

等高犁耕朝向对紫色土坡面土壤再分布的影响

李富程, 江仁涛, 花小叶

(西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要:选择一块坡长 15 m、坡度 14.16% 的坡地,采用磁性示踪法分析等高向下犁耕(向下坡方向翻垡)和等高向上犁耕(向上坡方向翻垡)的土壤再分布特征,利用模拟耕作(15 次)检验两种等高犁耕的长期作用下对土壤剖面 and 微地貌演化的影响。结果表明:等高向下犁耕导致土壤发生向下坡移动,土壤位移量为 15.62~28.70 kg/m,坡度对其影响不显著($p=0.93$);等高向上犁耕导致土壤同时发生向下坡和向上坡移动,土壤净位移量为 -10.91~8.23 kg/m,坡度对其有显著影响($p<0.001$),土壤净位移方向随着坡度的增大由向上坡转为向下坡,本研究条件下临界坡度为 14%;等高向下犁耕 15 次后坡顶侵蚀深度是原土层深度的 132%,耕作后土层深度与耕作深度相当,表明等高向下犁耕加速土壤侵蚀和促进母岩成土的双重作用共同维持着坡顶土层深度的稳定;等高向上犁耕 15 次后坡顶土层深度增加了 12.7%,表明等高向上犁耕具有保护坡顶土层深度的作用。等高向上犁耕是一种防治类似紫色土的薄层土壤耕作侵蚀和土壤退化的有效措施。

关键词:耕作侵蚀; 等高耕作; 磁性示踪; 耕作位移; 土壤退化

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)03-0106-06

Effect of Contour Plowing Orientation on Soil Redistribution on Hillslope in Purple Soil

LI Fucheng, JIANG Rentao, HUA Xiaoye

(College of Resources & Environment, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: A hillslope with a length of 15 m and a slope gradient of 14.16% was selected as the experimental site in the hilly areas of the Sichuan Basin, China. The magnetic tracer method was used to determine the rates and patterns of soil redistribution for downward contour plowing (i. e., downslope turning the soil) and upward contour plowing (i. e., upslope turning the soil), respectively. Consecutive tillage by ox-drawn ploughing was performed 15 times for downward contour plowing and upward contour plowing, respectively, to simulate the impact of long-term tillage on soil profile transformation and microtopography evolution at different slope positions. The results showed that downward contour plowing caused only downslope soil translocation. Soil translocation rates ranged from 15.62 to 28.70 kg/m and no significant correlation was found between soil translocation rates and slope gradient for downward contour plowing ($p=0.93$). For upward contour plowing, the soil extended to both sides of plough blade, i. e. the soil moved both upslope and downslope simultaneously. Net downslope translocation rates ranged from -10.91 to 8.23 kg/m. Soil translocation rates were significantly correlated with slope gradients for upward contour plowing ($p<0.001$), and net displacement direction turned from uphill to downhill when slope gradient increased to 14% under this study condition. The eroded depth of soil profile at the summit position after 15 times downward contour plowing was 132% more than its original depth of pre-tillage soil profile, and the depth of post-tillage soil profile was equal to tillage depth, indicating that the downward contour plowing plays a dual roles; enhancing soil erosion and accelerating pedogenic processes when the depth of soil profile was less than tillage depth. For upward contour plowing, the depth of post-tillage soil profile at the summit position increased by 12.7%, indicating that it plays an important role in protecting soil profile. Upward contour plowing could be

收稿日期: 2015-12-14

修回日期: 2016-01-05

资助项目: 国家自然科学基金“四川紫色土区耕作机具与坡面要素的适配机制”(41401301); 四川省科技支撑项目“地震灾区生态恢复与灾害防治关键技术研究”(2014SZ0058); 国家科技支撑计划项目“川西北藏区沙化土地生态修复技术研究及示范”(2015BAC05B04); 西南科技大学博士基金“耕作侵蚀的边界效应对土壤输送、侵蚀、补偿与平衡机制”(13zx7129)

第一作者: 李富程(1982—), 男, 吉林蛟河人, 博士, 讲师, 主要从事农业生态与水土保持研究。E-mail: lfckind@163.com

an effective protective measure in reducing tillage erosion and preventing soil from degradation on the sloping land in such as purple soil with thin soil over bedrock.

Keywords: tillage erosion; contour tillage; magnetic tracer; tillage translocation; soil degradation

耕作侵蚀过程机制和保持耕作技术开发是我国现阶段水土保持科学技术的重点研究领域^[1]。耕作侵蚀主要发生在上坡或凸坡部位,而耕作沉积发生在坡脚或凹坡部位^[2-4]。大量研究证实耕作侵蚀导致的土壤再分布是坡耕地土壤退化的重要过程^[5-6]。紫色土的成土速率极快,但大多坡耕地上坡部位土层厚度只有20~30 cm,距其维持基本稳定的生产力所需土层厚度60 cm以上相差甚远^[7]。紫色土坡耕地土壤“浅薄化”一方面由其发育浅、坡度大、侵蚀强等先天条件决定,另一方面受不合理的人类耕作活动影响^[7-8]。因地制宜地优化耕作操作,选择能够减小耕作侵蚀的耕作机具和耕作方式,是防治薄层紫色土继续退化的经济可行的重要手段。耕作方向对耕作侵蚀有显著影响^[9],其中等高耕作的耕作侵蚀较小,被认为是一种可以有效减小耕作侵蚀的保护性耕作措施^[10-11]。常规畜力等高犁耕从坡脚开犁,向下坡方向翻垡,土壤位移量相对较大^[12-13]。因此,本文采用磁性示踪法和模拟耕作法,比较研究等高犁耕向下坡翻垡(简称等高向下犁耕)和等高犁耕向上坡翻垡(简称等高向上犁耕)的土壤再分布模式和强度,模拟两种等高犁耕的长期耕作对土壤剖面和微地貌演化的影响,为紫色土坡耕地退化土壤的恢复与重建提供重要支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于四川丘陵区的绵阳市游仙区官司河流域(31°33'14''N, 104°47'50''E)。该区海拔介于500~638 m,相对高差50~100 m。气候类型为亚热带湿润季风气候,平均降水量和蒸发量分别为986.5 mm和550 mm。土壤类型为石灰性紫色土,土层较浅薄,且直接下覆母岩层,出露地层为白垩系和第四系,主要为砂岩和页岩的重复叠置。坡地农作物主要有油菜(*Brassica campestris* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、红薯(*Ipomoea batatas* L. Lam. var. *batatas*)、花生(*Arachis hypogaea* Linn.)等。当地农民传统耕作采用牛拉铧式犁,为了省力和方便操作,大多采用等高耕作。等高犁耕有两种翻垡方式:向下坡翻垡和向上坡翻垡。试验地在耕作试验前已有半年未耕过。

1.2 试验设计与研究方法

试验开展于2014年12月。选择一块坡长为15 m、

坡度为14.16%的坡地,将坡地沿顺坡方向分成4个样地(I, II, III, IV),每个样地宽度为5 m,相邻样地间距为2 m。I和II样地分别用于开展等高向下犁耕和等高向上犁耕的模拟耕作,III和IV样地分别用于开展等高向下犁耕和等高向上犁耕的耕作位移试验。采用当地的牛拉三角铧式犁进行耕作,犁的主要特征参数为:犁铧为等边三角形,两条侧边为0.34 m,底边为0.21 m;犁壁为长方形,长为0.28 m,宽为0.18 m;犁壁和犁铧组成的犁体曲面半径为0.57 m,弦长为0.60 m,犁体曲面直接固定在犁梢上,且与犁梢犁辕组成的面垂直。

两种等高犁耕的模拟耕作各进行15次。等高向下犁耕总是自坡脚开始沿等高线来回耕作至坡顶,耕作时犁辕朝下坡方向倾斜约20%(以垂直水平面为基准),向下坡方向翻垡;相反地,等高向上犁耕总是自坡顶开始沿等高线来回耕作至坡脚,耕作时犁辕朝上坡方向倾斜约20%,向上坡方向翻垡。犁耕深度约12 cm,当土层深度小于12 cm时深耕页岩补充土层厚度,犁耕宽度为0.2 m左右。整个过程在3 d内完成,期间无降雨。分别在耕作前、模拟耕作15次后采样,从坡顶至坡脚布设2条采样带,每隔5 m利用土壤采样器(Eijkelkamp, 荷兰)采集整个土壤剖面,按5 cm取土壤分层样,同一坡位相同深度的两筒样品合为一个混合样。利用探棒探测耕作前后土层深度变化(Eijkelkamp, 荷兰)。应用GPS测定耕作前后坡地微地貌变化(T4 GNSS, 中国)。

耕作位移试验采用磁性示踪法,磁性示踪剂选择粒径200目的钛铁矿粉。III和IV样地自坡顶向坡脚以间距2 m布置磁性示踪小区,每个样地设置两列示踪小区,两个相邻小区间距为1 m,共设置28个尺寸为长1.0 m、宽0.2 m、深0.12 m的磁性示踪小区,长边平行于等高线。在小区内用100 cm³环刀取2个平行样,带回实验室测定土壤容重。小区制作时先将挖出的土堆放在塑料布上,加入1 kg磁性示踪剂,弃去等量的土,充分混匀后利用磁化率仪(SM-30, 捷克)测定土壤磁化率,测定后将混有磁性示踪剂的土壤按原田间土壤容重回填于小区内。利用水平仪测定每个示踪小区的坡度,III和IV样地磁性示踪小区的坡度变化范围分别为6.2%~22.6%和5.0%~18.4%。请当地农民使用等高向下犁耕和等高向上犁耕分别对III和IV样地进行1次完整耕作。耕作后

将一个长宽高为 0.6 m×0.2 m×0.2 m 的金属框垂直于插入原示踪小区土壤中,深度限于耕作深度,以 0.10 m 间距从原示踪小区中心线分别向上坡、向下坡磁性示踪剂分布的最远点连续取样,样品充分混匀后测定土壤磁化率。

1.3 耕作侵蚀指标计算

应用类流体旋转理论,依据磁性示踪剂在耕作前后分布的差异计算土壤位移量,计算模型如下^[14]:

$$Q = \int_0^L (1 - \frac{C_x}{C_0}) M_s dx \quad (1)$$

式中:Q——单次耕作产生的土壤位移量(kg/m);
C₀——耕作前示踪小区的土壤磁化率(SI);C_x——耕作后示踪路径的土壤磁化率(SI);M_s——耕作层的土壤比质量(kg/m²);L——取样的最大距离(m)。耕作侵蚀速率与土壤位移量成正比,与坡体长度成反比,计算模型如下:

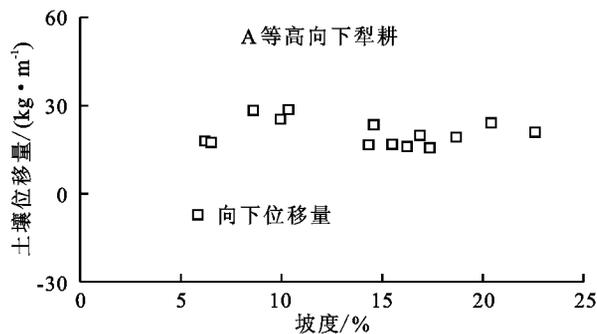
$$R_i = \frac{10Q}{L_d} \quad (2)$$

式中:R_i——单次耕作产生的耕作侵蚀速率(t/hm²);
L_d——坡体长度(m)。

2 结果与分析

2.1 单次耕作土壤再分布

2.1.1 土壤再分布模式 等高向下犁耕在耕作后原示踪小区内土壤磁性明显减弱,而示踪小区下坡方向土壤磁性却明显增强,表明等高向下犁耕引起磁性示



踪剂向下坡移动。与等高向下犁耕不同,等高向上犁耕示踪小区的下坡方向和上坡方向土壤磁性都明显增强,表明等高向上犁耕在单次耕作过程中引起磁性示踪剂同时向下坡和向上坡移动。等高向下犁耕引起示踪剂向下坡最大移动距离为 0.5~0.7 m(以示踪小区上部基线为基准);等高向上犁耕引起示踪剂向下坡最大移动距离为 0.3~0.6 m,向上坡最大移动距离为 0.4~0.6 m(以示踪小区中心线为基准)。等高向下犁耕在研究坡度 6.2%~22.6% 范围内引起向下坡土壤平均耕作位移为 0.09~0.17 m;等高向上犁耕在研究坡度 5.0%~18.4% 范围内引起向下坡土壤平均净位移为 -0.06~0.05 m。

2.1.2 土壤再分布强度 对于等高向下犁耕,单次耕作引起的向下坡土壤位移量为 15.62~28.70 kg/m(图 1A),土壤位移量与坡度无显著相关性($R^2 = 0.0009, n=14, p=0.93$)。对于等高向上犁耕,单次耕作引起的向下坡土壤净位移量为 -10.91~8.23 kg/m(图 1B),土壤净位移量与坡度呈极显著正相关($R^2 = 0.66, n=14, p < 0.001$)。以坡长 15 m 计,等高向下犁耕和等高向上犁耕的耕作侵蚀速率分别为 10.41~19.14 t/hm² 和 -7.27~5.49 t/hm²。可见,等高向上犁耕的耕作侵蚀强度显著小于等高向下犁耕,当坡度较小时(<14.2%),等高向上犁耕产生净的土壤向上坡移动,当坡度逐渐增大时,土壤净位移方向转为向下坡方向。

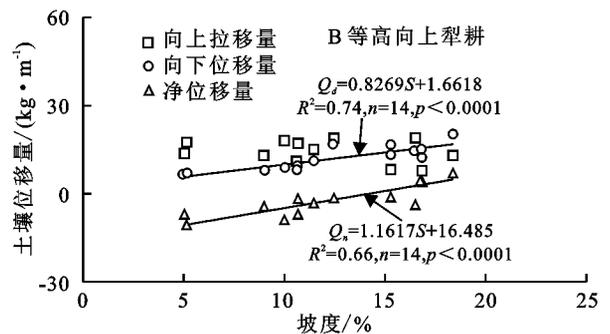


图 1 等高向下犁耕和等高向上犁耕土壤位移量与坡度关系

2.2 模拟耕作土壤再分布

2.2.1 模拟耕作后土层深度变化 对于等高向下犁耕,耕作前和耕作 15 次后的土层深度分别为 17.8—69.3 cm 和 12.0—86.8 cm(图 2A),显示出等高向下耕作引起土壤剖面发生明显变化。土壤剖面变化最显著的部位发生在坡顶和坡脚,坡顶土层深度减小了 32.6%,而坡脚增加了 25.1%。耕作后中坡部位(5 m 和 10 m)土层深度变化率较小(0.6%和 -1.3%)。这些结果表明等高向下犁耕产生明显的边界效应,即耕作侵蚀和耕作沉积主要分别发生在靠近上坡和下坡边界部位,而中坡扮演着类似“传送带”的作用,

将上坡耕层土壤传输到下坡。对于等高向上犁耕,耕作前和耕作 15 次后的土层深度分别为 17.8—72.8 cm 和 20.0—73.0 cm(图 2B),呈现出与等高向下犁耕明显不同的特征,坡顶土层深度增加了 12.7%,坡脚土层深度也增加了 0.3%,而中坡土层深度减少了 1.8%~2.8%。这个结果表明等高向上犁耕的耕作侵蚀和沉积强度明显弱于等高向下犁耕。

2.2.2 模拟耕作后海拔变化 等高向下犁耕 15 次后上坡部位海拔明显降低,而下坡部位显著增加,耕作前后海拔最低点和最高点始终出现在坡顶和坡脚边界处(图 3A)。这与锄耕模拟耕作呈现出不同的变

化特征,未出现锄耕模拟耕作中海拔最高点向下坡方向移动的现象^[15]。等高向下犁耕 15 次后相对海拔从 2.12 m 下降为 1.71 m,呈现出“夷平”趋势,坡顶海拔下降了 23.5 cm,超过了耕作前的土层深度。可

见,等高向下犁耕引起坡顶土壤流失非常明显。等高向上犁耕 15 次后海拔呈现出上坡部位明显增加,而下坡部位减小,下坡部位略有增加,相对海拔从 2.09 m 增加为 2.15 m(图 3B)。

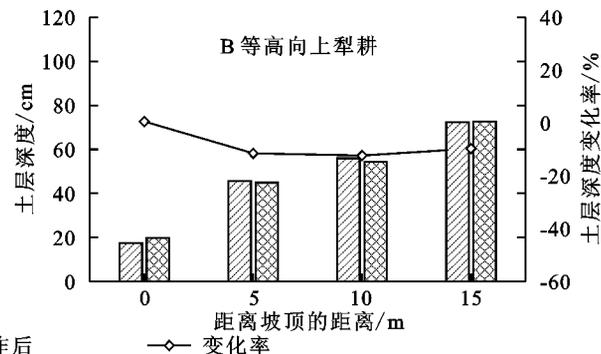
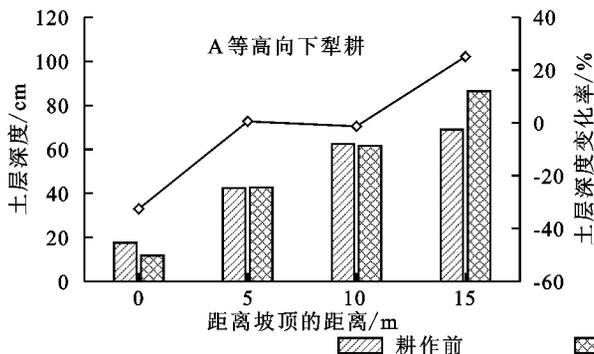


图 2 等高向下犁耕和等高向上犁耕耕作后土层深度变化

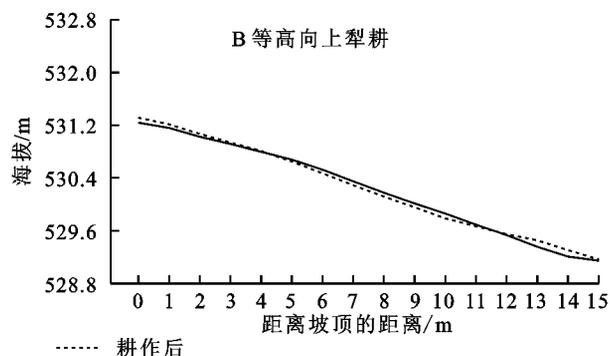
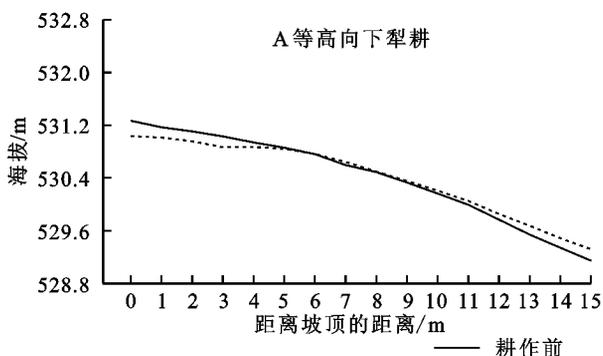


图 3 等高向下犁耕和等高向上犁耕耕作后海拔变化

2.2.3 模拟耕作后坡度变化 等高向下犁耕 15 次后坡度由 14.15% 减小为 11.42%, 而等高向上犁耕 15 次后坡度由 13.95% 增加为 14.33%。这个结果表明两种等高耕作土壤再分布模式的差异导致坡度变

化呈现相反的特征。两种等高耕作对坡度的影响主要表现在上坡和下坡部位, 等高向下犁耕导致上坡部位、下坡部位的坡度都减小, 而等高向上犁耕导致上坡部位的坡度增加, 下坡部位的坡度减小(图 4)。

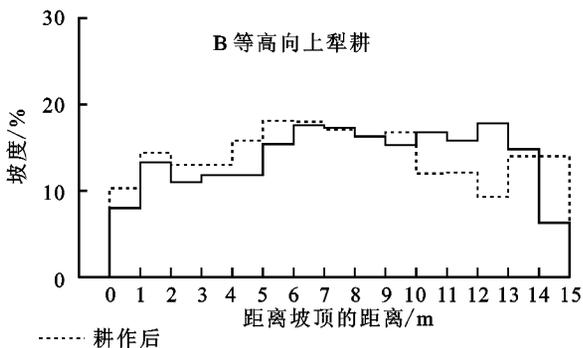
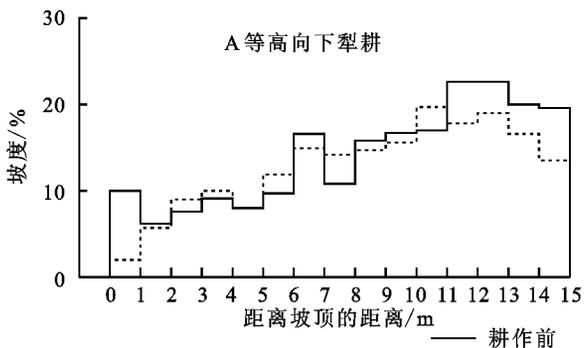


图 4 等高向下犁耕和等高向上犁耕耕作后坡度变化

3 讨论

3.1 等高向下犁耕与等高向上犁耕土壤再分布模式差异

两种等高耕作的土壤再分布模式存在显著差异, 等高向下犁耕导致土壤发生向下坡移动, 等高向上犁耕导致土壤同时发生向上坡、向下坡位移。这种差异主要源于不同翻袋方向时犁壁的驱动力与重力的组合形式不同。等高向下犁耕由于犁轘向下坡倾斜, 犁

铧驱动力与重力共同对土壤产生向下坡方向作用, 因而仅发生向下坡方向的土壤移动, 其向下坡位移就是净的土壤位移。等高向上犁耕由于犁轘向上坡倾斜, 犁铧驱动力与重力对土壤搬运作用相反, 其结果导致土壤不仅发生向上坡移动, 同时也发生向下坡位移, 上、下坡位移平衡的结果决定净的土壤位移。等高向上犁耕的土壤净位移方向取决于坡度, 当坡度较小时(本研究条件下临界坡度为 14%), 犁铧对土壤的驱动力大于重力, 这时土壤向上坡位移量大于向下坡位

移量,土壤发生向上坡净位移;当坡度继续增大,重力作用占主导地位,土壤向下坡位移量大于向上坡位移量,土壤发生向下坡净位移。这种分布模式与等高锄耕不同,等高锄耕虽然也导致土壤发生向下坡位移和向上坡位移,但是向上坡位移总是小于向下坡位移,土壤发生向下坡净位移^[11]。

3.2 等高向下犁耕与等高向上犁耕对坡地土壤剖面变化的影响

两种等高耕作在坡地不同景观位置对土壤侵蚀和沉积的作用明显不同,等高向下犁耕导致土壤侵蚀和沉积分别发生在上坡和下坡部位,而等高向上犁耕导致土壤在下坡和中坡流失,在上坡沉积。经过 15 次等高向下犁耕,坡顶原土壤剖面完全消失,但未出现母岩裸露现象,而是保持 12 cm 的土层厚度,这个厚度与犁耕深度一致,这是由于犁耕将下伏在薄层土壤下的页岩破碎,补充了流失的土壤。等高向下犁耕对坡顶土壤剖面起着两方面的作用:一是耕作侵蚀引起土壤向下坡传输,二是通过将沉积松散的泥页岩破碎促进其风化成土,两者共同维持着紫色土坡顶的土层深度。经过 15 次等高向上犁耕,坡顶土层深度增加了 12.7%,等高向上犁耕对于保护坡顶土层深度具有重要作用;同时,在坡脚形成一条浅沟,其对水蚀有一定抑制作用^[16]。等高向下犁耕的耕作侵蚀速率超过了紫色土正常的成土速率^[17],而等高向上犁耕的耕作侵蚀明显小于等高向下犁耕。由于等高向上犁耕动力来源于畜力,等高向上犁耕时操作者处于犁的下坡方向,重心较低,对犁的操作较为省力,相比紫色土区人力向上锄耕较易实施。因此,在坡度较小时,采用等高向上犁耕可以有效防治坡顶土层深度减小和生产力退化;当坡度较大时,虽然也可以减少耕作侵蚀,但实施难度增大,可以选择性地对坡顶等土壤浅薄处进行等高向上犁耕。

3.3 等高向下犁耕与等高向上犁耕对坡地微地貌演化的影响

两种等高耕作对于坡地微地貌变化的作用不同,模拟长期耕作显示出等高向下犁耕 15 次导致相对海拔下降 41 cm,坡度减小 2.73%,而等高向上犁耕 15 次导致相对海拔增加 5.7 cm,坡度增加 0.38%。等高向下犁耕对坡地微地貌演化的影响与已有研究有相同的作用特征,即陡坡耕地在长期的耕作侵蚀作用下趋向于夷平^[18-19],不同的是紫色土坡地虽然经历了上百年的耕作,但坡地并未被夷平,依然保持了较陡的坡度。这主要源于以下三方面原因:第一,由于紫色土区另一种主要土壤侵蚀形式——水力侵蚀的作用,水蚀将耕作堆积在坡脚的土壤搬运到耕地外部,

最近研究显示耕作侵蚀有加速水蚀的作用;第二,农民习惯于采取一些耕作保护措施来保护坡顶土壤,如等高向上耕作、锄耕向上耕作^[16]、锄耕不翻转耕作^[20],或者将坡顶耕地外的土壤搬运至耕地内来补充土壤等^[5];第三,浅薄的土层下伏母岩,导致耕作深度被迫减小,一定程度上降低了耕作侵蚀。依据等高向上犁耕的土壤再分布模式,理论上等高向上犁耕会使坡脚海拔下降,但模拟耕作显示长期等高向上犁耕对坡脚海拔影响不大。这主要是由于连续耕作导致土壤松散(土壤紧实度下降了 40%),从而导致土壤向上坡位移量下降、土壤向下坡净位移量明显增加,而中坡坡度最大,在微地貌上成为该坡地的凸坡,坡脚成为凹坡,以往研究显示凸坡和凹坡分别为耕作侵蚀和耕作沉积的主要发生部位,因而坡脚在 15 次耕作后不但没有成为土壤净流失区,反而成为土壤净流入区。

4 结论

(1) 等高向上犁耕采取向上坡翻垡,通过犁壁驱动力抵抗重力向上坡搬运土壤,单次耕作导致土壤同时发生向上坡、向下坡位移,土壤净位移的大小取决于上、下坡位移平衡结果,方向取决于坡度,当坡度较小时(本研究条件下临界坡度为 14%),土壤发生向上坡净位移,当坡度较大时,土壤发生向下坡净位移。

(2) 等高向下犁耕引起上坡土壤流失,下坡土壤沉积,模拟耕作显示长期耕作将上坡部位原土层完全侵蚀,但母岩并未裸露,而是保持与耕作深度相当的土层厚度,表明等高向下犁耕使坡顶土壤剖面随着耕作次数的增加而减小,同时通过将沉积松散的泥页岩破碎促进其风化成土,两种作用共同维持着紫色土坡顶的土层深度。

(3) 等高向上犁耕可以有效减少土壤向下坡移动,长期耕作可以提高坡顶土层深度和生产力。等高向上犁耕对于操作者来讲不算费力,相比向上锄耕较易被接受。等高向上犁耕是一种防治类似紫色土的薄层土壤耕作侵蚀和土壤退化的有效措施。

参考文献:

- [1] 王礼先,张有实,李锐,等. 关于我国水土保持科学技术的重点研究领域[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(1): 1-6.
- [2] 王占礼,邵明安,雷廷武. 黄土区耕作侵蚀及其对总土壤侵蚀贡献的空间格局[J]. 生态学报, 2004, 23(7): 1328-1335.
- [3] Zhang J H, Lobb D A, Li Y, et al. Assessment for tillage translocation and tillage erosion by hoeing on the steep land in hilly areas of Sichuan, China[J]. Soil & Tillage Research, 2004, 75(2): 99-107.
- [4] 聂小军,徐小涛. 耕作侵蚀对农田坡地景观影响的研究进展[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 254-260.

- [5] Zhang J H, Nie X J, Su Z A. Soil profile properties in relation to soil redistribution by intense tillage on a steep hillslope [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008,72(6):1767-1773.
- [6] Li F C, Zhang J H, Su Z A, et al. Simulation and ^{137}Cs tracer show tillage erosion translocating soil organic carbon, phosphorus, and potassium [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013,176(5):647-654.
- [7] 朱波,况福虹,高美荣,等. 土层厚度对紫色土坡地生产力的影响[J]. *山地学报*, 2009,27(6):735-739.
- [8] 尚河英,尹忠东,张鹏. 川中不同类型小流域土壤侵蚀特征分析[J]. *水土保持研究*, 2015,22(5):5-8.
- [9] 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.
- [10] Wildemeersch J C J, Vermanga J, Cornelisa W M, et al. Tillage erosion and controlling factors in traditional farming systems in Pinar del Rio, Cuba [J]. *Catena*, 2014,121(10):344-353.
- [11] Zhang J H, Frielinghaus M, Tian G, et al. Ridge and contour tillage effects on soil erosion from steep hillslopes in the Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004,59(6):277-283.
- [12] Dercon G, Govers G, Poesen J, et al. Animal-powered tillage erosion assessment in the southern Andes region of Ecuador[J]. *Geomorphology*, 2007,87(1/2):4-15.
- [13] Li Y, Tian G, Lindstrom M J, et al. Variation of surface soil quality parameters by intense-donkey-drawn tillage on steep slope [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004,68(3):907-913.
- [14] Lobb D A, Kachanoski R G, Miller M H. Tillage translocation 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.
- [15] Su Z A, Zhang J H, Qin F C, et al. Landform change due to soil redistribution by intense tillage based on high-resolution DEMs [J]. *Geomorphology*, 2012,175(6):190-198.
- [16] Zhang J H, Li F C. Soil redistribution and organic carbon accumulation under long-term (29 years) upslope tillage systems[J]. *Soil Use and Management*, 2013,29(3):365-373.
- [17] 刘刚才,李兰,周忠浩,等. 紫色土容许侵蚀量的定位试验确定[J]. *水土保持通报*, 2008,28(6):90-94.
- [18] Dercon D, Gover G, Posen J, et al. Animal-powered tillage erosion assessment in the southern Andes region of Ecuador [J]. *Geomorphology*, 2007,87(1/2):4-15.
- [19] Turkelboom F, Poesen J, Ohler I, et al. Reassessment of tillage erosion rates by manual tillage on steep slopes in northern Thailand [J]. *Soil & Tillage Research*, 1999,51(3/4):245-259.
- [20] 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 Research*, 2009,105(2):177-183.

(上接第 105 页)

- [19] 柳梅英,包安明,陈曦,等. 近 30 a 玛纳斯河流域土地利用/覆被变化对植被碳储量的影响[J]. *自然资源学报*, 2010,25(6):926-938.
- [20] 唐得昊,邹欣庆,刘兴健. 海岸带生态系统健康评价中能质和生物多样性的差异:以江苏海岸带为例[J]. *生态学报*, 2013,33(4):1240-1250.
- [21] 陶丽华,朱晓东,桂峰. 苏北辐射沙洲海岸带农业景观生态分析与优化设计[J]. *环境科学*, 2001,22(3):118-122.
- [22] 李加林,张忍顺,王艳红,等. 江苏淤泥质海岸湿地景观格局与景观生态建设[J]. *地理与地理信息科学*, 2003,19(5):86-90.
- [23] 揣小伟,黄贤金,郑泽庆,等. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J]. *资源科学*, 2011,33(10):1932-1939.
- [24] 方精云,徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. *生态学报*, 1996,16(5):497-508.
- [25] 黄玫,季劲钧,曹明奎,等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟[J]. *生态学报*, 2013,26(12):4156-4163.
- [26] Tallis H, Ricketts T, Guerry A, et al. InVEST 2.0 beta User's Guide: Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs [Z]. Stanford, USA: Natural Capital Project, 2011.
- [27] Haining R, Wise S, Ma J. Exploratory spatial data analysis[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 1998,47(3):457-469.
- [28] 张晓祥,唐彦君,严长清,等. 近 30 a 来江苏海岸带土地利用/覆被变化研究[J]. *海洋科学*, 2014,38(9):90-95.