

## 西南高山峡谷区人为耕作扰动对典型坡耕地 坡面坡形和微地形的影响

王嘉琦<sup>1,2</sup>, 王勇<sup>1,2</sup>, 张泽洪<sup>3</sup>, 张一雄<sup>1</sup>, 刘静依<sup>1</sup>,  
马真真<sup>1</sup>, 辛旺<sup>1</sup>, 秦伟<sup>4</sup>, 许海超<sup>4</sup>

(1.四川农业大学林学院,成都 611130; 2.四川农业大学水土保持与荒漠化防治重点实验室,成都 611130;

3.西华师范大学地理科学学院,四川南充 637009; 4.中国水利水电科学研究院,

流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100048)

**摘要:** [目的]为探明西南高山峡谷区长期不同耕作扰动方式对耕地坡面地形特征的影响。[方法]选取该区域典型坡耕地(坡度为 15°,坡长为 20 m)为研究对象,通过顺坡耕作与等高耕作方式连续耕作 50 次,结合测针法与 3 D 激光扫描技术,探究 2 种长期耕作扰动方式下坡面坡形和微地形特征的变化。[结果]连续顺坡耕作 50 次后,坡形逐渐由线性坡向“┌”型复合坡演化,而等高耕作向“└”型复合坡演化。连续耕作后,顺坡耕作和等高耕作导致上坡侵蚀范围分别占整个坡面的 15%和 11%,堆积范围分别占整个坡面的 13%和 6%。2 种耕作扰动方式均引起坡面地表粗糙度和地形起伏度发生显著变化,且常规顺坡耕作变化程度大于等高耕作。顺坡耕作与等高耕作方式下土壤平均流失厚度分别为 1.17、0.45 cm/次。耕作次数对土壤流失量直接影响效应最大,而耕作方式对土壤流失量的间接影响效应最大。[结论]耕作频次与耕作方式均是影响坡形和微地形变化的重要因素,随着耕作频次增加,土壤流失量逐渐增大。

**关键词:** 西南高山峡谷区; 耕作方式; 耕作次数; 坡形; 微地形

中图分类号: S152.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0152-08

## Effects of Tillage Disturbance on Slope Shape and Micro-topographic Features on Typical Sloping Cropland of Southwestern Alpine-canyon Area

WANG Jiaqi<sup>1,2</sup>, WANG Yong<sup>1,2</sup>, ZHANG Zehong<sup>3</sup>, ZHANG Yixiong<sup>1</sup>,

LIU Jingyi<sup>1</sup>, MA Zhenzhen<sup>1</sup>, XIN Wang<sup>1</sup>, QIN Wei<sup>4</sup>, XU Haichao<sup>4</sup>

(1.College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.Key Lab of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 3.School of Geographic Sciences, West China Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; 4.State Key Laboratory of Basin Water Cycle Modelling and Regulation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this study was to investigate the effects of various tillage practices on on slope shape and micro-topographic features on typical sloping croplands of southwestern alpine-canyon area. [Methods] 50 times of conventional tillage and contour tillage events were applied to rectangular plots (5 m×20 m) with a slope of 15° to examine the impacts of tillage disturbance on the slope shape and micro-topographic features by combining the stylus method and 3 D laser scanning technology. [Results] After 50 times of conventional tillage, the slope shape gradually evolved from a linear slope to a ‘┌’-type composite slope, while after contour tillage, the slope shape evolved to a ‘└’-type. After 50 times of successive tillage, the range of soil loss under conventional tillage and contour tillage accounted for 15% and 11% of that of the

whole slope, and the range of accumulated soil accounted for 13% and 6% of that of the whole slope, respectively. The two kinds of tillage disturbance patterns caused significant changes in the surface roughness and topographic undulation on the slope, and the degree of change of conventional tillage was greater than that of contour tillage. The average thickness of the soil loss under conventional tillage and contour tillage were 1.17 and 0.45 cm/time, respectively. Tillage frequency had the largest indirect effect on soil loss, while the disturbance patterns had the largest indirect effect on soil loss. [Conclusion] Tillage frequency and tillage pattern are the most important factors affecting slope shape and micro-topographic features. As the frequency of tillage increases, the amount of soil loss will gradually increase.

**Keywords:** southwestern alpine-canyon area; tillage pattern; tillage frequency; slope shape; micro-topography

Received: 2024-09-02

Revised: 2024-10-17

Accepted: 2024-11-05

Online(www.cnki.net): 2024-12-25

水土流失作为目前最严重的环境问题之一,不仅导致土壤肥力下降,而且造成水资源污染,影响着人类赖以生存的土地资源。我国是世界上水土流失最严重的国家之一,水土流失面积约占国土总面积的 37%,坡耕地是水土流失的主要策源地<sup>[1]</sup>。据统计<sup>[2]</sup>,我国坡耕地约占全国耕地总面积的 20%,而坡耕地的土壤侵蚀量占全国总量的 28%。影响水土流失的因素主要可分为自然因素和人为因素。自然因素主要包括降雨、地形、土壤和植被;人为因素主要包括生产项目建设及不合理的土地利用方式,强烈耕作活动是引发坡耕地水土流失的重要因素之一<sup>[3]</sup>。因为不合理且无任何土壤保持措施的耕作往往由于农具和重力的作用,土壤发生运移、堆积、再分配到下坡或上坡(取决于耕作的方向),从而形成凸部侵蚀、凹部沉积的坡面侵蚀模式<sup>[4-5]</sup>。

西南高山峡谷区位于我国金沙江、澜沧江和怒江三大著名江河的上游,主要包括四川省西部、云南省东北部及西藏自治区东部。该区域耸立着许多的高山和深切的沟谷,导致其地质灾害风险隐患及危害巨大,并同时伴有严重的水土流失问题<sup>[6]</sup>。同时,西南高山峡谷区坡耕地分布广泛,10°以上的坡耕地占比 70%以上,但其地形起伏大且分布零碎、单块耕地面积小、耕作难度大,区域内少数民族聚集,人地矛盾突出,耕作活动十分强烈,水土流失严重,对侵蚀过程影响显著,使该区域成为中国典型的生态脆弱区<sup>[7]</sup>。

长期农业耕作活动影响西南高山峡谷区陡坡耕地的土壤再分配过程,进而改变坡耕地的局部坡度,并造成坡耕地的坡形变化,引发严重的水土流失。常规顺坡耕作和等高耕作是西南高山峡谷区常见的 2 种耕作方式,不同耕作方式均导致土壤在耕作工具和重力的影响下发生搬运、迁移和堆积,引起坡耕地土壤在景观内的重新分配,进而造成坡耕地地形特征发生变化<sup>[8-9]</sup>。为明确该区域不同耕作扰动方式引起的坡耕地地形演化过程和土壤侵蚀变化差异。

本研究以西南高山峡谷区域内典型坡耕地为研究对象,利用测针法原理,结合 3D 激光微地形扫描技术探究连续 50 次顺坡耕作与等高耕作模式下坡耕地坡形与微地形的变化特征。研究结果不仅为高山峡谷区土壤侵蚀研究工作提供理论参考,也为该区域水土流失动态监测和采取合理的水土保持措施提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验在大小凉山干旱河谷土壤侵蚀与生态修复野外科学观测研究站内进行,位于四川省凉山彝族自治州喜德县李子乡(28°02'05"N, 102°12'35"E)(图 1),该区域以中山山地为主,伴有多种微型地貌表现,属于典型西南高山峡谷区。该地平均海拔高度 1 843 m,境内属低纬度高海拔的中亚热带季风气候,年平均气温 14.1 °C,年平均降水量约 1 000 mm。土壤类型为山地黄棕壤,土壤质地较细。区域面积 2 206 km<sup>2</sup>,15°以上坡耕地面积占比达到 70%以上,当地传统耕作方式为顺坡耕作,同时,也采取一些保护性耕作措施,如等高耕作、起垄耕作等。耕作时间通常为每年仅在农作物收获过后进行耕作 1 次,农作物以种植玉米(*Zea mays* L.)、小麦(*Triticum aestivum* L.)和荞麦(*Fagopyrum esculentum* Moench)为主。试验地土壤基本理化特征见表 1。

### 1.2 试验设计与研究方法

1.2.1 试验小区的设置及测量点高程量的获取 本研究试验于 2024 年 3 月在四川省西昌市小凉山干旱河谷土壤侵蚀与生态修复野外科学观测研究站选择 2 处坡度 15°,坡长为 20 m、坡宽为 5 m 的径流小区为研究对象。为查明长期耕作扰动对坡面地形特征的影响,本研究通过 5 d 连续锄耕 50 次的方法模拟长期耕作扰动所影响的坡面坡形和微地形特征变化的过程<sup>[10-11]</sup>,耕作方式为当地常见的顺坡耕作与等高

耕作,耕作期间无降雨。耕作工具为当地农民常用的锄头,其长度为 27.4 cm,宽度为 7.7 cm。耕作范围为包含径流小区整个坡面,耕作深度约为 20 cm。为更好地描述坡形的变化规律,将耕作后的复合坡的坡位分为 5 个部分,当坡面范围内土层高度减少时,土壤近乎流失于下方,此部分坡面范围为上坡侵蚀区;土层高度几乎不变时,为中坡传输区;土层高度增加时,土壤发生堆积,该坡面为下坡堆积区。因此,复合坡的描述按照从坡顶到坡脚的顺序依次为坡顶、上坡侵蚀区、中坡传输区、下坡堆积区和坡脚。

试验采用测针法原理<sup>[5]</sup>(图 2)。以径流小区左下角为坐标原点,Y 轴为径流小区坡长方向,X 轴为径流小区坡宽方向,Z 轴为水平垂直方向,建立坐标系;坡顶和坡底区域分别以 X 轴方向间隔 0.5 m 设置测量点,坡中区域以 X 轴方向和顺坡方向间隔 1 m 设置测量点。坡面测量点获取须待土地平整后,采用 2 种不同耕作方式对每个小区进行连续耕作 50

试验。本研究设置未耕作坡面作为对照试验,在耕作前和每 5 次耕作后对每个测量点(横向与纵向均每隔 1 m)进行测量,测量值为土面到小区四周边界的高度。试验重复 2 次。

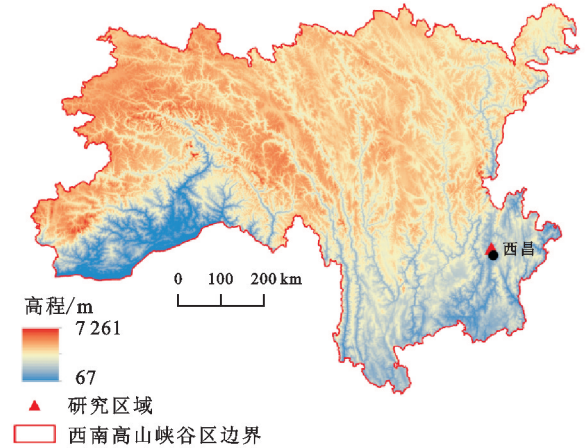


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

表 1 试验区土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil in the experimental area

土壤理化性质	土壤厚度/cm	体积质量/(g·cm <sup>-3</sup> )	土壤水分体积分数/%	土壤总孔隙度/%	<0.002 mm 粒径质量分数/%	有机质质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )
最小值	73	1.24	15.20	43	31.88	12.51
最大值	96	1.42	21.20	50	37.83	20.36
平均值	87	1.33	18.28	47	35.18	17.79
标准差	12	0.05	2.16	2	3.03	3.11
变异系数/%	13.79	4.06	11.84	4.26	8.61	17.46

选用徕卡 Nova MS60 全站扫描仪对耕作前和每连续 5 次耕作后的坡面进行地形扫描。选定小区四周的标记点,利用标记点调节全站扫描仪相对高程面,而后在坡脚处操作仪器对整个小区进行扫描。仪器通过发射激光信号并利用激光从发射到反射再

到接收器接收的时间差(时间飞行法)来计算距离,最终生成密集点云。结合手动测量的点位高程值,利用 Photo Scan 2.0.2 软件可生成未耕作和每耕作 5 次的土面 DEM,进而分析出耕作期间的地表微地形变化特征。

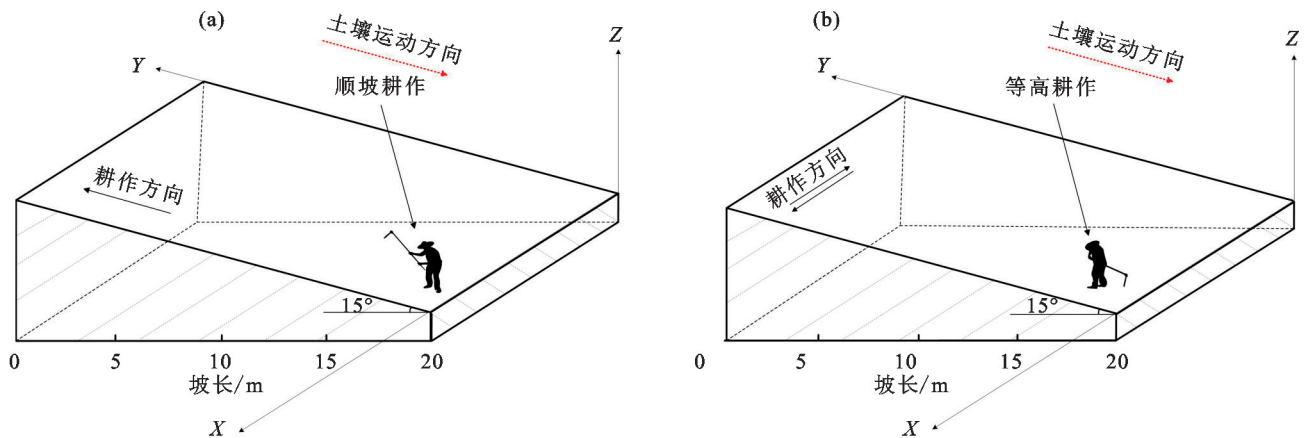


图 2 试验设计

Fig.2 Schematic diagram of the experimental design

1.2.2 微地形指标的计算 耕作扰动后的微地形形态特征通过地表粗糙度和地形起伏度因子表征。通过测针法原理获取径流小区内 0.5 m 网格各点的高程值( $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_m$ ),并结合 3 D 激光扫描技

术,进而可提取每 5 次耕作扰动下的 DEM 数据。采用均值变点法计算地形起伏度(S),采用地表单元的曲面面积( $S_{\text{曲面}}$ )与其在水平面上的投影面积( $S_{\text{水平}}$ )之比用于表示地表粗糙度(R)<sup>[7]</sup>。

$$S = \frac{\sum_{c=1}^n (Z_c - \bar{Z})^2}{n} \quad (1)$$

$$R = \frac{S_{\text{曲面}}}{S_{\text{水平}}} \quad (2)$$

式中:  $Z_c$  为各样点的高程, m;  $\bar{Z}$  为样点高程的平均值, m;  $n$  为样点数。

### 1.3 数据处理与分析

运用 3 D 激光扫描技术、Photo Scan 2.0.2 和 ArcGIS 10.8 软件对连续耕作下的坡面地表特征进行提取及分析, 采用 GraphPad Prism 8、Origin 2022 和 SPSS 20 等软件对数据进行分析处理并绘图。使用 R4.3.3 中 BruceR 包进行多因素方差分析, ggplot 2 包进行绘图, ANOVA 法进行差异性显著检验, 统计显著性水平设置为  $p < 0.05$ , Mantel 相关性检验采用 R4.3.3 中 Vegan 包与 linkET 包; 偏最小二乘结构方程构建采用 Pls-pm 包。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕作扰动方式与坡面坡形特征的关系

由图 3 可知, 不同耕作方式对坡面坡形特征的影响存在较大差异。与耕作前相比, 连续 10、20、30、40、50 次顺坡耕作导致坡顶高程值分别降低 10.01、25.03、39.45、44.55、46.64 cm, 坡脚高程值分别增加 14.01、21.85、26.65、38.42、53.69 cm。连续 10、20、30、40、

50 次等高耕作条件下, 坡顶高程相较于耕作前分别降低 12.03、14.96、17.95、19.58、21.89 cm, 而坡脚高程相较于耕作前分别抬高 4.92、10.34、15.23、17.11、20.84 cm。长期等高耕作下其坡度的平均变化率 4.03%, 而长期顺坡耕作下其坡度的平均变化率 8.06%。表明连续不断的耕作扰动导致土壤在景观内重新分布, 导致坡顶区域发生侵蚀、坡脚区域发生堆积。

以径流小区坡面 10 m 为界, 分别对坡面 0~10、10~20 m 的高程变化进行曲线拟合(表 2), 通过对各函数  $y=0$ (高程未发生变化) 确定顺坡耕作和等高耕作扰动上下坡侵蚀和下坡堆积区域范围。表明顺坡耕作下其侵蚀范围为 0~2.91 m, 占整个坡面的 15%, 堆积范围为 17.41~20 m, 占整个坡面的 13%, 其上坡侵蚀量和下坡堆积量分别为  $(4.50 \pm 0.47)$ 、 $(4.61 \pm 0.47)$  g; 而等高耕作下侵蚀范围为 0~2.17 m, 占整个坡面的 11%, 堆积范围为 18.76~20 m, 占整个坡面的 6%, 其上坡侵蚀量和下坡堆积量分别为  $(1.57 \pm 0.15)$ 、 $(0.86 \pm 0.13)$  g。顺坡耕作下侵蚀和堆积的范围均大于等高耕作。结合图 3 和表 2, 连续耕作 50 次后顺坡耕作与等高耕作方式下坡中传输区分别为 2.91~17.41、2.17~18.76 m。连续顺坡耕作后, 坡形逐渐由线性坡向“┌”型复合坡演化; 连续等高耕作后, 坡形逐渐由线性坡向“└”型复合坡演化。

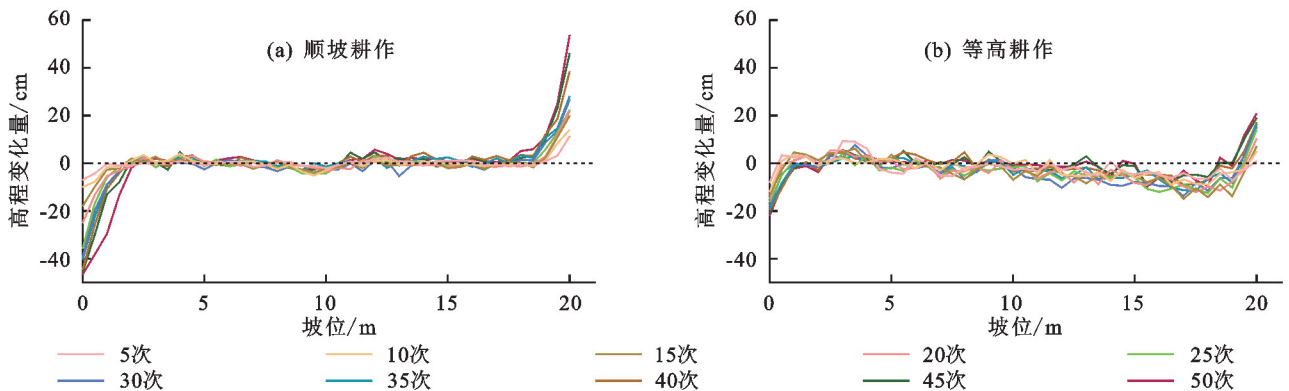


图 3 连续耕作后坡耕地坡形的变化

Fig.3 Changes in the slope shape of sloping cropland after 50 times of tillage

表 2 不同耕作次数下坡顶裸露区和坡脚堆积区函数拟合

Table 2 Functions fitted to bare areas at the top of slopes and stockpiled areas at the foot of slopes under different tillage frequencies

区域范围/m	耕作方式	拟合函数	土壤侵蚀范围/m	土壤堆积范围/m	面积/m <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	p
0~10	顺坡耕作	$y = 0.24 t^3 - 4.71 t^2 + 28.15 t - 47.97$	0~2.91	—	14.55	0.82	0.001 6
	等高耕作	$y = 0.12 t^3 - 2.24 t^2 + 12.03 t - 16.80$	0~2.17	—	10.85	0.81	<0.001
10~20	顺坡耕作	$y = 3.22 \times 10^{-10} e^{(t/0.77)} - 2.13$	—	17.41~20	12.95	0.92	0.002 1
	等高耕作	$y = 8.36 \times 10^{-14} e^{(t/0.60)} - 3.16$	—	18.76~20	6.20	0.69	<0.001

注:  $t$  为坡面位置, m;  $y$  为高程变化量, cm。

### 2.2 坡耕地微地形特征对不同耕作扰动方式的响应

由图 4 可知, 相较于耕作前, 连续耕作扰动下地表粗糙度和地形起伏度平均变化幅度分别为 2.44%

和 52.90%, 表明随着耕作扰动次数的增加, 地表粗糙度和地形起伏度均发生明显变化。同时, 50 次连续耕作后, 顺坡耕作下的地表粗糙度和地表起伏度分别

增加 6.07% 和 45.58%，等高耕作下分别增加 4.64% 和 36.69%。相比于等高耕作，长期顺坡耕作后坡面微地形指标的变化程度更大。

长期耕作扰动下不同坡位的微地形指标变化也有所不同(图 5)。连续顺坡耕作 50 次后，上坡侵蚀区的地表粗糙度和地形起伏度最大，地表粗糙度和

地形起伏度相较于耕作前的平整坡面分别增加 1.74、1.78 cm；而在坡面中坡传输区和下坡堆积区，顺坡耕作和等高耕作下地表粗糙度和地形起伏度变化较小。说明连续顺坡耕作后，上坡侵蚀区的微地形指标变化更剧烈，即长期顺坡耕作对上坡侵蚀区的影响程度最明显。

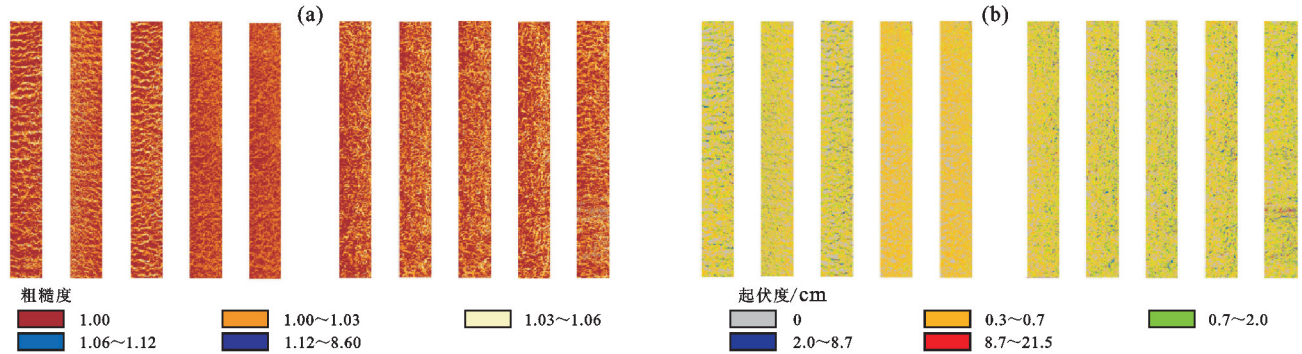


图 4 不同耕作次数下地表粗糙度与地形起伏度

Fig.4 Surface roughness and topographic relief under different tillage frequencies

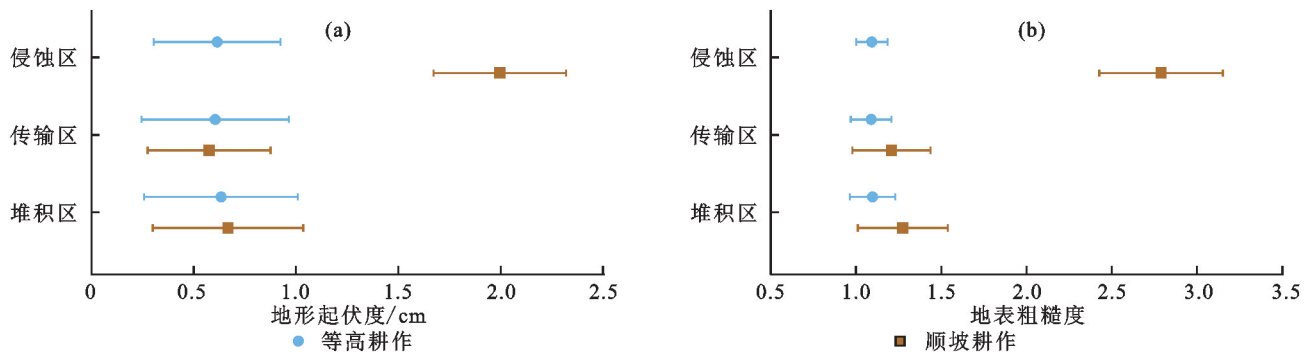


图 5 50 次耕作前后不同坡位地形起伏度与地表粗糙度的变化

Fig.5 Changes in topographic relief and surface roughness on different slope locations before tillage and after 50 times of tillage

### 2.3 耕作扰动对坡耕地地形变化及土壤流失量的影响

由图 6a 可知，单次耕作与坡耕地地形相对高程变化量平均值存在显著的线性关系 ( $p < 0.01$ )，顺坡耕作与等高耕作下斜率分别为 0.016 3 和 -0.037 6。表明随着耕作次数的增加，顺坡耕作下坡面相对高程的变化量逐渐增大，而等高耕作过程则相反。长期顺坡耕作将加剧上坡位侵蚀和下坡位堆积，进而加剧对坡面坡形变化的影响，而连续等高耕作对坡形变化具有削弱作用。

长期顺坡耕作和等高耕作下平均土壤流失厚度分别为 1.17、0.45 cm/次。线性拟合结果显示，耕作次数与累积土壤流失厚度呈显著正相关 ( $p < 0.01$ ，图 6b)，表明随着耕作次数的增加，2 种耕作扰动方式均导致的土壤流失量逐渐增加。顺坡耕作下耕作次数与累积土壤流失厚度的线性关系斜率(0.873 5)显著高于等高耕作(0.419 4)，顺坡耕作导致土壤累积流失厚度比等高耕作多 18.58 cm，表明长期顺坡耕作对坡面土壤流失的影响程度显著大于等高耕作。

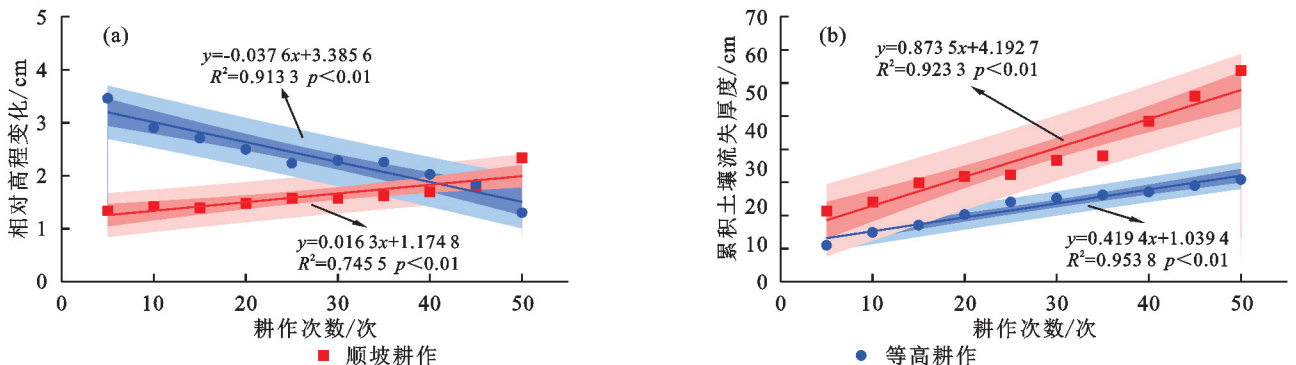


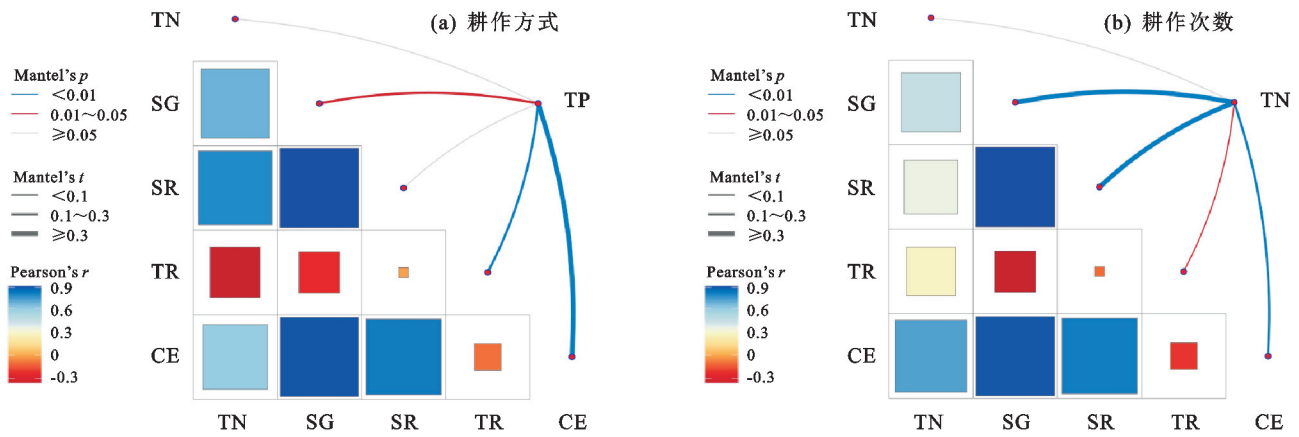
图 6 不同耕作次数下坡面相对高程及累积土壤流失厚度的变化趋势

Fig.6 Changes in the relative elevation and the thickness of accumulated soil loss under different tillage frequencies

### 2.4 坡耕地地形变化及土壤流失量的关键影响因素

利用 Mantel 分析耕作次数(TN)和耕作方式(TP)分别与坡度(SG)、地表粗糙度(SR)、地形起伏度(TR)、累积土壤流失厚度(CE)间的相关性(图 7)表明,TP 与 SG、SR 和 CE 间呈显著正相关,其中,TP 与 SR 的相关性数值最大(0.766),其次是 SG(0.667),最小为 CE(0.523),耕作方式主要影响坡度、粗糙度和累积土壤流失厚度的变化,其中对地表粗糙度的影响最大。TN 与 SG、TR 和 CE 间均呈明显正相关( $p < 0.01$ ),相关系数值分别为 0.490、0.538、0.780,表明耕作次数主要影响坡面累积土壤流失厚度。

结构方程结果显示,TN 对 CE 的直接影响效应最大,其效应值为 0.542(图 8)。其次为 SG(0.447)和 TP(0.354),而 SR 对 CE 的影响的直接效应值为负(-0.082)。此外,TP 和 TN 通过影响 SG 和 SR 进而间接影响 CE。其中,相较于 TN 而言,TP 的间接效应最大(0.235),主要通过影响 SR,进而影响 SG,并最终对 CE 造成影响。TP 和 TN 对 CE 影响总效应值分别为 0.589、0.728。耕作方式对土壤流失量的间接影响效应最大,而耕作次数对土壤流失量的直接影响效应最大,其中,耕作次数是影响土壤流失量的最主要因素。



注: TP、TN、SG、SR、TR、CE 分别为耕作方式、耕作次数、坡度、地表粗糙度、地表起伏度、累积土壤流失厚度。下同。

图 7 耕作扰动方式与各影响因子的 Mantel 检验分析

Fig.7 Mantel's test analysis of tillage disturbance with each influencing factor

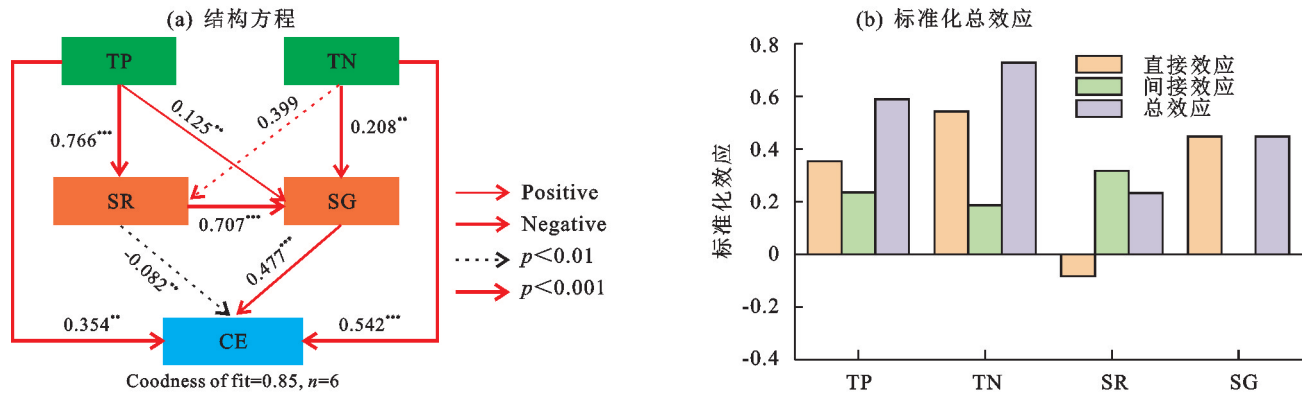


图 8 不同变量对土壤累积流失厚度影响的 PLS-SEM 分析

Fig.8 PLS-SEM analysis of the effect of accumulated soil loss on different variables

## 3 讨论

### 3.1 人为耕作扰动对坡耕地坡形及微地形的影响过程

长期强烈耕作活动过程中,坡耕地土壤受耕作工具与重力等作用的影响发生迁移,导致土壤在景观内重新分布,进而造成不同坡面位置土壤发生侵蚀与堆积,最终引起坡形逐渐由线性坡向复合坡演化<sup>[12-14]</sup>。由于坡耕地上方存在边界,每次耕作后坡顶得不到土壤的补给,地表高程明显下降。同时,由于坡耕地下边界的阻挡使耕作迁移下来的土壤在此处发生堆积,且无法再向下方移动,进而导致下坡区域的土壤逐渐

堆积<sup>[9]</sup>。相比于顺坡耕作,等高耕作作为典型的保护性农业耕作措施,其耕作方向与土壤运动方向垂直,土壤受耕作工具作用力较小,从而减少土壤的运移距离<sup>[15-16]</sup>。连续等高耕作过程中坡面中下部区域的地形高程出现负增加,是因为西南高山峡谷区砾石丰富<sup>[6]</sup>,等高耕作的试验小区中下部区域出现大石块,在耕作过程中石块被移出小区,从而造成该部分区域的高程相较于耕作前平整坡面低。

随着耕作扰动次数的增加,坡面微地形特征也发生改变。是因为在耕作扰动的过程中,坡耕地表面的

起伏状态不断变化,使得耕作后的坡面凸凹不平,进而改变微地形特征<sup>[17]</sup>。本研究发现,长期顺坡耕作对地表粗糙度和地形起伏度影响程度大于等高耕作,且长期顺坡耕作对上坡侵蚀区的微地形指标影响程度最大。与前人<sup>[18-19]</sup>研究结果一致,即人为耕作是影响地表粗糙度和地形起伏度的重要因素。起伏状态是影响地表粗糙度和地形起伏度的重要因子,而相较于等高耕作,传统的顺坡耕作对土壤的扰动更强,更易破坏土壤结构,使坡面变得更为凸凹不平,从而其对坡面微地形的影响程度更大<sup>[20]</sup>。

### 3.2 单次耕作下土壤流失厚度及坡面相对高程的变化特征

本研究表明,顺坡耕作下平均土壤流失厚度显著大于等高耕作,是由于在等高耕作过程中,耕作工具与土壤运动方向垂直,土体发生向上坡和下坡双向运动,向下耕作净位移量相对较小,能有效地控制土壤侵蚀<sup>[21]</sup>。相反,顺坡耕作相比于保护性耕作措施,土壤受着农具和重力的双重影响,更容易沿顺坡方向运移、堆积并沉积到下坡,造成更严重的土壤流失<sup>[22]</sup>。李富程等<sup>[23]</sup>研究表明,等高耕作条件下土壤迁移距离比向下耕作平均减少 0.08 m,等高耕作是坡地控制耕作侵蚀的重要管理方式;XU 等<sup>[15]</sup>研究表明,土壤净下坡位移与耕作方向密切相关,等高耕作是解决陡坡耕地土壤流失的重要手段。

单次顺坡耕作下坡面相对高程变化量逐渐增大,而单次等高耕作下坡面相对高程变化量逐渐减小。表明长期频繁的耕作扰动下,每进行 1 次顺坡耕作,坡耕地坡形变化程度大于等高耕作,并显著增加上坡侵蚀和下坡堆积的范围及面积。连续不断的顺坡耕作使得坡面的坡度逐渐增大,其土壤受重力分力越大,导致土壤向下坡迁移更剧烈,因此,地形的相对高程变化量也就越大<sup>[24]</sup>。而等高耕作由于是从左至右后又从右至左的反复耕作活动,其所引发的坡面坡度变化较小,从而有效地避免长期顺坡耕作对坡面高程引起的变化。

### 3.3 耕作扰动强度与耕作扰动方式对坡面土壤流失的影响

本研究结果表明,耕作频次与耕作方式是影响西南高山峡谷区坡面土壤流失的重要因素。在我国紫色土区,YANG 等<sup>[25]</sup>学者通过模拟 5、10、15 次耕作后发现,坡耕地侵蚀速率逐渐增大,土层明显变薄。在东北黑土区,单次耕作下土壤位移量可达 32.68~134.14 kg/m,频繁的耕作作业使得土壤流失严重<sup>[26]</sup>。不同的耕作方向导致土壤运动的方向不同,进而所引起的土壤流失程度也有所不同<sup>[14]</sup>。等高耕作下土壤受耕作工具的作用力

较小,其迁移距离小,所造成的土壤流失量较小<sup>[15,27]</sup>。西南高山峡谷区域内由于山高,坡陡,地窄,且坡耕地分布广泛,耕作频繁,加之人类活动及其不合理的开发利用加速土壤侵蚀,而减小耕作频次与等高耕作是防治该区域坡耕地土壤流失的重要措施。

本研究通过短期连续耕作的方式开展耕作扰动强度与耕作扰动方式对坡地地形特征的影响,然而在试验过程中不同耕作次数间缺乏时间间隔,导致土壤自然沉降和土壤体积质量等特征与实际耕作活动存在差异。因此,今后研究应探索更合理且科学的试验方案开展相关耕作扰动土壤研究。此外,坡面地形特征的研究还应关注坡长、坡度、植被覆盖等因素的影响。

## 4 结论

1) 长期耕作扰动改变坡耕地坡面坡形,不同耕作方式的影响结果不同。连续 50 次顺坡耕作和等高耕作后,坡形逐渐由线性坡分别向“┌”型和“└”复合坡演化。连续常规顺坡耕作和等高耕作后造成上坡侵蚀分别为 0~2.91、0~2.17 m,下坡堆积分别为 17.41~20、18.76~20 m。

2) 耕作扰动影响坡耕地坡面微地形特征,连续 50 次耕作后地表粗糙度和地形起伏度变化程度均大于等高耕作。长期顺坡耕作后上坡侵蚀区地表粗糙度和地形起伏度变化显著大于坡面其他区域。

3) 连续耕作扰动后,长期顺坡耕作加剧坡面相对高程变化,而长期等高耕作削弱坡面相对高程变化。耕作频次和耕作方式均与土壤流失量呈显著正相关。

4) 耕作扰动是影响土壤流失量的关键影响因素。耕作次数对土壤流失量的直接影响效应最大,耕作方式对土壤流失量的间接影响效应最大。等高耕作与减小耕作频次是防治西南高山峡谷区坡耕地土壤流失的重要措施。

#### 参考文献:

- [1] 陈昱,刘方平,吴彩云,等.雨型和种植模式对鄱阳湖平原区农田水土流失的影响[J].水土保持研究,2024,31(5):18-25.  
CHEN Y, LIU F P, WU C Y, et al. Effects of rain patterns and planting patterns on soil and water losses in farmland in the Poyang Lake plain area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 18-25.
- [2] 李海,沈鹏,吕凯,等.玉米间作大豆行比配置对坡耕地水土流失的影响[J].水土保持研究,2024,31(4):11-19.  
LI H, SHEN P, LÜ K, et al. Effect of row ratio configuration of maize intercropping soybean on soil and water loss in slope farmland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 11-19.
- [3] 吴悦溪,任小花,严靖雯,等.基于 Web of Science 的

- 1992—2023 年径流小区土壤侵蚀研究文献计量分析[J].水资源与水工程学报,2024,35(4):212-224.
- WU Y X, REN X H, YAN J W, et al. Bibliometric analysis of soil erosion research at runoff plot scale based on Web of Science from 1992 to 2023 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35(4): 212-224.
- [4] ZHAO P Z, LI S, WANG E H, et al. Tillage erosion and its effect on spatial variations of soil organic carbon in the black soil region of China[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 72D81.
- [5] WILKEN F, KETTERER M, KOSZINSKI S, et al. Understanding the role of water and tillage erosion from <sup>239,240</sup>Pu tracer measurements using inverse modelling [J]. Soil, 2020, 6(2): 549-564.
- [6] 丁琳, 黄婷婷, 秦伟, 等. 西南高山峡谷区土壤侵蚀空间分异特征[J]. 泥沙研究, 2023, 48(6): 51-58.
- DING L, HUANG T T, QIN W, et al. Spatial variation of soil erosion in Southwest Alpine Canyon Area [J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(6): 51-58.
- [7] 伍冰晨, 齐实, 郭郑曦, 等. 西南山区林地空间格局和微地形对坡面地表产流的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 108-116.
- WU B C, QI S, GUO Z X, et al. Effects of forestland spatial pattern and micro-topography on surface runoff in a mountainous area of southwestern China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8): 108-116.
- [8] DAI J D, ZHANG J H, ZHANG Z H, et al. Effects of water discharge rate and slope gradient on runoff and sediment yield related to tillage erosion [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2021, 67(6): 849-861.
- [9] 张泽瑜, 陆淑宁, 黄淑娟, 等. 等高犁耕对黄土坡耕地坡形与坡度的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 94-102.
- ZHANG Z Y, LU S N, HUANG S X, et al. Effect of contour ploughing on the slope shape and slope of loess sloping farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 94-102.
- [10] WANG Y, ZHANG Y X, XIAN Y C, et al. Horizontal and vertical variations in soil fertility in response to soil translocation due to tillage-induced erosion on sloping cropland [J]. Catena, 2024, 242: e108089.
- [11] 贾立志, 张泽洪. 不同逆坡耕作强度对干热河谷区坡耕地水蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 14-19.
- JIA L Z, ZHANG Z H. Effect of different upslope tillage intensity on water erosion on sloping farmland in the dry-hot valley of Jinsha River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 14-19.
- [12] 袁正蓉, 巨莉, 李富程. 基于 CiteSpace 方法的近 30 年耕作侵蚀学科动态可视化分析[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 407-411.
- YUAN Z R, JU L, LI F C. Visualization analysis on discipline dynamic of tillage erosion in recent 30 years based on CiteSpace [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 407-411.
- [13] NOVARA A, NOVARA A, COMPARETTI A, et al. Effect of standard disk plough on soil translocation in sloping Sicilian vineyards [J]. Land, 2022, 11(2): e148.
- [14] 许海超, 张建辉, 戴佳栋, 等. 耕作侵蚀研究回顾和展望 [J]. 地球科学进展, 2019, 34(12): 1288-1300.
- XU H C, ZHANG J H, DAI J D, et al. Review and prospect of tillage erosion research [J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(12): 1288-1300.
- [15] XU H C, JIA L Z, ZHANG J H, et al. Combined effects of tillage direction and slope gradient on soil translocation by hoeing [J]. Catena, 2019, 175: 421-429.
- [16] 李富程, 江仁涛, 花小叶, 等. 高犁耕朝向对紫色土坡面土壤再分布的影响 [J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 106-111.
- LI F C, JIANG R T, HUA X Y. Effect of contour plowing orientation on soil redistribution on hillslope in purple soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 106-111.
- [17] 李志刚, 梁心蓝, 黄洪粮, 等. 坡耕地地表起伏对坡面漫流的影响 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 71-77.
- LI Z G, LIANG X L, HUANG H L, et al. Effect of surface land fluctuation on overland flow in sloping farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 71-77.
- [18] LUO J, WANG N N, ZHENG Z C, et al. Tillage-induced microtopography alters time-dependent intrinsic correlation of runoff and sediment yield [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 221: e105423.
- [19] 陈祖明, 王彬. 基于 SIMWE 模型的典型水土保持措施侵蚀阻控路径分析: 以通双小流域为例 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 703-710.
- CHEN Z M, WANG B. Paths of soil erosion controlled by typical soil and water conservation practices based on the SIMWE model: A case study of the Tongshuang watershed [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3): 703-710.
- [20] FENG Z Z, ZHENG X M, LI X F, et al. Soil surface roughness characteristics under different agricultural tillage practices: A case study in the black soil region of Northeast China [J]. Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17: 10781-10792.
- [21] ZHENG F Z, LOBB D A, LI S. A plot study on the effects of water eroded channels on tillage translocation [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213: e105118.



- Research,2022,277:e108405.
- [19] 马瑞琦,王德梅,陶志强,等.不同筋型小麦干物质和氮素积累对追施氮量的响应[J].植物营养与肥料学报,2022,28(4):622-631.
- MA R Q, WANG D M, TAO Z Q, Response of dry matter and nitrogen accumulation of wheats with different gluten contents to topdressing rate of nitrogen fertilizer [J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2022,28(4):622-631.
- [20] 栗丽,洪坚平,王宏庭,等.水氮互作对冬小麦氮素吸收分配及土壤硝态氮积累的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):138-142.
- LI L, HONG J P, WANG H T, et al. Effects of nitrogen and irrigation interaction on nitrogen uptake and distribution in winter wheat and nitrate accumulation in soil[J].Journal of Soil and Water Conservation,2013,27(3):138-142.
- [21] 崔亚坤,王妮妮,田中伟,等.分蘖和拔节期干旱对小麦植株氮素积累转运的影响[J].麦类作物学报,2019,39(3):322-328.
- CUI Y K, WANG N N, TIAN Z W, et al. Effect of water deficit during tillering and jointing stages on nitrogen accumulation and translocation in winter wheat[J].Journal of Triticeae Crops,2019,39(3):322-328.
- [22] 杨梅,李雪萌,秦保平,等.水氮运筹对强筋小麦干物质转运与籽粒产量的影响[J].麦类作物学报,2024,44(6):770-779.
- YANG M, LI X M, QIN B P, et al. Effects of water and nitrogen management on matter translocation and grain yield of strong gluten wheat[J].Journal of Triticeae Crops,2024,44(6):770-779.
- [23] LI Y, HUANG G, CHEN Z, et al. Effects of irrigation and fertilization on grain yield, water and nitrogen dynamics and their use efficiency of spring wheat farmland in an arid agricultural watershed of Northwest China[J].Agricultural Water Management,2022,260:e107277.
- [24] 唐锐,韩宜秀,易树生,等.不同水氮组合对冬小麦产量及水氮利用效率的调控效应[J].植物营养与肥料学报,2023,29(10):1944-1955.
- TANG R, HAN Y X, YI S S, et al. Optimal water and nitrogen combination for winter wheat yield and water-nitrogen efficiency in Guanzhong area of Shaanxi [J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2023,29(10):1944-1955.
- [25] 尹豪杰,王荣荣,蒋桂英,等.春小麦光合生理和产量对干旱复水的响应[J].水土保持学报,2023,37(6):134-144.
- YIN H J, WANG R R, JIANG G Y, et al. Response of photosynthetic physiology and yield of spring wheat to drought-rewatering[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(6):134-144.
- [26] 高翠民,杨永辉,韩伟锋,等.水氮运筹对滴灌冬小麦产量和水氮利用效率的影响[J].麦类作物学报,2024,44(7):885-893.
- GAO C M, YANG Y H, HAN W F, et al. Effect of water and nitrogen management on yield, and water and nitrogen use efficiency of winter wheat under drip irrigation[J].Journal of Triticeae Crops,2024,44(7):885-893.
- (上接第159页)
- [22] 罗辅燕,张泽洪,葛秋伶,等.金沙江流域干旱河谷区坡耕地作物类型对耕作侵蚀的影响[J].水土保持研究,2023,30(2):22-28.
- LUO F Y, ZHANG Z H, GE Q L, et al. Effects of crop types on tillage erosion in the dry valleys of Jinsha River Basin [J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30(2):22-28.
- [23] 李富程,花小叶,赵丽,等.紫色土坡地犁耕方向对耕作侵蚀的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):35-40.
- LI F C, HUA X Y, ZHAO L, et al. Effect of tillage direction on tillage erosion by ox-drawn ploughing on slope land in purple soil regions [J].Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(6):35-40.
- [24] WILDEMEERSCH J C J, VERMANG J, CORNELIS W M, et al. Tillage erosion and controlling factors in traditional farming systems in Pinar del Rio, Cuba [J].Catena,2014,121:344-353.
- [25] YANG C, SU Z G, FAN J R, et al. Simulation of the landform change process on a purple soil slope due to tillage erosion and water erosion using UAV technology [J].Journal of Mountain Science,2020,17(6):1333-1344.
- [26] 赵鹏志,陈祥伟,王恩姮.东北黑土区典型坡面耕作侵蚀定量分析[J].农业工程学报,2016,32(12):151-157.
- ZHAO P Z, CHEN X W, WANG E H. Quantitative assessment of tillage erosion on typical sloping field in black soil area of Northeast China [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(12):151-157.
- [27] 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. Effects of contour tillage on soil erosion process in different slope [J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(2):37-44.