



黄土高原植被变化对土壤侵蚀的影响

刘宇¹, 宋进喜^{1,2}, 邢璐通¹, 黄钰琳¹, 高隽清¹, 李晓鑫¹, 曹成珺¹, 史阿莹¹

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 陕西省黄河研究院, 陕西 西安 710127)

摘要 土壤侵蚀主要发生在我国黄土高原地区,大规模植被恢复措施的开展进一步影响了黄土高原的土壤侵蚀情况,剖析植被变化对土壤侵蚀的影响可为黄土高原生态环境治理提供理论指导。研究基于中国土壤流失方程(CSLE)以及多元数据资料,对黄土高原2000—2018年植被覆盖度、土壤侵蚀及其相互作用进行多方面分析。结果表明:①黄土高原自东南向西北植被覆盖度逐渐递减,19年间植被覆盖度呈稳定上升趋势;②2000—2018年黄土高原平均土壤侵蚀模数为 $2\,526.27\text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$,与降雨量呈正相关,丘陵、台地及起伏山地侵蚀程度较强;③黄土高原植被覆盖度为45%~75%的区域侵蚀程度较强,当植被覆盖度增加40%以上时,会直接引起侵蚀的加剧,而当植被覆盖度减少或增加不超过30%时,降雨量的变化是侵蚀加剧或减弱的主导因素。研究结论可为黄土高原土壤侵蚀综合防治和生态环境质量改善提供参考。

关键词 中国土壤流失方程;土壤侵蚀;植被覆盖度;黄土高原

中图分类号:S157.1 DOI:10.16152/j.cnki.xdxzbzr.2024-03-006

The impact of vegetation changes on soil erosion in the Loess Plateau

LIU Yu¹, SONG Jinxi^{1,2}, XING Lutong¹, HUANG Yulin¹, GAO Junqing¹,
LI Xiaoxin¹, CAO Chengjun¹, SHI Aying¹

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Yellow River Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710127, China)

Abstract Soil erosion mainly occurs in the Loess Plateau region of China, and the implementation of large-scale vegetation restoration measures further affects the soil erosion situation on the Loess Plateau. Analyzing the impact of vegetation changes on soil erosion can provide theoretical guidance for the ecological environment management of the Loess Plateau watershed. Based on the Chinese soil loss equation (CSLE) and multivariate data, this study conducts a comprehensive analysis of vegetation coverage, soil erosion, and their interactions on the Loess Plateau from 2000 to 2018. The results show that: ① The vegetation coverage of the Loess Plateau gradually decreases from southeast to northwest, and the vegetation coverage shows a stable upward trend over 19 years, with significant improvement in large-scale vegetation; ② The average soil erosion modulus on the Loess Plateau from 2000 to 2018 was $2\,526.27\text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$, which was positively correlated with rainfall. The degree of erosion was strong in hills, plateaus, and undulating mountains; ③ The area with vegeta-

收稿日期:2023-12-14

基金项目:国家自然科学基金专项项目(42041004)

第一作者:刘宇,男,从事水土过程耦合研究,liuyu021@stumail.nwo.edu.cn。

通信作者:宋进喜,男,教授,博士生导师,从事水文学、水资源及水环境研究,jinxisong@nwo.edu.cn。

tion coverage ranging from 45% to 75% in the Loess Plateau has a strong degree of erosion. When the vegetation coverage increases by more than 40% , it directly causes the intensification of erosion. However, when the vegetation coverage decreases or increases by no more than 30% , the change in rainfall is the dominant factor for the intensification or weakening of erosion. This study can provide reference for the comprehensive prevention and control of soil erosion and the improvement of ecological environment quality in the Loess Plateau watershed.

Keywords CSLE; soil erosion; vegetation coverage; Loess Plateau

土壤侵蚀现已成为全球性的环境问题,不仅会导致土壤质量退化,同时也与生态系统稳定性密切相关^[1]。中国是世界土壤侵蚀最严重的国家之一,而黄土高原由于其坡度陡峭、地形复杂、土质疏松^[2],导致该地区是我国水土流失最严重的区域之一。目前,黄土高原水土流失的总面积为 $39 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中侵蚀程度超过极强度的面积为 $8.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全国极强度侵蚀总面积的 64%。与此同时,黄土高原的土壤侵蚀分布极不均衡,强度及以上的土壤侵蚀面积为 $15.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,只占总面积的 24%,但其贡献的产沙量却占入黄河泥沙总量的 80% 以上^[3]。因此,研究黄土高原土壤侵蚀情况具有重要意义。学者针对中国土壤侵蚀的具体情况,建立了土壤侵蚀预报模型,如蔡强国等提出了黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型^[4],分别对坡面、沟坡和沟道提出了不同的子模型;Liu 等基于通用土壤流失方程(universal soil loss equation, USLE)^[5],对其各因子进行修改后得到中国土壤流失方程(Chinese soil loss equation, CSLE),在土壤侵蚀预报模型研究领域取得了重要成果。

植被作为影响土壤侵蚀过程最重要的因子之一,具有强大的水土保持功能,一方面,其冠层对降雨的截留作用可以减少地表径流;另一方面,其根系对土壤的锚固作用可以提升土壤抗蚀能力^[6-8]。20 世纪初期,黄土高原的生态环境极度脆弱,植被遭到大面积破坏,水土流失问题极其严重^[9]。在 1978 年“三北”工程及 1999 年退耕还林还草政策的推动下,黄土高原的植被得到了显著恢复,水土流失问题得到了一定缓解^[10]。然而植被变化对黄土高原土壤侵蚀情况的影响仍不明晰,现有关于土壤侵蚀在空间分布特征上的研究,多以不同的土地覆被类型、降雨类型、降雨强度、坡面坡度等因素为出发点^[11-12],对植被的分析较少。

基于此,本文以黄土高原为研究对象,利用 CSLE 模型、像元二分模型计算土壤侵蚀模数和植被覆盖度,基于相关的统计分析方法,与遥感和 GIS 相结合,在时空尺度上分析土壤侵蚀对植被变化的响应,研究结果可以为黄土高原水土保持提供参考和科学依据。

1 研究区概况、数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于黄河流域中部,地理范围为北纬 $33.72^\circ \sim 41.27^\circ$,东经 $100.90^\circ \sim 114.55^\circ$ (见图 1),是中国四大高原之一,总面积为 $63.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[13]。黄土高原海拔西北高东南低,六盘山西部为 2 000 ~ 3 000 m,六盘山与吕梁山之间为 1 000 ~ 2 000 m,是黄土高原的主体部分,吕梁山东部降低至 500 ~ 1 000 m,是大面积的河谷平原。黄土高原具有典型的大陆季风气候特征,年均气温为 $3.6 \sim 14.3 \text{ }^\circ\text{C}$,冬季寒冷、夏季炎热,昼夜温差大,且东部和西部的温差也很大^[14]。黄土高原不仅位于东部季风区,而且还是南部高空西风带的盛行地区,年降水量为 150 ~ 750 mm,东西之间的降水量有较大差异,从东南向西北逐渐减少,且多集中在夏秋季,春冬季则相对干旱少雨^[15]。

1.2 数据来源

本研究所用基础数据包括黄土高原空间范围、地貌类型空间分布、降雨数据、土壤类型数据、土地覆盖类型数据、数字高程模型(digital elevation mode, DEM)、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、梯田空间分布、中国农业熟制区划等专题数据(见表 1)。

将上述数据的坐标统一到 WGS—1984 中,并将其分辨率统一重采样至 1 km,方便后续计算分析。

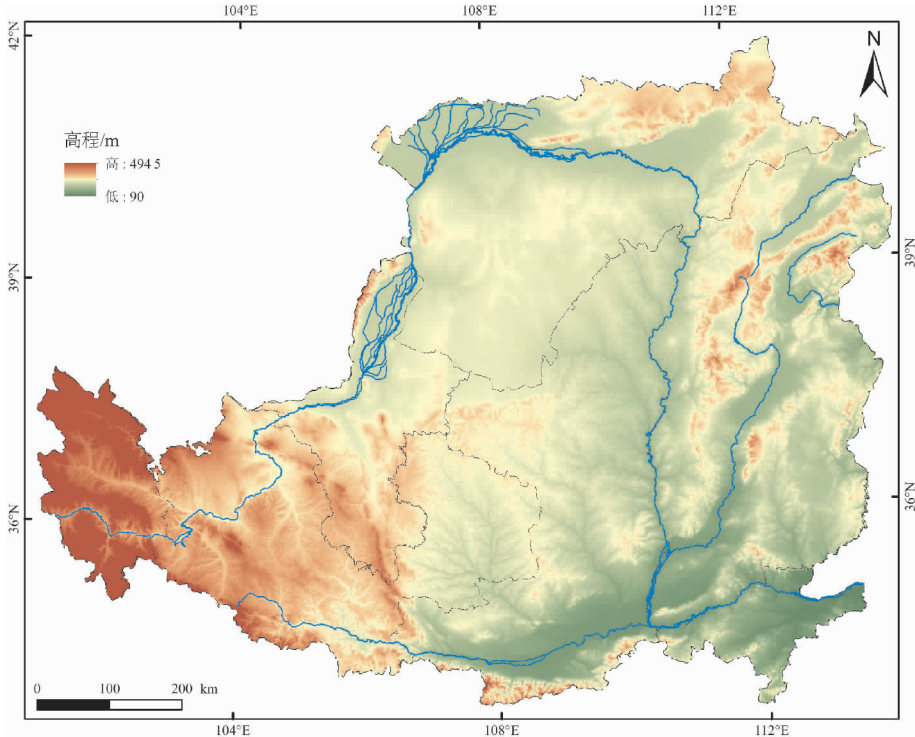


图 1 研究区域高程图

Fig. 1 Geographical elevation map of the study area

表 1 数据来源、年份及用途

Tab. 1 Source, year and purpose of the data

基础数据	来源	年份	用途
黄土高原空间范围	中国科学院资源环境科学数据中心	—	—
地貌类型空间分布	中国科学院资源环境科学数据中心	—	—
降雨数据	项目组提供	2000—2018	计算 R
土壤类型数据	国家地球系统科学数据中心	1995	计算 K
数字高程模型 (DEM)	地理空间数据云	—	计算 LS
归一化植被指数 (NDVI)	NASA-LAADS DAAC	2000—2018	计算 FVC
土地覆盖类型数据	欧洲航天局	2000—2018	计算 B
梯田空间分布	国家地球系统科学数据中心、参考文献 [16]	2000、2010、2015、2018	计算 E
中国农业熟制区划	中国科学院资源环境科学数据中心	—	计算 T

1.3 植被覆盖度的计算

基于归一化植被指数 (NDVI) 的遥感影像, 采用像元二分模型计算黄土高原植被覆盖度^[17], 根据《土壤侵蚀分类分级标准》对植被覆盖度进行分级 (见表 2), 公式为

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \times 100\%$$

(1)

式中: FVC 为植被覆盖度; $NDVI$ 为归一化植被指数; $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 分别为裸露地表和全植被覆盖地表的 $NDVI$ 值^[18]。

表 2 植被覆盖度分级

Tab. 2 Classification of vegetation coverage

植被覆盖度等级	植被覆盖度/%
裸露	< 10
低	10 ~ 30
中低	30 ~ 45
中度	45 ~ 60
中高	60 ~ 75
高	> 75

1.4 土壤侵蚀模数的计算

基于 GIS 和中国土壤流失方程(CSLE),计算黄土高原每个栅格单元的土壤侵蚀模数,公式为

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \tag{2}$$

式中: A 为土壤侵蚀模数 $[\text{t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$; R 为降雨侵蚀力 $[\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})^{-1}]$; K 为土壤可蚀性因子 $[\text{t} \cdot \text{h} \cdot (\text{MJ} \cdot \text{mm})^{-1}]$; L 、 S 、 B 、 E 、 T 分别为坡长因子、坡度因子、生物措施因子、工程措施因子和耕作措施因子(无量纲)^[5]。

1.4.1 降雨侵蚀力(R)

基于日降雨量估算降雨侵蚀力,公式为

$$R_{\text{半月}i} = \alpha \sum_{k=1}^m (P_k)^\beta \tag{3}$$

$$R_{\text{年}} = \sum_{i=1}^{24} R_{\text{半月}i} \tag{4}$$

$$\beta = 0.836\,3 + \frac{18.177}{P_{\text{d}12}} + \frac{24.455}{P_{\text{y}12}} \tag{5}$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.189\,1} \tag{6}$$

式中: $R_{\text{半月}i}$ 为半月时段的降雨侵蚀力值; P_k 为半月时段内第 k 天的侵蚀性日雨量($\geq 12\text{ mm}$, 否则为 0), mm ; $P_{\text{d}12}$ 表示日雨量 12 mm 以上的日平均雨量, mm ; $P_{\text{y}12}$ 表示日雨量 12 mm 以上的年平均雨量, mm ^[19]。

1.4.2 土壤可蚀性(K)

运用 EPIC 模型计算土壤可蚀性因子,公式为

$$K = \{0.2 + 0.3e^{-0.025\,6\,\text{SAN}(1-\frac{\text{SIL}}{100})}\} \times (\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}})^{0.3} \times (1 - \frac{0.25C}{C + e^{(\frac{3.72-2.95C}{})}}) \times [1 - \frac{0.7(1 - \frac{\text{SAN}}{100})}{(1 - \frac{\text{SAN}}{100}) + e^{[22.9(1-\frac{\text{SAN}}{100})-5.51]}}] \tag{7}$$

式中: SAN 为砂粒含量($0.05 \sim 2\text{ mm}$), %; SIL 为粉砂含量($0.002 \sim 0.05\text{ mm}$), %; CLA 为黏粒含量($< 0.002\text{ mm}$), %; C 为有机碳含量, %^[20]。

1.4.3 坡长、坡度因子(L 、 S)

基于 1 弧秒分辨率的 SRTM 数字高程数据,经过去接边、去除伪条纹等以及滤波除噪等预处理,利用 CSLE 模型中的坡长、坡度因子算法和坡长、坡度因子计算工具(LS_Tool),计算得到 L 、 S 。

1.4.4 生物措施因子(B)

基于土地利用类型和植被覆盖度,将 Borrel-li^[21] 在 USLE 中计算非耕地因子的方法应用于 CSLE 中生物措施因子的计算(见表 3)。

表 3 不同土地利用类型的生物措施因子

Tab.3 B of different land use types	
土地覆盖类型	B
林地	0.000 1 ~ 0.003
灌丛、草原、林地灌木过渡带	0.01 ~ 0.15
裸地或低植被覆盖地	0.1 ~ 0.5
水体、湿地、城市建筑用地、冰雪	-
耕地	1

$$B = \text{MIN}_B + (\text{MAX}_B - \text{MIN}_B) \times (1 - \frac{\text{FVC}}{100}) \tag{8}$$

式中: MAX_B 和 MIN_B 分别为表中 B 的最大值和最小值。

1.4.5 工程措施因子(E)

基于梯田空间分布图,根据《水土流失普查技术规定》中水土保持工程措施因子赋值表,取平均值为 0.242 ,对工程措施因子进行赋值(见表 4)。

表 4 不同梯田的工程措施因子

Tab.4 E of different terraced fields			
工程措施	分类	E	平均值
梯田	土坎水平梯田	0.084	0.242
	石坎水平梯田	0.121	
	坡式梯田	0.414	
	隔坡梯田	0.347	

1.4.6 耕作措施因子(T)

根据《水土流失普查技术规定》中研究区所属的轮作区代码以及中国农业熟制区划图对耕作措施因子进行赋值(见表 5),当土地利用为非耕地时,则赋值为 1 。

1.4.7 土壤侵蚀制图

基于 GIS 中地图代数运算的方法,将各因子直接相乘,计算得到研究区的土壤侵蚀模数,根据《土壤侵蚀分级分类标准》进行分级(见表 6)。

表 5 不同农业熟制区划的耕作措施因子
Tab. 5 *T* of different agricultural maturity zones

一级区名	二级区名	<i>T</i>
青藏高原喜凉作物一熟轮歇区	藏东南川西河谷地喜凉作物一熟区	0. 272
	海北甘南高原喜凉作物一熟轮歇区	0. 272
北部中高原半干旱喜凉作物一熟区	后山坝上晋北高原山地半干旱喜凉作物一熟区	0. 488
	陇中青东宁中南黄土丘陵半干旱喜凉作物一熟区	0. 488
北部低高原易旱喜温一熟区	辽吉西蒙东南晋北半干旱喜温作物一熟区	0. 417
	黄土高原东部易旱喜温作物一熟区	0. 417
	晋东半湿润易旱作物一熟填闲区	0. 417
	渭北陇东半湿润易旱冬麦一熟填闲区	0. 417
东北平原丘陵半湿润喜温作物一熟区	大小兴安岭山麓岗地喜凉作物一熟区	0. 331
	三江平原长白山地温凉作物一熟区	0. 331
	松嫩平原喜温作物一熟区	0. 331
	辽河平原丘陵温暖作物一熟填闲区	0. 331
西北干旱灌溉一熟兼二熟区	河套河西灌溉一熟填闲区	0. 279
	北疆灌溉一熟填闲区	0. 281
	南疆东疆绿洲二熟一熟区	0. 281
黄淮海平原丘陵水浇地二熟旱地二熟一熟区	燕山太行山前平原水浇地套复二熟旱地一熟区	0. 397
	黑龙港缺水低平原水浇地二熟旱地一熟区	0. 426
	鲁西北豫北低平原水浇地粮棉两熟一熟区	0. 391
	山东丘陵水浇地二熟旱坡地花生棉花一熟区	0. 425
	黄淮平原南阳盆地旱地水浇地二熟区	0. 413
	汾渭谷地水浇地二熟旱地一熟二熟区	0. 378
	豫西丘陵山地旱地坡地一熟水浇地二熟区	0. 392
西南中高原山地旱地二熟一熟水田二熟区	秦巴山区旱地二熟一熟兼水田两熟区	0. 403
	川鄂湘黔低高原山地水田旱地两熟兼一熟区	0. 396
	贵州高原水田旱地两熟一熟区	0. 410
	云南高原水田旱地二熟一熟区	0. 425
	滇黔边境高原山地河谷旱地一熟两熟区	0. 429
江淮平原丘陵麦稻二熟区	江淮平原麦稻两熟兼早三熟区	0. 392
	鄂豫皖丘陵平原水田旱地两熟兼早三熟区	0. 372
四川盆地水旱二熟兼三熟区	盆西成都平原水田麦稻两熟区	0. 422
	盆东丘陵低山水田旱地两熟三熟区	0. 411
长江中下游平原丘陵水田三熟二熟区	沿江平原丘陵水田早三熟二熟区	0. 338
	两湖平原丘陵水田中三熟二熟区	0. 312
东南丘陵山地水田旱地二熟三熟区	浙闽丘陵山地水田旱地三熟二熟区	0. 354
	南岭丘陵山地水田旱地二熟三熟区	0. 338
	滇南山地旱地水田二熟兼三熟区	0. 395
华南丘陵沿海平原晚三熟热三熟区	华南低丘平原晚三熟区	0. 466
	华南沿海西双版纳台南二熟三熟与热作区	0. 459

表6 土壤侵蚀分级

Tab.6 Grading of soil erosion degree

土壤侵蚀程度	$A/[t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}]$
微度	<1 000
轻度	1 000 ~ 2 500
中度	2 500 ~ 5 000
强度	5 000 ~ 8 000
极强度	8 000 ~ 15 000
剧烈	>15 000

2 结果与分析

2.1 黄土高原植被变化

2.1.1 时间变化趋势

黄土高原植被覆盖度由 2000 年的最低值 44.75% 增长至 2018 年的最高值 60.86%, 增幅

为 36% (见图 2)。2000—2018 年间,黄土高原地区的植被覆盖度虽然每年都有起伏波动,但总体上仍呈现出稳定上升的趋势 ($R^2 = 0.761$), 平均增速为 0.062/a。

2.1.2 空间分布特征

黄土高原植被覆盖度呈现出由东南向西北逐渐减少的空间格局[见图 3(a)]。植被覆盖度超过 60% 的区域面积占比 41.92%, 主要分布在黄土高原东南方向的吕梁山脉及太行山脉一带,此外,还有陕北高原南部和陇中高原西部等地,这些地区主要由森林、草地和耕地组成;植被覆盖度低于 30% 的区域面积占比 21.22%, 主要集中在毛乌素沙地和库布齐沙漠等地,其中,植被覆盖度低于 10% 的区域面积占比仅为 3.14%, 大多分布在黄河中上游河道附近。

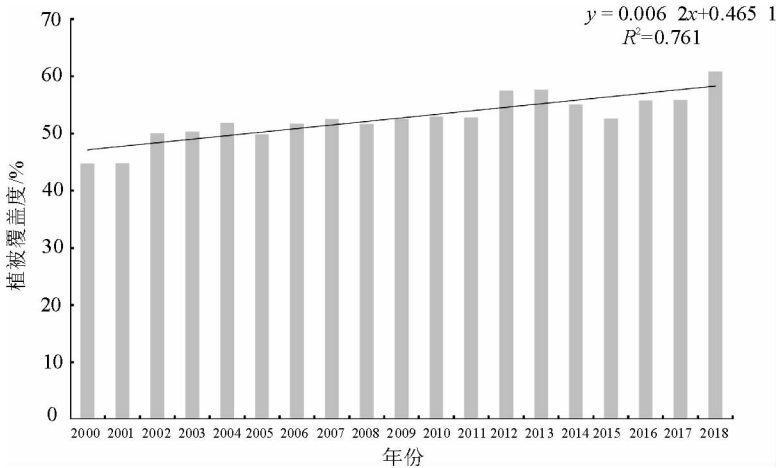


图2 黄土高原植被覆盖度变化趋势
Fig.2 Changes in vegetation coverage on the Loess Plateau

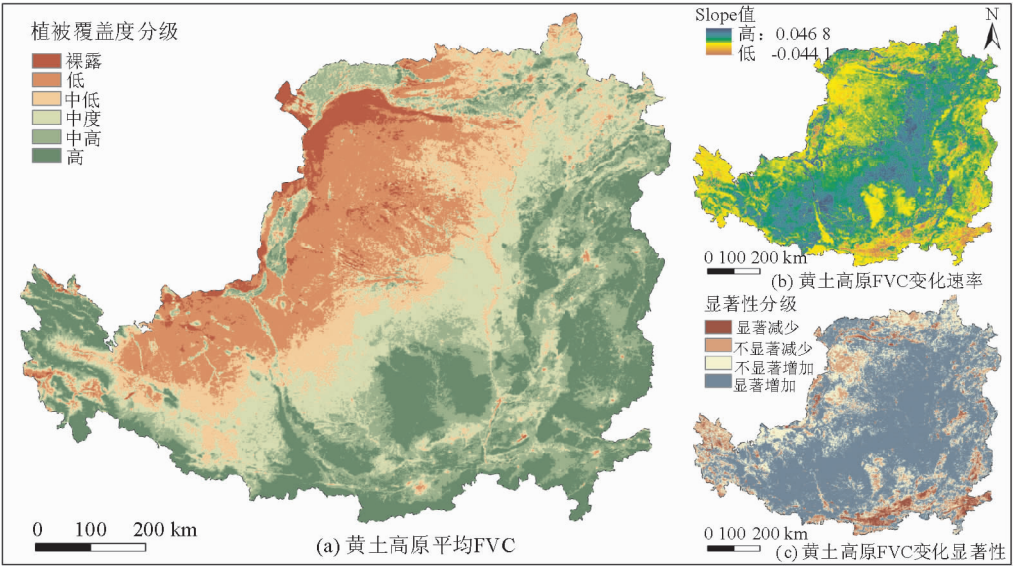


图3 黄土高原植被覆盖度空间分布及变化特征
Fig.3 Spatial distribution and variation characteristics of vegetation coverage on the Loess Plateau

黄土高原 2000—2018 年植被覆盖度的变化速率为 $-0.044\ 1/a \sim 0.046\ 8/a$ [见图 3(b)], 其中植被覆盖度呈现增加趋势的区域面积占比 87.24%。通过对黄土高原植被覆盖度变化趋势进行显著性分析可以发现[见图 3(c)], 呈显著增加的区域面积占比 62.57%, 分布在黄土高原中部地区; 而显著减少的区域面积仅占比 3.38%, 分布在陕西南部渭河下游及黄南北部黄河附近。综合以上分析, 2000—2018 年黄土高原植被得到显著改善。

表 7 黄土高原土壤侵蚀时间变化特征

Tab. 7 Temporal variation characteristics of soil erosion in the Loess Plateau

年份	A /[$t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$]	降雨量/mm	不同土壤侵蚀等级面积占比/%					
			微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
2000	2 346.27	355.06	67.13	13.22	8.33	4.01	3.61	3.70
2010	2 996.55	411.24	64.87	13.75	8.53	3.97	3.86	5.02
2015	1 680.34	298.48	73.74	12.28	6.01	2.77	2.86	2.35
2018	3 036.16	481.37	64.67	13.82	8.70	4.25	3.79	4.76

2.2.2 空间分布特征

2000—2018 年黄土高原平均土壤侵蚀模数为 $2\ 526.27\ t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$, 侵蚀总量达 $158.24 \times 10^7\ t$ (见表 8)。中度及以下侵蚀面积占比高达 88.23%, 但土壤侵蚀量只占总侵蚀量的 26.50%; 相比之下, 强度及以上侵蚀仅占总面积的 11.77%, 但土壤侵蚀量却占总侵蚀量的 73.50%。以上结果表明, 黄土高原局部地区的水土流失问题十分严重。

不同地貌类型的土壤侵蚀情况存在明显差异 (见图 4、表 9)。平原地区位于黄土高原西北部、

2.2 黄土高原土壤侵蚀时空变化

2.2.1 时间变化特征

2000—2018 年黄土高原土壤侵蚀模数与降雨量呈正相关 (见表 7), 微度侵蚀的面积最大 (占比 70% 左右), 强度及以上侵蚀面积较小 (占比 10% 左右)。但 2010—2018 年随着降雨量的增加, 土壤侵蚀模数却基本相似, 由此可以推断, 在此期间植被覆盖度的增加一定程度上缓解了土壤侵蚀的加剧。

吕梁山东侧及关中盆地一带, 由于地势平坦且土壤质地紧密, 因此土壤侵蚀模数仅为 $469.56\ t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$, 为微度侵蚀; 台地和丘陵区位于黄土高原中部, 因坡面较多且植被覆盖相对较低, 所以侵蚀程度较强, 土壤侵蚀模数分别为 $2\ 753.22$ 和 $2\ 875.11\ t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$, 达到中度侵蚀; 小起伏山地因坡耕地分布较多, 导致水土流失严重, 土壤侵蚀模数达到 $3\ 630.44\ t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$; 中起伏山地和大起伏山地因坡度较大不适合耕种, 且植被覆盖度相对较高, 所以土壤侵蚀模数分别为 $2\ 660.85$ 和 $2\ 043.50\ t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ 。

表 8 不同程度土壤侵蚀分布特征

Tab. 8 Distribution of soil erosion to different degrees

侵蚀程度	面积/ km^2	面积占比 /%	侵蚀总量 / $\times 10^7\ t$	侵蚀总量占比 /%	平均侵蚀模数 /[$t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$]
微度	413 307	65.25	8.36	5.28	204
轻度	92 889	14.67	15.06	9.52	1 624
中度	52 642	8.31	18.52	11.70	3 522
强度	23 923	3.78	15.09	9.54	6 315
极强度	24 210	3.82	26.56	16.78	10 984
剧烈	26 425	4.17	74.65	47.17	28 857
合计	633 396	100.00	158.24	100.00	2 526

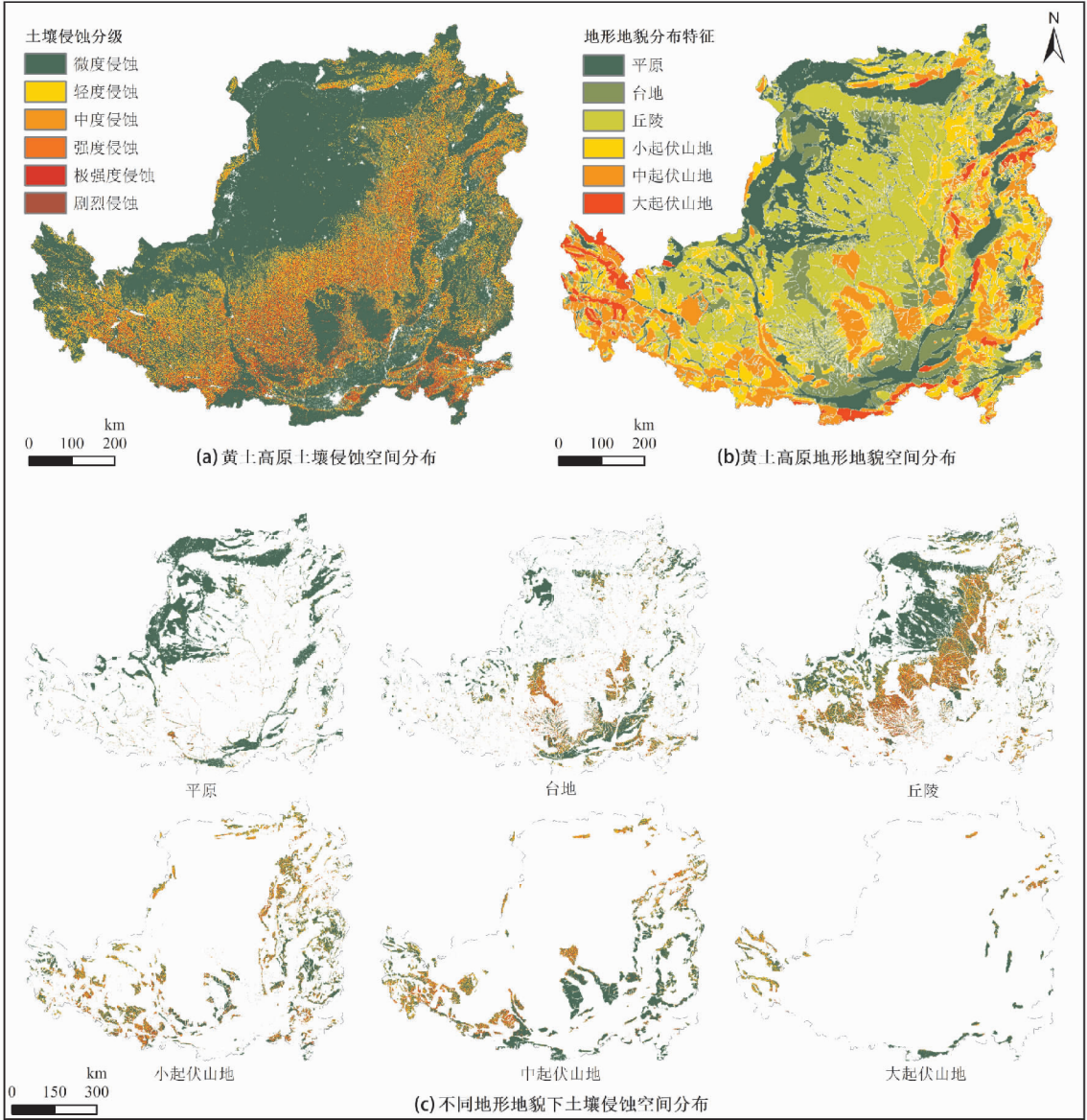


图 4 黄土高原土壤侵蚀分布特征

Fig. 4 Distribution of soil erosion in the Loess Plateau

表 9 不同地形地貌土壤侵蚀分布特征

Tab. 9 Distribution of soil erosion under different terrains and landforms

地形地貌	A /[$\text{t} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$]	不同侵蚀等级面积所占比例/%					
		微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
平原	469.56	93.72	3.09	1.35	0.59	0.63	0.63
台地	2 875.11	63.62	14.98	8.44	3.88	4.20	4.89
丘陵	2 753.22	60.60	16.14	9.47	4.55	4.69	4.55
小起伏山地	3 630.44	47.71	22.42	12.50	5.62	5.74	6.01
中起伏山地	2 660.85	62.90	16.19	9.26	3.75	3.49	4.40
大起伏山地	2 043.50	69.72	15.88	7.19	2.70	1.88	2.63

2.3 植被变化对土壤侵蚀的影响

2.3.1 土壤侵蚀对植被变化的响应

黄土高原土壤侵蚀模数在不同植被覆盖度等级表现不同,随植被覆盖度的增加呈现先增后减的变化特征(见表 10)。植被覆盖度低于 30% 的区域主要分布在西北部的沙地荒漠区,地势平坦,土壤分离能力弱,因此土壤侵蚀模数低;植被覆盖度为 45% ~ 75% 的区域主要分布在黄土高原东南部海拔较高的谷地和高原地带,受雨水冲刷的

影响较为明显,导致土壤侵蚀模数较高;而植被覆盖度超过 75% 的区域,由于植被茂盛,土壤具有较强的抗蚀能力,因此侵蚀程度减弱。总体来看,植被覆盖度为 45% ~ 75% 时,强度及以上的侵蚀面积占比较大,达到 11.61% ~ 22.76%,土壤侵蚀模数为 $2\,192 \sim 4\,810\text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$;而当植被覆盖度低于 10% 时,强度及以上的侵蚀面积占比仅为 0.24% ~ 2.37%,土壤侵蚀模数也仅为 $231 \sim 591\text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。

表 10 不同植被覆盖度的土壤侵蚀情况
Tab. 10 Soil erosion of different vegetation coverage

植被 覆盖度	年份	A /[$\text{t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]	不同侵蚀等级面积所占比例/%					
			微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
裸露	2000	230.53	94.47	4.36	0.94	0.15	0.06	0.02
	2010	255.47	94.75	3.88	1.03	0.20	0.10	0.03
	2015	245.09	94.85	3.53	1.18	0.29	0.12	0.03
	2018	590.58	87.08	7.03	3.52	1.44	0.67	0.25
低	2000	1 304.26	73.14	13.28	7.26	3.02	2.07	1.22
	2010	563.77	86.57	8.35	3.24	0.97	0.61	0.26
	2015	430.33	88.93	7.60	2.35	0.65	0.37	0.10
	2018	660.42	85.93	7.97	3.76	1.26	0.75	0.33
中低	2000	3 373.90	50.92	17.97	12.90	6.79	6.17	5.25
	2010	2 323.97	58.98	18.11	11.03	4.98	4.07	2.83
	2015	1 512.60	67.49	16.68	8.38	3.35	2.87	1.23
	2018	1 193.77	76.85	11.37	6.33	2.65	1.80	0.99
中度	2000	3 575.27	56.76	15.29	10.64	5.51	5.43	6.38
	2010	4 681.36	44.04	18.88	14.32	7.29	7.18	8.29
	2015	2 191.58	60.11	18.17	10.11	4.53	4.46	2.62
	2018	3 154.29	56.95	17.31	11.07	5.44	4.75	4.47
中高	2000	3 333.05	60.15	14.87	9.94	4.56	4.53	5.95
	2010	4 810.08	50.96	17.57	11.71	5.42	5.69	8.65
	2015	2 681.02	61.93	16.39	8.41	4.28	4.77	4.23
	2018	4 747.26	51.02	16.71	11.89	6.52	6.05	7.81
高	2000	1 790.85	79.66	8.31	4.54	2.22	2.17	3.10
	2010	3 018.81	73.85	9.96	5.31	2.55	2.83	5.50
	2015	1 942.50	79.14	8.26	3.94	2.25	2.81	3.60
	2018	3 057.52	68.38	12.53	7.31	3.28	3.15	5.35

2.3.2 植被变化对土壤侵蚀的影响

土壤侵蚀是多种因素综合作用的结果,在前文的结果中已发现降雨对土壤侵蚀影响较大,因此,以降雨变化基本一致为前提条件,分析植被变化对土壤侵蚀的影响(见表11、图5)。2000—2018年间,当黄土高原植被覆盖度增加40%以上时,土壤侵蚀程度加剧;当植被覆盖度降低或增加0~30%,且降雨量的变化在-200~100 mm之间时,土壤侵蚀程度减弱;当降雨量减少200 mm以

上或增加100 mm以上时,尽管区域内平均植被覆盖度呈增加趋势,但其土壤侵蚀模数仍表现为增加。综上所述,植被变化对土壤侵蚀的影响是十分复杂的,当植被覆盖度的增加超过40%时,会直接引起侵蚀的加剧;而当植被覆盖度减少或增加不超过30%时,植被变化对土壤侵蚀的影响会小于降雨变化对土壤侵蚀的影响,侵蚀的加剧或减弱可近似看作由降雨量不同程度的变化所引起的。

表11 植被覆盖度不同程度的变化对土壤侵蚀的影响
Tab. 11 The impact of changes in vegetation coverage to different degrees on soil erosion

不同程度降雨量变化	平均植被覆盖度 变化情况	土壤侵蚀模数变化 /[t·(km ² ·a) ⁻¹]	植被覆盖度 不同程度变化	土壤侵蚀模数变化 /[t·(km ² ·a) ⁻¹]
减少200 mm以上	增加6.41%	303.07	降低	530.61
			增加0%~10%	205.06
			增加10%~20%	-967.22
			增加20%~30%	399.73
			增加30%~40%	2 000.41
			增加40%~50%	3 092.49
减少100~200 mm	增加13.65%	-1 073.68	增加50%以上	4 771.37
			降低	-265.33
			增加0%~10%	-446.44
			增加10%~20%	-1 659.51
			增加20%~30%	-2 202.82
			增加30%~40%	-1 211.71
减少0~100 mm	增加10.64%	-1 175.38	增加40%~50%	2 491.43
			增加50%以上	4 202.29
			降低	-657.46
			增加0%~10%	-954.08
			增加10%~20%	-1 724.91
			增加20%~30%	-2 042.24
增加0~100 mm	增加12.29%	-403.79	增加30%~40%	-943.56
			增加40%~50%	1 374.79
			增加50%以上	3 522.83
			降低	-675.23
			增加0%~10%	-467.36
			增加10%~20%	-676.45
增加100~200 mm	增加16.98%	851.83	增加20%~30%	-665.22
			增加30%~40%	345.73
			增加40%~50%	2 482.25
			增加50%以上	1 486.68
			降低	510.66
			增加0%~10%	572.85
			增加10%~20%	641.27
			增加20%~30%	957.95
			增加30%~40%	1 505.74
			增加40%~50%	1 711.31
			增加50%以上	862.41

续表 11

不同程度降雨量变化	平均植被覆盖度 变化情况	土壤侵蚀模数变化 /[t·(km ² ·a) ⁻¹]	植被覆盖度 不同程度变化	土壤侵蚀模数变化 /[t·(km ² ·a) ⁻¹]
增加 200 mm 以上	增加 19.72%	1 778.23	降低	1 056.93
			增加 0% ~ 10%	894.54
			增加 10% ~ 20%	1 014.97
			增加 20% ~ 30%	2 229.83
			增加 30% ~ 40%	2 928.63
			增加 40% ~ 50%	3 148.74
			增加 50% 以上	1 527.69

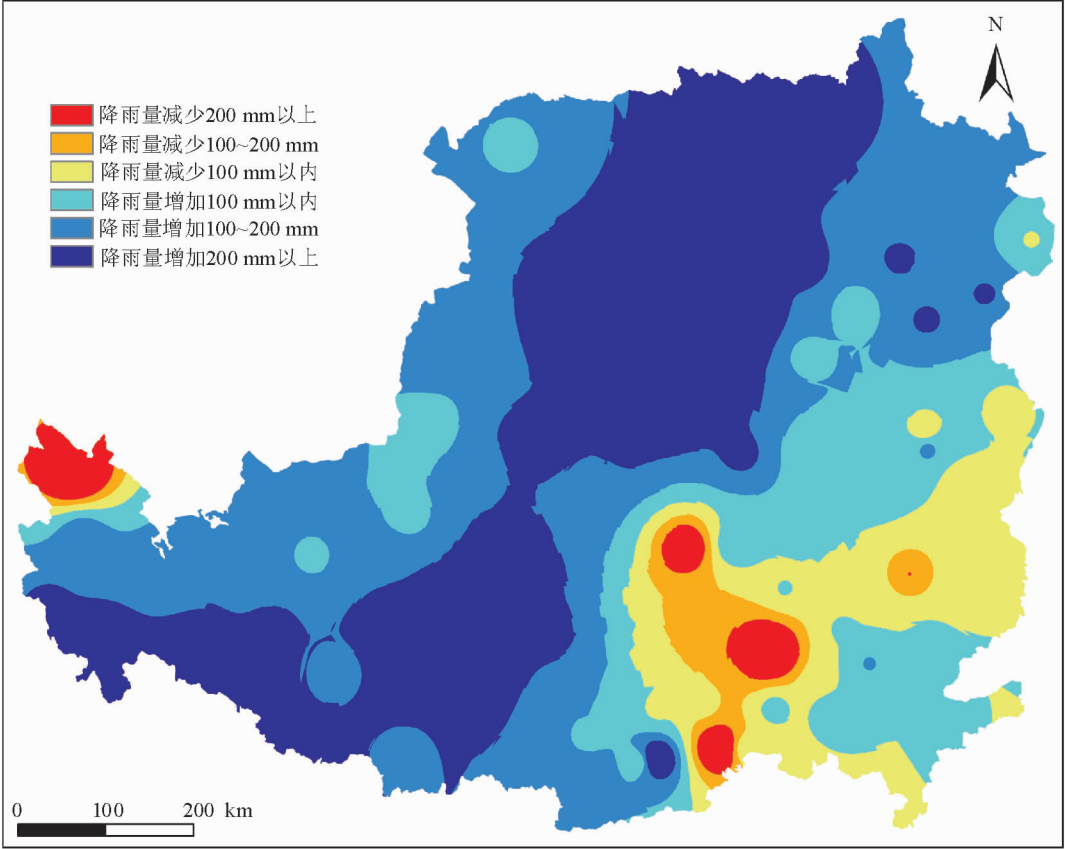


图 5 黄土高原 2000—2018 年降雨量变化分布

Fig. 5 Distribution of rainfall changes on the Loess Plateau from 2000 to 2018

3 讨论与结论

3.1 结论

本文以黄土高原为研究对象,基于像元二分模型和中国土壤流失方程计算得到植被覆盖度及土壤侵蚀模数,在时空尺度上统计分析其各自的变化特征,探究植被变化对土壤侵蚀的影响,得出以下结果。

1) 2000—2018 年黄土高原平均植被覆盖度为 53.11%,整体呈现出由东南向西北逐渐递减的分布格局,19 年间植被覆盖度增幅为 34%,变

化速率为 $-0.044\ 1/a \sim 0.046\ 8/a$,呈显著增加的区域面积占比 62.57%,而呈显著减少的区域面积仅占比 3.38%,平均增速为 $0.006\ 2/a$,整体上黄土高原植被面积显著增加。

2) 2000—2018 年黄土高原平均土壤侵蚀模数为 $2\ 526.27\ t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$,年均土壤侵蚀总量达到 $158.24 \times 10^7\ t$,轻度及以上侵蚀面积占比 34.75%,还需持续加强水土保持工作。同时,土壤侵蚀模数与降雨量呈正相关,但植被覆盖度的增加可以在一定程度上缓解侵蚀的加剧。黄土高原侵蚀程度较强的区域主要集中在丘陵、台地、小起伏山地和大起伏山地,而平原地区的侵蚀程度

最弱。

3)黄土高原土壤侵蚀模数在不同植被覆盖度等级表现不同,植被覆盖度为45%~75%的区域侵蚀程度较强。植被变化对土壤侵蚀的影响十分复杂,当植被覆盖度的增加超过40%时,会直接引起侵蚀的加剧;而当植被覆盖度减少或增加不超过30%时,植被变化对土壤侵蚀的影响小于降雨变化的影响,侵蚀的加剧或减弱可以近似看作由降雨量不同程度的变化所引起的。

3.2 讨论

长期以来,人们一直认为植被具有很强的水土保持效应,20世纪末,随着我国黄土高原开始实施退耕还林还草工程,区域内植被迅速恢复,且生态系统多样性和稳定性也得到提高,土壤侵蚀程度显著降低^[22]。植被的不同部分对水土流失的作用机制存在明显差异,可将其分为植被冠层、枯落物和根系分别进行研究。植被冠层对土壤侵蚀的影响主要表现在对降雨的拦截,通过降低雨滴的动能进而保护土壤结构完整性;其次,冠层部分可增加地表糙率,延长径流流程,削弱地表径流的冲刷力^[23]。当枯落物分布于地表时,其能有效保护土壤团聚体,降低土壤溅蚀量;当枯落物混入土壤后,其长期的分解作用会改变土壤理化性质,增强土壤抗蚀能力^[24]。根系主要通过其力学参数及对土壤理化性质的改变,影响土壤可蚀性,如根系的分泌物可增强土壤颗粒结合,提高结构的稳定性^[25]。

然而,一些学者认为植被恢复并不总是对生态系统具有积极影响,即存在有效覆盖度,当植被覆盖度超过该临界值后,会对土壤的抗蚀性能存在负向效应^[26]。许炯心等的研究也表明^[27],水土保持效益随植被覆盖度的增加呈现先增大后保持不变甚至减小的趋势。究其原因,大面积进行长期的植被恢复会改变区域内土壤的水平衡状态^[28]。植被的生长和蒸散发也会加剧土壤耗水,导致土壤水分枯竭,甚至土地退化^[29]。在植被覆盖度较高的林地,部分雨滴经过冠层截留后再脱落降至地面,其所产生的能量会更大,造成更多的侵蚀^[30]。因此,为了评估植被对调控径流和减少土壤侵蚀的有效性,我们需要权衡多方面的关系,并最终确定适宜的植被恢复策略。

降雨是土壤侵蚀最主要的驱动力之一,可根据土壤侵蚀的发生与否分为侵蚀性降雨和非侵蚀性降雨^[31]。降雨引起的侵蚀主要表现为雨滴对

土壤的冲击导致土壤颗粒飞溅,以及降雨形成地表径流对土壤颗粒进行搬运和沉积^[32]。在侵蚀性降雨中,不同等级的降雨强度对土壤侵蚀的影响并不相同,Jiang等的研究表明^[33],大部分土壤侵蚀通常是由少数几次大雨或暴雨所引起的。除降雨强度外,降雨的持续时间也是影响土壤侵蚀和地表径流的重要因素,当降雨与土壤表面进行相互作用时,高强度且短时的降雨会更容易使地表形成结皮,进而降低入渗率并增加地表径流,导致产沙增加^[34]。

不同地形的土壤侵蚀存在明显差异,坡度作为土壤侵蚀预报模型中重要的地形因子,通过影响降雨入渗量,改变土壤颗粒的结合能力,进而影响坡面土壤侵蚀^[35]。在赵蒙恩等的研究中^[36],坡度是决定土壤侵蚀状况的主导因子;王婷等的研究结果显示^[37],土壤侵蚀程度与坡度呈正相关,坡度的增加会缩短坡面产流的时间,进而导致径流量和产沙量增加;但张龙齐等认为^[38],土壤侵蚀量不会随坡度的增加一直呈正相关,而是存在一个临界坡度,当坡度超过临界坡度时,坡面承雨量的降低对坡面径流的削弱作用会占主导地位,导致土壤侵蚀量减少。此外,降雨强度也会影响临界坡度,导致坡度对土壤侵蚀的影响仍是一个争议问题^[39]。

土壤侵蚀除了受植被、降雨、地形等影响外,还取决于土壤的理化性质,在土壤侵蚀预报模型中通常用土壤可蚀性进行衡量。不同的土地利用类型其土壤理化性质也不同,韩子琳等对不同土地利用类型的土壤侵蚀模数进行比较后^[40],结果显示耕地>其他用地>林地>建设用地>水域;陈森等的研究结果也表明^[41],在相同条件下,裸地的侵蚀量>耕地的侵蚀量>林地的侵蚀量。除此之外,土地利用的变化也会改变土壤的理化性质,进而影响土壤可蚀性,导致土壤侵蚀程度加剧或减弱^[42]。张洋等的研究结果显示^[43],当草地转化为林地或耕地时,土壤侵蚀程度降低;陈森等发现林地转裸地、林地转耕地和耕地转裸地时土壤侵蚀量增加^[41],而裸地转林地、耕地转林地和裸地转耕地时土壤侵蚀量则减少。

最后,CSLE模型是计算面蚀强度的经验方程,无法充分反映沟蚀、风蚀和重力侵蚀所产生的影响,因此计算得到的土壤侵蚀模数可能偏低^[44],要消除该误差还需基于实地检测数据对CSLE模型进行修正。

参考文献

- [1] 李倩茹,贾彦龙,王慧军,等. 基于生态功能区的河北省生态系统服务权衡与协同分析[J]. 地理学报, 2023,78(11):2833-2849.
- LI Q R, JIA Y L, WANG H J, et al. Balancing and collaborative analysis of ecosystem services in Hebei Province based on ecological function zones[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023,78(11):2833-2849.
- [2] 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. The evolution of soil erosion patterns and their driving mechanisms on the Loess Plateau from 1901 to 2016[J]. *Yellow River*, 2022,44(9):36-45.
- [3] 邓蕾,王凯博,汪晓珍,等. 黄河流域黄土高原水土保持与高质量发展:成效、问题与对策[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2024,52(1):1-7.
- DENG L, WANG K B, WANG X Z, et al. Soil and water conservation and high quality development in the Yellow River Basin Loess Plateau: Effectiveness, problems and countermeasures[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2024,52(1):1-7.
- [4] 蔡强国,陆兆熊,王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型[J]. 地理学报, 1996,51(2):108-117.
- CAI Q G, LU Z X, WANG G P. A model for erosion and sediment production process in typical small watersheds in Loess Hilly and gully areas[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996,51(2):108-117.
- [5] LIU B Y, ZHANG K L, XIE Y. An empirical soil loss equation[C] // *Sustainable Utilization of Global Soil and Water Resources*, 2002,2:21-25.
- [6] 张光辉. 对土壤侵蚀研究的几点思考[J]. 水土保持学报, 2020,34(4):21-30.
- ZHANG G H. Several thoughts on soil erosion research[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(4):21-30.
- [7] LIU F, ZHANG G H, WANG H. Effects of biological soil crusts on soil detachment process by overland flow in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Land Forms*, 2016,41(7):875-883.
- [8] WANG L J, ZHANG G H, WANG X, et al. Soil loss: Effects of plant litter incorporation rate under simulated rainfall conditions[J]. *Land Degradation and Development*, 2019,30:1293-1302.
- [9] 妙旭华,赵晓阔. 基于生态系统服务价值的陇东黄土高原生态补偿研究[J]. 中国水土保持, 2023(5):61-65,7.
- MIAO X H, ZHAO X Q. Research on ecological compensation in the loess plateau of Longdong Based on the value of ecosystem services[J]. *China Soil and Water Conservation*, 2023(5):61-65,7.
- [10] 郭永强,王乃江,褚晓升,等. 基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J]. 中国环境科学, 2019,39(11):4804-4811.
- GUO Y Q, WANG N J, CHU X S, et al. Analysis of vegetation cover changes and their causes on the Loess Plateau based on google earth engine[J]. *Chinese Environmental Science*, 2019,39(11):4804-4811.
- [11] 杜军,李洪涛,马玉凤,等. 河南省丹江口水库汇水区土壤侵蚀动态变化[J]. 河南科学, 2018,36(6):898-903.
- DU J, LI H T, MA Y F, et al. Dynamic changes in soil erosion in the catchment area of Danjiangkou Reservoir in Henan Province[J]. *Henan Science*, 2018,36(6):898-903.
- [12] 徐相忠,刘前进,张含玉. 降雨类型与坡度对棕壤垄沟系统产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2020,34(4):56-62.
- XU X Z, LIU Q J, ZHANG H Y. The effects of rainfall types and slopes on runoff and sediment production in brown soil ridge and gully systems[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(4):56-62.
- [13] 洪增林,成星,张瑜,等. 黄土高原碳汇系统研究展望[J]. 西北地质, 2023,56(3):39-50.
- HONG Z L, CHENG X, ZHANG Y, et al. Outlook on carbon sequestration system research in the Loess Plateau[J]. *Northwest Geology*, 2023,56(3):39-50.
- [14] 路慧萍,董刚,赵芳媛,等. 气候因子对黄土高原植被的影响[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2018,41(3):626-635.
- LU H P, DONG G, ZHAO F Y, et al. The impact of climate factors on vegetation on the Loess Plateau[J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2018,41(3):626-635.
- [15] 卢珊,胡泽勇,付春伟,等. 黄土高原夏季极端降水及其成因分析[J]. 高原气象, 2022,41(1):241-254.
- LU S, HU Z Y, FU C W, et al. Analysis of extreme summer precipitation and its causes on the Loess Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2022,41(1):241-254.
- [16] CAO B W, LI W, ZHAO Y Y, et al. A 30-meter terrace mapping in China using landsat 8 imagery and

- digital elevation model based on the google earth engine [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13: 24372456.
- [17] 贺洁,何亮,吕渡,等. 2001—2020 年黄土高原光合植被时空变化及其驱动机制[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(3): 306-318.
- HE J, HE L, LYU D, et al. The spatiotemporal changes and driving mechanisms of photosynthetic vegetation on the Loess Plateau from 2001 to 2020[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(3): 306-318.
- [18] 王一,郝利娜,许强,等. 2001—2019 年黄土高原植被覆盖度时空演化特征及地理因子解析[J]. *生态学报*, 2023, 43(6): 2397-2407.
- WANG Y, HAO L N, XU Q, et al. The spatiotemporal evolution characteristics and geographical factor analysis of vegetation coverage on the Loess Plateau from 2001 to 2019 [J]. *Journal of Ecology*, 2023, 43(6): 2397-2407.
- [19] 齐斐,张春强,刘霞,等. 基于 M-K 检验和地统计分析的沂蒙山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(5): 146-153.
- QI F, ZHANG C Q, LIU X, et al. Research on the spatiotemporal variation trend of rainfall erosivity in Yimeng Mountain area based on M-K test and geostatistical analysis [J]. *Soil and Water Conservation Bulletin*, 2021, 41(5): 146-153.
- [20] 李倩茹,贾彦龙,王慧军,等. 基于生态功能区的河北省生态系统服务权衡与协同分析[J]. *地理学报*, 2023, 78(11): 2833-2849.
- LI Q R, JIA Y L, WANG H J, et al. Balancing and collaborative analysis of ecosystem services in Hebei Province based on ecological function zones [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(11): 2833-2849.
- [21] BORRELLI P, ROBINSON D A, FLEISCHER L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 2013.
- [22] 田培,毛梦培,潘成忠. 植被调控水土流失机制研究进展及展望[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2024, 22(1): 131-140.
- TIAN P, MAO M P, PAN C Z. Research progress and prospects on the mechanism of vegetation regulation of soil erosion [J]. *Chinese Soil and Water Conservation Science*, 2024, 22(1): 131-140.
- [23] YU Y, ZHAO W, MARTINEZ M, et al. Loess Plateau, from degradation to restoration [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 140206.
- [24] SUN L, ZHANG G H, LIU F, et al. Effects of incorporated plant litter on soil resistance to flowing water erosion in the Loess Plateau of China [J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 147: 238-247.
- [25] 魏瑶瑶,王俊,张永旺,等. 黄土高原不同植被类型土壤入渗特征研究[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(2): 16-20.
- WEI Y Y, WANG J, ZHANG Y W, et al. Research on soil infiltration characteristics of different vegetation types in the Loess Plateau [J]. *Journal of Yan'an University (Natural Science Edition)*, 2021, 40(2): 16-20.
- [26] 郭忠升. 水土保持植被的有效盖度、临界盖度和潜在盖度[J]. *水土保持通报*, 2000, 20(2): 60-62.
- GUO Z S. The effective coverage, critical coverage, and potential coverage of soil and water conservation vegetation [J]. *Soil and Water Conservation Bulletin*, 2000, 20(2): 60-62.
- [27] 许炯心,孙季. 无定河水土保持措施减沙效益的临界现象及其意义[J]. *水科学进展*, 2006, 17(5): 610-615.
- XU J X, SUN J. The critical phenomenon and significance of sediment reduction benefits of soil and water conservation measures in Wuding River [J]. *Progress in Water Science*, 2006, 17(5): 610-615.
- [28] FENG X, VICO G, PORPORATO A. On the effects of seasonality on soil water balance and plant growth [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(5): 1-12.
- [29] JIANG C, ZHANG H Y, ZHAO L L, et al. Unfolding the effectiveness of ecological restoration programs in combating land degradation: Achievements, causes, and implications [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 748: 141552.
- [30] 张龙齐,贾国栋,吕相融,等. 黄土高原典型地区不同植被覆盖下坡面土壤侵蚀阈值研究[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 187-198.
- ZHANG L Q, JIA G D, LYU X R, et al. A study on soil erosion thresholds on slopes under different vegetation cover in typical areas of the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 187-198.
- [31] 何小武,肖屿昆,王艳艳,等. 鄱阳湖流域次降雨等级及其对降雨侵蚀力的贡献[J]. *江西农业大学学报*, 2023, 45(6): 1588-1600.
- HE X W, XIAO Y K, WANG Y Y, et al. Secondary rainfall levels and their contribution to rainfall erosivity in the Poyang Lake Basin [J]. *Journal of Jiangxi Agricultural University*, 2023, 45(6): 1588-1600.
- [32] 渠立,陈菲菲,方圆,等. 不同降雨模式对径流和土

- 壤侵蚀的影响研究[J]. 地下水,2023,45(5):219-220.
- QYU L, CHEN F F, FANG Y, et al. A study on the effects of different rainfall patterns on runoff and soil erosion[J]. Groundwater,2023,45(5):219-220.
- [33] JIANG C, LIU J G, ZHANG H Y, et al. China's progress towards sustainable land degradation control: Insights from the northwest arid regions[J]. Ecological Engineering,2019,127:75-87.
- [34] 刘宏志. 植被和降雨类型对地表径流和土壤侵蚀的影响研究[J]. 陕西水利,2023(10):112-114.
- LIU H Z. A study on the effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion [J]. Shaanxi Water Conservancy,2023(10):112-114.
- [35] 陆淑宁,张泽瑜,李荣融,等. 等高耕作对不同坡度坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报,2023,37(2):37-44.
- LU S N, ZHANG Z Y, LI R R, et al. The effect of contour cultivation on soil erosion process on slopes with different slopes [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(2):37-44.
- [36] 赵蒙恩,闫庆武,刘政婷,等. 鄂尔多斯市土壤侵蚀时空演变及影响因子分析[J]. 干旱区研究,2022,39(6):1819-1831.
- ZHAO M E, YAN Q W, LIU Z T, et al. Analysis of spatiotemporal evolution and influencing factors of soil erosion in Ordos City[J]. Research on Arid Areas, 2022,39(6):1819-1831.
- [37] 王婷,陆忠军,宁静,等. 基于 RUSLE 的黑土区典型县域土壤侵蚀时空变化特征研究[J]. 水土保持通报,2023,43(5):227-234.
- WANG T, LU Z J, NING J, et al. Research on the spatiotemporal variation characteristics of soil erosion in typical counties in black soil areas based on RUSLE [J]. Soil and Water Conservation Bulletin,2023,43(5):227-234.
- [38] 张龙齐,贾国栋,吕相融,等. 控制坡度条件下黄土高原不同质地坡面土壤侵蚀研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2023,51(6):11-24.
- ZHANG L Q, JIA G D, LYU X R, et al. Study on soil erosion of different texture slopes on the Loess Plateau under controlled slope conditions [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition),2023,51(6):11-24.
- [39] 王玉宽,王勇强,傅斌,等. 紫色土坡面降雨侵蚀试验研究[J]. 山地学报,2006,24(5):597-600.
- WANG Y K, WANG Y Q, FU B, et al. Experimental study on rainfall erosion on purple soil slopes [J]. Journal of Mountain Science,2006,24(5):597-600.
- [40] 韩子琳,李正则,张蕾,等. 2000—2020 年海伦市土壤侵蚀时空变化分析[J]. 国土与自然资源研究,2023(5):24-30.
- HAN Z L, LI Z Z, ZHANG L, et al. Analysis of spatiotemporal changes in soil erosion in Helen City from 2000 to 2020 [J]. Land and Natural Resources Research,2023(5):24-30.
- [41] 陈森,汪小钦,林敬兰,等. 土地利用和植被覆盖变化对长汀县 30 多年土壤侵蚀变化的定量影响[J]. 水土保持学报,2023,37(5):168-177,188.
- CHEN M, WANG X Q, LIN J L, et al. Quantitative impact of land use and vegetation cover changes on soil erosion in Changting County over 30 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5):168-177,188
- [42] 王伟,曹怡平,张力. 土地利用对土壤可蚀性 K 值的影响分析:基于第二次全国土壤普查数据[J]. 绿色科技,2023,25(16):94-98.
- WANG W, CAO Y P, ZHANG L. Analysis of the impact of land use on soil erodibility K value-based on data from the second national soil survey [J]. Green Technology,2023,25(16):94-98.
- [43] 张洋,李鹏,马文东,等. 黄河上游西柳沟流域土壤侵蚀对土地利用变化响应[J]. 水土保持研究,2022,29(5):70-76,84.
- ZHANG Y, LI P, MA W D, et al. The response of soil erosion to land use change in the Xiliugou watershed of the upper reaches of the Yellow River[J]. Research on Soil and Water Conservation,2022,29(5):70-76,84.
- [44] 何维灿,赵尚民,王睿博,等. 基于 GIS 和 CSLE 的山西省土壤侵蚀风险研究[J]. 水土保持研究,2016,23(3):58-64.
- HE W C, ZHAO S M, WANG R B, et al. Research on soil erosion risk in Shanxi Province based on GIS and CSLE[J]. Research on Soil and Water Conservation,2016,23(3):58-64.

(编辑 李波)