

闫蒙,王旭洋,周立业,等.科尔沁沙地沙漠化过程中土壤有机碳含量变化特征及影响因素[J].中国沙漠,2022,42(5):221-231.

科尔沁沙地沙漠化过程中土壤有机碳含量变化特征及影响因素

闫蒙¹,王旭洋²,周立业¹,李玉强²

(1.内蒙古民族大学 农学院, 内蒙古 通辽 028000; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 奈曼沙漠化研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 科尔沁沙地是中国半干旱地区沙漠化发展的典型地区和沙漠化防治的重点区域。本研究以科尔沁沙地为研究区域,以沙漠化逆转不同阶段的沙地为研究对象,通过野外调查和室内分析,采用空间代替时间的方法,在区域尺度上探讨了土壤有机碳对沙漠化过程的响应规律,并结合气候、植被和地形因子阐释了该区域土壤有机碳空间变异的主导因素。结果表明:(1)土壤有机碳含量随沙漠化程度的加剧表现出疏林草地(未沙漠化)>固定沙地(轻度沙漠化)>半固定沙地(中度沙漠化)>半流动沙地(重度沙漠化)>流动沙地(极重度沙漠化)。(2)固定沙地、半固定沙地、半流动沙地和流动沙地土壤有机碳密度分别比疏林草地降低了29.1%、49.3%、62.9%和84.1%。(3)随着沙漠化的发展,土壤质地发生粗化现象,即中、细砂粒含量明显增加,而土壤细颗粒(极细砂和黏粉粒)含量明显下降。(4)科尔沁沙地沙漠化过程中,土壤黏粉粒的损失是土壤粗化、有机碳含量下降的主要原因,而pH的变化受沙漠化影响较小。(5)气候因子是导致SOC含量受经纬度影响的主要因素,而地形因子的影响次之。

关键词: 土壤有机碳; 科尔沁沙地; 沙漠化; 区域尺度; 主成分分析

文章编号: 1000-694X(2022)05-221-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00041

中图分类号: S53

文献标志码: A

0 引言

土地沙漠化是人地关系不协调导致的在干旱、半干旱及部分半湿润地区以风沙活动为主要标志的土地退化过程^[1],分布广泛、危害严重、威胁人口众多,受到了社会和学术界的广泛关注^[2-3]。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,其中SOC是全球碳循环的重要组成部分,调节着陆地生态系统的平衡^[4-5]。SOC主要由动植物残体、根系分泌物等有机物质的分解形成,既是植物养分循环的焦点,又可以维持和巩固土壤结构,而且会影响土壤侵蚀潜力和水分分布^[6]。据不完全统计,在全球范围内大约1 550 Pg碳以有机质的形式储存于土壤中,大约是植物碳储量的3倍,是大气碳储量的2倍^[7-8]。土壤有机碳库拥有如此巨大的储量,使得其微小的变化

都会引起全球气候的波动。因此,SOC库在全球碳平衡中具有十分重要的作用。

目前,关于沙漠化过程中SOC的变化特征及演变规律已有不少研究。刘树林等^[9]对浑善达克沙地沙漠化过程中土壤粒度与养分变化关系研究表明,沙漠化土地表层土壤中SOC含量与土壤黏粒含量和粗粉沙含量之间存在很好的相关性,尤其与土壤黏粒含量的相关性非常高;马建业等^[10]通过分析毛乌素沙地逆转过程中土壤颗粒固碳效应发现,土壤颗粒均表现出显著的固碳效应,且以砂粒和粉粒为主要固碳组分;赵哈林等^[11]为了了解呼伦贝尔沙质草地沙漠化过程中土壤理化特性的变化规律,调查分析了不同类型沙漠化草地土壤理化特性的差异和变化特征,发现随着沙漠化的发展SOC含量明显下降,并且与土壤黏粉粒含量、土壤硬度显著正相

收稿日期:2022-01-23; 改回日期:2022-03-17

资助项目:国家自然科学基金项目(32001214);内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2022YFDZ0028);中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室开放课题(KLDD-2020-008)

作者简介:闫蒙(1997—),男,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,主要从事草地生态学研究。E-mail: ymeng324@163.com

通信作者:周立业(E-mail: toni2002@126.com);王旭洋(E-mail: xuyangwang@lzb.ac.cn)

关。然而,前人的研究结果大多建立在点尺度上,样地之间距离较小,无法考虑到不同沙漠化阶段样点之间 SOC 的空间异质性,缺乏从区域尺度揭示沙漠化过程中 SOC 的演变规律,因此有关沙漠化过程中 SOC 含量区域尺度的变化特征及其影响机制有待进一步研究。

科尔沁沙地位于半干旱农牧交错区东端,水热条件相对比较优越,近年来,由于气候变化及人类不合理地过度利用,该地区的顶极植被群落类型——疏林草原植被遭到严重破坏,造成了不同类型、不同程度的土地沙漠化^[1],许多学者围绕科尔沁沙地沙漠化在土壤碳、氮分布^[12]、植物-土壤系统碳氮储量动态^[13]等方面进行了大量的研究,然而对于科尔沁沙地在沙漠化过程中 SOC 含量在区域尺度变化特征及其影响因素方面的研究较少。因此本研究从区域尺度出发,以科尔沁沙地不同沙漠化阶段的土壤为研究对象,通过野外调查取样,利用空间序列代替时间演替的方法,选取不同沙漠化阶段(疏林草地、固定沙地、半固定沙地、半流动沙地、流动沙地)的土壤,分析沙漠化过程对 SOC 含量的影响,探究 SOC 变化特征及其影响机制,以期为科尔沁沙地恢复治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地核心区(42.3°—44.5°N、118.5°—123.5°E,海拔 180—650 m),是典型的半干旱区域,总面积约 5.06 万 km²,属于大陆性半干旱、半湿润季风气候,年平均气温 5.8—6.4 °C,年降水量 343—451 mm,其中 70% 集中于夏季,年蒸发量 1 500—2 500 mm。年平均风速 3.5—4.5 m·s⁻¹,春季平均风速 4.2—5.9 m·s⁻¹,风速≥17 m·s⁻¹ 的大风日数 25—40 d,其中沙尘暴天气 10—15 d,主要出现在春季。土壤类型以栗钙土、黑钙土和风沙土为主,地貌以平缓的流动沙丘、半流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘与丘间甸子地镶嵌分布为特征。植被以沙生植物为主,主要植物种包括黄柳(*Salix gordejewii*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)等^[14]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择

该地区气候变化和人类不合理的土地利用方式导致土地沙漠化加剧。基于当前科尔沁沙地沙漠化程度分类图^[15]以及根据地上植被群落特征和盖度等,将该区域退化过程分为疏林草地(未沙漠化)、固定沙地(轻度沙漠化)、半固定沙地(中度沙漠化)、半流动沙地(重度沙漠化)以及流动沙地(极重度沙漠化,表 1),采用空间代替时间的研究方法,以经度相隔 10′ 和纬度相隔 5′ 的经纬度线的交叉点作为调查点,在不同沙漠化阶段的疏林草地、固定沙地、半固定沙地、半流动沙地和流动沙地分别设置调查样点 20、88、47、47、19 个,共设置样点 221 个(图 1)。

表 1 科尔沁沙地沙漠化程度划分标准^[16]

Table 1 Division standard of desertification degree in Horqin Sandy Land^[16]

沙漠化程度	裸沙面积占比/%	植被盖度/%
轻度沙漠化	<5	>60
中度沙漠化	5—25	30—60
重度沙漠化	25—50	10—30
极重度沙漠化	>50	<10

1.2.2 土壤样品采集

2021 年 8—9 月,在科尔沁沙地不同沙漠化阶段的每个采样点,随机设置 3 个 5 m×5 m 的小样方,分别在 5 m×5 m 样方内按“五点取样法”选取 5 个钻点,用直径 2.5 cm 的土钻取样,分 0—10、10—20 cm 两层,每个小样方内 5 个点相同层次的土样均匀混合组成 1 个混合样,每一小样方获得 2 个混合样品(每土层 1 个),每一位点 3 个小样方计 6 个混合样。同时每个样方中用环刀(100 cm³)分层(0—10、10—20 cm)取原状土,测定不同土层土壤的容重。

1.2.3 土壤样品测定及计算

土壤在自然状态下风干,过 2 mm 土壤筛,并去肉眼可见根和除枯枝落叶等杂物,测定土壤基本理化性质。土壤有机碳(SOC)用重铬酸钾-硫酸外加热法;全氮(TN)用半微量凯氏定氮法;全磷(TP)采用硫酸-高氯酸消煮,钼锑抗比色法;土壤容重(SBD)采用烘干法测定,土壤样品在 105 °C 烘干至恒重,测定干土的质量^[17]:

$$SBD = (M_2 - M_1)/V \quad (1)$$

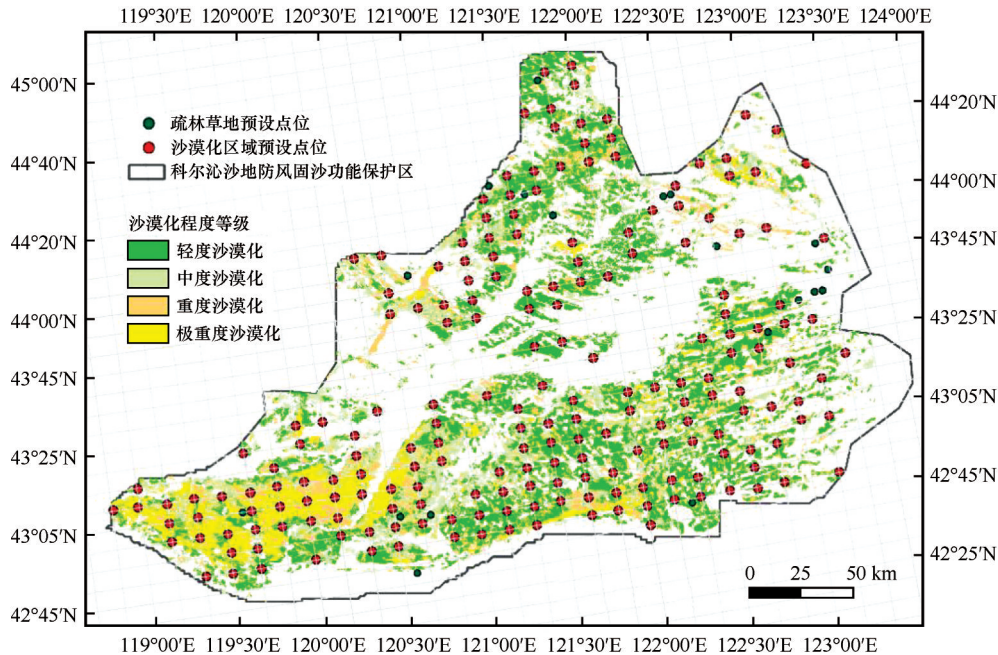


图1 样点分布
Fig.1 Sample distribution

式中： SBD 为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)； M_1 为铝盒的重量(g)； M_2 为铝盒+烘干土质量(g)； V 为环刀容积(cm^3)。

土壤有机碳(SOC)密度公式如下：

$$SOCD = \sum_{i=1}^m SOC_i SBD_i D_i \quad (2)$$

式中： $SOCD$ 是土壤有机碳密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)； SOC_i 是第*i*层的土壤有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)； SBD_i 是第*i*层的土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)； D_i 是第*i*层的土层厚度(m)； m 是土层的数量^[18]。

土壤pH值用Multiline P4 pH探头(水：土=2.5：1)测定；土壤电导率用Multiline P4电导率探头(水：土=5：1)测定，土壤机械组成采用湿筛法^[17]测定，粒级及分类见表2^[19]。

表2 土壤粒级
Table 2 Soil particle size

粒径/mm	分类
2.00—0.50	粗砂
0.50—0.25	中砂
0.25—0.10	细砂
0.10—0.05	极细砂
<0.05	黏粉粒

1.2.4 环境因子数据获取

环境因子包括气象因子、地形因子及植被指数，其中气象因子包括年降水量、年积温、生长季

(5—9月)平均气温和生长季降水量，由中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)收集；地形因子包括高程、坡度、地面粗糙度和剖面曲率，来自航天飞机雷达地形任务数字高程模型(DEM；<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>)；植被指数包括归一化植被指数($NDVI$)和增强植被指数(EVI)，通过卫星遥感数据中提取(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)。使用ArcMap GIS软件10.7版将所有环境变量统一转换为空间分辨率为500 m的栅格数据。

1.3 数据分析

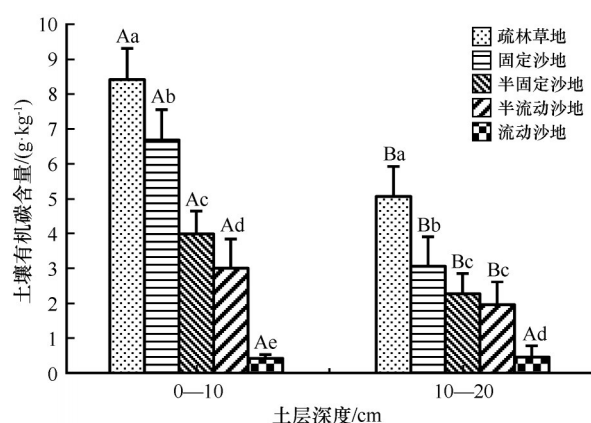
采用SPSS26.0进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)分析比较不同土层SOC在不同沙漠化阶段的差异($\alpha=0.05$)，采用Pearson相关系数法确定各因子间相关关系，采用主成分分析法对相关土壤因子及环境因子进行分析，采用一元线性回归分析法分析SOC与土壤各主要理化性质之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 沙漠化过程同一土层土壤有机碳含量特征

在沙漠化过程中，除流动沙地下层(10—20 cm)土壤中SOC含量略高于上层(0—10 cm)外，其他均为上层SOC含量高于下层，且上下两层土壤SOC含

量均呈显著性差异($P<0.05$,图2)。同一土层土壤SOC含量均随沙漠化程度的加剧而降低,0—10 cm土层中,不同沙漠化阶段有机碳含量差异显著($P<0.05$);10—20 cm土层中,疏林草地SOC含量显著高于其他阶段($P<0.05$),但半固定沙地与半流动沙地土壤SOC含量无显著差异($P>0.05$)。0—10 cm土壤上层SOC含量占整个剖面(0—20 cm)SOC含量的47.7%—68.6%。此外,SOC含量在疏林草地0—10 cm土层土壤达到最大值,为 $8.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,在流动沙地0—10 cm土层土壤降至最低,为 $0.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。



不同大写字母表示同一沙漠化阶段不同土层间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一土层不同沙漠化阶段间差异显著($P<0.05$)

图2 同一土层深度土壤有机碳含量沿沙漠化程度分布特征

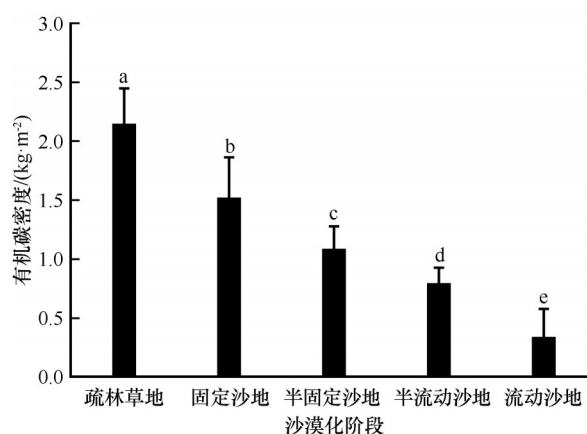
Fig.2 Distribution characteristics of soil organic carbon content along desertification degree at the same soil layer depth

2.2 不同沙漠化阶段SOC密度

在科尔沁沙地沙漠化过程中,SOC密度随沙漠化程度的加剧呈下降趋势,且不同沙漠化阶段SOC密度差异显著($P<0.05$,图3),其中顶极植被群落的疏林草地SOC密度最高,为 $2.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,而发生极重度沙漠化的流动沙地SOC密度最低,仅为 $0.34 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.3 土壤因子相关指标及与土壤有机碳含量相关关系

除流动沙地外,同一沙漠化阶段土壤全氮含量(STNC)和土壤全磷含量(STPC)均为上层土壤(0—10 cm)高于下层土壤(10—20 cm),其中疏林草地0—10 cm土层的全氮含量和全磷含量均最高,分别为 $0.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,并且均随沙漠化程度的加深而降低,除半流动沙地和流动沙地外,其他均



不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著

图3 土壤有机碳(SOC)密度随沙漠化过程变化特征

Fig.3 Variation characteristics of soil organic carbon (SOC) density with desertification process

呈现显著性差异($P<0.05$,表3)。土壤容重随沙漠化程度的加深而增大,但同一土层所有沙漠化阶段均无显著性差异($P>0.05$)。固定沙地两个土层的pH值均最高;土壤电导率随着沙漠化程度的加深而降低,疏林草地和固定沙地两个土层土壤电导率显著高于其他沙漠化阶段($P<0.05$);土壤粗砂粒和中砂粒含量均为半固定沙地与半流动沙地最高,而细砂粒为流动沙地最高且显著高于其他沙漠化阶段($P<0.05$),土壤极细砂粒与黏粉粒随沙漠化程度的加深而减少,并且除半固定沙地与半流动沙地外,上层土壤极细砂粒与黏粉粒均高于下层土壤,流动沙地细砂粒显著高于其他沙漠化阶段($P<0.05$)。

不同土层SOC含量与全氮含量、全磷含量均呈极显著相关关系($P<0.01$,表4),土壤电导率仅与0—10 cm土层SOC含量呈极显著负相关关系($P<0.01$);不同土层SOC含量与土壤pH值无显著性相关关系($P>0.05$);0—10 cm土层SOC含量与电导率呈极显著相关关系($P<0.01$);土壤容重仅与10—20 cm土层SOC含量存在极显著相关关系($P<0.01$);土壤细砂、极细砂及黏粉粒仅与0—10 cm上层土壤SOC含量呈显著负相关关系($P<0.05$)。这说明科尔沁沙地不同沙漠化阶段0—20 cm土层SOC含量的改变依赖于全氮、全磷含量的变化,以及由于沙漠化程度的加重导致的土壤机械组成变化。

2.4 影响土壤有机碳含量的土壤因子

本研究通过主成分分析提取影响科尔沁沙地不同沙漠化阶段土壤各层SOC的主要土壤因子(表5)。结果显示,0—10 cm土层中,影响科尔沁沙

表 3 不同沙漠化阶段不同土层土壤因子相关指标

Table 3 Relevant indicators of environmental factors of different soil layers in different desertification stages

土壤因子	土层深度 /cm	沙漠化阶段				
		疏林草地	固定沙地	半固定沙地	半流动沙地	流动沙地
土壤全氮含量/(g·kg ⁻¹)	0—10	0.91±0.11 ^a	0.60±0.04 ^b	0.33±0.14 ^c	0.15±0.06 ^d	0.07±0.01 ^d
	10—20	0.37±0.05 ^a	0.27±0.01 ^b	0.17±0.07 ^c	0.12±0.07 ^d	0.06±0.01 ^d
土壤全磷含量/(g·kg ⁻¹)	0—10	0.20±0.01 ^a	0.15±0.04 ^b	0.11±0.03 ^c	0.09±0.02 ^d	0.06±0.02 ^d
	10—20	0.15±0.01 ^a	0.10±0.03 ^b	0.08±0.02 ^{bc}	0.07±0.02 ^c	0.06±0.01 ^c
土壤容重/(g·cm ⁻³)	0—10	1.61±0.06 ^a	1.63±0.06 ^a	1.64±0.07 ^a	1.63±0.06 ^a	1.64±0.04 ^a
	10—20	1.64±0.06 ^a	1.66±0.04 ^a	1.66±0.07 ^a	1.67±0.06 ^a	1.67±0.03 ^a
pH 值	0—10	7.02±0.69 ^{ab}	7.21±0.69 ^{ab}	6.80±0.61 ^{ab}	6.72±0.54 ^b	6.90±0.66 ^{ab}
	10—20	7.07±0.47 ^b	7.59±0.84 ^a	7.09±0.67 ^b	6.88±0.61 ^b	6.90±0.71 ^b
电导率/(μS·cm ⁻¹)	0—10	42.38±4.71 ^a	39.17±3.87 ^a	27.18±4.20 ^b	19.55±3.88 ^c	13.82±1.32 ^d
	10—20	36.20±2.50 ^a	37.41±5.44 ^a	25.19±5.53 ^b	21.70±3.79 ^{bc}	17.20±5.03 ^c
粗砂/%	0—10	1.29±0.33 ^b	1.39±0.40 ^b	2.10±0.40 ^a	1.90±0.42 ^a	0.58±0.36 ^c
	10—20	1.27±0.46 ^{ab}	1.18±0.44 ^{ab}	2.01±0.31 ^a	2.18±0.93 ^a	0.75±0.12 ^b
中砂/%	0—10	14.36±3.57 ^b	18.02±3.23 ^a	20.74±2.86 ^a	19.62±2.85 ^a	9.54±2.08 ^c
	10—20	16.23±3.87 ^b	17.48±1.33 ^b	23.82±5.31 ^a	19.26±4.27 ^b	9.25±1.13 ^c
细砂/%	0—10	45.43±7.38 ^c	51.70±7.83 ^d	57.40±8.07 ^c	64.60±7.99 ^b	72.61±8.87 ^a
	10—20	54.02±2.54 ^b	56.07±5.55 ^b	59.02±6.44 ^b	60.40±6.01 ^b	74.70±7.22 ^a
极细砂/%	0—10	16.97±3.01 ^a	13.47±3.01 ^b	9.52±2.81 ^c	6.62±2.18 ^d	7.28±2.26 ^d
	10—20	14.49±3.72 ^a	11.27±2.51 ^b	9.54±1.38 ^b	7.64±1.36 ^b	7.31±1.90 ^b
黏粉粒/%	0—10	21.20±3.52 ^a	17.11±4.01 ^b	11.69±3.45 ^c	6.79±2.53 ^d	9.43±2.44 ^c
	10—20	14.89±3.90 ^a	12.04±3.34 ^b	8.20±2.61 ^c	5.97±2.20 ^c	6.02±2.14 ^c

不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

表 4 不同土层土壤有机碳与土壤因子相关性

Table 4 Correlation between soil organic carbon and environmental factors in different soil layers

土层深度/cm	土壤全氮含量	土壤全磷含量	土壤容重	pH 值	电导率	粗砂	中砂	细砂	极细砂	黏粉粒
0—10	0.883**	0.784**	-0.046	0.02	0.511**	-0.020	-0.089	-0.389**	0.320**	0.586**
10—20	0.503**	0.411**	-0.097**	-0.08	0.051	-0.053	-0.102	-0.045	0.102	0.147

** $P<0.01$ 。

地不同沙漠化 SOC 含量土壤因子的第 1、2、3 主成分累计贡献率达到 72.835%；10—20 cm 土层中，第 1、2、3 主成分累计贡献率达到 67.193%，能反映土壤因子对 SOC 影响效应的大部分信息。0—10 cm 土层第 1 主成分主要受土壤全氮、全磷、电导率、细砂、极细砂以及黏粉粒的影响，累计解释变量为 42.148%，第 2 主成分主要受粗砂和中砂的影响，累计解释变量为 62.223%，第 3 主成分主要受 pH 值的影响，累计解释变量为 72.835%；10—20 cm 土层第 1 主成分与

土壤全氮、全磷、极细砂有较大的相关性，累计解释变量为 34.755%，第 2 主成分主要受中砂和细砂的影响，累计解释变量为 54.515%。

2.5 不同土层土壤有机碳含量一元线性回归模型

基于单变量一元回归分析，可得出不同土层主要土壤影响因子与 SOC 含量的一元线性回归方程（表 6）。两个垂直土层 SOC 含量均与全氮、全磷呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)，能解释 0—10 cm 土层

表 5 不同土层土壤有机碳与土壤因子主成分(F)分析

Table 5 Principal component analysis of soil organic carbon and environmental factors in different soil layers

变量	0—10 cm			10—20 cm		
	F_1	F_2	F_3	F_1	F_2	F_3
土壤全氮含量	0.853	-0.166	-0.299	0.807	-0.254	-0.142
土壤全磷含量	0.897	-0.110	-0.261	0.801	-0.105	-0.226
土壤容重	-0.107	0.431	0.032	-0.059	0.287	0.547
pH 值	0.510	0.089	0.816	0.607	0.004	0.577
电导率	0.791	-0.035	0.340	0.632	-0.211	0.535
粗砂	0.136	0.814	-0.125	0.150	0.754	0.113
中砂	0.013	0.865	-0.052	-0.100	0.840	-0.040
细砂	-0.777	-0.533	0.117	-0.628	-0.705	0.237
极细砂	0.732	-0.072	0.158	0.755	-0.025	0.074
黏粉粒	0.793	-0.271	-0.251	0.642	-0.027	-0.450
特征值	4.215	2.008	1.061	3.475	1.976	1.268
解释变量/%	42.148	20.075	10.612	34.755	19.761	12.678
累计解释变量/%	42.148	62.223	72.835	34.755	54.515	67.193

表 6 不同土层土壤有机碳含量与土壤因子的一元线性回归方程

Table 6 Univariate linear regression equation between soil organic carbon content and soil factors in different soil layers

土层深度/cm	回归方程	R^2	F	P
0—10	$y=8.595STNC+0.118$	0.778	484.174	<0.01
	$y=45.435STPC-0.074$	0.612	218.398	
	$y=0.011EC+0.126$	0.995	48.399	
	$y=-0.088Fsa+0.954$	0.145	24.465	
	$y=0.162Vfs+0.273$	0.096	15.647	
	$y=0.255Scl+0.130$	0.339	71.625	
10—20	$y=15.193STNC+0.154$	0.363	79.598	
	$y=37.905STPC+0.121$	0.239	44.452	
	$y=-0.147SBD+0.692$	-0.002	0.659	

y, 土壤有机碳; STNC, 土壤全氮含量; STPC, 土壤全磷含量; EC, 电导率; Fsa, 细砂粒; Vfs, 极细砂粒; Scl, 黏粉粒; SBD, 土壤容重。

中 SOC 含量的 77.8% 的变异, 其中电导率与 SOC 含量拟合 R^2 最大(0.995), 除此之外, 10—20 cm 土层 SOC 含量与土壤容重亦呈极显著相关关系($P<0.01$), 其中全氮与 SOC 含量拟合 R^2 最大(0.363)。

2.6 影响土壤有机碳含量的环境因子

通过主成分分析提取影响科尔沁沙地不同沙

漠化阶段土壤各层 SOC 的主要环境因子(表 7)以从区域尺度分析影响科尔沁沙地 SOC 的环境因素。结果显示, 0—10 cm、10—20 cm 土层主成分中大于 1 的特征值成分有 4 个, 累计解释变量分别为 78.743%、78.603%, 能反映不同沙漠化土层 SOC 的绝大部分信息。两个土层的第 1 主成分均主要受经度、高程、生长季平均气温以及 NDVI 均值影响, 累计解释变量分别为 36.112% 和 36.347%; 第 2 主成分均主要受地面剖面曲率、地面粗糙度与坡度的影响, 累计解释变量分别 55.343% 和 55.721%; 第 3 主成分均与纬度和生长季降水量的相关性最大, 累计解释变量分别达 69.579% 和 69.597%; 第 4 主成分与年积温的相关性最大。

3 讨论

3.1 不同沙漠化阶段土壤有机碳剖面分布特征及空间分布规律

SOC 是土壤养分循环的核心, 也是衡量土壤质量变化和肥力变化的重要指标^[20], 本研究表明, 科尔沁沙地同一沙漠化阶段 SOC 含量垂直分布特征主要表现为除流动沙地外, 土壤上层(0—10 cm) SOC 含量明显高于下层(10—20 cm), 呈现明显的“表聚性”特征^[21], 这与常帅等^[22]对锡林郭勒草原土

表 7 不同土层土壤有机碳与环境因子主成分(*F*)分析

Table 7 Principal component analysis of soil organic carbon and environmental factors in different soil layers

变量	0—10 cm				10—20 cm			
	<i>F</i> ₁	<i>F</i> ₂	<i>F</i> ₃	<i>F</i> ₄	<i>F</i> ₁	<i>F</i> ₂	<i>F</i> ₃	<i>F</i> ₄
纬度	0.448	−0.048	−0.791	0.314	0.442	−0.053	−0.823	0.188
经度	0.921	0.024	0.080	0.123	0.920	0.049	0.060	0.108
年降水量	0.645	0.236	0.269	−0.168	0.637	0.257	0.277	−0.106
年积温	0.480	0.156	0.367	0.469	0.496	0.172	0.309	0.453
高程	−0.926	0.017	0.003	−0.280	−0.933	−0.005	0.041	−0.238
地面剖面曲率	−0.073	0.802	−0.102	0.029	−0.091	0.798	−0.128	0.009
地面粗糙度	−0.310	0.883	0.059	0.206	−0.323	0.872	0.026	0.255
坡度	−0.398	0.831	0.029	0.162	−0.413	0.817	0.007	0.223
生长季平均气温	0.720	−0.053	0.130	0.427	0.739	−0.037	0.075	0.380
生长季降水量	0.192	−0.111	0.917	−0.115	0.204	−0.084	0.928	−0.030
生长季EVI均值	0.674	0.391	−0.040	−0.482	0.649	0.414	−0.024	−0.554
生长季NDVI均值	0.737	0.367	−0.118	−0.454	0.712	0.389	−0.101	−0.520
特征值	4.695	2.500	1.851	1.191	4.729	2.515	1.804	1.171
解释变量/%	36.112	19.232	14.236	9.163	36.374	19.347	13.876	9.006
累计解释变量/%	36.112	55.343	69.579	78.743	36.374	55.721	69.597	78.603

壤剖面 SOC 垂直分布及丁越岩等^[23]就不同植被类型对毛乌素沙地 SOC 的影响研究结果一致。一方面可能是因为科尔沁沙地植物根系主要分布在土壤表层,同时土壤表层积累了大量的植物掉落物以及动物残体,而土壤表层 SOC 主要来源于植物根系分泌物、植物根系的腐殖质及枯枝落叶^[21],再加上土壤表层有适合微生物生存的良好通气性、含水量以及土壤温度等环境因素,土壤微生物活动旺盛^[24-25],加速了地表掉落物及动植物残体的分解及腐殖化,使得土壤中的有机质含量增加,土壤容重降低,SOC 含量不断累积;另一方面,随着土层深度的加深,土壤质地变得紧实,表层土壤的 SOC 向下迁移受到限制,使得下层土壤的 SOC 含量低于上层,但不同退化程度间 SOC 的降低幅度存在较大差异,由于流动沙地地表无结皮或只有物理性结皮,并且地表完全被流沙覆盖^[26],因此流动沙地上下两层土壤理化性质差异较小,SOC 含量无显著差异。除此之外,其他沙漠化阶段 SOC 含量垂直分布差异可能与不同沙漠化阶段土壤有机质及地下根系的生物量分布差异有关,土壤表层中植物根系较为富集,能较好地吸收来自土壤微生物分解地表掉落物释放的养分,同时在疏林草地中,丰富的表层根系

还可以截获水分,促进植被生长状况的正向循环,进一步增加凋落物及根系向土壤的营养输入^[27-28],从而对不同沙漠化阶段土壤剖面 SOC 含量造成影响。

3.2 不同沙漠化阶段土壤有机碳储量特征

土壤有机碳密度(SOCD)是指单位面积一定深度的土层中 SOC 的储量,是评价和衡量土壤中 SOC 储量的一个极其重要的指标^[29]。本研究结果表明,在科尔沁沙地,随着沙漠化程度的增加 SOCD 呈现出降低的趋势,与阎欣等^[30]就荒漠草原沙漠化对土壤物理和化学特性的影响的研究结果一致。科尔沁沙地沙漠化过程中,不同沙漠化阶段对应着适合本生境的典型群落类型^[31],其顶级群落疏林草地植物丰富度高,植被盖度大于 90%,但随着沙漠化的加剧,原生地带性植物逐渐消退,植物群落组成结构趋于简单,植被盖度下降至 0—10%^[32]。首先导致地表凋落物减少,有机质无法滞留,从而直接降低了 SOC 的输入^[33],同时,土壤微生物作为土壤的重要组成部分,推动着土壤物质循环及能量流动,对 SOC 的形成与分解有着重要影响^[34],而 SOC 又可以作为底物,为微生物的生长和繁殖提供碳源^[35],

沙漠化的加剧不利于土壤微生物的生长和繁殖,从而使SOC的积累能力减弱,导致SOCD降低。此外,土地沙漠化导致土壤的理化性质也发生变化(黏粒含量、土壤容重、土壤pH值等因素),而这些因素对SOCD的影响同样不可忽视。

3.3 不同沙漠化阶段科尔沁沙地土壤有机碳影响因素

SOC是当前全球变化和全球碳循环的研究热点,也是退化生态系统恢复重建研究的重要内容^[36],在全球变化的背景下,研究科尔沁沙地不同沙漠化阶段SOC含量并揭示其影响因素,有助于增加土壤碳截存,提高土壤质量,并且对沙漠化土地的生态恢复及环境治理具有重要的意义^[37]。在本研究中,虽然科尔沁沙地不同沙漠化阶段SOC含量与土壤理化性质随土层深度的增加存在一定的差异性,但不同沙漠化阶段垂直剖面SOC含量与STNC、STPC均呈极显著相关关系($P<0.01$),这与相关学者的研究结果一致^[38-39]。原因可能是沙漠化程度越低,地表植被覆盖度越高,局部区域风沙活动越弱,大气降尘沉积积累,同时生物小循环过程旺盛,地表枯落物在腐烂分解的过程中土壤有机质含量增加^[40-41],使得STNC、STPC及SOC含量增加。

土壤容重是土壤基本物理性质,可以反映土壤的通气、透水以及松紧程度,也是评估SOC贮量的重要参数^[42-43]。本研究发现,在科尔沁沙地沙漠化过程中,上层土壤(0—10 cm)SOC含量与土壤容重无显著相关关系,但下层土壤(10—20 cm)SOC含量与土壤容重呈极显著负相关关系($P<0.01$),即下层土壤容重越大,SOC含量越少。这可能是由于随着土层深度的增加,土壤通气性变差,导致土壤容的增加,而土壤容重的增加会使土壤微生物因氧气供给受限而活性减弱^[23,44],从而造成土壤中有机质降低,SOC含量减少。而本研究中土壤容重仅与下层土壤(10—20 cm)显著相关,很可能是因为科尔沁沙地表层环境较适宜,微生物活性较强,土壤有机碳与土壤全氮及全磷的极显著相关关系可能掩盖了土壤容重对土壤有机碳累积的影响。

土壤机械组成代表了土壤质地的粗细,可以直接影响土壤的理化性质,是土壤最基本的物理性质^[45],且土壤机械组成比例能通过其化学保护机制降低SOC的分解速率并且促进土壤有机碳的固持^[46]。在本研究中,科尔沁沙地土壤砂粒含量随沙

漠化程度的加剧而增加,与SOC分布变化相反,土壤极细砂和黏粉粒含量则均随沙漠化程度的加剧而减少,与SOC含量变化特征相同,这与有关学者的研究一致^[47-49]。表4中,0—10 cm土层SOC含量与土壤细砂粒呈极显著性负相关关系,与土壤极细砂和黏粉粒呈极显著正相关。在不同土层土壤粒径组成中,黏粉粒含量对SOC的影响最强,可作为衡量SOC含量的重要因素,这可能是因为黏粉粒颗粒较细,表面积较大,能暴露更多的正电荷位与土壤中带负电荷的腐殖质结合^[50],使得SOC更易与土壤颗粒中的粉粒结合,对土壤水分的有效性及其生长产生影响,从而影响SOC分布^[51]。

3.4 区域尺度科尔沁沙地土壤有机碳影响因素

气候和地形因子很大程度上决定着陆地植被生产力以及生物群落组成,而经纬度的不同会直接或间接地决定科尔沁沙地的降水、气温等气象因子以及土壤质地的空间异质性,土壤质地的不同也会对土壤的水、肥、气、热的分配与循环有不同程度的作用^[52],从而影响植被生长与SOC的矿化,进而对生态系统SOC的空间格局进行调控。主成分分析结果表明,经纬度、气候(生长季平均气温、年降水量、年积温)、地形(地面剖面斜率、地面粗糙程度、坡度、高程)以及植被覆盖状况均对科尔沁沙地SOC含量空间格局有不同程度的影响,其中经纬度和地形是最重要的影响因素。在科尔沁沙地区域尺度上,气温和降水均随经纬度的变化具有较为明显的空间分布特征,气温和降水决定着不同地理位置的水热条件,科尔沁沙地植被空间分布也因此不同^[53]。本研究结果显示,降水对科尔沁沙地SOC的影响较气温更为显著,这与李妙宇等^[54]的研究结果相似,降水作为干旱半干旱地区唯一土壤水分来源,限制着植被的生产力,较高的降水量会增加植被生产力,从而使地上植被和地下根系生物量增加,土壤微生物活性也随之提高,有机质分解速率也因此加快^[55]。

除气候因子外,地形因子也显著影响着科尔沁沙地植被及SOC含量,其中高程直接或间接影响着生态系统SOC含量,随着高程的增加,气温也会随之降低,限制植被生长,从而限制SOC的分解,有利于其积累^[56]。坡度代表着地面倾斜程度,是重要的地形指标。本研究结果显示,科尔沁沙地SOC含量同样受坡度影响。

4 结论

科尔沁沙地 SOC 含量 $0.42\text{--}8.42\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, SOCD 为 $0.34\text{--}2.15\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 其中 SOC 主要分布在 $0\text{--}10\text{ cm}$ 的上层土壤中; SOC 含量从疏林草地(未沙漠化)、固定沙地(轻度沙漠化)、半固定沙地(中度沙漠化)、半流动沙地(重度沙漠化)到流动沙地(极重度沙漠化)逐渐降低, 表现出按疏林草地—荒漠草地—流动沙地演替退化的过程, 表层 SOC 含量流失更加明显; 在科尔沁沙地沙漠化过程中, 土壤机械组成和全氮、全磷含量限制着 SOC 的积累, 而土壤黏粉粒含量更能反映土壤机械组成对 SOC 含量的限制作用; 区域尺度中, 经纬度是影响科尔沁沙地 SOC 含量的重要因素, 其中气候因子是 SOC 经纬度分布格局的主控因素, 未来应针对不同环境及不同地区 SOC 含量采取不同的区域管理方式, 以提高科尔沁沙地生态系统的碳储量, 也可以通过围封、灌溉、补播等适宜的措施, 改变沙漠化草地的土壤结构, 维持沙化草地生态系统的自我调节能力, 增加其土壤碳库储量及其稳定性。

参考文献:

- [1] 段翰晨, 王涛, 薛娴, 等. 基于 RS 与 GIS 的科尔沁沙地沙漠化时空演变[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 470–477.
- [2] 胡光印, 董治宝, 逯军峰, 等. 黄河流域沙漠化空间格局与成因[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 213–224.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment Council. Ecosystems and human well-being: desertification synthesis [R]. Washington, D C, USA: World Resources Institute, 2005.
- [4] Liang B C, Vanden Bygarrrt A J, MacDonald J D, et al. Revisiting no-till's impact on soil organic carbon storage in Canada[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 198: 104529.
- [5] Guenet B, Gabrielle B, Chenu C, et al. Can N_2O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? [J]. Global Change Biology, 2021, 27(2): 237–256.
- [6] 李巧玲, 阎欣, 吴秀芝, 等. 荒漠草原沙漠化对土壤无机碳和有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 98–103, 110.
- [7] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils [J]. Nature, 1990, 348 (6298): 232–234.
- [8] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263(5144): 185–190.
- [9] 刘树林, 王涛, 屈建军. 浑善达克沙地土地沙漠化过程中土壤粒度与养分变化研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 611–616.
- [10] 马建业, 佟小刚, 李占斌, 等. 毛乌素沙地沙漠化逆转过程土壤颗粒固碳效应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3487–3494.
- [11] 赵哈林, 周瑞莲, 赵学勇, 等. 呼伦贝尔沙质草地土壤理化特性的沙漠化演变规律及机制[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 1–7.
- [12] 连杰, 赵学勇, 王少昆, 等. 科尔沁沙地风蚀作用对土壤碳、氮分布的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 529–535.
- [13] 李玉强, 赵哈林, 移小勇, 等. 沙漠化过程中科尔沁沙地植物—土壤系统碳氮储量动态[J]. 环境科学, 2006(4): 635–640.
- [14] 王少昆, 赵学勇, 曲浩, 等. 科尔沁沙地和浑善达克沙地流动沙丘中土壤微生物学特征比较[J]. 环境科学研究, 2010, 23 (12): 1516–1522.
- [15] 王建华. 中国沙漠 10 万分布图集中国西部环境与生态科学数据中心[DB/OL]. [2006–8]. <http://westdc.westgis.ac.cn>.
- [16] Duan H C, Wang T, Xue X, et al. Dynamics of aeolian desertification and its driving forces in the Horqin Sandy Land, Northern China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186: 6083–6096.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 272–282.
- [18] 张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 等. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 629–639.
- [19] Li Y Q, Zhang J P, Zhao X Y, et al. Comparison of soil physico-chemical properties under different land-use and cover types in northeastern China's Horqin Sandy Land [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2016, 8(6): 495–506.
- [20] Li X, Xiao J. A global, 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO-2, MODIS, and re-analysis data [J]. Remote Sensing, 2019, 11(5): 517.
- [21] 赵青, 刘爽, 陈凯, 等. 武夷山自然保护区不同海拔甜槠天然林土壤有机碳变化特征及影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41 (13): 5328–5339.
- [22] 常帅, 于红博, 曹聪明, 等. 锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1355–1366.
- [23] 丁越岩, 杨劼, 宋炳煜, 等. 不同植被类型对毛乌素沙地土壤有机碳的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 18–25.
- [24] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(6): 777–787.
- [25] 曲浩, 赵学勇, 赵哈林, 等. 陆地生态系统凋落物分解研究进展[J]. 草业科学, 2010, 27(8): 44–51.
- [26] 赵哈林, 周瑞莲, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地沙漠化正、逆过程的地面判别方法[J]. 中国沙漠, 2008(1): 8–15.
- [27] Han F P, Hu W, Zheng J Y, et al. Estimating soil organic carbon storage and distribution in a catchment of Loess Plateau, China [J]. Geoderma, 2010, 154(3/4): 261–266.
- [28] Knapp A K, Briggs J M, Collins S L, et al. Shrub encroachment in North American grasslands: shifts in growth form dominance rapidly alters control of ecosystem carbon inputs [J]. Global Change Biology, 2008, 14: 615–623.
- [29] 张青青, 伍海兵, 梁晶. 上海市绿地表层土壤有机碳储量的估算[J]. 土壤, 2020, 52(4): 819–824.
- [30] 阎欣, 安慧, 刘任涛. 荒漠草原沙漠化对土壤物理和化学特性的影响[J]. 土壤, 2019, 51(5): 1006–1012.

- [31] 左小安,赵学勇,赵哈林,等.科尔沁沙地草地退化过程中的物种组成及功能多样性变化特征[J].水土保持学报,2006(1):181-185.
- [32] 唐庄生,安慧,上官周平.荒漠草原沙漠化对土壤养分与植被根冠比的影响[J].草地学报,2015,23(3):463-468.
- [33] 马志良,赵文强.植物群落向土壤有机碳输入及其对气候变暖的响应研究进展[J].生态学杂志,2020,39(1):270-281.
- [34] 舒向阳,胡玉福,蒋双龙,等.川西北沙化草地植被群落、土壤有机碳及微生物特征[J].草业学报,2016,25(4):45-54.
- [35] 于秀丽.莫莫格湿地土壤微生物量碳动态及与酶活性的关系[J].东北林业大学学报,2020,48(4):59-63.
- [36] 王霖娇,李瑞,盛茂银.典型喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳时空分布格局及其与环境的相关性[J].生态学报,2017,37(5):1367-1378.
- [37] 田慎重,宁堂原,王瑜,等.不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J].应用生态学报,2010,21(2):373-378.
- [38] 赵芳,欧阳勋志.飞播马尾松林土壤有机碳空间分布及其影响因子[J].生态学报,2016,36(9):2637-2645.
- [39] 曹小玉,李际平,闫文德.不同龄组杉木林土壤有机碳与氮磷钾分布特征及耦合关系[J].土壤通报,2014,45(5):1137-1143.
- [40] 席军强,杨自辉,郭树江,等.人工梭梭林对沙地土壤理化性质和微生物的影响[J].草业学报,2015,24(5):44-52.
- [41] 李强,周道玮,陈笑莹.地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J].生态学报,2014,34(14):3807-3819.
- [42] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. Prediction of bulk density of soils in the Loess Plateau region of China [J]. *Surveys in Geophysics*, 2014, 35(2):395-413.
- [43] Sequeira C H, Wills S A, Seybold C A, et al. Predicting soil bulk density for incomplete databases [J]. *Geoderma*, 2014, 213(1):64-73.
- [44] 刘顺,盛可银,刘喜帅,等.赣南毛竹林土壤的渗透性特征[J].安徽农业大学学报,2018,45(2):252-257.
- [45] 夏汉平,蔡锡安.采矿地的生态恢复技术[J].应用生态学报,2002(11):1471-1477.
- [46] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils [J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2):155-176.
- [47] 孙忠祥,李勇,赵云泽,等.旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析[J].农业机械学报,2019,50(1):255-262.
- [48] 杨敏,杨飞,杨仁敏,等.祁连山中段土壤有机碳剖面垂直分布特征及其影响因素[J].土壤,2017,49(2):386-392.
- [49] 阎欣,安慧.沙化草地恢复过程中土壤有机碳物理组分和全氮含量的变化[J].西北植物学报,2017,37(6):1242-1251.
- [50] 赵兴敏,赵兰坡,郭欣欣,等.水体沉积物与岸边土壤颗粒组成及有机碳分布特征[J].水土保持学报,2014,28(6):304-308.
- [51] Baumann F, He J S, Schmidt K, et al. Pedogenesis, permafrost, and soil moisture as controlling factors for soil nitrogen and carbon contents across the Tibetan Plateau [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(12):3001-3017.
- [52] 王春燕,何念鹏,吕瑜良.中国东部森林土壤有机碳组分的纬度格局及其影响因子[J].生态学报,2016,36(11):3176-3188.
- [53] Feng X M, Fu B J, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3:2846.
- [54] 李妙宇,上官周平,邓蕾.黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J].生态学报,2021,41(17):6786-6799.
- [55] Nie X Q, Yang L C, Li F, et al. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the alpine shrubland in the Three Rivers Source Region on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Catena*, 2019, 178:154-162.
- [56] Yuan Z Q, Fang C, Zhang R, et al. Topographic influences on soil properties and aboveground biomass in lucerne-rich vegetation in a semi-arid environment [J]. *Geoderma*, 2019, 344:137-143.

Characteristics and influencing factors of soil organic carbon in the process of desertification in Horqin Sandy Land

Yan Meng¹, Wang Xuyang², Zhou Liye¹, Li Yuqiang²

(1. Inner Mongolia Minzu University, Tongliao 028000, Inner Mongolia, China; 2. Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Horqin Sandy Land is a typical area for the development of desertification and a key area for desertification control in semi-arid areas of China. This study takes Horqin Sandy Land as the study area, takes sandy land at different stages of desertification reversal as the research object, and adopts the method of space instead of time through field investigation and indoor analysis. on the regional scale, the response law of soil organic carbon to desertification process was discussed, and the dominant factors of spatial variation of soil organic carbon in this region were explained with climate, vegetation and topographic factors. The results show that: (1) with the aggravation of desertification, the content of soil organic carbon shows as follows: sparse forest grassland (non-desertification) > fixed sandy land (mild desertification) > semi-fixed sandy land (moderate desertification) > semi-mobile sandy land (severe desertification) > mobile sandy land (extreme sandy desertification). (2) compared with sparse forest grassland, the soil organic carbon density of fixed sandy land, semi-fixed sandy land, semi-mobile sandy land and mobile sandy land decreased by 29.1%, 49.3%, 62.9% and 84.1%, respectively. (3) with the development of desertification, the soil texture coarsening phenomenon occurred, that is, the content of medium and fine sand significantly increased, while the content of soil fine particles (ultra-fine sand and clay) decreased significantly. (4) in the process of desertification in Horqin sandy land, the loss of soil clay particles is the main reason for the coarsening of soil and the decrease of soil organic carbon content, while the change of pH is less affected by desertification. (5) Climate factor is the main factor that leads to the influence of longitude and latitude on SOC content, while topography factor takes the second place.

Key words: soil organic carbon; Horqin Sandy Land; desertification; regional scale; principal component analysis