

川北山区坡耕地侵蚀耕作对土壤团聚体碳的影响*

樊红柱^{1,2} 张建辉¹ 王勇^{1,2} 蒋松³

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 四川省农业科学院土壤肥料研究所, 成都 610066)

摘要:为更好地了解耕作侵蚀对坡耕地土壤碳循环的影响,采用¹³⁷Cs示踪技术研究了川北山区坡耕地土壤再分配对土壤有机碳和团聚体有机碳含量与储量的影响。结果表明:与该区土壤¹³⁷Cs有效背景值比较,短坡耕地上坡部位(坡顶、坡肩)土壤中¹³⁷Cs含量降低了76.91%,而下坡部位(坡脚、坡趾)增加了24.02%;坡耕地上坡部位发生土壤损失,耕作侵蚀平均速率为63.22 t/(hm²·a),占土壤总侵蚀的94.61%,耕作导致下坡土壤沉积,平均沉积速率为23.94 t/(hm²·a)。上坡土壤中大于2 000 μm、250~2 000 μm和53~250 μm的团聚体所占比例显著低于下坡,而小于53 μm的团聚体所占比例则相反;土壤及不同粒级团聚体的有机碳含量与储量下坡显著高于上坡。土壤和不同粒级团聚体的有机碳含量与¹³⁷Cs面积浓度呈极显著正相关关系,说明侵蚀引起土壤再分配造成上坡有机碳含量贫瘠,而下坡相对富集。因此,川北山区坡耕地施肥管理应关注土壤质量空间变异特征。

关键词:川北山区 耕作侵蚀 土壤团聚体 碳含量与储量 坡耕地

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0157-08

Tillage Erosion Impacts on Soil Aggregate Associated Carbon in Mountainous Region Slope Farmland of Northern Sichuan

Fan Hongzhu^{1,2} Zhang Jianhui¹ Wang Yong^{1,2} Jiang Song³

(1. Institute of Maintain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract: In order to better understand the effects of tillage erosion on carbon cycle in the sloping farmland, responses of soil organic carbon and aggregate associated carbon to soil erosion were explored in a mountainous region of northern Sichuan Basin, southwest China, with ¹³⁷Cs tracer and laboratory analysis method. The results showed soil loss was found in upslope where ¹³⁷Cs concentrations were lower (soil erosion rates were greater), whereas soil deposit occurred in the bottom of sloping farmland where ¹³⁷Cs concentrations were higher (soil erosion rates were less). Not only water erosion but also tillage erosion contributed to soil losses. Tillage erosion played an important role in sloping farmland soil redistribution, average tillage erosion rate in upslope was 63.22 t/(hm²·a), occupying 94.61% of total soil erosion. Soil deposit rate was 23.94 t/(hm²·a) in low positions. Soil erosion resulted in the lowest >2 000 μm, 250~2 000 μm and 53~250 μm size aggregates, and created the highest <53 μm aggregate fraction in upslope. Meanwhile, soil organic carbon and aggregate associated carbon content and stock were significantly lower in upslope positions than these in bottom slope positions. There was significant correlation between soil organic carbon, content of aggregate associated carbon and ¹³⁷Cs inventory, suggesting that soils were more fertile in bottom positions than in top positions due to soil redistribution by soil erosion. Therefore, fertilization management strategies should involve spatial

收稿日期: 2015-05-04 修回日期: 2015-08-18

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2015CB452704)

作者简介: 樊红柱,助理研究员,中国科学院大学博士生,主要从事土壤侵蚀和土壤化学研究,E-mail: hongzhufan@126.com

通讯作者: 张建辉,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀、土壤物理研究,E-mail: zjh@imde.ac.cn

variation of soil properties in purple soil of hilly sloping farmland.

Key words: Mountainous region of northern Sichuan Tillage erosion Soil aggregates Carbon content and storage Sloping farmland

引言

农田土壤有机碳是陆地生态系统中较活跃的碳库,其储量约占全球有机碳储量的 10%,土壤有机碳不仅在土壤物理、化学和生物学特性中发挥着重要作用,也是全球 CO₂的源和汇,土壤有机碳微小变化可能对全球大气 CO₂浓度产生重要影响^[1-2]。团聚体是土壤结构的基本单元,一方面通过稳定土壤结构,增强抗侵蚀能力、减少水土流失;另一方面,通过保护土壤中的有机质,提高土壤肥力与质量^[3-4]。一般以 250 μm 为界线将土壤水稳性团聚体划分为大团聚体 (Macro-aggregates) 和微团聚体 (Micro-aggregates),其中前者又可分为大于 2 000 μm 的大团聚体和 250 ~ 2 000 μm 的中等团聚体,后者又可分为 53 ~ 250 μm 的微团聚体及小于 53 μm 的粉 + 黏团聚体^[5]。不同粒级团聚体在协调土壤养分的保持与供应、改善孔隙组成、水力学性质和生物学性质等方面具有不同的作用^[4,6]。Six 等^[7]认为团聚体可以有效地阻隔微生物对有机碳的矿化,从而达到保护有机碳的目的。彭新华等^[8]认为土壤中 70% 以上的有机碳储存在微团聚体中,并揭示了不同粒径团聚体对有机碳固定的作用机制。Zhang 等^[6]发现侵蚀坡耕地和梯坡中土壤¹³⁷Cs 含量与有机碳含量呈显著正相关,即有机碳在上坡流失,在下坡沉积。方华军等^[9]认为土壤侵蚀倾向于优先使低密度小颗粒的有机碳组分发生再分布,导致沉积区土壤活性有机质比侵蚀区土壤有机质生物活性更大。综上所述,近年来国内外对土壤团聚体有机碳的研究开展较多,但主要集中于土地利用类型、耕作方式、施肥管理及秸秆还田等方面的研究^[10-12],而关于耕作侵蚀对土壤团聚体碳的影响报道还不多见。本文研究川北山区典型坡耕地上耕作侵蚀对土壤团聚体碳含量与储量的影响,以期丰富农田有机碳的研究,为坡地水土流失治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样区概况

研究区位于四川省广元市剑阁县 (32°7'49"N, 105°22'31"E)。该区属亚热带湿润气候,年降水量 800 ~ 1 000 mm,多年平均气温为 17℃左右,年日照时数 1 300 ~ 1 400 h。土壤母质为白垩系城墙岩群白龙组紫色砂岩,土壤抗蚀性差,侵蚀剧烈,浅薄的

土层直接下伏母岩。研究区域坡耕地分布广泛,具有地块小、坡度大、土层浅的特点;土地利用为基本农田,种植结构以烟草连作或轮作为主,顺坡耕作一直是该区的主要耕作方式。

1.2 样品采集与分析

2013 年 3 月在研究区选择一个坡度 8.5%、坡长 18 m 的线性坡耕地。顺坡面布置 3 条间隔 5 m 的平行取样线,沿着每条取样线,从上坡至下坡根据坡型布置坡顶、坡肩、坡背、坡脚和坡趾 5 个采样点;将直径 8 cm、深度 15 cm 的取样筒垂直打入地面取土壤剖面全样,取样深度依土层厚度而定;3 条取样线共 15 个采样点,即每个景观部位取 3 次重复土样。运用差分相位 GPS 技术测量海拔高度、坡长、坡度等地形参数。上、中、下坡位土壤粉粘粒质量分数分别为 52.10%、55.85% 和 55.99%。

¹³⁷Cs 含量利用美国堪培拉 (CANBERRA) 公司生产的高纯锗 (HPGe) 探头多道 γ 能谱仪,经前置放大和数字转换后,接多道分析仪测定;每个样品测试质量不小于 350 g,测试时间为 50 000 s,测试结果相对误差小于 5%^[13]。土壤水稳性团聚体的筛分根据 Du 等^[14]的方法并做了部分修改:称取自然风干土样 50 g,置于由 2 000 μm、250 μm 和 53 μm 构成的套筛上,放入蒸馏水至淹没土样 2 cm 位置,浸泡土样 5 min;然后以 25 次/min 的速度在蒸馏水中振荡 10 min,上下振幅为 3 cm,分离得到大团聚体 (>2 000 μm)、中等团聚体 (250 ~ 2 000 μm)、微团聚体 (53 ~ 250 μm) 和粉黏团聚体 (<53 μm);将各级筛上团聚体组分用去离子水冲洗干净置于铝盒中,60℃下干燥 12 h 后称量,计算各粒级水稳性团聚体的质量分数,同时将干燥的各粒径团聚体磨细过 100 目筛,供有机碳分析。土壤有机碳用重铬酸钾容量法测定^[15]。

1.3 计算与统计分析

土壤¹³⁷Cs 含量是反映土壤再分布的可靠指标,运用 Zhang 等^[6]的公式计算土壤总侵蚀速率,即

$$Y = \frac{10dB}{P} \left[1 - \left(1 - \frac{X}{100} \right)^{1/(t-1963)} \right] \tag{1}$$

其中 $X = (A_e - A)/A_e \times 100$ $A_e = A_0(1 - V_{RI})$
式中 Y ——土壤总侵蚀速率,t/(hm²·a)
 d ——耕作层厚度,m
 B ——土壤容重,kg/m³
 P ——粒径校正系数,一般取 1

X —— ^{137}Cs 浓度净减率
 A_e —— ^{137}Cs 有效背景值, Bq/m^2
 A —— ^{137}Cs 测定值, Bq/m^2
 A_0 —— ^{137}Cs 背景值, Bq/m^2
 V_{RI} ——径流指数, 取 0.235^[16]

根据本研究区 2013 年采集的土样计算得到 ^{137}Cs 有效背景值为 $1\,244.77\text{ Bq}/\text{m}^2$ 。

土壤耕作侵蚀速率按照 Zhang 等^[6] 的公式计算, 即

$$R_2 = 10(Q_{s,out} - Q_{s,in})/L_i \tag{2}$$

$$Q_{s,out} = D_{t,i}\rho_{b,i}(k_1 + k_2S_i) \tag{3}$$

$$Q_{s,in} = D_{t,i-1}\rho_{b,i-1}(k_1 + k_2S_{i-1}) \tag{4}$$

式中 R_2 ——耕作侵蚀速率, $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$
 $Q_{s,out}$ 、 $Q_{s,in}$ ——耕作导致的土壤输出量、输入量, $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$
 L_i ——第 i 段的坡长, m
 $\rho_{b,i}$ 、 $\rho_{b,i-1}$ ——土壤容重, kg/m^3
 $D_{t,i}$ 、 $D_{t,i-1}$ ——耕层深度, m
 S_i 、 S_{i-1} —— i 和 $i-1$ 段的坡度, m/m
 k_1 、 k_2 ——土壤耕作传输系数, 取 0.106 6 m 和 0.490 2 m^[16]

团聚体的平均重量直径 (Mean weight diameter, MWD)^[17] 和土壤有机碳储量^[15] 计算式为

$$V_{\text{MWD}} = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{R_i} w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{5}$$

式中 $\overline{R_i}$ ——某级别团聚体平均直径
 w_i ——某级别团聚体的干质量

$$V_{\text{SOC}_i} = \frac{\sum C_i p_i T_i}{10} \tag{6}$$

式中 V_{SOC_i} ——特定深度的土壤有机碳储量, t/hm^2
 C_i ——第 i 层土壤有机碳含量, g/kg
 p_i ——第 i 层土壤容重, kg/m^3
 T_i ——第 i 层土壤厚度, cm

试验数据应用 Excel 2007 和 DPS 6.55 软件进行处理, 显著性检验用 LSD 法进行分析。

2 结果与分析

2.1 坡耕地土壤侵蚀

自然界没有天然来源的 ^{137}Cs , 环境中存在的 ^{137}Cs 是大气核试验和核反应堆泄漏的产物, 环境中的 ^{137}Cs 除了本身衰变外, 水力侵蚀和人为扰动是导致 ^{137}Cs 变化的主要原因, 土壤 ^{137}Cs 含量是反映土壤侵蚀与沉积速率的可靠指标^[6,13,16,18]。一般地, 土

壤既无侵蚀也无沉积时, ^{137}Cs 面积浓度应当等于背景值; 当某点 ^{137}Cs 面积浓度小于背景值时, 表明该点发生土壤侵蚀; 相反地, 当某点 ^{137}Cs 面积浓度大于背景值时, 表明该点发生土壤沉积^[16]。坡耕地 ^{137}Cs 面积浓度含量分布见图 1。由图 1 可知, 坡耕地不同部位土壤中 ^{137}Cs 含量与研究区 ^{137}Cs 含量背景值 $1\,244.77\text{ Bq}/\text{m}^2$ 相比较, 仅有坡趾 ^{137}Cs 含量 ($1\,870.63\text{ Bq}/\text{m}^2$) 高于背景值, 其他部位坡顶 ($211.18\text{ Bq}/\text{m}^2$)、坡肩 ($363.60\text{ Bq}/\text{m}^2$)、坡背 ($878.53\text{ Bq}/\text{m}^2$) 和坡脚 ($1\,216.83\text{ Bq}/\text{m}^2$) 的 ^{137}Cs 含量均低于背景值, 表明坡趾发生了净土壤堆积, 其他位置发生了不同程度的土壤损失。从图 1 还可知, 不同部位土壤中 ^{137}Cs 含量由小到大为: 坡顶、坡肩、坡背、坡脚、坡趾, 特别是在坡顶与坡趾, ^{137}Cs 含量分别达最低和最高。由此可见, 坡顶土壤损失最严重, 从上坡到下坡土壤损失逐渐减小; 而坡趾土壤损失最弱, 明显地表现出相对沉积甚至净堆积的特征。这与川中丘陵区紫色土坡耕地上开展的研究结果一致^[6,13,16,18], 主要是由于长期耕作导致土壤在坡面再分布造成的结果。

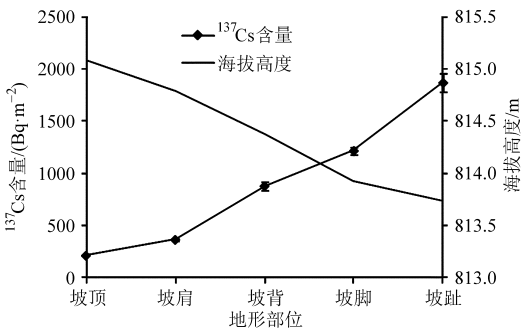


图 1 坡耕地不同地形部位 ^{137}Cs 含量分布
Fig.1 Distribution of ^{137}Cs inventory in different geomorphic positions on slope farmland

坡耕地土壤侵蚀速率顺坡分布见图 2。坡顶、坡肩、坡背和坡脚土壤总侵蚀速率分别为 79.26、54.38、15.76、1.01 $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$, 而坡趾发生土壤沉积, 沉积速率为 48.88 $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 。坡顶和坡肩耕作侵蚀速率分别为 76.95、49.50 $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$, 表示耕作导致上坡土壤流失; 坡脚和坡趾耕作侵蚀速率分别为 -14.06、-84.65 $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$, 表示耕作造成上坡土壤在下坡沉积。坡顶和坡肩土壤平均总侵蚀速率为 66.82 $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$, 耕作侵蚀平均速率为 63.22 $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$, 占土壤总侵蚀速率的 94.61%, 表明川北山区短坡耕地上坡土壤侵蚀主要以耕作侵蚀为主; 图 2 显示从上坡到下坡水蚀速率逐渐增大, 并且下坡土壤总侵蚀和耕作侵蚀均为负值 (土壤沉积), 表明下坡土壤侵蚀主要以水蚀为主。导致耕作侵蚀上坡大下坡小分布格局的原因与该区土地耕

作方式和种植结构密切相关,顺坡耕作是该区主要的耕作方式,该区以烟草连作或轮作为主要种植方式,由于烟草是一种忌涝的经济作物,在川北山区坡耕地上,种植烟草时烟农习惯顺坡起垄以便排水,造成上坡大量土壤被侵蚀,在坡中部传输搬运,最后在坡脚堆积^[6]。水蚀从坡顶到坡趾逐渐加强的原因可能有两方面:一方面是地表径流不能在坡上部汇聚,而在坡中、下部汇聚,造成坡上部水蚀较小、坡下部较大的分布特征;另一方面是烟草种植时需要中耕培土(6—7月份)来稳固烟株、促进新根生长,这时正好是该区雨季,耕作疏松的土壤为水力侵蚀搬运土壤创造了良好的条件,从而加速了土壤侵蚀。耕作一方面直接导致耕作侵蚀,另一方面还加速了水力侵蚀作用,所以在川北山区坡耕地上土壤侵蚀是耕作侵蚀和水蚀共同作用的结果。

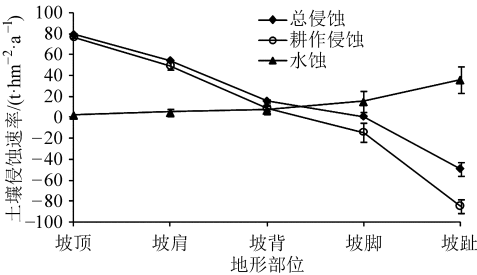


图2 坡耕地不同地形部位土壤侵蚀速率
Fig.2 Soil erosion rates in different geomorphic positions on slope farmland

2.2 坡耕地土壤水稳性团聚体

不同粒径的团聚体在土壤营养元素的保持、供应及转化能力等方面发挥着不同的作用^[4]。坡耕地不同部位土壤团聚体含量变化差异较大(表1),坡脚和坡趾大于2 000 μm的大团聚体含量之间无显著差异,分别为13.06%和13.44%,但两者均显著高于坡顶、坡肩和坡背,坡顶大于2 000 μm大团聚体含量最低,仅为5.47%。坡顶和坡肩250~2 000 μm中等团聚体含量差异不显著,分别为20.92%和24.69%;坡背、坡脚和坡趾也无显著差异,但下坡250~2 000 μm中等团聚体含量显著高于上坡。53~250 μm的微团聚体含量也表现出下

坡显著高于上坡。小于53 μm的粉黏团聚体含量在坡顶、坡肩、坡背、坡脚和坡趾分别为51.63%、39.84%、25.47%、11.99%和15.31%,表现出小于53 μm的粉黏团聚体含量从上坡到下坡显著降低的趋势。以上结果表明大于2 000 μm、250~2 000 μm和53~250 μm的团聚体含量从上坡到下坡呈增加趋势,而小于53 μm的团聚体含量则相反。由表1还可知,上坡小于53 μm的粉黏团聚体含量最高,250~2 000 μm和53~250 μm的团聚体含量次之,大于2 000 μm的团聚体含量最低,小于250 μm的微团聚体占66.65%~73.61%;下坡250~2 000 μm的团聚体含量最高,53~250 μm的团聚体次之,大于2 000 μm和小于53 μm的团聚体较少,大于250 μm的大团聚体占51.32%~56.36%;表明上坡土壤团聚体结构以微团聚体为主,下坡以大团聚体为主,这主要是因为长期强烈耕作引起上坡土壤不断向下坡迁移造成的。方华军等^[9]的研究也表明遭受严重侵蚀的坡顶和坡肩,土壤水稳性大团聚体含量明显减少,而微团聚体含量显著提高;郭志民^[19]的研究也发现随着土壤侵蚀程度的加剧,大于2 000 μm和大于250 μm的团聚体均有减少趋势,特别是大于2 000 μm的团聚体减少更为明显,而20~250 μm的团聚体却有增加趋势。这些研究表明土壤侵蚀倾向于破坏水稳性大团聚体,相应地增加微团聚体含量。苏正安等^[13]在川中丘陵区的研究发现土壤物理性黏粒和微团聚体含量从上坡到下坡呈增加趋势,与该研究结果不一致。主要原因是苏正安的研究选取110 m长坡,而该研究是18 m的短坡,在长坡地上水蚀扮演了非常重要的角色,水蚀具有分选性,即水力侵蚀导致土壤物理性黏粒和微团聚体大量被侵蚀,而在坡下部堆积;由于短坡地以耕作侵蚀为主^[18],耕作侵蚀对土壤颗粒主要起搬运和混匀作用,导致侵蚀区大团聚体含量减少。

土壤团聚体稳定性表示土壤结构的稳定性,直接或间接影响土壤其他物理、化学属性。团聚体平均重量直径(MWD)是反映土壤团聚体稳定性的重要指标,MWD越大,表示土壤团聚体的团聚度越

表1 坡耕地不同地形部位土壤团聚体含量

地形坡位	粒径/μm				%
	大于2 000	250~2 000	53~250	0~53	
坡顶	5.47±0.30 ^c	20.92±1.52 ^b	21.98±1.82 ^d	51.63±3.64 ^a	
坡肩	8.66±1.32 ^b	24.69±2.61 ^b	26.81±0.36 ^{bc}	39.84±0.93 ^b	
坡背	7.29±0.67 ^{bc}	44.03±1.78 ^a	23.21±1.16 ^{cd}	25.47±2.27 ^c	
坡脚	13.06±1.02 ^a	43.30±3.87 ^a	31.65±2.45 ^{ab}	11.99±0.41 ^d	
坡趾	13.44±1.04 ^a	41.00±2.28 ^a	30.25±0.31 ^b	15.31±0.93 ^d	

注:不同字母表示 $P<0.05$ 的差异显著,下同。

高、稳定性越强^[17]。坡耕地不同地形部位土壤 MWD 发生显著变化(图 3)。坡脚和坡趾土壤团聚体的 MWD 差异不显著,且两者均显著高于坡顶、坡肩和坡背的 MWD,其中坡顶部位 MWD 最小。耕作侵蚀导致土壤在坡脚和坡趾部位发生沉积,结果显著增强此部位土壤的团聚化作用,改善了土壤的物理结构,提高了土壤抵抗外力破坏的能力。

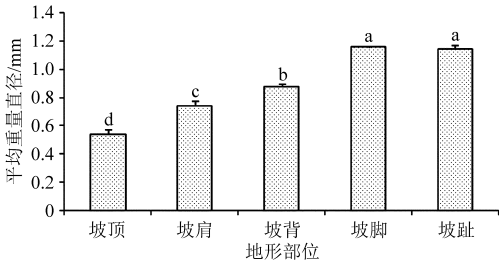
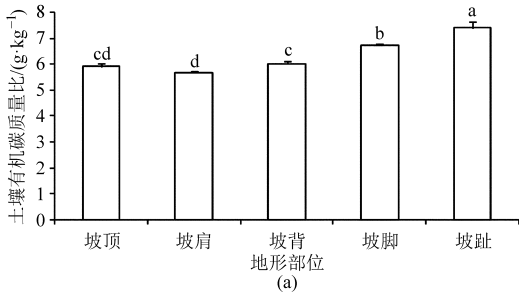


图 3 坡耕地不同地形部位土壤平均重量直径
Fig. 3 Mean weight diameter of soil aggregates on slope farmland



2.3 坡耕地土壤团聚体有机碳

土壤有机碳是土壤肥力的重要指标,是土壤质量和功能的核心,在土壤许多理化和生物学特性中发挥着重要作用^[1]。坡耕地不同部位土壤有机碳质量比为 5.68~7.39 g/kg(图 4a),其中,坡趾有机碳含量显著高于其他部位,分别比坡顶、坡肩、坡背和坡脚高 19.89%、23.14%、18.40% 和 8.66%,由大到小为坡趾、坡脚、坡背、坡顶、坡肩。不同部位土壤有机碳储量与有机碳含量具有相似的变化规律(图 4b)。表明坡耕地下坡土壤较上坡肥沃。国内外研究^[20-22]表明耕作侵蚀对土壤的厚度、容重、质地等物理性质和 C、N、P、K 等化学性质的影响不可忽视,侵蚀引起坡耕地土壤再分配造成上坡土壤肥力直接降低,下坡土壤营养元素处于过剩状态,本研究也证实了这一结论。这是因为在土壤发生侵蚀过程中,首先是最肥沃的表层土壤被侵蚀掉,大量的泥土

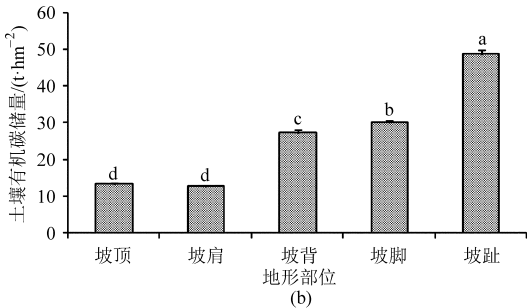


图 4 坡耕地不同地形部位土壤有机碳含量与储量
Fig. 4 Soil organic carbon content and stock in different geomorphic positions on slope farmland

从上坡传输到下坡,导致上坡土壤肥力严重退化。因此,坡耕地种植作物施肥管理时应考虑不同地形部位土壤肥力的空间分布特征,以便增加作物产量、节约肥料资源、提高肥料利用率和保护农田生态环境。

坡耕地不同部位对团聚体中有机碳含量影响的结果见表 2。大于 2 000 μm 的团聚体中有机碳含量坡趾和坡脚较高,分别为 7.20 g/kg 和 6.82 g/kg,且无显著差异;坡顶、坡肩和坡背团聚体中有机碳含量差异不大,在 6.33~6.59 g/kg 范围内变化;方差分析结果表明坡趾土壤团聚体有机碳含量显著高于坡顶、坡肩和坡背,而坡顶、坡肩、坡背和坡脚之间未达到显著差异水平。不同部位土壤中 250~2 000 μm 、53~250 μm 和小于 53 μm 的团聚体有机碳含量与大于 2 000 μm 的团聚体有机碳含量变化相似,即从上坡到下坡呈现出逐渐增加的趋势。土壤侵蚀产生的消散及分散作用使水稳性大团聚体破碎,释放出原来受大团聚体保护的闭蓄态颗粒有机物;同时大团聚体是微团聚体与有机物等胶结形成,含许多初期不稳定的新成有机物如颗粒碳、轻组碳及微生物量碳等;这些物质一方面在微生物作用下分解矿化

损失,另一方面由于耕作侵蚀被迁移到下坡;导致下坡土壤有机碳含量高于上坡。同时,上坡土壤中富集有机物的物质被侵蚀掉后,下层贫碳的土壤物质通过耕翻作用混入耕层进行补充,也降低了上坡土壤有机碳的含量。

表 2 坡耕地不同地形部位土壤团聚体有机碳含量

Tab. 2 Organic carbon content in aggregates of slope farmland		g/kg			
地形部位	粒径/ μm				
	大于 2 000	250~2 000	53~250	0~53	
坡顶	6.59 $\pm$ 0.30 ^b	7.06 $\pm$ 0.06 ^{bc}	5.09 $\pm$ 0.26 ^c	5.73 $\pm$ 0.12 ^c	
坡肩	6.45 $\pm$ 0.23 ^b	6.25 $\pm$ 0.66 ^d	5.18 $\pm$ 0.37 ^{bc}	5.51 $\pm$ 0.48 ^c	
坡背	6.33 $\pm$ 0.03 ^b	6.35 $\pm$ 0.11 ^{cd}	5.39 $\pm$ 0.44 ^{bc}	6.00 $\pm$ 0.26 ^c	
坡脚	6.82 $\pm$ 0.14 ^{ab}	7.31 $\pm$ 0.04 ^{ab}	5.93 $\pm$ 0.18 ^{ab}	7.01 $\pm$ 0.27 ^b	
坡趾	7.20 $\pm$ 0.33 ^a	7.98 $\pm$ 0.09 ^a	6.42 $\pm$ 0.44 ^a	8.21 $\pm$ 0.10 ^a	

不同部位土壤各粒级团聚体有机碳储量与团聚体有机碳含量变化规律相似(表 3)。不同部位土壤中大于 2 000 μm 和 250~2 000 μm 的大团聚体有机碳含量明显高于微团聚体有机碳含量。Jastrow 等^[23]利用¹³C 示踪法证实土壤中微团聚体有机碳比

大团聚体有机碳形成时间早,说明新碳先进入大团聚体;Six 等^[24]认为土壤中的大团聚体是由较小粒级的团聚体通过有机物等胶结剂形成,所以大团聚体比微团聚体含更多的有机碳。上坡小于 250 μm 微团聚体有机碳占总碳储量的 63.10% ~ 68.95%,下坡大于 250 μm 团聚体有机碳占总碳储量的 53.51% ~ 59.66%,说明坡耕地上坡土壤有机碳主要储存在微团聚体中,下坡主要储存在大团聚体中。

表 3 坡耕地不同地形部位土壤团聚体有机碳储量

slopes farmland		t/hm ²			
地形	粒径/μm				
坡位	大于 2 000	250 ~ 2 000	53 ~ 250	0 ~ 53	
坡顶	0.82 ± 0.01 ^c	3.36 ± 0.21 ^c	2.55 ± 0.25 ^d	6.73 ± 0.22 ^b	
坡肩	1.25 ± 0.09 ^d	3.44 ± 0.10 ^c	3.11 ± 0.16 ^d	4.91 ± 0.30 ^c	
坡背	2.09 ± 0.14 ^c	12.50 ± 0.60 ^b	5.73 ± 0.35 ^c	6.92 ± 0.68 ^b	
坡脚	3.99 ± 0.22 ^b	13.89 ± 1.29 ^b	8.36 ± 0.51 ^b	3.73 ± 0.13 ^d	
坡趾	6.35 ± 0.31 ^a	20.91 ± 1.62 ^a	12.86 ± 0.31 ^a	8.49 ± 0.21 ^a	

2.4 坡耕地土壤团聚体有机碳与侵蚀的关系

从¹³⁷Cs 面积浓度分布图和土壤侵蚀速率图可知,上坡土壤侵蚀最强烈,相应有机碳含量(图 4a)和团聚体有机碳含量均较低(表 2),随土壤侵蚀程度的减弱,无论是土壤有机碳还是团聚体有机碳储量从上坡至下坡呈上升趋势。由此可以看出,不同坡位土壤侵蚀的变化是造成土壤有机碳与团聚体有机碳变化的主要原因之一。侵蚀坡耕地不同坡位土壤有机碳含量与¹³⁷Cs 含量达极显著线性相关, $R^2 = 0.974, P = 0.00175$ (图 5),其斜率为 0.002,表

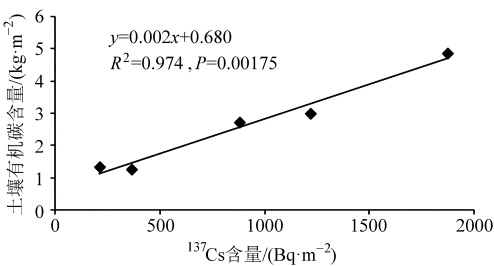


图 5 土壤有机碳含量与¹³⁷Cs 含量相关性

Fig.5 Relationship between soil organic carbon content and ¹³⁷Cs inventory of slope farmland

明土壤中¹³⁷Cs 含量每增加 1 Bq/m²,坡耕地每平方米土壤有机碳将增加 0.002 kg。将各粒级团聚体碳含量与土壤中¹³⁷Cs 含量进行相关分析,分析结果见图 6,表明大于 2 000 μm ($R^2 = 0.971$)、250 ~ 2 000 μm ($R^2 = 0.968$)、53 ~ 250 μm ($R^2 = 0.976$) 和 0 ~ 53 μm ($R^2 = 0.970$) 的团聚体中有机碳含量与¹³⁷Cs 含量均达到极显著线性正相关关系($P < 0.01$),其直线斜率分别为 0.002、0.002、0.001、0.002,表明当土壤中¹³⁷Cs 含量每增加 1 Bq/m²,坡耕地土壤中各粒级团聚体有机碳将增加 0.002、0.002、0.001、0.002 kg/m²。该结果与以前研究类似,表明引起坡耕地土壤侵蚀的动力因素并非只有降雨所产生的径流(水蚀),农事耕作(耕作侵蚀)所导致的土壤位移也不可忽略^[20-22]。由于该区多为山地,当地农民习惯利用锄头耕地,为了省力和方便,农民通常顺坡方向耕作;同时,该区主要以烟草连作或轮作为主,由于烟草忌涝,烟农习惯顺坡起垄种植烟草以便排水;特殊的耕作方式和种植结构容易导致上坡松散的肥沃土壤向下坡方向移动,相应地有机碳在坡上部损

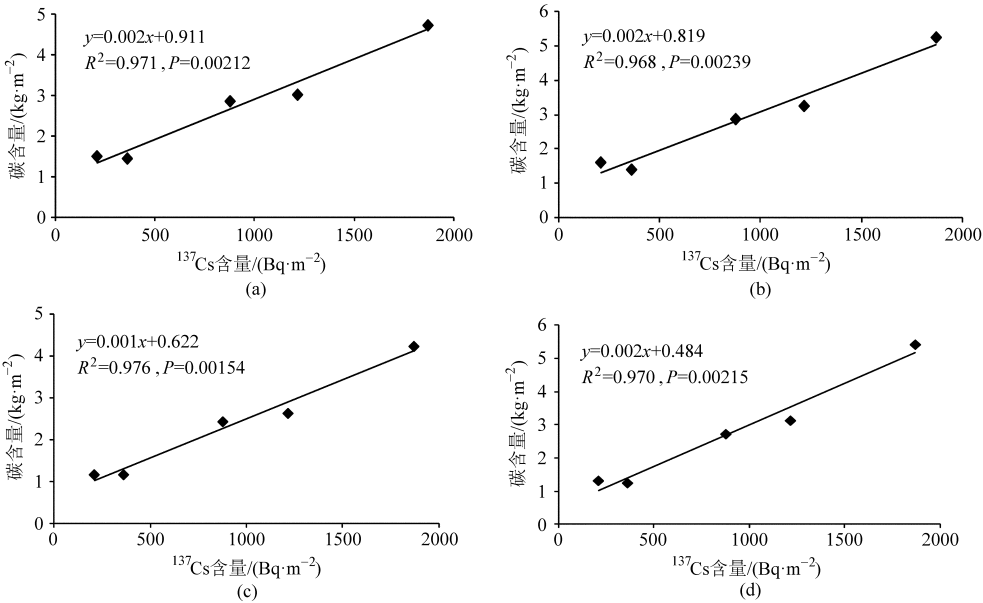


图 6 土壤团聚体有机碳含量与¹³⁷Cs 含量相关性

Fig.6 Relationship between organic carbon content in aggregate and ¹³⁷Cs inventory of slope farmland

(a) 大于 2 000 μm 土壤团聚体 (b) 250 ~ 2 000 μm 土壤团聚体 (c) 53 ~ 250 μm 土壤团聚体 (d) 0 ~ 53 μm 土壤团聚体

失,在坡中下部堆积。由于耕作方式和种植烟草的双重作用造成坡面发生严重侵蚀,从而显著影响了土壤团聚体碳的空间分布。

3 结论

(1)坡耕地上坡土壤¹³⁷Cs 含量远远低于背景值(即土壤损失严重),下坡¹³⁷Cs 含量明显高于背景值(即土壤相对沉积或净堆积);坡耕地上坡土壤大于 2 000 μm、250 ~ 2 000 μm 和 53 ~ 250 μm 的团聚体含量显著低于下坡,而小于 53 μm 的团聚体含量则相反,说明土壤侵蚀倾向于破坏大团聚体,相应地增

加微团聚体的比例。团聚体平均重量直径(MWD)也表现出下坡显著高于上坡。表明侵蚀区土壤团聚体结构主要以微团聚体为主,沉积区以大团聚体为主。

(2)土壤大团聚体被破坏后,包裹在大团聚体内的有机物随土壤流失而沿坡迁移,造成土壤总有机碳与各粒级团聚体有机碳含量和储量从上坡到下坡呈现出逐渐增加的趋势,上坡土壤肥力退化严重。因此,川北山区坡耕地上作物施肥管理应考虑土壤质量的空间分布特征。

参 考 文 献

- 1 Pan G, Smith P, Pan W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 129(1-3):344-348.
- 2 Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, 304: 1623-1627.
- 3 Lu S G. Role of organic matter in formation and stability of aggregates in mulberry plantation soils [J]. Pedosphere, 2011, 11(2): 185-188.
- 4 花可可,朱波,杨小林.等.长期施肥对紫色土旱坡地团聚体与有机碳组分的影响[J].农业机械学报,2014,45(10):167-174.
Hua Keke, Zhu Bo, Yang Xiaolin, et al. Effects of long-term different fertilization on soil aggregates and organic carbon fractions on sloping upland of purple soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):167-174. (in Chinese)
- 5 窦森,李凯,关松.土壤团聚体中有机质研究进展[J].土壤学报,2011,48(2):412-418.
Dou Sen, Li Kai, Guan Song. A review on organic matter in soil aggregates [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(2): 412-418. (in Chinese)
- 6 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.
- 7 Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14):2099-2103.
- 8 彭新华,张斌,赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J].土壤学报,2004,41(4):618-623.
Peng Xinhua, Zhang Bin, Zhao Qiguo. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618-623. (in Chinese)
- 9 方华军,杨学明,张晓平,等.东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J].生态学报,2006, 26(9):2847-2854.
Fang Huajun, Yang Xueming, Zhang Xiaoping, et al. Spatial distribution of particulate organic carbon and aggregate associated carbon in topsoil of a sloping farmland in the Black Soil Region, Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9):2847-2854. (in Chinese)
- 10 李鉴霖,江长胜,郝庆菊.土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2014,35(12):4695-4704.
Li Jianlin, Jiang Changsheng, Hao Qingju. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun Mountain [J]. Environmental Science, 2014, 35(12):4695-4704. (in Chinese)
- 11 唐晓红,魏朝富,吕家格,等.保护性耕作对丘陵区水稻土团聚体稳定性的影响[J].农业工程学报,2009,25(11):49-54.
Tang Xiaohong, Wei Chaofu, Lü Jiake, et al. Effects of conservation tillage on aggregate stability of paddy soil in hilly region [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11):49-54. (in Chinese)
- 12 王亮,孙向阳,刘克锋.不同施肥条件下微生物对棕壤团聚体和碳分布的影响[J].农业机械学报,2012,43(3):57-61.
Wang Liang, Sun Xiangyang, Liu Kefeng. Effect of microbial on carbon distribution in brown soil aggregates under different fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3):57-61. (in Chinese)
- 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 CSAE, 2009, 25(5):54-60. (in Chinese)
- 14 Du Z L, Wu W L, Zhang Q Z, et al. Long-term manure amendments enhance soil aggregation and carbon saturation of stable pools in North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(10):2276-2285.
- 15 解丽娟,王伯仁,徐明岗,等.长期不同施肥下黑土与灰漠土有机碳储量的变化[J].植物营养与肥料学报,2012,18(1):98-105.

- Xie Lijuan, Wang Boren, Xu Minggang, et al. Changes of soil organic carbon storage under long-term fertilization in black and grey-desert soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1):98–105. (in Chinese)
- 16 李富程. 土壤侵蚀作用下不同坡位碳氮磷深度成层性研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013.
Li Fucheng. Depth-stratigraphy of SOC, N, P at landscape positions under soil redistribution by tillage and water erosion [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- 17 周振方,胡雅杰,马灿,等. 长期传统耕作对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. *干旱地区农业研究*,2012,30(6):145–151.
Zhou Zhenfang, Hu Yajie, Ma Can, et al. Effects of long-term conventional cultivation on stability and distributions of organic carbon in soil aggregates [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(6):145–151. (in Chinese)
- 18 Zhang J H, Quine T A, Ni S J, et al. Stocks and dynamics of SOC in relation to soil redistribution by water and tillage erosion [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(10):1834–1841.
- 19 郭志民. 土壤侵蚀与恢复重建对土壤性质的影响[J]. *福建水土保持*, 1999, 11(2):49–51.
Guo Zhimin. Effects of soil erosion and reconstruction on soil properties [J]. *Fujian Soil and Water Conservation*, 1999, 11(2):49–51. (in Chinese)
- 20 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 CSAE*, 2007, 23(1):272–278. (in Chinese)
- 21 Zhang J H, Wang Y, Zhang Z H. Effect of terrace forms on water and tillage erosion on a hilly landscape in the Yangtze River Basin, China [J]. *Geomorphology*, 2014, 216:114–124.
- 22 Li F C, Zhang J H, Su Z A. Changes in SOC and nutrients under intensive tillage in two types of slope landscapes [J]. *Journal Mountain Science*, 2012, 9(1):67–76.
- 23 Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by ^{13}C natural abundance [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(3):801–807.
- 24 Six J, Paustain K, Elliot E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2):681–689.
- ~~~~~

(上接第 120 页)

- 28 Haboudane D, Miller J R, Pattey E, et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(3):337–352.
- 29 Metternicht G. Vegetation indices derived from high-resolution airborne videography for precision crop management [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(14):2855–2877.
- 30 Dash J, Curran P J. Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI) [J]. *Advances in Space Research*, 2007, 39(1):100–104.
- 31 Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 35(2):161–173.
- 32 Durbha S S, King R L, Younan N H. Support vector machines regression for retrieval of leaf area index from multiangle imaging spectroradiometer[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 107(1–2):348–361.
- 33 Wold S. PLS for multivariate linear modeling [M] // van de Waterbeemd. *Chemometric Methods in Molecular Designed*. Weinheim, Germany: Verlag-Chemie, 1995:195–218.
- 34 金秀良,徐新刚,李振海,等. 基于新型植被指数对冬小麦蛋白质含量的估算研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(9):2541–2545.
Jin Xiuliang, Xu Xingang, Li Zhenhai, et al. Estimation of winter wheat protein content based on new indexes[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(9):2541–2545. (in Chinese)
- 35 孙华,鞠洪波,张怀清,等. 偏最小二乘回归在 Hyperion 影像叶面积指数反演中的应用[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(7):44–52.
Sun Hua, Ju Hongbo, Zhang Huaiqing, et al. Partial least squares regression application in LAI inversion using Hypersion data [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(7):44–52. (in Chinese)
- 36 李振海,徐新刚,金秀良,等. 基于氮素运转原理和 GRA-PLS 算法的冬小麦籽粒蛋白质含量遥感预测[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(19):3780–3790.
Li Zhenhai, Xu Xingang, Jin Xiuliang, et al. Remote sensing prediction of winter wheat protein content based on nitrogen translocation and GRA-PLS method[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(19):3780–3790. (in Chinese)
- 37 谭昌伟,王纪华,黄文江,等. 基于 TM 和 PLS 的冬小麦籽粒蛋白质含量预测[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3):388–392.
Tan Changwei, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. Predicting grain protein content in winter wheat based on TM images and partial least squares regression[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3):388–392. (in Chinese)