

# 东北黑土区典型坡面耕作侵蚀定量分析

赵鹏志, 陈祥伟, 王恩姮<sup>\*</sup>

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 东北黑土区水土流失主要集中在坡耕地, 以往研究多关注水蚀而忽略了耕作侵蚀的存在。为印证并定量描述黑土耕作侵蚀, 该文采用物理示踪法, 测定了典型坡耕地耕作位移量及其分布格局。结果表明: 铧式犁耕作后示踪剂沿耕作方向发生扩散, 上坡耕作示踪剂集中分布在 0~20 cm 范围, 而下坡耕作示踪剂集中分布在 0~20 和 50~150 cm。一次耕作引起的耕作位移量为 32.68~134.14 kg/m, 耕作迁移系数 234 kg/m。坡度是影响耕作位移的重要因素, 二者呈显著的正相关关系, 且对上坡耕作的的影响大于下坡耕作。研究区耕作年侵蚀速率 0.4~11.0 Mg/(hm<sup>2</sup>·a), 凸起的坡背、坡肩处及坡度较大的位置侵蚀严重。虽然黑土区坡度较小, 但由于耕作深度大, 速度快, 耕作侵蚀严重, 应引起足够重视。

**关键词:** 侵蚀; 土壤; 运移; 耕作; 空间分布; 坡耕地; 铧式犁

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.022

中图分类号: S157.1; S157.4<sup>+</sup>2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0151-07

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.022 <http://www.tcsae.org>

Zhao Pengzhi, Chen Xiangwei, Wang Enheng. 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 (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 151—157. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.022 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

耕作侵蚀是指农具牵引和土体自重而引起净余土壤向下坡方向搬运、堆积、重新分配的过程<sup>[1]</sup>, 形成凸部侵蚀、凹部沉积的坡面侵蚀格局。坡耕地侵蚀的研究多关注水蚀, 耕作侵蚀常被忽略。1980s, 欧美国家开展的坡地侵蚀研究, 取得了耕作侵蚀的直接证据<sup>[2]</sup>。研究表明, 在凸坡位置耕作侵蚀对总侵蚀速率的贡献高达 70%<sup>[1]</sup>。耕作侵蚀及与水蚀的交互作用<sup>[3]</sup>可加剧农田坡地景观格局<sup>[4]</sup>和土壤质量<sup>[5-6]</sup>的演变, 进而影响全球碳平衡<sup>[7-9]</sup>。中国耕作侵蚀的研究始于 2000 年, 主要集中在西南丘陵地区和黄土高原地区<sup>[10-14]</sup>, 很少涉及东北黑土区。

东北黑土区是中国最重要的商品粮生产基地之一, 由于过度开垦和自然因素等共同影响, 水土流失日益严重<sup>[15-16]</sup>, 坡耕地黑土层以 0.1~0.5 cm/a 递减<sup>[17-18]</sup>。尤其大型农业机械的使用, 虽大幅提高了生产效率和经济效益, 但同时随着机械动力和耕作深度的不断增大, 加剧了对土壤的扰动, 增加了耕作侵蚀的风险。基于 <sup>137</sup>Cs 的研究结果发现农田土壤再分布格局已不符合标准水蚀特征<sup>[19-20]</sup>。为取得黑土区坡耕地耕作侵蚀的直接证据, 本文采用物理示踪法, 通过模拟田间深松整地, 定量描述

坡地黑土耕作侵蚀过程、速率、影响因素及空间分布, 为正确认识黑土区坡耕地侵蚀机制, 进而有针对性地进行防治、减缓侵蚀提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究地点位于黑龙江省西北部的克山农场 (48°12'~48°23'N、125°8'~125°37'E), 海拔 240~340 m, 温带大陆性季风气候特征明显, 年均气温 0.9 °C, 年均降水量 501.7 mm, 年均蒸发量 1329 mm, 土壤以黏化湿润均腐土为主, 属典型黑土区, 具有漫川漫岗地形特征, 坡缓而长。平均坡度 ≤4°, 基于农田防护林网建设, 耕地坡长一般在 250~500 m 之间, 该区已全面实现机械作业, 铧式犁深翻配合圆盘耙整平是最重要的整地管理措施, 整地深度 20~35 cm。为建立坡度与耕作位移的关系模型, 选择前茬作物为青贮玉米的复合坡耕地为研究对象, 平均坡度 3.6°, 最大坡度 7.2° (13.10%), 坡长 320 m, 具有典型性和代表性。

### 1.2 试验布设

基于物理示踪法<sup>[1,21]</sup>, 采用白色石英砂材质的小石子 (直径 6~12 mm) 作为示踪剂, 根据耕作后小石子沿耕作路径不同距离的分布量来计算土壤位移量。选择不同坡度 (1.82%~13.10%) 位置, 共设 9 个耕作小区, 其中 P1~P5 为下坡耕作, P6~P9 为上坡耕作 (图 1)。示踪小区长 20 cm, 宽 100 cm (约为单犁体宽幅的 3 倍), 深 35 cm (耕作深度为 25 cm)。

耕作小区修整后, 将金属底板 (100 cm×20 cm) 和金属容积框 (100 cm×20 cm×35 cm) 分别水平和垂直置

收稿日期: 2015-11-29 修订日期: 2016-04-10

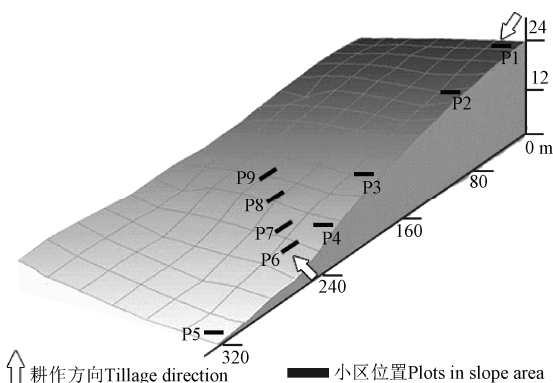
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41302222); 国家自然科学基金项目 (41271293)。

作者简介: 赵鹏志, 男, 甘肃酒泉人, 主要从事耕作侵蚀研究。哈尔滨 东北林业大学林学院, 150040。Email: zhaopz@163.com

\*通信作者: 王恩姮, 女, 辽宁鞍山人, 副教授, 主要从事黑土结构与侵蚀方面的研究。哈尔滨 东北林业大学林学院, 150040。

Email: erxin222@163.com; enheng\_wang@nefu.edu.cn

入小区。称取约 90 kg (具体由小区内原土容重和小区体积计算) 耕作小区内土壤与 3.5 kg 示踪小石子 (小区内土壤总质量的 5%) 混合均匀, 分层填入金属容积框, 轻拍至初始容重。小心移除容积框后, 进行翻耕整地处理, 耕作方向垂直于小区宽。翻耕作业机械采用 1LYF-535 重型液压五铧翻转犁 (永鹏农机具制造有限公司), 单犁体宽幅 30 cm, 耕作深度 25 cm, 耕作速度 13.6 km/h, 耕作路径覆盖示踪区。



注: P1~P5 为下坡耕作小区, P6~P9 为上坡耕作小区; 图中数值单位为 m。  
Note: P1-P5 is tillage plot on downward slope; P6-P9 is tillage plot on upward slope; Unit of value in figure is m.

图 1 耕作小区布设示意图

Fig.1 Plots position for tillage operations

耕作后, 以金属底板的上边缘 (即耕作机械驶来方向) 为精确的零基线, 开始取样。0~100 cm 取样间隔 10 cm, >100~200 cm 取样间隔 20 cm, >200 cm 时取样间隔 40 cm<sup>[22]</sup>。下坡耕作沿下坡方向连续取样, 上坡耕作沿上坡方向连续取样, 直至无小石子分布为止。

### 1.3 耕作位移计算

根据 Lobb 等<sup>[21,23]</sup>计算土壤位移量的方法, 将试验小区内示踪剂的空间分布生成累积曲线。利用累积曲线的方法 (summation curve method), 估算平均耕作位移及试验误差。

$$T_p = \int_0^{\infty} (1 - cs) dx - \int_{-\infty}^0 (cs) dx \quad (1)$$

式中  $T_p$  为单位耕作宽度被标记土壤的平均耕作位移, m;  $cs$  为累积曲线计算的示踪剂质量比率, kg/kg;  $x$  为采样宽度, m。

$$\varepsilon = \left( \frac{\int_{L_S}^{L_S+L_P} |1 - cs| dx}{T_p + L_p} \right) \times 100 \quad (2)$$

式中  $\varepsilon$  为试验误差, %;  $L_p$  为小区长, m;  $L_S$  为最大采样距离, m。

$$T_L = T_p \cdot D_p / D_T \quad (3)$$

式中  $T_L$  为单位耕作宽度耕层土壤平均位移, m;  $D_p$  为小区深度, 此处为 35 m;  $D_T$  为耕作深度, m。

$$T_M = \rho \cdot T_L \cdot D_T = \rho \cdot T_p \cdot D_p \quad (4)$$

式中  $T_M$  为单位耕作宽度土壤位移量, kg/m;  $\rho$  土壤容重, kg/m<sup>3</sup>。

### 1.4 耕作位移模型

田间耕作试验证实  $T_M$  与坡度呈线性关系<sup>[24-27]</sup>, 即

$$T_M = a + \beta \cdot \theta \quad (5)$$

式中  $a$  为截距, kg/m;  $\beta$  为耕作迁移系数, 10<sup>2</sup> kg/m;  $\theta$  为坡度, %。

### 1.5 耕作侵蚀速率

土壤耕作侵蚀速率被定义为每单位坡长的单位坡宽沿下坡净土壤位移量, 单一耕作方向时, 耕作侵蚀速率可表达为<sup>[12]</sup>

$$R_0 = 10 \cdot T_M / L_d \quad (6)$$

式中  $R_0$  为耕作侵蚀速率, Mg/hm<sup>2</sup>,  $L_d$  为研究坡段的长度, m。

在该区多为上下坡往复机械耕作, 因此净土壤位移量是上下坡耕作位移量的差值。假设铧式犁每年翻耕 1 次, 年际间上下坡往复耕作, 则年平均单位坡宽向下坡方向净土壤位移量<sup>[24]</sup>为

$$T_{Mn} = (T_{Md} - T_{Mu}) / 2 \quad (7)$$

式中  $T_{Mn}$  为年平均净土壤位移量, kg/m;  $T_{Md}$  为下坡耕作土壤位移量, kg/m;  $T_{Mu}$  为上坡耕作土壤位移量, kg/m。

由此, 土壤耕作侵蚀速率可表达为<sup>[12]</sup>

$$R = 5T_{Mn} / L_d \quad (8)$$

式中  $R$  为单次耕作年土壤耕作侵蚀速率, Mg/(hm<sup>2</sup>·a)。

### 1.6 地形测量

研究坡面长 320 m, 宽 120 m, 采用 20 m×20 m 网格法沿坡长方向布设了 7 条样线, 沿坡宽方向布设了 14 条样线, 共 119 个样点 (图 1), 并在拟设耕作小区的位置加密布点 (5 m×5 m)。利用 NTS-962R 全站仪 (南方测绘仪器有限公司) 测定 119 个网格交叉点及 9 个耕作小区的坐标, 计算坡度, 用于耕作小区布设及耕作侵蚀速率的计算。

### 1.7 数据处理

采用 SPSS19.0 对数据进行统计分析; 由于田间耕作试验具有高度的变异性, 当  $P < 0.1$  时即认为达到显著水平<sup>[22-23]</sup>。基于 Arcgis10.0 平台反距离加权法进行插值, 结合 PhotoshopCS5 软件绘制耕作侵蚀速率空间分布图。

## 2 结果与分析

### 2.1 示踪剂回收率及试验误差

示踪剂回收率是指耕作后回收的石子总质量与施入耕作小区石子总质量之比, 其高低影响试验误差, 决定耕作试验的准确性<sup>[21]</sup>。本试验耕作稳定, 平均耕作深度 24.9 cm, 与预设值 25 cm 一致。示踪剂回收率 95.54%~98.15%, 平均 96.96% (表 1), 标准差 0.87%, 回收率高而稳定, 采用示踪法估算耕作位移可靠。

### 2.2 示踪剂再分布规律及耕作位移

机械耕作后示踪剂沿耕作方向发生扩散, 标记土壤的平均位移和耕作位移量可达 10~34 cm 和 32.68~134.14 kg/m (表 1)。不同耕作方向其分布特征明显不同, 以 P4、P6 为例 (图 2), 上坡耕作小区 P6 示踪剂集中分

布在 0~20 cm 范围, 20 cm 后沿耕作路径浓度迅速降低, 最高质量分数仅为示踪剂总质量的 2.5%。与上坡耕作单高峰扩散不同, 下坡耕作后示踪剂浓度有 2 个高峰, 分别在 0~20 和 50~150 cm, 尤其在 50~150 cm 范围, 示踪剂质量分数最高可达 8%。上下坡耕作后示踪剂分布特征的差异, 导致平均耕作位移的不同。由表 1 可知, 耕作之后 50%小石子的平均位移为 25~45 cm, 95%小石子的平均位移可达 109~183 cm。

表 1 耕作位移及其特征指标  
Table 1 Tillage translocation and characteristic indexes

小区 Plot	坡度 Slope gradient/%	示踪剂 回收率 Tracer recovery rate /%	试验误差 Experimental error/%	耕作深度 Tillage depth/cm	容重 Bulk density (kg·m <sup>-3</sup> )	标记土壤 平均位移 Average translocation distance of labeled soil/cm	$\lambda_{50}$ /cm	$\lambda_{75}$ /cm	$\lambda_{90}$ /cm	$\lambda_{95}$ /cm	耕层土壤 平均位移 Average translocation distance of tillage depth/cm	耕作位移量 Translocation in mass (kg·m <sup>-1</sup> )	耕作侵蚀 速率 Tillage erosion rates/ (Mg·hm <sup>-2</sup> )
P1	5.02	96.95	13.34	27.3	959	22	36	65	99	128	28	72.48	36.24
P2	7.04	96.62	2.22	24.5	1080	20	40	74	20	158	28	74.63	37.32
P3	8.98	97.87	4.59	24.5	1018	22	44	81	22	149	31	76.77	38.39
P4	13.10	97.29	5.79	27.3	1017	34	40	67	95	113	44	134.14	67.07
P5	1.82	95.74	2.27	24.5	1120	28	31	61	98	118	40	99.74	49.87
P6	-8.40	97.23	1.41	22.1	979	10	25	50	84	111	15	32.68	16.34
P7	-1.48	98.15	6.70	23.8	952	21	45	89	146	183	31	71.00	35.50
P8	-3.52	97.26	5.15	24.5	1010	24	37	69	108	137	34	85.15	42.58
P9	-8.70	95.54	2.01	25.9	1034	21	33	58	88	109	28	74.53	37.27

注:  $\lambda_{50}$ 、 $\lambda_{75}$ 、 $\lambda_{90}$ 、 $\lambda_{95}$  分别表示耕作后 50%、75%、90%、95%土壤的位移, 下同。  
Note:  $\lambda_{50}$ ,  $\lambda_{75}$ ,  $\lambda_{90}$  and  $\lambda_{95}$  represent distance to which 50%, 75%, 90% and 95% of soil mass is translocated after tillage, respectively, same below.

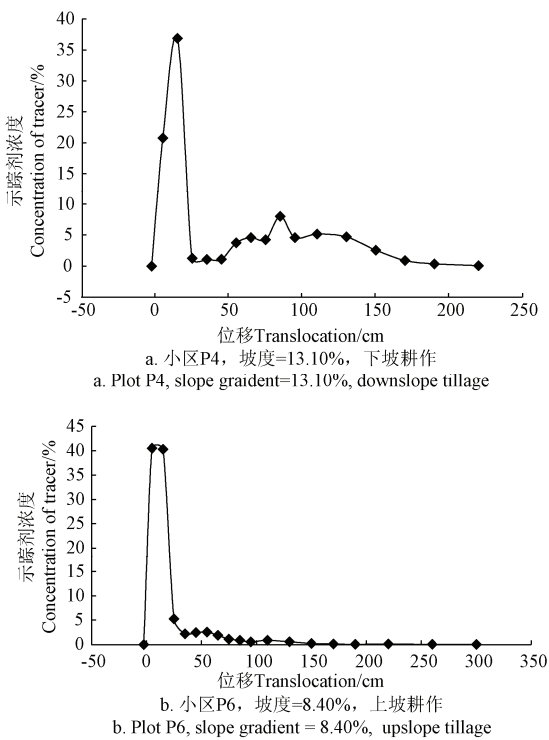


图 2 示踪剂浓度随耕作路径再分布位移

Fig.2 Spatial distribution of the tracer after tillage operation

基于耕作深度计算的耕层土壤平均位移  $T_L$  均值为 31 cm, 变异系数 0.27 (表 1)。下坡耕作小区 P4 和上坡耕作小区 P6 分别获得  $T_L$  最大值 44 cm 和最小值 15 cm。 $T_L$  计算基于精确的耕作深度, 而在机械耕作过程中随着地形起伏变化, 机械耕作深度也会随之变化, 增强了  $T_L$  的变异性。相比之下,  $T_M$  比  $T_L$  更为可靠, 因为  $T_M$  是根据小区深度  $D_P$  计算的,  $D_P$  在建立小区时可精确测定 ( $D_P=35$  cm), 而且  $T_M$  表示单位耕作宽度内土壤位移质

量 (kg/m), 更符合传统意义上对侵蚀的理解<sup>[21]</sup>。

2.3 耕作位移 (量) 与坡度的关系

$T_M$  受耕作方向的影响, 下坡耕作时, 除小区 P5 外,  $T_M$  随坡度增大而增大, 当坡度为 13.10% 时,  $T_M$  也最大为 134.14 kg/m (表 1); 而上坡耕作  $T_M$  与  $\theta$  的关系不及下坡耕作明显。以 P6、P9 为例 (表 1), 虽坡度相似, 但是  $T_M$  相差 56.15%。下坡耕作  $T_M$  平均值为 91.55 kg/m, 是上坡耕作 (65.84 kg/m) 的 1.39 倍, 表明下坡耕作产生的土壤位移量远大于上坡耕作, 导致土壤向下坡方向的净位移。

$T_M$  与坡度呈显著正相关关系 ( $P<0.05$ ) (图 3), 由此得到单次耕作迁移系数<sup>[24]</sup>为 234 kg/m。

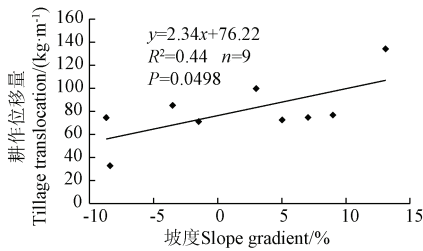


图 3 耕作位移与坡度的关系

Fig.3 Relationship between tillage translocation and slope gradient

分上下坡耕作、上坡耕作和下坡耕作将  $\lambda_{50}$ 、 $\lambda_{75}$ 、 $\lambda_{90}$ 、 $\lambda_{95}$  与坡度建立线性回归方程, 结果如表 2 所示。整体来看 (上下坡耕作), 坡度对示踪剂分布的影响主要集中在前区 ( $\lambda_{50}$ ), 而对后区 ( $\lambda_{75}$ ,  $\lambda_{90}$ )、尾区 ( $\lambda_{95}$ ) 影响不显著。对于上坡耕作, 坡度显著影响示踪剂再分布规律 ( $P<0.1$ ), 且在尾区影响最大。与上坡耕作不同, 坡度对下坡耕作后示踪剂的迁移影响不大, 且随着示踪剂位移距离增加影响越来越小。坡度对上坡耕作土壤迁移的影响大于下坡耕作。

表 2 示踪剂位移距离与坡度的回归分析  
Table 2 Regression analysis of translocation percentiles and slope gradient

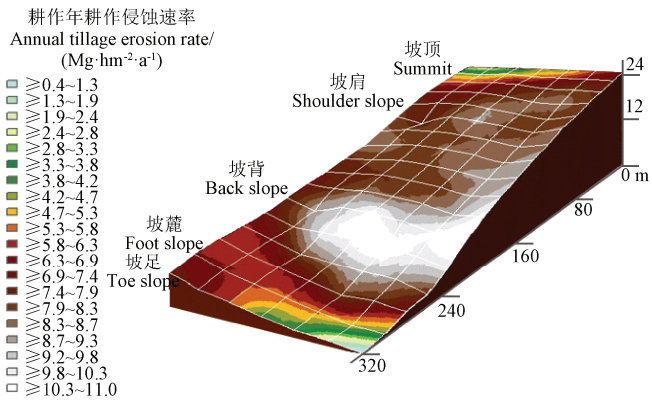
耕作方向 Tillage direction	位移距离 Translocation	样本数 Sample number	回归截距 Intercept	回归系数 Regression coefficient	决定系数 Coefficient of determination	P 值 P value
上下坡耕作 Upslope and downslope tillage	$\lambda_{50}$	9	0.360	0.005	0.335	0.099*
	$\lambda_{75}$	9	0.671	0.007	0.180	0.254
	$\lambda_{90}$	9	1.056	0.006	0.063	0.513
	$\lambda_{95}$	9	1.330	0.006	0.032	0.644
上坡耕作 Upslope tillage	$\lambda_{50}$	4	0.464	0.021	0.815	0.097*
	$\lambda_{75}$	4	0.908	0.044	0.866	0.069*
	$\lambda_{90}$	4	1.475	0.074	0.878	0.063*
	$\lambda_{95}$	4	1.846	0.090	0.884	0.060*
下坡耕作 Downslope tillage	$\lambda_{50}$	5	0.310	0.010	0.562	0.144
	$\lambda_{75}$	5	0.637	0.008	0.153	0.516
	$\lambda_{90}$	5	1.058	0.002	0.002	0.938
	$\lambda_{95}$	5	1.357	-0.003	0.004	0.918

注：\*表示在 0.1 水平显著。  
Note: \* Means significant at 0.1 level.

2.4 耕作侵蚀空间分布

由式 (6) 计算得到了 9 个坡位耕作小区的耕作侵蚀速率  $R_0$  (表 1)，其变化规律与耕作位移量 ( $T_M$ ) 一致：下坡耕作时，除小区 P5 外， $R_0$  随坡度增大而增大，当坡度为 13.10% (小区 P4) 时，耕作侵蚀速率最大，为 67.07 Mg/hm<sup>2</sup>。上坡耕作  $R_0$  与坡度的关系不及下坡耕作明显，小区 P6 侵蚀速率最小，为 16.34 Mg/hm<sup>2</sup>。

基于耕作位移量与坡度关系建立耕作位移模型 (图 3)，结合式 (7) ~ (8) 以及 119 个样点的坡度，估算得到了 119 个点的耕作侵蚀速率；借助 Arcgis10.0 平台反距离加权插值法绘制单次耕作年侵蚀速率空间分布图 (图 4)。坡面尺度范围内，耕作侵蚀空间变异较大，耕作年侵蚀速率标准差 2.66 Mg/(hm<sup>2</sup>·a)，在 0.4 ~ 11.0 Mg/(hm<sup>2</sup>·a) 之间变化。侵蚀量较大的位置为凸起的部位，如坡背、坡肩处，而在坡顶、坡足处侵蚀量相对较小。耕作侵蚀与坡度关系密切，在坡度较大的位置，侵蚀量也较大，如耕作小区 P4 (表 1、图 4)，坡度最大 (13.10%) 时耕作年侵蚀速率也最高，达到了 11 Mg/(hm<sup>2</sup>·a)，而在位于坡足的小区 P5，耕作年侵蚀速率仅为 5.27 Mg/(hm<sup>2</sup>·a)。



注：给定坡长 20 m。  
Note: slope length is 20 m.

图 4 耕作年侵蚀速率空间分布  
Fig.4 Spatial distribution of annual tillage erosion rate

3 讨论

碎石示踪研究耕作侵蚀的方法已在世界范围内广泛采用<sup>[22,25,28-29]</sup>，与 <sup>137</sup>Cs 示踪<sup>[2]</sup>相比，方法成本和技术难度均较低，材料易获得<sup>[26]</sup>。本研究采用的碎石直径 6 ~ 12 mm，与 Tiessen 等<sup>[22]</sup>、Li 等<sup>[25]</sup> 研究相似，石子回收率均超过 95%，保证了本次耕作试验结果的可靠性。

基于累积曲线方法估计的试验误差平均为 4.83% (表 1)，低于已报道的研究结果<sup>[1,22,25]</sup>，得益于细致的采样过程和稳定的耕作深度 (平均深度 24.9 cm，与预设的耕作深度 25 cm 一致)。值得注意的是，小区 P1 试验误差 (13.34%) 明显高于平均误差，但示踪剂损失率并不高，即造成小区 P1 试验误差较高的原因不是示踪剂的损失。对小区 P1 数据进一步分析发现 (数据未给出)，第 1、第 2 采样区 (0 ~ 10、>10 ~ 20 cm) 各自回收的石子质量相差近 2.2 倍，与其他小区明显不同，由此推测耕作试验误差可能来源于小区内的示踪剂分布及采样情况。与 Li 等<sup>[25]</sup>观点一致，即认为耕作试验误差主要来源于采样，并建议在开展类似的田间耕作试验时，应特别注意示踪小区的采样精度。

已开展耕作侵蚀研究认为坡度是影响耕作位移量最重要的因素<sup>[1,24-27]</sup>，本研究结果也表明耕作位移量与坡度呈显著正相关关系 (图 3)，主要与重力作用有关。重力作用增大了耕作机械对土壤向下坡运移的传输力，于此同时削弱了向上的传输力<sup>[27]</sup>，随着坡度增大，下坡耕作位移量增大，而上坡耕作位移量减小，导致净余土壤向下坡位移。Tiessen 等<sup>[22]</sup>、Li 等<sup>[25]</sup>研究发现，坡度对示踪剂分布的影响主要集中在尾区，本研究发现只有上坡耕作才表现出类似规律，而下坡耕作示踪剂空间分布受坡度的影响很小 (表 2)，除了与黑土区坡耕地坡度变化范围小有关外，还可能与重力和机械牵引力的交互作用有关。下坡耕作时，耕作方向上的重力分力与机械对土壤的牵引力共同作用，导致土壤向下坡方向的位移，因为机械牵引力远大于重力分力，因此坡度变化引起的重力分力对土壤位移的影响不及机械对土壤的直接牵引力，



表现出下坡耕作时土壤位移受坡度影响很小的现象。而上坡耕作时, 由于耕作方向上重力分力与机械对土壤的牵引力相反, 削弱了机械牵引力对土壤迁移的效果, 使得坡度对耕作位移的影响更易表现。

基于黑土区整地时普遍采用的重型液压翻转铧式犁, 平均耕作位移量为  $32.68 \sim 134.14 \text{ kg/m}$ , 单次耕作迁移系数为  $234 \text{ kg/m}$ , 与 De Alba<sup>[30]</sup> ( $204 \text{ kg/m}$ )、Govers 等<sup>[24]</sup> ( $234 \text{ kg/m}$ )、Van Muysen 等<sup>[31]</sup> ( $245 \text{ kg/m}$ ) 等铧式犁的耕作侵蚀试验结果相似, 但高于 Kosmas 等<sup>[32]</sup>、Quine 等<sup>[33]</sup>报道的值。Logsdon<sup>[28]</sup>在美国爱荷华州基于凿子犁耕作系统进行了耕作侵蚀试验, 该研究区坡度 ( $3.3\% \sim 10.2\%$ ) 与本试验相似, 但耕作迁移系数仅为本研究结果的  $44.5\%$ 。尽管黑土区坡耕地坡度较小, 低于上述研究区, 但本研究区采用的重型铧式犁深松措施, 作业深度大, 速度快, 对土壤扰动剧烈, 因此产生的耕作位移量和侵蚀速率多高于上述研究区。由平均耕作位移量计算得到的研究地耕作年侵蚀速率为  $0.4 \sim 11.0 \text{ Mg/(hm}^2 \cdot \text{a)}$ , 小于中国南方丘陵区耕作侵蚀速率<sup>[12]</sup>。南方丘陵区耕作模式为向下坡单一方向的人工锄耕, 土壤位移即是净下坡位移, 而在东北黑土区为机械上下坡往复耕作, 净土壤位移为二者之差, 因此向下坡方向的土壤位移量很大程度上会被向上坡方向的耕作位移量抵消, 净迁移量减小, 这也说明黑土区采用机械往复式耕作模式有益于水土保持。本研究估算的耕作侵蚀速率是基于  $20 \text{ m}$  坡长的平均值, 并不是任意一点的耕作侵蚀速率, 不同于连续方程预测结果<sup>[34]</sup>, 但仍然可以证明黑土区坡耕地存在严重的耕作侵蚀。

东北黑土区水土流失主要集中在坡耕地<sup>[17]</sup>, 以往研究多关注水蚀<sup>[17]</sup>、风蚀<sup>[20]</sup>及冻融侵蚀<sup>[35]</sup>, 而忽略了耕作对多营力共同作用下总侵蚀的贡献, 耕作侵蚀也是黑土区坡耕地土壤流失的重要组成部分。从坡耕地侵蚀速率空间分布可知, 耕作侵蚀最严重的部位是坡背和坡肩处 (图 4), 这与方华军等<sup>[19]</sup>利用  $^{137}\text{Cs}$  技术预测的黑土坡耕地侵蚀沉积过程相似; 认为主要由耕作侵蚀造成, 而水蚀所起作用较小, 因为该坡位的汇水面积不足以产生较强烈的水蚀<sup>[27]</sup>。王禹等<sup>[20]</sup>研究了黑土区顺坡耕地水蚀、风蚀对总侵蚀的贡献率, 认为凸型坡顶侵蚀主要为风蚀, 并由此估算了风蚀占总侵蚀的比例。而有研究指出, 该区由于顺坡耕作引起的耕作侵蚀可达约  $60 \text{ Mg/(hm}^2 \cdot \text{a)}$ <sup>[36]</sup>, 且耕作侵蚀常发生在坡顶和坡凸起的部位<sup>[1]</sup>, 由此认为坡顶侵蚀量大不仅仅是由风蚀造成的, 耕作侵蚀或是主要侵蚀类型, 该区风蚀对总侵蚀的贡献率应该不及  $32.6\%$ 。在今后的研究工作中, 需明确黑土区坡耕地不同侵蚀类型及其对总侵蚀的贡献量及贡献途径, 以进一步了解不同侵蚀过程及机理, 对有效防治黑土区水土流失具有重要参考意义。

## 4 结 论

以往关于黑土区坡耕地侵蚀主要归因于水蚀和风蚀, 并未关注耕作侵蚀, 本文通过模拟铧式犁深松整地

证实了耕作侵蚀也是该区坡耕地侵蚀的重要存在形式。单次作业后, 耕层土壤的平均位移和耕作位移量可达  $10 \sim 34 \text{ cm}$  和  $32.68 \sim 134.14 \text{ kg/m}$ , 耕作迁移系数为  $234 \text{ kg/m}$ 。耕作方向和坡度对耕作位移影响显著, 且对上坡耕作侵蚀速率的影响大于下坡耕作。虽然黑土区耕地坡度较小, 但由于机械耕作深度大, 作业速度快, 耕作侵蚀严重, 土壤耕作年侵蚀速率为  $0.4 \sim 11.0 \text{ Mg/(hm}^2 \cdot \text{a)}$ 。耕作侵蚀较为严重的位置是坡背、坡肩凸起的部位及坡度较大的位置。未来应深入探讨耕作方向 (上坡、下坡、等高耕作)、机具类型、作业参数、作物系统等农田管理措施对黑土耕作侵蚀的影响机制, 以及与其他侵蚀类型如水蚀、冻融侵蚀等的交互作用, 为防治水土流失、实现黑土资源的可持续利用奠定理论基础。

致谢: 感谢黑龙江省克山农场林业科成文福书记、王凯科长在样地选择时给予的支持; 感谢加拿大农业与农产品部马铃薯研究中心李胜研究员、沈阳农业大学邓继峰讲师在小区布设及数据处理过程中给予的建议和指导; 同时特别感谢东北林业大学林学院水土保持与荒漠化防治学科研究生卢倩倩、杨小燕、韩少杰、罗松、齐思明、康璐一在繁重的示踪剂回收过程中付出的宝贵时间和精力和精心劳作。

## [参 考 文 献]

- [1] Lobb D A, Gary Kachanoski R. Modelling tillage translocation using step, linear-plateau and exponential functions[J]. Soil & Tillage Research, 1999, 51(3): 317—330.
- [2] Quine T A, Walling D E, Chakela Q K, et al. Evidence from caesium-137 measurements rates and patterns of tillage and water erosion on terraces and contour strips[J]. Catena, 1999, 36(1): 115—142.
- [3] Li Sheng, Lobb D A, Lindstrom M J. Patterns of water and tillage erosion on topographically complex landscapes in the North American Great Plains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 63(1): 37—46.
- [4] Tiessen K H D, Li S, Lobb D A, et al. Using repeated measurements of  $^{137}\text{Cs}$  and modelling to identify spatial patterns of tillage and water erosion within potato production in Atlantic Canada[J]. Geoderma, 2009, 153(1): 104—118.
- [5] 李富程, 张建辉. 耕作侵蚀对紫色土坡耕地土壤水分分布的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 220—223.  
Li Fucheng, Zhang Jianhui. Spatial distribution of soil moisture in relation to soil redistribution by intense tillage in Purple soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 220—223. (in Chinese with English abstract)
- [6] 苏正安, 张建辉. 耕作侵蚀及其对土壤肥力和作物产量的影响研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 272—278.  
Su Zheng'an, Zhang Jianhui. Research progress in tillage erosion and its impacts on soil fertility and crop production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(1): 272—278. (in Chinese with English abstract)

- [7] Zhang Jianhui, Wang Yongyan, Li Fucheng. Soil organic carbon and nitrogen losses due to soil erosion and cropping in a sloping terrace landscape[J]. *Soil Research*, 2015, 53(1): 87—96.
- [8] Nie Xiaojun, Zhang Jianhui, Cheng Jinxia, et al. Effect of soil redistribution on various organic carbons in a water-and tillage-eroded soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 155: 1—8.
- [9] Li Yong, Zhang Qingwen, Reicosky D C, et al. Changes in soil organic carbon induced by tillage and water erosion on a steep cultivated hillslope in the Chinese Loess Plateau from 1898—1954 and 1954—1998[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2007, 112(G1): 531—532.
- [10] 王占礼, 邵明安. 黄土坡地耕作侵蚀对土壤养分影响的研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 63—67.  
Wang Zhanli, Shao Ming'an. Effects of tillage erosion on soil nutrients in loess sloping land of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2002, 18(6): 63—67. (in Chinese with English abstract)
- [11] Li Yong, Tian Guanlong, Lindstrom M J, et al. Variation of surface soil quality parameters by intensive donkey-drawn tillage on steep slope[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2004, 68(3): 907—913.
- [12] 张建辉, 李勇, Lobb D A, 等. 我国南方丘陵区土壤耕作侵蚀的定量研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(2): 1—4.  
Zhang Jianhui, Li Yong, Lobb D A, et al. Quantifying tillage translocation and tillage erosion in hilly areas of Sichuan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(2): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [13] 苏正安, 张建辉, 聂小军. 紫色土坡耕地土壤物理性质空间变异对土壤侵蚀的响应[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 54—60.  
Su Zheng'an, Zhang Jianhui, Nie Xiaojun. Response of spatial variability of soil physical properties to soil erosion in purple soil slope farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(5): 54—60. (in Chinese with English abstract)
- [14] Nie Xiaojun, Zhang Jianhui. Variation of chemical properties as affected by soil erosion on hillslopes and terraces[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(6): 1285—1292.
- [15] Fang Huajun, Yang Xueming, Zhang Xiaoping, et al. Using  $^{137}\text{Cs}$  tracer technique to evaluate erosion and deposition of black soil in northeast China[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 201—209.
- [16] Fang Haiyan, Sun liying, Qi Deli, et al. Using  $^{137}\text{Cs}$  technique to quantify soil erosion and deposition rates in an agricultural catchment in the black soil region, Northeast China[J]. *Geomorphology*, 2012, 169: 142—150.
- [17] 陆继龙. 我国黑土的退化问题及可持续农业[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(2): 53—55, 67.  
Lu Jilong. Phaeozem degradation and sustainable agriculture in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(2): 53—55, 67. (in Chinese with English abstract)
- [18] An Juan, Zheng Fenli, Wang Bin. Using  $^{137}\text{Cs}$  technique to investigate the spatial distribution of erosion and deposition regimes for a small catchment in the black soil region, Northeast China[J]. *Catena*, 2014, 123: 243—251.
- [19] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 利用  $^{137}\text{Cs}$  技术研究黑土坡耕地土壤再分布特征[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(3): 464—468.  
Fang Huajun, Yang Xueming, Zhang Xiaoping, et al. Redistribution patterns of black soil in hillslope landform of Northeast China: A  $^{137}\text{Cs}$  Study[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 464—468. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王禹, 杨明义, 刘普灵. 东北黑土区坡耕地水蚀与风蚀速率的定量区分[J]. *核农学报*, 2010, 24(4): 790—795.  
Wang Yu, Yang Mingyi, Liu Puling. Contribution partition of water and wind erosion on cultivated slopes in northeast black soil region of China[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2010, 24(4): 790—795. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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.
- [22] Tiessen K H D, Mehuys G R, Lobb D A, et al. Tillage erosion within potato production systems in Atlantic Canada I. Measurement of tillage translocation by implements used in seedbed preparation[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 95(1): 308—319.
- [23] Lobb D A, Kachanoski R G, Miller M H. Tillage translocation and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using  $^{137}\text{Cs}$  as a tracer[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75(2): 211—218.
- [24] Govers G, Vandaele K, Desmet P, et al. The role of tillage in soil redistribution on hillslopes[J]. *European Journal of Soil Science*, 1994, 45(4): 469—478.
- [25] Li S, Lobb D A, Lindstrom M J. Tillage translocation and tillage erosion in cereal-based production in Manitoba, Canada[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 94(1): 164—182.
- [26] Wildemeersch Jasmien C J, Vermanga Jan, Cornelisa Wim M, et al. Tillage erosion and controlling factors in traditional farming systems in Pinar del Río, Cuba[J]. *Catena*, 2014, 121: 344—353.
- [27] 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.
- [28] Logsdon S D. Depth dependence of chisel plow tillage erosion[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 128: 119—124.
- [29] Zhang Jianhui, Lobb D A, Li Yong, 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.
- [30] De Alba S. Modelling the effects of complex topography and patterns of tillage on soil translocation by tillage with mouldboard plough[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56(4): 335—345.
- [31] Van Muysen W, Govers G, Bergkamp G, et al. Measurement and modelling of the effects of initial soil conditions and

- slope gradient on soil translocation by tillage[J]. *Soil & Tillage Research*, 1999, 51: 303—316.
- [32] Kosmas C, Gerontidis S, Marathianou M, et al. The effects of tillage displaced soil on soil properties and wheat biomass[J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, 58(1): 31—44.
- [33] Quine T A, Zhang Y. Re-defining tillage erosion: Quantifying intensity-direction relationships for complex terrain. I. Derivation of an adirectional soil transport coefficient[J]. *Soil Use and Management*, 2004, 20(2): 114—123.
- [34] Wang Zhanli, Shao Ming'an. Modeling on tillage erosion in loess region of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2001, 17(1): 53—57.
- [35] 范昊明, 张瑞芳, 周丽丽, 等. 气候变化对东北黑土冻融作用与冻融侵蚀发生的影响分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(6): 48—53.
- Fan Haoming, Zhang Ruifang, Zhou Lili, et al. Impact of climate change on freeze-thaw function and freeze-thaw erosion in black soil region of northeast China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(6): 48—53. (in Chinese with English abstract)
- [36] Zhang Qingwen, Li Yong. Effectiveness assessment of soil conservation measures in reducing soil erosion in Baiquan County of Northeastern China by using  $^{137}\text{Cs}$  techniques[J]. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2014, 16(6): 1480—1488.

## Quantitative assessment of tillage erosion on typical sloping field in black soil area of northeast China

Zhao Pengzhi, Chen Xiangwei, Wang Enheng\*

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** Massive research on soil erosion in northeastern China has focused on quantifying the rates and patterns of water erosion. Soil transportation caused by farming equipments or tillage erosion, however, has largely been overlooked as a significant geomorphic process in the black soil region. The objectives of this study, therefore, were to 1) quantitatively determine tillage translocation value due to moldboard plowing, which was the predominant implement of soil preparation in this area; 2) to examine the effect of slope gradient and tillage direction on tillage translocation; and 3) to investigate the spatial distribution of tillage erosion in a typical sloping cultivated land. Tillage translocation process was determined by labeling method in this study. White quartz gravel with 6-12 mm in diameter was used as the tracer for all the plots. A summation curve was generated to calculate mean soil movement based on tracer redistribution along the path of tillage. Tillage operations were conducted in both up and down direction of the sloping field separately, and the mean slope was  $3.6^\circ$  with maximum up to  $7.2^\circ$ . Speed and depth of tillage were set as 13.6 km/h and 25 cm, respectively. Prior to tillage operation, the terrain following coordinates and elevation of study area were measured at 20 m intervals along 7 transects, and these data were to produce digital elevation model of study area (320 m $\times$ 120 m). The results showed that the ratio of tracers recovered after tillage operations to that applied ranged from 95.54% to 98.15%, with an average of 96.96%, showed that the tracer recovery rate was high. And tillage depth estimated by summation curve was 24.9 cm which was consistent with pre-set tillage depth (25.0 cm). These evidences indicated that the technique used in this experiment could appropriately estimate tillage translocation. The average experiment error (4.83%) was lower than reported tillage translocation and erosion studies, which credited to the accurate sampling process. A further analysis was conducted to the first plot (slope gradient 5.02%) with the highest error of 13.34%. We found that variability within the original tracer-labeled plot contributed to the high experiment error. Moldboard plow operation moved great quantities of soil resulting to potential erosive. Tracer concentration at 0-20 cm within plots maintained at a high level in upslope tillage direction while the tracer concentration at 0-20 and 50-150 cm were both higher in downslope direction, indicating that tillage implements translocated more soil and took it far away in downslope direction. Mean soil translocation varied from 10 to 34 m and translocation in mass ranged from 32.68 to 134.14 kg/m. Tillage translocation was significantly affected by slope gradient, especially for upslope tillage. The rate of tillage erosion depended on the interval length of 20 m flocculated in 0.4-11.0 Mg/(hm $^2$ ·a). Severer tillage erosion was observed on back-slope, shoulder positions and the greater slope positions, comparing to summit and toe-slope positions. The slope gradient of cultivated lands in black soil area is generally smaller, but the tillage erosion could be serious because of the higher tillage depth and speed of equipment operations. Results from this research can be of benefit to set targeted measures to reduce soil loss and maintain soil fertility in this area.

**Keywords:** erosion; soils; transportation; tillage; spatial distribution; sloping field; Mouldboard plowing