

# 藏东南区梯田和复合坡耕地土壤侵蚀对 有机碳和全氮空间分布格局的影响

王丽娟<sup>1,2</sup>, 苏正安<sup>1</sup>, 周涛<sup>1,2</sup>, 张广兴<sup>3</sup>, 王俊杰<sup>1,2</sup>, 刘翊涵<sup>1,4</sup>, 伍佐<sup>1,5</sup>

(1.中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所 山地表生过程与生态调控重点实验室, 四川 成都 610041; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.四川兴景水利工程设计有限公司, 四川 成都 610041; 4.四川师范大学 地理与资源科学学院, 四川 成都 610101; 5.四川农业大学 水利水电学院, 四川 雅安 625014)

**摘要:** [目的] 查明青藏高原东南部地区坡耕地土壤侵蚀空间分布格局及其对土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)顺坡迁移过程的影响,为该区土地资源利用及土壤资源保护提供科学依据。[方法] 利用<sup>137</sup>Cs核素示踪技术,结合现场调查,研究藏东南地区梯田系列和复合坡耕地土壤侵蚀空间分布格局差异;采用相关分析,探明坡面土壤<sup>137</sup>Cs面积浓度与同样深度(30 cm)SOC、TN面积浓度之间的相关性。[结果] ①在整个梯田系列内,土壤<sup>137</sup>Cs面积浓度从坡顶到坡脚呈离散分布格局,上部梯田下坡部位土壤<sup>137</sup>Cs面积浓度明显高于紧邻的下部梯田上坡土壤,且上坡梯田表现为土壤侵蚀,而下坡和坡脚梯田则表现为土壤沉积;在单个梯田景观内,土壤侵蚀速率主要呈上部坡位高,下部坡位低的趋势;②复合坡耕地土壤侵蚀速率表现为先波动减少,然后逐渐增加的趋势,即坡顶部位土壤侵蚀速率相对较高,顺坡向下逐渐变小,在坡中部和下部表现为沉积,在坡脚部位土壤侵蚀速率又逐渐增加;③梯田系列和坡耕地土壤<sup>137</sup>Cs面积浓度与SOC、TN面积浓度之间均具有显著的相关关系( $p < 0.05$ )。[结论] 在藏东南地区,梯田有效地改变了该区的土壤侵蚀空间分布格局,土壤<sup>137</sup>Cs示踪技术可以较好地示踪该区坡耕地土壤、SOC和TN顺坡迁移和空间再分布状况,防控耕作侵蚀的危害也应当得到与水蚀同样的重视。

**关键词:** 土壤侵蚀; <sup>137</sup>Cs示踪; 土壤有机碳; 全氮; 青藏高原东南部

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0293-08

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 王丽娟, 苏正安, 周涛, 等. 藏东南区梯田和复合坡耕地土壤侵蚀对有机碳和全氮空间分布格局的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 293-300. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.036; Wang Lijuan, Su Zhengnan, Zhou Tao, et al. Impacts of soil erosion on spatial patterns of soil organic carbon and total nitrogen in terraced fields and complex sloping land of Southeast Tibet [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 293-300.

## Impacts of Soil Erosion on Spatial Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen in Terraced Fields and Complex Sloping Land of Southeast Tibet

Wang Lijuan<sup>1,2</sup>, Su Zhengnan<sup>1</sup>, Zhou Tao<sup>1,2</sup>, Zhang Guangxing<sup>3</sup>, Wang Junjie<sup>1,2</sup>, Liu Yihan<sup>1,4</sup>, Wu Zuo<sup>1,5</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation,

Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu,

Sichuan 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Sichuan Xingjing Engineering Design & Consulting Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610041, China;

4. College of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610100, China;

5. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

**Abstract:** [Objective] The impacts of soil erosion on the spatial distribution of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) in the sloping farmland of the Southeast Tibet Plateau were determined in order to provide a scientific basis for land resource utilization and soil resource conservation. [Methods] Spatial patterns

收稿日期: 2022-02-16

修回日期: 2022-04-21

资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0307); 国家自然科学基金项目“水蚀和耕作侵蚀交互作用对紫色土坡耕地微地貌变化的影响”(41401313); 国家重点研发计划“金沙江干热河谷坝区生态综合治理及农业产业发展技术试验示范”(2017YFC0505102)联合资助。

第一作者: 王丽娟(1998—), 女(汉族), 山西省忻州市人, 硕士, 研究方向为土壤侵蚀和水土保持。Email: wanglijuan20@mails.ucas.ac.cn。

通信作者: 苏正安(1980—), 男(汉族), 四川省江油市人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。Email: suzhengan@imde.ac.cn。

of soil erosion were investigated using the  $^{137}\text{Cs}$  tracer method combined with field investigation. Correlations between  $^{137}\text{Cs}$  inventories and inventories of SOC and TN were determined using correlation analysis. [Results] For the terraced toposequence, discrete patterns of  $^{137}\text{Cs}$  inventories were found, and an abrupt increase in  $^{137}\text{Cs}$  inventories was observed between lower slope positions of the upper terrace and the upper slope position of an adjacent lower terrace. A fluctuating increasing trend in  $^{137}\text{Cs}$  inventories was observed from the upper terrace to the lower terrace. A gradual increasing trend in  $^{137}\text{Cs}$  inventories appeared within a terrace, indicating that soil loss occurred at the upper slope positions and soil deposition appeared at the lower slope positions. For sloping farmland, increasing and decreasing trends in  $^{137}\text{Cs}$  inventories appeared along the slope transects, accompanied by decreasing and increasing trends in the soil erosion rate. Low  $^{137}\text{Cs}$  inventories were observed at the summit and toe slope positions of sloping farmland, and the highest  $^{137}\text{Cs}$  inventories were found at the middle slope positions. ③ Inventories of SOC and TN showed similar spatial patterns to those observed for  $^{137}\text{Cs}$  inventories, and a linear relationship was found between  $^{137}\text{Cs}$  inventories and SOC and TN inventories ( $p < 0.05$ ). [Conclusion] Soil erosion was one of the most important driving forces affecting SOC and TN transport along a slope transect. Overall, the spatial patterns of  $^{137}\text{Cs}$  can be used to trace spatial patterns of SOC and TN in the sloping farmland of the Southeast Tibet Plateau. The  $^{137}\text{Cs}$  tracing method was a useful tool to elucidate the redistribution and migration of soil and nutrients on a slope. Furthermore, tillage erosion should be given the same attention as water erosion in order to prevent and control soil erosion in this area.

**Keywords:** soil erosion;  $^{137}\text{Cs}$  tracer; soil organic carbon (SOC); total nitrogen (TN); Southeast Tibet Plateau

藏东南地区(主要指四川省西部、西藏自治区东部和云南省西北部)作为怒江、雅鲁藏布江、长江的重要水源涵养区,也是云南省、四川省和东南亚很多国家的生态屏障,同时属于中国少数民族(藏、羌族)的聚居区,该区域的生态安全和可持续发展对于中国西南地区的稳定和发展具有十分重要的意义<sup>[1-2]</sup>。与此同时,由于该区特殊的地质地貌条件及垂直地带性气候变化,使得该区土壤侵蚀类型复杂多样,并成为中国重要的生态脆弱区之一<sup>[3]</sup>。

在坡耕地景观内,叠加了人类活动的土壤侵蚀过程不仅会导致坡地土壤发生顺坡迁移,而且会进一步引起土壤有机碳(SOC)和养分(氮、磷、钾等)的流失,从而导致坡地土壤退化,威胁区域生态环境安全和粮食安全<sup>[4-6]</sup>。目前,在藏东南地区,土壤侵蚀空间分布格局及其对 SOC 和 TN 顺坡迁移过程的影响机制研究尚处于空白状态。因此,科学评估藏东南地区坡耕地土壤侵蚀的空间分布格局,探明土壤侵蚀对 SOC 和 TN 顺坡迁移的影响机制,有利于该区的生态安全以及可持续发展,具有重要科学意义和现实意义。

目前,研究土壤侵蚀的方法主要有遥感法、模型法、径流小区法、水文站法、核素示踪技术等<sup>[7]</sup>。 $^{137}\text{Cs}$  示踪技术是核素示踪技术中较为成熟的一种方法,具有量化程度高、简便、快速、准确,适应各种地形,省时省力等优点<sup>[8]</sup>。目前, $^{137}\text{Cs}$  核素示踪技术的研究理论较为成熟,已经在北美<sup>[9]</sup>、西欧<sup>[10-11]</sup>、亚洲<sup>[12]</sup>、非洲<sup>[13]</sup>和大洋洲等<sup>[14]</sup>地区得到了一定程度的应用,取

得了大量的成果。前人研究发现, $^{137}\text{Cs}$  不仅能够被用于定量估算土壤侵蚀速率,而且能够较好地表征坡地 SOC 和 TN 的空间分布格局<sup>[15-16]</sup>。Ritchie 等<sup>[17]</sup>在美国北部一个小流域的研究表明,土壤 $^{137}\text{Cs}$  含量和土壤碳的含量显著相关,土壤沉积发生部位土壤碳的含量明显高于土壤侵蚀部位。朱茜等<sup>[18]</sup>利用 $^{137}\text{Cs}$  核素示踪技术对苏南丘陵不同土地利用类型的土壤侵蚀及其对土壤养分的影响研究发现,在竹林、茶园、林地中 $^{137}\text{Cs}$  均与 SOC 呈现显著的正相关,土壤侵蚀对 SOC, TP, TN 的分布均会产生不同的影响。王永平等<sup>[16]</sup>利用 $^{137}\text{Cs}$  示踪技术对滇池西南部东大河小流域的不同土地利用类型土壤侵蚀量及其与土壤总有机碳、总氮、总磷流失量之间的关系进行研究分析发现,不同土地利用方式下土壤侵蚀对土壤养分的空间分布和流失均具有显著影响。目前,由于藏东南区地理环境的特殊性及其复杂性,针对该区的土壤侵蚀原位监测和实地调查研究相对较少,该区坡耕地土壤侵蚀对 SOC 和 TN 顺坡迁移的影响机制尚不清楚,亟需开展精细化、量化的研究。

为此,采用 $^{137}\text{Cs}$  核素示踪技术,研究了藏东南区一处典型长复合坡耕地和一个梯田系列的 $^{137}\text{Cs}$ 、SOC 和 TN 的空间分布格局,以期查明该区坡耕地土壤侵蚀对 SOC 和 TN 空间分布格局的影响,从而为该区水土流失防治策略和土地利用规划制定提供科学依据。

## 1 研究区概况

长复合坡耕地(94°23′32″E, 29°38′25″N)位于西藏自治区林芝市巴宜区, 梯田系列(98°34′19″E, 29°36′42″N)位于昌都市芒康县, 分别代表了这两个区域较为典型的农耕地地貌类型(图1)。林芝市巴宜区位于雅鲁藏布江中下游, 地势北高南低, 海拔差异较大, 属于热带湿润半湿润季风气候, 年均气温8.5℃, 年均降雨量接近654 mm, 降雨量时间上分布不均衡, 年际、年内变率较大, 降雨主要集中在5—9月, 约占总降雨量的90%, 其中6—8月约占全年的60%。巴宜区土壤类型具有显著的垂直地带性, 主要土壤类型有冲积土、棕壤、暗棕壤、高山草甸土、高山寒漠土等, 本研究中复合坡耕地土壤类型为高山草甸土, 土壤容重1.22~1.58 g/cm<sup>3</sup>。该区植被类型也具有显著的垂直地带性, 植被主要有云杉(*Picea asperata*)、冷杉(*Abies fabri*)、高山栎(*Quercus semicarpifolia*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、早熟禾(*Poa annua*)等。芒康县位于金沙江流域, 是典型的高山峡谷区, 气候类型为高原温带半湿润季风型气候, 年均气温10℃, 年均降水量350~450 mm, 年内分布不均衡, 主要集中在6—9月。芒康县的土壤和植被类型也具有显著的垂直地带性。主要的土壤类型为褐土、棕壤、暗棕壤、高山草甸土、高山草原土和高山寒漠土等, 本研究中梯田系列土壤类型为高山草甸土, 土壤容重1.38~1.48 g/cm<sup>3</sup>。植被主要有云杉、高山松(*Pinus densata*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)等。研究区主要种植作物为青稞、小麦和马铃薯, 耕作方式均为常规耕作方式, 且按区域和时段进行, 即采用模板犁和锄耕犁。

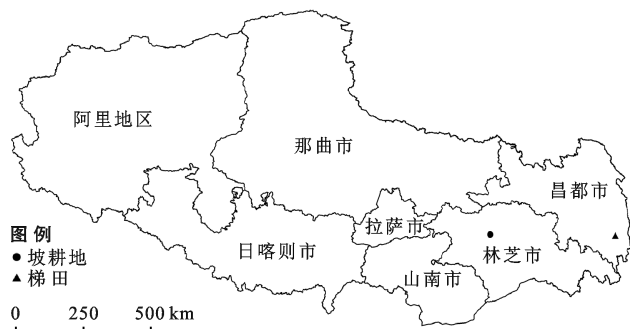


图1 藏东南区梯田和复合坡耕地研究位置

## 2 研究方法

### 2.1 样点选取及样品采集

2019年9月在林芝市巴宜区和芒康县分别选择

了具有典型性和代表性的一块长复合坡耕地和一个梯田系列(图2)进行土样采集。坡耕地样地为上部的凸形坡和下部的凹形坡组成的复合坡耕地, 平均坡度为18.34%, 坡长110 m, 土壤质地为砂质壤土(砂粒59.29%~66.77%, 粉粒31.31%~39.20%, 黏粒1.29%~1.92%); 梯田系列为坡式梯田, 有田埂, 平均坡度为32.30%, 坡长为150 m, 土壤质地为粉质壤土和黏质壤土(砂粒30.18%~51.48%, 粉粒43.48%~51.00%, 黏粒4.02%~26.34%)。



图2 藏东南区梯田采样点景观

采用双剖面线法, 沿坡地纵断面线从坡顶至坡脚, 进行土壤样品采集。土壤采样仪器为直径8 cm的剖面取样器, 将取样筒垂直打入地面获取剖面全样, 并按照发生层进行分层采集。基本上每个剖面样品按照耕作深度分为耕层(0—15 cm)和犁底层(16—30 cm)两层。坡耕地坡长为110 m, 每隔10 m布设一个采样点, 共12个采样点, 每个坡位采集2个重复样, 按照发生层将两个重复样品进行混合, 得到两个混合样品, 共得到24个土样样品。梯田系列内共有四阶梯田, 总长度150 m, 根据每个坡段的坡长, 沿梯田样带每隔约7~15 m采集土壤样品, 每个坡位采集2个重复样, 同样按照发生层进行分层采样, 共采集土样24个。

### 2.2 样品处理与分析

将土壤样品置于风干室, 自然风干后, 去除其中较大的砾石、植物根系等, 然后按照不同的分析要求进行研磨、过筛(2.00 mm)、充分混匀、称重后装入样品瓶待测。

采用高纯锗 $\gamma$ 谱仪进行<sup>137</sup>Cs放射性活度的测量。测试仪器为美国堪培拉(CANBERRA)公司高纯锗(HPGe)探头多道 $\gamma$ 能谱仪, 经前置放大和数字转换之后, 接多道分析仪, 测试结果的相对误差小于5%。土壤有机碳用重铬酸钾法测定, 全氮分析采用

微量凯氏定氮法<sup>[19]</sup>。土壤容重使用烘干重量和样品体积来确定。

### 2.3 数据分析

本文采用 Microsoft Excel 2019 软件进行<sup>137</sup>Cs 面积浓度统计分析和土壤侵蚀速率的计算,利用 SigmaPlot10.0 绘制<sup>137</sup>Cs 面积浓度、土壤侵蚀速率、SOC 及 TN 的空间分布图并分析<sup>137</sup>Cs 面积浓度与 SOC, TN 面积浓度之间的相关关系。

### 2.4 土壤侵蚀速率估算模型

采用比例模型估算土壤侵蚀速率。比例模型假设<sup>137</sup>Cs 的沉降在研究区及其耕作层内分布是均匀的,因此土壤侵蚀量与<sup>137</sup>Cs 的流失量成正比。因其形式简单,参数较少,而被国内外众多学者使用<sup>[20-21]</sup>。模型表达式:

$$Y = \frac{BdX}{10(t-1963)} \quad (1)$$

$$X = (A_0 - A) / A_0 \times 100 \quad (2)$$

式中:  $B$  为土壤容重( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $d$  为耕作层深度( $\text{m}$ );  $A$  为所测样点的<sup>137</sup>Cs 面积浓度( $\text{Bq}/\text{m}^2$ );  $t$  为采样年份;  $A_0$  为<sup>137</sup>Cs 背景值( $\text{Bq}/\text{m}^2$ )。文安邦等<sup>[22]</sup>2000 年测得雅鲁藏布江中游扎囊县的<sup>137</sup>Cs 背景值为  $1114 \text{ Bq}/\text{m}^2$ , 拉萨市的<sup>137</sup>Cs 背景值为  $1055.5 \text{ Bq}/\text{m}^2$ , 取两地的均值为  $1084.75 \text{ Bq}/\text{m}^2$ , 通过放射性衰变常数(0.977)校正, 2019 年为  $697.15 \text{ Bq}/\text{m}^2$ , 因此, 将  $697.15 \text{ Bq}/\text{m}^2$  作为本文的<sup>137</sup>Cs 背景值;  $Y$  为年平均土壤侵蚀速率 [ $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ];  $X$  为<sup>137</sup>Cs 侵蚀百分比。

## 3 结果与分析

### 3.1 <sup>137</sup>Cs 和土壤侵蚀速率的空间分布特征

从表 1 和图 3 可知, 在整个梯田系列中,<sup>137</sup>Cs 面积浓度介于  $80.21 \sim 1337.74 \text{ Bq}/\text{m}^2$  之间, 均值为  $(642.69 \pm 455.55) \text{ Bq}/\text{m}^2$ , 空间变异系数为 71%。土壤<sup>137</sup>Cs 面积浓度在整个梯田系列中呈离散型分布, 并且从上部梯田到下部梯田具有波动增加

趋势。土壤侵蚀速率的变化范围为  $-63.23 \sim 70.42 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 均值为  $(7.34 \pm 46.27) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 按照《土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007》, 土壤侵蚀达到轻度侵蚀标准。在整个梯田系列中, 土壤侵蚀速率的空间分布总体上较为离散, 并从上部梯田到下部梯田具有波动减小的趋势, 甚至在第 3, 第 4 阶梯田内出现明显的土壤沉积现象(图 4)。在单个梯田景观内, 位置较高的三阶梯田的上坡部位的<sup>137</sup>Cs 面积浓度明显低于下坡部位, 表现为上坡部位土壤侵蚀速率高, 下坡部位土壤侵蚀速率相对较低; 最底部梯田内土壤侵蚀速率均表现为沉积。此外, 相邻两阶梯田之间<sup>137</sup>Cs 面积浓度的变化较大, 表现为上一阶梯田的下坡位置的<sup>137</sup>Cs 面积浓度显著高于下一阶梯田的上坡位置, 即梯田地埂可以有效隔断整个坡面的泥沙输移过程和泥沙连通性, 从而使得梯田土壤<sup>137</sup>Cs 面积浓度和土壤侵蚀速率的空间分布格局表现为离散型。

在复合坡耕地景观内, <sup>137</sup>Cs 面积浓度呈先波动增加后波动减少的趋势(图 3)。<sup>137</sup>Cs 面积浓度介于  $350.04 \sim 1024.73 \text{ Bq}/\text{m}^2$  之间, 均值为  $(657.02 \pm 208.79) \text{ Bq}/\text{m}^2$ , 空间变异系数为 32%。土壤侵蚀速率的变化范围介于  $-33.63 \sim 39.54 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  之间, 均值为  $(4.13 \pm 21.84) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。从表 2, 图 3b 和 4b 可知, 在坡顶(0—5 m)部位, 土壤<sup>137</sup>Cs 面积浓度较低, 土壤侵蚀速率达到  $32.40 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 为整个坡面侵蚀最严重部位; 在坡上部(5—45 m), <sup>137</sup>Cs 的面积浓度逐渐增加, 土壤侵蚀速率明显减少为  $1.54 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ; 在坡中部(45—65 m), <sup>137</sup>Cs 面积浓度增加到最高值, 土壤侵蚀速率为负值, 以沉积为主; 在坡下部(65—85 m), <sup>137</sup>Cs 面积浓度对比坡中部有所降低, 但仍表现为土壤沉积; 在坡脚(85—110 m)处, 由于坡面长和坡面汇流作用, <sup>137</sup>Cs 面积浓度相对较低, 土壤侵蚀速率达到  $24.01 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 按照《土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007》, 土壤侵蚀达到了轻度侵蚀标准。

表 1 藏东南区梯田系列不同坡位的<sup>137</sup>Cs, 土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)面积浓度

项目	坡顶	坡上部	坡中部	坡下部	坡脚
坡长/m	0~40	40~70	70~110	110~130	130~150
<sup>137</sup> Cs 面积浓度/ $(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2})$	129.50	539.57	538.89	1058.95	1255.01
土壤侵蚀速率/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	61.85	15.76	15.44	-34.67	-52.98
SOC 面积浓度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	3.22	6.93	6.05	8.21	9.21
TN 面积浓度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	0.40	0.70	0.63	0.81	0.98

注: 每个坡段的参数值为该坡段每个样点参数值的均值。

表2 藏东南区坡耕地不同坡位的<sup>137</sup>Cs,土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)面积浓度

项目	坡顶	坡上部	坡中部	坡下部	坡脚
坡长/m	0~5	5~45	45~65	65~85	85~110
<sup>137</sup> Cs 面积浓度/(Bq·m <sup>-2</sup> )	396.63	679.62	992.68	699.99	461.26
土壤侵蚀速率/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	32.40	1.54	-30.19	-0.30	24.01
SOC 面积浓度/(kg·m <sup>-2</sup> )	2.62	2.80	3.21	3.04	2.30
TN 面积浓度/(kg·m <sup>-2</sup> )	0.31	0.30	0.32	0.30	0.22

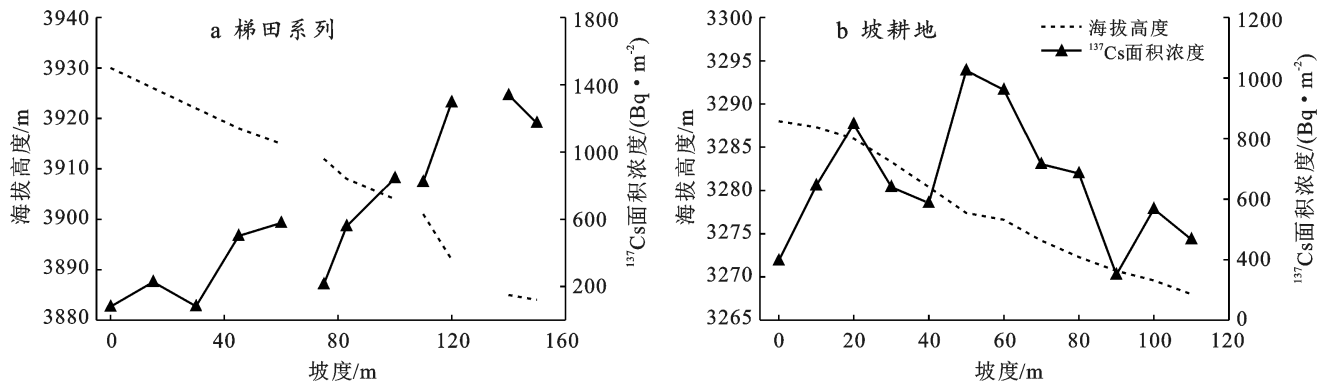
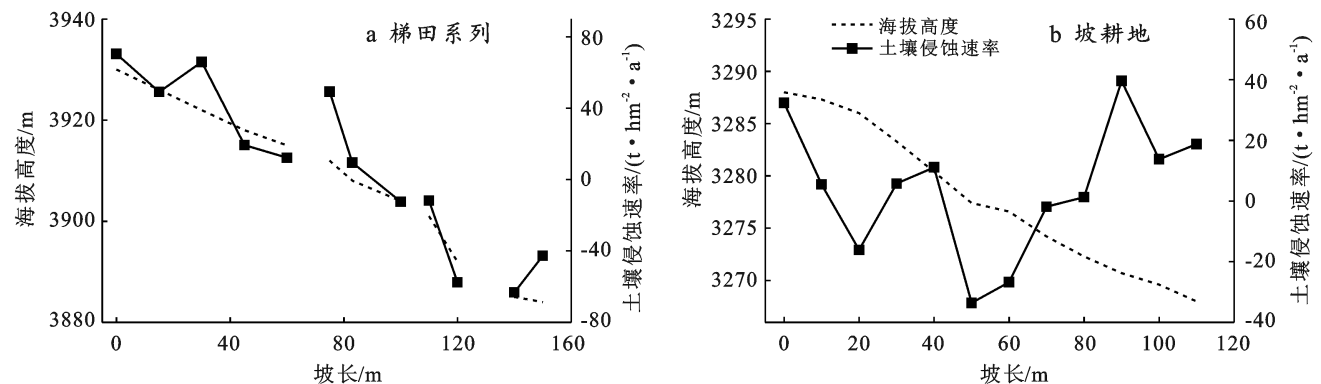
图3 藏东南区梯田系列和坡耕地的土壤<sup>137</sup>Cs的空间变化

图4 藏东南区梯田系列和坡耕地的土壤侵蚀速率的空间变化

### 3.2 土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)的空间分布特征

从图5a可知,整个梯田系列中,SOC和TN面积浓度从坡顶到坡脚仍然呈离散分布,但从上部梯田到下部梯田具有波动增加的趋势。在梯田系列内,SOC面积浓度介于1.93~9.45 kg/m<sup>2</sup>之间,均值为(6.37±2.32) kg/m<sup>2</sup>。土壤TN面积浓度介于0.28~0.99 kg/m<sup>2</sup>,均值为(0.67±0.21) kg/m<sup>2</sup>。在单个梯田景观内,SOC和TN面积浓度均表现为从上坡位置到下坡位置逐渐增加的趋势。SOC和TN二者之间具有显著的相关性( $R^2=0.99, p=0.01$ ),且二者与<sup>137</sup>Cs空间分布格局相似。从图5b可知,在坡耕地景观内,随坡长增加,SOC和TN面积浓度呈先波动增加后波动减少的趋势。SOC面积浓度介于1.71~3.58 kg/m<sup>2</sup>之间,均值为(2.77±0.54) kg/m<sup>2</sup>,土壤TN面积浓度变化范围为0.14~0.37 kg/m<sup>2</sup>,均值为(0.28±0.06) kg/m<sup>2</sup>。SOC和TN二者之间具有显著的相

关性( $R^2=0.99, p=0.01$ )。在坡顶处,SOC和TN面积浓度相对较高,值得注意的是,<sup>137</sup>Cs面积浓度在坡顶处较低;坡脚处的SOC和TN面积浓度均较低,坡中部和坡下部SOC和TN面积浓度高,这与<sup>137</sup>Cs的分布较一致;在坡中部,SOC和TN面积浓度最高,<sup>137</sup>Cs面积浓度最高值出现在相同的坡位;坡脚处SOC和TN面积浓度最低,而<sup>137</sup>Cs面积浓度最小值出现在坡顶。

### 3.3 土壤侵蚀对土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)空间

从图6,图7可知,梯田系列和坡耕地景观中SOC和TN面积浓度均与<sup>137</sup>Cs面积浓度具有显著的正相关关系( $p<0.05, N=12$ )。在梯田系列中,<sup>137</sup>Cs面积浓度与SOC面积浓度的决定系数 $R^2=0.85, p<0.01$ ; <sup>137</sup>Cs面积浓度与TN面积浓度方程的决定系数 $R^2=0.87, p<0.01$ 。在坡耕地景观内,<sup>137</sup>Cs面积浓度与SOC面积浓度方程的决定系数 $R^2=0.50,$

$p < 0.01$ ;  $^{137}\text{Cs}$  面积浓度与 TN 面积浓度方程的决定系数  $R^2 = 0.38$ ,  $p < 0.05$ 。这表明  $^{137}\text{Cs}$  与 SOC 和 TN

在土壤中有非常相似的顺坡迁移过程,土壤侵蚀过程会显著改变 SOC 和 TN 的空间分布格局。

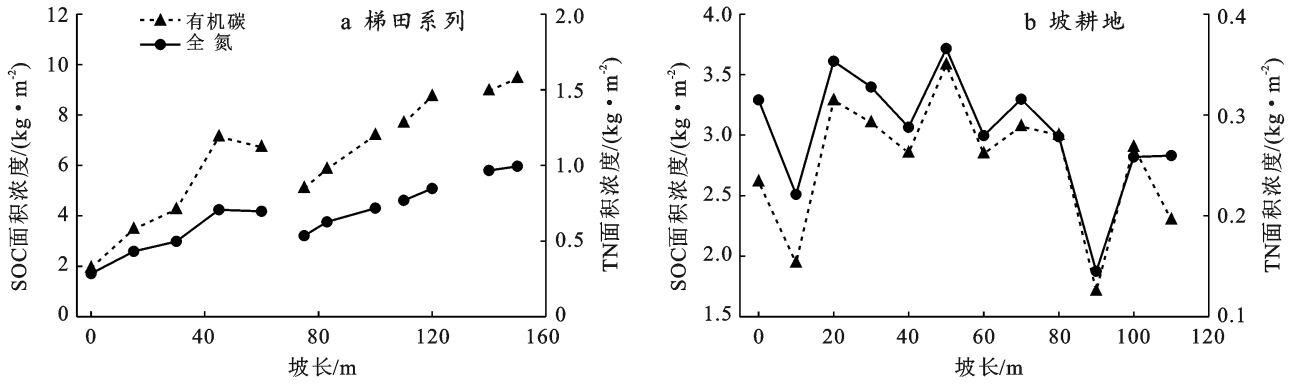


图 5 藏东南区梯田系列和坡耕地土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)的空间分布

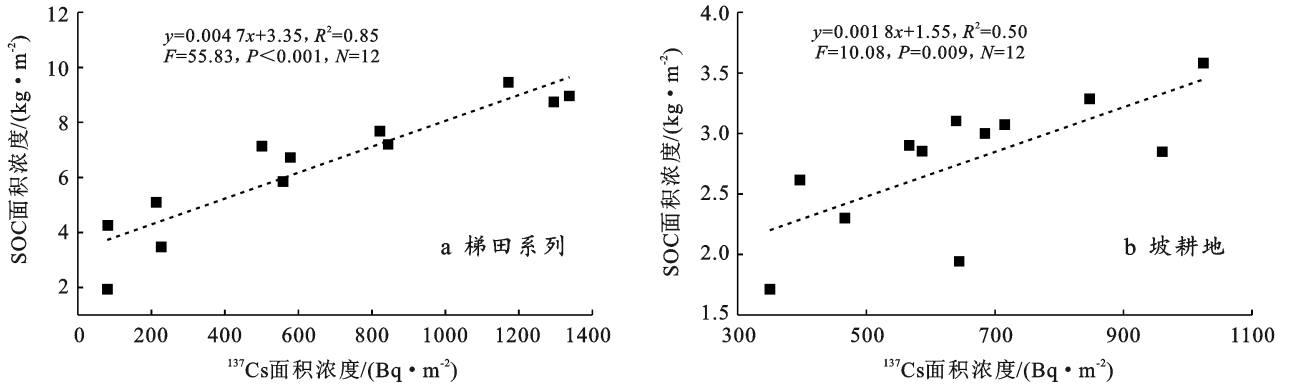


图 6 藏东南区梯田系列和坡耕地土壤  $^{137}\text{Cs}$  与土壤有机碳(SOC)面积浓度相关关系

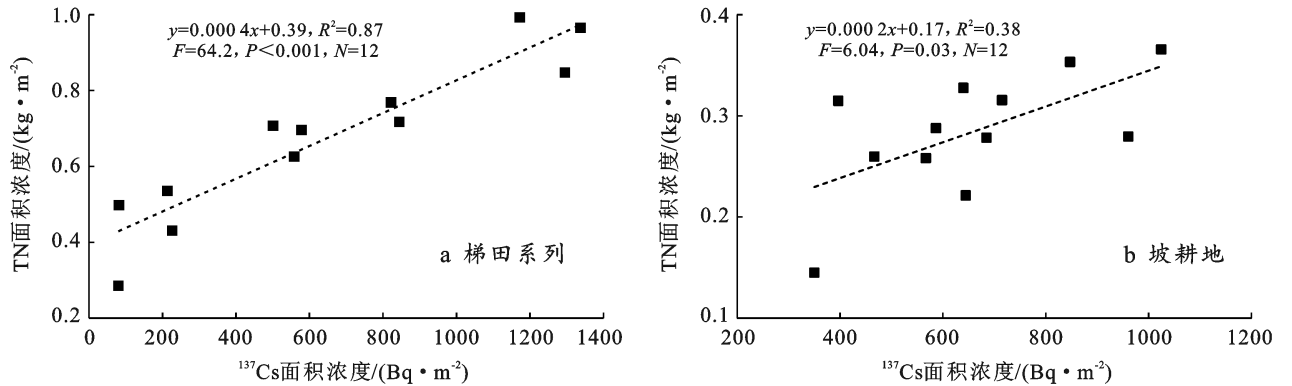


图 7 藏东南区梯田系列和坡耕地土壤  $^{137}\text{Cs}$  与全氮(TN)面积浓度相关关系

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

藏东南地区土壤侵蚀类型复杂,同时存在水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀、重力侵蚀、耕作侵蚀。通过实地调查发现,藏东南区坡耕地和梯田系列中重力侵蚀、冻融侵蚀现象不明显,而风蚀作用在地块尺度内空间分异性不显著,因此,坡耕地景观内土壤侵蚀空

间分布格局差异主要受水力侵蚀和耕作侵蚀双重作用驱动(表 3)。

表 3 藏东南区不同地形坡耕地土壤侵蚀特征

项目	长复合坡耕地	梯田系列
坡长/m	110	150
平均坡度/%	18.34	32.30
土壤侵蚀速率/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	$4.13 \pm 21.84$	$7.34 \pm 46.27$
SOC 面积浓度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$2.77 \pm 0.54$	$6.37 \pm 2.32$
TN 面积浓度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$0.28 \pm 0.06$	$0.67 \pm 0.21$

在水力侵蚀和耕作侵蚀综合作用下,不同地形坡地土壤 $^{137}\text{Cs}$ 空间分布和侵蚀格局明显不同。在梯田系列中,整个梯田系列的土壤侵蚀速率均值为 $(7.34\pm 46.27)\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ ,按照《土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007》,梯田景观的土壤侵蚀为轻度侵蚀。与此同时,梯田系列中上部梯田往往以侵蚀为主,而下部梯田以沉积为主,总体而言,净土壤侵蚀速率较低,这表明该区梯田能够很好地防治坡地水土流失,这与 Zhang 等<sup>[23]</sup>在川中丘陵区紫色土区的研究结果较为相似。同时,Su 等<sup>[24]</sup>对龙门山断裂带梯田系列土壤 $^{137}\text{Cs}$ 空间分布格局研究后发现,梯田系列中存在上部梯田侵蚀的泥沙均沉积在下部梯田这一现象。在单个梯田景观内,土壤 $^{137}\text{Cs}$ 面积浓度表现为上坡位置低,下坡位置高的特点,即相对而言,上坡处于侵蚀状态,而下坡处于相对沉积状态,这主要是耕作侵蚀主要发生在坡地上坡部位,并不断导致土壤向下部坡位迁移所致。Nie 等<sup>[25]</sup>通过研究四川盆地坡耕地土壤侵蚀空间分布格局得到过相似的研究结果,即耕作侵蚀在短而陡的坡耕地景观内起主导作用,导致陡而短的坡耕地坡顶部位侵蚀严重,土层深度逐渐变浅。在复合坡耕地景观内,土壤侵蚀主要发生在坡顶和坡度较大的坡脚位置,而土壤沉积主要发生在坡中和坡下位置。值得注意的是,复合坡耕地的坡顶部位土壤侵蚀较为严重,这与梯田景观内坡顶土壤侵蚀现象较为严重一致,均是由于耕作侵蚀导致坡顶发生土壤净流失,且缺乏土壤补充所致,这与葛方龙等<sup>[26]</sup>在川中丘陵区的的结果较为一致。相对而言,复合坡的坡脚部位土壤侵蚀较为严重则是由于该坡地坡面长度较长,坡面径流在该部位汇流,且缺乏地埂阻拦所致。这表明耕作侵蚀是藏东南区坡耕地景观内不容忽视的土壤侵蚀类型,主要发生在坡顶和上坡部位,并在短而陡的坡耕地上扮演主导侵蚀类型,而水蚀主要发生在长坡耕地景观内,并主要导致坡耕地中下坡和坡脚等径流汇流部位的土壤发生流失。

地形对坡耕地 SOC 和 TN 的空间分布格局也会产生显著的影响。在梯田系列中,SOC 面积浓度的均值为 $(6.37\pm 2.32)\text{ kg}/\text{m}^2$ ,TN 面积浓度均值为 $(0.67\pm 0.21)\text{ kg}/\text{m}^2$ ;复合坡耕地景观中 SOC 面积浓度均值为 $(2.77\pm 0.54)\text{ kg}/\text{m}^2$ ,TN 面积浓度均值为 $(0.28\pm 0.06)\text{ kg}/\text{m}^2$ 。梯田景观中的 SOC 和 TN 面积浓度明显高于坡耕地,但除地形因素外,影响 SOC 和 TN 浓度的因素还包括样地 SOC 值、TN 本底值、气候、农田管理措施(施肥、耕作)等,因此,这并不能证明梯田地形土壤碳库和氮库含量比坡耕地更高,土壤固碳能力更强。但可以肯定的是,梯田地形显著改

变了坡地 SOC 和 TN 的空间分布格局,梯田系列中 SOC 和 TN 面积浓度从上部梯田到下部梯田呈现波动增加的趋势;坡耕地中 SOC 和 TN 面积浓度随坡长增加先波动增加后波动减少,且在土壤侵蚀严重的坡脚部位面积浓度低,而在发生土壤沉积的坡中部、坡下部 SOC 和 TN 面积浓度较高,这表明通过改变地形驱动土壤侵蚀变化,可以有效改变坡地 SOC 和 TN 的空间分布格局和顺坡迁移过程。这与 Zhang 等<sup>[23]</sup>在川中丘陵区的的结果较为一致。

坡耕地 SOC 和 TN 顺坡迁移过程受到了水力侵蚀和耕作侵蚀的双重作用影响。近年来,大量研究结果,表明土壤 $^{137}\text{Cs}$ 面积浓度与土壤养分的面积浓度之间具有显著的相关关系<sup>[18,27]</sup>。在本研究的梯田景观中,SOC,TN 面积浓度和 $^{137}\text{Cs}$ 面积浓度之间具有相似的空间分布格局,且 $^{137}\text{Cs}$ 面积浓度与 SOC,TN 面积浓度之间均存在显著的相关关系。在坡耕地景观中, $^{137}\text{Cs}$ 面积浓度与 SOC,TN 面积浓度之间同样存在显著的线性相关关系。这些结果表明,坡面土壤侵蚀(水蚀和耕作侵蚀)对 SOC 和 TN 的顺坡迁移过程具有决定性作用,这与赵鹏志等<sup>[28]</sup>在东北黑土区的研究结果一致。值得注意的是,受耕作侵蚀影响,坡耕地顶部土壤侵蚀往往较为严重,但坡顶部位的 SOC 和 TN 的面积浓度不一定在坡面上处于最低值,这主要是因为耕作侵蚀属于无分选性搬运过程,且耕作侵蚀导致的坡顶 SOC 流失在植物生长作用下能够得到一定程度补充,这与 van Oost 等<sup>[29]</sup>研究结果一致。这也表明耕作侵蚀与水蚀对 SOC 库储量的影响过程和机制较为复杂,还需要进一步开展量化、精细化的研究。

## 4.2 结论

(1) 在藏东南区,梯田等人工地形会显著改变坡面的土壤侵蚀空间格局和过程。复合坡耕地土壤侵蚀主要发生坡顶和坡脚部位,分别是耕作侵蚀和水蚀作用所致,而梯田系列中土壤 $^{137}\text{Cs}$ 则较为离散,且土壤侵蚀的空间分布格局表现为上部梯田侵蚀,下部梯田沉积。这表明由于梯田田埂的隔断作用,梯田系列的土壤侵蚀速率和泥沙连通性均会显著减低。

(2) 在梯田系列和坡耕地景观中,同样深度的 SOC 和 TN 与 $^{137}\text{Cs}$ 的空间分布格局较为一致,且 SOC 和 TN 的面积浓度均与 $^{137}\text{Cs}$ 的面积浓度之间具有显著的线性相关关系。

(3) 在藏东南区,耕作侵蚀和水蚀共同驱动了该区坡耕地土壤、SOC 和 TN 的空间再分布过程。在坡顶部位,耕作侵蚀是坡耕地土壤、SOC 和 TN 流失的主要驱动力,而在下坡和坡脚部位,水蚀是土壤、SOC 和 TN 流失的主要动力。

## [参 考 文 献]

- [1] 徐梦, 李晓亮, 蔡晓布, 等. 藏东南地区不同土地利用方式下土壤有机碳组分及周转变化的特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(19): 3714-3725.
- [2] 刘庆. 青藏高原东部(川西)生态脆弱带恢复与重建研究进展[J]. 资源科学, 1999, 21(5): 81-84.
- [3] 陈同德, 焦菊英, 王颢霖, 等. 青藏高原土壤侵蚀研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 547-564.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [5] 魏守才, 张晓平, 陈学文. 土壤水蚀对土壤有机碳动态及全球碳循环平衡的影响[J]. 土壤与作物, 2015, 4(4): 156-162.
- [6] Collins A L, Zhang Y, McMillan S, et al. Sediment-associated organic matter sources and sediment oxygen demand in a special area of conservation (SAC): A case study of the River Axe, UK [J]. *River Research and Applications*, 2017, 33(10): 1539-1552.
- [7] 刘娜, 王克林, 张伟, 等. 土壤侵蚀及其评价、校验方法研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(18): 1-6.
- [8] Walling D E, Quine T A. Calibration of Cesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data [J]. *Land Degradation & Development*, 1990, 2(3): 161-175.
- [9] Diaz-Asencio M, Corcho-Alvarado J A, Cartas-Aguila H, et al. <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs as tracers of recent sedimentary processes in two water reservoirs in Cuba [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, 177: 290-304.
- [10] Foucher A, Lacey P J, Salvador-Blanes S, et al. Quantifying the dominant sources of sediment in a drained lowland agricultural catchment: The application of a thorium-based particle size correction in sediment fingerprinting [J]. *Geomorphology*, 2015, 250: 271-281.
- [11] Evans R, Collins A L, Zhang Y, et al. A comparison of conventional and <sup>137</sup>Cs-based estimates of soil erosion rates on arable and grassland across lowland England and Wales [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 173: 49-64.
- [12] Li Yong, Li Junjie, Are K S, et al. Livestock grazing significantly accelerates soil erosion more than climate change in Qinghai-Tibet Plateau: Evidenced from <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pbex measurements [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 285: 106643.
- [13] Damnati B, Ibrahim S, Radakovitch O. Quantifying erosion using <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb in cultivated soils in three Mediterranean watershed: Synthesis study from El Hachef, Raouz and Nakhla (North West Morocco) [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2013, 79: 50-57.
- [14] Hancock G R, Kunkel V, Wells T, et al. Soil organic carbon and soil erosion: Understanding change at the large catchment scale [J]. *Geoderma*, 2019, 343: 60-71.
- [15] 刘丹, 丁明军, 文超, 等. 赣南红壤丘陵区<sup>137</sup>Cs示踪土壤侵蚀对土壤养分元素的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 62-67.
- [16] 王永平, 周子柯, 滕昊蔚, 等. 滇南小流域3种土地利用方式下土壤侵蚀及养分流失特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 11-18.
- [17] Ritchie J C, McCarty G W. <sup>137</sup>Cesium and soil carbon in a small agricultural watershed [J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 69(1/2): 45-51.
- [18] 朱茜, 林杰. 基于<sup>137</sup>Cs的苏南丘陵区的土壤侵蚀和土壤养分研究[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(8): 134-141.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 丁肇龙, 汪君, 胥鹏海, 等. 基于<sup>137</sup>Cs的新疆准东地区不同土地利用类型土壤风蚀特征研究[J]. 土壤, 2018, 50(2): 398-403.
- [21] 伍佐, 苏正安, 王勇, 等. 农田防护林对耕地土壤侵蚀速率和空间分布格局的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(7): 1218-1226.
- [22] 文安邦, 刘淑珍, 范建容, 等. 雅鲁藏布江中游地区土壤侵蚀的<sup>137</sup>Cs示踪法研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 47-50.
- [23] Zhang Jianhui, Quine T A, Ni Shijun, 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.
- [24] Su Zhengan, Li Yan, Zhang Jianhui, et al. Spatial variation in soil, SOC, and total N redistribution on affected and non-affected slope terraces due to the 8.0 Wenchuan Earthquake in 2008 by using <sup>137</sup>Cs technique [J]. *Catena*, 2017, 155: 191-199.
- [25] Nie Xiaojun, Zhang Jianhui, Su Zhengan. Dynamics of soil organic carbon and microbial biomass carbon in relation to water erosion and tillage erosion [J]. *PLoS One*, 2013, 8(5): e64059.
- [26] 葛方龙, 张建辉, 苏正安, 等. 坡耕地紫色土养分空间变异对土壤侵蚀的响应[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 459-464.
- [27] 任瑞雪, 张风宝, 杨明义, 等. 坡面侵蚀过程中泥沙有机碳流失特征分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 15-19.
- [28] 赵鹏志, 陈祥伟, 王恩姮. 黑土坡耕地有机碳及其组分累积—损耗格局对耕作侵蚀与水蚀的响应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3634-3642.
- [29] Oost K V, Muysen W V, Govers G, et al. From water to tillage erosion dominated landform evolution [J]. *Geomorphology*, 2005, 72(1/2/3/4): 193-203.