

# 科尔沁沙地半固定沙丘不同坡位土壤 C, N 特征

罗永清<sup>1</sup>, 丁杰萍<sup>2,3</sup>, 赵学勇<sup>1</sup>, 李玉强<sup>1</sup>, 周欣<sup>1</sup>, 朱阳春<sup>1</sup>, 岳祥飞<sup>1</sup>, 张腊梅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 奈曼沙漠化研究站, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃省环境科学设计研究院, 甘肃 兰州 730020; 3. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** [目的] 研究沙丘不同坡位土壤碳氮的分布特征, 旨在探索沙丘不同坡位植被演替机制。[方法] 选取高于 5 m 的半固定沙丘, 沿主要风向于坡底、坡中、坡顶和背风坡设置样点, 对土壤容重、土壤总有机碳含量和土壤总氮含量进行测定, 并计算碳氮比、碳氮密度和碳氮储量。[结果] (1) 不同坡位土壤碳含量均随深度增加显著降低, 主要变异层发生在 0—40 cm 层。不同坡位土壤碳含量在 30—40 cm 层和 60—100 cm 层存在差异。(2) 氮含量与容重在不同坡位和不同深度均不存在显著差异性, 碳氮比在坡底和坡顶存在显著的垂直差异性, 背风坡 60—100 cm 层土壤碳氮比显著高于其它坡位。(3) 各坡位土壤碳密度随深度增加显著下降。30—40 cm 层土壤碳密度存在显著的坡位差异, 而土壤氮密度的垂直差异和坡位间差异均不显著。(4) 半固定沙丘土壤碳氮储量分别为 716.89 和 94.14 kg/m<sup>2</sup>, 不同坡位差异性不显著; 碳储量的构成在 4 种坡位差异较大, 而各坡位不同深度土壤氮储量对总储量的贡献差异较小。[结论] 科尔沁沙地半固定沙丘土壤碳氮含量与密度不同坡位的差异较小, 同时各坡位的碳氮均存在显著的垂直差异性, 尤其在 30—40 cm 层, 变异程度较大, 这可能与该层植物根系分布有关。

**关键词:** 科尔沁沙地; 半固定沙丘; 坡位; 土壤特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0094-07

中图分类号: S151, X171.1

## Soil Carbon and Nitrogen Characteristics of Different Positions of Semi-fixed Dune in Horqin Sandy Land

LUO Yongqing<sup>1</sup>, DING Jieping<sup>2,3</sup>, ZHAO Xueyong<sup>1</sup>, LI Yuqiang<sup>1</sup>,  
ZHOU Xin<sup>1</sup>, ZHU Yangchun<sup>1</sup>, YUE Xiangfei<sup>1</sup>, ZHANG Lamei<sup>1</sup>

(1. Naiman Desertification Research Station of Cold and Arid Regions Environmental  
and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu

730000, China; 2. Gansu Academy of Environmental Sciences, Lanzhou, Gansu 730020, China;

3. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the distribution of soil organic carbon(SOC) and total nitrogen(TN) in different positions of semi-fixed dune in Horqin sandy land, for exploring the vegetation succession mechanism of different dune slope positions. [Methods] Soil samples were collected from the bottom of windward slope, mid-slope, top and leeward of semi-fixed dunes with 5 m height, along the direction of prevailing wind. Soil bulk density, SOC and TN contents were measured and then the ratio of carbon/nitrogen(C/N), densities and stocks of SOC and TN were calculated. [Results] (1) SOC contents in all 4 positions of the semi-fixed dune were decreased with soil depth and the obvious variation occurred in depth of 0—40 cm, and there were position differences ( $p < 0.05$ ) of SOC contents at depth of 30—40 cm and 60—100 cm; (2) TN contents and bulk density were all insignificantly different among different depths and slope positions. Ratio of C/N showed significant differences between the bottom and top of semi-fixed dunes. The ratio at the depth in leeward from 60 to 100 cm had significantly higher values than others; (3) SOC density decreased significantly with soil depth in all slope positions, and there existed significant differences of SOC density at depth

收稿日期: 2014-02-27

修回日期: 2014-04-10

资助项目: 国家科技支撑项目“沙地生态系统持续恢复关键技术集成与试验示范”(2011BAC07B0); 内蒙古自治区科技重大专项(Y439K71001); 中国科学院“百人计划”项目(Y451H31001); 国家自然科学基金项目(31170413; 41171414)

第一作者: 罗永清(1984—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士, 助理研究员, 主要从事环境生态学及植物生理生态学研究。E-mail: luoyongqing8401@sina.com。

of 30—40 cm among slope positions. No significant differences of nitrogen density were found among dune positions and profile depths; (4) Stocks of SOC and TN were 716.89 and 94.14 kg/m<sup>2</sup> in semi-fixed dune, respectively. The differences among slope positions were insignificant. However, contribution in each layer of SOC stock to the total stock was different between slope positions while TN was similar in each layer to the total. [Conclusion] There were insignificant differences in both contents and densities of SOC and soil nitrogen in semi-fixed dune of Horqin sandy land among dune position, however, contents of SOC and soil nitrogen differed significantly among soil depth in all dune positions, especially at the depth of 30—40 cm, which changed intensely, and this may due to plant root distribution of this depth.

**Keywords:** Horqin sandy land; semi-fixed dune; slope position; soil property

碳在自然界的赋存关系到一系列生态问题。土壤中的碳动态是当前研究的热点,土壤以及“土壤—植被”系统的碳转移对整个生态系统的无机环境及生物圈物质循环有重要意义。土壤系统中,碳输出与输入一方面关系到大气组成及相应的温室效应等环境问题,另一方面土壤中碳的增加与减少对土壤微生物、土壤理化性质及陆地生态系统初级生产有重要影响<sup>[1-3]</sup>。氮素为生物体的生命元素,对整个生物圈,尤其是初级生产具有重要意义。沙地生态系统中,植被初级生产的限制因子虽为土壤水分,但氮素含量对植被形态<sup>[4]</sup>、群落演替、生物多样性<sup>[5]</sup>及土壤微生物活性<sup>[6]</sup>等有一定的影响。

土壤碳氮受植被、水分、热量等多种因素影响,同时又对生物与环境有一定的影响,是沙地植被恢复的重要因素之一。沙地恢复过程中,土壤碳氮为植被—土壤系统的关键环节,一方面,通过植被的建成与演替,及在该过程中植物个体的光合固定、死亡(包括器官脱落等)分解,无机环境中的碳氮被逐步转化并输入到土壤<sup>[7-9]</sup>;另一方面,土壤中的碳氮以养分供给等直接方式和改善土壤性质等间接方式(土壤质地、微生物活动、土壤酶活性等)影响着植被的建成与个体发育<sup>[10]</sup>。因此,土壤碳氮是沙地植被恢复的关键。

由于土壤、水分等环境因子的差异,沙漠化(或沙漠化恢复)不同阶段植被与土壤均呈现出异质性<sup>[11-13]</sup>。此前的研究多集中在大尺度生境差异,如流动沙地不同恢复阶段植被特征<sup>[11-12]</sup>,沙漠化不同阶段“土壤—植物”系统生物量及碳氮特征等<sup>[13]</sup>。沙丘不同坡位的研究显示,其植被特征及植物根系分布均有较大的异质性,但目前对其机理尚不清楚。因此,本研究从土壤性质方面进行研究,通过对半固定沙丘不同坡位碳氮等指标的分析,旨在探讨各坡位土壤特征,探索沙丘不同坡位植被演替机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区东部的通辽市奈曼旗境内(42°55′N, 120°42′E)。该区地处科尔沁沙地中南部,平均海拔 340~350 m,属温带大陆性半干旱气候,降水主要集中在 6—8 月,年均降水量 364.6 mm;年均温为 6.4 °C,大于 10 °C 年积温为 3 000~3 400 °C;年均蒸发量 1 972.8 mm;年平均风速 3.5 m/s,大风日数 20~60 d。地貌为大片沙丘地与甸子地交错分布。试验区植被主要包括灌木植物小叶锦鸡儿、差巴嘎蒿及草本植物(表 1)。

表 1 半固定沙丘不同坡位植被特征

坡位	总盖度/ %	密度/ (株·m <sup>-2</sup> )	主要物种
坡底	75	120	山竹岩黄耆 ( <i>Hedysarum fruticosum</i> ), 大籽蒿 ( <i>Artemisia sieversiana</i> ), 差巴嘎蒿 ( <i>Artemisia halodendron</i> ), 大果虫实 ( <i>Corispermum macrocarpum</i> ), 猪毛菜 ( <i>Salsola collina</i> ), 小叶锦鸡儿 ( <i>Caragana microphylla</i> ), 灰绿藜 ( <i>Chenopodium glaucum</i> ), 地锦草 ( <i>Euphorbia humifusa</i> ), 白草 ( <i>Pennisetum centrasiatium</i> ), 黄蒿 ( <i>Artemisia scoparia</i> )
坡中	65	45	差巴嘎蒿 ( <i>Artemisia halodendrom</i> ), 大果虫实 ( <i>Corispermum macrocarpum</i> ), 小叶锦鸡儿 ( <i>Caragana microphylla</i> ), 山竹岩黄耆 ( <i>Hedysarum fruticosum</i> ), 苦荬菜 ( <i>Ixeris denticulata</i> )
坡顶	70	38	差巴嘎蒿 ( <i>Artemisia halodendrom</i> ), 小叶锦鸡儿 ( <i>Caragana microphylla</i> ), 大果虫实 ( <i>Corispermum macrocarpum</i> )
背风坡	45	97	白草 ( <i>Pennisetum centrasiatium</i> ), 灰绿藜 ( <i>Chenopodium glaucum</i> ), 狗尾草 ( <i>Setaria viridis</i> ), 大果虫实 ( <i>Corispermum macrocarpum</i> ), 猪毛菜 ( <i>Salsola collina</i> ), 差巴嘎蒿 ( <i>Artemisia halodendrom</i> )

## 1.2 试验设计与样品测定

试验区设于“西北—东南”走向的沙丘草地。该地冬春季主要为西北风向,土壤属风沙土,有机质含量低,土壤肥力低下。样地沿冬春风风向,自西北向东南定义为迎风坡和背风坡,依次设置为坡底、坡中、坡顶及背风坡 4 种坡位类型。其中迎风坡向平缓延长,坡度  $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,坡长 30~50 m,背风坡坡向陡峭,坡度  $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ,丘高 5~10 m。该沙丘为山脉状连续沙丘,试验沿与坡向垂直方向,分别于 4 种坡位各设置 5 个取样点,样点距离 50~100 m,每个样点在  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  的样方内用十字交叉法取 5 钻土样,充分混合后带回实验室进行测定分析。同时于样方内用环刀(体积为  $100\text{ cm}^3$ )取样,测定土壤容重。

土样经风干后过 2 mm 筛,进一步研磨并过 0.1 mm 筛,采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定土壤有机碳,采用开氏法测定土壤氮含量。

## 1.3 数据计算分析

土壤碳/氮密度及储量计算公式为:

$$\text{土壤碳/氮密度}(\text{mg}/\text{cm}^3) = \text{土壤容重}(\text{g}/\text{cm}^3) \times \text{土壤碳/氮含量}(\text{g}/\text{kg})$$

$$\text{土壤碳/氮储量}(\text{g}/\text{m}^2) = \sum \text{土壤容重}(\text{g}/\text{cm}^3) \times \text{土壤碳/氮含量}(\text{g}/\text{kg}) \times \text{土层厚度}(\text{m}) \times 1000$$

数据采用 Excel 和 SPSS 13.0 软件进行单因素方差分析, LSD 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土层深度的土壤碳氮特征

对比沙丘不同深度土壤指标的算数平均值发现,土壤容重为  $1.59\text{ g}/\text{cm}^3$ ,不同深度的土壤容重在 0.05 水平上有显著差异性( $F=2.89, p<0.05$ ),其中 20—30 cm 层略高于其它层,但整体变异程度较小,整个研究区土壤容重极差值为  $0.03\text{ g}/\text{cm}^3$ (表 2)。

表 2 沙丘不同土层深度土壤容重、碳氮含量、碳氮比及碳氮密度的垂直特征

土层深度/ cm	容重/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	碳含量/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	氮含量/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	碳密度/ ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	氮密度/ ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	碳氮比 (C/N)
0—10	$1.58\pm 0.02^{\text{abc}}$	$0.87\pm 0.06^{\text{a}}$	$0.077\pm 0.005^{\text{a}}$	$1.37\pm 0.10^{\text{a}}$	$0.122\pm 0.009^{\text{a}}$	$11.88\pm 0.89^{\text{a}}$
10—20	$1.60\pm 0.03^{\text{ab}}$	$0.63\pm 0.04^{\text{b}}$	$0.071\pm 0.006^{\text{ab}}$	$1.00\pm 0.06^{\text{b}}$	$0.113\pm 0.010^{\text{ab}}$	$9.99\pm 0.93^{\text{ab}}$
20—30	$1.60\pm 0.03^{\text{a}}$	$0.52\pm 0.03^{\text{c}}$	$0.067\pm 0.006^{\text{abc}}$	$0.83\pm 0.05^{\text{c}}$	$0.108\pm 0.009^{\text{abc}}$	$8.44\pm 0.63^{\text{bc}}$
30—40	$1.60\pm 0.05^{\text{ab}}$	$0.42\pm 0.03^{\text{d}}$	$0.056\pm 0.006^{\text{bcd}}$	$0.67\pm 0.05^{\text{d}}$	$0.090\pm 0.010^{\text{bcd}}$	$8.01\pm 0.53^{\text{cd}}$
40—50	$1.57\pm 0.02^{\text{c}}$	$0.36\pm 0.02^{\text{d}}$	$0.064\pm 0.007^{\text{abcd}}$	$0.56\pm 0.04^{\text{d}}$	$0.100\pm 0.011^{\text{abcd}}$	$6.46\pm 0.67^{\text{d}}$
50—60	$1.58\pm 0.03^{\text{bc}}$	$0.35\pm 0.02^{\text{d}}$	$0.054\pm 0.005^{\text{cd}}$	$0.56\pm 0.03^{\text{d}}$	$0.086\pm 0.007^{\text{cd}}$	$7.07\pm 0.56^{\text{cd}}$
60—100	$1.58\pm 0.03^{\text{c}}$	$0.35\pm 0.02^{\text{d}}$	$0.051\pm 0.003^{\text{d}}$	$0.54\pm 0.04^{\text{d}}$	$0.080\pm 0.005^{\text{d}}$	$7.05\pm 0.61^{\text{cd}}$
F 值	2.89*	30.64**	2.90*	30.71**	2.96**	7.47**

注: \* 表示不同深度土壤性质在 0.05 水平上的显著差异性, \*\* 表示不同深度土壤性质在 0.01 水平上的显著差异性, 相同字母表示在 0.05 水平上的差异性不显著。下同。

研究区土壤有机碳含量为  $0.50\pm 0.02\text{ g}/\text{kg}$ ,随土壤深度增加碳含量降低,这种垂直差异存在显著性( $F=30.64, p<0.01$ )。此外,在 0—40 cm 土层深度范围内,随深度增加土壤有机碳含量迅速降低,降幅超过 50%,此后达到稳定水平。土壤全氮同样具有垂直差异性( $F=2.90, p<0.05$ ),但与有机碳相比,这种垂直差异较小,表层土壤全氮仅比底层高出  $0.026\text{ g}/\text{kg}$ 。同时,全氮含量有更大的变异,各层变异系数均高于 25%,尤其在中层(30—40 cm 层和 40—50 cm 层),变异系数分别为 49.01% 和 49.18%。从碳氮比来看,研究区不同土壤深度同样具有垂直差异性( $F=7.67, p<0.01$ ),碳氮比随土壤深度逐渐降低(40—50 cm 层低于下层,但差异性不显著)。

研究区土壤碳氮密度同样呈现出极显著的垂直差异( $p<0.01$ ) 即随土层深度增加碳氮密度逐渐降低,但两种元素的降低幅度不同:从表层(0—10 cm)到底层(10—100 cm),碳密度下降了 60.33%,而氮密

度降低了 34.15%。

### 2.2 不同坡位土壤碳氮特征

2.2.1 碳氮含量及容重 不同坡位土壤碳含量的垂直差异不同,坡底各层土壤碳随深度增加而降低,其中 0—30 cm 深度变异较大,由  $0.86\pm 0.11\text{ g}/\text{kg}$  下降到  $0.44\pm 0.06\text{ g}/\text{kg}$ ,更深层则较为均一,碳含量范围在  $0.31\sim 0.30\text{ g}/\text{kg}$  之间。坡中土壤碳含量主要变异层分布在 0—40 cm 深度,其含量由表层的  $0.94\pm 0.10\text{ g}/\text{kg}$  下降到  $0.40\pm 0.05\text{ g}/\text{kg}$ ,其下各层土壤碳含量相差小于  $0.02\text{ g}/\text{kg}$ 。坡顶土壤碳含量同样呈现逐层递减的特征,但主要变异层出现在 0—40 cm 深度,其含量极差达到  $0.34\text{ g}/\text{kg}$ ,其下层该值为  $0.03\text{ g}/\text{kg}$ 。背风坡土壤碳含量在 0—30 cm 层显著减小,但与前 3 种坡位不同,从 40 cm 到 100 cm 深度,土壤碳含量由  $0.39\pm 0.04\text{ g}/\text{kg}$  增加到  $0.44\pm 0.02\text{ g}/\text{kg}$ 。从坡位间差异来看,除 30—40 cm 和 60—100 cm 以外,其余各层碳含量变异较小,相对极差值均小于

0.35 g/kg, 而该两层的相对极差值分别为 0.61 和 0.42 g/kg(图 1)。

多重比较表明,在 30—40 cm 层坡顶土壤碳含量显著( $p < 0.01$ )高于其它生境,在 60—100 cm 层,背风坡显著( $p < 0.05$ )高于其它生境。氮含量在 4 种坡位的垂直分布虽有随深度逐渐下降的趋势,但由于较大的变异(各坡位变异系数均在 35%以上),这种垂直差异不存在显著性( $p > 0.05$ )。同时,不同坡位土壤氮含量也不存在显著差异性( $p > 0.05$ )。不同坡位土壤碳氮比表现出不同的特征。从垂直角度来看,坡中( $F = 1.90, p > 0.05$ )和背风坡( $F = 1.64, p > 0.05$ ),各层土壤碳氮比不存在显著性差异,而在坡底( $F =$

3.63,  $p < 0.01$ )和坡顶( $F = 3.27, p < 0.05$ )的垂直差异达到显著性水平。与碳氮含量类似,这两种生境表层土壤碳氮比高于底层:坡底 0—10 cm 层显著( $p < 0.05$ )高于亚表层(10—20 cm)以外的其余各层,坡顶表层(0—10 cm)和亚表层(10—20 cm)显著( $p < 0.05$ )高于底层(60—100 cm)。此外,除 60—100 cm 层背风坡土壤碳氮比显著高于其它生境外,其余各层不存在坡位间差异性。

研究区 4 种坡位土壤容重差异性较小,不同坡位各层土壤容重的相对极差均小于 0.03。从垂直角度来看,4 种坡位不存在显著的垂直差异性( $p > 0.05$ ),其变异系数均小于 3%。

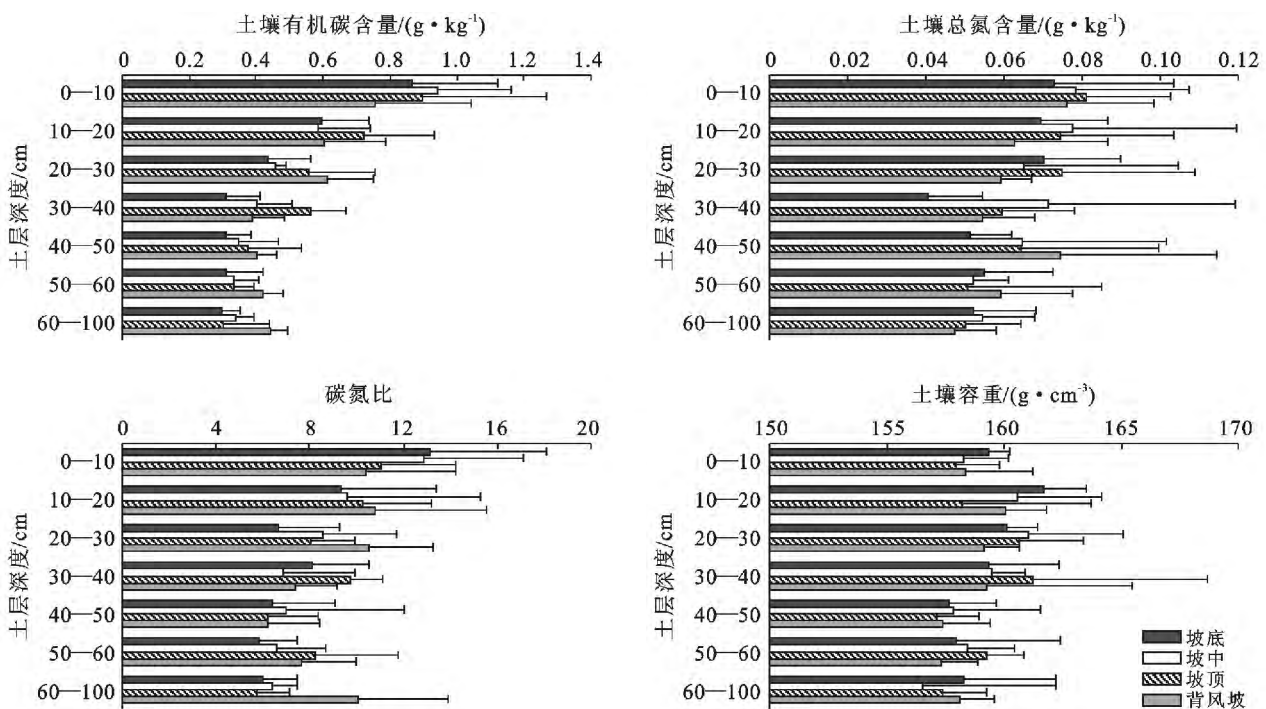


图 1 半固定沙丘不同坡位土壤碳含量、氮含量容重及碳氮比垂直分布

2.2.2 碳密度与氮密度 研究区不同坡位土壤碳密度均具有显著的垂直差异性(表 3)。在坡底和坡中生境,土壤碳密度随深度增加而减小,表层(0—10 cm)土壤碳密度显著高于其下各层,且随深度增加碳密度下降幅度较大,表层(0—10 cm)碳密度分别为底层(60—100 cm)的 2.92 和 2.80 倍。坡顶的碳密度垂直特征与坡底和坡中一致,随深度增加碳密度减小,但降低幅度更大,且该坡位土壤表层(0—10 cm)和亚表层(10—20 cm)的含量均在一个较高的水平,分别为底层(60—100 cm)的 3.01 和 2.40 倍。与其它 3 种坡位不同,背风坡碳密度最小值出现在中层(30—40 cm),其垂直特征表现为上层(0—40 cm)随深度增加土壤碳密度逐渐减小,然后缓慢增加的趋势,但 30—100 cm 各层差异性不显著。从各层的坡

位间差异来看,除 30—40 cm 层以外( $F = 5.20, p < 0.05$ ),其余各层的差异不显著(表 3)。

氮密度在 4 种生境中虽有表层高于底层的特点,但各生境的垂直差异均未达到显著性水平。此外,各层土壤氮密度的坡位间差异性也不显著。

2.2.3 碳储量与氮储量 研究区土壤的碳储量为  $716.88 \pm 31.59 \text{ g/m}^2$ ,大小顺序为:坡底 < 坡中 < 坡顶 < 背风坡(图 2),但差异不显著( $F = 0.93, p > 0.05$ ),最小储量和最大储量分别为  $641.35 \pm 61.43 \text{ g/m}^2$  和  $787.12 \pm 39.61 \text{ g/m}^2$ 。从各层土壤碳储量占总碳储量的比例来看,4 种坡位各具特点(图 3):表层碳储量在坡底和坡中生境中占较大的比例(分别为 21.51% 和 21.23%),而背风坡表层该比例仅为 15.25%。在 10—20 cm 层和 20—30 cm 层,4 种坡位碳储量所占

总碳储量的比例基本一致,该值分别为 12.28%~15.36%和 10.52%~12.36%。而在 30—40 cm 层,4 种坡位碳储量占总碳储量的比例差异较大,其中坡顶该值为 12.32%,高于坡底(7.75%)、坡中(9.12%)和背风坡(7.94%)。40—50 cm 层和 50—60 cm 层

该比例在 4 种坡位中基本一致,最高比例和最低比例之差均小于 2%。不同坡位底层(60—100 cm)土壤碳储量占总碳储量的比例差异较大,背风坡比例最高,占总碳储量的 35.64%,依次为坡中(30.36%)、坡底(29.45%)和坡顶(25.55%)。

表 3 不同坡位土壤碳密度与氮密度

项目	土层深度/cm	坡底	坡中	坡顶	背风坡	F 值
土壤碳密度/ (mg · cm <sup>-3</sup> )	0—10	1.38±0.18a	1.49±0.15a	1.42±0.26a	1.20±0.21a	0.35
	10—20	0.97±0.10b	0.95±0.12b	1.13±0.13a	0.97±0.13ab	0.53
	20—30	0.70±0.09bc	0.74±0.20bc	0.90±0.13b	0.97±0.10ab	1.91
	30—40	0.50±0.08c	0.64±0.08c	0.91±0.08b	0.63±0.07c	5.20*
	40—50	0.49±0.05c	0.54±0.08c	0.59±0.11bc	0.63±0.05c	0.61
	50—60	0.50±0.09c	0.53±0.05c	0.53±0.04bc	0.67±0.04bc	1.64
	60—100	0.50±0.04c	0.53±0.04c	0.47±0.10c	0.70±0.03bc	3.19
	F 值	11.80**	15.53**	6.19**	4.41*	—
土壤氮密度/ (mg · cm <sup>-3</sup> )	0—10	0.116±0.022a	0.124±0.020a	0.128±0.016a	0.120±0.015a	0.08
	10—20	0.112±0.012a	0.124±0.029a	0.117±0.018a	0.100±0.018a	0.24
	20—30	0.112±0.014a	0.104±0.028a	0.120±0.014a	0.094±0.006a	0.30
	30—40	0.064±0.010a	0.113±0.034a	0.097±0.014a	0.087±0.012a	1.07
	40—50	0.081±0.008a	0.103±0.026a	0.101±0.025a	0.117±0.029a	0.41
	50—60	0.087±0.012a	0.083±0.006a	0.081±0.025a	0.093±0.013a	0.12
	60—100	0.083±0.012a	0.085±0.010a	0.079±0.010a	0.075±0.008a	0.20
	F 值	2.14	0.49	0.96	1.02	—

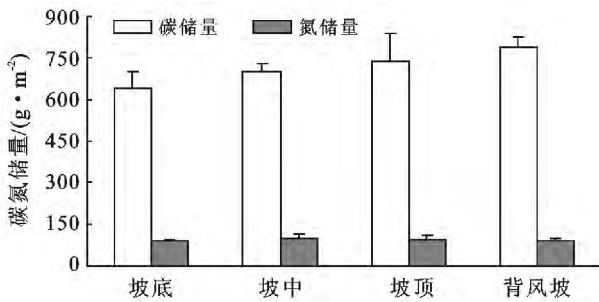


图 2 半固定沙丘不同坡位土壤碳氮储量

与碳储量类似,在 4 种坡位 0—100 cm 土壤的氮储量不存在显著差异性 ( $F = 0.11, p > 0.05$ )。最大氮储量和最小氮储量分别出现在坡中(99.12±

17.47 g/m<sup>2</sup>)和坡底(90.31±3.42 g/m<sup>2</sup>)。但与碳不同,氮储量的分配格局中,上层(0—30 cm)各坡位土壤氮储量占总氮储量的比例基本一致,0—10 cm, 10—20 cm 及 20—30 cm 层的 4 种坡位间该比例的差值均小于 2%。而在 30—40 cm 层,4 种坡位该比例的差异较大,其中坡中最大,为 11.43%,依次为坡顶(10.09%)和背风坡(9.57%),坡底最小,仅为 7.12%。同样,40—50 cm 层该比例在 4 种坡位的差异较大,最大比例和最小比例的差值分别为 12.86% (背风坡)和 8.96% (坡底)。在 50—60 cm 和 60—100 cm 土层,各坡位氮储量占总氮储量的比例基本一致(图 3)。

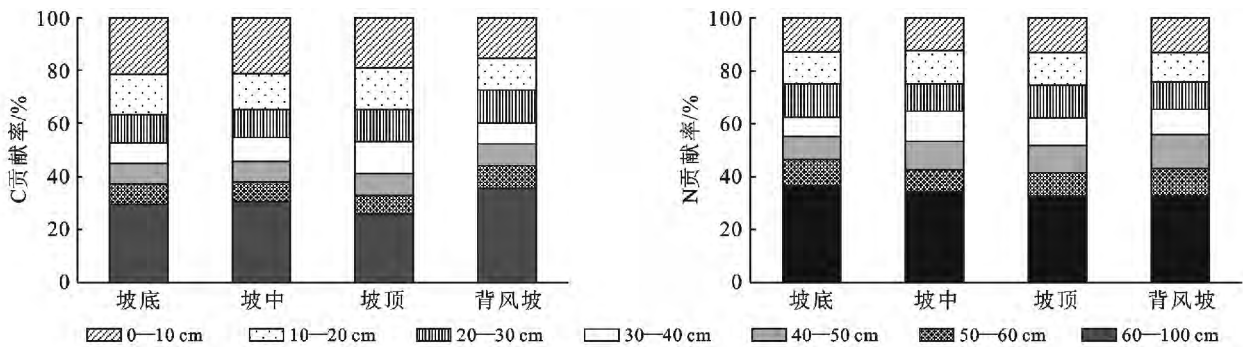


图 3 半固定沙丘不同坡位各层土壤碳氮储量对总储量的贡献率

### 3 讨论

沙丘不同坡位土壤水分<sup>[14]</sup>、辐射<sup>[15]</sup>以及干沙层厚度等<sup>[16]</sup>均存在较大的异质性,这些因素对植被生存生产、凋落物分解<sup>[17]</sup>及微生物活动<sup>[18]</sup>等产生一定的影响,而植物活动、凋落物分解<sup>[17]</sup>和微生物活动是沙地生境土壤养分的重要来源,所以不同坡位土壤特征存在差异性。如以氮素为对象的研究<sup>[17]</sup>表明,迎风坡总氮和硝态氮含量较高,而铵态氮在背风坡含量较高。有研究<sup>[19]</sup>表明,科尔沁沙地不同生境土壤碳含量存在显著差异,这可能是由于生境间植被初级生产所导致,包括地上与地下生物量、凋落物与立枯物产量等。本研究发现,4种不同坡位条件,土壤碳含量存在显著的垂直差异性,土壤碳含量随深度递减。土壤碳的垂直差异性主要发生在浅层(0—30 cm 或 0—40 cm),碳含量与碳密度均在浅层随深度迅速下降,并达到平衡状态。造成这一现象的原因可能是地表凋落物,一方面,同一类型沙丘不同坡位在初级生产及凋落物产生方面均有差异性,如王新源<sup>[20]</sup>的研究发现,坡底凋落物与立枯物的产量显著高于坡顶。另一方面,植被对由风力运移的凋落物有一定的截获作用<sup>[20-21]</sup>,研究区为半固定沙丘,地表植被盖度较高,因此对由风力运移的凋落物有截获作用,不同坡位对凋落物的截获量不同<sup>[20]</sup>。此外,不同坡位土壤温度和水分含量有差异,此二者为凋落物分解的关键因子<sup>[22]</sup>,沙丘顶虽有相对较大的凋落物截获,坡底(丘间地)与迎风坡坡中土壤温度与水分则高于坡顶和背风坡<sup>[20]</sup>,这可能是造成迎风坡坡底与坡中表层土壤碳密度高于坡顶和背风坡的主要原因,但除 30—40 cm 层和 60—100 cm 层外,不同坡位生境间不存在差异性。因此,在大尺度上,土壤碳存在生境间差异,但在同一沙丘不同坡位,这种差异不显著。

土壤氮含量则不同,在不同生境和不同深度均变异较大,不存在垂直差异性,这可能与氮素的特殊性有关。首先,氮素为植物体内易转移再利用的元素<sup>[23]</sup>,当植物体死亡或器官脱落之前氮素向其它器官的转移导致凋(脱)落物本身的氮素含量有较大的差异性,进而在其分解过程中向土壤的释放量变化较大;另一方面,氮素多以水溶性状态存在于土壤中,易受降水淋溶影响,所以浅层土壤氮素随降水向底层的转移可能是导致其垂直差异较小的原因之一<sup>[24-25]</sup>;此外,存在于土壤中的氮素,尤其是硝态氮和铵态氮,为植物生长的必需元素<sup>[23]</sup>,其被植物根系的吸收利用可能是导致其浅层含量减小的原因之一。

碳素与氮素在土壤垂直尺度的赋存差异导致碳

氮的非一致性分布,即碳素具有明显的由大到小的垂直差异而氮素没有,所以各层的碳氮比理论上应该为逐渐下降的特征,但本研究中,30—40 cm 层为异常层,该层有机碳含量在该层存在生境差异,氮素在该层变异系数最大,碳氮比在该层高于其相邻上下层,容重同样有最大的变异。这可能与植物根系分布与活动有关。已有的研究<sup>[26-28]</sup>表明,科尔沁沙地植物,尤其是草本和小灌木,根系主要分布在 0—30 cm 层,由此推断,30—40 cm 层可能为植物根系存在与否的界限层,根系本身的活动,如死亡分解、分泌物产生以及元素吸收等<sup>[4]</sup>,以及根系与环境的共同作用,如水分再分配、水力提升等<sup>[29-31]</sup>,导致该层为土壤的“活跃层”。这一现象在李玉强等<sup>[19]</sup>的研究中有所验证。通过对该研究的数据分析发现,不同沙漠化阶段的土壤碳氮比同样在 30—40 cm 层高于相邻上下层,且有较大的变异系数,尤其是在潜在沙漠化、轻度和中度沙漠化土壤,其变异系数均在前 2 位。

### 4 结论

科尔沁沙地半固定沙丘土壤碳氮含量、密度、及碳氮比均存在显著的垂直差异性,碳氮含量及密度均表现为随土壤深度增加而逐渐减小的特征。不同坡位土壤容重、氮含量、氮密度、氮储量等指标的异质性较小,但 30—40 cm 层为活跃层,该层各指标变异程度较大,且碳含量与碳密度存在显著的坡位差异。各坡位土壤碳氮储量分别为 716.89 和 94.14 g/m<sup>2</sup>,且不同坡位不存在显著差异性,但碳储量的构成在 4 种坡位差异较大,而各坡位不同深度土壤氮储量对总储量的贡献差异较小。

#### [参 考 文 献]

- [1] Cathy N. Impacts of crop residue management on soil organic matter stocks: A modelling study[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(15): 2751-2760.
- [2] Mambelli S, Bird J A, Gleixner G, et al. Relative contribution of foliar and fine root pine litter to the molecular composition of soil organic matter after in situ degradation[J]. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(9): 1099-1108.
- [3] Georgia R K, Paul W H, Gareth E J, et al. Estimating the component of soil respiration not dependent on living plant roots: Comparison of the indirectly-intercept regression approach and direct bare plot approach[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1835-1841.
- [4] 蒋德明,周全来,阿拉木萨,等. 科尔沁沙地植被生产力对模拟增加降水和氮沉降的响应[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(6): 1070-1074.

- [5] 李禄军, 曾德慧, 于占源, 等. 氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1838-1844.
- [6] 林贵刚, 赵琼, 赵蕾, 等. 林下植被去除与氮添加对樟子松人工林土壤化学和生物学性质的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1188-1194.
- [7] Thomas K, Martin A B, Olof A, et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 141(1/2): 184-192.
- [8] Archana S, Singh K P, Pushpa S, et al. Carbon input, loss and storage in sub-tropical Indian Inceptisol under multi-ratooning sugarcane [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(2): 221-226.
- [9] Fabio S, Rattan L, Michael H E, et al. Changes in soil carbon and nutrient pools along a chronosequence of poplar plantations in the Columbia Plateau, Oregon, USA[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 122(3): 325-339.
- [10] Huang Shan, Peng Xianxian, Huang Qianru, et al. Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China[J]. *Geoderma*, 2010, 154(3/4): 364-369.
- [11] Zuo Xiaolan, Zhao Xueyong, Zhao Halin, et al. Scale dependent effects of environmental factors on vegetation pattern and composition in Horqin Sandy Land, Northern China[J]. *Geoderma*, 2012, 173(3/4): 1-9.
- [12] Zuo Xiaolan, Zhao Xueyong, Zhao Halin, et al. Spatial heterogeneity of soil properties and vegetation-soil relationships following vegetation restoration of mobile dunes in Horqin Sandy Land, Northern China [J]. *Plant and Soil*, 2009, 318(1/2): 153-167.
- [13] Li Yuqiang, Zhao Halin, Zhao Xueyong, et al. Biomass energy, carbon and nitrogen stores in different habitats along a desertification gradient in the semiarid Horqin sandy land[J]. *Arid Land Research and Management*, 2006, 20(1): 43-60.
- [14] 赵文智. 科尔沁沙地人工植被对土壤水分异质性的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 113-119.
- [15] 朱劲伟, 金铭德, 朱廷耀, 等. 论乌兰敖都地区沙丘坡面直射光的分布[J]. 生态学杂志, 1989, 8(4): 5-12.
- [16] 宗芹, 阿拉木萨, 骆永明, 等. 科尔沁沙地沙丘迎风坡面干沙层的空间分布[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 875-880.
- [17] 董锡文, 张晓珂, 姜思维, 等. 科尔沁沙地固定沙丘土壤氮素空间分布特征研究[J]. 土壤, 2010, 42(1): 76-81.
- [18] 张晓珂, 董锡文, 梁文举, 等. 科尔沁沙地流动沙丘土壤线虫群落组成与多样性研究[J]. 土壤, 2009, 41(54): 749-756.
- [19] 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): 73-76.
- [20] 王新源. 科尔沁沙地不同沙丘各生境梯度下凋落物物质周转与氮素再分配[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [21] 赵哈林, 苏永中, 张华, 等. 灌丛对流动沙地土壤特性和草本植物的影响[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 385-390.
- [22] Olof A, Thomas K. The ICBM family of analytically solved models of soil carbon, nitrogen and microbial biomass dynamics—descriptions and application examples[J]. *Ecological Modelling*, 2001, 136(2): 191-207.
- [23] 潘瑞炽. 植物生理学 [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [24] 贾晓红, 李新荣, 肖洪浪. 沙坡头地区农田灌溉和施肥对氮淋溶量影响的研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 223-227.
- [25] 范丙全, 胡春芳, 平建立. 灌溉施肥对壤质潮土硝态氮淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 16-21.
- [26] 黄刚, 赵学勇, 张铜会, 等. 科尔沁沙地 3 种灌木根际土壤 pH 值及其养分状况[J]. 林业科学, 2007, 43(8): 138-142.
- [27] 李凯锋, 罗于洋, 张海龙, 等. 科尔沁差巴嘎蒿根系分布规律与土壤水分关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012(8): 167-171.
- [28] Hansson A C, Aifen Z, Andrén O. Fine-root production in degraded vegetation in Horqin sandy rangeland in Inner Mongolia, China[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1995, 9(1): 1-13.
- [29] 刘新平, 张铜会, 何玉惠, 等. 科尔沁沙地三种常见乔木根—土界面水分再分配初探[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2360-2365.
- [30] 阿拉木萨, 周丽芳. 科尔沁沙地 21 种植物水分提升作用的实证检验[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(1): 70-77.
- [31] 赵玮, 张铜会, 刘新平, 等. 差巴嘎蒿灌丛土壤和根系含水量对降雨的响应[J]. 生态学杂志, 2008, 27(2): 151-156.