

# 荒漠草原沙漠化对土壤无机碳和有机碳的影响

李巧玲<sup>1,2</sup>, 阎欣<sup>2</sup>, 吴秀芝<sup>2</sup>, 王波<sup>3</sup>, 刘任涛<sup>2</sup>, 安慧<sup>2</sup>

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021; 3. 盐池县草原实验站, 宁夏 盐池 751506)

**摘要:** 以空间代替时间的方法, 通过对宁夏荒漠草原不同沙漠化阶段土壤有机碳(SOC)和无机碳(SIC)的研究, 探讨荒漠草原沙漠化对土壤 SIC、SOC 及不同粒径组分土壤 SIC、SOC 分布特征的影响。结果表明: (1) 随着荒漠草原沙漠化程度的加剧, 0—10 cm 土层各粒径组分土壤 SIC 和 SOC 含量呈下降趋势。半固定沙地和流动沙地各粒径组分土壤 SIC 含量均表现为黏粉粒无机碳(CSIC) > 细砂粒无机碳(FIC) > 粗砂粒无机碳(CIC), 而 SOC 含量均表现为细砂粒有机碳(FOC) > 粗砂粒有机碳(COC) > 黏粉粒有机碳(CSOC)。(2) 随着荒漠草原沙漠化程度的加剧, 0—30 cm 土层土壤无机碳(SICD)、土壤有机碳(SOCD)和土壤总碳(STCD)密度均表现为荒漠草原 > 固定沙地 > 半固定沙地 > 流动沙地。固定沙地、半固定沙地和流动沙地土壤 SOCD、SICD 分别比荒漠草原降低了 18.5%, 57.7%, 60.5% 和 6.7%, 35.9%, 47.0%。(3) 0—10 cm 土层各粒径组分土壤 SOC 和 SIC 含量、全土 SOC 含量与 0—30 cm 土层 SOC 和 SIC 均呈显著正相关关系, 其中土壤粗砂粒有机碳和粗砂粒无机碳对 SOC 影响最大, 而土壤黏粉粒有机碳和黏粉粒无机碳与全土 SIC 含量呈显著负相关关系。因此, 沙漠化防治对于减少荒漠草原土壤碳损失极为重要。

**关键词:** 荒漠草原; 土壤无机碳; 土壤有机碳密度; 沙漠化

**中图分类号:** S154.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2019)01-0098-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcb.2019.01.017

## Effects of Desertification on Soil Organic Carbons and Soil Inorganic Carbons in Desert Grassland

LI Qiaoling<sup>1,2</sup>, YAN Xin<sup>2</sup>, WU Xiuzhi<sup>2</sup>, WANG Bo<sup>3</sup>, LIU Rentao<sup>2</sup>, AN Hui<sup>2</sup>

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ministry of Education Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021; 3. Grassland Experiment Station of Yanchi, Ningxia 751506)

**Abstract:** In order to explore the influence mechanism of desertification on the soil organic carbon (SOC) and soil inorganic carbon (SIC), we studied the distribution characteristics of SOC and SIC in bulk soil and their different particle sizes by spatial method instead of time method during the desertification process of desert grassland in Yanchi County. The results showed that: (1) The SIC and SOC contents in 0—10cm soil layer declined with the increasing desertification of desert grassland. The rank of SIC and SOC contents in each particle size of semi-fixed dunes and mobile dunes were soil inorganic carbon of clay and silt (CSIC) > soil inorganic carbon of fine sand (FIC) > soil inorganic carbon of coarse sand (CIC), soil organic carbon of fine sand (FOC) > soil organic carbon of coarse sand (COC) > soil organic carbon of clay and silt (CSOC). (2) The rank of SOC, SIC and STC densities in 0—30 cm soil layer were desert grassland > fixed dunes > semi-fixed dunes > mobile dunes. Compared with desert grassland, SOC and SIC densities in fixed dunes, semi-fixed dunes and mobile dunes declined by 18.5%, 57.7%, 60.5% and 6.7%, 35.9%, 47.0% respectively. (3) The SOC and SIC contents in different particle size fractions of 0—10 cm soil layer and SOCD and SICD of 0—30 cm soil layer were significantly positively correlated with SOC and SIC contents in bulk soil, and CIC and COC had the greatest influence on SOC. The SIC in bulk soil were significantly negatively correlated to CSIC and CSOC. Therefore, desertification control is extremely important to reduce soil carbon loss in desert grassland.

收稿日期: 2018-08-09

资助项目: 宁夏自然科学基金项目(NZ17004); 宁夏回族自治区西部一流学科项目(NXYLXK2017B06)

第一作者: 李巧玲(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事恢复生态研究。E-mail: liqiaoling65@163.com

通信作者: 安慧(1981—), 女, 博士, 研究员, 主要从事恢复生态研究。E-mail: anhui08@163.com

**Keywords:** desert grassland; soil inorganic carbon; soil organic carbon density; desertification

由于全球气候变化和过度放牧等人类活动的影响,大部分草原的植被和土壤出现不同方式和程度的退化<sup>[1]</sup>。草原退化严重威胁干旱、半干旱地区畜牧业的可持续发展,影响社会经济状况和人类生存。当前,我国沙漠化土地约为  $3.59 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占国土面积的 3.74%<sup>[2]</sup>。沙漠化是草原退化的极端表现形式,也是荒漠化的形式之一<sup>[3]</sup>。沙漠化过程中土壤粗化、结构松散、养分含量降低影响土壤持水力、紧实度以及对矿质元素的黏结性<sup>[4]</sup>。土壤沙漠化导致土壤养分和生产潜力降低是引起植被退化的直接因素,造成草原结构和功能失衡,并且促进风沙地貌形成。因此,草原沙漠化问题日益受到社会的普遍关注。

土壤碳库是评价土地退化程度的重要指数,由有机碳(SOC)和无机碳(SIC)库组成。SOC 主要由动植物残体、根系分泌物等有机物质的分解形成,不仅是植物养分循环的焦点,影响土壤侵蚀潜力和水分分布,而且对维持和巩固土壤结构的作用也很大<sup>[5]</sup>。SIC 是土壤风化成土过程中形成的矿物态碳,由原生碳酸盐和次生碳酸盐组成,其中次生碳酸盐主要是原生碳酸盐与二氧化碳(CO<sub>2</sub>)通过一系列的化学反应溶解再沉淀而形成<sup>[6]</sup>。SIC 库约占全球总碳库的 38%,是陆地生态系统中除 SOC 库外最大的碳库,主要存储于干旱、半干旱地区<sup>[7]</sup>。全球陆地面积约 32%属于干旱、半干旱地区,其中大量的 SIC 在缓解大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高过程中具有重要作用,并在全球碳循环中的贡献越来越大<sup>[8]</sup>。近年来,我国关于 SIC 的研究在西北地区逐渐增加。青藏高原深层 SIC 研究发现高寒草地不同土层 SICD 所占比例、SIC 含量均随土层深度的增加而显著下降<sup>[9]</sup>;而内蒙古栗钙土不同土地利用方式下 0—130 cm 土层 SIC 随土层深度增加而增大,不同植被类型影响土壤剖面 SIC 分布<sup>[6]</sup>。即人类和自然因素对干旱区 SIC 的影响显著。

荒漠草原是干旱、半干旱地区的过渡带,其生态系统承受和抵御干扰的能力十分脆弱<sup>[10]</sup>,是沙漠化发展和逆转的中间地区。近年来,大量研究<sup>[11-12]</sup>主要集中在草原沙漠化过程中植被群落、土壤养分和土

壤理化性质等方面,而关于荒漠草原沙漠化对 SIC 的研究较少。因此,以宁夏中北部盐池县不同沙漠化阶段的荒漠草原为研究对象,研究荒漠草原不同沙漠化阶段土壤全土和不同粒径组分 SIC 和 SOC 分布规律,探讨沙漠化对荒漠草原土壤碳库的影响,以期为荒漠草原生态系统的恢复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区盐池县(37°49' N, 107°27' E),海拔 1 411~1 435 m,是典型的干草原向荒漠草原的过渡地带。本区气候属于典型的中温带大陆性气候,年平均气温 8.2 °C,1 月(最冷)和 7 月(最热)平均气温分别为-8.7,22.4 °C。风沙活动频繁,多发生在冬春季节,年大风(平均风速 2.8 m/s)时间为 24 d,年均无霜期 165 d,年均降水量 280 mm,约 60%以上集中在 7—9 月,降水量年际变率大,年潜在蒸发量 2 710 mm<sup>[13]</sup>。

研究区土壤类型主要以地带性的灰钙土(淡灰钙土)为主,其次是草甸土和风沙土等非地带性土壤。该地区干旱少雨且土壤结构松散,土壤基质较差,植物稀疏低矮,群落结构不明显。草原植被类型有沙生植被、荒漠植被和盐生植被,植物种类中旱生和中旱生的植被数量大,分布面积广。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 该地区脆弱的环境条件和人类不合理的土地利用方式导致荒漠草原沙漠化加剧。根据地上植被群落特征和盖度等一系列变化,可推断荒漠草原沙漠化过程总体表现为:荒漠草原(DG)—固定沙地(FD)—半固定沙地(SFD)—流动沙地(MD)动态演化序列。采用空间代替时间的研究方法。研究区在空间上分布的不同沙漠化程度的荒漠草原,根据植被的指示性及盖度分级标准<sup>[11]</sup>(表 1),在研究区选择不同沙漠化阶段的荒漠草原、固定沙地、半固定沙地和流动沙地作为试验样地。以荒漠草原作为对照,每个样地中设置 3 个 50 m×50 m 的重复取样区,每个取样区间的环境条件基本一致。

表 1 草原沙漠化分级指数

沙漠化阶段	植被盖度/%	流沙面积/%	优势种	地表结皮
荒漠草原	70~80	<5	牛枝子( <i>Lespedeza potaninii</i> )	有土层和大量结皮覆盖
固定沙地	60~70	5~20	苦豆子( <i>Sophora alopecuroides</i> )和中亚百草( <i>Pennisetum centrasiaticum</i> )	50%以上被土层或结皮覆盖
半固定沙地	40~50	20~50	狗尾草( <i>Setaria viridis</i> )和阿尔泰狗娃花( <i>Aster altaicus</i> )	20%~50%以上物理结皮性和较少生物结皮
流动沙地	0~10	100	沙蓬( <i>Agriophyllum squarrosum</i> )	只有少量物理性结皮

1.2.2 土壤样品采集和粒径分组 2016 年 7 月底在荒漠草原不同沙漠化阶段的取样区内随机设置 3 个 1 m×1 m 的小样方,每个小样方用直径 9 cm 土

钻按“Z”形采集 0—30 cm(10 cm 间隔)土壤样品,每个土层 5 钻土样混合均匀(共 108 个土壤样品),装入自封袋带回实验室。自然风干,过 2 mm 土壤筛去除

石砾、植物根系、动物残体等肉眼可见的杂物。土壤样品研磨后过 0.15 mm 筛用于测定 SOC、STC 含量,并计算 SIC 含量。

2017 年 7 月底在荒漠草原不同沙漠化阶段的取样区内随机设置 3 个 1 m×1 m 的样方,每个样方用直径 9 cm 土钻按“Z”形采集 0—10 cm 土层土壤样品,每个土层 5 钻土样混合均匀(共 36 个土样),装入自封袋中带回实验室。风干后采用干筛法进行粒径分组:称取 200.0 g 风干土壤样品置于土壤套筛(2, 0.1, 0.05 mm)进行筛动,得到 0.1~2, 0.05~0.1, <0.05 mm 3 个粒径组分,可分别称为粗砂粒、细砂粒和黏粉粒。分别称取 3 g 不同粒径组分的土壤样品测定 SOC、SIC 含量。

土壤容重:在荒漠草原不同沙漠化阶段的取样区内随机设置 3 个 1 m×1 m 的小样方,每个小样方内挖土壤剖面利用环刀(100 cm<sup>3</sup>)测定 0—30 cm(10 cm 间隔)的土壤容重,每层 3 个重复。

### 1.2.3 土壤样品测定及计算

(1)土壤有机碳和无机碳含量。全土和不同粒径组分土壤样品用元素分析仪测定有机碳(SOC)和总碳(STC)含量,无机碳(SIC)含量为总碳(STC)含量减去有机碳(SOC)含量<sup>[9]</sup>。

有机碳含量(SOC):称取 40~60 mg 土壤样品,加入 25% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 浸没土壤,200 °C 蒸干后,使用元素分析仪测定。

总碳含量(STC):不经过 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 预处理,其余方法和使用仪器与土壤有机碳测定相同。

(2)土壤容重(BD):土壤样品在 105 °C 烘干至恒重,测定干土的质量。

$$BD = (M_2 - M_1) / V$$

式中:BD 为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);M<sub>1</sub> 为铝盒的重量(g);M<sub>2</sub> 为铝盒+烘干土质量(g);V 为环刀容积(cm<sup>3</sup>)。

(3)土壤碳密度:

$$\text{土壤总碳密度(STCD)} = \sum_{i=1}^n (1-\theta) \times BD_i \times T_i \times \text{STC}_i / 10$$

$$\text{土壤有机碳密度(SOCD)} = \sum_{i=1}^n (1-\theta) \times BD_i \times T_i \times \text{SOC}_i / 10$$

$$\text{土壤无机碳密度(SICD)} = \sum_{i=1}^n (1-\theta) \times BD_i \times T_i \times \text{SIC}_i / 10$$

式中: $n$  为土壤剖面的层数;STCD 为土壤总碳密度(kg C/m<sup>2</sup>);SOCD 为土壤有机碳密度(kg C/m<sup>2</sup>);SICD 为土壤无机碳密度(kg C/m<sup>2</sup>);STC 为土壤总碳含量(g/kg);SOC 为土壤有机碳含量(g/kg);SIC 为土壤无机碳含量(g/kg); $\theta$  为第  $i$  层 >2 mm 石砾(体积分数%),本研究土壤颗粒均小于 2 mm,因此可忽略不计;BD <sub>$i$</sub>  为第  $i$  层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);T <sub>$i$</sub>  为

第  $i$  层土层厚度(cm)。

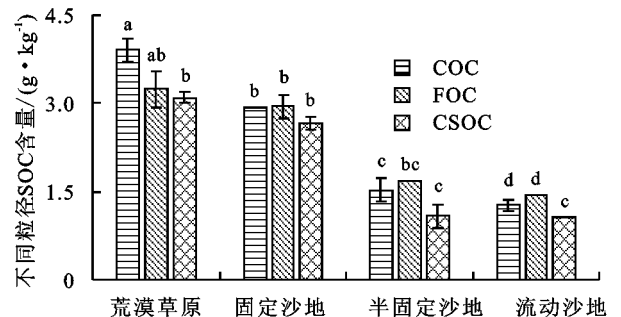
## 1.3 数据分析

采用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析,采用 One-way ANOVA 进行单因素方差分析,最小差异法(LSD)进行多重比较。采用多元逐步回归方法分析全土 SOC、SIC 与不同粒径组分 SOC、SIC 之间的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 荒漠草原 0—10 cm 不同粒径组分 SOC 和 SIC 分布特征

荒漠草原沙漠化对各粒径组分 SOC 含量影响显著( $P < 0.05$ ,图 1)。随着沙漠化程度的加剧,土壤粗砂粒有机碳(COC)、细砂粒有机碳(FOC)、黏粉粒有机碳(CSOC)含量均呈逐渐下降趋势。荒漠草原土壤粗砂粒有机碳、黏粉粒有机碳含量显著高于固定沙地、半固定沙地、流动沙地。固定沙地、半固定沙地、流动沙地土壤粗砂粒有机碳、黏粉粒有机碳含量分别比荒漠草原降低了 24.8%,61.3%,67.5%和 14.1%,65.1%,65.4%。荒漠草原、固定沙地土壤细砂粒有机碳含量显著高于半固定沙地和流动沙地。荒漠草原各粒径组分土壤有机碳含量表现为粗砂粒有机碳>细砂粒有机碳>黏粉粒有机碳,而固定沙地、半固定沙地、流动沙地均表现为细砂粒有机碳>粗砂粒有机碳>黏粉粒有机碳。



注:不同小写字母表示不同沙漠化阶段在 0.05 水平差异性。

图 1 沙漠化对荒漠草原不同粒径组分 SOC 含量的影响

荒漠草原沙漠化对各粒径组分 SIC 含量影响显著( $P < 0.05$ ,图 2)。随着荒漠草原沙漠化程度的加剧,土壤粗砂粒无机碳(CIC)和黏粉粒无机碳(CSIC)含量显著降低,而土壤细砂粒无机碳(FIC)含量呈先增加后降低趋势。固定沙地、半固定沙地、流动沙地土壤粗砂粒无机碳和黏粉粒无机碳含量分别比荒漠草原降低了 11.6%,27.8%,36.3%和 2.4%,21.6%,40.4%。荒漠草原、半固定沙地、流动沙地土壤黏粉粒无机碳含量均高于粗砂粒无机碳和细砂粒无机碳含量。固定沙地土壤细砂粒无机碳含量分别是荒漠草原、半固定沙地和流动沙地土壤细砂粒无机碳含量的 1.23, 1.50, 1.71 倍。

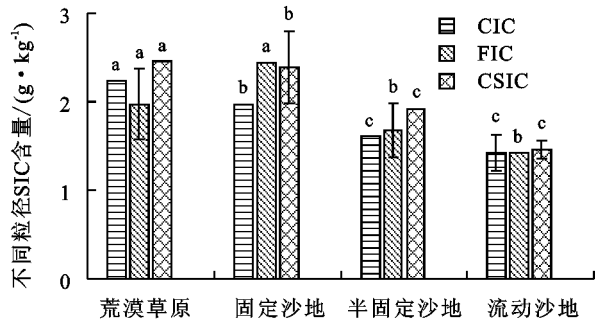


图 2 沙漠化对荒漠草原不同粒径组分 SIC 含量的影响

## 2.2 荒漠草原沙漠化对 SOC、SIC、STC 含量及密度分布特征的影响

荒漠草原不同沙漠化阶段 0—30 cm 土层 SOCD、SICD 及 STCD 差异显著 ( $P < 0.05$ , 表 2)。随着沙漠化程度的加剧, 0—30 cm 土层 SOCD、SICD 及 STCD 呈逐渐下降的趋势, 固定沙地、半固定沙地和流动沙

地 0—30 cm 土层 STCD、SICD 和 SOCD 分别比荒漠草原下降了 13.2%, 49.7%, 55.5%、6.7%, 35.9%, 47.0% 和 18.5%, 57.7%, 60.5%。荒漠草原、固定沙地 SIC 含量显著高于半固定沙地和流动沙地, 而荒漠草原和固定沙地差异不显著。随着荒漠草原沙漠化程度的不断加剧, SOCD/STCD 的在 0—10, 20—30, 0—30 cm 土层表现为荒漠草原 > 固定沙地 > 流动沙地 > 半固定沙地, 10—20 cm 土层 SOCD/STCD 随着沙漠化加剧呈先增加后降低趋势, 在固定沙地达到最大值。随着荒漠草原沙漠化程度的不断加剧, 0—30 cm 土层 SICD/STCD 表现为半固定沙地 > 流动沙地 > 固定沙地 > 荒漠草原。0—10 cm 土层 SICD/STCD 表现为半固定沙地 > 固定沙地 > 流动沙地 > 荒漠草原。10—20, 20—30 cm 土层 SICD/STCD 随着荒漠草原沙漠化的加剧, 整体呈增加趋势 (表 2)。

表 2 荒漠草原沙漠化对 SIC、SOC 含量和密度变化特征的影响

沙漠化阶段	土层深度/cm	SOC/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	SIC/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	STC/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	SOCD/ ( $kg C \cdot m^{-2}$ )	SICD/ ( $kg C \cdot m^{-2}$ )	STCD/ ( $kg C \cdot m^{-2}$ )	SOCD/ STCD/%	SICD/ STCD/%
荒漠草原	0—10	5.96±0.2a	2.39±0.0a	7.19±0.4a	8.92±0.4a	3.58±0.0a	12.50±0.3a	71	29
	10—20	3.58±0.5a	2.37±0.2a	5.70±0.6a	5.22±0.7a	3.45±0.4a	8.67±0.3a	60	40
	20—30	4.59±0.4a	3.06±0.1a	6.15±0.8a	6.87±0.6a	4.57±0.2a	11.43±0.8a	60	40
	0—30	4.61±0.2a	2.53±0.0a	7.13±0.1a	7.00±0.6a	3.87±0.1a	10.80±0.2a	64	36
固定沙地	0—10	3.78±0.3b	2.30±0.0b	5.82±0.1b	5.57±0.4b	3.40±0.0a	8.97±0.3b	62	38
	10—20	3.39±0.3a	2.27±0.1a	4.64±0.8b	4.93±0.5a	3.30±0.2a	8.23±0.4a	60	40
	20—30	4.45±0.1a	2.69±0.0b	7.13±0.2a	6.80±0.2a	4.11±0.9a	10.90±0.3a	62	38
	0—30	3.96±0.0b	2.54±0.0a	6.51±0.0b	5.77±0.2b	3.61±0.1b	9.37±0.0b	61	39
半固定沙地	0—10	2.01±0.0c	1.49±0.0c	3.50±0.1c	3.10±0.1c	2.29±0.0b	5.38±0.3c	57	43
	10—20	1.87±0.0b	1.57±0.0b	3.43±0.1b	2.82±0.0b	2.37±0.0b	5.19±0.2b	54	46
	20—30	1.94±0.2b	1.81±0.1c	3.44±0.1b	2.96±0.3b	2.77±0.1b	5.72±0.2b	52	48
	0—30	1.88±0.0c	1.62±0.0b	3.51±0.1c	2.96±0.1c	2.48±0.2c	5.43±0.0c	54	46
流动沙地	0—10	2.13±0.1c	1.21±0.0c	2.91±0.3c	3.22±0.2c	1.82±0.0c	5.04±0.3c	64	36
	10—20	1.58±0.1b	1.42±0.1c	3.01±0.0b	2.39±0.0b	2.15±0.0b	4.54±0.1b	53	47
	20—30	1.73±0.3b	1.41±0.0d	2.81±0.1b	2.66±0.5b	2.17±0.0c	4.83±0.9b	55	45
	0—30	1.71±0.0c	1.36±0.0c	3.06±0.1d	2.76±0.2c	2.05±0.0d	4.80±0.1d	57	43

注: 不同小写字母表示不同沙漠化阶段在 0.05 水平差异性。

随着土层深度的增加, 荒漠草原、固定沙地、半固定沙地和流动沙地 STCD、SOCD 整体呈先降低后增加的趋势, 且在 10—20 cm 土层有最小值。不同沙漠化阶段 SIC 随土层深度增加整体呈增加趋势, 荒漠草原、固定沙地 SIC、SICD 随着土层深度的增加呈先增加后减小趋势, 并在 10—20 cm 土层有最小值, 半固定沙地、流动沙地 SIC、SICD 随土层深度的增加而逐渐增加 (表 2)。随着土层深度的增加, 荒漠草原和半固定沙地 SICD/STCD 均呈增加趋势; 固定沙地和流动沙地 SICD/STCD 呈先增大后减小趋势。半固定沙地 SOCD/STCD 的表现为 20—30 cm 土层 > 10—20 cm 土层 > 0—10 cm 土层。固定沙地和流动沙地 SOCD/STCD 随土层深度的增加呈“V”形变化,

在 10—20 cm 土层为最小值 (表 2)。

## 2.3 土壤 SOC 与 SIC 的关系 (全土和不同粒径组分)

荒漠草原 0—30 cm 土层 SOC 与 SIC、SOCD 与 SICD 均呈显著正相关关系 ( $R^2$  分别为 0.24, 0.21, 图 3)。荒漠草原 0—10 cm 全土与各粒径组分 SOC、SIC 含量的逐步回归分析表明: 荒漠草原 0—10 cm 土层 SOC 与不同粒径组分 SOC 和 SIC 含量均呈显著正相关, 并且粗砂粒有机碳和粗砂粒无机碳贡献最大 ( $R^2$  分别为 0.76, 0.63, 图 4)。同时, SIC 与土壤黏粉粒有机碳和黏粉粒无机碳表现为负相关, 与土壤粗砂粒无机碳、细砂粒无机碳、细砂粒有机碳表现为显著的正相关关系, 其贡献依次为粗砂粒无机碳 > 细砂粒有机碳 > 细砂粒无机碳 ( $R^2$  分别为 0.61, 0.73, 图 4)。

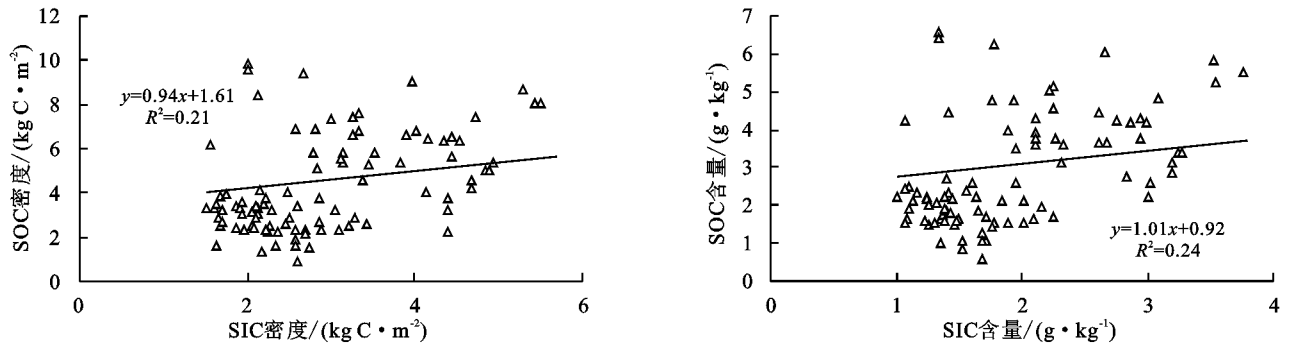
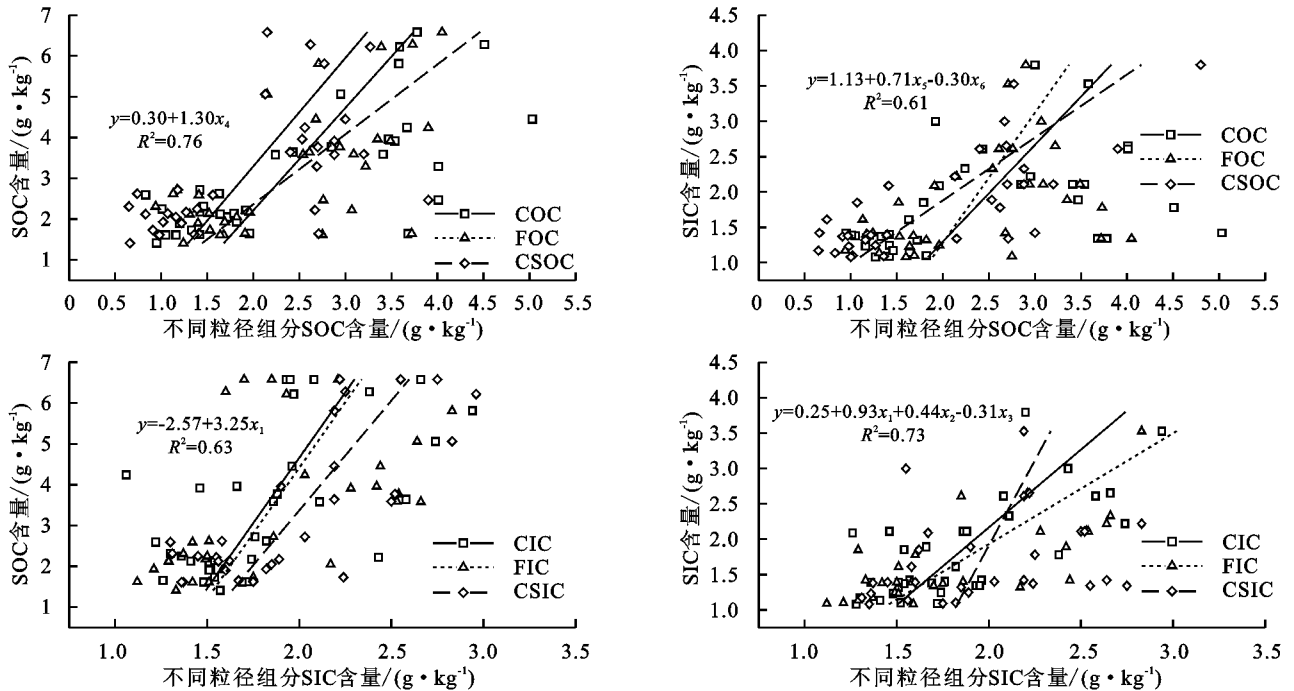


图 3 荒漠草原 0—30 cm 土层 SOC 和 SIC 之间的关系



注:  $x_1$  为土壤粗砂粒无机碳 (g/kg);  $x_2$  为土壤细砂粒无机碳 (g/kg);  $x_3$  为土壤黏粉粒无机碳 (g/kg);  $x_4$  为土壤粗砂粒有机碳 (g/kg);  $x_5$  为土壤细砂粒有机碳 (g/kg);  $x_6$  为土壤黏粉粒有机碳 (g/kg)。

图 4 全土 SOC 和 SIC 与不同粒径组分 SOC 和 SIC 之间的关系

### 3 讨论

#### 3.1 沙漠化对荒漠草原不同粒径组分 SOC 和 SIC 的影响

在干旱、半干旱地区,过度放牧和风蚀是导致沙漠化的主要原因<sup>[12]</sup>。土地沙漠化引起土壤粒径的强烈分选,土壤粗砂粒含量逐渐增加,细砂粒和黏粉粒含量减小,不同粒径的土壤颗粒对土壤碳的吸附能力不同,导致土壤的粗化和贫瘠化<sup>[11]</sup>。本研究结果与吴建国等<sup>[14]</sup>有机碳研究结果一致。荒漠草原沙漠化过程中风蚀有选择的吹蚀土壤中的小粒径颗粒使土壤粗化程度加剧,使新鲜根系和植物残体分解速率下降,进而导致土壤有机碳含量明显下降<sup>[15]</sup>。土壤真菌以及其他土壤微生物将土壤粗砂粒有机碳分解为细砂粒有机碳,增加土壤细砂粒有机碳含量<sup>[16]</sup>。土壤水分是土壤无机碳形成、移动的重要载体<sup>[17]</sup>。沙漠化导致表层土壤蓄水保水能力不断下降,减少土壤截留的降雨量,而不同粒径土壤颗粒持水性差异较

大。土壤黏粉粒表面积大且吸附能力强,可截留较多降水,有利于无机碳淋溶沉淀;且土壤黏粉粒较强的黏结性使形成的土壤块体强度高、紧实度大,从而使黏粉粒抵抗外力强,结构稳定<sup>[18]</sup>。

#### 3.2 沙漠化对荒漠草原土壤无机碳、有机碳含量及密度的影响

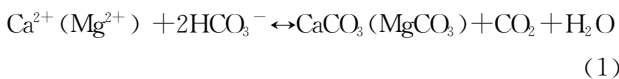
放牧引起的土壤沙漠化是 SOC 降低的主导因素。从荒漠草原退化至流动沙地,植被多样性、盖度等的下降不仅减小 SOC 的输入量;而且破坏土壤结构,使土壤微生物生长繁殖速度缓慢,土壤酶活性降低;不利于植物残体的分解作用,进而降低 SOC 含量蓄积<sup>[19]</sup>。本研究与伊犁山地 SOC 含量随土层深度的增加而降低的结果一致<sup>[20]</sup>。随着土层深度增加,植物根系的分布范围和土壤温度的变化,影响土壤细菌、放线菌活动及一些酶的活性,减缓土壤呼吸速率和根系、凋落物的分解作用,最终影响深层 SOC 的蓄积<sup>[21]</sup>。

SIC 的来源及转换速率主要是受土壤水分和土

壤母质的影响<sup>[6]</sup>。沙漠化导致荒漠草原土壤裸露面积增加,使表层土壤水分容易蒸发。有研究<sup>[17]</sup>表明,土壤含水量越少,碳酸盐的淋溶、淀积作用越弱,碳酸盐含量越少。SIC 与土壤母质的岩性关系密切,砂岩、花岗岩和页岩母质发育的土壤碳酸盐含量低<sup>[6]</sup>。本研究区灰钙土母质多为第四纪洪积冲积物,土壤剖面 SIC 含量较高<sup>[22]</sup>。杨黎芳等<sup>[6]</sup>研究表明,栗钙土无机碳的分布类型可分为 2 种:低—高—(低)—(高)型和高—低—(高)—(低)型。本研究区 0—30 cm 土层 SIC 分布属于第 2 种类型,即高—低—(高)型。SIC 随着土壤水分向深层土壤淋溶的过程中,土壤温度、CO<sub>2</sub> 浓度随之下降<sup>[7]</sup>,促使 SIC 向深层湿润的土壤富集,从而导致表层 SIC 含量降低。

### 3.3 荒漠草原 SOC 和 SIC 的关系

本研究中,荒漠草原 SOC 和 SIC、SOC<sub>D</sub> 和 SIC<sub>D</sub> 均呈显著正相关( $R^2$  分别为 0.24, 0.21, 图 3)。与新疆伊犁沙漠地区有关 SOC 和 SIC 呈显著正相关的结果一致<sup>[23]</sup>。



通常, SOC 分解出 CO<sub>2</sub>, 产生 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 H<sup>+</sup>。促进化学方程(1)向右发生反应,形成 CaCO<sub>3</sub> 和 MgCO<sub>3</sub> 沉淀,即 SOC 和 SIC 为正相关关系。本研究区以灰钙土为主(pH>8),富含 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>,促进碳酸盐沉淀的形成。

土壤 0—10 cm 各粒径组分 SOC 和 SIC 易受人类活动(过度放牧)影响。多元逐步回归分析结果显示,随着沙漠化程度的加剧,土壤粗砂粒有机碳和粗砂粒无机碳均对 SOC 含量影响最大。这与 Zinn 等<sup>[24]</sup>不同土地利用和土壤管理方式导致粗砂粒有机碳含量损失最大的研究结果一致。随着荒漠草原沙漠化程度的加剧,富含大量有机质物质的表层土壤细砂粒和黏粉粒大量损失,土壤粗砂粒明显增多,造成土壤粗砂粒有机碳对 SOC 含量也有较大影响;且土壤粗砂粒有机碳可转换成粗砂粒无机碳,进而土壤粗砂粒无机碳含量对 SOC 含量影响最大。另外,荒漠草原不同沙漠阶段土壤细砂粒无机碳、细砂粒有机碳含量对 SIC 含量影响较大。沙漠化过程中土壤细砂粒含水量相对于土壤粗砂粒较高<sup>[18]</sup>,有利于 SIC 的沉淀积累。

## 4 结论

(1)随着沙漠化程度的加剧,荒漠草原 0—30 cm 土层土壤 SOC 和 SIC 均呈显著下降趋势。土壤 SOC 随土层深度增加而减少,而 SIC 呈相反变化规律。

(2)荒漠草原 0—10 cm 土层不同粒径组分中土壤粗砂粒无机碳、黏粉粒无机碳、粗砂粒有机碳、细砂粒有机碳、黏粉粒有机碳含量均随着沙漠化程度的加

剧而降低。

(3)荒漠草原 SOC、SIC 含量和密度均为正相关关系,其中 SOC<sub>D</sub>、SIC<sub>D</sub> 更能充分反映土壤 SOC 和 SIC 之间的关系。

### 参考文献:

- [1] 王宏,李晓兵,李霞,等. 中国北方草原对气候干旱的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 172-182.
- [2] 刘新平,张会,赵哈林,等. 科尔沁沙地流动沙丘土壤水分和特征常数的空间变化分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 156-159.
- [3] 吕子君,卢欣石,辛晓平,等. 中国北方草原沙化现状与趋势[J]. 草地学报, 2005, 13(增刊 1): 24-27.
- [4] 王长庭,王根绪,刘伟,等. 高寒草甸不同类型草地土壤机械组成及肥力比较[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 160-165.
- [5] Han G D, Hao X Y, Zhao M L, et al. Effect of grazing intensity on carbon and nitrogen in soil and vegetation in a meadow steppe in Inner Mongolia [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008, 125(1): 21-32.
- [6] 杨黎芳,李贵桐,赵小蓉,等. 栗钙土不同土地利用方式下有机碳和无机碳剖面分布特征[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 158-162.
- [7] 杨黎芳,李贵桐. 土壤无机碳研究进展[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 986-990.
- [8] Li Z P, Han F X, Su Y, et al. Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China [J]. Geoderma, 2007, 138(1): 119-126.
- [9] 张蓓蓓,刘芳,丁金枝,等. 青藏高原高寒草地 3 m 深度土壤无机碳库及分布特征[J]. 植物生态学报, 2016, 40(2): 93-101.
- [10] 关中美,郝成元. 我国干旱半干旱地区脆弱生态系统及其退化成因[J]. 生态经济, 2013, 11(9): 158-162.
- [11] 唐庄生, 安慧, 邓蕾, 等. 荒漠草原沙漠化植物群落及土壤物理变化[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 991-1000.
- [12] 李玉强,赵哈林,赵学勇,等. 科尔沁沙地沙漠化过程中土壤碳氮特征分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 73-77.
- [13] 王兴,宋乃平,杨新国,等. 放牧扰动下草地植物多样性对土壤因子的响应[J]. 草业学报, 2013, 22(5): 27-36.
- [14] 吴建国,张小全,徐德应,等. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 593-599.
- [15] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等. 我国西北干旱区的荒漠化过程及其空间分异规律[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 1-8.
- [16] 李海波,韩晓增,尤孟阳,等. 不同土地利用与施肥管理下黑土团聚体颗粒有机碳分配变化[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 184-189.
- [17] 谭丽鹏,何兴东,王海涛,等. 腾格里沙漠油蒿群落土壤水分与碳酸钙淀积关系分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 701-705.

蓄功能十分微弱,为保证较好的拦蓄效果,在林地中度退化阶段就应该研究对策抑制退化程度的加深。

(2)3种退化程度林下土壤在最大持水量、最小持水量、毛管持水量、非毛管持水量、毛管孔隙度及总孔隙度等指标中度退化均最大,轻度退化次之,重度退化在6项指标中均最小。土壤硬度为重度退化>轻度退化>中度退化;林地土壤入渗时间和入渗速率之间存在较好的幂函数关系。综合3种退化程度枯落物和土壤水源涵养功能,中度退化水源涵养功能较轻度退化林分略有下降,但幅度较小,重度退化林分水源涵养功能下降明显。

#### 参考文献:

- [1] 方升佐. 中国杨树人工林培育技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2308-2316.
- [2] 郑春雅, 许中旗, 马长明, 等. 冀西北坝上地区退化防护林的土壤性质[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 203-207.
- [3] 邢海富. 坝上杨树防护林死亡原因浅析[J]. 河北林业科技, 2015(1): 76-77.
- [4] 马任甜, 方瑛, 安韶山. 云雾山草地植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1170-1180.
- [5] 张峰, 彭祚登, 安永兴, 等. 北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J]. 林业科学, 2010, 46(10): 6-14.
- [6] 赵鸣飞, 薛峰, 吕焯, 等. 黄土高原森林枯落物储量、厚度分布规律及其影响因素[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7364-7373.
- [7] 马雪华, 杨茂瑞, 胡星弼. 亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究[J]. 林业科学, 1993(3): 199-206.
- [8] 魏文俊, 尤文忠, 赵刚, 等. 退化柞蚕林封育对枯落物和表层土壤持水效能的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 721-728.
- [9] 魏强, 凌雷, 张广忠, 等. 甘肃兴隆山主要森林类型凋落物累积量及持水特性[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2589-2598.
- [10] 董伯骞, 黄选瑞, 夏明瑞. 退化华北落叶松林枯落物对近自然经营的短期响应[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 52-58.
- [11] 陈波, 孟成生, 赵耀新, 等. 冀北山地不同海拔华北落叶松人工林枯落物和土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 216-221.
- [12] Lamb E G, Han S, Lanoil B D, et al. A High Arctic soil ecosystem resists long-term environmental manipulations[J]. Global Change Biology, 2011, 17(10): 3187-3194.
- [13] 杨丹, 樊大勇, 谢宗强, 等. 消落带生态系统氮素截留转化的主要机制及影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 973-980.
- [14] 樊登星, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京西山不同林分枯落物层持水特性研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, (增刊2): 177-181.
- [15] 王鹏程, 肖文发, 张守攻, 等. 三峡库区森林植被林地枯落物现存量及其持水能力[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(4): 41-47.
- [16] 宣立辉, 康凡, 谷建才, 等. 冀北地区典型林分枯落物层与土壤层的水文效应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 86-91.
- [17] 王安宁, 蔺鑫, 穆枫, 等. 冀北木兰围场沙荒坡地不同坡位黄柳沙障内枯落物的持水性能[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(1): 98-107.
- [18] 郑春雅. 冀西北坝上地区杨树防护林退化原因研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2016.
- [18] 张继义, 赵哈林. 退化沙质草地恢复过程土壤颗粒组成变化对土壤-植被系统稳定性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1395-1401.
- [19] 刘楠, 张英俊. 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响[J]. 草业科学, 2010, 27(4): 11-14.
- [20] 孙慧兰, 李卫红, 杨余辉, 等. 伊犁山地不同海拔土壤有机碳的分布[J]. 地理科学, 2012, 32(5): 603-608.
- [21] 高雪峰, 韩国栋, 张功, 等. 荒漠草原不同放牧强度下土壤酶活性及养分含量的动态研究[J]. 草业科学, 2007, 24(2): 10-13.
- [22] 张秀珍, 刘秉儒, 詹硕仁. 宁夏境内12种主要土壤类型分布区域与剖面特征[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(9): 48-50, 63.
- [23] 凌智永, 李志忠, 王少朴, 等. 伊犁可克达拉剖面有机碳、碳酸钙分布特征及其环境意义[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(2): 195-199.
- [24] Zinn Y L, Lal R, Resck D V, et al. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils [J]. Geoderma, 2005, 127(1): 168-173.

(上接第 103 页)