

旋耕机耕作对紫色土碳氮垂直分布过程的影响

巨莉¹, 李富程²

(1.四川省水利科学研究院, 成都 610072; 2.西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要:利用在土壤表面人为添加钡铁矿粉以示踪表层土壤垂直和顺坡再分配过程,通过对比耕作前与模拟耕作 20 次、40 次土壤有机碳和全氮垂直分布特征,研究紫色土旋耕机等高耕作所产生的土壤顺坡和垂直搬运耦合作用对有机碳、全氮垂直分布过程的影响机制。结果显示:强烈耕作后坡顶侵蚀深度超过原土壤剖面厚度,但土壤剖面厚度依然与耕作深度相当,这是由于耕作对坡顶土壤起着顺坡搬运(耕作侵蚀)和垂直搬运(破碎母岩)的双重作用。磁性示踪剂的深度分布显示出耕作引起表层土壤垂直向下迁移,但不同坡位垂直分布机制不同。坡顶土壤有机碳和全氮浓度明显减小,这是由于强烈的耕作侵蚀向下坡搬运耕层土壤,同时耕作垂直搬运引起母岩碎屑向耕层混入产生稀释作用;坡趾表层 0—5 cm 土壤有机碳和全氮浓度减小,但是 5—20 cm 明显增加,表明耕作侵蚀引起来自上坡的低浓度土壤在坡趾堆积。这些结果表明旋耕机等高耕作下土壤同时发生顺坡传输与垂直迁移,两者相互作用导致耕作侵蚀区和耕作沉积区呈现出明显不同的有机碳、全氮垂直分布模式。

关键词:土壤; 耕作侵蚀; 磁性示踪; 耕作位移; 耕作方向; 有机碳

中图分类号:S157.1; S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0007-07

Effects of Rotary Tillage on Vertical Distribution Patterns of SOC and Total Nitrogen in Purple Soil

JU Li¹, LI Fucheng²

(1.Sichuan Academy of Water Conservancy, Chengdu 610072, China; 2.School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: The ilmenite powder was artificially added to the soil surface to trace the vertical and downslope redistribution process of surface soil. By comparing the vertical distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen before tillage, the coupling effects of vertical and lateral transfers of soil by rotary tillage on vertical distribution of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) in purple soil are revealed after 20 and 40 simulated tillage operations. The erosion depth exceeds the original soil layer thickness at the summit of the slope, but the soil layer thickness is still the same as the tillage depth after intensive tillage due to the dual roles of tillage: translocation of soil along the slope and vertical transfer of soil or rock fragments. The depth distribution of soil magnetic susceptibility shows that tillage causes the vertical downward movement of the soil. The intensive tillage leads to the vertically downward transfer of SOC, but vertical redistribution patterns differ from one another at different slope positions. Due to upward migration of rock fragments and downslope transport of soil, SOC concentrations reduce significantly at the summit positions of the slope. SOC in the surface layer (0—5 cm) decreases at the toeslope position, but it increases significantly in 5—20 cm layer, because intensive tillage translocates the soil with low concentrations of SOC and TN derived from upper position of slope. These results suggest that the soil vertical movement interacting with the downslope movement under contour tillage by rotary cultivator results in significant different vertical distribution patterns of SOC and TN in the tillage erosion area and tillage deposition area.

Keywords: soil; tillage erosion; magnetic tracer; tillage translocation; tillage direction; soil organic carbon

收稿日期:2018-12-14

修回日期:2019-01-16

资助项目:四川省财政专项“紫色土坡耕地水土保持耕作关键技术研究”(206040217123);国家自然科学基金(41401301);国家留学基金资助项目(201809390004)

第一作者:巨莉(1985—),女,四川雅安人,博士,高级工程师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:juyongmei@126.com

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

耕作侵蚀是紫色土坡耕地主要侵蚀方式之一^[1-4]。与水蚀土壤再分配模式不同,耕作侵蚀呈现出3个典型特征:深层剥离、无分选性搬运和边界效应。单次耕作对土壤的剥离深度可达到耕作工具入土深度,对于典型的薄层紫色土,耕作可将坡顶母质甚至母岩破碎混入耕层;耕作侵蚀不像水蚀那样优先搬运细粒和轻质物质,而是非分选性地将耕层土壤向下坡或凹坡搬运;边界效应是指耕作导致土壤在靠近坡顶(凸坡)和坡趾(凹坡)部位分别发生土壤侵蚀和沉积^[5-7]。大量研究表明耕作侵蚀对坡面土壤有机碳的迁移和变异性具有重要影响^[8-10]。耕层土壤有机碳随着耕作侵蚀而向下坡迁移,致使耕作侵蚀区耕层土壤有机碳浓度降低,而耕作沉积区耕层土壤有机碳浓度增加^[8-10]。目前,研究集中于耕作对土壤有机碳等主要元素顺坡方向迁移的作用,较少考虑耕作对垂直方向再分布的影响。

示踪法是耕作侵蚀过程研究最主要的方法,物理示踪剂和化学示踪剂最早用于耕作侵蚀研究,后来又兴起低电磁感应示踪技术^[11]和磁性示踪技术^[4]。耕作侵蚀磁性示踪法以其灵敏度高、重现性好、速度快、样品不需作化学处理、无危害等优点已成功应用于耕作位移测定。磁性示踪剂类型多样,如粉煤灰、砖瓦渣、煤渣以及钛铁矿粉等,钛铁矿粉以其磁性强、用量少、粒径小、吸附性强被广泛使用^[12-19]。目前,磁性示踪法主要用于耕作对土壤顺坡搬运过程研究,而未用于垂直迁移过程研究。

紫色土耕作对土壤碳氮再分布影响研究主要集中于人工锄和家畜犁2种传统耕作机具,而对小型旋耕机的相关研究较少。国外对大型机械化耕作机具的耕作侵蚀与土壤碳氮迁移的关系进行了较多研究,小型旋耕机的动力连接方式不同于大型机械化耕作机具,这可能产生不同的土壤再分配模式,进而影响土壤碳氮的顺坡和垂直迁移过程。因此,本研究利用人为在土壤表面添加钛铁矿粉以示踪表层土壤垂直和顺坡再分配过程,通过对比耕作前与模拟耕作20次、40次土壤有机碳和全氮垂直分布特征,研究紫色土旋耕机等高耕作所产生的土壤顺坡和垂直搬运耦合作用对有机碳、全氮垂直分布过程的影响机制,为全面认识紫色土耕作产生的土壤再分配过程与土壤变异性提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于四川省绵阳市游仙区新桥镇(31°33′14″N, 104°47′50″E)。该区地形以低矮丘陵为主,海拔介于

500~638 m。土壤类型为城墙岩群组(K₁c)石灰性紫色土。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。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。传统耕作方式为牛拉犁耕作,耕作方向分为等高耕作和顺坡耕作。近年来,耕作方式逐渐从传统的牛拉犁耕作转变成旋耕机耕作,旋耕机耕作方向较为灵活,依据坡耕地的坡度坡长可选择等高耕作、顺坡耕作或者环状耕作。

1.2 试验设计与采样分析

模拟耕作试验开展于2015年1月。选择一块坡长为18 m、坡度为15.12%的坡地,供试样地耕层土壤基本理化性质见表1。将坡地沿顺坡分成2部分,一部分作为磁性示踪区研究表层土壤垂直和顺坡再分配过程,另一部分作为土壤采样区研究有机碳和全氮再分配过程。磁性示踪剂选择粒径200目的钛铁矿粉,已有研究证实钛铁矿粉作为耕作侵蚀磁性示踪剂是可行的^[13-19]。磁性示踪区宽度为2 m,土壤采样区宽度为5 m,两者间距为2 m。磁性示踪区采用方格布设法(1 m×1 m)从坡顶连续铺设至坡趾,铺设厚度为1 cm,即在长18 m、宽2 m的磁性示踪区表面均匀地人为投加一层磁性示踪剂。方格布设法具体操作方法为:将长×宽×高=1 m×1 m×0.01 m的铁框垂直插入土壤,将框内土壤铲出放置在塑料布上,称量13 kg土壤,加入1 kg磁性示踪剂,混合均匀后按原容重回填于铁框内。铺完后从坡顶到坡趾每米范围内测定12次土壤磁化率(表2)。由表2可知土壤磁化率变异性较弱,土壤磁性示踪剂布设较均匀。

试验用旋耕机主要技术参数如下:外形尺寸1 700 mm×1 350 mm×900 mm,总重120 kg,旋耕刀直径33.5 cm,总安装刀数32把,发动机功率6.3 kW,转速3 600 rpm。采用等高耕作连续耕作40次,从下坡开犁,沿等高线方向来回耕作,耕至坡顶,然后从空地返回到坡趾再进行耕作,保持每次耕作的路径一致,耕作深度约为10~12 cm。模拟耕作在2 d内完成,期间无降雨。

对于磁性示踪区和土壤采样区,分别在耕作前、20次耕作和40次耕作后利用土壤采样器(Eijkelkamp, 荷兰)对坡顶(1 m)、肩坡(5 m)、背坡(10 m)、坡脚(15 m)、坡趾(18 m)进行土壤剖面采样,从土壤表面一直采到母岩,每个坡位设2个采样点,按5 cm取土壤分层样,将相同深度的2个样品合为1个混合样。基于土壤采样点土壤表面到母岩距离的测量,确定耕作前后土壤剖面厚度。利用GPS(T4GNSS, 中

国)测定耕作前后地形变化。土壤有机碳和全氮分别采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法和半微量凯氏法测定。土壤磁化率应用高精度磁化率仪(SM-30,捷克)测定,灵敏度达 10^{-7} SI。需要说明的是用于验证示踪剂铺设是否均匀的试验中,将磁化率仪直接放

在土壤表面测定;而用于分析表层土壤再分配过程的试验中,用磁化率仪对土壤磁性示踪区采集的分层样品进行测定,测定时需将样品混匀并堆至超过 5 cm 厚。土壤磁化率背景值介于 $(0.15\sim0.29)\times10^{-3}$ SI,平均值为 0.22×10^{-3} SI($SD=0.03\times10^{-3}$ SI)。

表 1 供试样地耕层土壤基本理化性质

坡位	pH	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土壤紧实度/ ($\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$)	抗剪强度/ ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	土壤颗粒组成/%		
					砂粒	粉粒	黏粒
					(0.02~2 mm)	(0.002~0.02 mm)	(<0.002 mm)
坡顶(1 m)	7.88	1.45	239.57	0.48	54.56	39.18	6.26
肩坡(5 m)	7.81	1.44	239.98	0.50	50.60	42.95	6.45
背坡(10 m)	8.12	1.54	255.67	0.52	46.73	46.12	7.15
坡脚(15 m)	8.14	1.56	241.08	0.51	48.66	44.78	6.56
坡趾(18 m)	8.28	1.46	272.02	0.53	23.45	66.82	9.74

表 2 磁性示踪区表层土壤磁化率强度

距坡顶 距离/m	磁化率/ $\times10^{-3}$ SI	变异 系数/%	距坡顶 距离/m	磁化率/ $\times10^{-3}$ SI	变异 系数/%
0~1	117.7 \pm 10.8	9.2	9~10	120.2 \pm 7.0	5.8
1~2	118.8 \pm 10.2	8.5	10~11	118.6 \pm 9.5	8.0
2~3	118.7 \pm 9.1	7.7	11~12	118.6 \pm 10.4	8.8
3~4	118.0 \pm 8.1	6.9	12~13	120.4 \pm 10.7	8.9
4~5	118.5 \pm 6.9	5.8	13~14	116.9 \pm 11.7	10.0
5~6	118.5 \pm 10.8	9.1	14~15	117.6 \pm 11.3	9.6
6~7	118.8 \pm 9.7	8.2	15~16	118.4 \pm 10.8	9.2
7~8	119.5 \pm 9.9	8.2	16~17	119.1 \pm 8.5	7.1
8~9	120.6 \pm 11.4	9.5	17~18	117.4 \pm 11.5	9.8

注:平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 等高耕作土壤顺坡搬运特征

旋耕机等高耕作 40 次后,坡顶(1 m)高程下降

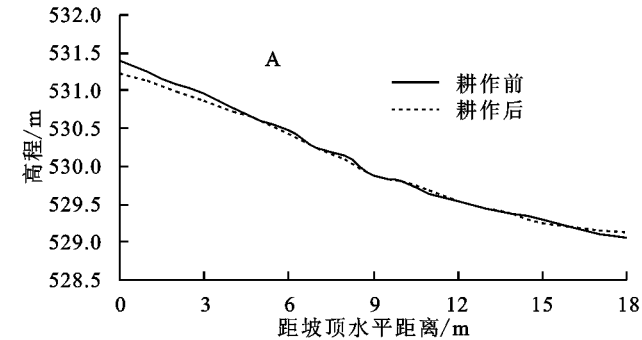
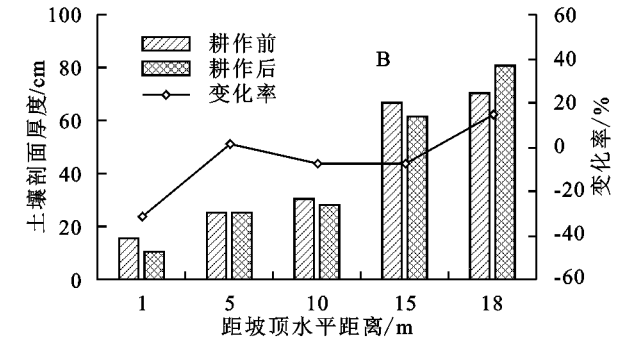


图 1 模拟耕作前后高程和土壤剖面厚度变化

2.2 等高耕作表层土壤垂直搬运特征

紫色土原土壤磁化率在垂直分布上较为一致(图 2),且不同坡位耕作前无明显差异(表 3)。耕作前在土壤表层层人为铺设 1 cm 磁性示踪剂,模拟耕作 20 次和 40 次后,不同坡位土壤磁化率呈现显著不同的变化。与耕作前相比,模拟耕作 20 次坡顶、肩坡和背坡表层 0—10 cm 土壤磁化率明显增强,而坡脚和坡趾 0—20 cm 土壤磁化率均明显增强。对于模拟耕作 40

了 0.17 m,超过了耕作前原土壤剖面厚度(0.16 m),坡趾(18 m)高程升高了 0.08 m,耕作前后肩坡、背坡和坡脚高程变化较小(图 1A)。旋耕机等高耕作导致距坡顶 0~5 m 的上坡部位土壤流失,距坡顶 5~15 m 的坡中部位微地貌基本保持稳定,距坡顶 15~18 m 的下坡部位土壤累积。耕作后坡面相对高程从 2.34 m 减小为 2.09 m,旋耕机等高耕作导致坡面变得平缓。旋耕机等高耕作 40 次前后土壤剖面厚度分别为 15.5~70.4 cm 和 10.6~80.7 cm,等高耕作导致土壤剖面厚度发生明显变化(图 1B)。坡顶和坡趾土壤剖面厚度变化最为显著,坡顶土壤剖面厚度减小 31.61%,而坡趾土壤剖面厚度增加 14.67%。肩坡、背坡和坡脚土壤剖面厚度变化相对较小,肩坡增加 1.20%,而背坡和坡脚分别减小 7.33%和 7.80%。这些结果显示出旋耕机等高耕作导致的土壤再分布具有明显的边界效应。



次,坡顶和肩坡 0—10 cm 土壤磁化率与耕作前相比明显增强,背坡和坡脚 0—15 cm 土壤磁化率明显增强,而坡趾 0—20 cm 土壤磁化率明显增强。模拟耕作 40 次与 20 次相比,除背坡 5—15 cm 外,各坡位土壤磁化率均明显减小。对于土壤表层 0—15 cm,模拟耕作 20 次后,坡顶土壤磁化率显著小于坡脚($p=0.047$)和坡趾($p=0.027$)。模拟耕作 40 次后,坡顶土壤磁化率显著小于坡趾($p=0.02$)(表 3)。

表 3 模拟耕作前后土壤表层(0—15 cm)磁化率、有机碳和全氮变化

坡位	磁化率/ $\times 10^{-3}$ SI			有机碳/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)			全氮/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)		
	耕作前	耕作 20 次	耕作 40 次	耕作前	耕作 20 次	耕作 40 次	耕作前	耕作 20 次	耕作 40 次
坡顶	0.26±0.04a	2.16±2.56a	1.85±2.23a	6.81±3.16a	6.20±1.70a	5.03±1.91a	0.86±0.18a	0.74±0.15a	0.64±0.14a
肩坡	0.22±0.02a	5.66±4.61ab	3.71±2.88ab	7.33±2.90a	6.90±1.57ab	6.80±2.77a	0.82±0.25a	0.81±0.12ab	0.80±0.20ab
背坡	0.27±0.06a	3.00±2.74ab	4.02±2.09ab	8.83±0.96a	8.50±0.62ab	6.87±1.50ab	0.89±0.17a	0.86±0.12ab	0.87±0.13ab
坡脚	0.22±0.01a	7.49±2.41b	3.73±2.65ab	9.48±1.33a	8.53±1.05ab	7.73±1.53ab	0.89±0.18a	0.99±0.04b	0.92±0.14b
坡趾	0.22±0.02a	8.23±0.48b	6.75±0.89b	9.59±2.26a	8.83±1.72b	10.13±0.55b	0.90±0.20a	0.96±0.06b	0.95±0.07b

注：(1) 表内数字表示平均值±标准差；(2) 同列不同小写字母表示不同坡位在 $p<0.05$ 水平上差异显著。

2.3 等高耕作土壤有机碳和全氮再分布特征

不同坡位土壤有机碳、全氮在等高模拟耕作前、耕作 20 次和 40 次后的变化如图 2 所示。与耕作前相比,坡顶、坡脚、坡趾有机碳和全氮浓度的垂直变化较为明显。对于坡顶,土壤有机碳和全氮浓度随着耕作次数的增加总体上呈现逐渐减小的趋势。对于坡脚,土壤有机碳深度分布的变化与坡顶相似,与有机碳不同,表层 5—30 cm 全氮浓度在耕作 20 次和 40 次后相比耕作前呈增加趋势。对于坡趾,耕作 20 次后表层 0—25 cm 有机碳浓度与耕作前相比呈现减小趋势,但耕作 40 次后 5—20 cm 有机碳浓度呈增大趋势。与有机碳不同,耕作 20 次和 40 次后 5—30 cm 全氮浓度与耕作前相比都呈增大趋势。

模拟耕作前不同坡位土壤表层(0—15 cm)有机碳和全氮无显著性差异(表 3)。耕作 20 次后,不同坡位土壤有机碳浓度与耕作前相比均发生明显减小,平均减小 3.7%~10%,导致坡顶和坡趾土壤有机碳浓度差异显著($p=0.044$)。耕作 40 次后,坡顶、肩坡、背坡和坡脚土壤有机碳与耕作前相比分别减小 7.2%~26.1%,而坡趾却增加 5.6%,导致坡顶($p=0.006$)、肩坡($p=0.047$)与坡趾有机碳浓度均达到显著性差异。与有机碳变化略有不同,耕作 20 次和 40 次后全氮在坡顶显著减小,肩坡和背坡略微减小,而在坡脚和坡趾都呈增加趋势,这导致坡顶与坡脚、坡趾全氮浓度耕作 20 次和 40 次后差异都达到显著性($p<0.05$)。

模拟耕作前后土壤表层(0—15 cm)磁化率与有机碳、全氮浓度的相关分析结果见表 4。耕作前原土壤磁化率与有机碳、全氮无显著相关性($p=0.54$ 和 $p=0.69$)。人为添加磁性示踪剂模拟耕作 20 次后,土壤磁化率与有机碳呈极显著正相关($p<0.001$),土壤磁化率与全氮也呈现显著正相关($p=0.014$)。耕作 40 次后,土壤磁化率与有机碳、全氮相关性增强,都达到极显著正相关($p<0.001$)。

3 讨论

旋耕机等高耕作 40 次后坡顶侵蚀深度(0.17 m)超过了原土壤剖面厚度(0.16 m),但并没有使坡顶土层消失,而是保持与耕作深度相当的土壤剖面厚度,

表明耕作深度对于维持紫色土坡顶土壤剖面厚度具有重要作用。这是由于紫色泥页岩沉积松散,当耕作侵蚀使土壤剖面厚度小于耕作深度时,旋耕机就会直接将耕层下的母岩剥离而混入耕层,进而补充耕层损失的土壤。耕作对坡顶土壤起着顺坡搬运(耕作侵蚀)和垂直搬运(破碎母岩)的双重作用,在这种作用下紫色土坡顶土壤剖面厚度总是处于动态平衡中。虽然增加耕作深度有助于增大母岩破碎量,有望提高土壤剖面厚度,但同时也会增大耕作侵蚀,提高土壤顺坡搬运量^[14,19]。本研究结果与锄耕结果明显不同,锄耕多次模拟耕作后坡顶土层完全消失^[7-8,20],这主要是由于锄耕顺坡耕作导致土壤单方向地向下坡移动,锄耕顺坡耕作的耕作侵蚀强度明显大于旋耕机等高耕作。此外,耕作工具本身的差异也有一定影响,人力锄耕对母岩的剥离破碎作用弱于旋耕机。

表 4 模拟耕作前后土壤表层(0—15 cm)磁化率与有机碳、全氮的相关性

土壤元素	耕作前磁化率		耕作 20 次磁化率		耕作 40 次磁化率	
	相关系数	p 值	相关系数	p 值	相关系数	p 值
有机碳	0.17	0.54	0.80	<0.001	0.88	<0.001
全氮	0.11	0.69	0.62	0.014	0.97	<0.001

在顺坡方向上,旋耕机等高耕作导致土壤在上坡流失,在下坡累积,表明旋耕机等高耕作顺坡搬运土壤作用显著。耕作对土壤顺坡搬运可分为耕作侵蚀区、耕作传输区和耕作沉积区。对于本研究坡地,距坡顶 0~5 m 的上坡部位为耕作侵蚀区,耕作导致该区域土壤流失;距坡顶 5~15 m 的坡中部为耕作传输区,在耕作过程中扮演着“传输带”的作用^[7];距坡顶 15~18 m 的下坡部位为耕作沉积区,耕作导致土壤在该区域累积。在垂直方向上,旋耕机等高耕作引起表层土壤磁性示踪剂垂直向下迁移,但土壤磁性示踪剂在不同坡位呈现出不同的垂直分布特征。对于耕作侵蚀区,模拟耕作后坡顶土壤磁化率显著小于坡趾,而且坡顶耕层下部(5—10 cm)土壤磁化率明显小于耕层上部(0—5 cm)。这种差异主要归因于耕层以下母岩碎屑向上迁移对耕层土壤的稀释作用和耕作对土壤顺坡传输作用的综合作用。对于耕作传输区,耕作的混匀作用导致土壤磁性示踪剂在整个耕层分布较均匀。

对于耕作沉积区, 表层 0—20 cm 土壤磁性强度都显著增大, 相当于耕作深度的 2 倍。这主要是由于旋耕机等高耕作引起来自上坡的土壤在坡趾堆积, 导致原耕层土壤被埋藏在“新耕层”之下。

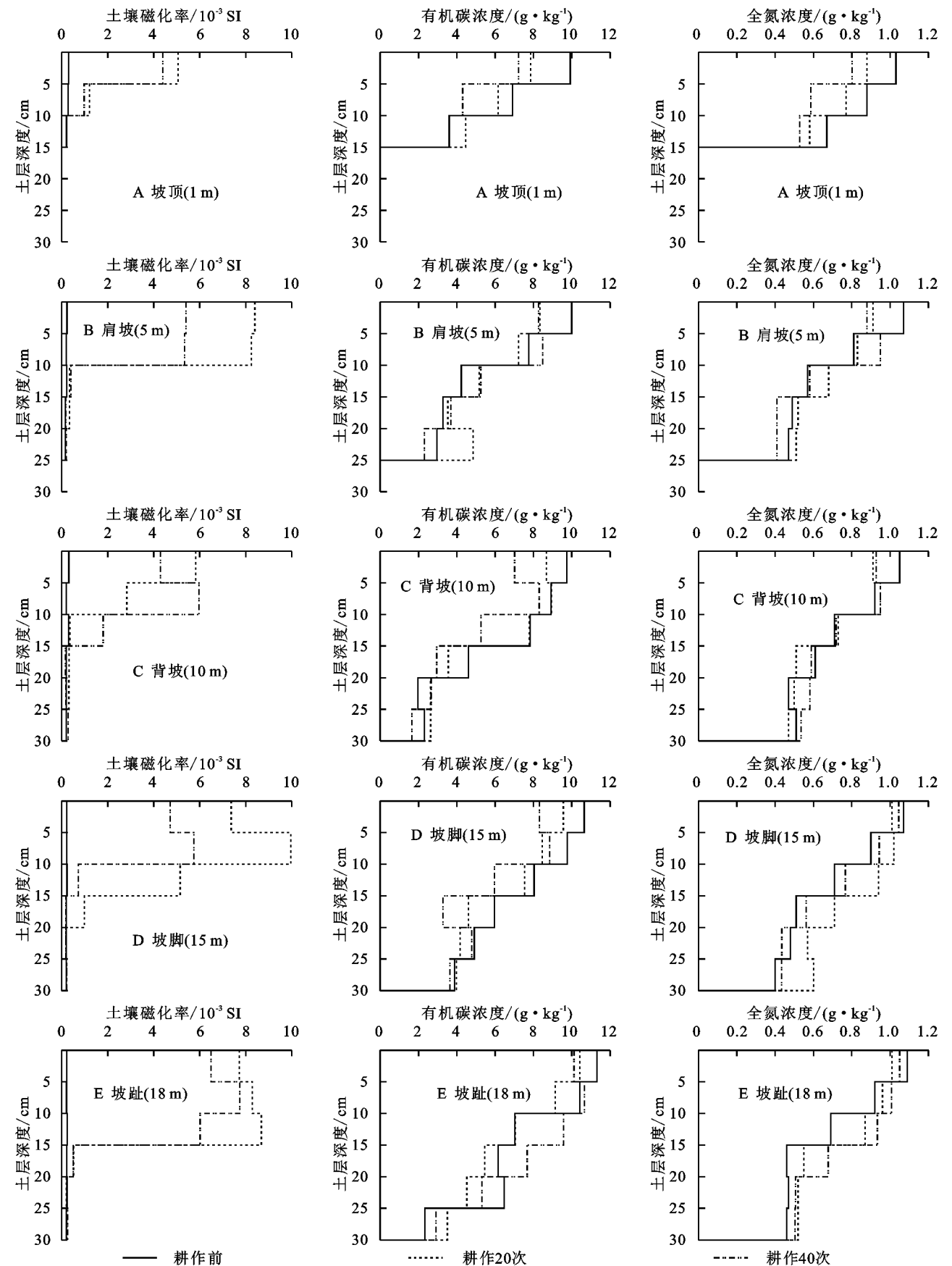


图 2 等高模拟耕作前、20 次和 40 次后 0—30 cm 土壤磁化率、有机碳和全氮变化

旋耕机等高耕作导致坡面土壤有机碳和全氮垂直分布发生明显变化。模拟耕作20次和40次后,坡顶土壤有机碳和全氮明显减小。这主要是由于耕作侵蚀使坡顶表层土壤向下坡迁移,同时,耕作将土壤有机碳含量极低的母岩破碎补充至耕层,稀释了原耕层土壤有机碳浓度。背坡和坡脚表层(0—10 cm)土壤有机碳浓度明显减少,这是由于耕作的混匀作用和耕作传输作用使上坡低浓度有机碳向下传输。耕作40次后坡趾表层0—5 cm土壤有机碳和全氮略有减小,但是5—20 cm明显增加。这主要是来自上坡土壤的有机碳和全氮浓度低于原耕层土壤,同时原坡趾有机碳和全氮浓度较高的土壤被埋藏于“新耕层”之下。本研究结果与紫色土区锄耕模拟结果相似^[20],但是由于坡耕地坡度和耕作机具不同,不同景观部位的有机碳和全氮垂直分布有所不同。黄土区犁耕模拟研究也显示强烈耕作后上坡和中坡土壤有机质含量显著减小,而下坡明显增加^[21]。

本研究采用人为在土壤表面添加钛铁矿粉以示踪表层土壤垂直和顺坡再分配过程,这对于研究耕作对土壤碳氮再分布过程的影响具有重要作用。这主要体现在以下几方面:首先,钛铁矿粉磁性强,在土壤表层铺设1 cm,浓度为7.1%条件下,耕作20次后土壤磁性强度为原土壤磁性强度的20倍,耕作40次后土壤磁性强度为原土壤磁性强度的17倍;其次,采用方格布设法铺设土壤磁性示踪剂后,铺设较均匀,空间变异性较小(<10%);第三,紫色土原土壤磁性强度较弱(土壤磁化率背景值介于 $0.15 \sim 0.29 \times 10^{-3}$ SI),且土壤磁化率的垂直分布较均匀,人为在土壤表面添加钛铁矿粉给各坡位创造完全一致的土壤初始条件,土壤磁性示踪剂的再分布过程有利于更好地反映耕作对土壤垂直和顺坡分布的影响;最后,模拟耕作后,土壤磁化率与土壤有机碳和全氮呈显著正相关($p < 0.05$),说明耕作对土壤碳氮和土壤磁性示踪剂再分布过程的作用是一致的。

4 结论

(1) 旋耕机等高模拟耕作后坡顶侵蚀深度超过原土壤剖面厚度,但土壤剖面厚度依然保持与耕作深度相当,耕作对坡顶土壤起着顺坡搬运(耕作侵蚀)和垂直搬运(破碎母岩)的双重作用,从而使土壤剖面厚度处于动态平衡。耕作深度对于紫色土坡顶土壤剖面厚度起着至关重要的作用,研发能增加耕作深度同时减少耕作位移的耕作机具是未来重要的发展方向。

(2) 耕作对土壤顺坡搬运过程可分为耕作侵蚀区、耕作传输区和耕作沉积区;耕作引起表层土壤磁性

示踪剂垂直向下迁移,但不同坡位垂直分异明显;对于耕作侵蚀区,母岩碎屑向上迁移的稀释作用和耕作对土壤的顺坡传输作用下,土壤磁性强度明显减弱;对于耕作传输区,耕作的混匀作用导致土壤磁性示踪剂在整个耕层分布较均匀;对于耕作沉积区,耕作引起来自上坡的土壤堆积在原耕层之上,导致土壤磁性强度相比上坡明显增大,但随着耕作次数的增加呈减小趋势。

(3) 耕作对土壤的顺坡和垂直迁移作用引起土壤有机碳和全氮也发生顺坡传输与垂直迁移,两者相互影响,强烈耕作后导致坡顶土壤有机碳和全氮浓度明显减小,坡趾表层0—5 cm减小,而表层0—5 cm以下呈现明显增加。

(4) 采用方格布设法在坡耕地表层人为投加钛铁矿粉作为土壤磁性示踪剂,使整个坡面形成完全一致的土壤初始条件,土壤磁性示踪剂的再分布过程有利于更好地反映耕作对土壤垂直和顺坡分布的影响,这对于研究耕作对土壤碳氮再分布过程的影响具有重要作用。

参考文献:

- [1] Zhang J, Quine T A, Ni S, et al. Stocks and dynamics of SOC in relation to soil redistribution by water and tillage erosion[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 1834-1841.
- [2] 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: 99-107.
- [3] Zhang J H, Frielinghaus M, Tian G., et al. Ridge and contour tillage effects on soil erosion from steep hill-slope in the Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 59(6): 277-284.
- [4] 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: 177-183.
- [5] Ni S J, Zhang J H. Variation of chemical properties as affected by soil erosion on hillslopes and terraces[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 58(6): 1285-1292.
- [6] Su Z A, Zhang J H, Nie X J. Effect of soil erosion on soil properties and crop yields on slopes in the Sichuan Basin, China[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(6): 736-746.
- [7] 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.
- [8] Li F C, Zhang J H, Su Z A, et al. Simulation and ¹³⁷Cs tracer show tillage erosion translocating soil organic car-

- bon, phosphorus, and potassium[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176(5):647-654.
- [9] Zhang J H, Ni S J, Su Z A. Dual roles of tillage erosion in lateral SOC movement in the landscape [J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(2):165-176.
- [10] Zhang J H, Li F C, Wang Y, et al. Soil organic carbon stock and distribution in cultivated land converted to grassland in a subtropical region of China[J]. *Environmental Management*, 2014, 53(2):274-283.
- [11] De Alba S, Borselli L, Torri D, et al. Assessment of tillage erosion by mouldboard plough in Tuscany(Italy) [J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 85(1/2):123-142.
- [12] Zhang J H, Jia L Z, Zhang Z H, et al. Effect of the soil-implement contact area on soil translocation under hoeing tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 183:42-50.
- [13] 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.
- [14] 李富程,花小叶,黄强.耕作深度对紫色土坡地旋耕机耕作侵蚀的影响[J].*水土保持研究*, 2016, 23(4):1-5.
- [15] 李富程,花小叶,江仁涛,等.紫色土坡地土壤性质对耕作侵蚀的影响[J].*水土保持通报*, 2016, 36(4):152-157.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Li F C, Jiang R T, Ju Li. Influences of tillage operations on soil translocation over sloping land by hoeing tillage[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018, 64(3):430-440.
- [20] Zhang J H, Wang Y, Jia L Z, et al. An interaction between vertical and lateral movements of soil constituents by tillage in a steep-slope landscape[J]. *Catena*, 2017, 152:292-298.
- [21] Wang Z L, Shao M A, Li Y. Study on the soil redistribution induced by tillage erosion in loess region of China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2):168-172.

~~~~~

(上接第 6 页)

- [14] Bouyoucos G J. Clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion[J]. *Journal of the American Society of Agronomy*, 1935(9):738-741.
- [15] 姜小三,潘剑君,杨林章,等.土壤可蚀性  $K$  值的计算和  $K$  值图的制作方法研究:以南京市方便水库小流域为例[J].*土壤*, 2004, 36(2):177-180.
- [16] 宋阳,刘连友,严平,等.土壤可蚀性研究述评[J].*干旱区地理*, 2006, 29(1):124-131.
- [17] 徐俏,崔东,王兴磊,等.冻融对伊犁草地土壤水稳性大团聚体的影响[J].*干旱地区农业研究*, 2017, 35(6):244-251.
- [18] 张海欧,解建仓,南海鹏,等.冻融交替对复配土壤团粒结构和有机质的交互作用[J].*水土保持学报*, 2016, 30(3):273-278.
- [19] 曾全超,李娅芸,刘雷,等.黄土高原草地植被土壤团聚体特征与可蚀性分析[J].*草地学报*, 2014, 22(4):743-749.
- [20] 孙娇.黄土丘陵区植被恢复下土壤团聚体稳定性及其化学计量特征[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- [21] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].*科学通报*, 1993, 38(20):1896-1899.
- [22] Shirazi M A, Boersma L. A unifying quantitative analysis of soil texture[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(1):142-147.
- [23] 周萍,刘国彬,候喜禄,黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团粒结构分形特征[J].*中国水土保持科学*, 2008, 6(2):75-82.
- [24] 宁丽丹,石辉,周海军,等.岷江上游不同植被下土壤团聚体特征分析[J].*应用生态学报*, 2005, 16(8):1405-1410.
- [25] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. *Catena*, 2003, 52(1):1-8.
- [26] 缪驰远,刘宝元,刘刚,等.东北典型黑土区剖面粒径分布特征及其可蚀性研究[J].*水土保持学报*, 2008, 22(3):18-23.