

# 紫色土丘陵区坡面土壤有机碳含量及储量分布特征

樊红柱<sup>1</sup>, 张泽洪<sup>2</sup>, 郭松<sup>1</sup>, 蒋松<sup>1</sup>

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

**摘要:** 为探明坡耕地土壤有机碳空间分布特征, 对紫色土丘陵区坡耕地不同部位土壤有机碳及活性有机碳顺坡和深度分布进行分析。结果表明: 坡耕地上坡土层深度仅为 22.3 cm, 中坡和下坡土层深度约为上坡的 2.09 倍和 3.30 倍; 与上坡比较, 中坡和下坡土壤容重下降了 0.2 和 0.04, 土壤孔隙度增加了 19.82% 与 3.83%。沿坡从上向下土壤有机碳及活性有机碳储量显著增加, 下坡土壤有机碳及活性有机碳储量比上坡和中坡分别增加了 674.74%, 104.09% 和 958.51%, 267.75%; 不同部位土壤有机碳及活性有机碳含量随土层深度增加呈降低趋势, 中坡和下坡土壤有机碳及活性有机碳含量的深度分布满足  $Y=a\ln X+b$  对数方程, 上坡不符合该方程。坡耕地土壤有机碳与其活性有机碳含量呈极显著正相关。土壤沿坡耕地重新分配影响有机碳空间分布格局。

**关键词:** 紫色土; 坡耕地; 有机碳; 活性有机碳; 空间分布

**中图分类号:** S153.6<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2017)03-0197-05

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.03.034

## Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon Content and Storage on Slope in the Purple Soil Hilly Region

FAN Hongzhu<sup>1</sup>, ZHANG Zehong<sup>2</sup>, GUO Song<sup>1</sup>, JIANG Song<sup>1</sup>

(1. Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066;

2. Institute of Maintain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041)

**Abstract:** In this paper, the main objective was to better understand the spatial distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) and labile organic carbon (LOC) on the sloping farmland. Soil samples were collected from different geomorphic positions at the Suining site, which was a typical purple soil hilly region. Content and storage of SOC and LOC were studied. The results showed that soil depth was only 22.3 cm in the upper position. Compared with the soil depth in the upper position, it was almost 2.09 times in the middle position and 3.30 times in the lower position. Soil bulk density in the middle and lower positions was reduced by 0.2 and 0.04 than that in the upper position, but soil porosity in the middle and lower position was 19.82% and 3.83% higher than that in the upper position, respectively. Storages of SOC and LOC significantly increased from the upper position to the lower position. Compared with the upper and middle positions, SOC storage in the lower position was 674.74% and 104.09% higher, LOC storage was 958.51% and 267.75% higher, respectively. Contents of SOC and LOC in different positions of the sloping farmland decreased with the increasing soil depth. The depth distribution of SOC and LOC for the middle and lower positions could be described by the formula  $Y=a\ln X+b$ , but it did not follow this formula for the upper position. There was a significant positive correlation between SOC and LOC in the sloping farmland. Therefore, the spatial distribution pattern of SOC and LOC were affected by soil erosion in the sloping farmland.

**Keywords:** purple soil; sloping farmland; soil organic carbon; soil labile organic carbon; spatial distribution

全球气候变化及其对未来环境的影响是当前国内外学者高度关注的热点问题, 土壤有机碳库作为陆地生态系统碳库重要组成部分之一, 其在全球碳素循环过程

中扮演着举足轻重的作用<sup>[1]</sup>。土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库, 全球 1 m 深度土壤中储存了约 1 500 Pg 有机碳和 2 000 Pg 无机碳(1 Pg=10<sup>15</sup> g)<sup>[2-3]</sup>, 土壤碳

库是大气碳库的 3.3 倍、陆地生物量的约 4.5 倍<sup>[4-5]</sup>。由于土壤生态系统中储存了巨大数量的有机碳,其微小变化将对全球大气中 CO<sub>2</sub> 浓度产生严重影响,进一步影响全球气候变化的温室效应<sup>[6]</sup>。紫色土是我国特有土地资源,长江上游紫色土区域面积约为 18 万 hm<sup>2</sup>,且集中分布在四川盆地<sup>[7]</sup>;川中丘陵区面积占全国面积比例的 1.25%,占西南地区面积比例的 10.66%,是我国陆地生态系统重要景观之一,该区耕地以旱作坡耕地为主,占耕地面积的 60.8%左右<sup>[1]</sup>。紫色土母质本身物理风化快、下渗及抗蚀性差,加之农业利用程度高、人类活动强度大等原因,导致丘陵区紫色土水土流失严重、土壤肥力下降<sup>[8-10]</sup>。土壤有机质是衡量土壤肥力的重要指标,但土壤有机质的含量多少不能很好地反映土壤质量的变化,它只是一个矿化分解与合成的平衡结果,不能反映转化速率<sup>[11]</sup>。20 世纪 70—80 年代,科学家提出了活性有机质的概念,即土壤有机质的活性部分,它是指土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解矿化、对植物养分供应有最直接作用的那部分有机质<sup>[11-12]</sup>。近年来对土地不同利用方式、耕作管理措施及不同培肥模式下紫色土有机碳的变化研究较多<sup>[13-15]</sup>。目前对紫色土坡耕地侵蚀环境下土壤有机碳尤其是活性有机碳顺坡和深度分布特征尚不清楚。本文以紫色土丘陵区坡耕地土壤为研究对象,探讨坡耕地土壤有机碳沿坡和深度分布特征,为明确侵蚀环境下土壤有机碳与活性有机碳的分布及流失规律提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省遂宁市船山区永兴镇元宝村(105°37'16" E, 30°34'26" N, 海拔 314 m)。该区属亚热带湿润季风气候,全年气候温和,光照较少,雨量充沛,四季分明,年均温度 17.4℃,年均降水量 930 mm,夏季降水量为 473~480 mm,占全年的 51%左右<sup>[16]</sup>。试验土壤为侏罗系遂宁组砂页岩母质发育的红棕紫泥土,研究区坡耕地具有分布广泛、地块小、坡度大、土层浅薄、抗蚀性差、土壤侵蚀剧烈等特点;土地利用为基本农田,种植结构以小麦—玉米—红薯轮作为主,由于地块小,锄头顺坡耕作是该区域主要农耕方式。

### 1.2 样品采集与分析

2015 年 9 月作物收获后,选择坡度 8.3%、坡长 16.5 m 的线性坡耕地为研究对象。沿坡面间隔约 5 m 设置 1 条取样剖面线、顺坡设置 3 条平行取样剖面线,沿纵断面布设上坡、中坡和下坡 3 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,将取样筒中的

土壤每隔 4 cm(40 cm 深度后每隔 5 m)进行分层取样,称量样品总鲜重,测定含水量,计算土壤容重。运用差分相位 GPS 技术测量海拔、坡长、坡度等地形参数。

土壤有机碳采用 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 氧化法测定<sup>[17]</sup>,土壤活性有机碳采用 KMnO<sub>4</sub> 氧化法测定<sup>[18]</sup>。

土壤碳(有机碳和活性有机碳)储量按照于小玲等<sup>[19]</sup>的方法计算。公式为:

$$SOC_i = \sum_{n=1}^n (C_i \times p_i \times h_i) / 10$$

式中: SOC<sub>i</sub> 为特定深度的土壤碳储量(t/hm<sup>2</sup>); C<sub>i</sub> 为第 i 层土壤碳含量(g/kg); p<sub>i</sub> 为第 i 层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); h<sub>i</sub> 为第 i 层土壤厚度(cm); n 为土层数。

各层有机碳对总碳的贡献率按照谢钧宇等<sup>[20]</sup>的方法计算,各层有机碳的贡献率(%) = 该层土壤有机碳储量/土壤总有机碳储量 × 100。文中数据处理采用 Excel 2007 和 DPS 软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡耕地土壤基本情况

坡耕地的上坡、中坡和下坡部位坡长分别为 0—2.5, 2.5—8.0, 8.0—16.5 m。而坡度在中坡位置最大,为 10.89%;上坡次之,为 8.43%;下坡位置坡度最小,仅有 5.70%。上坡、中坡和下坡部位土壤深度分别为 22.3, 46.5, 73.6 cm, 土层深度沿坡逐渐加深。这主要因为上坡和中坡部位发生土壤侵蚀,侵蚀土壤物质在下坡位置沉积,由于长期的堆积导致下坡坡度逐渐变小、土层深度增加。由于上坡部位遭受强烈侵蚀,耕层土壤不断被侵蚀搬运,为了维持原始耕层厚度和坡顶坡度,农民习惯向下挖土壤母质或者挖坡顶非耕地的土壤来补偿坡顶的土壤流失<sup>[21]</sup>。上坡土壤容重(1.65 g/cm<sup>3</sup>)显著高于其他部位、而土壤孔隙度最小(37.89%);由于上坡侵蚀土壤在下坡的堆积作用,引起下坡土壤容重(1.61 g/cm<sup>3</sup>)低于上坡高于中坡(1.45 g/cm<sup>3</sup>),而下坡土壤孔隙度(39.34%)高于上坡低于中坡(45.40%)。

表 1 不同地形坡位土壤基本情况

| 坡位 | 坡长/<br>m | 坡度/<br>% | 土层<br>深度/cm | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 土壤总<br>孔隙度/% |
|----|----------|----------|-------------|------------------------------|--------------|
| 上坡 | 0—2.5    | 8.43     | 22.3        | 1.65±0.07a                   | 37.89±2.77b  |
| 中坡 | 2.5—8.0  | 10.89    | 46.5        | 1.45±0.03b                   | 45.40±1.12a  |
| 下坡 | 8.0—16.5 | 5.70     | 73.6        | 1.61±0.02ab                  | 39.34±0.72b  |

注:不同小写字母表示显著性水平为  $p < 0.05$ 。下同。

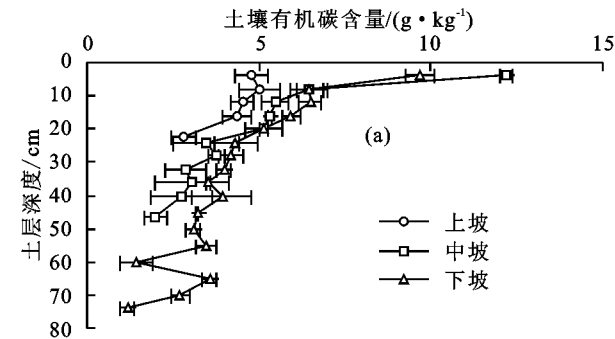
### 2.2 坡耕地土壤有机碳顺坡分布

上坡、中坡和下坡部位土壤有机碳储量分别为 41.64, 158.07, 322.60 t/hm<sup>2</sup>, 呈现出下坡 > 中坡 > 上坡的变化规律。下坡土壤有机碳储量比上坡和中坡分别

增加了 674.74%和 104.09%,不同坡位土壤有机碳储量差异显著。沿坡从上到下坡耕地土壤肥力逐渐提高。主要是因为上坡和中坡遭受严重土壤侵蚀,引起表层富碳物质在上坡和中坡流失,而在下坡堆积,从而提高了下坡位置土壤有机碳储量<sup>[10,22]</sup>。沿坡从上到下,土壤中活性有机碳储量也呈现出显著增加趋势,上坡、中坡和下坡部位土壤活性有机碳储量分别为 15.04,43.29,159.20 t/hm<sup>2</sup>,下坡土壤活性有机碳储量比上坡和中坡分别增加了 958.51%和 267.75%。

2.3 坡耕地土壤有机碳深度分布

由图 1a 可知,上坡和中坡土壤有机碳含量总体上呈现出随土层深度增加而逐渐降低的趋势。下坡 0—60 cm 土壤中有有机碳含量随土层深度增加而递减,60—73 cm 又随土层加深有机碳含量逐渐递减。说明 60—65 cm 可能是原始耕层土壤的表层,也进一步表明坡耕地的上坡和中坡部位土壤遭受严重侵蚀



后沉积在下坡而掩埋了原始耕层。坡耕地耕层土壤(0—20 cm)有机碳在上坡、中坡和下坡部位平均含量分别为 4.30,6.91,6.74 g/kg,中坡和下坡部位耕层土壤有机碳含量较上坡部位分别提高了 60.70%和 56.74%,表明坡耕地土壤有机碳在上坡部位损失,在坡中、下部位累积的特征。下坡部位耕层土壤有机碳含量比中坡部位降低了 2.46%,这主要是因为坡耕地下坡部位没有田埂保护,侵蚀土壤被带出坡地,从而降低了下坡位置土壤有机碳含量。

坡耕地不同部位土壤活性有机碳含量随土层深度增加也呈逐渐降低的趋势变化,这与土壤有机碳含量深度分布规律一致。耕层土壤(0—20 cm)活性有机碳在上坡、中坡和下坡部位平均含量分别为 1.62,2.54,2.76 g/kg,中坡和下坡部位耕层土壤活性有机碳含量较上坡部位分别提高了 56.79%和 70.37%;这与土壤侵蚀区上坡部位富碳土壤物质沿坡重新分配关系密切<sup>[23]</sup>。

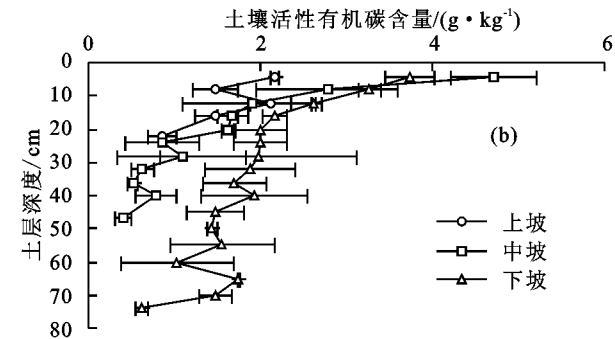


图 1 不同地形坡位土壤有机碳与活性有机碳含量深度分布

土壤有机碳含量随土层深度变化趋势可用  $Y = a \ln X + b$  对数方程来描述<sup>[10,22]</sup>,式中: $Y$  为某一深度土层的有机碳含量(g/kg); $X$  为土层深度(cm); $a$  和  $b$  表示描述有机碳剖面分布的系数(g/kg)。由表 2 可知,上坡、中坡和下坡位置土壤有机碳与活性有机碳含量深度分布对数方程系数  $a$  均为负值,说明这些部位土壤有机碳与活性有机碳含量表现出随土层深度增加而逐渐降低的趋势。方差分析结果表明,中坡和下坡土壤有机碳和活性有机碳含量深度分布均达极显著差异水平,而上坡差异不显著;也就是说在坡耕地强烈侵蚀区(上坡)土壤有机碳与活性有机碳含量的深度分布不满足对数经验方程,土壤沉积区(中坡和下坡)土壤有机碳与活性有机碳含量的深度分布完全符合对数方程。

2.4 坡耕地土壤有机碳对总碳贡献

由图 2 可知,坡耕地的上坡、中坡和下坡部位不同土层有机碳对总碳贡献率差异较大,但所有坡位各土层有机碳对总碳储量的贡献率随土层深度增加呈现出先增加后降低的变化趋势,不同部位最大贡献率的拐点土层深度有所差异。上坡部位 16 cm 土层处

有机碳对总碳贡献率最大为 29.27%,中坡部位 36 cm 土层处贡献率最大为 14.00%,下坡部位 65 cm 土层处贡献率最大为 10.83%;即沿坡从上到下,有机碳贡献率最大土层深度逐渐加深,这与坡耕地侵蚀土壤物质再分配密切相关<sup>[10,21-23]</sup>。

2.5 坡耕地土壤有机碳与活性有机碳关系

土壤有机碳与活性有机碳含量进行线性回归分析,坡耕地土壤有机碳与活性有机碳呈极显著线性正相关, $r=0.89, p<0.01$ ,直线方程斜率为 0.329,坡耕地土壤中有有机碳含量每增加 1 g/kg,土壤活性有机碳含量将增加 0.329 g。

表 2 土壤有机碳及活性有机碳深度分布回归方程系数

| 参数  | 土壤有机碳 |         |         | 土壤活性有机碳 |         |         |
|-----|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
|     | 上坡    | 中坡      | 下坡      | 上坡      | 中坡      | 下坡      |
| $a$ | -0.92 | -3.50   | -2.36   | -0.58   | -1.61   | -0.86   |
| $b$ | 6.49  | 15.38   | 12.26   | 3.01    | 6.41    | 4.83    |
| $r$ | 0.72  | 0.95 ** | 0.95 ** | 0.72    | 0.97 ** | 0.94 ** |
| $n$ | 5     | 11      | 17      | 5       | 11      | 17      |

注: $a$  和  $b$  分别为方程  $Y = a \ln X + b$  的系数; $r$  为相关系数; $n$  为样本数; \*\* 表示极显著相关( $p<0.01$ )。

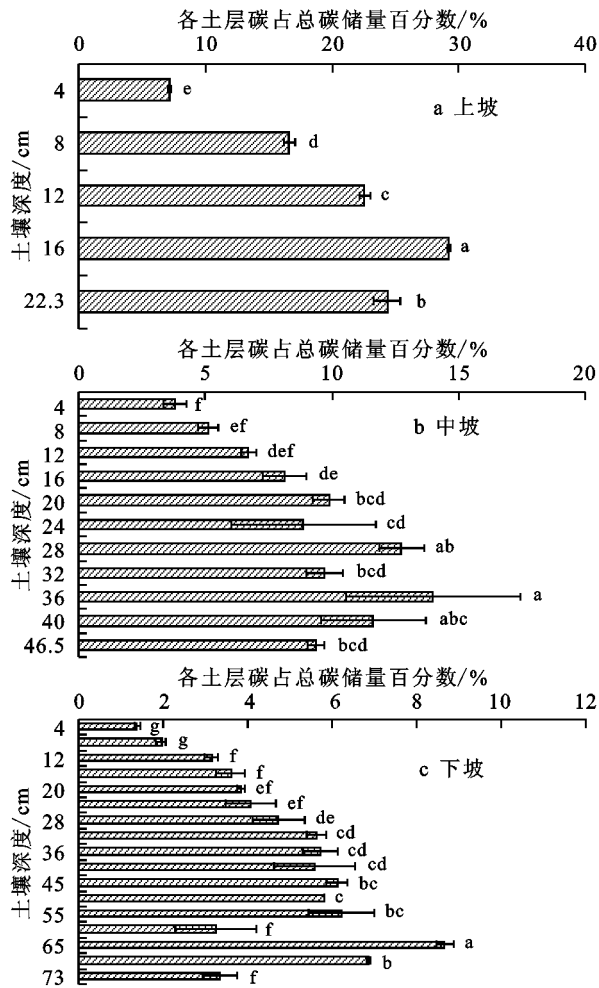


图 2 不同土层有机碳占总碳储量比例

### 3 讨论

土壤中的有机碳既是衡量土壤肥力的重要指标;也是陆地生态系统碳库的重要组成部分,其微小变化将直接影响着温室气体  $\text{CO}_2$  的排放和全球气候变化<sup>[2-3]</sup>。因此,土壤有机碳对粮食安全和气候变化具有非常重要的意义。本研究发现,坡耕地上坡土层深度仅为 22.3 cm,中坡和下坡土层深度约是上坡的 2.01 倍和 3.30 倍;中坡和下坡土壤容重比上坡(1.65  $\text{g}/\text{cm}^3$ )下降了 0.2 和 0.04。由于丘陵区坡耕地地块小,人工顺坡耕作是该区主要的耕作方式,长期顺坡强烈耕作导致严重的水土流失。苏正安<sup>[21]</sup>指出强烈的水土流失导致坡耕地的坡顶土壤流失殆尽,上坡部位由于土层深度较浅,强烈耕作造成土壤母质碎屑物混入耕层引起土壤容重显著增加、孔隙度下降;中坡和下坡部位由于上坡土壤的淀积作用,引起耕层土壤容重变小、孔隙度增加。这与李富程<sup>[24]</sup>在川中丘陵区紫色土坡地上的研究结果相似。

沿坡从上向下土壤碳(有机碳及活性有机碳)储量显著增加;不同部位土壤碳含量总体随土层深度增加而逐渐降低;就不同部位耕层土壤(0—20 cm)碳含量来说,中坡和下坡土壤有机碳含量较上坡提高了 60.70%和

56.74%,中坡和下坡土壤活性有机碳含量较上坡提高了 56.79%与 70.37%;表明沿坡从上到下土壤越来越肥沃。多数研究表明引起土壤重新分配是水力侵蚀和耕作侵蚀共同作用的结果,在丘陵区坡地上耕作侵蚀尤为重要<sup>[9-10,22-24]</sup>;强烈耕作一方面引起上坡部位表层富含有机碳的土壤物质被顺坡迁移搬运,另一方面强烈耕作将贫碳的土壤母岩掘出混入耕层,导致上坡部位耕层有机碳含量明显下降<sup>[24-25]</sup>;由于下坡坡度变小,从上坡传输下来的富碳土壤物质在下坡沉积,原来表层被新形成的耕层埋藏,减少有机碳的分解和矿化<sup>[23,26]</sup>;从而导致有机碳沿坡显著增加。已有研究结果证实耕作对土壤特征的影响不局限于耕层,对底层土壤同样也会产生不同程度的影响<sup>[21,24,27]</sup>。本研究发现,上坡、中坡和下坡位置土壤碳含量深度分布对数方程系数均为负值,说明这些部位土壤碳含量随土层深度增加而逐渐降低;方差分析结果表明,中坡和下坡土壤碳含量差异极显著,而上坡差异不显著,也就是说在坡耕地强烈侵蚀区(上坡)土壤碳含量的深度分布不满足对数方程,沉积区(中坡和下坡)土壤碳含量的深度分布完全符合对数方程。这与王勇<sup>[27]</sup>在川中丘陵区 and 三峡库区的紫色土坡地以及樊红柱<sup>[28]</sup>在川北山区紫色土坡地上的研究结果一致。本研究还发现沿坡从上到下有机碳对总碳贡献率最大土层深度逐渐加深,土壤有机碳与其活性有机碳含量呈极显著线性相关关系。以上结果说明,强烈的水土流失影响坡耕地土壤有机碳空间分布格局。

### 4 结论

坡耕地上坡部位的土层深度仅为 22.3 cm,中坡和下坡部位土层深度约是上坡的 2.09 倍和 3.30 倍;中坡和下坡部位土壤容重比上坡下降了 0.2 和 0.04;中坡和下坡部位土壤孔隙度比上坡增加了 19.82%和 3.83%;说明坡耕地土壤沿坡重新分配导致土壤沉积区(中坡和下坡)土层深度增加、容重降低、孔隙度增大。坡耕地不同位置土壤碳储量显著差异;下坡土壤有机碳储量比上坡和中坡增加了 674.74%和 104.09%,下坡土壤活性有机碳储量比上坡和中坡提高了 958.51%和 267.75%;不同部位土壤有机碳及活性有机碳含量总体随土层深度增加而降低,强烈侵蚀区土壤有机碳及活性有机碳含量的深度分布不满足  $Y = a \ln X + b$  对数方程,沉积区土壤有机碳及活性有机碳含量的深度分布完全符合该对数方程。因此,坡耕地土壤施肥管理应考虑不同坡位有机碳空间分布特征。

#### 参考文献:

- [1] 罗勇,王小国,高美荣,等. 川中丘陵典型农田土壤有机碳储量及空间分布特征[J]. 长江流域资源与环境,

- 2015, 24(4): 669-675.
- [2] 郑聚锋, 程琨, 潘根兴, 等. 关于中国土壤碳库及固碳潜力研究的若干问题[J]. 科学通报, 2011, 56(26): 2162-2173.
- [3] 张旭博, 孙楠, 徐明岗, 等. 全球气候变化下中国农田土壤碳库未来变化[J]. 中国农业科学, 2014, 47(23): 4648-4657.
- [4] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 等. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5358-5371.
- [5] 李菲, 李娟, 龙健, 等. 典型喀斯特山区植被类型对土壤有机碳、氮的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3374-3381.
- [6] Lane R R, Mack S K, Day J W, et al. Fate of soil organic carbon during wetland loss[J]. Wetlands, 2016, 36(6): 1167-1181.
- [7] 高扬, 徐亚娟, 陈维梁, 等. 紫色土坡耕地 C、N 与微生物 C、N 变化及其耦合特征[J]. 环境科学学报, 2014, 34(7): 1794-1800.
- [8] Gao Y, Zhu B, Wang T, et al. Seasonal change of non-point source pollution-induced bioavailable phosphorus loss: a case study of Southwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 420(2): 373-379.
- [9] Li F C, Zhang J H, Su Z A, et al. Simulation and  $^{137}\text{Cs}$  tracer show tillage erosion translocating soil organic carbon, phosphorus, and potassium[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, 176(5): 647-654.
- [10] Zhang J H, Wang Y, Li F, et al. 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.
- [11] Xu M G, Lou Y L, Sun X L, et al. Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(7): 745-752.
- [12] Liang B, Yang X Y, He X H, et al. Effects of 17-year fertilization on soil microbial biomass C and N and soluble organic C and N in loessial soil during maize growth [J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(2): 121-128.
- [13] 高雪松, 何鹏, 邓良基, 等. 丘陵区坡面土壤有机碳及颗粒有机碳分布特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 337-342.
- [14] Wang Y, Zhang J H, Li F C. Using Cesium-137 to investigate soil quality under conservation tillage on steep lands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 6(5): 439-448.
- [15] 陈轩敬, 赵亚南, 柴冠群, 等. 长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 1): 139-144.
- [16] 樊红柱, 秦鱼生, 陈庆瑞, 等. 长期施肥紫色水稻土团聚体稳定性及其固碳特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1473-1480.
- [17] 曾骏, 郭天文, 于显枫, 等. 长期施肥对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 812-815.
- [18] 张璐, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥对中国 3 种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1646-1655.
- [19] 于小玲, 佟小刚, 杨学云, 等. 长期施肥对壤土黑碳积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1404-1411.
- [20] 谢钧宇, 杨文静, 强久次仁, 等. 长期不同施肥下土有机碳和全氮在团聚体中的分布[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1413-1422.
- [21] 苏正安. 紫色土坡耕地土壤景观演化对耕作侵蚀的响应[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010: 68, 87, 97.
- [22] Zhang J H, Ni S J, Su Z A. Dual roles of tillage erosion in lateral SOC movement in the landscape[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 63(2): 165-176.
- [23] 樊红柱, 张建辉, 张冀, 等. 川北山区坡耕地土壤活性有机碳对土壤侵蚀的响应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 57-60.
- [24] 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: 66, 123.
- [25] 王勇, 张建辉, 李富程. 耕作侵蚀对坡耕地土壤水稳定性团聚体和水分特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 180-185.
- [26] Wei S C, Zhang X P, McLaughlin N B, et al. Effect of soil temperature and soil moisture on  $\text{CO}_2$  flux from eroded landscape positions on black soil in Northeast China[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 144(12): 119-125.
- [27] 王勇. 耕作侵蚀对紫色土坡耕地水蚀的作用机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 42-43.
- [28] 樊红柱. 侵蚀对紫色土坡耕地土壤有机碳库变化的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 39-48.