋于平稳,植被覆盖度达 45% 时可有效遏制流域输沙,表明植被覆盖度对输沙模数影响存在阈值效应。



注:不同字母代表差异显著($p < 0.05$)。

图 5 不同植被覆盖度区间的输沙模数均值

Fig. 5 Mean sediment transport modulus in different vegetation coverage ranges

3.4 基于减沙效率的植被覆盖度区间

依据植被覆盖度与输沙模数的指数函数关系,得出其一阶导函数($y' = -700.02e^{-0.053x}$)用以表征函数的变化率即植被减沙效率。将输沙模数和植被覆盖度的线性拟合曲线按照 5% 的间隔分段,根据植被减沙效率及曲线斜率,植被覆盖度分布可划分为 4 个区间:低覆盖度($0 \sim 20\%$)、过渡覆盖度($20\% \sim 45\%$)、高覆盖度($45\% \sim 70\%$)与极高覆盖度($70\% \sim 100\%$),拟合结果见图 6。在低覆盖度,随着植被覆盖度的增加输沙模数急剧降低,平均减沙效率达 $424.87 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。植被覆盖度位于 $20\% \sim 45\%$ 时,曲线斜率趋于平缓,平均减沙效率降至 $131.05 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,在高覆盖度($45\% \sim 70\%$),减沙效率趋于平稳,平均值为 $34.83 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,已远低于低覆盖度,在极高覆盖度($70\% \sim 100\%$)减沙效率已无明显变化,均值为 $8.27 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,仅为低覆盖度与过渡覆盖度的 1.9% , 6.0% 。

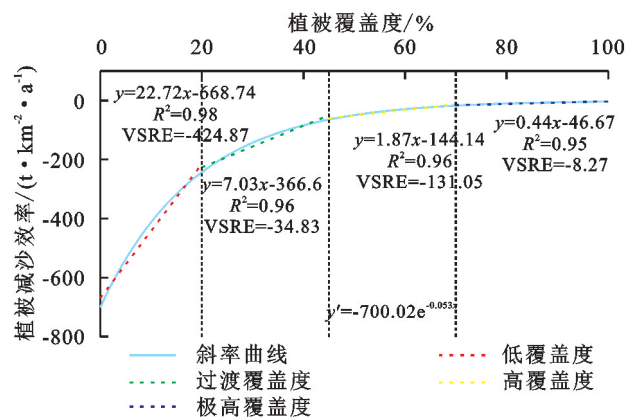


图 6 植被覆盖度区间划分

Fig. 6 Classification of vegetation coverage threshold zones

4 讨论

4.1 植被对流域侵蚀产沙的影响

植被对流域侵蚀产沙的影响是间接性的,以水力侵蚀为例,植被地上部分可以拦蓄降雨,避免雨滴直接打击地表土壤^[13];同时,植被增加了地表粗糙度,阻碍径流汇聚,降低径流速度,增加径流下渗量,减少径流的坡面冲刷;其次植被根系起到了固结土壤,改善土壤结构的作用,加强土壤抗蚀性,减轻坡面土壤流失^[14]。郭帅等^[15]研究表明黄河中游流域输沙量与 NDVI 呈负相关关系;Liu 等^[16]通过分析黄土丘陵沟壑区不同地表土壤类型植被覆盖度与产沙系数相关关系,发现在相同植被覆盖度下,砒砂岩区的产沙系数要大于黄土区与盖沙黄土区;侯喜禄等^[17]在安塞进行的小区试验结果表明,植被在暴雨事件下减沙量最高可达 62.4% ,且减沙量随植被覆盖度增加而加大。多数研究表明,植被覆盖度与产沙量呈负相关关系,植被减

沙效率会随植被覆盖度增加而逐渐降低,但植被在不同下垫面条件下的减沙效率存在差异^[18]。

4.2 植被覆盖度阈值成因

目前研究多以点或区间形式来确定植被覆盖度阈值,阈值点是通过植被覆盖度与目标变量拟合过程中出现的非线性变化拐点^[19],或在已有标准(例如容许土壤流失量)的前提下计算出的临界值来确定^[20];阈值区间意味着从一种状态到另一种状态的逐渐过渡,而不是像阈值点强调在临界值上前后状态的突发性变化,在生态系统中,研究目标往往在多种因素影响下呈现出平稳且连续变化的响应现象,因此阈值应表现为过渡区域,而并非离散点^[21]。土壤侵蚀是包括降雨、土壤、植被、地形地貌、径流在内的多因素影响下的复杂物理过程,本研究植被覆盖度与流域输沙模数的拟合结果表明,二者呈显著的负相关关系,在植被覆盖度达45%时渭河流域输沙模数有效降低,植被减沙效率在不同的植被覆盖度区间呈现不同的规律。

植被不仅影响着地表水文过程,同时也影响着坡面与沟道水流特性^[22],不同气候区,不同植被与土壤类型导致其对侵蚀并非单一的抑制作用。例如在干旱半干旱环境中,稀疏、丛生的草地植被会改变局部微地貌导致水流的汇聚,随着植被覆盖度的增加,植被减沙效率呈先增加后减少趋势^[23]。Zhang等^[24]通过模拟试验得出,植被减沙存在临界阈值,低于此临界值时坡面流阻力随径流深的增加而减小,高于此临界值时则呈正相关关系。由于多种因素的影响,植被减沙的阈值在不同的空间和时间尺度上存在差异。刘晓燕等^[25]发现不同侵蚀区的植被减沙阈值不尽相同,例如祖厉河与洮河流域所属的黄土丘陵沟壑区第五副区,由于其特殊的地形及产沙机制导致其植被减沙阈值远远大于其他区域。在坡面尺度上,张旭等^[26]的研究表明坡面径流的流速与植被覆盖度呈负相关的指数关系,本文的研究结果亦证实植被覆盖度与输沙模数存在相似的关系。因此,在进一步研究阈值效应时,需要考虑空间尺度效应、降雨、植被和地形的综合影响。

4.3 植被覆盖度阈值应用

近40年来,渭河流域植被建设成效显著,减水减沙效益突出。在目前城市快速扩张,耕地面积减少,农村劳动力短缺的背景下,渭河流域作为重要的粮食产区,如何在巩固植被恢复成果同时保证粮食产量是未来植被建设的重要问题^[27]。此外,有研究指出渭河流域植被覆盖度显著增加的同时,区域小气候发生变化,蒸发量明显上升^[28],河川径流量呈减少趋势^[29]。因此,为了推动渭河流域生态建设与高质量发展,不同经济与环境背景下的地区应进行相应的植被建设规划。

根据《中国土壤侵蚀分类分级标准》^[30]中非耕地林草盖度与地面坡度划分面蚀分级标准,在坡面尺度上0~75%林草盖度下细分4级,而本研究聚焦于渭河流域,主要包括黄土高原沟壑区与丘陵沟壑区,关注植被在流域产沙中的影响,相较于坡面尺度,泥沙输移比会随着面积增加而降低,阈值划分思路与《中国土壤侵蚀分类分级标准》相吻合,但在结果上存在一定差异性。本研究表明植被减沙具有显著的阈值现象,而植被受气候、土壤、水分等限制,在不同的地区阈值表现出显著的差异,因此在实际开展植被恢复过程中应依据植被覆盖度阈值并综合考虑区域特点进行综合治理。植被覆盖度小于20%的流域,如陕北黄土高原南端与关中盆地过渡地带的石质山区,应采取人工干预,特别是增加裸地的植被覆盖度,采取生物措施(如植树种草)与工程措施(如淤地坝,水库)相结合,以尽快减少流域输沙量;当流域植被覆盖度位于20%~45%时,应在“适地适树”前提下提升植被覆盖度,加强水土保持设施维护;当流域植被覆盖度位于45%~70%时,要注重优化水土保持措施的空间配置,视区域气候与地形条件构建多层次植被结构;植被覆盖度达70%以上流域应以自然恢复为主,在维持水土保持功能和生态系统稳定的前提下,合理进行人工干预。

5 结论

(1) 2000—2019年渭河流域植被覆盖度整体呈上升趋势,泾河及北洛河中上游流域植被恢复效果显著,关中平原城市扩张区域植被盖度有所降低。

(2) 研究区年均输沙模数除沮河流域外整体随时间变化呈降低趋势,主要产沙区位于马莲河上游,洛河上游所处黄土丘陵沟壑区。

(3) 输沙模数随植被覆盖度增加而减少,呈负相关的指数关系。随植被覆盖度的增加,输沙模数呈下降趋势,且由急剧下降过渡到缓慢下降最后趋于平稳,植被覆盖度达45%时可有效遏制流域输沙。

(4) 根据植被减沙效率,植被覆盖度可划分为4个区间:低覆盖度(0~20%),过渡覆盖度(20%~45%),高覆盖度(45%~70%)与极高覆盖度(70%~100%)。黄土高原未来植被恢复需综合考虑区域气候、水分、土壤条件,同时结合水土流失防控需求与植被覆盖度阈值,优化植被物种组成,提升植被结构稳定性与生态功能。

参考文献(References):

- [1] 穆兴民,李朋飞,刘斌涛,等.1901—2016年黄土高原土壤侵蚀格局演变及其驱动机制[J].人民黄河,2022,44(9):36-45.
Mu X M, Li P F, Liu B T, et al. Spatial-temporal devel-

- opment and driving mechanisms of erosion on the Chinese Loess Plateau between 1901 and 2016[J]. *Yellow River*, 2022,44(9):36-45.
- [2] 霍云霁,朱冰冰.坡面草被覆盖对侵蚀产沙影响的模拟试验[J].*水土保持研究*,2022,29(5):14-20.
- Huo Y P, Zhu B B. Experimental study on impacts of vegetation patterns on sediment yield of slope[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(5):14-20.
- [3] Wang Y X, Ran L S, Fang N F, et al. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2018,167:257-265.
- [4] Tian X J, Zhao G J, Mu X M, et al. Decoupling effects of driving factors on sediment yield in the Chinese Loess Plateau[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2023,11(1):60-74.
- [5] Xin Z B, Yu X X, Lu X X. Factors controlling sediment yield in China's Loess Plateau[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011,36(6):816-826.
- [6] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.黄土高原植被变化与恢复潜力预测[J].*水土保持学报*,2021,35(1):205-212.
- Zhao G J, Mu X M, Tian P, et al. Prediction of vegetation variation and vegetation restoration potential in the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021,35(1):205-212.
- [7] 白云鹏,赵广举,张丽梅,等.近55年来渭河流域输沙变化及驱动因子分析[J].*水土保持学报*,2020,34(4):91-97.
- Bai Y P, Zhao G J, Zhang L M, et al. Spatiotemporal variation of sediment load in the Weihe River Basin in recent 55 years and the driving factors[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(4):91-97.
- [8] 徐瑞瑞,高鹏,穆兴民,等.渭河流域水沙时空变化及其对人类活动的响应[J].*人民黄河*,2020,42(3):17-24.
- Xu R R, Gao P, Mu X M, et al. Dynamic of streamflow and sediment load and its response to human activities in the Weihe River Basin[J]. *Yellow River*, 2020,42(3):17-24.
- [9] Zhang R H, Sun R. Evapotranspiration estimation and influence on water change in the Weihe River Basin, China[J]. *Remote Sensing Science*, 2015,3(4):42-52.
- [10] Hu J F, Li P F, Zhao G J, et al. Effects of climate variability and anthropogenic factors on sediment load reduction in the Weihe River Basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2022,36(4):14562.
- [11] 刘晓燕,李晓宇,高云飞,等.黄土丘陵沟壑区典型流域产沙的降雨阈值变化[J].*水利学报*,2019,50(10):1177-1188.
- Liu X Y, Li X Y, Gao Y F, et al. Changes of rainfall threshold for sediment producing in the loess hilly and gully region of the Loess Plateau [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019,50(10):1177-1188.
- [12] Toms J D, Lesperance M L. Piecewise regression: A tool for identifying ecological thresholds[J]. *Ecology*, 2003,84(8):2034-2041.
- [13] 李鑫浩,曹文华,牛勇,等.黄泛平原区风沙土物理结皮硬度和厚度特征及其影响因素[J].*水土保持通报*,2022,42(1):63-68,76.
- Li X H, Cao W H, Niu Y, et al. Characteristics and influencing factors of hardness and thickness of aeolian sandy soil crust at sandy area of Yellow River floodplain[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(1):63-68,76.
- [14] 朱方方,秦建森,朱美菲,等.模拟降雨下林下覆被结构对产流产沙过程的影响[J].*水土保持学报*,2023,37(3):10-18.
- Zhu F F, Qin J M, Zhu M F, et al. Effect of mulch structure on runoff and sediment yield under simulation rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(3):10-18.
- [15] 郭帅,裴艳茜,胡胜,等.黄河流域植被指数对气候变化的响应及其与水沙变化的关系[J].*水土保持通报*,2020,40(3):1-7,13.
- Guo S, Pei Y Q, Hu S, et al. Response of vegetation index to climate change and their relationship with runoff-sediment change in Yellow River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(3):1-7,13.
- [16] Liu X Y, Yang S T, Dang S Z, et al. Response of sediment yield to vegetation restoration at a large spatial scale in the Loess Plateau[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014,57(8):1482-1489.
- [17] 侯喜禄,曹清玉.陕北黄土丘陵沟壑区植被减沙效益研究[J].*水土保持通报*,1990,10(2):33-40.
- Hou X L, Cao Q Y. Study on the benefits of plants to reduce sediment in the loess rolling gullied region of North Shaanxi[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1990,10(2):33-40.
- [18] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J].*水科学进展*,2014,25(6):825-834.
- Zhang K D, Wang G Q, Sun X M, et al. Hydraulic characteristic of overland flow under different vegetation coverage[J]. *Advances in Water Science*, 2014,25(6):825-834.
- [19] Muradian R. Ecological thresholds: A survey [J]. *Ecological Economics*, 2001,38(1):7-24.
- [20] Chen J, Xiao H B, Li Z W, et al. Threshold effects of vegetation coverage on soil erosion control in small watersheds of the red soil hilly region in China [J]. *Ecological Engineering*, 2019,132:109-114.
- [21] Huggett A J. The concept and utility of 'ecological thresholds' in biodiversity conservation[J]. *Biological Conservation*, 2005,124(3):301-310.

- [15] Benz U C, Hofmann P, Willhauck G, et al. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, 58(3/4): 239-258.
- [16] Gao Y, Mas J F, Maathuis B H P, et al. Comparison of pixel-based and object-oriented image classification approaches: A case study in a coal fire area, Wuda, Inner Mongolia, China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(18): 4039-4055.
- [17] 崔一娇, 朱琳, 赵力娟. 基于面向对象及光谱特征的植被信息提取与分析[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 867-875.
- Cui Y J, Zhu L, Zhao L J. Abstraction and analysis of vegetation information based on object-oriented and spectra features[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 867-875.
- [18] Drăguț L, Csillik O, Eisank C, et al. Automated parameterisation for multi-scale image segmentation on multiple layers[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 88: 119-127.
- [19] 林雪. 面向林地信息的高分一号遥感影像融合与分类研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- Lin X. Study on Fusion Algorithms and Classification Methods for GF-1 Data Oriented to Forestland Information[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [20] Haralick R M, Shanmugam K, Dinstein I. Textural features for image classification[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1973, SMC-3(6): 610-621.
- [21] Song X F, Duan Z, Jiang X G. Comparison of artificial neural networks and support vector machine classifiers for land cover classification in Northern China using a SPOT-5 HRG image[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(10): 3301-3320.
- [22] 张睿, 马建文. 支持向量机在遥感数据分类中的应用新进展[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(5): 555-562.
- Zhang R, Ma J W. State of the art on remotely sensed data classification based on support vector machines[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(5): 555-562.
- [23] 林杰. 基于植被结构特征的土壤侵蚀遥感定量反演[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- Lin J. Remote Sensing Quantitative Inversion of Soil Erosion Factors Based on Vegetation Structural Characteristics[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.

(上接第 102 页)

- [22] 孙一, 刘晓燕, 田勇, 等. 坡面植被覆盖度对泥沙输移的影响特性[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(5): 12-18.
- Sun Y, Liu X Y, Tian Y, et al. Effects of slope vegetation coverage on sediment transport[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(5): 12-18.
- [23] 滕佳昆, 刘宇. 坡面径流冲刷侵蚀的植被覆盖阈值现象研究[J]. *中国水土保持*, 2018(4): 42-45, 69.
- Teng J K, Liu Y. Study on the phenomenon of vegetation coverage threshold of slope runoff erosion[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2018(4): 42-45, 69.
- [24] Zhang K D, Wang Z G, Wang G Q, et al. Overland-flow resistance characteristics of nonsubmerged vegetation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2017, 143(8): 04017021.
- [25] 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.
- Liu X Y, Dang S Z, Gao Y F, et al. The rule and threshold of the effect of vegetation change on sediment yield in the loess hilly region, China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(5): 505-518.
- [26] 张旭, 孙一, 潘森, 等. 植被覆盖度对坡面水流的影响分析[J]. *水电能源科学*, 2018, 36(6): 22-24.
- Zhang X, Sun Y, Pan M, et al. Influence of vegetation coverage on overland flow[J]. *Water Resources and Power*, 2018, 36(6): 22-24.
- [27] Wei Z Z, Wan X Y. Spatial and temporal characteristics of NDVI in the Weihe River Basin and its correlation with terrestrial water storage[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5532.
- [28] 李艳忠, 刘昌明, 刘小莽, 等. 植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(12): 2005-2020.
- Li Y Z, Liu C M, Liu X M, et al. Impact of the grain for green project on the land use/cover change in the middle Yellow River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(12): 2005-2020.
- [29] 黄晨璐, 杨勤科. 渭河与泾河流域水沙变化规律及其差异性分析[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(2): 327-336.
- Huang C L, Yang Q K. Runoff and sediment variation rules and differences in Wei River and Jing River Basins[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(2): 327-336.
- [30] 中华人民共和国水利部. SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 190—2007 Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.