

科尔沁沙地沙丘恢复过程中典型灌丛下结皮发育特征及表层土壤特性

郭铁瑞, 赵哈林, 左小安, 李玉霖, 黄迎新, 王少昆

(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, 兰州 730000)

摘要:通过野外取样和室内分析相结合,对科尔沁沙地不同沙丘典型灌丛下结皮发育及结皮下表层土壤特性进行了初步研究.结果表明,半流动沙丘的差巴嘎蒿、半固定沙丘的小叶锦鸡儿、固定沙丘的冷蒿以及固定沙丘丘底的小红柳灌丛下分别发育了物理结皮、藻、地衣及苔藓结皮,结皮的厚度、硬度、水分、 $<0.05\text{ mm}$ 粘粉粒含量、有机质、全 N、全 P、速效 N 和速效 P 等指标在沙丘生境中为半流动沙丘 $<$ 半固定沙丘 $<$ 固定沙丘 $<$ 固定沙丘丘底,在结皮类型中为物理结皮 $<$ 藻结皮 $<$ 地衣结皮 $<$ 苔藓结皮,各结皮间养分含量和粒径分布差异极显著($p<0.01$).结皮下层土壤的养分及细颗粒含量随结皮发育进展呈增长趋势.同一沙丘结皮下 0~5 cm 范围内土壤容重、粘粉粒、养分含量由表及里呈递减趋势,且均高于同层流动风沙土.在 4 种灌丛的 7 类结皮中,固定沙丘丘底的小红柳灌丛下发育的苔藓结皮及其表土的养分、细颗粒含量明显高于其它沙丘灌丛下的结皮.

关键词:科尔沁沙地;典型灌丛;土壤结皮;表层土壤特性

中图分类号:X171 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2008)04-1027-08

Crust Development and Subsurface Soil Properties Under Dominant Shrubs in the Process of Dune Restoration, Horqin Sand Land

GUO Yi-rui, ZHAO Ha-lin, ZUO Xiao-an, LI Yu-lin, HUANG Yin-xin, WANG Shao-kun

(Naiman Desertification Research Station, Cold and Arid Regions of Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Soil crust is a common and widespread phenomenon in desert areas all over the world due to its extraordinary ability to survive desiccation and extreme temperatures, high pH and salinity. Despite its unassuming appearance, biological soil crusts play a significant role in desert ecosystems, including involvement in the process of formation, stability and fertility of soil, preventing soil erosion by water or wind, increasing the possibility of vascular plant colonization, and being responsible for the stabilization of sand dunes. This study taking Horqin Sand Land as research region, by field sampling, crust and topsoil (0-2.5 cm and 2.5-5 cm under crust) samples in different dune habitats and shrub communities were collected, and their physicochemical properties were analyzed, including particle size distribution, bulk density, total nutrients and available nutrients, pH, EC and CaCO_3 content. The result revealed that *Artemisia halodendron* in semi-mobile dune, *Caragana microphylla* in semi-fix dune, *Artemisia frigida* in fix dune and *Salix microstachya* in interdunal lowland were respectively developed physical soil crust, algae crust, lichen crust and moss crust. Crust thickness, hardness, water content, fine fraction, total and available nutrients gradually increased by semi-mobile dune $<$ semi-fix dune $<$ fix dune $<$ interdunal lowland in terms of different dune habitats, and by physical soil crust $<$ algae crust $<$ lichen crust $<$ moss crust in terms of different crust types. There were significant differences among crust types on nutrient content and particle size distribution ($p<0.01$). Meanwhile, crust enhanced the $<0.05\text{ mm}$ content and nutrient content of topsoil, following an increasing trend from semi-mobile dune to interdunal lowland. As to each crust, the parameters of 0-2.5 cm subsurface soil layer were higher than that in 2.5-5 cm soil layer. The result also showed that the fine fraction and nutrient content of moss crust under *Salix microstachya* in interdunal lowland were higher than others, so did the 0-5 cm subsurface soil under it.

Key words: Horqin Sand Land; dominant shrubs; soil crust; subsurface soil properties

土壤结皮广泛存在于世界上每一种气候类型的每一种土壤上^[1].在干旱、半干旱地区的各大荒漠区,高等植被的覆盖不足 30%,而 70%以上的广大范围覆盖着以藻类、地衣、菌类、苔藓等隐花植物为主的生物结皮.很多环境指标诸如土壤类型,地形地貌,灌丛的种类、覆盖、分布都会在一定尺度上影响微生物结皮的发育和分布^[2,3].近年来,有关土壤结皮作为植被稀疏的干旱区的主要碳源,对土壤表面稳定性、养分循环的影响^[4-8]等方面已有较多研

究^[9-12].科尔沁沙地是我国北方半干旱农牧交错带的典型生态脆弱区,植被退化和土地沙漠化十分严重.近年来随着降雨的增加,草方格、围栏等保护措施的设置及禁牧、禁伐等政策的实施和治理,退化植被大量恢复,沙漠化呈现出整体逆转的趋势^[13].由

收稿日期:2007-06-10;修订日期:2007-09-29

基金项目:国家自然科学基金项目(40601008);中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新项目(0650444001)

作者简介:郭铁瑞(1980~),女,博士研究生,主要研究方向为干旱区生态恢复, E-mail: guoyirui_gyr@163.com

于灌丛的水岛、肥岛效应^[14],科尔沁沙地的大量灌丛下发育了生物结皮,与高等植被共同覆盖于地表.有关科尔沁沙地植被、土壤退化与恢复的内容已有不少研究^[15~17],但对于该地区不同恢复阶段沙丘的典型灌丛下发育的土壤结皮,以及结皮发育对表层土壤理化性状影响的报道较少.本研究运用时空互代法,以该区处在不同恢复阶段的半流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘的典型灌丛下发育的结皮为对象,探讨结皮及其表层土壤的特性,以期为生物结皮的研究积累资料,为科尔沁沙地退化生态系统恢复及植被重建提供理论依据.

1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地中南部的奈曼旗境内.地理位置东经 120°42′,北纬 42°55′,平均海拔 360 m,属半干旱气候.年平均降水量约为 364.6 mm,主要集中在 6~8 月;年蒸发量约 1 972.8 mm.年均气温 6.4℃,1 月份平均气温 -12.7℃,7 月份平均气温 23.7℃,≥10℃年积温在 3 000℃以上,无霜期约 150 d,平均风速 3.5 m·s⁻¹,大风日数 20~60 d.土壤类型主要有风沙土、草甸土、沙质栗钙土和沼泽土^[14].气候特征冬、春季干旱,多大风,降雨集中在夏季,水热同期,有利于植物生长.地貌类型以流动、半流动沙丘、固定、半固定沙丘、丘间低地和大片开阔的甸子地相间分布为特征.植被的斑块化分布和空间异质性较强,优势植物种有沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、欧亚旋覆花(*Convolvulus Chinensis*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、黄蒿(*Artemisia scoparia*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、苔草(*Carex dispalata*)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和小红柳(*Salix microstachya*)等.

2 材料与方法

2.1 样品采集

2006 年 8 月,在中国科学院奈曼沙漠化研究站附近的尧勒甸子村和孟和村内,分别选择处于封育过程中的不同恢复阶段的流动沙丘、半流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘和固定沙丘的丘底各 3 块(50 m × 50 m)作为样地.不同沙丘分别发育了不同典型灌丛,分别为半流动沙丘的差巴嘎蒿灌丛、半固定沙丘的小叶锦鸡儿灌丛、固定沙丘的冷蒿灌丛和固定沙丘的丘底小红柳灌丛.

每个样地分别随机设置 1 m × 1 m 的样方 10 个,分别用坡度仪和样方框测定样方内坡度和植物盖度.在每块样地内分别选取生物结皮发育相对完整的灌丛 6 株,每株灌丛下选取 3 个 20 cm × 20 cm 的结皮保存完整的样点,用 10 cm × 10 cm 的线圈针刺法测定结皮盖度.用平铲小心获取结皮层,游标卡尺和硬度计分别测定结皮厚度和硬度,采集结皮至土盒用烘干法测定结皮含水量.在采集结皮处用环刀(50 cm³)分别取结皮下 0~2.5 cm、2.5~5 cm 2 层原状土测定土壤容重和饱和含水量.每个样点分别采集结皮、结皮下 0~2.5 cm、2.5~5 cm 层土壤的土样,带回实验室做土壤理化性质分析.因为流动沙丘无结皮,所以共有 72 个结皮样品和 150 个结皮下土壤样品供试.

2.2 测定项目及方法

样品带回室内自然风干,通过 2 mm 孔径的土壤筛去除死根和杂物.部分土样进一步磨细通过 100 目筛,用于碳、氮分析.按常规方法分别对土样测定 9 项理化指标:机械组成用湿筛加吸管法,有机质(OM)用重铬酸钾容量法-外加热法,全氮(TN)用半微量凯氏定氮法,全磷(TP)用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮-钼锑抗比色法,速效氮(AN)用碱解扩散法,速效磷(AP)用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法,pH 值用 1:1 土水比悬液酸度计测定,电导率(EC)用 1:5 土水比浸提液测定,碳酸钙(CaCO₃)采用气量法测定^[18].

2.3 统计分析

植被群落多样性采用 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数^[19].数据分析用 SPSS 13.0 的软件,以 $p < 0.05$ 为显著水平.采用 LSD 和 one-way ANOVA 分析结皮及结皮下土壤特性在不同恢复阶段沙丘之间的差异,采用配对样本 t 检验分析结皮下 2 层土壤特性之间的差异.所有数值均采用 means ± SE 表示.

3 结果与分析

3.1 不同沙丘恢复阶段的结皮发育特征

由表 1 可知,半流动、半固定、固定沙丘和固定沙丘丘底的典型灌丛下分别发育了不同类型的结皮,依次为差巴嘎蒿灌丛下发育了物理结皮(AHP),小叶锦鸡儿灌丛下同时发育了物理结皮(CMP)和藻结皮(CMA),冷蒿灌丛下发育了地衣结皮(AFL)和苔藓结皮(AFM),小红柳灌丛下也同时发育了地衣结皮(SML)和苔藓结皮(SMM).

半流动沙丘多见物理结皮,一般由雨滴或风作

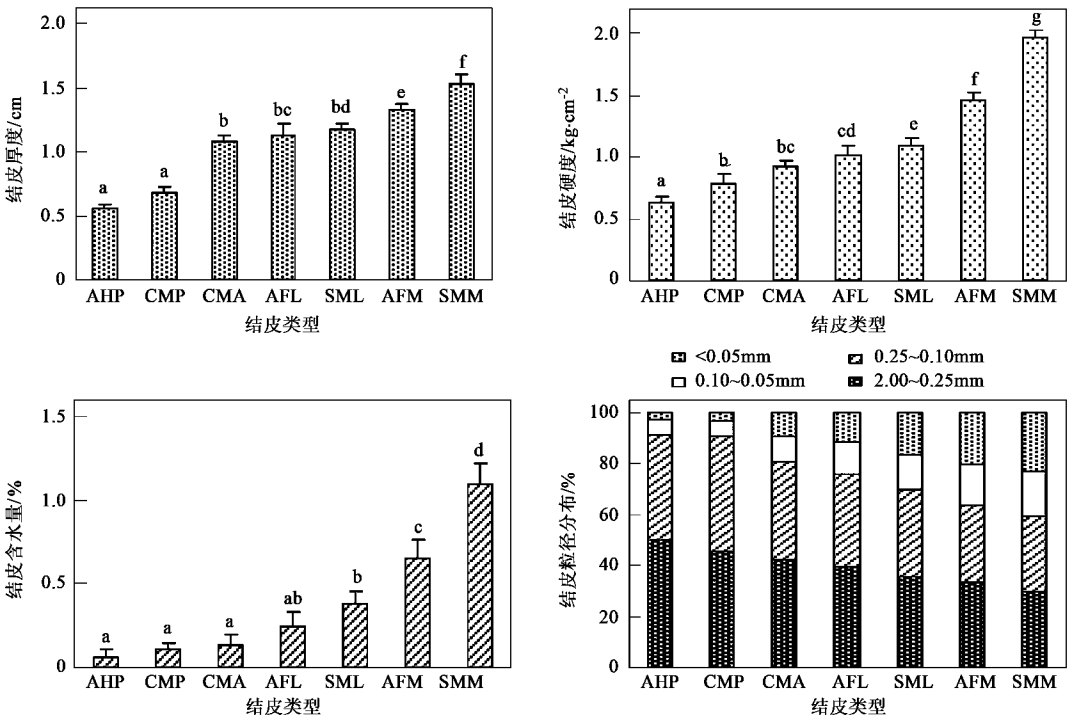
表 1 结皮取样地点及结皮发育概况

Table 1 Site description of the soil crust development in Horqin Sand Land							
取样地点	坡度/(°)	植被盖度/%	灌丛类型	结皮盖度/%	结皮类型	结皮缩写	灌丛特征描述
半流动沙丘	4~7	10~30	差巴嘎蒿	30	灰白色物理结皮	AHP	沙地先锋植物, 抗逆性强, 耐沙埋, 灌丛盖度为 15%~40%, 冠层高度 40~60 cm, 地上生物量 200~400 g·m ⁻²
半固定沙丘	3~9	30~50	小叶锦鸡儿	50	灰白色物理结皮 灰黑色藻结皮	CMP CMA	植株一般散生, 密度 1~3 株/10 m ² , 灌丛盖度为 50%~90%, 冠层高度 80~100 cm, 地上生物量 400~700 g·m ⁻²
固定沙丘	4~7	50~70	冷蒿	80	棕色地衣结皮 黑褐色苔藓结皮	AFL AFM	分布在封育多年的固定沙地, 灌丛盖度为 50%~70%, 冠层高度 40~80 cm, 地上生物量 300~400 g·m ⁻²
固定沙丘丘底	3~5	>70	小红柳	90	灰黑色地衣结皮 黄褐色苔藓结皮	SML SMM	分布在封育多年的丘间低地, 灌丛盖度为 60%~80%, 冠层高度 50~120 cm, 地上生物量 500~600 g·m ⁻²

用在裸露地表的小颗粒土壤上,形成浅灰白色的硬壳.藻结皮作为先锋种主要分布于半固定沙丘的丘顶,灰至灰白色,表面光滑平坦,薄而脆,易破损.在固定沙丘和丘底,地衣结皮成片发育,分布面积较广,在风蚀后留下的地表突出部位发育强烈,色黑而质硬,凹凸不平,柔韧性差,抗机械压力的能力也较弱.苔藓结皮主要分布于丘底,苔藓植物体密集,垫状丛生,深绿色至黑褐色,表面呈明显的凹凸状,有一定的柔韧性,结皮平均厚度较大.

3.2 结皮的物理性质

随着沙丘生境的恢复,科尔沁沙地的土壤结皮经历了一个由物理结皮逐渐向藻结皮、地衣结皮至苔藓结皮发育的演替过程.由图 1 可以看出,从半流动沙丘到固定沙丘的丘底,结皮厚度、硬度和结皮含水量沿着物理结皮<藻结皮<地衣结皮<苔藓结皮的顺序依次增加.随着沙漠化逆转和优势灌木的建立,从 AHP 到 SMM,结皮质地逐渐变细,极细沙(0.1~0.05 mm)和粘粉粒(<0.05 mm)含量分别由 AHP



不同小写字母表示结皮间差异显著($p < 0.05$),下同

图 1 不同沙丘生境中结皮的主要物理性质

Fig.1 Crust physical properties in different dune habitats

中的 $(5.75 \pm 0.12)\%$ 和 $(2.97 \pm 0.11)\%$ 增加到 SMM 中的 $(18.65 \pm 0.48)\%$ 和 $(22.94 \pm 1.23)\%$,而且结皮越厚,极细砂和粘粉粒含量越高.同时中粗砂($2 \sim 0.25\text{ mm}$)含量依次减少.在 7 种结皮类型中,不同粒径的含量差异极显著,分别为 $2 \sim 0.25\text{ mm}$ 粗沙($F = 18.94, p < 0.001$), $0.25 \sim 0.1\text{ mm}$ 中粗沙($F = 15.41, p < 0.001$), $0.1 \sim 0.05\text{ mm}$ 极细沙($F = 39.89, p < 0.001$)和 $< 0.05\text{ mm}$ 粘粉粒($F = 91.79, p < 0.001$).

3.3 结皮的化学特征变化

由图 2 可以看出,在不同沙丘植被恢复的过程中,相应灌丛下结皮的有机质、全 N、全 P、速效 N、速效 P 含量在沙丘生境中为半流动沙丘 < 半固定沙丘 < 固定沙丘 < 固定沙丘丘底,在结皮类型中按照物理结皮 < 藻结皮 < 地衣结皮 < 苔藓结皮的发育趋势依次增加.其中,固定沙丘丘底的小红柳灌丛下苔藓结皮的有机质含量最高,半流动沙丘差巴嘎蒿灌丛下物理结皮的有机质含量最低,仅为最高值的 9.71%.全 N 和速效 N 含量变化幅度较大,分别在 $(0.29 \pm 0.01) \sim (1.70 \pm 0.26)\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(24.68 \pm 0.64) \sim (115.31 \pm 2.44)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,全 P 和速效 P 含量变化幅度不大,分别在 $(0.102 \pm 0.01) \sim (0.247 \pm 0.02)\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $(4.40 \pm 0.41) \sim (9.82 \pm 0.28)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,变化趋势均与有机质相同,依次为 AHP < CMP < CMA < AFL < SML < AFM < SMM.养分

含量在不同沙丘生境的 7 种结皮上差异极显著,分别为有机质含量($F = 283.83, p < 0.001$),全 N 含量($F = 27.31, p < 0.001$),全 P 含量($F = 22.28, p < 0.001$),速效 N 含量($F = 1224.04, p < 0.001$)和速效 P 含量($F = 147.52, p < 0.001$).

不同沙丘生境灌丛下结皮的电导率随着植被生境条件的好转呈增长的趋势.电导率反映了土壤中可溶性养分离子水平,从半流动沙丘到固定沙丘的丘底,从物理结皮到苔藓结皮,各沙丘灌丛下结皮的电导率在 $(38.33 \pm 1.82) \sim (100.29 \pm 3.46)\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间波动增加,差异极显著($F = 290.86, p < 0.001$).从各沙丘灌丛下结皮的 pH 值来看,科尔沁沙地土壤结皮均处于中性偏弱碱性状态,该指标在结皮间差异极显著($F = 187.52, p < 0.001$).土壤中 CaCO_3 主要来源于石灰性母质和风积灰尘,从结皮的 CaCO_3 含量变化来看,变化趋势不大但差异极显著($F = 47.18, p < 0.001$).在科尔沁沙地的研究区域,土壤母质情况一致,因此上述 CaCO_3 含量的差异只能由风积灰尘的差异所引起.

3.4 不同沙丘生境结皮下的土壤特性

3.4.1 结皮发育下层土壤的物理特性

在沙丘灌丛植被恢复和结皮发育过程中,不同结皮下层土壤的物理特性见表 2.随着沙丘灌丛生境由半流动沙丘、半固定沙丘到固定沙丘和固定沙丘丘底的过程中,灌丛下结皮对其下层土壤容重的

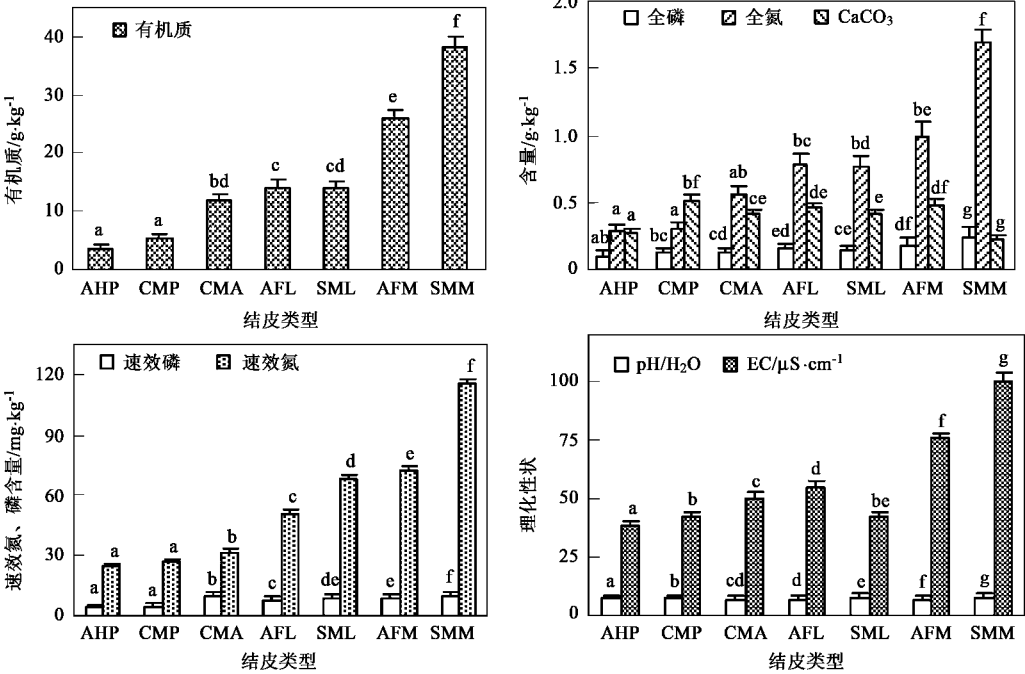


图 2 不同沙丘生境中结皮的主要化学性质

Fig. 2 Crust chemical properties in different dune habitats

表 2 不同沙丘生境结皮下表土的物理特征¹⁾

Table 2 Mean values, standard deviation errors and ANOVA <i>F</i> values of physical variables of the subsurface soil under crust in dune habitats											
沙丘类型	结皮下表土	土壤容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$		结皮下表土粒径分布/%							
				2.0~0.25 mm		0.25~0.1mm		0.1~0.05 mm		<0.05 mm	
		0~2.5 cm	2.5~5 cm	0~2.5 cm	2.5~5 cm	0~2.5 cm	2.5~5 cm	0~2.5 cm	2.5~5 cm	0~2.5 cm	2.5~5 cm
流动沙丘	流动风沙土	1.66±0.03 ^a	1.68±0.03 ^a	42.16±0.22 ^a	39.84±0.16 ^a	53.92±2.10 ^a	56.27±1.85 ^a	2.82±0.04 ^a	2.98±0.33 ^a	1.22±0.86 ^a	1.29±0.59 ^a
半流动沙丘	AHP	1.63±0.05 ^b	1.65±0.03 ^b	39.21±5.18 ^b	37.62±1.64 ^b	53.61±3.45 ^b	55.19±3.32 ^b	4.57±0.78 ^{bc}	4.78±0.46 ^{bc}	2.85±0.82 ^b	2.61±0.31 ^b
半固定沙丘	CMP	1.63±0.05 ^b	1.65±0.08 ^b	42.27±1.23 ^{bc}	46.02±0.67 ^c	51.68±3.96 ^b	48.51±3.62 ^c	3.49±0.65 ^{bd}	3.25±0.45 ^b	3.16±0.42 ^b	2.46±0.67 ^b
	CMA	1.59±0.03 ^{bc}	1.61±0.04 ^b	46.75±3.22 ^c	48.45±2.85 ^{cd}	40.41±1.94 ^c	39.82±2.41 ^d	6.35±0.94 ^{ce}	6.59±0.57 ^{cd}	6.49±0.45 ^c	5.23±1.24 ^c
固定沙丘	AFL	1.57±0.03 ^{cd}	1.59±0.04 ^{bc}	42.30±2.34 ^{bc}	47.53±2.58 ^{ce}	37.92±2.88 ^{cd}	33.85±2.49 ^c	6.63±1.33 ^{cf}	8.48±1.18 ^{de}	13.15±0.86 ^{de}	10.14±1.42 ^{df}
	AFM	1.53±0.02 ^{de}	1.58±0.02 ^{bc}	37.21±1.42 ^{bd}	39.95±1.22 ^b	38.44±3.47 ^{ce}	38.65±1.29 ^{df}	10.61±2.46 ^g	9.17±1.11 ^{eg}	13.80±2.33 ^{cf}	12.23±1.57 ^c
固定沙丘	SML	1.50±0.01 ^{eg}	1.52±0.03 ^{cd}	32.91±3.73 ^{de}	37.74±2.94 ^b	36.93±3.75 ^{cd}	39.84±2.88 ^{de}	13.98±1.75 ^h	12.61±1.64 ^f	16.21±1.66 ^f	9.81±0.67 ^f
丘底	SMM	1.48±0.02 ^{fg}	1.48±0.02 ^d	30.53±1.83 ^c	32.83±1.32 ^f	32.38±2.64 ^{df}	32.63±1.28 ^{dh}	18.20±1.29 ⁱ	11.08±2.18 ^{fg}	18.89±2.33 ^g	17.94±1.23 ^g
<i>F</i> -ratio		9.857	6.984	9.794	23.773	18.177	28.368	42.247	25.951	56.627	77.650
<i>p</i>		<0.000 1	<0.001	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1

1) 同列中不同小写字母表示结皮间差异显著($p < 0.05$)

影响表现出以下 3 个趋势:①容重的总体变化趋势为物理结皮下土壤<藻结皮下土壤<地衣结皮下土壤<苔藓结皮下土壤,而由表 2 可知,不同结皮厚度变化为物理结皮<藻结皮<地衣结皮<苔藓结皮,说明厚度较大的结皮下土壤容重值也较大;②丘底小红柳灌丛从苔藓结皮下层土壤的容重值最小,流动沙丘 2.5~5 cm 层的流动风沙土容重值最大,远高于其它结皮下土壤容重值($p < 0.001$),说明结皮在形成过程中大颗粒含量减少,结皮下土壤富集的细颗粒在低等生物的作用下被胶结的更加紧密,使其下层的土壤容重增加,孔隙度减小;③在所有结皮中,固定沙丘冷蒿灌丛从苔藓结皮下 0~2.5 cm 与 2.5~5 cm 层土壤容重值存在显著差异($F = 9.375, p < 0.05$),其它结皮下 2 层土壤容重差异不显著($p > 0.05$)。

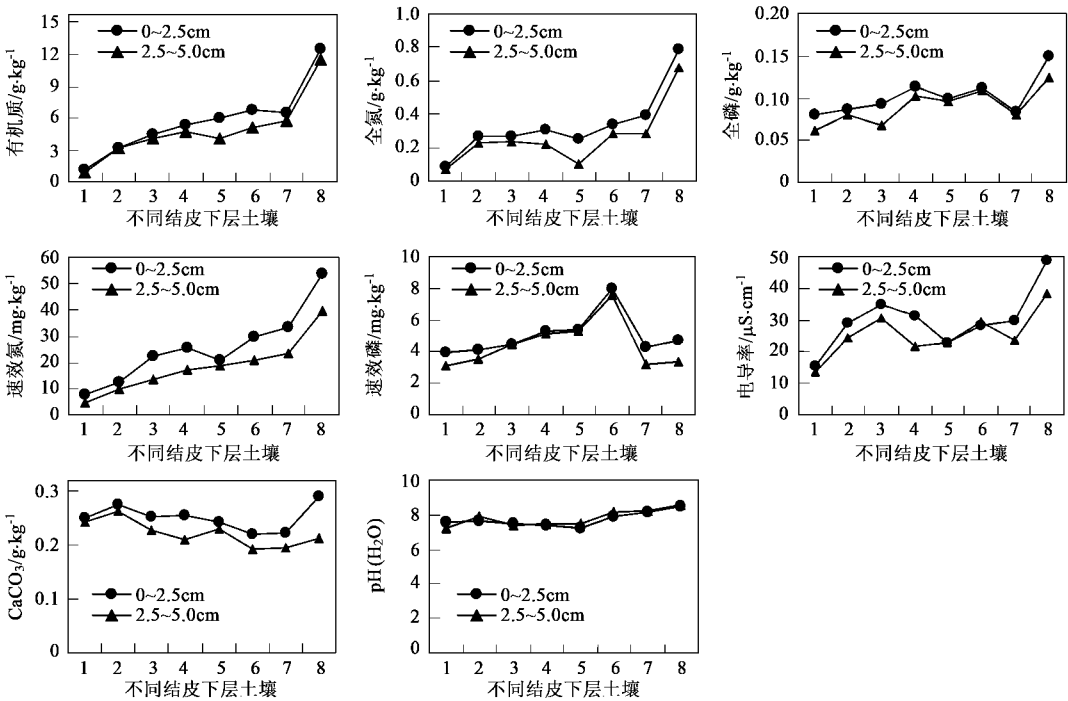
从结皮下土壤的粒径分布可以看出:首先,从流动沙丘到固定沙丘丘底,从 AHP 到 SMM,结皮下土壤颗粒组成中的极细砂(0.05~0.10 mm)和粘粉粒(<0.05 mm)含量逐渐增加($p < 0.001$),中粗沙(0.25~0.10 mm)和粗沙(2.0~0.25 mm)含量则逐渐递减.说明随着沙丘灌丛生境的好转和结皮由物理性状向藻类、地衣、苔藓的发育过程中,结皮下层土壤细颗粒含量增加,质地变细.其次,同一沙丘灌丛下发育的 2 种结皮,结皮下土壤的粘粉粒含量变

化趋势依次为物理结皮下土壤<藻结皮下土壤,地衣结皮下土壤<苔藓结皮下土壤,对结皮而言即 CMP<CMA, AFL<AFM, SML<SMM.对于不同沙丘灌丛下发育的同类结皮,则为半流动沙丘<半固定沙丘,固定沙丘<固定沙丘丘底,对结皮而言即 AHP<CMP, AFL<SML, AFM<SMM.

3.4.2 结皮发育下层土壤的化学特性

从图 3 可以看出,不同沙丘灌丛下的结皮在形成、发育后,其下层土壤养分含量的变化也较大.从半流动沙丘到固定沙丘的丘底,从物理结皮到苔藓结皮,结皮下层土壤的有机质、全 N、全 P、速效 N 含量随结皮的发育进程而依次增加.其中,固定沙丘丘底小红柳的苔藓结皮下 0~2.5 cm 土壤的养分含量最高,有机质和全 N 分别比半流动沙丘差巴嘎蒿物理结皮下同层土壤的对应值增加了 74.82% 和 65.82%.速效 P、CaCO₃ 含量、电导率和 pH 值在该过程中波动增加.同一沙丘灌丛发育的不同类型结皮,下层土壤养分含量与结皮养分含量变化相似,为物理结皮<藻结皮<地衣结皮<苔藓结皮,即土壤养分含量为 CMP 下土壤<CMA 下土壤, AFL 下土壤<AFM 下土壤, SML 下土壤<SMM 下土壤.

此外,每种结皮下 0~2.5 cm 土层的有机质、全 N 含量明显高于 2.5~5 cm 土层,其中,土壤有机质和全 N 含量在固定沙丘冷蒿灌丛的地衣结皮下从 0



横坐标中 1、2、3、4、5、6、7、8 分别为流动风沙土、AHP、CMP、CMA、AFL、AFM、SML 和 SMM 下层的土壤

图 3 不同沙丘生境中结皮对下层土壤化学性质的影响

Fig. 3 Chemical variables of subsurface soil under crusts in dune habitats

~ 2.5 cm 层到 2.5 ~ 5 cm 层分别衰减了 33.22% ($F = 18.24, p = 0.01$)和 60% ($F = 39.43, p = 0.003$),在半固定沙丘小叶锦鸡儿灌丛的藻结皮下分别衰减了 12.5% ($F = 19.02, p = 0.12$)和 29.09% ($F = 24.30, p = 0.008$),而丘底小红柳的苔藓结皮下土壤的速效 N 和速效 P 含量则分别衰减了 26.16% ($F = 57.07, p = 0.002$)和 28.45% ($F = 36.43, p = 0.004$).各结皮下 2 层土壤的 pH 值变化差异不显著($p > 0.1$).

4 讨论

4.1 不同沙丘生境结皮发育演替的特征

生物结皮广泛形成于干旱、半干旱地区的生态系统中,其形成是温度、降水、风速、阳光辐射和土壤营养状况、水分等多种因素综合作用的结果^[20].在本研究区,自半流动沙丘、半固定沙丘向固定沙丘恢复的过程中,差巴嘎蒿、小叶锦鸡儿灌丛群落逐渐减少,冷蒿和小红柳灌丛入侵并占据主导地位,沙丘逐渐固定,土壤颗粒细化,土壤养分提高、稳定性加强.沙面逐渐固定促使不同恢复阶段沙丘上分别发育了物理结皮、藻结皮、地衣结皮和苔藓结皮,并依次进展演替.Li 等^[21]报道在科尔沁沙地,差巴嘎蒿灌丛的建立改变了严重沙漠化土地的地表粗糙度,降低了风速,从而减少了风蚀.差巴嘎蒿和小叶锦鸡儿灌

丛的建立可以捕获空气中小颗粒的浮尘和降尘并固结在地表,从而提高灌丛覆盖下土壤的肥力,形成“肥力岛”^[22].此外,结皮的形成主要与外来尘埃的动态沉积有关.在沙丘迁移和侵蚀的过程中,大颗粒物首先被吹起,同时小颗粒则被牢固的附着在地表形成了结皮的雏形^[23].因此,不管形成了何种结皮,结皮中都含有大量细颗粒物.灌丛的“肥岛”作用不仅能凝聚养分,还包含大量的菌丝体^[24],因此在细颗粒物在降尘不断沉积、沙面逐渐固定的过程中逐渐经历了一个由雨滴击溅形成的灰白色物理结皮到深棕色微生物结皮的转变^[21].这个过程不但提高了土壤肥力,也极大改变了固定沙丘表面的微环境.

在干旱地区,微生物结皮通常由细菌、真菌、藻类、苔藓、地衣、小型土壤动物等相互作用形成.科尔沁沙地的本研究区,由于沙丘植被恢复和灌丛的生态效应,结皮在时间序列上逐渐由物理结皮发育成地衣和苔藓结皮.不同生境沙丘类型中,固定沙丘丘底的生境条件相对较好,小红柳灌丛下苔藓结皮的厚度最大,其结皮中的生物量大于其它结皮,加速了对养分的富集.半流动沙丘的差巴嘎蒿灌丛下为很薄的物理结皮,无结皮微生物及绿色植物的参与,因此其结皮的各项养分含量在 7 种结皮中最低.由此

可见,沙丘灌丛下结皮的养分含量与立地条件密切相关,随沙丘恢复的进程而逐渐增强。

4.2 不同沙丘生境结皮下层土壤的理化特性

有研究表明,生物结皮的形成可以显著地影响或改变表层土壤的理化属性^[25],如生物结皮中固氮蓝绿藻的存在,可以增加表层土壤的氮输入,在荒漠化地区,每年由生物结皮固定的氮素可达 $2 \sim 365 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1}$ ^[26];结皮微生物所固定的碳,可以增加表层土壤的有机质含量,保持土壤肥力^[27];有研究认为生物结皮的出现可提高土壤磷素的有效性,Jafari 等^[28]对比了有生物结皮和无生物结皮 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 土层土壤磷素含量,结果显示前者略高于后者。土壤表面微生物结皮的形成提高了土壤持水能力,加速了土壤的生化过程,并促进土壤矿物质沉积,这些过程提高了流动沙丘的养分循环并创造了一个养分积累的有利环境。

结皮下层土壤的养分积累来自于与植物复杂的相互关系(灌丛和凋落物),土壤的侵蚀和沉积,土壤微生物,大气降尘和矿化沉降等生化循环过程。其中,灌丛的出现强烈的影响土壤微生物特性并使土壤养分含量有较高的水平。灌丛的种类对“肥岛效应”的作用不同,它们在不同土层上吸收的养分含量不同,凋落物聚集和矿化作用也不同^[29]。灌丛的不同种类因外部形态差异,径流量也有差异,从而影响到结皮微环境,致使结皮下层土壤的理化性质不同。此外,地形地貌和潜在的地质条件也会直接影响到表层土壤的理化性质。研究区中固定沙丘丘底的地形低洼,易在融雪、降水过程后出现临时性积水,为孢子植物、尤其是苔藓植物的有性繁殖与营养生长创造良好的环境条件,是生物结皮发育最为完善的区域。在这类地貌部位,苔藓植物除分布于低矮灌丛下,还在灌丛间形成面积不等的纯群,与发育良好的地衣结皮镶嵌分布,干燥时呈黑色、黑褐色,湿润时呈绿色。丘底苔藓和地衣结皮的大量发育,使得这些区域的生物结皮具有较大的厚度和较强的抗机械能力,较耐践踏。当降水超过 5 mm 并在其上形成地表径流,水文过程将周围高处的细土物质运积于低洼处,并促进了结皮中微生物的生长发育,从而大大增加了土壤中的粘粒含量。

本研究仅以科尔沁沙地不同沙地恢复过程中的典型灌丛下发育的结皮及下层土壤为对象,探讨结皮发育特征及下层土壤理化性质,还不能完全地反映该区生物结皮的真实状况及功能作用。有关该区生物结皮在发育阶段的不同形态和发育机理,以及

生物结皮的发生发育对植被恢复演替的影响,还有待深入研究。

5 结论

(1)科尔沁沙地不同沙地恢复过程中,半流动沙丘的差巴嘎蒿灌丛发育了物理结皮,半固定沙丘的小叶锦鸡儿灌丛同时发育了物理结皮和藻结皮,固定沙丘的冷蒿灌丛下发育了地衣结皮和苔藓结皮,固定沙丘丘底的小红柳灌丛也同时发育了地衣结皮和苔藓结皮。

(2)从半流动沙丘到固定沙丘的丘底,结皮厚度、硬度和结皮含水量沿着物理结皮 < 藻结皮 < 地衣结皮 < 苔藓结皮的顺序依次增加。7 种不同生境下结皮类型的粒径分布差异极显著,结皮质地随结皮发育梯度逐渐变细,结皮越厚, $< 0.05 \text{ mm}$ 的粘粉粒含量越高。结皮的有机质、全 N、全 P、速效 N、速效 P 含量在沙丘生境中为半流动沙丘 < 半固定沙丘 < 固定沙丘 < 固定沙丘丘底,在结皮类型中为物理结皮 < 藻结皮 < 地衣结皮 < 苔藓结皮。不同沙丘生境上 7 种结皮的养分含量差异极显著。

(3)不同的沙丘生境中结皮下层土壤的养分含量和细颗粒含量差异极显著。结皮下层土壤养分含量主要分布在结皮下 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 的土层,且在该范围内由表及里递减。结皮下层土壤的极细沙、粘粉粒含量,有机质、全 N、全 P、速效 N 含量随沙丘生境恢复和结皮发育进程而依次增加。结皮的形成发育和结皮下层土壤特性的改进归因于灌丛的建立,不同沙丘生境演替发育的不同优势灌木为不同类型结皮的形成发育创造了有利条件。

参考文献:

- [1] Belnap J. The world at your feet: desert biological soil crusts [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, **1**: 181-189.
- [2] Thomas A D, Dougill A J. Distribution and characteristics of cyanobacterial soil crusts in the Molopo Basin, South Africa [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, **64**: 270-283.
- [3] Prasse R, Bomkamm R. Effect of microbiotic soil surface crusts on emergence of vascular plants [J]. *Plant Ecology*, 2000, **150**: 65-75.
- [4] Belnap J, Eldridge D J. Disturbance and recovery of biological soil crusts [A]. In: Belnap J, Lange O L (eds). *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management* [C]. Berlin: Springer, 2001. 363-384.
- [5] Eldridge D J, Greene R S. Microbiotic soil crusts: A view of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia [J]. *Australia Journal of Soil Research*, 1994, **32**: 389-415.
- [6] Li X R, Wang X P, Li T, *et al.* Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificial stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China [J]. *Biol Fertil Soil*, 2002, **35**: 147-154.

[7] 凌裕泉,屈建军,胡玫,等.沙面结皮形成与微环境的变化[J].应用生态学报,1993,4(4):393.

[8] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions [J]. Advances in Ecological Research, 1990, **20**: 179-223.

[9] Eldridge D J, Leys J F. Exploring some relationship s between biological soil crusts, soil aggregation and wind erosion [J]. Journal of Arid Environment, 2003, **53**: 457-466.

[10] Li X R, Zhang J G, Wang X P, *et al.* Study on Soil Microbiotic Crust and Its Influences on Sand-fixing Vegetation in Arid Desert Region [J]. Acta Botanica Sinica, 2000, **42**(9): 965-970.

[11] Zaady E, Groffman P, Shachak M. Nitrogen fixation in macro and microphytic patches in the Negev Desert [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, **30**: 449.

[12] Zhang Y M, Wang H L, Wang X Q, *et al.* The microstructure of microbiotic crust and its influence on wind erosion for a sandy soil surface in the Gurbantunggut Desert of Northwestern China [J]. Geoderma, 2006, **132**: 441-449.

[13] 王涛,吴薇,薛娟,等.近 50 年来中国北方沙漠化土地的时空变化[J].地理学报,2004,59(2):203-212.

[14] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等.科尔沁沙地沙漠化过程及其恢复机理[M].北京:海洋出版社,2003.74-83.

[15] 左小安,赵学勇,赵哈林,等.科尔沁沙质草地群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J].环境科学,2007,28(5):945-951.

[16] 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,2006,27(4):635-640.

[17] 苏永中,赵哈林.持续放牧和围封对科尔沁退化沙地草地碳截存的影响[J].环境科学,2003,24(4):23-28.

[18] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996.

[19] 左小安,赵学勇,张铜会,等.科尔沁沙地榆树疏林草地物种多样性及乔木种群空间格局[J].干旱区资源与环境,2005,19(4):63-68.

[20] Stradling D A, Thygersen T, Walker J A, *et al.* Cryptogamic crust metabolism in response to temperature, water vapor, and liquid water [J]. Therm Ochim Ica Acta, 2002, **394**: 219-225.

[21] Li S G, Harazono Y, Zhao H L, *et al.* Micrometeorological changes following establishment of artificially established Artemisia vegetation on desertified sandy land in the Horqin sandyland, China and their implication in regional environmental change [J]. Journal of Arid Environments, 2002, **52**: 101-119.

[22] Su Y Z, Zhao H L, Li Y L, *et al.* Influencing mechanisms of several shrubs on soil chemical properties in semiarid Horqin Sandy Land, China [J]. Arid Land Research and Management, 2004, **18**: 251-263.

[23] Duan Z H, Wang G, Xiao H L, *et al.* Abiotic soil crust formation on dunes in an extremely arid environment: a 43-year sequential study [J]. Arid Land Research and Management, 2003, **17**: 43-54.

[24] Dhillion S S. Environmental heterogeneity, animal disturbances, microsite characteristics, and seedling establishment in a *Quercus havardii* community [J]. Restoration Ecology, 1999, **7**: 399-406.

[25] Wakindiki C, BenHur M. Soil mineralogy and texture effects on crust micromorphology, infiltration, and erosion [J]. Soil Sci Soc Am J, 2002, **66**: 897-905.

[26] Billings S A, Schaeffer S M, Evans R D. Nitrogen fixation by biological soil crusts and heterotrophic bacteria in an intact Mojave Desert ecosystem with elevated CO₂ and added soil carbon [J]. Soil Biol Biochem, 2003, **35**: 643-649.

[27] Zaady E, Kuhn U, Wilske B, *et al.* Patterns of CO₂ exchange in biological soil crusts of successional age [J]. Soil Biol Biochem, 2000, **32**: 959-966.

[28] Jafari M, Tavili A, Zargham N, *et al.* Comparing some properties of crusted and uncrusted soils in Alagol region of Iran [J]. Pak J Nutr, 2004, **3**: 273-277.

[29] Quideau S A, Graham R C, Chadwick O A, *et al.* Biogeochemical cycling of calcium and magnesium by ceanothus and chamise [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, **63**: 1880-1888.