

耕作深度对紫色土坡地旋耕机耕作侵蚀的影响

李富程¹, 花小叶¹, 黄 强²

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 绵阳市环境监测中心站, 四川 绵阳 621010)

摘 要:利用磁性示踪法定量研究紫色土坡地旋耕机上下耕作的耕作位移和土壤位移量, 分析了不同耕作深度(8, 10, 12 cm)对耕作侵蚀的影响。结果表明: 在研究坡度范围内(3.43%~20.97%), 旋耕机不同耕作深度引起的土壤净位移差异显著($p=0.007$), 且随着耕作深度的增加土壤净位移显著增大, 3 种耕作深度的土壤净位移与坡度均显著相关, 且随着耕作深度的增加相关性逐渐增强; 耕作侵蚀速率随着耕作深度的增加而增大, 耕作深度由 8 cm 增加为 10 cm, 耕作侵蚀速率增大了 77%, 由 10 cm 增加为 12 cm 耕作侵蚀速率增大了 49%。耕作深度是影响紫色土坡地旋耕机耕作侵蚀的重要因素之一, 增加耕作深度引起耕作侵蚀明显增加, 因此合理调控耕作深度是防治紫色土退化的一种重要措施。

关键词:耕作侵蚀; 耕作深度; 磁性示踪; 旋耕机; 土壤退化

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)04-0001-05

Effects of Tillage Depth on Tillage Erosion by Rotary Cultivator Plough on the Steep Land in Purple Soil

LI Fucheng¹, HUA Xiaoye¹, HUANG Qiang²

(1. College of Resources & Environment, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. Mianyang Environmental Monitoring Center, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: This study was implemented in purple soil regions of Sichuan. To evaluate the effect of tillage depth on tillage erosion by rotary cultivator plough, the magnetic tracer was used to label experiment plots of soil to quantify soil translocation and soil flux due to tillage. Three tillage depths of 8, 10 and 12 cm were set and seventeen plots were established for each tillage depth on a series of hillslopes with slope gradients ranging from 3.43% to 20.97%. The results showed that net soil displacement distances under different tillage depths were significantly different ($p=0.007$) and increased with tillage depth. Soil displacement distances were positively correlated to slope gradients for all treatments. Especially, the coefficient was gradually improved with the increasing tillage depth. As tillage depth increased from 8 cm to 10 cm and 10 cm to 12 cm, tillage erosion rate increased by 77% and 49%, respectively. Consequently, tillage depth was one of the critical factors affecting tillage erosion by rotary cultivator plough. Because tillage erosivity markedly enhanced with the increase of tillage depth, reasonably regulating the tillage depth plays an important role in prevention and control of soil degradation in the area of purple soil.

Keywords: tillage erosion; tillage depth; magnetic tracer; rotary cultivator; soil degradation

四川紫色土坡耕地具有坡度大、坡长短、土层薄的特点, 且耕作强度大, 导致该区耕作侵蚀强烈, 严重制约土壤可持续利用。随着农村劳动力减少且老龄化, 小型旋耕机得到广泛应用, 该区耕作侵蚀研究大多限于人工锄、畜力犁等传统耕作机具^[1-4], 对旋耕机的研究较少^[5]。大量研究表明耕作深度对土壤性质、蓄水保墒能力和作物产量都有显著影响^[6-7], 而且也

是影响耕作侵蚀的重要因素。许多学者对拖拉机牵引式铧式犁、凿式犁、圆盘犁开展了耕作深度与耕作侵蚀的关系研究^[8-12], St Gerontidis 等研究指出铧式犁上下耕作的耕作深度由 40 cm 减为 20 cm 导致土壤位移量减小 77.2%^[8], Van Muysen 等研究指出凿式犁耕作深度由 20 cm 减为 15 cm 导致土壤位移量减少 45% 以上^[11]。研究表明机械化耕作区的耕作传

输系数 k 随耕作深度的增加显著增大^[8-12], 小型旋耕机的机械结构和耕作方式不同于上述耕作机具。因此, 本研究采用磁性示踪法, 研究耕作深度对小型旋耕机耕作侵蚀的影响, 为紫色土区土壤退化防治提供重要数据支撑。

1 材料与方

1.1 研究区概况

试验研究区位于四川省绵阳市游仙区新桥镇(31°33'14''N, 104°47'50''E)。该区地貌以浅丘为主, 海拔 500~638 m, 相对高差一般为 50~100 m。气候类型为亚热带湿润季风气候, 年均温度 16.1℃, 年均降水量 986.5 mm。土壤类型为白垩系泥岩发育的黄红紫色土, 成土母质为砂岩、泥岩的风化物, 土壤表层质地较细, 土层浅薄, 且直接下覆母岩层。该区传统耕作机具为畜力犁, 近年小型旋耕机逐渐得到广泛应用, 旋耕机耕种面积逐年上升, 正常一年耕两次。为了使耕层土壤更适合播种, 每次耕作过程中一般耕作两遍, 耕作方向主要采用上下耕作。试验地在耕作试验前已有半年未耕过, 试验地耕层土壤容重为 $(1.39 \pm 0.1) \text{ g/cm}^3$ ($n=137$), 土壤质量含水量为 $19.5\% \pm 1.5\%$ ($n=137$)。

1.2 试验设计

采用磁性示踪法测定耕作位移和土壤位移量, 磁性示踪剂选用钛铁矿粉。钛铁矿粉是一种黑色粉末, 粒径为 200 目, 主要成份为二氧化钛、三氧化二铁和氧化铁。相对于砖瓦渣或煤渣等磁性示踪剂^[13-14], 钛铁矿粉具有磁性强、粒径小、颜色深等特点, 能够提高土壤耕作位移测量的准确性和可操作性^[4]。当地农民应用旋耕机的耕作深度一般在 10 cm 左右, 本试验将耕作深度设计为 8, 10, 12 cm 三种深度, 以符合常用耕作深度。选择 1 块长期自然耕作的坡耕地, 从坡顶到坡脚坡度的变化范围为 3.43%~20.97%, 将坡地沿顺坡方向分为三部分, 分别进行 8, 10, 12 cm 三种耕作深度的耕作试验。从坡顶到坡脚依次布设磁性示踪小区, 相邻示踪小区在平行等高线方向间距 0.5 m 以上, 在垂直等高线方向间距 2 m 以上, 避免耕作时相互影响。每种耕作深度设置 17 个示踪小区, 共计 51 个。采用重庆吉宝机械制造有限公司生产的吉宝牌柴油旋耕机进行耕作, 其主要技术参数如下: 旋耕机总重 120 kg, 外形尺寸 1 700 mm×1 350 mm×900 mm, 发动机功率 6.3 kW, 转速 3600 rpm, 旋耕刀总数 32 把, 直径 33.5 cm, 幅宽 135 cm。

磁性示踪法测得耕作位移试验的具体步骤如下: 设置长 1.00 m, 宽 0.20 m, 深 0.08~0.12 m (依试验设计耕作深度设置) 的示踪小区, 示踪小区长边平行于等高线方向, 挖出的土壤堆放在塑料布上, 弃去 1.5 kg 土, 再加入等量磁性示踪剂, 充分混匀后利用磁化率仪 (SM-30) 测定土壤磁化率, 测定完成后将混有磁性示踪剂的土壤按原田间土壤容量回填于示踪小区内。按当地耕作习惯, 耕作方向设置为先向上坡后向下坡耕作, 上下坡耕作路径保持一致。耕作后将一个长宽高为 0.6 m×0.2 m×0.2 m 的金属框垂直插入磁性示踪小区中间, 以 0.10 m 间距从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, 取样深度限定于耕作深度, 所采样品充分混匀后测定土壤磁化率。

1.3 计算方法

耕作引起的土壤位移可根据示踪剂的移动分布计算^[3,15]:

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

式中: D_d 为耕作引起的平均土壤移位距离 (m); C_0 为耕作前示踪小区的土壤磁化率 (SI); $C(x)$ 为耕作后示踪路径的土壤磁化率 (SI); L 为取样的最大距离 (m)。

耕作位移和土壤位移量运用张建辉^[3]等改进的模型计算:

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

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

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

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

式中: S 为坡度 (m/m); Q_s 为单次耕作引起的土壤位移量 (kg/m); k_1, k_2 为土壤耕作位移系数 (m); k_3, k_4 为单次耕作的土壤耕作传输系数 (kg/m); D_t 为耕作层深度 (m); ρ_b 为土壤容重 (kg/m³)。

耕作侵蚀速率取决于土壤位移量和坡长^[3], 计算公式如下:

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

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

1.4 数据分析

利用方差分析研究旋耕机不同耕作深度的土壤耕作位移、土壤位移量和耕作侵蚀速率是否存在显著差异; 通过回归分析建立不同耕作深度的土壤平均位移距离、土壤净位移与坡度的关系。

2 结果与分析

2.1 示踪剂空间分布

研究坡地土壤磁化率本底值为 $0.089 \times 10^{-3} \sim 0.278 \times 10^{-3}$ SI, 平均为 0.104×10^{-3} SI。耕作前示踪小区土壤磁化率达 $21.1 \times 10^{-3} \sim 43.7 \times 10^{-3}$ SI, 平均为 31.2×10^{-3} SI, 是土壤背景值的 300 倍; 耕作后示踪剂分布路径内的土壤磁化率为 $0.4 \times 10^{-3} \sim 17.9 \times 10^{-3}$ SI, 平均为 3.67×10^{-3} SI, 是土壤背景值的 35 倍。由于示踪小区混入示踪剂后的土壤磁化率显著大于土壤磁化率本底值, 而且示踪区范围内耕层土壤磁化率本底值基本一致, 因此, 土壤本身的磁化率对耕作位移的测定无影响。

以磁性示踪小区的中心线为基准, 旋耕机上下耕作后, 示踪小区的上坡部位和下坡部位均出现磁性示踪剂。耕作后示踪剂浓度在原小区位置显著降低, 但其浓度最高值仍在原小区内, 且均出现在基线下坡方向, 在其上坡和下坡部位示踪剂浓度均逐渐减小。耕作深度 8, 10, 12 cm 时示踪剂向上坡最大位移分别为 0.3~0.4, 0.2~0.4, 0.2~0.4 m, 不同耕作深度土壤

向上坡最大位移无明显差异。与向上坡最大位移不同, 向下坡最大位移随耕作深度的增加而增大, 耕作深度 8 cm 时示踪剂向下坡最大位移为 0.5~0.6 m; 耕作深度 10 cm 时示踪剂向下坡最大位移为 0.4~0.7 m; 耕作深度 12 cm 时示踪剂向下坡最大位移为 0.5~0.8 m。这种差异主要源于不同耕作深度时土壤剖面对旋耕机的阻力不同, 以及旋耕机刀片旋转过程中将土块向前后抛掷的角度也不同。

2.2 耕作位移和土壤位移量

2.2.1 耕作位移与耕作深度的关系 不同耕作深度引起的土壤向上坡耕作位移无显著差异($p=0.19$), 耕作深度 8, 10, 12 cm 时土壤向上坡耕作位移平均值均为 0.04 m(表 1)。与土壤向上坡耕作位移不同, 土壤向下坡耕作位移随耕作深度的增加而增大($p=0.01$), 耕作深度 8, 10, 12 cm 引起的土壤向下坡耕作位移平均值分别为 0.08, 0.10, 0.11 m(表 1), 其中耕作深度 8 cm 与 10 cm ($p=0.03$) 和 12 cm ($p=0.003$) 的土壤向下坡耕作位移存在显著差异, 而耕作深度 10 cm 与 12 cm 无显著差异($p=0.38$)。可见, 旋耕机不同耕作深度引起的向上坡耕作位移总是小于向下坡耕作位移。

表 1 旋耕机不同耕作深度时的耕作侵蚀特征指标

项目	耕作深度 8 cm	耕作深度 10 cm	耕作深度 12 cm
坡度/($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.03~0.18	0.05~0.21	0.04~0.19
向上位移/m	0.04±0.01a	0.04±0.01a	0.04±0.01a
向下位移/m	0.08±0.01a	0.10±0.03b	0.11±0.04bc
土壤净位移/m	0.04±0.02a	0.06±0.03ab	0.08±0.03b
向上位移量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	4.12±1.50a	6.12±1.91b	6.12±2.14bc
向下位移量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	9.27±1.58a	14.83±4.09b	19.18±5.79c
土壤净位移量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	4.96±1.46a	8.78±2.97b	13.10±3.28c
耕作侵蚀速率/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	4.96±1.46a	8.78±2.97b	13.10±3.28c

注: 耕作侵蚀速率以坡长 10 m 计; 同一行字母相同表示无显著差异, 字母不同表示存在显著差异($p<0.05$)。

土壤净位移取决于向上坡和向下坡耕作位移的平衡结果。耕作深度 8, 10, 12 cm 土壤净位移平均值分别为 0.04, 0.06, 0.08 m(表 1), 方差分析显示不同耕作深度引起的土壤净位移存在显著差异($p=0.007$)。这些结果表明旋耕机上下耕作导致土壤向下坡方向流失, 耕作位移与耕作深度成正比。不同耕作深度的土壤净位移量大小关系为: 8 cm < 10 cm < 12 cm, 耕作深度由 8 cm 增加为 10 cm, 土壤位移量增大了 77.0%, 耕作深度由 10 cm 增加为 12 cm, 土壤位移量增大了 49.2%。

2.2.2 耕作位移与坡度的关系 旋耕机不同耕作深度引起的向上坡和向下坡耕作位移与坡度的关系不同(图 1)。从图 1 可以看出, 耕作深度为 8 cm 时, 土壤向上坡耕作位移与坡度显著相关($R^2=0.2536$,

$p=0.035$), 而土壤向下坡耕作位移与坡度无显著相关性($R^2=0.2385$, $p=0.063$)。耕作深度为 10 cm 时, 土壤向上坡耕作位移与坡度无显著相关性($R^2=0.0295$, $p=0.785$), 而土壤向下坡耕作位移与坡度显著相关($R^2=0.403$, $p=0.008$)。耕作深度为 12 cm 时, 土壤向上坡耕作位移与坡度显著相关($R^2=0.2484$, $p=0.037$), 而土壤向下坡耕作位移与坡度也显著相关($R^2=0.5458$, $p=0.001$)。这些结果显示随着耕作深度的增加, 土壤向上坡耕作位移与坡度的关系由负相关转变为正相关, 而土壤向下坡耕作位移与坡度的正相关程度不断提高。

旋耕机上下耕作的不同耕作深度均导致土壤发生向下坡净位移, 耕作深度 8, 10, 12 cm 的土壤净位移与坡度均显著正相关, 二者可由线性方程很好的拟

合(图 2), 判定系数 R^2 分别为 0.301 8($p=0.039$), 0.389 2($p=0.01$), 0.413 5($p=0.006$)。这些结果表明土壤净位移与坡度的关系受耕作深度的影响, 且随着耕作深度的增加, 坡度对土壤净位移的影响逐渐增大。这主要是由于随着耕作深度的增加, 土壤切削面积增大, 相应发生位移的土壤体积也会增大, 导致向下坡土壤耕作位移增大。

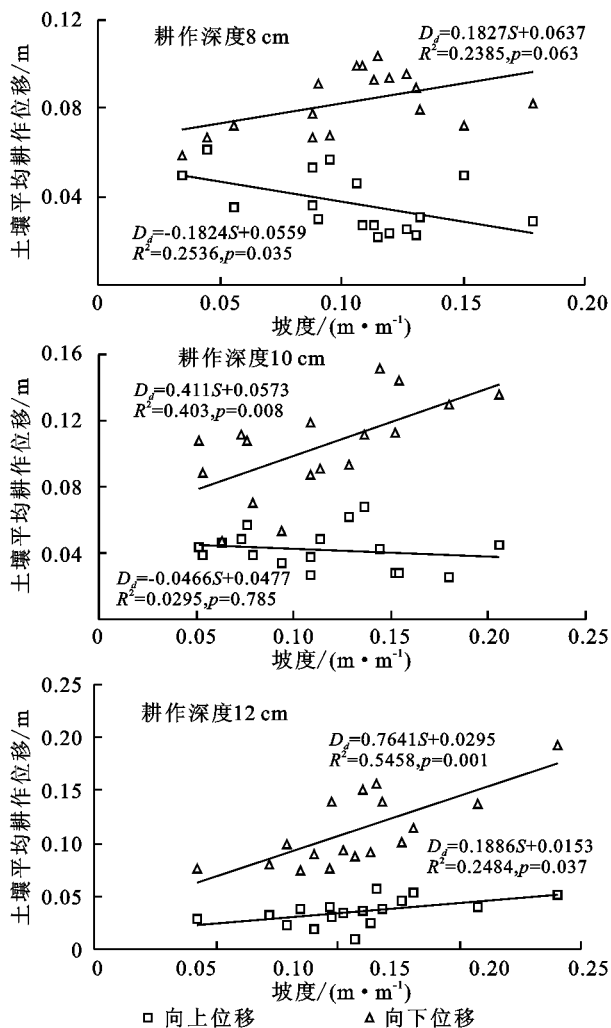


图 1 不同耕作深度土壤耕作位移与坡度的关系

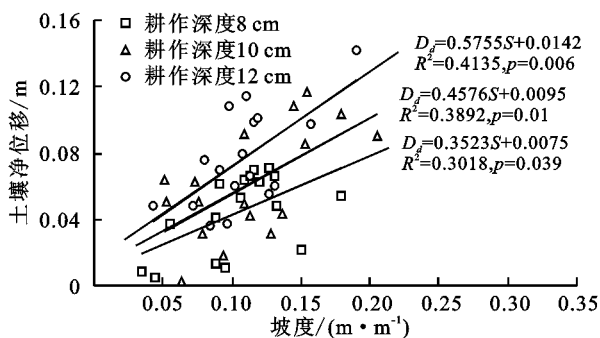


图 2 不同耕作深度土壤净位移与坡度的关系

2.3 耕作侵蚀速率

耕作传输系数 k_3 和 k_4 均随着耕作深度的增加而明显增大。耕作深度为 8 cm 时, 耕作传输系数 k_3 和

k_4 分别为 0.84 和 39.42 kg/m; 耕作深度为 10 cm 时, 耕作传输系数 k_3 和 k_4 分别为 1.36, 65.66 kg/m; 耕作深度为 12 cm 时, 耕作传输系数 k_3 和 k_4 分别为 2.44, 98.73 kg/m。以坡长 10 m 计, 耕作深度为 8 cm 时耕作侵蚀速率为 2.19~7.90 t/hm², 平均值 4.97 t/hm²(表 1), 耕作深度 10 cm, 12 cm 时耕作侵蚀速率分别为 4.71~14.87 t/hm²(平均值为 8.78 t/hm²)和 6.65~21.2 t/hm²(平均值为 13.10 t/hm²)。不同耕作深度的耕作侵蚀速率均存在显著差异($p < 0.001$)。耕作侵蚀速率随耕作深度的增加而增大, 耕作深度由 8 cm 增加为 10 cm 时耕作侵蚀速率增大了 77.0%, 由 10 cm 增加为 12 cm 时增大了 49.2%。

3 讨论

旋耕机耕作深度由 12 cm 减为 8 cm(33%)导致土壤位移量减小 62%, 这与铧式犁和凿式犁等大型机械化耕作机具的结果基本一致^[8,11,16]。耕作传输系数 k 可以用来评价耕作侵蚀的强度, k 值越大, 耕作侵蚀强度越大。旋耕机耕作深度为 8 cm 时的耕作传输系数 k_3 和 k_4 (0.84 和 39.42 kg/m) 分别比耕作深度为 12 cm 时(2.44 和 98.73 kg/m)小 65.6% 和 60.1%; 耕作深度为 10 cm 时的耕作传输系数 k_3 和 k_4 (1.36 和 65.66 kg/m) 分别比耕作深度为 12 cm 时小 44.3% 和 33.5%。旋耕机不同耕作深度的耕作传输系数 k_3 和 k_4 都明显小于该区域锄耕向下耕作, 旋耕机的耕作传输系数 k_3 明显小于锄耕等高耕作, 而 k_4 却明显大于锄耕等高耕作(表 2)。方差分析显示旋耕机耕作深度为 12 cm 时与锄耕等高耕作的土壤位移量相当($p = 0.21$), 而旋耕机耕作深度为 8, 10 cm 时明显小于锄耕等高耕作($p < 0.001$)。因此, 旋耕机耕作是一种减少耕作侵蚀的有效措施。

虽然减小旋耕机耕作深度, 有利于减小耕作侵蚀, 然而长期进行旋耕机浅耕, 则不利于紫色土的土壤保持, 甚至可能导致坡顶本身浅薄的土层进一步变浅, 进而影响作物产量。大多数紫色土坡地上部土层厚度在 20 cm 左右, 这个厚度与传统耕作机具的耕作深度相当, 耕作将沉积松散的泥页岩破碎促进其风化成土, 这对于维持紫色土坡顶的土层厚度起着重要作用。旋耕机按其机械性能耕作深度可达 16—18 cm, 但实际运用中耕作深度多为 10—12 cm, 这个耕作深度很难达到传统耕作机具促进母岩风化成土的作用, 而且旋耕机不具备传统耕作机具将坡地景观外的土壤搬运至耕地内部的作用^[17]。因此, 对于紫色土旋耕机耕作, 可考虑将浅耕与深翻相结合, 浅耕有助于减小耕作侵蚀, 防止土壤退化, 深耕有助于改善耕层土壤, 促进母岩风化成土。

表 2 部分区域的耕作传输系数^[1,3,8,11,16]

耕作机具	耕作方向	耕作深度/m	容重/(kg·m ⁻³)	耕作传输系数 k (or k_3, k_4) /(kg·m ⁻¹)	地区
旋耕机	上下交替耕作	0.08	1399	0.84(k_3);39.42(k_4)	四川
旋耕机	上下交替耕作	0.10	1435	1.36(k_3);65.66(k_4)	四川
旋耕机	上下交替耕作	0.12	1430	2.44(k_3);98.73(k_4)	四川
锄头	向下耕作	0.22	1310	30(k_3);139(k_4)	四川
锄头	向下耕作	0.19	1391	37(k_3);118(k_4)	重庆
锄头	等高耕作	0.19	1310	10(k_3);13(k_4)	四川
铧式犁	上下交替耕作	0.20	1420	153	希腊
铧式犁	上下交替耕作	0.30	1420	383	希腊
铧式犁	上下交替耕作	0.40	1420	670	希腊
铧式犁	上下交替耕作	0.18	1598	63	希腊
铧式犁	上下交替耕作	0.25	1598	159.8	希腊
凿式犁	上下交替耕作	0.20	1250	545	比利时

4 结 论

(1) 耕作深度对旋耕机上下耕作的耕作侵蚀有显著影响,随着耕作深度的增大,土壤净位移、土壤净位移量和耕作侵蚀速率显著增大。

(2) 旋耕机上下耕作导致的土壤再分布受耕作深度、坡度的共同影响,随耕作深度的增加,耕作位移与坡度的相关性逐渐增强。

(3) 旋耕机上下耕作的土壤耕作传输系数 k_3 和 k_4 均随着耕作深度的增加而增大,减小旋耕机耕作深度可以减少耕作侵蚀,有利于土壤保护,但长期浅耕易导致耕层土壤变薄,使用旋耕机耕作时,选择合适的耕作深度并定期深耕,可在减小耕作侵蚀的同时有效防治土壤退化。

参考文献:

[1] Zhang J H, Lobb D A, Li Y, et al. Assessment of 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 李富程,花小叶,王彬. 紫色土坡地旋耕机耕作侵蚀特征[J]. 中国水土保持科学,2016,14(1):71-78.

[6] 肖继兵,孙占祥等. 半干旱区中耕深松对土壤水分和作物产量的影响[J]. 土壤通报,2011,42(3):709-714.

[7] Jabro J D, Stevens W B, Iversen W M, et al. Tillage depth effects on soil physical properties, sugarbeet yield, and sugarbeet quality[J]. Communications in Soil

Science and Plant Analysis, 2010,41(7): 908-916.

[8] St Gerontidis D V, Kosmas C, Detsis B, et al. The effect of moldboard plow on tillage erosion along a hill-slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001,56(2):147-152.

[9] Van Oost K, Govers G, De Alba S, et al. Tillage erosion: a review of controlling factors and implications for soil quality[J]. Progress in Physical Geography, 2006, 30(4): 443-466.

[10] 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.

[11] van Muysen W, Govers G, van Oost K, et al. The effect of tillage depth, tillage speed, and soil condition on chisel tillage erosivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000,55(3):355-364.

[12] Van Muysen W, Van Oost K, Govers G. Soil translocation resulting from multiple passes of tillage under normal field operating conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2006,87(2):218-230.

[13] 马琨,王兆骞,陈欣. 土壤侵蚀示踪方法研究综述[J]. 水土保持研究,2002,9(4):91-95.

[14] 鲍玉海,贾松伟,贺秀斌. 土壤磁性示踪技术[J]. 水土保持研究,2007,14(6):6-9.

[15] Quine T A, Walling D E, Chakela Q K, et al. Rates and patterns of tillage and water erosion on terraces and contour strips: evidence from caesium-137 measurements[J]. Catena, 1999,36(1): 115-142.

[16] Kosmas C, Gerontidis S, Marathanou M, et al. The effects of tillage displaced soil on soil properties and wheat biomass[J]. Soil & Tillage Research, 2001,58 (1/2):31-44.

[17] 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.