

# 坡向与植物群落对水蚀风蚀交错带土壤有机碳氮的影响

张凯<sup>1,2</sup>, 徐慧敏<sup>3</sup>, 李秧秧<sup>1,4</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100;

4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 以黄土高原北部水蚀风蚀交错带六道沟流域内的 1 个支沟为对象, 通过植被调查和采样分析, 研究了坡向和植物群落类型对土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN) 含量、碳氮比 (C/N) 和有机碳氮密度 (SOC<sub>D</sub>、TND) 的影响。结果表明: (1) 坡向对 0—20 cm 土壤 SOC 和 TN 含量及 0—60 cm C/N 均有显著影响。SOC、TN 含量及 C/N 分别表现为: 半阴坡 > 半阳坡 > 沟头半阴坡 > 半阳坡 = 沟头及半阳坡 > 半阴坡 ≥ 沟头的趋势; (2) 植物群落对 0—10 cm SOC 和 TN 含量及 0—20 cm C/N 均有显著影响。半阴坡分布的 3 种豆科群落达乌里胡枝子、紫花苜蓿及白花草木樨间土壤碳氮差异不显著, 但均显著高于禾本科的长芒草群落; 半阳坡分布的达乌里胡枝子和紫花苜蓿群落 SOC 和 TN 含量相当, 均显著高于茵陈蒿群落 (菊科) 和长芒草群落; 沟头的达乌里胡枝子群落 SOC、TN 显著高于长芒草。豆科草本植物更有利于促进土壤碳氮的积累; (3) 坡向主要影响表层 0—20 cm SOC<sub>D</sub> 和 TND, 其对 60 cm 剖面 SOC<sub>D</sub> 和 TND 贡献率分别为 45%~55% 和 47%~53%。不同植物群落下土壤表层及整个剖面 SOC<sub>D</sub> 和 TND 均有显著差异。研究支沟内 SOC<sub>D</sub> 平均为 2.13 kg/m<sup>2</sup>, 远低于黄土高原其他地区。上述结果对于水蚀风蚀交错带土壤碳氮储量的精确评估及植被合理建造有一定指导价值。

**关键词:** 坡向; 植物群落; 土壤有机碳; 全氮; 土壤碳氮比; 水蚀风蚀交错带

中图分类号: S153.6 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2018)06-0156-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.06.024

## Effects of Slope Aspects and Plant Community Types on Soil Organic Carbon and Nitrogen in the Crisscross Area of Wind-Water Erosion

ZHANG Kai<sup>1,2</sup>, XU Huimin<sup>3</sup>, LI Yangyang<sup>1,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** A branch gully of Liudaogou watershed in the wind-water erosion crisscross region of the northern Loess Plateau was selected as the object, and the effects of slope aspects and plant community types on soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) content, ratio of carbon-nitrogen (C/N) and soil organic carbon and nitrogen density (SOC<sub>D</sub>, TND) were studied through vegetation survey and sampling analysis. The results showed that: (1) Slope aspects had significant effects on the SOC and TN contents in 0—20 cm, and C/N in 0—60 cm. The SOC, TN contents and C/N followed the order of semi-shady slope > semi-sunny slope > gully-head, semi-shady slope > semi-sunny slope = gully-head, and semi-sunny slope > semi-shady slope ≥ gully-head, respectively. (2) Plant communities had significant effects on the SOC and TN contents in 0—10 cm and C/N in 0—20 cm. There was no significant difference in SOC and TN contents between three kinds of leguminous communities growing in the semi-shady slope, namely, *Lespedeza davurica*, alfalfa and sweet clover, but they were significantly higher than that of the *Stipa bungeana* community. The SOC and TN contents in *Lespedeza davurica* and alfalfa communities were similar in the semi-sunny slope,

收稿日期: 2018-07-20

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41571130082)

第一作者: 张凯 (1993 ), 女, 在读硕士研究生, 主要从事植物生态学研究。E-mail: zk930321@163.com

通信作者: 李秧秧 (1968 ), 女, 研究员, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: yyli@ms.iswc.ac.cn

which were significantly higher than those of the *Artemisia capillaris* and *Stipa bungeana* communities. The SOC and TN contents in *Lespedeza davurica* community were significantly higher than that of the *Stipa bungeana* community in the gully-head, indicating that legume herb was more conducive to the accumulation of soil carbon and nitrogen in the study area. (3) Slope aspects mainly affected the SOCD and TND in surface layer of 0—20 cm, and their contribution to SOCD and TND of 60 cm soil profile were 45%~55% and 47%~53%, respectively. There were significant differences in SOCD and TND between the surface layer and the whole soil profile under different plant community types. The average SOCD in the studied branch gully was estimated to be 2.13 kg/m<sup>2</sup>, which was far lower than other parts of the Loess Plateau. These results had important role in evaluating soil carbon and nitrogen storage accurately and rational construction of vegetation in the crisscross area of wind-water erosion on the Loess Plateau.

**Keywords:** slope aspect; plant community; soil organic carbon; total nitrogen; soil C/N ratio; wind-water erosion crisscross region

陆地生态系统碳、氮元素的生物地球化学循环已经引起了世界范围内的广泛关注<sup>[1]</sup>。土壤碳库作为陆地生态系统最大的碳库,其储量约占陆地碳库的 2/3<sup>[2]</sup>。研究<sup>[3]</sup>表明,土壤有机碳每减少 1 Pg(1 Pg=10<sup>15</sup> g),大气中 CO<sub>2</sub> 浓度将增加 0.47 μmol/mol,因而土壤有机碳库容的微小变动都将显著改变大气 CO<sub>2</sub> 浓度,进而对全球变暖产生影响<sup>[4]</sup>。另外,土壤有机碳库直接调节着土壤团聚体含量、孔隙度、饱和导水率和土壤持水能力,因此土壤有机碳亦是衡量土壤肥力和土壤质量的重要指标<sup>[5]</sup>。土壤氮素与土壤有机碳密切相关,土壤有机碳的积累速率很大程度上取决于植被的净初级生产力,而氮是大多数温带生态系统初级生产力的关键限制因素<sup>[6]</sup>,因此土壤氮库也被认为是表征土壤固碳潜力的指标<sup>[7]</sup>。改善土壤有机碳库和氮库对于土壤质量和生态系统服务功能的提升至关重要。

土壤有机碳含量及其空间分布受气候、地形(海拔、坡向、坡度等)、土壤母质、土地利用/植被等多种环境因子的综合影响<sup>[8]</sup>,在侵蚀丘陵区气候和土壤母质相对均一的情况下,地形和土地利用是影响土壤有机碳积累的两大主要因素<sup>[9]</sup>。地形一方面通过对局部水分、温度和热量等的再分配影响植被凋落物的产生和分解,进而影响有机碳含量<sup>[10]</sup>;另一方面还通过影响土壤侵蚀的过程和强度以及土壤颗粒、养分等的沉积和再分布影响有机碳含量<sup>[11]</sup>。坡向是一个重要的地形因子,通过对水热条件的重新分配形成不同的坡面微域小气候<sup>[12]</sup>,从而影响植被群落构成和土壤形成过程以及植物生物量、凋落物量、腐殖化和矿质化过程,最终导致不同坡向 SOC 的积累和分布出现显著差异。土地利用通过改变局域土壤环境中有机残留物的输入及有机碳的分解来影响土壤有机碳含量<sup>[13]</sup>,且有有机碳含量的多少因土地利用方式/植被恢复类型不同而异。

关于坡向和土地利用方式对土壤有机碳和氮库

的影响已有一些研究<sup>[12,14-15]</sup>,如阴坡土壤有机碳和氮浓度普遍大于阳坡;有研究<sup>[14]</sup>认为,耕地转化为灌木的固碳效应大于乔木和草地;也有研究<sup>[16-17]</sup>认为,撂荒后自然恢复的草地土壤有机碳积累效应优于林地;还有研究<sup>[18]</sup>估算了不同气候带典型草地的有机碳储量。这些研究主要集中在黄土丘陵沟壑区或黄土丘陵区,且主要考虑乔灌草不同土地利用方式及不同草地类型的影响,鲜有对不同坡向条件下,不同草地植物群落水平固碳能力的研究。黄土高原北部水蚀风蚀交错带作为其生态环境最为脆弱的地区,面积约占整个黄土高原的 30%<sup>[19]</sup>,对黄土高原碳、氮储量的“贡献”是不可忽视的,但由于下垫面条件的高度空间异质性,给其生态系统碳储量的精确评估带来困难。为此,本研究在陕北水蚀风蚀交错带六道沟流域内,采用野外调查采样与室内分析相结合的方法,探讨不同坡向和植物群落对土壤有机碳氮含量及密度的影响,为该区生态系统土壤有机碳氮储量和土壤固碳潜力的精确评估及植被合理建造提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站所在的六道沟流域(38°46′—38°51′N, 110°21′—110°23′E)进行,海拔 1 081~1 274 m。该地貌为盖沙黄土丘陵,属黄土高原典型的水蚀风蚀交错带。流域面积为 6.89 km<sup>2</sup>,主沟道南北走向,属窟野河的二级支流。研究区气候类型为中温带半干旱气候,冬春干旱少雨多风沙,夏秋多雨,多年平均降水量为 437.4 mm,其中 6—9 月降水量占全年降水量的 77%,且多以暴雨形式出现;年平均气温 8.4 °C,月平均最低气温 -9.7 °C(1 月),最高气温 23.7 °C(7 月),≥10 °C 活动积温 3 248 °C,全年无霜期 153 d,年日照时间 2 836 h,年总太阳辐射 5 922 MJ/m<sup>2</sup>。土壤主要类型有绵沙土、新黄土、红土及在沙地发育起来的风沙土和沙地

淤土。植被类型以干旱草原为主,沙生植物和黄土区植物交错出现。

## 1.2 试验设计

1.2.1 样地选取与土样采集 2016年8月,在六道沟流域选取了面积约为0.3 km<sup>2</sup>,退耕16年的支沟,植被类型主要为草地,偶有稀疏柠条灌丛分布。采用8坡向分类法<sup>[20]</sup>,将该流域划分为半阴坡(坡向西北,292.5°~337.5°)、半阳坡(坡向东南,112.5°~157.5°)和沟头,沟道内由于两边坡陡遮光,导致植被分布很少。

在各坡向的坡面上沿坡向从上向下布设样带,其中半阳坡布设有3条样带,半阴坡布设有6条样带,沟头因为面积小,随机布设。每条样带隔一定间距设置代表性样点,整个支沟共布设了79个样点。在每个样点处测定并记录其经纬度、海拔和坡度,采用陆地生物群落典型样方进行植被调查<sup>[21]</sup>,每个采样点设置3个面积为1 m×1 m的样方,以群落优势种命名各样点植物群落类型,最后刈割烘干并称地上生物量。采样支沟的基本特征见表1。

表1 采样支沟的基本特征

坡向	海拔/ m	坡度/ (°)	群落 优势种	样点数	盖度/ %	伴生种
半阴坡	1189~1231	4~22	长芒草 ( <i>Stipa bungeana</i> )	9	45~60	丛生隐子草、硬质早熟禾、白花草木樨、达乌里胡枝子、乳浆大戟、远志、茵陈蒿、紫花苜蓿、硬毛棘豆、假苇拂子茅
			白花草木樨 ( <i>Melilotus alba</i> )	19	60~80	长芒草、丛生隐子草、达乌里胡枝子、茵陈蒿、角蒿、紫花苜蓿、假苇拂子茅、地肤、猪毛菜、硬质早熟禾、苦菜、乳浆大戟、远志
			紫花苜蓿 ( <i>Medicago sativa</i> )	11	75~88	达乌里胡枝子、白花草木樨、长芒草、远志、丛生隐子草、猪毛菜、茵陈蒿、田旋花
			达乌里胡枝子 ( <i>Lespedeza davurica</i> )	8	60~75	长芒草、丛生隐子草、白花草木樨、硬质早熟禾、假苇拂子茅、茵陈蒿、阿尔泰狗娃花、地梢瓜、猪毛菜、田旋花
半阳坡	1185~1219	5~27	长芒草	6	45~50	丛生隐子草、达乌里胡枝子、紫花苜蓿、茵陈蒿、猪毛菜
			紫花苜蓿	4	80~90	长芒草、丛生隐子草、达乌里胡枝子、角蒿、地肤、苦菜、茵陈蒿
			达乌里胡枝子	6	75~85	茵陈蒿、硬质早熟禾、长芒草、丛生隐子草、白花草木樨、角蒿、苦菜、沙打旺、地肤
			茵陈蒿 ( <i>Artemisia capillaris</i> )	4	85~95	紫花苜蓿、达乌里胡枝子、阿尔泰狗娃花、猪毛菜、地肤、田旋花、长芒草、蒺藜、地梢瓜、远志
沟头	1210~1220	5~15	长芒草	7	40~55	丛生隐子草、紫花苜蓿、达乌里胡枝子、白花草木樨、远志、茵陈蒿、地肤、硬毛棘豆
			达乌里胡枝子	5	65~70	长芒草、丛生隐子草、白花草木樨、紫花苜蓿、硬毛棘豆、猪毛菜、茵陈蒿、乳浆大戟、冰草、沙打旺

注:伴生种的拉丁名依次为丛生隐子草(*Cleistogenes caespitosa*)、硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)、乳浆大戟(*Euphorbia esula*)、远志(*Polypogon tenuifolia*)、硬毛棘豆(*Oxytropis hirta*)、假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)、角蒿(*Incarvillea sinensis*)、地肤(*Kochia scoparia*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、苦菜(*Ixeris chinensis*)、田旋花(*Convolvulus arvensis*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、地梢瓜(*Cynanchum thesioides*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、蒺藜(*Tribulus terrester*)和冰草(*Agropyron cristatum*)。

在每个采样点用环刀取原状土测土壤容重,重复

3次,采集深度为60 cm;用土钻分层(分别为0—10, 10—20, 20—40, 40—60 cm)采集3个样方的土壤样品,混匀,部分置入铝盒测土壤含水量,部分装入样品袋带回实验室,风干过筛后测定土壤颗粒组成、土壤有机碳和全氮含量,共采集79个样点316个土样。

1.2.2 测定项目及方法 土壤容重采用环刀法测定;土壤含水量采用烘干法测定;土壤颗粒组成采用Mastersizer 2000激光粒度仪测定;土壤有机碳含量采用浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>溶液外加热法测定;土壤全氮含量采用凯氏法消解—凯氏定氮仪测定<sup>[22]</sup>。

## 1.3 数据处理

如果某一土体的剖面由*n*层组成,那么该土壤剖面的有机碳密度(SOCD, kg/m<sup>2</sup>)和全氮密度(TND, kg/m<sup>2</sup>)的计算公式为:

$$SOCD = \sum_{i=1}^n SOC_i \times B_i \times D_i \quad (1)$$

$$TND = \sum_{i=1}^n TN_i \times B_i \times D_i \quad (2)$$

式中:SOCD为第*i*层土壤有机碳含量(g/kg);TN<sub>*i*</sub>为第*i*层土壤全氮含量(g/kg);B<sub>*i*</sub>为第*i*层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);D<sub>*i*</sub>为第*i*层土层厚度(cm)。

目前大多数研究中土壤有机碳和氮密度以1 m

深度计。为便于和同类研究比较,本研究 60 cm 以下深度土壤的有机碳密度推算公式<sup>[6]</sup>为:

$$\log C = S \log d + I \quad (3)$$

式中: $\log$  对数变换以 10 为底; $C$  为第  $i$  层土壤有机碳密度( $\text{kg}/\text{m}^2$ ); $d$  为第  $i$  层土层深度( $\text{cm}$ );参数  $S$ 、 $I$  通过实测值回归拟合确定。

利用单因素方差分析分别检验坡向、植物群落类型对土壤有机碳和全氮含量及密度的影响,若方差分析达到显著( $P < 0.05$ ),用 Duncan 法进行多重比较。用线性回归分析来揭示土壤有机碳和全氮含量之间的耦合关系。所有的统计分析用 SPSS 18.0 软件进行,绘图用 Microsoft Excel 2013 软件进行。图中数据均为平均值 $\pm$ 标准误。

## 2 结果与分析

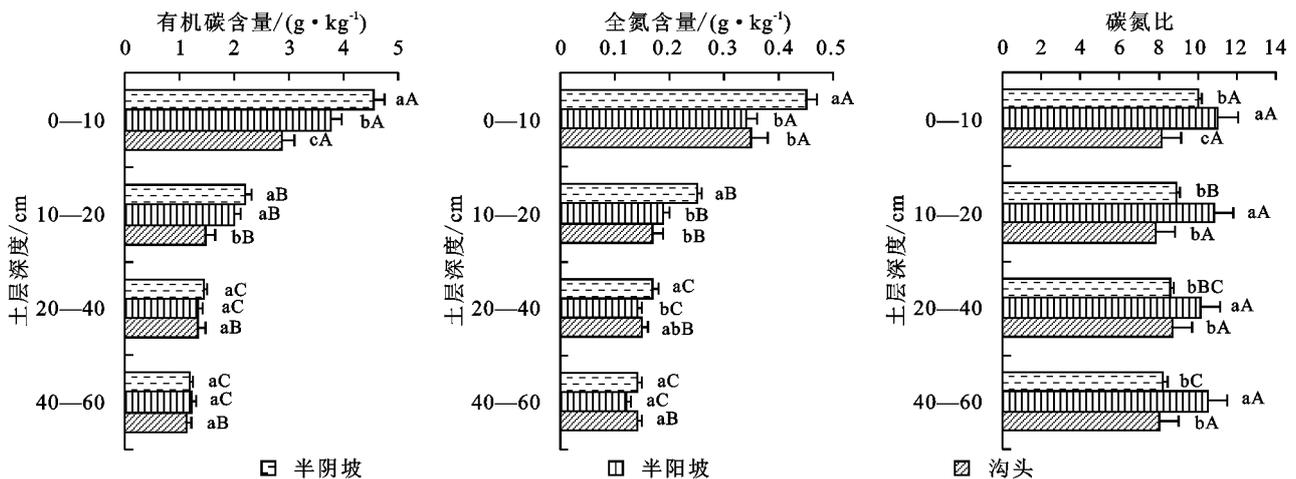
### 2.1 不同坡向下土壤有机碳、全氮含量及碳氮比

图 1 为不同坡向下土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)含量和碳氮比(C/N)在 0—60 cm 土壤剖面上的分布情况。从总体上看,半阴坡、半阳坡及沟头 0—60 cm 土壤剖面 SOC 平均含量分别为 2.35, 2.08, 1.71 g/kg, TN 平均含量分别为 0.25, 0.20, 0.19 g/kg, 呈现出半阴坡最高, 半阳坡次之, 而沟头最低的趋势。不同坡向间 0—10, 10—20 cm 的 SOC 及 TN 含量差异均显著( $P < 0.05$ ), 其

中 SOC 表现为半阴坡 > 半阳坡 > 沟头, 而 TN 含量表现为半阴坡 > 半阳坡 = 沟头的趋势。20—60 cm 不同坡向间的 SOC 含量及 40—60 cm 不同坡向间的 TN 含量差异均不显著( $P > 0.05$ )。

各坡向 SOC 和 TN 含量在不同土层深度上均存在显著差异( $P < 0.05$ ), 且随土层深度的增加逐渐降低。表层 0—10 cm SOC 和 TN 含量显著大于其他各土层( $P < 0.05$ ), 半阴坡、半阳坡及沟头表层 0—10 cm SOC 平均含量分别为 0—60 cm 土壤的 1.94, 1.81, 1.68 倍, TN 为 1.80, 1.70, 1.84 倍, 说明各坡向 SOC 和 TN 含量的垂直剖面分布具有明显的表聚现象, 且半阴坡和半阳坡土壤有机碳的表聚强度高于全氮。各坡向下层 20—40, 40—60 cm 的 SOC 及 TN 含量差异均不显著( $P > 0.05$ )。

坡向对各土层 C/N 都有显著影响( $P < 0.05$ ) (图 1)。0—10 cm 土层半阳坡 C/N 显著高于半阴坡, 半阴坡 C/N 显著高于沟头; 其余各层半阳坡 C/N 显著高于半阴坡和沟头, 且后两者差异不显著( $P > 0.05$ )。土层深度对 C/N 的影响主要表现在半阴坡, 其 0—10 cm 土层 C/N 显著高于 10—20 cm 土层, 且二者显著高于下层 40—60 cm 土层( $P < 0.05$ ); 而半阳坡和沟头不同深度间的 C/N 并无显著差异( $P > 0.05$ )。



注:图中不同小写字母表示同一土层不同坡向间有机碳、全氮含量及碳氮比差异显著( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示同一坡向不同土层间有机碳、全氮含量及碳氮比差异显著( $P < 0.05$ )。

图 1 不同坡向剖面土壤有机碳含量、全氮含量及碳氮比

### 2.2 不同植物群落下土壤有机碳、全氮含量及碳氮比

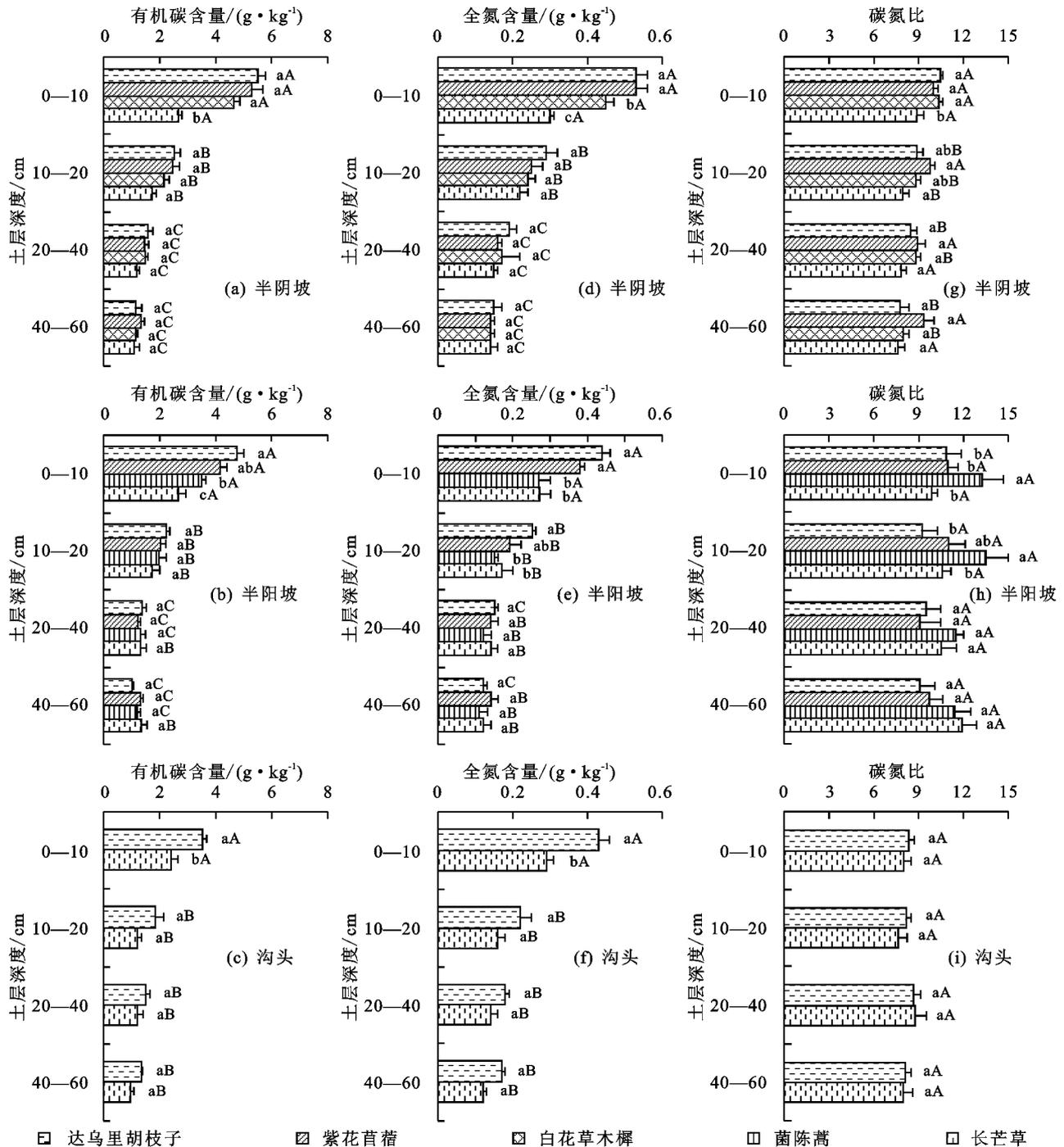
从图 2 可以看出,群落类型对 SOC 和 TN 含量的影响深度主要在表层 0—10 cm,除半阳坡 10—20 cm TN 含量外,不同群落类型间 10 cm 以下土层 SOC 和 TN 含量差异均不显著( $P > 0.05$ )。半阴坡主要分布 4 种植物群落类型,分别为达乌里胡枝子、紫花苜蓿、白花草木樨和长芒草群落,其对应的 0—10 cm SOC 含量分别为 5.50, 5.28, 4.64, 2.67 g/kg, 前 3 种豆科植物群落 SOC 含量并无显著差异,但

均显著高于禾本科的长芒草群落( $P < 0.05$ ); 0—10 cm TN 含量分别为 0.53, 0.53, 0.45, 0.30 g/kg, 胡枝子和苜蓿的 TN 含量显著高于草木樨( $P < 0.05$ ), 三者均显著高于长芒草( $P < 0.05$ )。半阳坡主要分布有胡枝子、苜蓿、茵陈蒿和长芒草群落,其下 0—10 cm SOC 含量分别为 4.75, 4.15, 3.52, 2.67 g/kg, TN 分别为 0.44, 0.38, 0.27, 0.27 g/kg, 胡枝子和苜蓿的 SOC 和 TN 含量相当,二者显著高于茵陈蒿和长芒草群落( $P < 0.05$ )。沟头主要分布着胡枝子和

长芒草群落,胡枝子 0—10 cm 的 SOC 和 TN 含量显著高于长芒草群落 ( $P < 0.05$ )。

各坡向不同群落类型下土壤 C/N 的分析结果表明,只有在半阴坡和半阳坡的 0—20 cm 土层,群落类型对 C/N 有显著影响 ( $P < 0.05$ ),其余土层和沟头均无显著影响 ( $P > 0.05$ ) (图 2)。半阴坡 0—10 cm 土层,胡枝子、苜蓿和草木樨这 3 种豆科植物群落 C/N 显著大于长

芒草群落 ( $P < 0.05$ ),而三者之间 C/N 差异不显著 ( $P > 0.05$ )。半阳坡 0—10 cm 土层,茵陈蒿植物群落 C/N 显著大于胡枝子、苜蓿和长芒草群落 ( $P < 0.05$ ),而后三者之间 C/N 差异不显著 ( $P > 0.05$ )。除半阴坡的胡枝子和草木樨群落 0—10 cm 土层 C/N 显著高于 10—60 cm 土层外 ( $P < 0.05$ ),其余各坡向同一植物群落,随土层深度变化,其 C/N 并无显著改变 ( $P > 0.05$ )。



注:图中不同小写字母表示同一土层不同群落类型间有机碳、全氮含量及碳氮比差异显著 ( $P < 0.05$ );不同大写字母表示同一群落类型不同土层间有机碳、全氮含量及碳氮比差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 半阴坡、半阳坡及沟头不同群落类型下土壤有机碳、全氮含量和碳氮比

### 2.3 土壤有机碳与全氮含量间的耦合关系

除半阳坡的苜蓿和茵陈蒿群落(样点数较少,相

关性不显著)外,其余不同坡向和不同植物群落 SOC 与 TN 含量基本存在显著线性相关关系 ( $P < 0.05$ )

(表 2、表 3)。无论是同一坡向(表 2)亦或同一群落(表 3)土壤碳氮的平均比例(线性回归方程的斜率)和作用区间基本随土层深度增加而减小,说明一方面表层土壤较下层土壤更容易积累和固定 SOC,即每增加 1 单位的氮,表层 0—10 cm 土壤将获得更多的碳,因而表层土也较为肥沃;另一方面,表层 0—10

cm 土壤碳氮含量的水平空间变异幅度大于 10—20 cm 土壤。半阴坡土壤碳氮的平均比例高于半阳坡和沟头;半阴坡 3 种豆科植物 0—10 cm 土壤碳氮的平均比例高于长芒草,半阳坡达乌里胡枝子 0—20 cm 土壤碳氮的平均比例高于长芒草,但沟头不同群落下差异不明显。

表 2 不同坡向 0—10,10—20 cm 土层土壤有机碳与全氮含量的关系

坡向	样点数	0—10 cm 土层			10—20 cm 土层		
		回归方程	R <sup>2</sup>	P	回归方程	R <sup>2</sup>	P
半阴坡	47	y=11.479x-0.625	0.873	0.000	y=9.182x-0.068	0.804	0.000
半阳坡	20	y=9.875x+0.364	0.775	0.000	y=7.759x+0.493	0.865	0.000
沟头	12	y=8.025x+0.054	0.822	0.000	y=7.547x+0.014	0.914	0.001

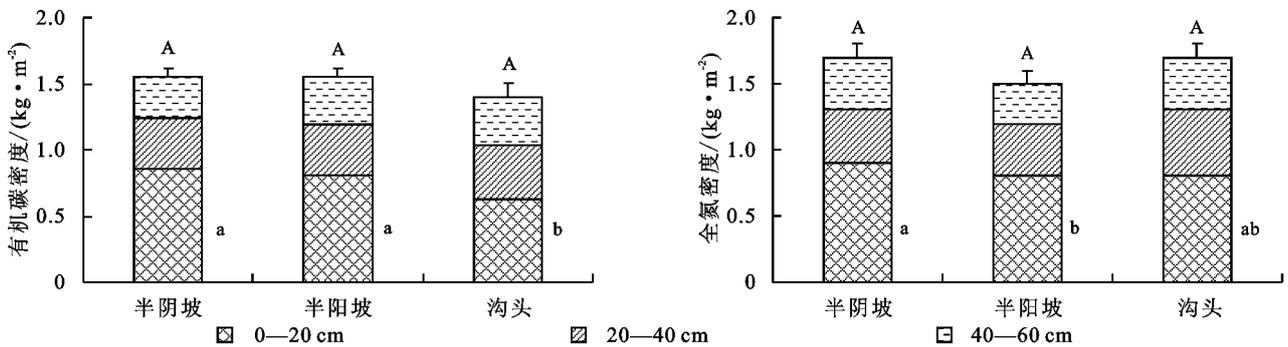
表 3 半阴坡、半阳坡及沟头不同群落类型下 0—10,10—20 cm 土层土壤有机碳与全氮含量的关系

坡向	群落类型	样点数	0—10 cm 土层			10—20 cm 土层		
			回归方程	R <sup>2</sup>	P	回归方程	R <sup>2</sup>	P
半阴坡	达乌里胡枝子	8	y=9.772x+0.364	0.935	0.000	y=6.944x+0.521	0.786	0.003
	紫花苜蓿	11	y=11.362x-0.717	0.818	0.000	y=9.581x+0.039	0.912	0.000
	白花草木樨	19	y=11.796x-0.626	0.744	0.001	y=10.468x-0.369	0.840	0.000
	长芒草	9	y=8.067x+0.061	0.709	0.017	y=6.196x+0.363	0.620	0.012
半阳坡	达乌里胡枝子	6	y=12.416x-0.724	0.992	0.000	y=10.695x-0.334	0.888	0.005
	紫花苜蓿	4	y=6.655x+1.527	0.592	0.230	y=5.481x+1.048	0.829	0.090
	茵陈蒿	4	y=0.823x+3.295	0.028	0.833	y=15.725x-0.391	0.613	0.217
	长芒草	6	y=8.880x+0.270	0.894	0.004	y=8.762x+0.268	0.982	0.000
沟头	达乌里胡枝子	5	y=10.901x-0.795	0.980	0.001	y=9.842x-0.359	0.959	0.004
	长芒草	7	y=12.366x-1.243	0.920	0.001	y=7.203x+0.065	0.659	0.027

2.4 不同坡向与植物群落下土壤有机碳和全氮密度

从图 3 可以看出,各坡向 SOCD 和 TND 均随土层深度增加而减小。半阴坡、半阳坡及沟头表层 0—20 cm SOCD 对 0—60 cm 剖面 SOCD 贡献率分别为 55%,52%,45%,TND 贡献率分别为 53%,53%,47%,说明了土壤表层对剖面 SOCD/TND 贡献很

大。不同坡向 0—20 cm 土层 SOCD 和 TND 差异显著(P<0.05),SOCD 表现为半阴坡、半阳坡显著高于沟头(P<0.05),TND 表现为半阳坡显著低于半阴坡、沟头(P<0.05),与对整个剖面 SOCD 和 TND 的影响趋势基本一致,但不同坡向 0—60 cm 剖面 SOCD 和 TND 差异不显著(P>0.05)。

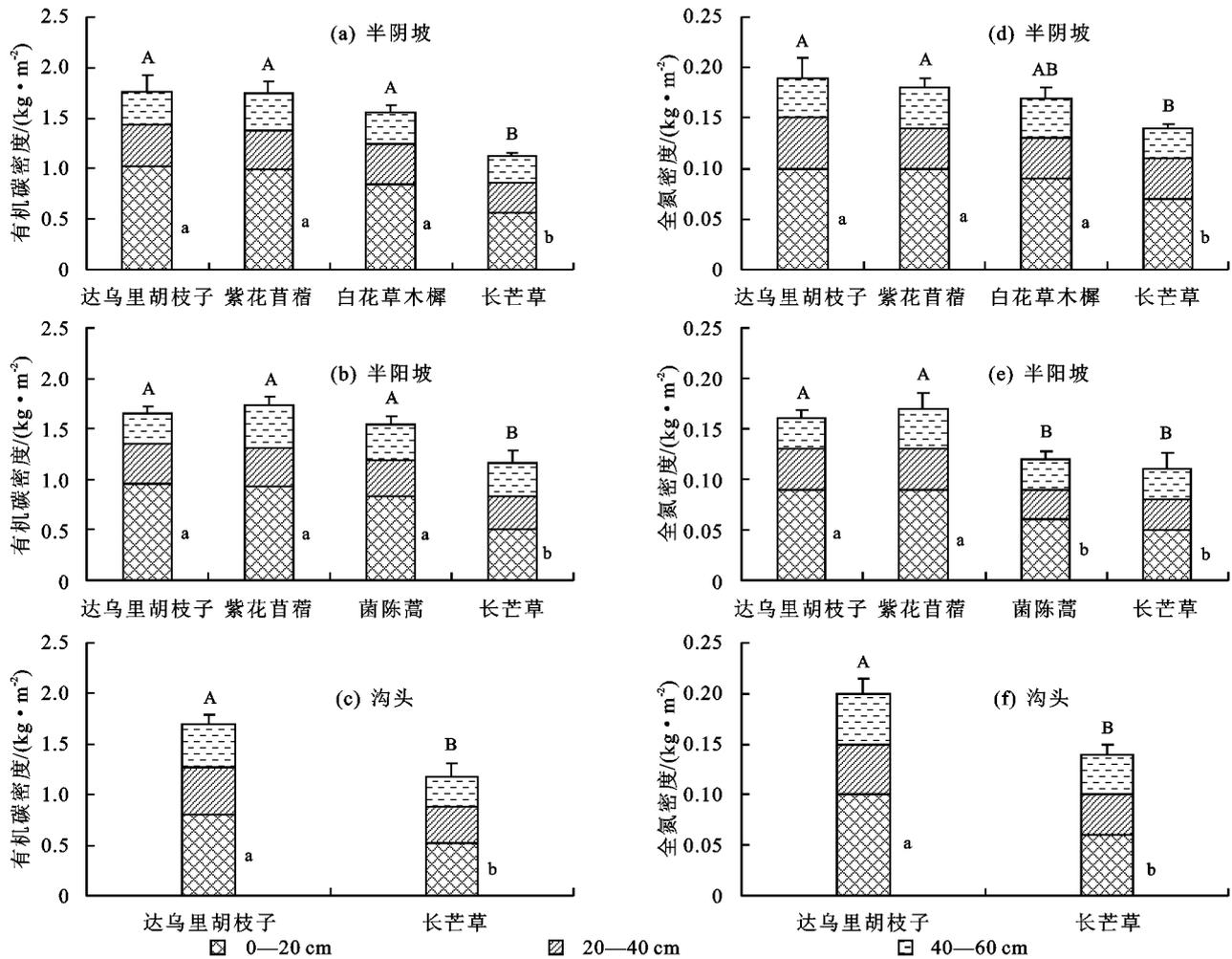


注:图中不同大、小写字母分别代表剖面 0—60 cm 和表层 20 cm 不同坡向的土壤有机碳氮密度差异显著(P<0.05)。

图 3 不同坡向剖面土壤有机碳密度和全氮密度

植物群落类型对 SOCD 和 TND 有显著影响(P<0.05)(图 4),且影响的土层深度主要为表层 0—20 cm。半阴坡各群落类型间 0—60 cm 土层 SOCD 分别为 1.76(胡枝子),1.74(苜蓿),1.55(草木樨),1.12 kg/m<sup>2</sup>(长芒草),TND 分别为 0.20(胡枝子),0.18(苜蓿),0.17(草木樨),0.14 kg/m<sup>2</sup>(长芒草),均表现为 3 种豆科植物群落间无显著差异(P>0.05),但显著高于长芒草群落(P<

0.05)。半阳坡各群落类型间 0—60 cm SOCD 表现为苜蓿(1.73kg/m<sup>2</sup>)=胡枝子(1.65 kg/m<sup>2</sup>)=茵陈蒿(1.54 kg/m<sup>2</sup>)>长芒草(1.16 kg/m<sup>2</sup>),TND 表现为苜蓿(0.17 kg/m<sup>2</sup>)=胡枝子(0.17 kg/m<sup>2</sup>)>茵陈蒿(0.13 kg/m<sup>2</sup>)=长芒草(0.11 kg/m<sup>2</sup>)。沟头各群落类型间 60 cm SOCD、TND 大小顺序均为胡枝子(SOCD 1.70 kg/m<sup>2</sup>,TND 0.20 kg/m<sup>2</sup>)>长芒草(SOCD 1.18 kg/m<sup>2</sup>,TND 0.14 kg/m<sup>2</sup>)。



注:图中不同大、小写字母分别代表剖面0—60 cm和表层0—20 cm不同群落的土壤有机碳和全氮密度差异显著( $P < 0.05$ )。

图4 半阴坡、半阳坡及沟头不同群落类型剖面土壤有机碳和全氮密度

### 3 讨论

#### 3.1 坡向对土壤有机碳、全氮含量及碳氮比的影响

研究表明, SOC 和 TN 含量的分布总体呈现半阴坡>半阳坡>沟头的规律,这与在其他地区得出的研究结果相似<sup>[14-15,23]</sup>。阴坡或半阴坡 SOC 含量高的原因可能主要在于:(1)阴坡土壤含水量一般高于阳坡,如祁连山森林草原带北坡 0—60 cm 含水量是南坡的 1.61 倍<sup>[24]</sup>,青藏高原高寒草甸阴坡表层 0—20 cm 含水量约为阳坡的 1.45 倍<sup>[25]</sup>。本研究中半阴坡 0—60 cm 土壤平均含水量比半阳坡高 26.45%,因此半阴坡植物生长好于半阳坡,其地上生物量比半阳坡高 16.67%,可向土壤归还更多的枯枝落叶等凋落物,从来源上有效补给土壤有机碳。(2)在北半球阳坡或半阳坡较阴坡或半阴坡所接受到的潜在太阳辐射强度大,辐射时间长,较高的年潜在辐射量使得坡面地表温度偏高<sup>[25]</sup>,如 Rorison 等<sup>[26]</sup>在对英国一个草地的研究中发现南坡年均温相比北坡高 2.5~3.0℃。阳坡或半阳坡较高的土壤温度增强了土壤微生物活性,加快有机质的矿化速率,不利于有机碳的积累,而阴坡较低的地表温度在一定程度上缓解了

SOC 的矿化,对有机碳的积累起着积极作用。(3)一般阳坡植被蒸腾量大,土壤本身含水量偏低,植物为维持正常生理需水量,叶片会对水分亏缺做出响应而将气孔关闭,导致通过光合作用吸收固定的  $\text{CO}_2$  降低,从而减少了光合产物的形成及向土壤中有机碳的输送。由于 TN 与 SOC 有极显著的高度相关性,因此阴坡或半阴坡 TN 含量亦高于阳坡或半阳坡。

沟头是流域土壤侵蚀较为严重的区域,随降雨径流的汇集过程将表层土壤冲刷搬运,加之研究区风、水二元侵蚀并存,土壤贫瘠,植被稀疏且多样性(主要分布 2 种植物群落)低,生物量较半阴坡和半阳坡分别低 30.63%和 19.06%,因而植被生产力和归还的凋落物产量低。此外,通过分析研究区沟头土壤颗粒组成,发现表层 0—10 cm 土壤砂粒(0.05~2 mm)含量高达 57.8%,而黏粒( $< 0.002$  mm)含量仅为 9.9%。Nichols<sup>[27]</sup>和陶贞等<sup>[28]</sup>分别在美国南部大平原和内蒙古温带草原的研究中均证实了 SOC 含量与黏粒含量极显著正相关,因此低的黏粒含量可能是沟头 SOC 低的重要原因。

土壤碳氮比是表征土壤碳氮间关系、衡量土壤碳

氮平衡状况的指标。本研究中, SOC 和 TN 含量均为半阴坡 > 半阳坡, 而 C/N 却表现为相反的趋势, 为半阴坡 < 半阳坡。原因可能与以下因素有关: (1) 土壤 C/N 是 SOC 和 TN 含量的比值, 由于 SOC 和 TN 积累速度不同步, 因而导致 C/N 变化规律与 SOC 和 TN 不同。0—10 cm 土层, 半阴坡 SOC 和 TN 含量分别比半阳坡提高了 21.28% 和 32.35%, 10—20 cm 土层分别提高了 9.95% 和 31.58%, 很明显可以看出各土层半阴坡相对半阳坡 TN 含量增加的幅度大于 SOC, 因此半阴坡 C/N 小于半阳坡。(2) 土壤微生物在土壤有机碳、氮的变化中起着重要的作用<sup>[29]</sup>。有研究<sup>[30]</sup>报道, 不同坡向上土壤微生物种类、数量及活性存在差异, 从而导致不同坡向 SOC 的分解速率和分解特征各异, 最终使得 C/N 发生变化。

### 3.2 植物群落对土壤有机碳、全氮含量及碳氮比的影响

植被主要通过凋落物和根系影响土壤有机碳。不同植物群落的凋落物数量、质量和分解特性、根系分泌物的类型和数量、根际微生物的种类和活性都存在较大差异, 进而决定了归还土壤的 SOC 含量<sup>[31]</sup>。本研究的不同植物群落类型中, 长芒草和茵陈蒿分属禾本科和菊科, 其群落 SOC 和 TN 含量均显著低于以豆科植物为主的群落, 如胡枝子和苜蓿群落, 这与大部分研究<sup>[32-34]</sup>结果一致。豆科植物含根瘤菌, 可固定大气中的氮, 使得土壤中氮素含量提高, 从而促进受氮限制地区植物更多的碳固定, 但并未发现 3 种豆科植物群落之间 SOC 和 TN 含量存在差异。不同群落类型只有表层 0—10 cm 的 SOC 和 TN 含量有显著差异, 而在 10 cm 以下各土层均无显著差异, 这与王邵军等<sup>[35]</sup>的研究结果一致, 刘伟等<sup>[18]</sup>在黄土高原中部的研究中发现, 各草地类型 SOC 含量的差异主要表现在 0—20 cm 土层, 说明植物群落主要影响表层 SOC 和 TN 含量, 这可能与草地植物根系主要集中在土壤浅表层, 且随土层深度增加而减少有关。

不同植物群落 C/N 的差异主要与植物向土壤中输入的枯枝落叶及地下部分死根等植物残体的有机组分有关, 土壤有机碳来源的不同将影响其在土壤中分解的难易程度、滞留时间以及碳氮养分的周转速率。通常微生物正常生命活动所需土壤最佳碳氮比约为 25 : 1。土壤 C/N 较低, 微生物分解更容易, 不利于 SOC 的积累; 相反, 土壤 C/N 较高, 有机质较难被微生物利用, 可以有效地促进碳的积累。本研究中半阴坡长芒草群落 C/N 显著低于其他 3 种豆科植物群落, 因而其土壤中微生物活动比较强烈, SOC 不易积累, 导致有机碳氮含量也显著低于其他植物群落。而半阳坡茵陈蒿群落相比胡枝子和苜蓿这 2 种豆科群落, 其固氮能力大大减弱, TN 含量显著降低, 且降低幅度大于 SOC 含量的降低幅度, 因而其 C/N 高于

豆科群落。

### 3.3 坡向和植物群落类型对土壤有机碳和全氮密度的影响

各坡向和植物群落 SOCD 和 TND 由其各自的土壤有机碳氮含量和土壤容重共同决定。本研究中, 坡向只对表层 0—20 cm SOCD 和 TND 有显著影响, 而对整个剖面影响不显著, 这主要与各坡向的土壤容重有密切关系。研究区表层平均土壤容重呈现半阴坡 (1.28 g/cm<sup>3</sup>) < 半阳坡 (1.39 g/cm<sup>3</sup>) < 沟头 (1.45 g/cm<sup>3</sup>) 的趋势, 因此半阴坡相对较高的有机碳氮含量与相对较低的土壤容重二者的综合作用使得其 SOCD 和 TND 低于半阳坡。一般随土层深度增加, 有机碳、氮含量减小, 土壤容重增加。由于各坡向二者沿土壤剖面在各土层的变化幅度不同, 其叠加效应可能导致不同坡向整个剖面 SOCD 和 TND 差异不明显。研究区群落类型对表层及整个剖面的 SOCD 和 TND 均达到显著, SOCD 和 TND 与其 SOC 和 TN 含量垂直变化的规律性基本一致, 这与何亚龙<sup>[36]</sup>在安塞区五里湾区域的研究结论一致。各坡向亦或各植物群落下 SOCD 和 TND 主要集中于土壤表层 0—20 cm, 20 cm 以下各土层间差异不显著, 这与温仲明等<sup>[37]</sup>在黄土高原森林草原区的研究结果一致。这可能与研究区干旱半干旱的气候条件有关。由于水分的限制, 植物地上部分生物量较小, 归还于土壤的有机物质也较少, 加之该地区年降水量较小, 不利于富集在土壤表层有机物质的快速分解, 且分解后释放的可溶性有机碳、氮向深层土壤的淋溶量也受限。

土壤有机碳密度是评价和衡量某一区域单位面积有机碳储量的重要指标。本研究的小流域 0—20 cm 和 0—100 cm SOCD 的变化范围分别为 0.25 ~ 1.43, 0.90 ~ 3.67 kg/m<sup>2</sup>, 平均为 0.81, 2.13 kg/m<sup>2</sup>, 与该流域农田 (0—20, 0—100 cm SOCD 分别为 0.53, 1.68 kg/m<sup>2</sup>)<sup>[38]</sup> 相比, 植被恢复促进了有机物质的积累, 提高了土壤碳氮储量, 但仍然低于黄土高原其他区域, 如燕沟流域 (退耕草地 0—20, 0—100 cm SOCD 分别为 1.62, 4.80 kg/m<sup>2</sup><sup>[14]</sup>)、纸坊沟流域 (退耕天然草地的 0—20, 0—100 cm SOCD 分别为 3.19, 6.89 kg/m<sup>2</sup><sup>[16]</sup>) 以及黄土高原中部天然草地 (0—100 cm SOCD 为 5.36 kg/m<sup>2</sup><sup>[18]</sup>), 更明显低于全国草地的平均水平 (0—100 cm SOCD 为 8.50 kg/m<sup>2</sup>)<sup>[39]</sup>。邓蕾<sup>[40]</sup>估算了黄土高原平均恢复年限为 19 年的草地土壤固碳速率为 520 kg/(hm<sup>2</sup> · a), 而本研究中其值仅为 180 kg/(hm<sup>2</sup> · a)。可见, 陕北水蚀风蚀交错带地区植被恢复提高土壤碳固存的能力较弱, 土壤碳储量相对较低, 固碳速率相对缓慢, 这可能与当地气候条件恶劣、土壤沙化严重、植被覆盖度低及微生物活性弱等因素有关。

## 4 结论

(1)坡向和植物群落类型是影响水蚀风蚀交错带土壤 SOC 和 TN 含量及密度、C/N 变异的重要因素。坡向主要影响 0—20 cm SOC 和 TN 含量及 0—60 cm C/N,且 SOC 含量、TN 含量及 C/N 分别呈现半阴坡>半阳坡>沟头、半阴坡>半阳坡=沟头及半阳坡>半阴坡≥沟头的分布规律。

(2)不同植物群落主要影响 0—10 cm SOC 和 TN 含量,且其影响与坡向有关。半阴坡分布的达乌里胡枝子、紫花苜蓿、白花草木樨 3 种豆科植物群落下土壤 SOC 和 TN 含量显著高于禾本科的长芒草群落;半阳坡分布的胡枝子和苜蓿群落下土壤的 SOC 和 TN 含量显著高于菊科的茵陈蒿群落和长芒草群落。沟头分布的胡枝子群落 SOC 和 TN 含量显著大于长芒草群落。

(3)坡向主要影响表层 0—20 cm SOCD 和 TND,其对 0—60 cm 剖面 SOCD 和 TND 贡献率分别为 45%~55%和 47%~53%。植物群落对表层及整个剖面 SOCD 和 TND 均有显著影响。研究流域 1 m 深度平均 SOCD 为 2.13 kg/m<sup>2</sup>,远低于黄土高原中部天然草地(5.36 kg/m<sup>2</sup>)和全国草地平均水平(8.5 kg/m<sup>2</sup>)。

### 参考文献:

- [1] Fu X, Shao M, Wei X, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2010, 155(1): 31-35.
- [2] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2013, 164(4): 80-99.
- [3] Lal R. Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect[J]. *Climatic Change*, 2001, 51(1): 35-72.
- [4] Chen L F, He Z B, Zhu X, et al. Impacts of afforestation on plant diversity, soil properties, and soil organic carbon storage in a semi-arid grassland of northwestern China[J]. *Catena*, 2016, 147: 300-307.
- [5] Xin Z, Qin Y, Yu X. Spatial variability in soil organic carbon and its influencing factors in a hilly watershed of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2016, 137: 660-669.
- [6] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [7] Vesterdal L, Schmidt I K, Callesen I, et al. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(1): 35-48.
- [8] Choudhury B U, Mohapatra K P, Das A, et al. Spatial variability in distribution of organic carbon stocks in the soils of North East India[J]. *Current Science*, 2013, 104(5): 604-614.
- [9] Eckert S, Engesser M. Assessing vegetation cover and biomass in restored erosion areas in Iceland using SPOT satellite data[J]. *Applied Geography*, 2013, 40(2): 179-190.
- [10] Wang Y, Fu B, Lü Y, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2011, 85(1): 58-66.
- [11] Schwanghart W, Jarmer T. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography: A case study from south-eastern Spain[J]. *Geomorphology*, 2011, 126(1): 252-263.
- [12] Sun W, Zhu H, Guo S. Soil organic carbon as a function of land use and topography on the Loess Plateau of China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 83: 249-257.
- [13] Lai Z, Zhang Y, Liu J, et al. Fine-root distribution, production, decomposition, and effect on soil organic carbon of three revegetation shrub species in northwest China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 359(14): 381-388.
- [14] 孙文义,郭胜利.黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. *生态学报*, 2011, 31(6): 1604-1616.
- [15] Huang Y M, Liu D, An S S. Effects of slope aspect on soil nitrogen and microbial properties in the Chinese Loess region[J]. *Catena*, 2015, 125: 135-145.
- [16] Zhang C, Liu G B, Xue S. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54(1): 16-24.
- [17] Zhao J, Dong Y, Wang Y, et al. Natural vegetation restoration is more beneficial to soil surface organic and inorganic carbon sequestration than tree plantation on the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 485(1): 615-623.
- [18] 刘伟,程积民,陈芙蓉,等.黄土高原中部草地土壤有机碳密度特征及碳储量[J]. *草地学报*, 2011, 19(3): 425-431.
- [19] 唐克丽.黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. *中国水土保持*, 2000(11): 11-12.
- [20] 徐少君,曾波,苏晓磊,等.基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究[J]. *生态学报*, 2012, 32(7): 2174-2184.
- [21] 董鸣.陆地生物群落调查观测与分析[M].北京:中国标准出版社,1997:1-23.
- [22] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,1999:25-49.
- [23] 孟国欣,查同刚,张晓霞,等.植被类型和地形对黄土区退耕地土壤有机碳垂直分布的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(9): 2447-2454.
- [24] 朱猛,刘蔚,秦燕燕,等.祁连山森林草原带坡面尺度土壤有机碳分布[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 741-748.
- [25] 刘旻霞,王刚.高寒草甸植物群落多样性及土壤因子对坡向的响应[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(2): 259-265.
- [26] Rorison I H, Sutton F, Hunt R. Local climate, topography

- and plant growth in Lathkill Dale NNR. I. A twelve-year summary of solar radiation and temperature[J]. *Plant Cell and Environment*, 1986, 9(1): 49-56.
- [27] Nichols J D. Relation of organic carbon to soil properties and climate in the Southern Great Plains[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(6): 1382-1384.
- [28] 陶贞, 次旦朗杰, 张胜华, 等. 草原土壤有机碳含量的控制因素[J]. *生态学报*, 2013, 33(9): 2684-2694.
- [29] Liu L, Duan Z H, Xu M K, et al. Effect of monospecific and mixed *Cunninghamia lanceolata* plantations on microbial community and two functional genes involved in nitrogen cycling[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 413-428.
- [30] Florinsky I V, McMahon S, Burton D L. Topographic control of soil microbial activity: A case study of denitrifiers[J]. *Geoderma*, 2004, 119(1): 33-53.
- [31] Berendsen R L, Pieterse C M, Bakker P A. The rhizospheremicrobiome and plant health[J]. *Trends in Plant Science*, 2012, 17(8): 478-486.
- [32] Wu G, Liu Y, Tian F, et al. Legumes functional group promotes soil organic carbon and nitrogen storage by increasing plant diversity[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(4): 1336-1344.
- [33] 刘学彤, 魏艳春, 杨宪龙, 等. 水蚀风蚀交错带不同退耕模式对土壤有机碳及全氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 91-98.
- [34] Zhao J, Wang X, Wang X, et al. Legume-soil interactions: Legume addition enhances the complexity of the soil food web[J]. *Plant and Soil*, 2014, 385(1/2): 273-286.
- [35] 王邵军, 曹子林, 李小英, 等. 滇池湖滨带不同植被类型土壤碳、氮时空分布特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(5): 55-59.
- [36] 何亚龙. 黄土高原退耕地土壤水分养分与碳密度的研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [37] 温仲明, 焦峰, 刘宝元, 等. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2025-2029.
- [38] 李裕元, 邵明安, 郑纪勇, 等. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(6): 2279-2287.
- [39] 方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. *中国科学(生命科学)*, 2010, 40(7): 566-576.
- [40] 邓蕾. 黄土高原生态系统碳固持对植被恢复的响应机制[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- (上接第 57 页)
- [21] 何晓玲, 郑子成, 李廷轩. 不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(12): 2492-2500.
- [22] 金轲, 蔡典雄, 吕军杰, 等. 耕作对坡耕地水土流失和冬小麦产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 1-5.
- [23] 白永会, 查轩, 查瑞波, 等. 秸秆覆盖红壤径流养分流失效益及径流剪切力影响研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 94-99.
- [24] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 85-88.
- [25] 杨青森, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 秸秆覆盖对东北黑土区土壤侵蚀及养分流失的影响[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(2): 1-5.
- [26] 严坤, 王玉宽, 徐佩, 等. 秸秆覆盖对三峡库区坡面侵蚀的影响[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 6-10.
- (上接第 65 页)
- [27] Peng H, Horton R, Lei T, et al. A modified method for estimating fine and coarse fractal dimensions of soil particle size distributions based on laser diffraction analysis[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(4): 937-948.
- [28] 魏茂宏, 林慧龙. 江河源区高寒草甸退化序列土壤颗粒分布及其分形维数[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 679-686.
- [29] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 等. 塔里木盆地南缘绿洲农田土壤颗粒分布分形特征及影响因素研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 730-735.
- [30] Yu J, Lv X, Bin M, et al. Fractal features of soil particle size distribution in newly formed wetlands in the Yellow River Delta [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: e10540.
- [31] Bai E, Boutton T W, Liu F, et al. Spatial variation of soil  $\delta^{13}\text{C}$  and its relation to carbon input and soil texture in a subtropical lowland woodland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 44(1): 102-112.
- [32] 姜坤, 秦海龙, 卢瑛, 等. 广东省不同母质发育土壤颗粒分布的分形维数特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 319-324.
- [33] Gao G L, Ding G D, Zhao Y Y, et al. Characterization of soil particle size distribution with a fractal model in the desertified regions of northern China[J]. *Acta Geophysica*, 2016, 64(1): 1-14.
- [34] 刘阳, 陈波, 杨新兵, 等. 冀北山地典型森林土壤颗粒分形特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 159-163.