

2018—2022 年陕西省关中地区土壤侵蚀时空分布

朱相君, 王传明, 李雄飞, 方利胜, 张金钟, 杨 恺, 刘政鸿

(陕西省水土保持生态环境监测中心, 陕西 西安 710000)

摘 要: [目的] 研究关中地区土壤侵蚀时空分布特征, 为制定精准有效的水土流失防治政策提供科学参考。[方法] 基于中国土壤水土流失方程 CSLE (Chinese soil loss equation) 计算土壤侵蚀模数, 采用 ArcGIS 的区域分析和叠加方法, 分析关中地区土壤侵蚀时空分布特征, 土地利用类型、坡度及植被覆盖度对土壤侵蚀的影响。[结果] ① 2018—2022 年, 关中地区水土流失面积减少了 568.67 km², 土壤侵蚀等级主要由中度及以上类型转移为微度和轻度。② 关中地区土壤侵蚀呈现南北高中间低的分布特征。微度是关中地区主要的侵蚀类型; 5 a 间, 微度及轻度侵蚀范围呈现从中间向两端扩大的趋势, 强度及以上侵蚀范围则逐渐缩小。③ 8°~25° 坡度带土壤侵蚀对坡度的敏感性较强; 小于 8° 区域土壤侵蚀对坡度的敏感性较弱。④ 2018—2022 年林地高覆盖度区域水土流失减少面积比例为 72.60%, 是引起水土流失面积减少的主要原因。⑤ 林地及耕地是研究区土壤侵蚀发生的主要土地利用类型。[结论] 关中地区呈现水土流失面积减少和高等级侵蚀强度比例减少的双下降趋势, 土壤侵蚀状况好转。8°~25° 坡度带是进行坡耕地治理时需要重点关注的区域; 高覆盖林地对于减少水土流失面积至关重要。

关键词: 土壤侵蚀; 中国土壤水土流失方程 (CSLE); 土地利用; 时空分布; 关中地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0224-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 朱相君, 王传明, 李雄飞, 等. 2018—2022 年陕西省关中地区土壤侵蚀时空分布 [J]. 水土保持通报, 2025, 45 (3): 224-232. Zhu Xiangjun, Wang Chuanming, Li Xiongfei, et al. Temporal and spatial distribution of soil erosion in Guanzhong region of Shaanxi Province from 2018 to 2022 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45 (3): 224-232. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.015; CSTR: 32312.14.stbctb. 2025.03.015.

Temporal and spatial distribution of soil erosion in Guanzhong region of Shaanxi Province from 2018 to 2022

Zhu Xiangjun, Wang Chuanming, Li Xiongfei, Fang Lisheng, Zhang Jinzhong, Yang Kai, Liu Zhenghong

(Shaanxi Province Soil and Water Conservation Ecological Environment Monitoring Center, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial distribution characteristics of soil erosion in the Guanzhong region were studied, in order to provide a scientific reference for formulating accurate and effective prevention and control policies for soil erosion. [Methods] Based on the Chinese soil loss equation (CSLE), the soil erosion modulus was calculated. Using ArcGIS for regional analysis and overlay methods, the spatiotemporal distribution characteristics of soil erosion in the Guanzhong region were analyzed, along with the effects of land use type, slope, and vegetation coverage on soil erosion. [Results] ① From 2018 to 2022, the area of soil erosion in Guanzhong region decreased by 568.67 km² and the soil erosion grade shifted mainly from moderate and above to slight and mild. ② The spatial distribution of soil erosion in the Guanzhong region was higher in the north and south, but lower in the center. Mild soil erosion is the main type of erosion. Over the past five years, the range of slight and mild erosion has shown a tendency to expand from the middle to the north and south sides, but the range of erosion levels of severe and above has gradually narrowed. ③ The sensitivity of soil erosion to slope was stronger in the 8°—25° slope zone, while it was weaker in areas with slopes less than 8°. ④ From 2018 to 2022, the proportion of reduced soil and water loss in high-coverage forest areas was 72.60%, which was the main

收稿日期: 2024-03-07

修回日期: 2024-06-26

采用日期: 2024-06-27

资助项目: 陕西省省级水土流失动态监测项目

第一作者: 朱相君 (1996—), 女 (汉族), 甘肃省民乐县人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持方面的研究。Email: 2236819681@qq.com。

通信作者: 王传明 (1976—), 男 (汉族), 山东省郯城县人, 学士, 高级工程师, 主要从事水土保持方面的研究。Email: 123049146@qq.com。

reason for the decrease in areas of soil and water loss. ⑤ Forestland and croplands were the primary land-use types where soil erosion occurred in the study area. [Conclusion] Guanzhong region showed a double downward trend of reduced soil erosion area and reduced proportion of high-grade erosion intensity, indicating that the soil erosion situation has improved. The 8° — 25° slope zone is a key area for sloped farmland management. High-coverage forests are crucial for reducing soil and water loss.

Keywords: soil erosion; Chinese soil loss equation (CSLE); land use; spatiotemporal distribution; Guanzhong region

土壤侵蚀是土壤被水、风等外营力消损的过程,是发生在陆地表面自然与经济因素交互耦合的复杂地理过程^[1-2]。土壤侵蚀破坏土壤结构,降低土壤肥力,进而导致土地生产力下降,还会造成水质恶化、河湖淤积等一系列问题,严重影响区域生态安全^[3-5]。因此,探索土壤侵蚀的时空变化特征及其主要影响因素,进而实施有效措施,对于保护土壤资源、修复生态环境具有重要科学意义^[6-7]。目前,土壤侵蚀模型已被广泛用于区域土壤侵蚀成因、过程机理及其定量评价等研究中^[8-10]。其中,刘宝元^[11]提出的中国土壤流失方程(Chinese soil loss equation, CSLE)在中国被广泛应用。该模型基于黄土丘陵沟壑区的部分径流小区的监测数据进行修正,充分考虑了中国的地貌特征,在西南喀斯特区^[12]、南方红壤区^[13]、西北黄土高原区^[14]以及东北黑土地区^[15]的土壤侵蚀研究方面应用最多。随着研究的深入,不少学者基于CSLE模型探究了土壤侵蚀分布规律,发现土壤侵蚀强度与坡度^[16]、人类活动^[17]、土地利用及植被覆盖等^[18-19]密切相关。如马亚亚等^[14]研究了陕北纸坊沟流域的土壤侵蚀,发现 15° ~ 25° 的坡耕地是土壤侵蚀的敏感部位;陈羽璇等^[13]研究了珠江流域的土壤侵蚀,发现土地利用类型是影响土壤侵蚀的主控因子;张龙齐等^[20]研究了黄土高原典型地区不同植被覆盖下对坡面土壤侵蚀的影响,表明植被覆盖的增加可以有效减少土壤侵蚀,植被控制土壤侵蚀存在明显的阈值。

综上所述,已有的研究多集中在流域、陕北或黄土高原等主要以自然因素为主导的水土流失地区,而对人口密度大、经济发展压力大的平原地区研究相对欠缺。关中地区是陕西省重要的工业、科技、教育、经济及农业产区,至2022年,土地面积占陕西省比重约为27%的关中地区,其人口及GDP所占比例却高达60%以上^[21],较高的人口聚集及经济发展也给生态环境造成了巨大压力,土壤侵蚀等水土流失问题比较突出^[22-23],也直接影响陕西省生态经济可持续发展。因此研究关中地区土壤侵蚀规律,进而提出针对性的对策,对于提升关中地区乃至陕西省的水土保持率具有重要的实践指导意义。2018年,水利部印发《全国水土流失动态监测规划(2018—2022

年)》,为关中地区短期水土流失防治提供了支撑,指明了目标。基于此,本文选取规划中的2018—2022年为研究年限,采用陕西省水土流失动态监测数据,基于CSLE模型,定量研究关中地区土壤侵蚀状况及不同土地利用、不同植被覆盖和不同坡度下的土壤侵蚀状况,并根据研究结果提出针对性的对策,为关中地区水土保持及生态文明建设提供科学参考。

1 研究区概况

关中地区地处陕西省中部,南依秦岭北麓,北接陕北高原,中部为关中盆地,区内主要水系由渭河、洛河及泾河等支流构成,其中渭河横贯关中盆地,河槽地势平坦,从渭河向南北两侧,地势呈不对称阶梯升高,地势总体西高、东低,南北高、中间低;年均温度在 9.9° ~ 15.8° ,年均降水为500~700 mm,雨热同期,为大陆性季风气候^[24]。关中地区包括西安、咸阳、铜川、宝鸡、渭南5市及杨凌农业高新技术产业示范区,共辖54个县,面积约 5.50×10^4 km²。2022年关中地区生产总值为19 753.84亿元,占陕西省的比重为60.27%,常住人口为2 581万人,占陕西省的比重为65.24%。关中地区不仅是陕西省的经济中心和人口聚集区,同时也是全国重要的交通枢纽。目前关中地区已形成“米”字形构架的交通网络,交通网以西安市为中心呈放射状向外围地区延伸,整体呈不规则环状分布^[25],其中关中地区中部地势平坦,交通设施基础条件好,交通网密集,人口密度大,秦岭北麓及陕北高原坡度大,交通线路较为稀疏,人口密度小。

2 数据来源与处理

所用数据包括遥感影像数据、降水数据、DEM数据及行政区数据等。其中,遥感影像数据包括土地利用影像数据、MODIS-NDVI数据及30 m TM影像修正系数。数据来源包括:①2018—2022年的土地利用遥感影像数据:来自水利部监测中心,分辨率为2 m。通过目视解译及野外验证相结合的方式生成8个1级类及25个二级类土地利用数据,本文中主要涉及8个土地利用一级类;②MODIS-NDVI数据及Landsat 8多光谱影像:选取每个研究年前3 a的影像

进行处理及计算。本次下载了 2015—2021 年每个半月 250 m 分辨率的 MODIS-NDVI 数据 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 影像利用 MRT 进行拼接、裁剪及投影, 对于有云及质量不佳的区域, 进行最大值合成法处理, 预处理后基于像元二分法计算植被覆盖度 (FVC), 进而计算 3 a 平均 24 个半月的 FVC; ③ 30 m 分辨率 24 个半月的 TM 影像修正系数由部中心共享。基于 MODIS 影像计算的 FVC 与 TM 影像修正系数相乘即得到 3 a 平均 24 个半月的 30 m 分辨率的 FVC。④ 降水数据。收集 1986—2015 年涉及关中 54 个县的站点逐日降雨数据, 通过数据插值, 获取 30 a 的逐日降水数据。⑤ 行政区数据。采取民政部官网公布的 2020 年全国行政区划的县界。⑥ DEM 数据: 空间分辨率为 30 m (<https://www.gscloud.cn/>), 进行坡度及坡长因子的计算。

3 研究方法

本研究采用刘宝元提出的中国土壤水土流失方程 CSLE (Chinese soil loss equation) 计算土壤侵蚀模数。方程基本形式为:

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 为降雨侵蚀力因子 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; K 为土壤可蚀性因子 [$t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$]; L 为坡长因子; S 为坡度因子; B 为植被覆盖与生物措施因子; E 为工程措施因子; T 为耕作措施因子, 以上 6 因子均无量纲。

降雨侵蚀力因子 R 计算公式为:

$$\bar{R} = \sum_{k=1}^{24} \bar{R}_{\text{半月}k} \quad (2)$$

$$\bar{R}_{\text{半月}k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^m (\alpha P_{i,j,k}^{1.7265}) \quad (3)$$

$$\overline{WR}_{\text{半月}k} = \frac{\bar{R}_{\text{半月}k}}{\bar{R}} \quad (4)$$

式中: \bar{R} 为多年平均年降雨侵蚀力 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; k 为 1, 2, ..., 24 个半月数; $\bar{R}_{\text{半月}k}$ 为第 k 个半月的降雨侵蚀力 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; i 为 1, 2, ..., N ; N 指 1986—2015 年的时间; j 为 0, 1, 2, ..., m ; m 为第 i 年第 k 个半月侵蚀性降雨日数量 (日降雨量 ≥ 10 mm); $P_{i,j,k}$ 为第 i 年第 k 个半月第 j 个侵蚀性日降雨量 (mm); α 为参数, 暖季 (5—9 月) $\alpha=0.3937$, 冷季 (10—12 月及 1—4 月) $\alpha=0.3101$; $\overline{WR}_{\text{半月}k}$ 为第 k 个半月平均降雨侵蚀力占多年平均降雨侵蚀力的比例^[26]。

K 因子采用第一次全国水利普查水土保持情况普查土壤可蚀性成果^[27]。 L, S 因子基于 DEM 数据,

根据坡长坡度因子计算工具得到^[28-29]。 B 因子值为 24 个半月降雨侵蚀力比例数据与土壤流失比例数据乘积的加和^[30]。其中, 园林草 B 因子值采取公式计算, 其他土地利用类型查询 B 因子赋值表获取^[31]。

园林草 B 因子计算公式:

$$B = \sum_{i=1}^{24} SLR_i \cdot WR_i \quad (5)$$

式中: WR_i 为第 i 个半月降雨侵蚀力占全年降雨侵蚀力的比值; SLR_i 为第 i 个半月园地、林地和草地土壤侵蚀比例, 其计算公式为:

茶园及灌木林地 SLR_i 计算公式:

$$SLR_i = \frac{1}{1.17647 + 0.86242 \times 1.05905^{100 \times FVC}} \quad (6)$$

果园、其他园地、有林地和其他林地 SLR_i 计算公式:

$$SLR_i = \frac{0.44468 \times e^{(-3.20096 \times GD)} - 0.04099 \times e^{(FVC - FVC \times GD)} + 0.025}{0.04099 \times e^{(FVC - FVC \times GD)} + 0.025} \quad (7)$$

草地 SLR_i 计算公式:

$$SLR_i = \frac{1}{1.25 + 0.78845 \times 1.05968^{100 \times FVC}} \quad (8)$$

式中: FVC 为数据预处理后计算得到的 3 a 平均 24 个半月的植被覆盖度; GD 为乔木林的林下盖度, 通过实地调查取得。

E 因子值基于土地利用属性表中的水保措施, 查询水保措施因子赋值表获取^[31]。 T 因子值结合土地利用数据, 查询耕作措施轮作措施赋值表获取^[31]。

根据《区域水土流失动态监测技术规范 (试行)》^[31] 规定, 上述 7 因子在计算时均重采样为 10 m 空间分辨率的栅格数据, 通过栅格计算器相乘获得土壤侵蚀模数 A , 并依据《土壤侵蚀分类分级标准 (SL 190—2007)》^[32], 划分土壤侵蚀强度等级。

4 结果与分析

4.1 土壤侵蚀时空分布特征

利用公式 (1) 计算得到 2018—2022 年关中地区的土壤侵蚀模数, 并依据《土壤侵蚀分类分级标准 (SL 190—2007)》, 划分 6 类土壤侵蚀强度等级, 分别是微度、轻度、中度、强烈、极强烈以及剧烈侵蚀。水力侵蚀面积为轻度及以上侵蚀类型面积的总和。由表 1 可以看出, 2018—2022 年关中地区土壤侵蚀以微度为主, 所占比例超过 78%。水土流失面积减少了 568.67 km², 其中强烈及以上侵蚀类型比例呈不同程度的下降趋势, 这说明近年来关中地区土壤侵蚀强度以微度为主, 且呈现水土流失面积减少和高等级侵蚀强度比例减少的双下降趋势, 土壤侵蚀状况在逐步改善。

表1 关中地区不同类型土壤侵蚀所占比例

Table 1 Proportion of different types of soil erosion in Guanzhong region

年份	占土地总面积比例/%		占水力侵蚀面积比例/%				
	微度侵蚀	水力侵蚀	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
2018	77.87	22.13	70.30	19.75	6.86	2.66	0.43
2020	78.39	21.61	76.56	15.78	4.82	2.54	0.30
2022	78.89	21.11	77.74	15.56	4.23	2.24	0.23

从空间分布来看(图1),2018—2022年关中地区土壤侵蚀空间分布呈现“南北高,中间低”的分布特征。其中微度、轻度及中度多呈片状分布;强烈及以上侵蚀则呈点状或条带状分布,其分布范围由易受人

类影响的平原区及海拔较高,坡度较陡的区域转向关中盆地与秦岭北麓的接壤区域。从空间分布变化来看,关中地区微度及轻度侵蚀范围呈现从中间向两端扩大的趋势,强度及以上侵蚀范围则逐渐缩小。

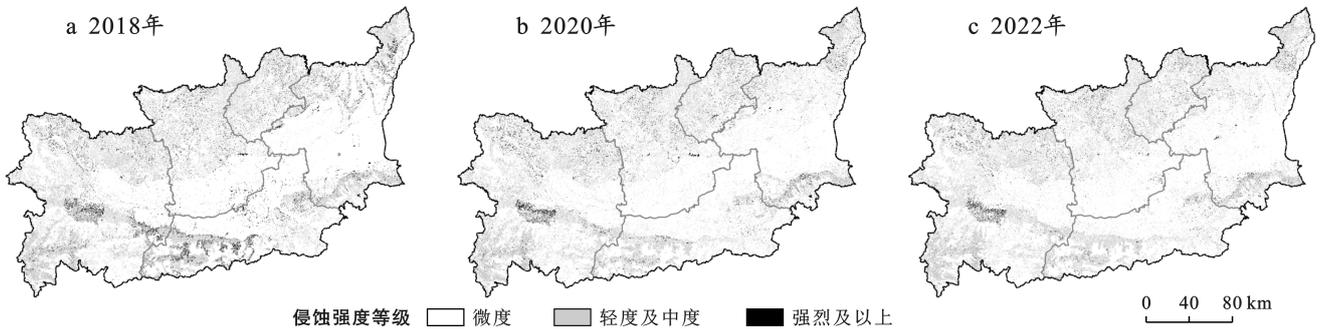


图1 关中地区土壤侵蚀强度空间分布

Fig.1 Spatial distribution of soil erosion intensity in Guanzhong region

为了深入分析关中地区土壤侵蚀状况,基于2018—2022年的侵蚀数据计算土壤侵蚀强度转移矩阵。由表2可知,2018—2022年关中地区78.43%的土地未发生侵蚀强度转移,仅有21.57%的土地发生侵蚀转移。其中,侵蚀强度降低面积比例为12.61%,侵蚀强度升高面积比例为8.97%,表明5 a间关中地区土壤侵蚀状况呈现稳中向好的趋势。从各强度转移面积来看,微度及轻度是转入面积较大的两种土壤侵蚀类型,其中微度侵蚀的主要来源是轻度,轻度侵蚀的主要来源是微度及中度。中度及强烈是转出

面积较大的两种土壤侵蚀类型,主要转入类型为微度及轻度。整体来看,土壤侵蚀呈现由高强度向低强度转移的趋势,但仍存在由微度、轻度向中度转移的现象;从转移速率来看,强烈和剧烈侵蚀减少速率高于50%,中度减少速率高于30%,微度和轻度变化速率低于10%。表明高强度土壤侵蚀减少速率显著,这一方面是因为退耕还林还草及坡耕地改造等水保工程起到了重要作用,另一方面也是由于高强度土壤侵蚀基数小,轻微的变化就会导致较高的变化率。

表2 2018—2022年关中地区土壤侵蚀强度转移矩阵

Table 2 Transfer matrix of soil erosion intensity in Guanzhong region from 2018 to 2022

km²

侵蚀强度	2018年面积							
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	合计	
2022年面积	微度	38 514.08	3 793.37	799.04	431.25	131.81	26.24	43 695.79
	轻度	3 507.90	4 090.92	1 033.98	340.86	97.71	13.48	9 084.85
	中度	468.26	408.21	676.10	217.75	45.88	5.75	1 821.94
	强烈	150.59	80.46	112.15	109.82	37.50	5.40	495.93
	极强烈	56.02	32.05	48.43	76.52	45.79	4.26	263.07
	剧烈	6.99	3.38	3.45	3.94	7.45	2.46	27.68
	合计	42 703.84	8 408.40	2 673.16	1 180.14	366.13	57.59	55 389.26
面积变化	991.95	676.46	-851.22	-684.21	-103.07	-29.91	—	

4.2 不同坡度土壤侵蚀变化分析

基于DEM数据提取坡度,依据水利部关于水土

保持坡度等级划分标准将坡度划分为6类($\leq 5^\circ$, $5^\circ \sim 8^\circ$, $8^\circ \sim 15^\circ$, $15^\circ \sim 25^\circ$, $25^\circ \sim 35^\circ$, $> 35^\circ$)。对土壤侵蚀数

据与坡度数据进行叠加分析,得到不同坡度土壤侵蚀状况。为准确客观衡量的水土流失情况,本研究计算不同坡度带水土流失面积与土地面积的比值进行分析。计算发现, $<25^\circ$ 区域水土流失情况比值为17.71%, $>25^\circ$ 坡度带水土流失情况比值为36.78%。表明 $>25^\circ$ 坡度带更易发生水土流失现象。结合实际及土地利用数据分析发现, $>25^\circ$ 区域土地比例仅为22.52%,且主要为林地,受人类活动影响较小,故不作具体分析,而 $<25^\circ$ 区域土地比例为77.47%,且为人类生产生活密集区,故对此坡度带做进一步分析。分析发现, $<25^\circ$ 坡度带水土流失比例为62.36%,且以轻度为主,其中, $<5^\circ$, $5^\circ\sim 8^\circ$, $8^\circ\sim 15^\circ$ 及 $15^\circ\sim 25^\circ$ 坡度带水土流失情况比值依次为13.29%,13.23%,20.73%及29.40%。数据表明 $<25^\circ$ 坡度带是以轻度为主的水土流失发生的主要区域,在具体治理中,尤其应关注 $8^\circ\sim 25^\circ$ 坡度带的水土流失现象。

根据侵蚀强度比例分析发现(表3),当坡度 $<8^\circ$ 时,土壤侵蚀主要类型为微度和轻度,各类强度比例不随坡度的增加而增加;当在 $8^\circ\sim 25^\circ$ 坡度带时,随着坡度的增加,微度侵蚀比例逐渐下降,轻度及以上侵蚀比例则随着坡度的增加而增加,当 $>25^\circ$ 时,微度侵蚀比例继续下降,轻度及中度侵蚀比例继续上升,强烈及以上侵蚀比例出现不规则波动。表明 $<8^\circ$ 区域的土壤侵蚀对坡度敏感性较弱,而 $8^\circ\sim 25^\circ$ 区域的土

壤侵蚀对坡度敏感性较强。进一步分析发现,小于 8° 的区域主要为人类活动影响较大的耕地及建设用地,因此应强化该区域生产建设项目人为水土流失监管以减少水土流失,而 $8^\circ\sim 25^\circ$ 区域主要为部分耕地、园地及少量林地,在治理时,应该降低坡度,通过实施坡改梯工程减少土壤侵蚀。

表3 关中地区不同坡度下各级土壤侵蚀强度比例
Table 3 Area proportion of soil erosion intensity of different slopes

类别	面积比例/%					
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
$<5^\circ$	86.70	9.58	2.31	1.06	0.31	0.04
$5^\circ\sim 8^\circ$	86.77	9.51	2.35	1.06	0.28	0.03
$8^\circ\sim 15^\circ$	79.27	14.43	4.00	1.64	0.59	0.07
$15^\circ\sim 25^\circ$	70.59	21.07	5.09	2.05	1.06	0.14
$25^\circ\sim 35^\circ$	64.36	26.53	6.13	1.85	0.97	0.16
$>35^\circ$	62.20	26.76	8.04	2.24	0.67	0.09

从不同坡度侵蚀变化来看(表4), $<8^\circ$ 坡度带轻度侵蚀面积呈增加趋势,其余各强度侵蚀面积均有所下降; 8° 及以上坡度带的微度及轻度侵蚀面积呈增加趋势,中度及以上侵蚀面积均呈现下降趋势。值得注意的是 $>15^\circ$ 坡度带的中度及以上侵蚀面积减少速率显著,反映了近年来对该坡度带的水土流失治理工作取得显著成效。

表4 2018—2022年关中地区不同坡度带的各类土壤侵蚀强度面积变化速率

Table 4 Area change rate of various soil erosion intensities at different slope zones in Guanzhong region from 2018 to 2022

坡度	面积比例/%					
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
$<5^\circ$	-0.23	19.77	-20.97	-60.44	-21.94	-44.69
$5^\circ\sim 8^\circ$	-0.49	18.33	-13.74	-54.23	-18.71	-37.98
$8^\circ\sim 15^\circ$	2.67	3.64	-29.06	-47.88	-28.29	-47.42
$15^\circ\sim 25^\circ$	6.14	0.45	-37.61	-50.25	-37.64	-49.96
$25^\circ\sim 35^\circ$	7.06	1.57	-36.93	-57.70	-35.55	-54.52
$>35^\circ$	7.01	8.97	-38.78	-71.47	-9.67	-67.46

4.3 不同植被覆盖状况土壤侵蚀变化分析

利用NDVI数据及TM影像修正系数,计算植被覆盖度,并分为5类:高覆盖($\geq 75\%$)、中高覆盖($60\%\sim 75\%$)、中覆盖(45% 至 60%)、中低覆盖($30\%\sim 45\%$)、低覆盖($<30\%$)。基于ArcGIS对土壤侵蚀数据与植被覆盖度数据进行叠加分析(表5)。结果显示,林地、园地及草地不同植被覆盖度均以微度侵蚀为主,微度所占比例高于68%。在分析林园草不同覆盖度的水土流失情况时,为减少不同覆盖度面积差异较大带来的影响,使结果更具可比性,计算不同覆盖度下的水土流失面积与该覆盖度总面积

的比值进行分析,无量纲(图2)。

由图2可知,园地水土流失主要分布在中高覆盖及高覆盖上,其中高覆盖水土流失情况比值为0.28,究其原因,高覆盖度园地主要分布在眉县、周至、太白及郿邑区北部及礼泉和淳化等县的南部,该区域在小于 15° 的坡度范围内,受人类活动影响较大,在种植过程中,为提高作物产量,容易通过人为的干预降低林下盖度,从而引起水土流失;林地不同覆盖度情况下的水土流失差异较小,都表现为以轻度为主的水土流失,从空间分布来看,林地主要分布在大于 25° 的区域,如周至县、太白县及华阴市等关中地区南

部和宜君县、旬邑县等关中地区北部区域,该区域坡度较陡,且其林下盖度不高,土壤稳定性较差,所以仍会存在以轻度侵蚀为主的土壤侵蚀,因此该区域在治理时,应该以生态预防和保护为主,利用生态系统的自我恢复功能,逐渐提升土壤的稳定性;草地水土流失则主要分布在低覆盖及中低覆盖区,这主要是该范围草地面积基数小导致的,且根据实际情况和技术路线界定要求,关中地区几乎没有草地,所以不作具体分析。

表 5 关中地区不同植被覆盖度土壤侵蚀类型所占比例
Table 5 Proportion of soil erosion types with different vegetation coverage in Guanzhong region

类型	面积比例/%						
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	
园地	低覆盖	91.66	6.77	1.20	0.26	0.10	0.01
	中低覆盖	91.81	6.80	1.10	0.22	0.06	0.01
	中覆盖	91.56	6.92	1.14	0.29	0.08	0.01
	中高覆盖	88.81	8.45	1.77	0.70	0.25	0.02
	高覆盖	72.30	18.22	5.58	2.89	0.98	0.03
林地	低覆盖	71.53	22.25	4.44	1.24	0.49	0.05
	中低覆盖	73.44	21.18	4.09	0.97	0.30	0.02
	中覆盖	74.56	20.40	4.05	0.69	0.27	0.03
	中高覆盖	68.10	24.96	5.50	0.90	0.52	0.02
	高覆盖	70.59	24.93	3.73	0.47	0.27	0.01
草地	低覆盖	78.45	10.38	6.24	3.77	1.09	0.07
	中低覆盖	80.92	12.52	4.59	1.82	0.15	0.00
	中覆盖	82.49	13.75	3.15	0.51	0.09	0.01
	中高覆盖	85.89	10.90	2.72	0.39	0.09	0.01
	高覆盖	90.20	8.02	1.61	0.11	0.05	0.01

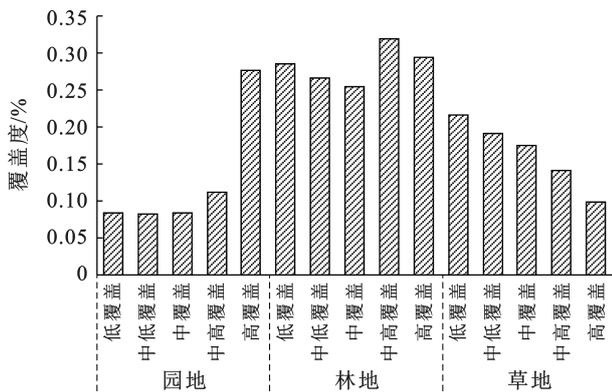


图 2 关中地区不同覆盖度下的水土流失情况

Fig.2 Soil erosion situation with different coverage levels in Guanzhong region

从不同覆盖度水土流失面积变化来看,2018—2022年高覆盖度水土流失面积大幅减少,其余覆盖度等级面积有不同程度的增加(图3)。其中林地高覆盖度水土流失减少面积比例为72.60%,其次是园

地和草地。表明高覆盖度林地是引起水土流失面积减少的主要原因。

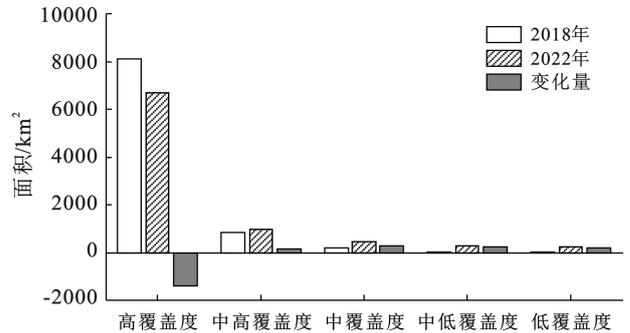


图 3 关中地区不同植被覆盖度水土流失面积变化

Fig.3 Variation of soil and water loss area under different vegetation coverage in Guanzhong region

4.4 不同土地利用类型土壤侵蚀变化分析

土地利用是人类活动作用于地表环境的重要表征方式^[33-34]。土地利用通过改变地表环境及植被覆盖度影响降水及地表径流进而影响土壤侵蚀^[35]。本文基于遥感解译获取关中地区土地利用数据,研究区土地利用类型所占比例最大的4类用地依次是林地(48.03%)、耕地(24.29%)、园地(12.61%)及建设用地(7.49%)。进一步基于土地利用和土壤侵蚀数据,利用 ArcGIS 进行叠加分析,得到不同土地利用类型的土壤侵蚀状况,5 a来研究区各类用地土壤侵蚀均以微度侵蚀为主,且耕地和林地土壤侵蚀比例超过68.75%(表6)。为减少这两类用地的面积基数大对水土流失的影响,进一步分析单位面积水土流失情况,发现林地及耕地水土流失所占比例分别为0.33和0.19,远高于其他土地利用类型的比值,充分表明林地及耕地是土壤侵蚀发生的主要地类。由于关中地区水域、草地、交通过地及其他土地用地比例不足5%,且分布较少,故不作具体分析。

从不同土地利用类型水力侵蚀面积变化来看(图4),林地、耕地水土流失面积有所减少,而园地及建设用地水土流失面积则有所增加。其中,林地水土流失面积减少较为显著,原因是林地尤其是高覆盖度林地的冠层可减缓雨滴的降落速度,降低雨滴冲击裸露土壤的能力,根系可以在土壤中形成稳定的土壤结构,逐步改善土壤的理化性质,增加土壤的稳定性,从而有效减少土壤侵蚀的发生^[20]。因此加强林地保护对于减少水土流失,提升水土保持率至关重要;建设用地水土流失面积有所增加,分析2018—2022年数据发现,部分耕地及园地转移为建设用地,在建设过程中,人为扰动导致以轻度为主的水土流失。

表6 关中地区各类用地不同土壤侵蚀强度面积所占比例

Table 6 Area proportion of different soil erosion intensity of various land use types in Guanzhong region

类型	面积比例/%							
	耕地	园地	林地	草地	建设用地	交通用地	水域	其他土地
2018年微度侵蚀	81.20	90.72	66.80	89.30	92.68	94.82	99.53	87.68
2018年水力侵蚀	18.80	9.28	33.20	10.70	7.32	5.18	0.47	12.32
2022年微度侵蚀	81.81	89.19	70.70	94.79	85.36	99.48	99.99	97.18
2022年水力侵蚀	18.19	10.81	29.30	5.21	14.64	0.52	0.01	2.82
平均微度侵蚀	81.51	89.95	68.75	92.05	89.02	97.15	99.76	92.43
平均水力侵蚀	18.49	10.05	31.25	7.95	10.98	2.85	0.24	7.57

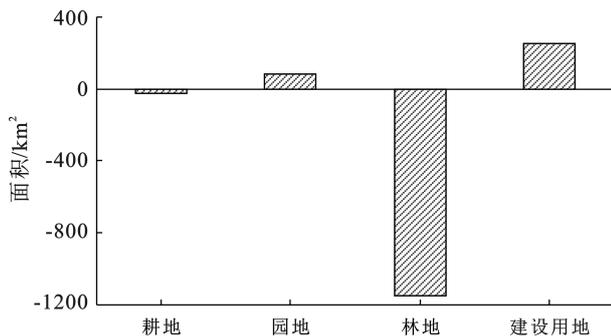


图4 关中地区不同土地利用类型土壤侵蚀面积变化
Fig.4 Change of soil erosion area in different land use types in Guanzhong region

5 讨论与对策

本研究系统分析了2018—2022年关中地区土壤侵蚀变化状况及不同坡度、不同植被覆盖度及不同土地利用下的土壤侵蚀状况,研究显示关中地区水土流失面积呈下降趋势,土壤侵蚀强度由高等级转向低等级,且主要表现为中度及强烈面积转出为轻度及以下侵蚀等级,充分表明关中地区近几年水土流失治理成果显著且治理重点为中度及强烈侵蚀区域,但是研究中仍然存在由微度向轻度及中度转移的现象。这是由于微度多分布在受人类活动影响较大的关中地区中部,该区域地表容易受到人为扰动而造成轻微的水土流失,因此在进行治理时,应该加强该区域生产建设项目的监管力度,防止微度和轻度向高等级转移。此外,8°~25°区域的土壤侵蚀对坡度敏感性较强,即坡度越大,土壤侵蚀越强烈,结合研究发现,该区域主要为旱地、园地及少量林地,因此在治理时,应该降低坡度,通过实施坡改梯工程减少土壤侵蚀,而小于8°的区域主要为耕地及建设用地,该区域土壤侵蚀对坡度敏感性较弱,人类活动是造成该区域水土流失的主要原因,因此在治理时应强化人为水土流失监管以减少水土流失。值得注意的是高覆盖林地及园地水土流失情况显著。经过探索和求证,林下盖度较低是导致上述现象的主要原

因。其中,高覆盖度园地主要分布在眉县、周至、太白等县的南部,农户在种植过程中,为提高作物产量,容易通过除草等人为干预的方式降低林下盖度,从而引起水土流失;而高覆盖度林地主要分布在坡度大于25°的区域,该区域坡度较陡,林下盖度也不高,土壤稳定性较差且交通不便,所以仍会存在显著的以轻度侵蚀为主的水土流失。基于上述情况,在具体治理时,针对高覆盖园地的水土流失现象,应该加强水保宣传,增强当地农户的水保意识,并通过政策激励或者技术支撑等方式鼓励农户对15°左右的高覆盖度园地进行套种,以增加高覆盖度园地的林下盖度,减少水土流失;针对高覆盖林地的水土流失,应该一方面通过飞播的方式,种植一些耐阴的草种,提高林下盖度以减少水土流失,另一方面通过实施封禁,保护原有区域的植被和生态环境,充分利用生态的自我修复能力提升区域的水土保持能力。

本研究结果可为关中地区提高水土保持率,加强生态文明建设提供科学参考,但仍存在不足。本文只选取规划中的2018—2022年作为研究年限,时间尺度较小,可能无法精准体现自然因素变化对土壤侵蚀的影响,在未来的研究中,也将扩大时间尺度,增加长期监测数据,以增加土壤侵蚀结果的全面性。

6 结论

(1) 2018—2022年,关中地区呈现水土流失面积减少和高等级侵蚀强度比例减少的双下降趋势。5 a间,水土流失面积减少了568.67 km²,年均减少速率为4.6%;土壤侵蚀等级变化主要表现为强烈转移为微度和轻度,中度转移为轻度。

(2) 从空间分布来看,关中地区土壤侵蚀呈现南北高中间低的分布特征。其中微度呈片状分布,是关中地区的主要侵蚀类型;强烈及以上侵蚀则呈点状零星分布在易受人类影响的平原区或呈条带状分布在关中盆地与秦岭北麓的接壤区域。从空间分布变化来看,关中地区微度及轻度侵蚀范围呈现从中

间向两端扩大的趋势,强度及以上侵蚀范围则逐渐缩小。

(3) 坡度大于 25° 的区域,是更容易产生水土流失的区域; $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 坡度带土壤侵蚀对坡度的敏感性较强,且该坡度带水土流失情况比值超过20%,是在治理需要关注的重点区域;小于 8° 区域土壤侵蚀对坡度的敏感性较弱。

(4) 关中地区覆盖度与水土流失关联不明显。中高覆盖及高覆盖区域园地水土流失较大,其他覆盖度水土流失较小;不同覆盖度下的林地水土流失差异较小。5 a间,林地高覆盖度区域水土流失减少面积比例为72.60%,是引起水土流失面积减少的主要原因。

(5) 林地、耕地、园地及建设用地是研究区的主要土地利用类型,土壤侵蚀主要发生在林地及耕地两个地类中。

参考文献(References)

- [1] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.
Shi Zhihua, Liu Qianjin, Zhang Hanyu, et al. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: Progress and prospects [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5):1117-1127.
- [2] Devátý J, Dostál T, Hösl R, et al. Effects of historical land use and land pattern changes on soil erosion: Case studies from lower Austria and central Bohemia [J]. Land Use Policy, 2019, 82:674-685.
- [3] 陈发虎,傅伯杰,夏军,等.近70年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望[J].中国科学:地球科学,2019,49(11):1659-1696.
Chen Fahu, Fu Bojie, Xia Jun, et al. Major advances in studies of the physical geography and living environment of China during the past 70 years and future prospects [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2019, 49(11):1659-1696.
- [4] Wuepper D, Borrelli P, Finger R. Countries and the global rate of soil erosion [J]. Nature Sustainability, 2019, 3(1):51-55.
- [5] 张科利,蔡强国,柯奇画.中国土壤侵蚀研究重大成就及未来关键领域[J].水土保持通报,2022,42(4):373-380.
Zhang Keli, Cai Qiangguo, KeQihua. Major achievements and future key fields of soil erosion research in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4):373-380.
- [6] Guo Lijia, Liu Ruimin, Men Cong, et al. Multiscale spatiotemporal characteristics of landscape patterns, hotspots, and influencing factors for soil erosion [J]. Science of The Total Environment, 2021, 779:146474.
- [7] Li Huichun, Guan Qingyu, Sun Yunfan, et al. Spatio-temporal analysis of the quantitative attribution of soil water erosion in the upper reaches of the Yellow River basin based on the RUSLE-TLSD model [J]. Catena, 2022, 212:106081.
- [8] 郭兴月,王添,程圣东,等.近30年土壤侵蚀模型研究进展[J].泥沙研究,2023,48(1):65-72.
Guo Xingyue, Wang Tian, Cheng Shengdong, et al. Progress of soil erosion models in recent 30 years [J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(1):65-72.
- [9] Wischmeier and Dwight D Smith B W H. Predicting Rainfall-erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation [M]. Washington, D.C. Agricultural Research Service, U.S. Dept of Agriculture in Cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station, 1965.
- [10] Renard K G. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Washington D C: Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, 1997.
- [11] 刘宝元.土壤侵蚀预报模型[M].北京:中国科学技术出版社,2001:252.
Liu Baoyuan. Soil Loss Prediction Model [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2001.
- [12] 陈锐银,严冬春,文安邦,等.基于GIS/CSLE的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2020,34(1):17-26.
Chen Ruiyin, Yan Dongchun, Wen Anbang, et al. Research on soil erosion in key prevention and control region of soil and water loss based on GIS/CSLE in Sichuan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1):17-26.
- [13] 陈羽璇,杨勤科,刘宝元,等.基于CSLE模型的珠江流域土壤侵蚀强度评价[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(6):86-93.
Chen Yuxuan, Yang Qinke, Liu Baoyuan, et al. Assessment of soil erosion intensity in Pearl River basin based on CSLE model [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(6):86-93.
- [14] 马亚亚,王杰,张超,等.基于CSLE模型的陕北纸坊沟流域土壤侵蚀评价[J].水土保持通报,2018,38(6):95-102.
Ma Yaya, Wang Jie, Zhang Chao, et al. Evaluation of soil erosion based on CSLE model in Zhifanggou watershed of northern Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6):95-102.
- [15] 顾治家,谢云,李骛,等.利用CSLE模型的东北漫川漫岗区土壤侵蚀评价[J].农业工程学报,2020,36(11):49-56.
Gu Zhijia, Xie Yun, Li Ao, et al. Assessment of soil erosion in rolling hilly region of northeast China using

- Chinese Soil Loss Equation (CSLE) model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11): 49-56.
- [16] Wang Huan, Gao Jiangbo, Hou Wenjuan. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different geomorphological types in karst areas: Based on the geodetector method [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(2): 271-286.
- [17] 李嘉麟, 陈家慧, 华丽, 等. 基于CSLE的湖北省土壤侵蚀时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 43-52.
Li Jialin, Chen Jiahui, Hua Li, et al. Spatial and temporal characteristics of soil erosion in Hubei Province based on CSLE [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 43-52.
- [18] He Qian, Dai Xiao' ai, Chen Shiqi. Assessing the effects of vegetation and precipitation on soil erosion in the three-river headwaters region of the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2020, 12(5): 865-886.
- [19] Tang Chongjun, Liu Yu, Li Zhongwu, et al. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, southern China [J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107956.
- [20] 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 Longqi, Jia Guodong, Lü Xiangrong, et al. Research of soil erosion thresholds on the lower slopes of different vegetation cover in typical areas of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 187-198.
- [21] 朱相君, 薛亮. 关中地区生态系统服务价值变化及其与经济发展耦合关系[J]. 生态学杂志, 2022, 41(4): 769-776.
Zhu Xiangjun, Xue Liang. Changes of ecological service value and its coupling with economic development in Guanzhong region [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(4): 769-776.
- [22] 吴健生, 李铠杨, 赵宇豪. 基于改进三维足迹模型的关中地区土地自然资本利用状况分析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(8): 1345-1355.
Wu Jiansheng, Li Kaiyang, Zhao Yuhao. The use of land natural capital in the Guanzhong region based on a revised three-dimensional ecological footprint model [J]. Progress in Geography, 2020, 39(8): 1345-1355.
- [23] 宋伟, 韩贇, 刘琳. 山水林田湖草生态问题系统诊断与保护修复综合分区研究: 以陕西省为例[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8975-8989.
Song Wei, Han Ze, Liu Lin. Systematic diagnosis of ecological problems and comprehensive zoning of ecological conservation and restoration for an integrated ecosystem of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in Shaanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8975-8989.
- [24] 吕攀屹, 黄领梅, 权全, 等. 陕西关中地区NDVI的时空变化特征及其驱动力分析[J]. 中国水土保持, 2022(7): 39-44.
Lyu Panyi, Huang Lingmei, Quan Quan, et al. Spatial and temporal variation characteristics of NDVI in Guanzhong region of Shaanxi Province and its driving force analysis [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(7): 39-44.
- [25] 宋佃星, 李强, 延军平. 陕西省公路交通可达性时空演变研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 36-41.
Song Dianxing, Li Qiang, Yan Junping. The spatial-temporal evolution of highway traffic accessibility in Shaanxi Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(3): 36-41.
- [26] 殷水清, 章文波, 谢云, 等. 基于高密度站网的中国降雨侵蚀力空间分布[J]. 中国水土保持, 2013(10): 45-51.
Yin Shuiqing, Zhang Wenbo, Xie Yun, et al. Spatial distribution of rainfall erosivity in China based on high-density station network [J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(10): 45-51.
- [27] 国务院第一次全国水利普查领导小组办公室. 水土保持情况普查[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
State Council First National Water Conservancy Survey Leading Group Office. General Survey of Soil and Water Conservation [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010.
- [28] Foster G R, Wischmeier W H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction [J]. Transactions of the ASAE, 1974, 17(2): 305-309.
- [29] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(5): 105-110.
Fu Suhua, Liu Baoyuan, Zhou Guiyun, et al. Calculation tool of topographic factors [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(5): 105-110.
- [30] Liu Baoyuan, Xie Yun, Li Zhiguang, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020, 8(4): 430-439.
- [31] 水利部水土保持司. 区域水土流失动态监测技术规范(试行)[S/OL]. 北京: 水利部水土保持司, 2018.
Department of Soil and Water Conservation of Ministry of Water Resources. Technical Regulations for Dynamic Monitoring of Regional Soil and Water Loss (Trial) [S/OL]. Beijing: Soil and Water Conservation Department of the Ministry of Water Resources, 2018.

- progress on the influence of straw returning to field on soil carbon pool and greenhouse gas emission in farmland [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(6): 14-20.
- [27] Zhang Z S, Guo L J, Liu T Q, et al. Effects of tillage practices and straw returning methods on greenhouse gas emissions and net ecosystem economic budget in rice-wheat cropping systems in central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 122: -644.
- [28] 韩燕云, 吴永红, 李丹, 等. 微生物介导的稻田水土界面温室气体排放及其农事减排措施研究进展[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(12): 2369-2381.
Han Yanyun, Wu Yonghong, Li Dan, et al. Advancements in research on microbe-mediated greenhouse gas emissions at the rice paddy soil-water interface and agricultural mitigation strategies [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(12): 2369-2381.
- [29] 段琳博. 温室番茄优产减排提质的水肥气耦合模式研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
Duan Linbo. Water, fertilizer and gas coupling for greenhouse tomatoes to improve quality and reduce emissions-model research [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2023.
- [30] 杨智慧, 牟长城, 王亚辉, 等. 抚育强度对不同林型“栽针保阔”红松林碳源/汇影响[J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(6): 19-32.
Yang Zhihui, Mu Changcheng, Wang Yahui, et al. Effects of tending intensity on carbon source/sink of Korean pine forests with different forest types by planting coniferous forest and reserving broadleaved forest [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(6): 19-32.
- [31] 任晓静. 冬水田转稻麦轮作对CH₄排放的影响[D]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2017.
Ren Xiaojing. Effect of altering rice-flooded-fallow to rice-wheat rotation on CH₄ emission [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [32] 王晓云, 蔡焕杰, 李亮, 等. 亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2413-2425.
Wang Xiaoyun, Cai Huanjie, Li Liang, et al. Effects of water deficit on greenhouse gas emission in wheat field in different periods [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2413-2425.
- [33] 王怡萌, 段磊磊, 陈聪, 等. 不同水位管理对恢复泥炭地土壤CO₂, CH₄排放的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4583-4593.
Wang Yimeng, Duan Leilei, Chen Cong, et al. Effects of different hydrologic managements on soil CO₂ and CH₄ emissions of the restored peatlands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4583-4593.
- [34] 刘意立. 我国亚热带季风气候区湿地土壤CO₂, CH₄排放规律研究[D]. 浙江 杭州: 浙江大学, 2014.
Liu Yili. Laboratory study on the carbon dioxide and methane emission from wetland soil in subtropical monsoon climate zone [D]. Hangzhou, Zhejiang: Zhejiang University, 2014.
- [35] 刘畅, 迟道才, 张丰, 等. 稻草生物炭对干湿交替稻田CH₄和N₂O排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(14): 232-242.
Liu Chang, Chi Daocai, Zhang Feng, et al. Effects of rice straw biochar on CH₄ and N₂O emissions in alternating wetting and drying rice fields [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(14): 232-242.
- ~~~~~
- (上接第232页)
- [32] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
Ministry of Water Resources. Standards for classification and gradation of soil erosion: SL 190—2007 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [33] Mooney H A, Duraiappah A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110 (Suppl 1): 3665-3672.
- [34] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.
Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14.
- [35] 陈淼, 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.
Chen Miao, Wang Xiaoqin, Lin Jinglan, et al. Quantitative effects of land use and vegetation cover changes on soil erosion in Changting County in recent 30 years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 168-177.