

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.028.

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 Fuyan, ZHANG Zehong, GE Qiuling, 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.

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

罗辅燕¹, 张泽洪^{2,3}, 葛秋伶², 秦湖钞², 刘辉^{2,3}

(1.西华师范大学 环境科学与工程学院, 四川 南充 637009; 2.西华师范大学 地理科学学院, 四川 南充 637009; 3.四川省干旱河谷土壤侵蚀监测与控制工程实验室, 四川 南充 637009)

摘要:为了研究干旱河谷区坡耕地农作物种植对耕作侵蚀的影响,在不同作物类型坡耕地(玉米地和荞麦地)上进行耕作试验,通过磁性示踪法测量坡耕地顺坡耕作的耕作位移距离,分析了不同作物类型下的耕作侵蚀速率特征。结果表明:(1)试验地类的耕作位移距离表现为玉米地<荞麦地<裸地(对照地)的变化趋势,荞麦地和玉米地的耕作位移距离均显著低于裸地($p<0.05$),表明坡耕地种植玉米和荞麦可以显著减小坡耕地土壤耕作位移距离;(2)3种地类的耕作位移距离与坡度均呈显著正相关关系,玉米地和荞麦地的耕作位移距离系数 k_2 值和传输系数 k_4 值明显小于裸地,说明作物因素减小了耕作位移距离随坡度的增加幅度;(3)裸地的耕作侵蚀速率显著高于玉米地和荞麦地($p<0.01$),分别是玉米地和荞麦地的1.99倍和1.88倍,说明坡地种植农作物可明显减小坡面耕作侵蚀。综上,种植农作物可有效减少坡耕地耕作侵蚀,研究成果丰富了对坡耕地作物根系防蚀特性的认识,也为完善耕作侵蚀模型奠定重要基础。

关键词:作物类型;耕作侵蚀;磁性示踪;干旱河谷区

中图分类号:S157.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0022-07

Effects of Crop Types on Tillage Erosion in the Dry Valleys of Jinsha River Basin

LUO Fuyan¹, ZHANG Zehong^{2,3}, GE Qiuling², QIN Huchao², LIU Hui^{2,3}

(1.College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; 2.School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; 3.Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Monitoring and Control for Soil Erosion in Dry Valleys, Nanchong, Sichuan 637009, China)

Abstract: To study the effect of crop types on tillage erosion in dry valleys, tillage experiments on slope farmland with different crop types (bare field, corn field and buckwheat field) were implemented to measure the tillage displacement distance and tillage erosion rate with the magnetic tracer in the dry valley regions of Sichuan. The results showed that: the soil displacement distance of three farmlands decreased in the order: bare field>buckwheat field>corn field; soil translocation of corn field and buckwheat field was significantly less than that of bare field ($p<0.05$), and that of buckwheat land was slightly greater than that of corn land, which showed that crop factors could reduce the soil tillage displacement in sloping land; there was a significant positive correlation between tillage displacement and slope for the three land types, and tillage displacement coefficient k_2 and tillage transport coefficient k_4 for corn field and buckwheat field were significantly smaller than that of bare field, which indicated that crop factors reduced the increasing amplitude of

收稿日期:2021-10-22

修回日期:2022-01-14

资助项目:西华师范大学博士科研启动项目(412567);西华师范大学英才科研资助项目(17YC141)

第一作者:罗辅燕(1978—),女,四川攀枝花人,硕士,副教授,主要从事山区资源开发利用与环境保护、环境教育研究。E-mail:347945211@qq.com

通信作者:张泽洪(1977—),男,四川江安县人,博士,副教授,主要从事农业生态与土壤质量研究。E-mail:zhangzehong2001@126.com

<http://stbcj.paperonice.org>

tillage displacement with slope; tillage erosion rate of bare field was significantly greater than those of corn field and buckwheat within the range of measured slope field ($p < 0.01$); Compared with corn field and buckwheat field, the mean tillage erosion rate for bare field increased by 1.99 times and 1.88 times, respectively, with no significant difference between corn field and buckwheat field ($p > 0.05$). The above results indicate that the crop system reduced obviously tillage erosion for sloping farmland and weakened the influences of slope gradient on tillage erosion. The crop system is beneficial to the control of tillage erosion for slope farmland. The research results can enrich the understanding of anti-erosion characteristics of crop roots in sloping farmland and lay an important foundation for improving the tillage erosion model.

Keywords: crop types; tillage erosion; magnetic tracer; dry valleys

金沙江流域是长江流域上游主要产沙区域,而金沙江下游地区是长江上游水土流失最严重区域,多年平均输沙模数为 $2\ 060\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,是金沙江上游流域的 4 倍^[1]。四川省凉山彝族自治州(简称凉山州)绝大部分区域位于金沙江下游,也是四川省干旱河谷主要分布区域^[2],由于特殊的气候特征,加之人类活动对植被的破坏,暴雨集中,使得该区成为我国水土流失最为严重的地区之一。凉山州幅员面积大,各小流域自然条件复杂多样,其中安宁河谷区是凉山州主要的干旱河谷分布区域,亦是凉山州重要的农业产土地带。该区地质条件复杂(安宁河大断裂带),地形破碎,气候干燥,降雨集中,坡耕地分布面积广,加之不合理的耕作措施,使得该区泥石流频发,为水土流失治理带来极大困难。因此,研究该区坡耕地土壤侵蚀特征及发生机理,对合理开展坡耕地农业生产,加强水土流失治理和生态环境修复,提高农业生产的生态环境效应具有重要意义。

坡耕地农业生产过程中,为了改善土壤质量和便于种植农作物,农民需要进行耕作后再进行种植。在坡耕地的耕作过程中,由于农耕工具和重力作用导致上坡土壤不断向下坡移动,导致净余土壤量不断向下坡发生传输,进行重新分配,从而产生耕作侵蚀。国外研究者通过模型确定了耕作侵蚀占坡面土壤侵蚀的比例达 70%,占主导地位^[3-5],国内学者在黄土高原地区和紫色土区的研究表明,耕作侵蚀对坡面土壤侵蚀的贡献均大于 40%^[6-7],耕作侵蚀在坡面土壤侵蚀中甚至超过了水力侵蚀,是坡面土壤侵蚀的主要贡献者。在疏松和翻转整个耕层的过程中,耕作不仅导致土壤向下坡移动,同时也改变了土壤耕层理化性质,削弱了土壤抗蚀性,间接地促进了水蚀的发展^[3,8]。耕作侵蚀不仅是坡面土壤侵蚀的主要贡献者而且也促进了坡面水力侵蚀,因此,防治坡耕地土壤侵蚀不仅需要控制水力侵蚀,更需要采取措施控制人类耕作活动导致的耕作侵蚀。植物根系影响土壤侵蚀一方面是地上部分性状通过拦截降雨、削减雨滴动能和增大坡面粗糙度减小流速

等方式减小坡面水力侵蚀,而地下部分根系性状则通过根系对土壤加固作用和根系分泌物对土壤的生物化学粘结作用影响土壤性质,从而影响土壤抗剪强度或可蚀性,进而影响土壤侵蚀。植被根系可以固结土壤,影响土壤水分含量和土壤结构,已有较多研究表明土壤-根系复合体的抗剪强度随根系含量的增加而增加,根系对土壤抗剪强度具有增强效应,含根量、根长和根系体积等根系参数与土壤抗剪强度呈正相关关系^[9-10]。坡耕地农作物根系密度和分布特征使得坡面土壤理化性质产生变化,土壤抗剪强度存在异质性,因而使得种植作物的土壤可耕性存在差异。另外,因根系的固结作用使得较大土体在坡面的运动过程中,不容易破碎,从而影响其运动的距离,因此,最终影响耕作对土壤的传输作用。

作物根系系统可以固结土壤,增强土壤抗剪强度,影响土壤耕性,同时在耕作过程中,也可以抑制土体的分解,从而影响土体在坡面的运动距离,因此,可以影响坡耕地土壤耕作侵蚀。但是,当前的坡面耕作侵蚀研究均较少考虑土壤中根系含量及分布特征对耕作位移的影响,特别是不同作物类型下的坡面土壤耕作侵蚀研究还较为缺乏,本研究以凉山州喜德县干旱河谷坡耕地为研究对象,利用磁性示踪技术,研究作物种植下的坡耕地耕作侵蚀特征,为该区坡耕地水土流失治理提供理论依据,也为凉山州干旱河谷区坡耕地水土流失治理和生态修复提供对策和建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省凉山州喜德县李子乡($28^{\circ}2'5''$, $102^{\circ}12'35''$),属于深切河谷低山丘陵地貌,海拔 1 700 m 左右,气候属于低纬度高海拔中亚热带季风气候,年均温 $20\sim 27^{\circ}\text{C}$,冬暖干燥,夏凉湿润,无明显四季差别,降雨集中在 5—10 月,约占总降水量的 90%,10 月—次年 4 月为旱季,多年平均降水量 1 006 mm,年均蒸发量为 1 945 mm,除雨季外,蒸发量远大于降水量。该区位

于金沙江下游,安宁河谷以东地区,境内地形总体特征是山高坡陡谷深(以中高山地为主,河谷平坝仅占全境面积的 3.82%),生态约束大。喜德县全县耕地 10.6%,其中常耕地仅 6%,坡耕地分布面积大,25°以上坡耕地面积占比达到 60%以上,特征为耕地面积小、碎片化、种垦难度高,坡耕地土地利用类型相对单一,坡地农作物以小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米

(*Zea mays* L.)、红薯[*Ipomoea batatas* (L.) Lam.]单一种植为主。土壤类型为第四纪松散堆积物上发育的山地黄棕壤,土壤质地较细,土层深度最深可达 1 m。该区地形破碎,传统耕作机具为锄耕,每年仅在农作物收获过后进行耕作一次,耕作方向主要采用顺坡耕作。试验地土壤容重和水分含量差异较小,忽略二者因素的影响(表 1)。

表 1 不同土地作物类型土壤的基本信息

土地利用类型	坡度/%	海拔/m	容重/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	土壤含水量/%	土壤颗粒组成/%		
					砂粒 (2~0.02 mm)	粉粒 (0.02~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
裸地	0~60	1300~1600	1.525	12.7	28.78	16.27	54.95
玉米地	0~60	1900	1.423	11.2	29.34	16.21	54.45
荞麦地	0~60	1200	1.453	11.8	28.59	15.65	55.76

1.2 试验方法

为了测量不同地类耕作位移距离,试验选取了分别种植玉米、荞麦的坡地以及裸地 3 种地类,玉米和荞麦的地上部分秸秆已收割,另外选择当年未种植农作物、全年无杂草、土壤中无根系的裸地作为对照地。3 种地类选择坡度范围为 0~57.7%(0°~30°),为了准确反映该坡度范围的耕作侵蚀,每种地类的坡度选择控制间隔 3°以内,每种地类的耕作试验的坡地样本约为 12~14 个,能覆盖该区坡耕地的坡度范围。

野外耕作试验于 2020 年 11 月在四川省凉山州喜德县李子乡洛乃格村进行,在选定的坡耕地上,利用环刀测定土壤容重,用 TDR 水分仪测定土壤水分(表 1)。在试验坡耕地上布设示踪小区(图 1),挖出长 1.0 m,宽 0.2 m,深 0.2 m,即 1.0 m×0.2 m×0.2 m 的土坑,将挖出的土壤用磁强计(捷克产 KT-10, TER-RAPLUS)测定磁性强度本底值后与磁铁粉(1.5 kg)充分混合,混合后的土壤磁性强度为土壤磁性本地值的 20~30 倍^[11],多次测定混合土壤的磁强,保证土壤和磁铁粉混合均匀,将混合了磁铁粉的土壤回填至示踪小区中,并进行压实。按当地顺坡耕作习惯,采用锄具人工耕作,耕作方向由示踪小区下方 1.0 m 处垂直于小区方向向上坡耕作,耕作宽度超过示踪区,耕作深度为 0.2 m,直到耕过示踪小区 0.2 m 为止。耕作后,以 0.1 m 为间距在示踪小区下方连续进行取样,取样深度为 0.2 m,取样直至测定采集的土壤磁性强度与土壤本底磁性值一致为止。

1.3 计算方法

耕作引起的土壤位移距离可依据测定的磁强值在坡面的重新分布来计算,依据 Lobb^[12]和 zhang^[13]等建立的土壤位移计算方式,向下耕作位移可由以下公式计算:

$$D_d = \int_0^L \left[1 - \frac{C(x)}{C_0} \right] dx \quad (1)$$

式中: D_d 为平均耕作位移(m); $C(x)$ 为耕作后测得的磁性示踪剂强度(10^5 SD); C_0 为耕作前标记小区初始的磁性示踪剂强度(10^5 SD); L 为采样的最大距离(m)。



图 1 取样示意图和耕作试验现场

耕作位移与传输量运用下面模型计算^[13]:

$$D_d = k_1 + k_2 S \quad (2)$$

$$Q_s = k_3 + k_4 S \quad (3)$$

$$k_3 = D_t \rho_b k_1 \quad (4)$$

$$k_4 = D_t \rho_b k_2 \quad (5)$$

式中: D_d 为平均耕作位移(m); Q_s 为单次耕作引起的位移量(kg/m); S 为坡度(m/m); k_1 和 k_2 为位移距离系数(m); k_3 和 k_4 为耕作传输系数(kg/m); D_t 为耕作深度(m); ρ_b 为土壤容重(kg/m^3)。

耕作侵蚀速率由单位坡宽的向下坡传输量除坡长,因此,耕作侵蚀速率公式为:

$$R = \frac{10Q_s}{L_d} \quad (6)$$

式中: R 为耕作侵蚀速率(t/hm^2); Q_s 为单次耕作引起的位移量(kg/m); L_d 为向下坡长(m)。

1.4 数据分析

利用 SPSS 10.1 中的相关分析、方差分析、回归分析、配对样本 T 检验等模块,判断不同作物类型坡面耕作土壤位移、耕作侵蚀速率是否存在显著差异;通过

Origin8.5 软件建立不同作物类型坡面耕作土壤位移、耕作侵蚀速率与坡度的关系,通过 Origin 8.5 软件建立。

2 结果与分析

2.1 示踪剂分布特征

试验坡地土壤磁性强度本地值为 $3.2 \times 10^{-4} \sim 1.91 \times 10^{-3}$ SI, 平均值约为 1.01×10^{-3} SI, 混合磁铁粉后的示踪小区土壤磁性强度为 $3.58 \times 10^{-3} \sim 3.96 \times 10^{-2}$ SI, 平均为 2.14×10^{-2} SI, 约是土壤背景值的 21 倍, 显著大于测试区土壤背景磁性强度, 能较好的与土壤背景磁性进行有效区分, 避免不同土壤磁性背景差异对耕作位移测定产生影响。耕作过程中, 从示踪小区中线下坡约 1 m 位置开始耕作, 耕作后示踪小区磁性强度显著降低, 最大值出现在示踪小区基线下部 0~20 cm 范围。对 10° 以下缓坡来说, 3 种地类耕作后磁铁粉运移最远距离均没有差异, 而在 20° 以上陡坡, 磁铁粉最远运移距离特征是: 裸地 > 玉米地 > 荞麦地, 而在 25° 陡坡, 裸地和玉米地明显大于荞麦地, 最大可达示踪小区下部约 80 cm (表 2)。此结果表明在缓坡阶段, 裸地、玉米地和荞麦地顺坡耕作后, 示踪区的土壤运移并没有明显变化, 而在陡坡, 裸地示踪区土壤则运移最远, 玉米地次之, 荞麦地运移距离最短。

2.2 耕作位移

根据耕作位移计算结果, 裸地、玉米地和荞麦地的耕作位移距离与坡度间均呈显著的线性正相关关系 ($p < 0.05$) (图 2), 在试验坡度范围内, 耕作位移距

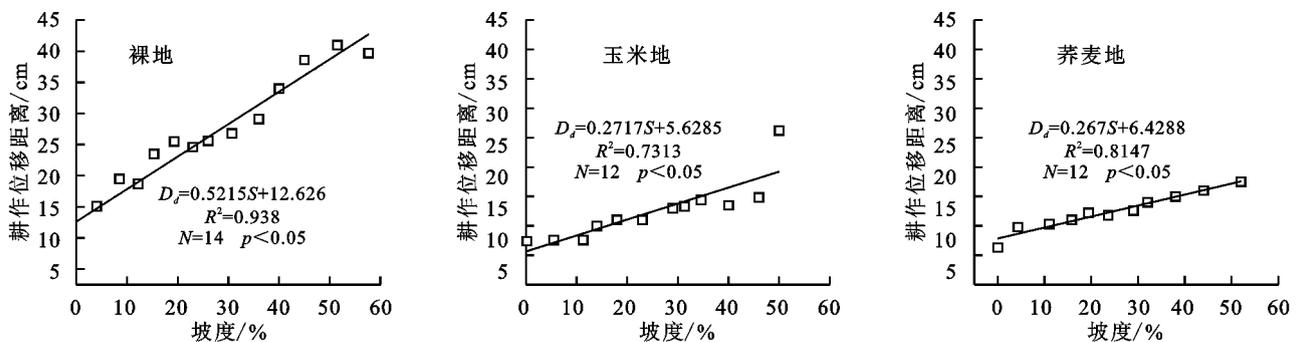


图 2 耕作位移距离与坡度关系

表 3 不同作物类型的耕作位移距离特征 cm

耕地地类	平均耕作位移距离
裸地	26.38 ± 9.28a
玉米地	11.82 ± 3.19b
荞麦地	12.41 ± 3.00b

注:同一字母相同表示无显著差异,字母不同表示存在显著差异 ($p < 0.05$)。

2.3 耕作侵蚀速率

通过耕作侵蚀速率计算公式(3—6),假设坡长均为 10 m,可计算裸地、玉米地和荞麦地的单次耕作侵蚀

离随坡度增加而增加,位移距离系数 k_1 大小关系为: 裸地 > 玉米地 > 荞麦地,裸地 k_1 分别比玉米地和荞麦地大 47.9%, 48.8%; 耕作位移距离系数 k_2 表现出裸地分别比玉米地和荞麦地大 55.4%, 49.1%, 而玉米地和荞麦地的位移距离系数则没有明显差异,表明裸地耕作位移距离随坡度增加幅度要大于玉米地和荞麦地。另外,不同作物类型的坡耕地平均土壤耕作位移距离大小关系为: 裸地 > 荞麦地 > 玉米地,裸地的平均耕作位移距离为 26.38 cm,显著大于玉米地的平均耕作位移距离 11.82 cm ($p < 0.05$),也大于荞麦地的平均耕作位移距离 12.41 cm ($p < 0.05$); 而玉米地和荞麦地之间的耕作位移距离则没有明显差异 ($p > 0.5$),但是荞麦地的耕作位移距离略大于玉米地 (表 3)。以上结果说明在试验坡度范围裸地耕作造成的土壤位移距离明显比玉米地和荞麦地要大,玉米地和荞麦地减少了耕作造成的土壤位移,即未种植农作物进行耕作造成的土壤顺坡耕作位移距离要大于种植庄稼。另外,种植玉米和荞麦在收割后其耕作位移距离同样随坡度的增加,其耕作位移距离随之增加,和未种植作物的裸地有同样的变化规律。

表 2 不同作物类型坡耕地示踪剂运移最远距离

坡度/ $^\circ$	最远距离/cm		
	裸地	玉米地	荞麦地
5	30	30	30
10	40	40	40
15	60	50	50
20	70	60	50
25	80	80	60

速率,3 种地类耕作侵蚀速率与坡度之间呈线性正相关关系(图 3),裸地的耕作侵蚀速率随坡度变化的斜率为 1.649 8,分别是玉米地(0.764 4)和荞麦地(0.781 1)的 2.2 倍和 2.1 倍,表明裸地耕作侵蚀速率随坡度变化的幅度大于玉米地和荞麦地,作物种植弱化了耕作侵蚀随坡度变化强度。方差分析结果(表 4)显示,裸地的耕作侵蚀速率明显大于玉米地和荞麦地的耕作侵蚀速率 ($p < 0.01$),其中裸地单次平均耕作侵蚀速率为 75.85 t/hm^2 ,分别是玉米地(38.15 t/hm^2)、荞

麦地(40.62 t/hm²)的1.99倍和1.88倍;而玉米地的单次耕作侵蚀速率和荞麦地的耕作侵蚀没有明显差异($p>0.05$),玉米地单次耕侵蚀速率(38.15 t/hm²)为荞麦地(40.62 t/hm²)的93.9%。耕作侵蚀速率结果表明未种植农作物坡耕地的耕作侵蚀速率明显比种植了玉米和荞麦的坡耕地大,坡耕地作物种植能有效减小坡耕地耕作侵蚀。

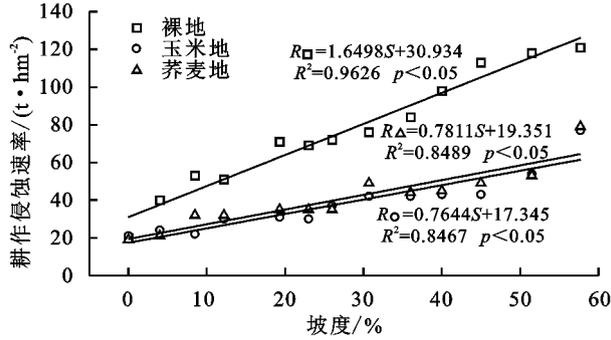


图3 耕作侵蚀速率与坡度之间关系

表4 不同地类耕作侵蚀速率差异 t/hm²

作物地类类型	裸地	玉米地	荞麦地
方差结果	75.85±30.80a	38.15±15.21b	40.62±15.53b

注:同一字母相同表示无显著差异,字母不同表示存在显著差异($p<0.001$)。

3 讨论

通过对比云南元谋干热河谷区未种植作物裸地耕作位移与坡度关系($D_a=1.1S+0.2, R^2=0.81$,

表5 不同地区地类耕作位移距离差异

坡度/ %	玉米地/ cm	荞麦地/ cm	云南东川 黄棕壤裸地/cm	云南元谋 燥红土裸地/cm	凉山州 黄棕壤裸地/cm
8.5	8	10	15	20	20
19.3	11	12	31	31	25
26.0	13	13	41	26	26
36.0	14	15	32	33	29
45.0	15	16	43	41	39
方差结果	12.20±2.78a	13.20±2.39a	32.40±11.08b	30.20±7.86b	27.80±7.05b

注:同一字母相同表示无显著差异,字母不同表示存在显著差异($p<0.05$);数据来源于文献[19]。

干旱河谷区其他区域坡耕地的耕作侵蚀研究是基于裸地即未种植庄稼时开展的耕作侵蚀试验,将本研究中玉米地和荞麦地的主要坡度耕作侵蚀速率与其他区域裸地耕作试验结果进行比较(表6),结果显示本研究中玉米地和荞麦地的耕作侵蚀速率明显低于云南东川和元谋裸地的耕作侵蚀速率($p<0.05$),表明坡耕地上种植荞麦和玉米有利于减小耕作侵蚀。种植荞麦和玉米减小耕作侵蚀一方面是通过耕作位移体现,另一方面是体现在耕作深度上。

通过对比已开展的干旱河谷区坡耕地的耕作试验

$p<0.01$)^[14],其耕作位移距离系数 k_2 值(1.1)也明显比本研究区玉米地($k_2=0.2717$)和荞麦地($k_2=0.2670$)大,其截距 k_1 值($k_1=20$)也明显大于本研究区玉米地($k_1=5.6285$)和荞麦地($k_1=0.2670$),表明种植玉米和荞麦的耕地,其耕作位移距离明显减少,农作物因素弱化耕作位移距离随坡度的增加幅度,通过在坡耕地上种植农作物可以显著减小因为坡度增加引起坡面土壤耕作位移距离的增大。

通过对比干旱河谷区裸地和本研究区玉米地、荞麦地主要坡度的耕作位移距离(表5),干旱河谷区坡耕地裸地耕作位移距离明显比本研究区种植玉米和荞麦的耕作位移距离大($p<0.05$),裸地和农作物种植坡耕地的耕作位移这种差异性,主要体现在根系对坡面土壤耕作位移的影响。由于根系在土体中分布纵横,特别是干旱河谷区农作物根系更加发达,根系和随之盘结的土壤一方面通过固结和束缚增大了土体黏附力,形成特殊的复合体,增加了总体强度,从而增加了土壤的迁移阻力,提高土层对滑移的抵抗力^[15-16];另一方面,根系表面分布的叉根、根节、根毛会增大与土壤接触面积,有效增加根系和土体的摩擦阻力^[17],因此,在耕作过程中,当土壤和根系形成的复合体受到破碎、剥离而发生滑移时,根系和土壤之间的摩擦阻力和黏附力就会通过根系抗拉阻碍土体发生位移^[18],根系这种通过改变土壤土力学性质来阻碍坡面土壤位移的作用是农作物种植坡地显著减少耕作位移的根本原因。

耕作深度(表7),尽管几种坡地的耕作深度没有明显差异,总体上裸地的平均耕作深度比种植农作物的坡地耕作深度大约2~5 cm,最大增加33%耕作深度,而玉米坡地的平均耕作深度比荞麦地小1 cm,二者并没有明显差异。尽管耕作深度因单次人力大小的差异而导致单次耕作深度过大或过小,但习惯性的耕作深度仍然受到土壤可耕作性的影响,特别是土壤密度、含水量、土壤结构、剪切强度、植物根系和有机碳含量等因素影响,其中植物根系因素是植被覆盖的根本原因,根系分布与耕层厚度存在密切关系^[18,20],根系生理活动的分泌

物对土壤具有胶结作用,可以将附近小的团聚体黏聚形成较大的团聚体,并网络串联形成形状各异的土块,其团聚体构成会影响其耕作性。根据纤维理论,植物根系犹如纤维^[21],由于纤维材料的柔韧性,根系受锄具作用时存在严重的阻挡作用,影响耕作工具进一步深入,因此必然会其耕作深度,玉米根系成

熟期最大根深可达 230 cm,上层土壤(0—40 cm)集中了 50%以上的根量^[22],根茬质量主要分布在 20~35 cm 根深范围,根幅范围 30~45 cm^[23],可见耕作过程中耕作深度处于玉米根系分布集中的深度,其对耕作深度影响大,而荞麦根系分布范围和分布深度相对玉米根系而言较小,对耕作影响较小。

表 6 不同地区地类耕作侵蚀速率差异

坡度/%	侵蚀速率/(t·hm ⁻²)				
	玉米地	荞麦地	云南东川黄棕壤裸地	云南元谋燥红土裸地	四川凉山州黄棕壤裸地
8.5	22	32	35.47	53.64	53
19.3	31	35	52.29	69.56	71
26.0	37	35	66.29	85.95	72
36.0	42	44	71.95	103.16	84
45.0	43	49	87.67	121.47	113
方差结果	35.00±8.69a	39.00±7.18a	62.73±19.828b	86.76.00±7.18b	78.60±22.19b

注:同一字母相同表示无显著差异,字母不同表示存在显著差异($p < 0.05$);数据来源于文献[19]。

表 7 不同地区地类耕作深度差异

坡度/%	玉米地/cm	荞麦地/cm	云南东川	云南元谋	凉山州
			黄棕壤裸地/cm	燥红土裸地/cm	黄棕壤裸地/cm
8.5	16	18	20	20	19
19.3	16	17	22	19	19
26.0	15	17	16	20	18
36.0	16	17	20	18	18
45.0	15	16	20	18	18
方差结果	15.60±0.55a	17.00±0.71a	19.60±2.19a	19.00±1.00a	18.40±0.55a

注:同一字母相同表示无显著差异,字母不同表示存在显著差异($p < 0.05$);数据来源于文献[15]。

通过本研究表明坡耕地种植农作物后,实际产生的耕作侵蚀明显要小于裸地,坡耕地作物系统能有效减小坡面耕作侵蚀,因此,在该区坡耕地进行耕作必须考虑作物及作物类型对耕作侵蚀的影响。在已有的研究中,试验均在裸地开展,未考虑耕地作物对耕作侵蚀的影响^[24-25],在折算坡耕地土壤耕作侵蚀的过程中实际得出的值偏大。坡耕地土壤侵蚀是耕作侵蚀和水蚀共同作用的结果,在紫色土和干热河谷区开展的耕作侵蚀对水蚀影响的研究中^[26-27],也未考虑作物类别的影响,可能导致其试验结果和真实情况存在较大差异。已有的研究表明耕地作物通过改变土壤理化性质进而影响土壤侵蚀^[28-31],特别是作物根系通过影响水分下渗、土壤抗蚀性与抗冲性,最终影响土壤侵蚀^[32-33]。因而,未来在坡耕地开展耕作侵蚀和水利侵蚀相互作用机制研究时,其作物类型应当是重点考虑的因素。

4 结论

(1) 由于农作物根系的阻挡作用,玉米地和荞麦地的耕作位移距离显著小于裸地,同时玉米地的耕作

位移距离小于荞麦地,表明坡耕地种植荞麦和玉米对耕作造成的土壤位移有显著减小作用。

(2) 3 种地类耕作位移距离随坡度呈现明显的线性正相关关系,裸地耕作位移距离系数 K 值明显大于玉米地和荞麦地,表明农作物的存在能够弱化耕作位移随坡度的增加幅度。

(3) 3 种地类耕作侵蚀速率与坡度之间呈线性正相关关系,裸地耕作传输系数 K 值明显大于玉米地和荞麦地,玉米地和荞麦地之间没有明显差异;裸地耕作侵蚀速率明显大于玉米地和荞麦地,玉米地和荞麦地之间的耕作侵蚀速率没有明显差异。表明作物系统能显著减小坡面耕作侵蚀,并能弱化坡度对坡面耕作侵蚀的加剧作用,有利于控制坡面耕作侵蚀。

参考文献:

- [1] 第宝锋,崔鹏,艾南山,等.中国水土保持生态修复分区治理措施[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(2): 64-69.
- [2] 蔡凡隆,张军,胡开波.四川干旱河谷的分布与面积调查[J].四川林业科技,2009,30(4):82-85.
- [3] Lobb D A, Kachanoski R G, Miller M H. Tillage trans-

- location and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using ^{137}Cs as a tracer[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995,75(2):211-218.
- [4] Quine T A, Zhang Y. An investigation of spatial variation in soil erosion, soil properties, and crop production within an agricultural field in Devon, United Kingdom[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002,57(1):55-65.
- [5] Heckrath G, Djurhuus J, Quine T A, et al. Tillage erosion and its effect on soil properties and crop yield in Denmark [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(1): 312-324.
- [6] 王占礼, 邵明安. 黄土坡地耕作侵蚀对主要土壤元素影响的研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 63-67.
- [7] 苏正安, 张建辉, 周维. 川中丘陵区耕作侵蚀对土壤侵蚀贡献的定量研究[J]. *山地学报*, 2006, 24(S): 64-70.
- [8] Zhang S L, Zhang X Y, Huffman T, et al. Influence of topography and land management on soil nutrients variability in Northeast China [J]. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 2011, 89: 427-438.
- [9] 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 1996, 1(2): 31-38.
- [10] 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(5): 125-130.
- [11] 张泽洪, 张建辉, 王勇, 等. 两种土壤磁性特征及其对磁性示踪试验的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 58-61.
- [12] Lobb D A, Quine T A, Govers G, et al. Comparison of methods used to calculate tillage translocation using plot-tracers[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56(4): 321-328.
- [13] Zhang J H, Su Z A, Nie X J. An investigation of soil translocation and erosion by conservation hoeing tillage on steep lands using a magnetic tracer[J]. *Soil Tillage and Research*, 2009, 105: 177-183.
- [14] Wang Y, Zhang Z H, Zhang J H, et al. Effect of surface rills on soil redistribution by tillage erosion on a steep hillslope[J]. *Geomorphology*, 2021, 380(1): 7-9.
- [15] 郭维俊, 黄高宝, 王芬娥, 等. 土壤-植物根系复合体本构关系的理论研究[J]. *中国农业大学学报*, 2006, 11(2): 35-38.
- [16] Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, et al. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 666-678.
- [17] 谌芸, 何丙辉, 练彩霞, 等. 三峡库区陡坡根-土复合体抗冲性能[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 5173-5181.
- [18] 贺长彬, 尤泳, 王德成, 等. 退化草地复合体力学特性与影响因素研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 79-89.
- [19] 张泽洪. 干热河谷区坡面水蚀与耕作侵蚀的交互作用机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [20] 杨越. 黑土不同耕层厚度对作物养分吸收及根系分布的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [21] 谭敏, 余永富, 胡正峰, 等. 根系分布形式和土壤质地对作物蒸腾量影响的模拟研究[J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(8): 1382-1388.
- [22] 刘晶淼, 安顺清, 廖荣伟, 等. 米根系在土壤剖面中的分布研究[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(3): 517-521.
- [23] 孙剑. 玉米根茬结构和力学特征及其土壤的摩擦学性能[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [24] Zhang J H, Lobb D A, Li Y L, et al. Assessment of tillage translocation and tillage erosion by hoeing on the steep land in hilly areas of Sichuan, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 75(2): 99-107.
- [25] Wang Y, Zhang J H, Zhang Z H. Two fold influences of intensive tillage on water-stable aggregate distributions within the steep hillslope landscape[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 151: 82-92.
- [26] Wang Y, Zhang J H, Zhang Z H, et al. Impact of tillage erosion on water erosion in a hilly landscape[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 552: 522-532.
- [27] 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*, 2020, 67(6): 1-13.
- [28] Armstrong C L, Mitchell J. Transformations of rainfall by plant canopy[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1987, 30(3): 688-696.
- [29] 王迪, 李久生, 饶敏杰. 玉米冠层对喷灌水量再分配影响的田间试验研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 43-47.
- [30] Moss A, Green T. Erosive effects of the large water drops (gravity drops) that fall from plants [J]. *Soil Research*, 1987, 25(1): 9-20.
- [31] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(1): 1-9.
- [32] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 34-37.
- [33] Wainwright J, Parsons A J, Schlsinger W H, et al. Hydrology-vegetation interactions in areas of discontinuous flow on a semi-arid Bajada, Southern New Mexico[J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 51(3): 319-338.