

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.019

生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响*

高广磊¹ 丁国栋¹ 赵媛媛¹ 冯薇¹ 包岩峰¹ 刘紫葳²

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 渥太华大学地理系, 渥太华 K1N6N5)

摘要:以宁夏盐池荒漠生态系统定位研究站域内藻、地衣、苔藓3种不同发育阶段生物结皮及裸沙地为研究对象,应用激光衍射粒度分析技术测定土壤粒度组成,计算分析平均粒径、标准偏差、偏度、峰态值和分形维数等土壤粒度特征参数,研究结果显示:研究区土壤粒度组成以砂粒为主,约占土壤颗粒体积分数的80%~95%,而粘粒、粉粒含量较少;土壤粒度分布较为集中,分选状况较差,偏度状况为极正偏度,峰态值为很尖窄、尖窄;土壤分形维数分布于2.15~2.30之间,且从大到小依次为苔藓结皮、地衣结皮、藻结皮、裸沙地。在生物结皮发育过程中,土壤粘粒、粉粒等细粒物质不断增加;粒度组成不断优化,整体呈现向均匀和对称分布演化趋势。生物结皮能够有效改良土壤结构,促进土壤发育,但速度十分缓慢。

关键词:土壤粒度 毛乌素沙地 粒度参数 生物结皮

中图分类号: P588.21; X141 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0115-06

引言

生物结皮是由细菌、真菌、藻类、地衣和苔藓等低等生物与土壤颗粒相互作用,在土壤表面发育形成的一层薄而密致的有机复合壳状体^[1-4],其生态适应性极强^[5],可以耐受高温、辐射,抵抗干旱、盐碱,因此广泛分布于全球干旱和半干旱荒漠地区,在部分地区甚至可覆盖地表面积的70%以上^[6]。生物结皮具有独特的生理生态结构和功能,其与荒漠生态系统的结构和功能密切相关,在荒漠生态系统中具有重要地位^[7-8]。目前,生物结皮已经成为生态学、植物学、土壤学、风沙物理学以及相关交叉学科研究的热点和重点问题^[9]。生物结皮的相关研究,国内外已有较多报道。自20世纪80年代以来,许多国外学者就已经从种类、分布、结构和功能等多个方面对生物结皮进行了研究^[1,6-7,10]。我国生物结皮相关研究开展较晚,但已取得较大进展。国内外生物结皮相关研究,主要涉及生物结皮种类与空间分布^[3,11-13]、生物结皮发育过程及其与环境因子的关系^[14-16]、生物结皮生态功能(水文、光合固碳、固氮等)^[17-20]等方面。但是,有关生物结皮对荒漠地区土壤的基本属性——粒度特征的影响却关注较少。鉴于此,本文通过对宁夏盐池荒漠生态系统定

位研究站域内藻、地衣和苔藓3种不同发育阶段生物结皮样地土壤调查分析,对比分析毛乌素沙地不同类型生物结皮土壤粒度组成以及平均粒径、标准偏差、偏度、峰态值和分形维数等土壤粒度参数,旨在探讨生物结皮发育对土壤粒度特征的影响,以期为我国干旱半干旱地区植被恢复、土壤改良和荒漠化防治提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于宁夏盐池荒漠生态系统定位研究站(37°04'~38°10'N,106°30'~107°47'E;海拔高度1400~1800m),地处黄土高原向鄂尔多斯高原过渡带,毛乌素沙地南缘核心区,属典型的温带大陆性季风气候。常年干旱少雨,年均降水量292mm,主要集中在6~9月份,约占全年降水量的62%,年均潜在蒸散量为2024mm,年平均气温7.8℃,冬夏、昼夜温差较大,分别可达28℃和20℃。研究区盛行西北风,年平均风速达2.6m/s,风蚀作用频繁强烈。土壤类型为风沙土,土壤结构松散,质量较差。研究区植被区系属欧亚草原带,受水分条件限制,植物种属较少,植物群落结构简单,草原低矮,生长稀疏,主要天然植被类型为以油蒿、长芒草、甘草等为主的典型半干旱荒漠草原。在基质疏松的流动

收稿日期:2013-08-12 修回日期:2013-09-17

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB429906)、国家林业局公益性行业科研专项经费资助项目(201304325)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD16B02)

作者简介:高广磊,博士生,主要从事荒漠化防治研究,E-mail: gaoguanglei@bjfu.edu.cn

通讯作者:丁国栋,教授,博士生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究,E-mail: dch1999@263.net

沙丘上主要生长有沙米、虫实等耐旱草本植物。此外,研究区还曾以人工栽植和飞播相结合的方式培育了大面积的柠条、沙柳、花棒、杨柴等灌木人工植被,用以固定流沙,遏制沙漠扩张^[21]。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集与分析

2012年7月,在宁夏盐池荒漠生态系统定位研究站内油蒿人工植被封育区选择具有典型代表性的天然藻、地衣和苔藓3种不同发育阶段生物结皮布设样品采集样地3个,样地尺寸2.0 m × 2.0 m,样

地间距小于50 m以保证其下层土壤与母质的一致性(表1)^[22]。样地地势平坦,取样点位于样地内沙蒿个体间空地,以消除微地貌和植被对土壤性状的影响。采用随机采样的方法,按照A层生物结皮层(厚度与生物结皮厚度相同)和B层生物结皮下层(1 cm)2个层次采集表层土壤样品。在生物结皮样地附近(50 m以内)选择裸沙地为对照样地,按照A层(0~1 cm)和B层(1~2 cm)2个层次采集土壤样品作为实验对照。同时,采集生物结皮样品,采用Opton West Germany 475200-9901型体视显微镜(Optex BK5000)鉴定生物结皮种类。

表1 生物结皮采集样地概况

Tab.1 General information of the different BSCs sites

样地编号	类型	颜色	厚度/cm	覆盖率/%	优势种
1	藻结皮	灰	0.37 ± 0.06	36.7 ± 2.9	具鞘微鞘藻、绿色颤藻
2	地衣结皮	棕	0.70 ± 0.12	53.3 ± 2.9	坚韧胶衣、球胶衣
3	苔藓结皮	绿	1.65 ± 0.32	71.7 ± 5.8	银叶真藓
4	裸沙地	—	—	—	—

土壤颗粒的粒度分布通常采用筛分法确定,这种方法虽简单易行,但工作量较大,且易受人为因素影响而使精确度降低^[23]。本研究采用激光衍射技术分析土壤样品粒度特征,激光衍射技术不但能够快速测定土壤颗粒分布,而且可以自由划分土壤颗粒粒径级,从而提供更多的土壤颗粒分布信息^[24]。土壤粒径分布采用英国马尔文公司生产的MS 2000型土壤粒度分析仪测定,该仪器测量范围0.02~2 000 μm,重复测量误差在2%以内。每例土样重复测定5次,取算术平均值。实验前,需对样品进行预处理。所有土壤样品过2 mm土壤筛后,加入质量分数为30%的H₂O₂溶液以去除样品中的有机质(包括生物结皮);然后加入NaHMP溶液浸泡,并用超声波震荡30 s以破坏土粒的团聚结构,使土粒分散。分析结果以美国制土壤粒径分级标准输出:黏粒(0~2 μm)、粉粒(2~50 μm)、极细砂(50~100 μm)、细砂(100~250 μm)、中砂(250~500 μm)、粗砂(500~1 000 μm)和极粗砂(1 000~2 000 μm)。同时输出土壤颗粒体积分数为5%、16%、25%、50%、75%、84%和95%所对应的沙粒粒径。

2.2 土壤粒度参数模型

根据Udden-Wentworth 粒级标准,采用Krumbein对数转换法将粒径真值转换为φ值^[25],其转换公式为

$$\phi = -\lg d \quad (1)$$

式中 d ——沙粒粒径, mm

采用Krumbein和Folk法计算平均粒径、标准

偏差、偏度和峰态值等土壤粒度特征参数^[24],各参数计算公式如下:

$$\text{平均粒径} \quad d_0 = \frac{1}{3}(\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}) \quad (2)$$

$$\text{标准偏差} \quad \sigma_0 = \frac{1}{4}(\phi_{84} - \phi_{16}) + \frac{1}{6.6}(\phi_{95} - \phi_5) \quad (3)$$

$$\text{偏度} \quad S_0 = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad (4)$$

$$\text{峰态值} \quad K_0 = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})} \quad (5)$$

式中,φ₅、φ₁₆、φ₂₅、φ₅₀、φ₇₅、φ₈₄和φ₉₅分别为粒配曲线中体积分数为5%、16%、25%、50%、75%、84%和95%所对应的沙粒粒径φ值。

平均粒径 d_0 反映了沙物质粒度的平均状况^[24],是研究沉积韵律和追索物质来源的依据之一^[26]。

标准偏差 σ_0 反映了沙物质粒度分布的分散程度^[24],按其取值范围可分为7种分选级别,即分选极好($\sigma_0 \leq 0.35$)、分选好($0.35 < \sigma_0 \leq 0.50$)、分选较好($0.50 < \sigma_0 \leq 0.71$)、分选中等($0.71 < \sigma_0 \leq 1.00$)、分选较差($1.00 < \sigma_0 \leq 2.00$)、分选差($2.00 < \sigma_0 \leq 4.00$)和分选极差($\sigma_0 > 4.00$)^[27]。

偏度 S_0 反映了沙物质粒度粗细分配的对称性^[24],按其取值范围分5个偏度等级:极负偏度($-1.0 \leq S_0 < -0.3$)、负偏度($-0.3 \leq S_0 < -0.1$)、近于对称($-0.1 \leq S_0 < 0.1$)、正偏度($0.1 \leq S_0 < 0.3$)和极正偏度($0.3 \leq S_0 \leq 1.0$)^[26]。

峰态值 K_0 反映了沙物质粒度分布的集中程度^[24],按其取值范围可分6个峰度等级,即很宽平

($K_0 \leq 0.67$)、宽平($0.67 < K_0 \leq 0.90$)、中等($0.90 < K_0 \leq 1.11$)、尖窄($1.11 < K_0 \leq 1.56$)、很尖窄($1.56 < K_0 \leq 3.00$)和极尖窄($K_0 > 3.00$)^[26]。

此外,本研究以马尔文土壤粒度分析仪土壤粒径体积分布数据为基础,计算土壤体积分形维数,计算公式为^[22]

$$\frac{V(r < R_i)}{V_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

式中 D ——土壤体积分形维数

r ——土壤粒径, mm

R_i ——粒径等级 i 的土壤粒径, mm

R_{\max} ——土壤粒径的极大值, mm

$V(r < R_i)$ ——土壤粒径小于 R_i 的土壤体积分数, %

V_T ——各粒径等级体积分数之和, %

表 2 不同发育阶段生物结皮土壤颗粒体积分数

Tab. 2 Soil particle distributions in different BSCs sites

%

类型	层次	粘粒	粉粒	砂粒				
				极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
藻结皮	A	0.63 ± 0.10	16.39 ± 3.70	18.08 ± 5.91	44.77 ± 8.14	18.39 ± 8.88	1.74 ± 0.91	0
	B	0.48 ± 0.06	11.30 ± 2.04	15.40 ± 4.73	49.02 ± 10.48	21.68 ± 11.57	1.91 ± 1.66	0.21 ± 0.36
地衣结皮	A	0.65 ± 0.05	20.51 ± 7.67	26.81 ± 6.80	42.25 ± 6.89	9.45 ± 5.72	0.34 ± 0.47	0
	B	0.50 ± 0.15	15.90 ± 7.49	20.04 ± 9.37	47.60 ± 5.55	15.08 ± 16.09	0.87 ± 1.03	0
苔藓结皮	A	0.70 ± 0.12	21.18 ± 0.81	28.72 ± 3.47	39.49 ± 5.45	8.63 ± 3.95	1.28 ± 1.10	0
	B	0.65 ± 0.06	18.25 ± 2.12	25.92 ± 7.18	41.72 ± 4.89	11.03 ± 7.39	2.43 ± 2.56	0
裸沙地	A	0.33 ± 0.08	6.21 ± 0.47	5.47 ± 0.52	60.90 ± 2.67	26.22 ± 1.77	0.87 ± 0.32	0
	B	0.38 ± 0.12	6.83 ± 0.93	5.30 ± 1.12	58.07 ± 5.86	27.61 ± 6.48	1.81 ± 1.04	0

生物结皮样地表层土壤与裸沙地土壤粒度组成的区别主要缘于风力侵蚀作用对于沙物质的搬运和堆积作用。研究区气候干燥,受频繁而强烈的干热侵蚀风影响,裸沙地表层土壤的细粒物质易在风沙流作用下被搬运而离开原位,使得土壤中细粒物质含量减少,粗粒物质相对增加,土壤结构不断粗化。生物结皮样地表层土壤细粒物质含量明显高于裸沙地,这是因为由于生物结皮的存在,沙物质的搬运与堆积作用发生改变。在生物结皮的遮蔽保护下,表层土壤中的细粒物质得以保存和恢复,而使土壤结构细化。因此,生物结皮对于改良土壤粒度组成具有积极的促进作用。

3.2 不同发育阶段生物结皮土壤粒度参数

3.2.1 平均粒径

研究区藻、地衣、苔藓 3 种类型生物结皮 A 层和 B 层土壤平均粒径分别为 2.76 和 3.04、3.52 和 3.70、3.49 和 3.29(表 3)。由此可知,无论是生物结皮层还是生物结皮下层,地衣结皮样地土壤平均粒径均为最大,其次分别为苔藓结皮和藻结皮,但 3

3 结果与分析

3.1 不同发育阶段生物结皮土壤粒度组成

由表 2 可知,研究区藻、地衣、苔藓 3 种类型生物结皮样地表层土壤颗粒粒度组成均以砂粒为主,其 A 层和 B 层土壤颗粒平均体积分数分别为 82.98% 和 88.22%、78.85% 和 83.59%、78.12% 和 81.10%;其次为粉粒,粘粒含量则最低,平均体积分数不足 1%。伴随着生物结皮的发育和演替,3 种类型生物结皮样地表层土壤中粘粒、粉粒含量不断增加,而砂粒含量则相应减少。同时,表层土壤粘粒、粉粒含量均高于裸沙地,而砂粒含量则小于裸沙地。由生物结皮样地表层土壤粒度的垂直分布可知,生物结皮层的土壤粘粒、粉粒含量均高于结皮下层,砂粒含量则低于结皮下层,这与裸沙地土壤粒度组成分布规律明显相反。

种生物结皮样地表层土壤的平均粒径均大于裸沙地(2.40 和 2.42)。这表明伴随着生物结皮的发育演替,土壤的平均粒径呈现不断细化的趋势,即裸沙地土壤平均粒径最粗,而地衣结皮样地土壤平均粒径则最细。土壤平均粒径的垂直分布显示,3 种生物结皮样地 A 层的土壤平均粒径均大于 B 层,而裸沙地 A 层土壤平均粒径则略小于 B 层,即藻、地衣和苔藓结皮 A 层土壤平均粒径细于 B 层,而裸沙地 A 层土壤平均粒径则略粗于 B 层。

3.2.2 标准偏差

由表 3 可知,研究区 3 种生物结皮样地表层土壤粒度的标准偏差值分布较为集中,分别为 1.52 和 1.32、1.64 和 1.57、1.51 和 1.47,按照 Folk 分选等级标准,其分选状况均表现为较差,说明研究区土壤粒度分布较为集中。其中,地衣结皮样地土壤粒度分布最为集中,分选状况最差,其次为苔藓结皮和藻结皮,且生物结皮下层土壤粒度分选状况要优于生物结皮层。裸沙地土壤粒度分选状况要优于 3 种生物结皮样地,虽然其分选状况也表现为较差,但标准

表3 不同发育阶段生物结皮样地土壤粒度参数
Tab.3 Soil particle parameters in different BSCs sites

类型	层次	平均粒度	标准偏差	偏度	峰态值	分形维数
藻结皮	A	3.04 ± 0.29	1.52 ± 0.19	0.35 ± 0.05	1.63 ± 0.29	2.28 ± 0.03
	B	2.76 ± 0.26	1.32 ± 0.15	0.33 ± 0.03	1.75 ± 0.43	2.23 ± 0.02
地衣结皮	A	3.70 ± 0.70	1.64 ± 0.30	0.33 ± 0.31	1.60 ± 0.44	2.29 ± 0.03
	B	3.52 ± 1.18	1.57 ± 0.41	0.32 ± 0.02	1.38 ± 0.41	2.24 ± 0.06
苔藓结皮	A	3.49 ± 0.08	1.51 ± 0.13	0.30 ± 0.12	1.57 ± 0.15	2.30 ± 0.02
	B	3.29 ± 0.28	1.47 ± 0.13	0.31 ± 0.07	1.59 ± 0.20	2.29 ± 0.01
裸沙地	A	2.40 ± 0.13	1.08 ± 0.09	0.37 ± 0.06	2.23 ± 0.30	2.15 ± 0.04
	B	2.42 ± 0.02	1.01 ± 0.10	0.35 ± 0.02	2.10 ± 0.13	2.17 ± 0.05

偏差取值(1.08和1.01)接近于分选中等级别。这反映了在风蚀作用的强烈影响下,土壤粒度变化的复杂性与差异性。在土壤粗化的过程中,土壤粒度分布更为集中,而在生物结皮影响下,土壤粒度的分布范围则更为广泛。

3.2.3 偏度

与标准偏差取值分布类似,藻、地衣、苔藓3种生物结皮表层土壤粒度偏度分布也较为集中,分别为0.35和0.33、0.33和0.32、0.30和0.31,按照偏度等级划分标准,其偏度状况均为极正偏度。这表明沙物质粒度粗细分配的对称性极差,其中藻结皮最差,其次为地衣结皮和苔藓结皮。参照表2可知,研究区土壤粒度组成以细砂为主,粘粒、粉粒等细粒物质含量较少,沙物质粒度粗细分配以粗粒物质为主,极不对称。此外,虽然生物结皮样地表层土壤粒度偏度等级均为极正偏度,但其偏度小于裸沙地(0.37和0.35)。这说明在生物结皮的影响下,土壤中细粒物质含量不断增加,土壤粒度粗细分配正朝向对称分布发展,但速度极慢。

3.2.4 峰态值

由表3可知,藻、地衣和苔藓3种生物结皮样地峰态值分别为1.63和1.75、1.60和1.38、1.57和1.59。按照土壤粒度分布峰度等级标准,除地衣结皮B层为尖窄外,其余均为很尖窄。这说明土壤粒度分布并不均匀,集中程度较高,存在明显的优势粒径级别。由表2可知,优势粒径级别为细砂,这与偏态值相互呼应。同时,与裸沙地相比(2.23和2.10),生物结皮样地土壤粒度峰态值明显较小。这说明裸沙地土壤粒度分布更为尖窄,亦说明生物结皮对土壤粒度分布具有明显的改良作用,受生物结皮影响,土壤粒度分布趋于宽平。

3.2.5 分形维数

分形维数不仅可以实现复杂土壤结构特征的定量表达,还可以有效指示土壤含水率、土壤肥力、土壤退化程度等土壤性质和特征^[28-30]。研究区藻、地衣和苔藓3种生物结皮样地表层土壤分形维数分别

为2.28和2.23、2.29和2.24、2.30和2.29,按照生物结皮的发展演替序列,分形维数呈增大趋势,且均大于裸沙地的土壤分形维数。同时,生物结皮层分形维数要大于生物结皮下层。分形维数与土壤中粘粒和粉粒含量呈显著的正相关关系,与砂粒含量呈负相关关系^[31]。因此,研究区生物结皮样地分形维数增加说明土壤正经历一个细化的过程,粘粒和粉粒含量不断增加,土壤结构不断得到改善。

此外,由式(2)~(6)和表3可知,与平均粒径、标准偏差、偏度值和峰态值等粒度参数相比,分形维数包含的土壤粒度组成信息更丰富,其对土壤粒度组成变化的响应也更为敏感。因此,分形维数能够更为准确地表征在强烈的风蚀条件下沙物质的群体特征及其变异规律,是监测土壤风蚀与土地退化的重要指标。

4 结论

(1)研究区土壤粒度分布较为集中,砂粒体积分数可达土壤颗粒的80%~95%,而粘粒、粉粒含量则相对较低,粒度特征整体呈现粒径较粗、分选较差、偏态极正和峰态尖窄的特点。土壤分形维数分布于2.15~2.30之间,且从大到小依次为苔藓结皮、地衣结皮、藻结皮、裸沙地。这是干旱、半干旱风沙地区风化、侵蚀、搬运、沉积等地表过程共同作用的结果,土壤细粒物质由于长期的风蚀作用严重损失。

(2)生物结皮能够有效改良土壤结构,促进土壤发育,但速度十分缓慢。与裸沙地相比,生物结皮样地土壤颗粒分布更为广泛,且呈明显的细化趋势;同时,伴随着生物结皮的演替发育,土壤中细粒物质不断增加,粒度组成不断优化。此外,无论是生物结皮层样地,还是裸沙地,随着土层深度的增加,土壤粒度组成存在明显的差异,这不仅反映了侵蚀、搬运、沉积等地表过程在不同土壤层次的差异性,也反映了生物结皮对于土壤粒度组成改良作用的空间局限性。

(3)各粒度参数基本反映了土壤粒度分布对不同发育阶段生物结皮发育的响应规律与差异,但平均粒径、标准偏差、偏度和峰态值等粒度参数包含的土壤粒度组成信息相对较少,不能充分利用土壤粒

度组成数据说明沙物质的群体特征。因此,分形维数更有利于表征土壤粒度组成的复杂结构,对于描述土壤风蚀过程具有重要指示意义。

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(4): 181 ~ 189.
- 2 闫德仁, 薛英英, 赵春光. 沙漠地区生物土壤结皮层腐殖质特征[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2 017 ~ 2 020.
Yan Deren, Xue Yingying, Zhao Chunguang. Humus feature in soil bio-crust in desert area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2 017 ~ 2 020. (in Chinese)
- 3 张元明, 陈晋, 王雪芹, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮的分布特征[J]. *地理学报*, 2005, 60(1): 53 ~ 60.
Zhang Yuanming, Chen Jin, Wang Xueqin, et al. The distribution patterns of biological soil crust in Gurbantunggut Desert[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 53 ~ 60. (in Chinese)
- 4 赵哈林, 郭秩瑞, 周瑞莲, 等. 植被覆盖对科尔沁沙地土壤生物结皮及其下层土壤理化特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1 657 ~ 1 663.
Zhao Halin, Guo Yirui, Zhou Ruilian, et al. Effects of vegetation cover on physical and chemical properties of bio-crust and under-layer soil in Horqin Sand Land[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1 657 ~ 1 663. (in Chinese)
- 5 Schlesinger W H, Phippen J S, Wallenstein M D, et al. Community composition and photosynthesis by photoautotrophs under quartz pebbles, southern Mojave Desert[J]. *Ecology*, 2003, 84(12): 3 222 ~ 3 231.
- 6 Belnap J, Lange O L. *Biological soil crusts: structure, function, and management*[M]. New York: Springer-verlag, 2001.
- 7 Evans R D, Johansen J R. Microbiotic crusts and ecosystem processes[J]. *Critical Reviews in Plant Science*, 1999, 18(2): 183 ~ 225.
- 8 Maestre F T, Bowker M A, Canton Y, et al. Ecology and functional roles of biological crusts in semi-arid ecosystems of Spain[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(12): 1 282 ~ 1 291.
- 9 杨晓辉, 张克斌, 赵云杰. 生物土壤结皮——荒漠化地区研究的热点问题[J]. *生态学报*, 2001, 21(3): 474 ~ 480.
Yang Xiaohui, Zhang Kebin, Zhao Yunjie. Microbiotic soil crust—a research forefront in desertification-prone areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 474 ~ 480. (in Chinese)
- 10 Bowker M A. Biological soil crust rehabilitation in theory and practice: an underexploited opportunity[J]. *Restoration Ecology*, 2007, 15(1): 13 ~ 23.
- 11 Garcia-Pichel F, Lopez-Cortes A, Nubel U. Phylogenetic and morphological diversity of cyanobacteria in soil desert crusts from the Colorado plateau[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(4): 1 902 ~ 1 910.
- 12 Zhang Y M, Chen J, Wang L, et al. The spatial distribution patterns of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Northern Xinjiang, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(4): 599 ~ 610.
- 13 Kidron G J, Vonshak A, Dor I, et al. Properties and spatial distribution of microbiotic crusts in the Negev Desert Israel[J]. *CATENA*, 2010, 82(2): 92 ~ 101.
- 14 Belnap J, Phillips S L, Miller M E. Response of desert biological soil crusts to alterations in precipitation frequency[J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 306 ~ 316.
- 15 Chen L, Xie Z, Hu C, et al. Man-made desert algal crusts as affected by environmental factors in Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67(3): 521 ~ 527.
- 16 Jia R L, Li X R, Liu L C, et al. Responses of biological soil crusts to sand burial in a revegetated area of the Tengger Desert, Northern China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(11): 2 827 ~ 2 834.
- 17 Belnap J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrological cycles[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(15): 3 159 ~ 3 178.
- 18 Burgheimer J, Wilske B, Maseyk K, et al. Relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and carbon fluxes of biologic soil crusts assessed by ground measurements[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(4): 651 ~ 669.
- 19 Brostoff W N, Sharifi M R, Rundel P W. Photosynthesis of cryptobiotic crust in a seasonally inundated system of pans and dunes in the western Mojave Desert, CA: field studies[J]. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2005, 200(6): 592 ~ 600.
- 20 Wu N, Zhang Y M, Downing A. Comparative study of nitrogenase activity in different types of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(9): 828 ~ 833.
- 21 原鹏飞. 盐池沙地水分动态与干沙层形成规律研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
Yuan Pengfei. Study on soil moisture dynamic and formation in dry sand layer in Yanchi Sandland[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009. (in Chinese)
- 22 Gui D, Lei J, Zeng F, et al. Characterizing variations in soil particle size distribution in oasis farmlands—a case study of the Cele

- Oasis[J]. *Mathematical and Computer Modeling*, 2010, 51(11~12): 1306~1311.
- 23 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 545~550. Wang Guoliang, Zhou Shenglu, Zhao Qiguo. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 545~550. (in Chinese)
- 24 杨金玲, 李德成, 张甘霖, 等. 土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J]. *土壤学报*, 2008, 45(3): 413~419. Yang Jinling, Li Decheng, Zhang Ganlin, et al. Comparison of mass and volume fractal dimension of soil particle size distribution [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(3): 413~419. (in Chinese)
- 25 丁国栋. 风沙物理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- 26 董智, 王丽琴, 杨文斌, 等. 额济纳盆地戈壁沉积物粒度特征分析[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(1): 32~38. Dong Zhi, Wang Liqin, Yang Wenbin, et al. Grain size characteristics of gobi sediment in Ejina Basin[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(1): 32~38. (in Chinese)
- 27 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- 28 伏耀龙, 张兴昌, 王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 120~125. Fu Yaolong, Zhang Xingchang, Wang Jingui. Fractal dimension of soil particle-size distribution characteristics in dry valley of upper Minjiang River[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(3): 120~125. (in Chinese)
- 29 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 基于多重分形的土壤颗粒粒径分布于土壤物理特性关系[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(3): 44~50. Guan Xiayan, Yang Peiling, Lü Ye. Relationships between soil particle size distribution and soil physical properties based on multifractal[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(3): 44~50. (in Chinese)
- 30 郑子成, 李卫, 李廷轩, 等. 基于分形理论的设施土壤水分特征曲线研究[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(5): 49~54. Zheng Zicheng, Li Wei, Li Tingxuan, et al. Soil water retention curve based on fractal theory in greenhouse soil [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(5): 49~54. (in Chinese)
- 31 Su Y Z, Zhao H L, Zhang W Z, et al. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification[J]. *Geoderma*, 2004, 122(1): 43~49.

Effects of Biological Soil Crusts on Soil Particle Size Characteristics in Mu Us Sandland

Gao Guanglei¹ Ding Guodong¹ Zhao Yuanyuan¹ Feng Wei¹ Bao Yanfeng¹ Liu Ziwei²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Department of Geography, University of Ottawa, Ottawa K1N6N5, Canada)

Abstract: To reveal the effects of biological soil crusts (BSCs) on soil particle size characteristics in Mu Us Sandland, soil samples under algae, lichens, and mosses crusts as well as the uncovered sandland were selected in Yanchi research station. Soil particle size distributions were identified by using laser diffraction technique. Particle size parameters were subsequently calculated including average particle size, standard deviation, skewness, kurtosis and fractal dimension. The results indicate that the majority soil particle size is occupied by sand particles approximately accounting for 80%~95% of the total volume; accordingly clay and silt particles contents are much less; soil particle size distributions in different sites are comparatively centralized that resulted in poor sorting, very positive skewness as well as sharp or very sharp kurtosis; the fractal dimension of soil increases progressively across the successional stages of BSCs in range of 2.15~2.30. In short, as affected by BSCs, clay and silt particles continue to increase leading to constantly particle distribution optimization, and soil particle size distribution inclines to uniform and symmetric pattern. Therefore, BSCs are beneficial to soil improvement and development, but rather slowly.

Key words: Soil particle size Mu Us Sandland Particle size parameter Biological soil crusts