

生物土壤结皮对库布齐沙漠北缘 土壤粒度特征的影响

肖巍强, 董治宝, 陈 颢, 邵天杰, 崔徐甲, 李 超, 宋绍鹏, 肖 南, 李露露

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 对库布齐沙漠北缘不同发育阶段的生物土壤结皮及其下层土壤粒度特征进行分析。结果表明:流动沙地和藻类结皮表层均以细砂和中砂成分为主,藓类结皮表层以细砂和极细砂为主。生物土壤结皮表层的中粉砂至黏土、粗粉砂和极细砂含量均高于其下层土壤。两种结皮样地均属于分选性较差等级,但结皮下层土壤分选性中等,3类曲线均不对称,属于正偏—极正偏等级,藓类结皮和藻类结皮表层的峰形均属于中等尖锐水平,而流动沙地的曲线尖窄。生物土壤结皮的成土作用随着结皮的发育阶段和土层深度的增加而表现出差异性和复杂性。

关键词: 粒度特征; 生物土壤结皮; 库布齐沙漠

文章编号: 1000-694X(2017)05-0970-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00138

中图分类号: S152.3

文献标志码: A

0 引言

生物土壤结皮(Biological Soil Crusts, BSCs)在中国西北荒漠区广泛分布,由隐花植物如蓝藻、荒漠藻、地衣、苔藓类和土壤中微生物,以及相关的其他生物体通过菌丝体、假根和分泌物等与土壤表层颗粒胶结形成的十分复杂的复合体,是干旱半干旱荒漠地表景观的重要组成部分之一^[1-3]。藻类和苔藓植物是荒漠植被演替过程中常见的两类先锋植物,同时也是生物土壤结皮中生物量最大的2个类群^[4],在改善土壤性质、促进植被恢复等方面具有重要作用,因此得到了国内外的广泛关注^[3,5]。对于沙丘沉积物粒度特征前人已经做得大量的工作,有从沙丘发育的不同时间尺度^[6-7]和空间区域尺度^[8-14]分析的,也有侧重沙丘类型^[15-19]、风沙环境状况^[11,19-20]和沉积环境变化^[7,20-22]等方面的。随着国内外学者对生物土壤结皮研究的不断深入,在生物土壤结皮分布、改良土壤理化性质、促进土壤养分积累及其水土保持功能等方面有着丰富的研究成果^[23-33]。

关于生物土壤结皮对于土壤粒度特征的影响也有很多论述。Onofriok等^[34]研究表明,土壤粉粒含量愈高土壤结皮愈容易形成;吴发启等^[35]对黄壤土物理结皮研究后,认为在降雨侵蚀中,结皮的形成是以细砂和粗粉砂为骨架,以小于0.01 m的细小颗

粒填塞土壤孔隙的一个物理过程。在生物土壤结皮方面,科尔沁沙地沙丘土壤结皮逐渐由物理结皮向地衣结皮和苔藓结皮发育,各种土壤结皮都是以砂粒(1~0.1 mm)和极细砂(0.1~0.05 mm)为主,分别占到了土壤颗粒总量的67.11%和93.04%,黏粉粒含量都很低^[36]。随着林龄的增加,结皮中的黏粉粒和细砂含量较流动沙地表层土壤分别增加13.9倍和36.1倍,砂粒含量下降了43%,结皮下0~5 cm表土的机械组成也发生了明显变化^[37];周小泉等^[38]认为,苔藓结皮能够明显提高土壤稳定性,增加细砂粒含量,降低粗砂粒含量,无结皮样地2~5 cm剖面土壤黏粉粒含量高于有结皮样地;陈小红等^[39]通过对同一地区不同发育程度的结皮机械组成比较发现中砂粒(1~0.05 mm)和粗粉粒(0.05~0.01 mm)含量相对较多,细粉粒和黏粒含量相对较少,不同发育程度的结皮机械组成无显著差异。结皮形成初期对颗粒组成有一定的要求,组成达到一定范围才能形成结皮。结皮一旦形成,随时间的增加,厚度在不断增加,但质地基本不变。肖波等^[40]认为沙土生物结皮的黏粒和粉粒含量在结皮层和0~5 cm以及5~25 cm均明显高于无结皮,在25~50 cm则基本近似,而黄土生物结皮在所有土层均与无结皮近似。尽管国内外学者对于土壤结皮的形成和发育及其对土壤粒度影响有着丰富的研究,但

收稿日期:2016-08-31; 改回日期:2016-10-08

资助项目:国家自然科学基金项目(41401310);中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK201503060)

作者简介:肖巍强(1992—),男,福建长乐人,硕士研究生,主要从事风沙地貌研究。E-mail: 834673637@qq.com

通信作者:董治宝(E-mail: zbdong@lzb.ac.cn)

是因土壤类型不同、结皮种类不同和土壤结皮的完善程度不同,结果也有差别。大部分侧重于对土壤粒度机械组成的研究,而忽略了对粒度参数的影响。鉴于此,在库布齐沙漠北缘地区选取流动沙地、藻类结皮和藓类结皮3种不同发育阶段生物土壤结皮样地进行调查分析,探讨不同发育阶段生物土壤结皮对于结皮层和下伏土壤层土壤粒度特征的影响。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

库布齐沙漠(39°30′—40°41′N, 107°00′—111°30′E)位于黄河中游南岸、鄂尔多斯高原北部,属于温带干旱、半干旱地区,东西长400 km,西部宽50 km,面积约1.863万km²。研究区位于库布齐沙漠北缘沿黄公路两侧,公路总体上呈东西延伸,沿黄公路南北两侧紧邻沙地,北侧沙地边缘是黄河阶地,北与巴彦淖尔盟的磴口县、杭锦后旗、临河市、五原县、乌拉特前旗隔着黄河相望。研究区1月平均气温-12.4℃,7月平均气温21.5℃,多年平均气温6.58℃,年极端高温40.2℃,极端低温-34.5℃,气温年较差大。多年平均降水量290 mm,全年降水时间上分布不均,1月和12月降水量最少,降水集中在6—8月,且多为短时雷雨,夏季降水变率33%~43%。由于该研究区离黄河较近,降雨量比沙漠腹地多,空气湿度相对较大。地表蒸发强烈,年蒸发量2130.2 mm,湿润度为0.4,无霜期135~160 d,年日照时间为3000~3200 h,≥10℃的积温3000~3200℃,年均风速3~4 m·s⁻¹,最大风速24 m·s⁻¹,大风日数25~35 d。在沙漠北缘公路两侧沙地内有大量天然沙生植被:流动沙丘上分布有沙柳(*Salix mongolicals*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)和水柏枝(*Myricaria germanica*),在其下部和丘间低地生长有花棒(*Hedysarum scoparium*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、羊柴(*Hedysarum fruticosum* var. *laeve*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、籽蒿(*Artemisia sphaerocephala*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等^[41],在公路的两侧固定、半固定沙丘上生物结皮广泛发育,且以藻类结皮为主,丘间地及灌丛下则以藓类结皮为主,苔类植物较为少见。

1.2 样品采集与试验方法

本研究于2015年12月冬季进行,在库布齐沙

漠北缘公路两侧平坦的丘间地内选择具有代表性的藻类和藓类两种生物土壤结皮样地各3个,并且在结皮样地周围选取2个流动沙地样地作为对照样地。样地尺寸为1.0 m×1.0 m,在各种样地内均匀设3个藻类结皮采样点、3个藓类结皮采样点和3个流动沙地采样点,再采用土壤剖面法在采样点上用平铲由上至下分别采集流动沙地、藻类结皮、藓类结皮样地的表层生物土壤结皮样本和结皮层以下0~1、1~2、2~3、3~4、4~5 cm的土样。采集结束后同一种样地同一深度层的样品均匀混合作为该样地样本,共计144个样本。所有样品均装入自封袋中并编号记录,带回实验室自然风干后过2 mm筛,去除树根、树叶等残留物再封袋保存。

上机前,样品的预处理过程为:①根据样本砂粒粒径,称取已干燥分散的样品0.5~1.0 g,放入500 mL烧杯中,加10%的双氧水10 mL,在加热状态下除去有机质;②随后加入10%盐酸10 mL,在加热状态下除去碳酸钙胶结物;③反应完成后,加满蒸馏水,放置在实验台上静置10~15 h;④倒掉上部多余的蒸馏水,加入分散剂(0.06 mol的六偏磷酸钠溶液10 mL),使用超声波池振荡器震荡10~15 min;⑤烧杯中加满水,在Mastersizer2000激光粒度仪上进行粒度分析,用百分比来表示各个粒级含量。然后利用Folk-Ward图解法公式进行粒度特征参数的计算,颗粒粒径单位用Φ表示^[42-43]。把砂粒沉积物的平均粒径0.031、0.063、0.125、0.25、0.5、1 mm作为中粉砂、粗粉砂、极细砂、细砂、中砂、粗砂和极粗砂的分界点,对应的Φ值依次为5、4、3、2、1、0。

2 结果

2.1 粒级组成

从图1可以看出,流动沙地和藻类结皮表层均以细砂和中砂成分为主,藓类结皮表层以细砂和极细砂为主。其中,流动沙地中砂所占比重最多,达到51.23%,分布较为集中,细砂占31.04%;藻类结皮表层细砂占26.42%,中砂为23.82%;极粗砂和中粉砂在流动沙地所占比重极少,几乎为0%,而有生物结皮覆盖的藻类和藓类结皮层样本中,中粉砂和粗粉砂明显增多,细砂和中砂比重有所减少,中粉砂、粗粉砂和极细砂均所占比重高于流动沙地,中砂、粗砂成分均低于流动沙地。

从图2和图3可知,无论是藻类结皮还是藓类

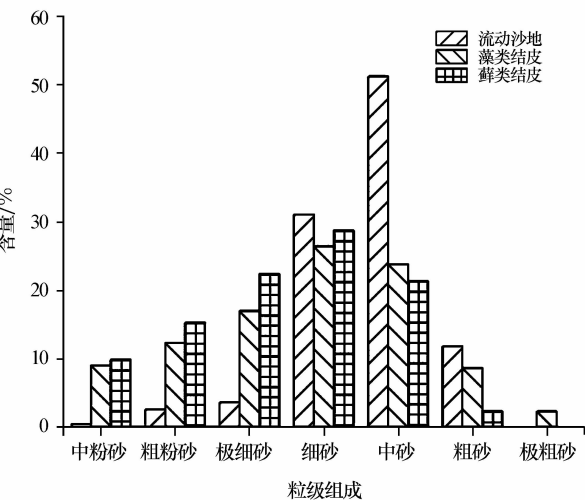


图 1 生物土壤结皮表层物质粒级组成
Fig. 1 Grain composition of BSCs

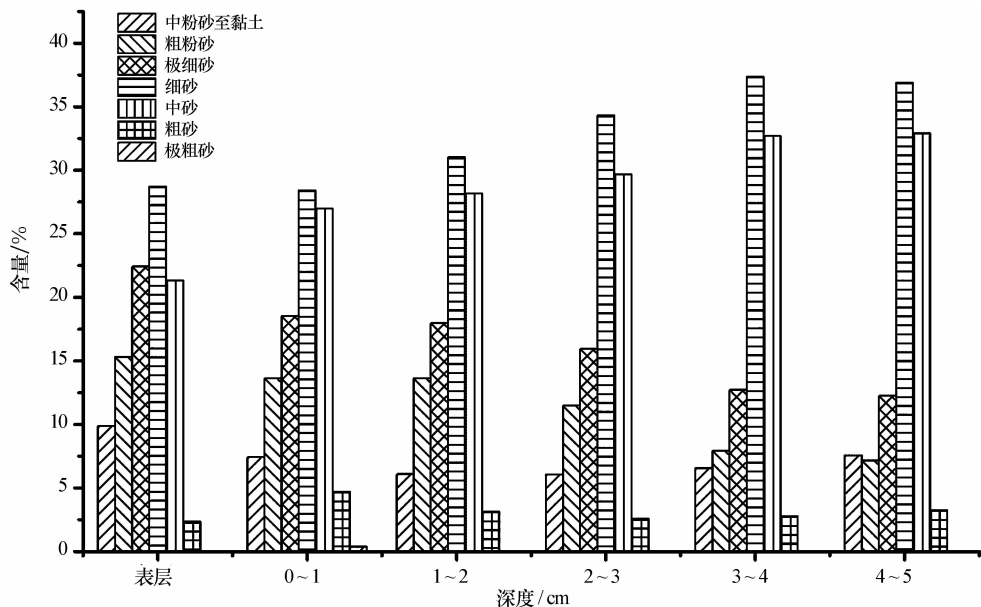


图 2 藓类结皮不同深度下物质的粒级组成
Fig. 2 Grain composition in different depth of moss crust

径、标准偏差、偏度和峰态值等土壤粒度特征参数^[43]。

2.2.1 平均粒径

平均粒径(M_z)代表沉积物粒度分布的集中趋势,即碎屑物质的粒度一般是趋向于围绕着一个平均的数值分布^[44]。从图 4 与表 1 可以看出,流动沙地、藻类结皮和藓类结皮表层物质的平均粒径依次为 1.94261Φ 、 2.58306Φ 、 2.96517Φ ,流动沙地表层颗粒粒径最大,其次为藻类结皮和藓类结皮,藓类结皮表层颗粒最细。可见有生物土壤结皮发育的样地表层颗粒均小于流动沙地,地表生物土壤结皮能够

结皮样地,生物土壤结皮表层中粉砂至黏土、粗粉砂和极细砂含量均高于下层土样,在藓类结皮样地中粉砂至黏土、粗粉砂和极细砂比重由结皮表层的 9.86%、15.31%、22.43% 不断下降至下伏 4~5 cm 深度处的 7.55%、7.16% 和 12.24%,细砂和中砂随深度不断增加。极粗砂在两种生物土壤结皮层和结皮下层土样中含量几乎为零,在藻类结皮层 (2.37%) 和下伏 1 cm 处 (0.84%) 较为明显,而藓类结皮层未发现极粗砂。

2.2 粒度参数

粒度参数是综合反映沉积物粒度特征及沉积环境的量化指标,经常使用的粒度参数有平均粒径(M_z)、标准偏差(σ)或分选系数(S_d)、偏度(SK)、峰态值(K_g)等,本文采用 Folk-Ward 法计算平均粒

促进土壤黏化过程,加快土壤发育进程。从整个样点垂直剖面可以看出,不管是流动沙地、藻类结皮还是藓类结皮样地,土壤颗粒平均值均表现为表层颗粒较细,深层处土壤颗粒粒径较粗。但上下差异表现不一,藻类结皮表层至 5 cm 深度内的平均粒径变化不大,差异较小;而流动沙地和藓类结皮表层至 5 cm 深度内的平均粒径变化较大,差异显著。

2.2.2 分选系数

分选系数(S_d)用标准偏差 σ 来表示,是沉积物分选性的指标。关于分选性好坏的标准,界限不尽一致,本文采用 Folk-Ward 提出的对 σ 的分级标准:

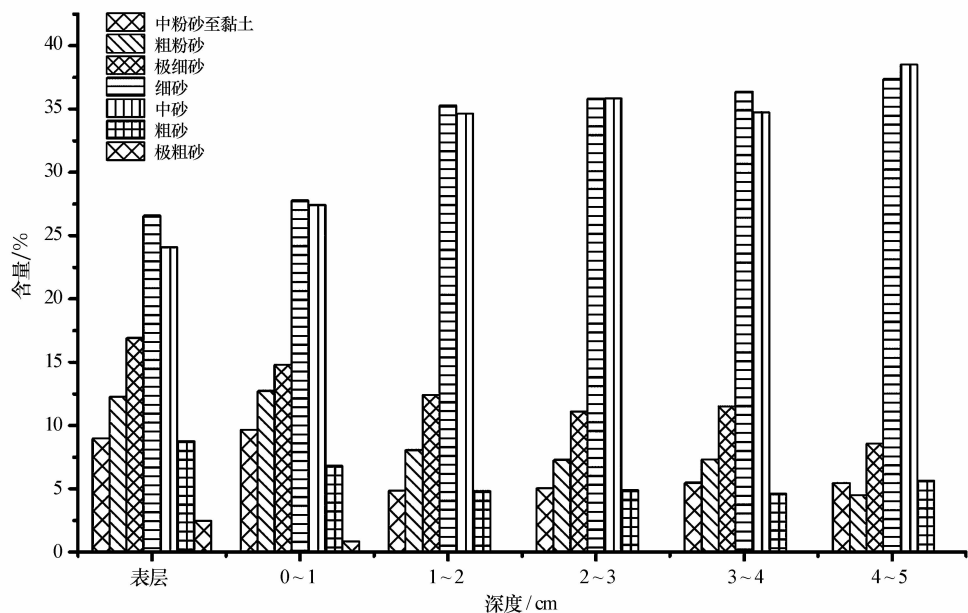


图 3 藻类结皮不同深度下物质的机械组成

Fig. 3 Grain composition in different depth of algal crust

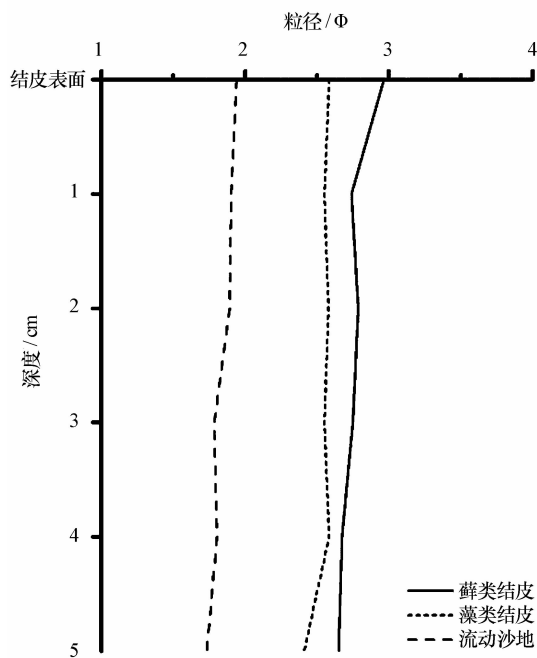


图 4 生物土壤结皮平均粒径的纵向分布

Fig. 4 Vertical distribution of the average particle size of BSCs

0.35~0.50 分选好,0.50~0.71 分选较好,0.71~1.00 分选中等,1.00~2.00 分选较差,2.00~4.00 分选差。由表 1 可知藻类结皮样地的标准偏差值由剖面表层自上而下分别为 1.554、1.174、1.224、1.209、1.239、1.123,均处在 1.00~2.00,属于分选性较差等级。藓类结皮表层的标准偏差为 1.767,比藻类结皮表层 1.554 要大,虽然都处于分选较差

等级,但藻类结皮层颗粒的分选性要优于藓类结皮。无论是藻类结皮还是藓类结皮,结皮表层的 σ 值均要大于其下伏土壤,而在藓类结皮样地 4~5 cm 深处, σ 值为 0.988,接近于 1,处于分选中等水平。这反映了在生物土壤结皮发展过程中,土壤粒度的变化具有复杂性和差异性。

2.2.3 偏度

偏度(SK)是用来测量频率分布曲线的不对称程度的,即表示非正态性特征的,可用平均值、中值和众数的相对位置来描述^[45]。按照 SK,进一步把频率曲线的偏态分为 5 个等级:−1~−0.3 为极负偏态,−0.3~−0.1 为负偏态,−0.1~+0.1 为近于对称,+0.1~+0.3 为正偏态,+0.3~+1 为极正偏态;若曲线为正偏态,则分布中主要粒度集中在粗粒部位;若曲线为负偏态,则分布中主要粒度集中在细粒部位。在一般作图中,横坐标 Φ 值从左向右,由小到大递增,即粒度由粗到细。偏态和沉积物的分选性有密切关系,如曲线负偏($SK<0$),则此沉积物的粒度在粗粒部分分散,粒度跨度大,而细粒部分相对集中,粒度跨度小,曲线波形呈现 Φ 值小的一侧坡缓, Φ 值大的一侧坡陡;如正偏($SK>0$),则沉积物粒度在细粒部分分散,粒度跨度大,而粗粒部分相对集中,粒度跨度小,曲线波形呈现 Φ 值小的一侧坡陡, Φ 值大的一侧坡缓,即粗偏是负偏,细偏是正偏^[45]。由表 1 可知,藓类结皮和藻类结皮样地土壤的 SK 范围分别在 0.280~0.389 和 0.046~0.308,

表 1 生物土壤结皮不同深度土壤粒度参数
Table 1 Soil particle parameters in different depth of BSCs

	平均粒径 M_z/Φ		标准偏差(σ)		偏度(SK)		峰态(K_g)	
	藓类结皮	藻类结皮	藓类结皮	藻类结皮	藓类结皮	藻类结皮	藓类结皮	藻类结皮
结皮表层	2.965	2.583	1.767	1.554	0.295	0.119	1.029	1.093
0~1 cm	2.739	2.551	1.460	1.174	0.280	0.263	1.252	0.885
1~2 cm	2.786	2.580	1.312	1.224	0.368	0.046	1.245	0.850
2~3 cm	2.750	2.551	1.324	1.209	0.389	0.162	1.411	0.835
3~4 cm	2.675	2.584	1.025	1.239	0.388	0.308	1.342	1.381
4~5 cm	2.650	2.410	0.988	1.123	0.316	0.276	1.548	1.458

均属于正偏~极正偏。图 5 表明,3 类样地沉积物粒度分布曲线均不对称, $SK>0$ 为细偏,主峰偏于粗粒一侧,在曲线右侧为一缓坡,增添了一个细粒尾部,这也说明了 3 类样地均以中砂、细砂成分为主,粉粒、黏粒等细粒物质偏少。其中流动沙地的粒度分布曲线的细粒端(4.5 Φ)处有一微弱的次峰,沉积物分选性中等;而藓类结皮和藻类结皮均表现为单峰曲线,在粗粒部分曲线较陡,藓类结皮曲线主峰值要小于藻类结皮,但在曲线的细粒部分,藓类结皮的跨度更为分散,细粒组分的跨度较大,且含量要大于藻类结皮,分选性要比藻类结皮要差。

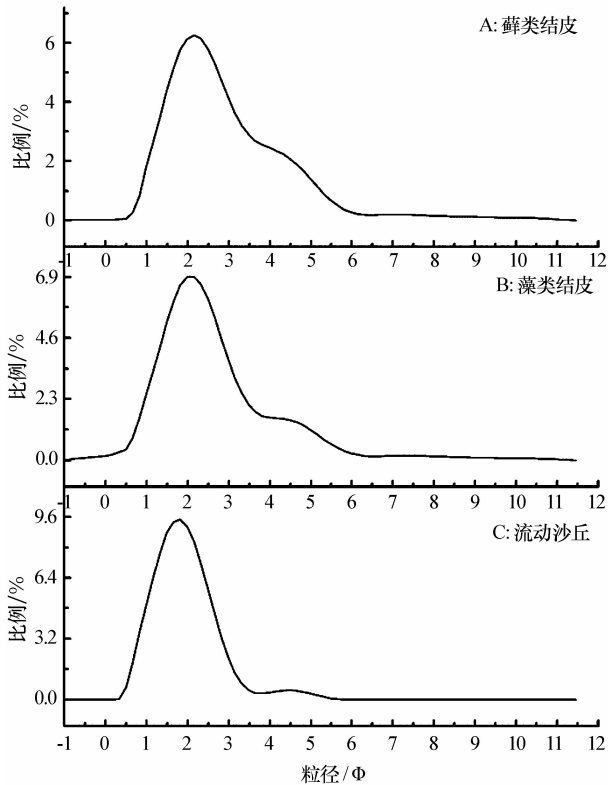


图 5 生物土壤结皮表层沉积物粒度曲线
Fig. 5 The grain size curves in surface of BSCs

2.2.4 峰态

峰态值(K_g)度量粒度频率曲线的粗细两端与曲线中部分选的比率,即计算粒度频率曲线中部展开与尾部展开之比,通俗地说就是衡量分布曲线的峰的宽窄尖锐程度。按照 K_g 的大小,把频率曲线分为 6 类: $K_g<0.67$ 为很平坦, K_g 在 0.69~0.9 为平坦, K_g 在 0.9~1.11 为中等尖锐, K_g 在 1.11~1.56 为尖锐, K_g 在 1.56~3 为很尖锐, $K_g>3$ 为非常尖锐。由表 1 可知,藓类结皮和藻类结皮两种生物结皮表层的峰态值都比较接近,分别为 1.029 和 1.093,峰形均属于中等尖锐水平。与流动沙地粒度曲线相比较,藓类结皮和藻类结皮表层峰形较宽,流动沙地的曲线尖窄,土壤粒度分布不均匀,集中程度较高,主要表现为平均粒径 1~3 Φ 的中砂和细砂成分较多(图 5),这也与前面所述的粒级组成特征相呼应。从生物土壤结皮表层以下的纵剖面来看,藓类和藻类结皮样地的峰态值总体表现为随着深度的增加而波动增加,下降到 5 cm 深度时,峰态值分别为 1.548 和 1.458,均要大于结皮表层,粒度曲线属于尖锐类型。可见生物土壤结皮的发育能够使流动沙地逐渐固定,促进土壤成土化进程,改善土壤沉积物粒度结构特征,粒度曲线逐渐由尖锐过渡到宽平。

3 讨论

颗粒组成是土壤基本物理属性之一,是影响土壤抗侵蚀性的重要因素。有研究表明,生物结皮的形成可通过低等生物的胞外分泌物粘结、捕获空气中的细颗粒以及生物风化等作用改变表层土壤颗粒组成^[3]。高丽倩等^[46]在对黄土生物结皮研究后指出,各生物量的生物结皮层土壤的颗粒组成以粗粉粒和细砂粒为主,占到所有颗粒组分的 80% 左右。由于土壤不同,本文研究中的沙土藻类结皮层和流

动沙地样本都以细砂和中砂为主,粉粒较少。细颗粒物含量随生物结皮的发育呈增加的趋势,苔藓结皮层所含的细颗粒物含量最多,黑褐色藻类结皮次之,浅灰色藻类结皮最少。本文研究表明,伴随着生物土壤结皮发育过程和演替,从流动沙地到形成生物土壤结皮层,沙粒粒径有不断细化的趋势,这也与郭轶瑞等^[36]、赵哈林等^[37]的研究一致。

生物土壤结皮形成的粗糙微地貌产生了一个空气静止的边界层,从而保护土壤表面免受风蚀,阻止或减缓水流的移动,使沉积物有足够的时间停留在土壤中,从而减少沉积物的流失^[47]。图4表明,生物土壤结皮的存在显著提高了下层土壤中黏粉粒含量,结皮越厚,下层土壤黏粉粒含量越高,这与前人的研究基本一致^[48-49],生物土壤结皮具有固定土壤和沉积土壤的作用,对土壤发育具有促进作用^[50]。

粉砂、细砂含量在藓类结皮表层要高于藻类结皮表层,原因可能为藻类结皮表面平坦光滑,而藓类结皮表面粗糙,苔藓丛生,孔隙度大,有明显的凹凸状,增大了地表粗糙度,再加上藓类结皮大部分主要生长在丘间地的灌丛植被下,对风产生阻挡作用,降低风速,使得较细沉积物在藓类结皮表面累积的更多。董治宝等^[51]研究表明,起动风速与粒径的关系服从分段函数:当粒径 $<0.09\text{ mm}$ 时,起动风速随粒径减小而增大;当粒径 $>0.09\text{ mm}$ 时,起动风速随粒径的增大而增大。由于起动风速的加大和藻类结皮较光滑的表面,缺少植物灌丛等的阻挡,较细的黏粒、粉砂容易被吹走,使得较粗组分砂砾在结皮层相对富集,从而在藻类结皮层中残留。

在垂向分布上,不同类型生物土壤结皮及下层土壤机械组成有差异(图2,图3)。结皮表层细颗粒组份比重高于下层土壤,越往下层粗颗粒组份增加。可见,生物土壤结皮层对于土壤的细化作用随着深度不断地弱化^[37,52],中砂和细砂随深度不断增加。段争虎等^[48]对人工植被区形成的结皮剖面进行研究,发现从结皮表层至6 cm深度,随着深度增加,细砂含量逐渐减少,粉砂含量依次递增,在各土壤层均表现上细下粗。研究认为,除生物土壤结皮本身具有一定程度的生物成土作用外,能够吸附大量降尘也是其影响土壤机械组成的一个重要原因。另外降雨过程使得水分下渗,土壤粉砂、极细砂向下发生位移且含量逐渐衰减,使得细砂和中砂的含量随着深度加深,比重不断上升。

随着生物土壤结皮不断向更高层次发育,流动沙地表层颗粒粒径最大,其次分别为藻类结皮和藓

类结皮,藓类结皮层中颗粒最细。生物结皮的不断发育逐渐改变着周围的微环境,使得表土和深层土壤的颗粒大小有着巨大差异。结皮生物量的逐渐积累和结皮多糖的形成,生物结皮不断的从空气中截留粉粒、黏粒,从而使粉粒、黏粒在结皮中不断富积,而砂粒则呈减少趋势^[33]。从分选系数上看,流沙的分选性要优于两种结皮,虽然两类生物土壤结皮都处于分选较差等级,但藻类结皮层颗粒的分选性要优于藓类结皮,并且结皮表层的 σ 值均要大于下层土壤。高广磊等^[53]指出毛乌素沙地地衣结皮样地分选状况最差,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。可见生物土壤结皮发育使土壤表层的砂粒粒级分布向两侧拓宽,主要粒级不突出,分选性变差。随着剖面加深,生物土壤结皮的成壤作用渐渐弱化,细砂和中砂的百分比含量较高,主要粒级逐渐突出,两侧粒级含量缩减, σ 值变小,分选性变好。

4 结论

库布齐沙漠北缘的流动沙地和藻类结皮表层均以细砂和中砂成分为主,藓类结皮表层以细砂和极细砂为主。其中,流动沙地的中砂所占比重最大,极粗砂和中粉砂比重较小;藓类和藻类结皮层样本中,中粉砂和粗粉砂明显增多,细砂和中砂比重有所减少,中粉砂、粗粉砂和极细砂均所占比重高于流动沙地,中砂、粗砂成分均低于流动沙地。从纵向分布来看,生物土壤结皮表层的中粉砂至黏土、粗粉砂和极细砂含量均高于其下层土样,生物土壤结皮的存在显著提高了其下层土壤中黏粉粒含量。极粗砂在两种生物结皮中的含量不一,说明不同生物结皮对不同粒径的砂砾拦截具有差异性。

从各个粒度参数上看,流动沙地表层颗粒粒径最大,其次分别为藻类结皮和藓类结皮,藓类结皮层中颗粒最小。结皮表层颗粒较细,深层处土壤颗粒粒径较粗,但上下差异随着不同发育阶段的生物结皮表现不一。两种生物土壤结皮样地均属于分选性较差等级,但藻类结皮的分选性要优于藓类结皮,且结皮下层土壤分选性中等。3类样地沉积物分布曲线均不对称,均属于正偏~极正偏等级,藓类结皮和藻类结皮表层的峰形均属于中等尖锐水平,流动沙地的曲线尖窄,细粒端处有一微弱的次峰。从纵剖面来看,藓类和藻类结皮样地的峰形由表层的中等宽平逐渐过渡到深层的尖锐类型。

生物土壤结皮的发育能够促进土壤黏化过程,

加快土壤发育进程,改善土壤结构。但这种作用随着生物土壤结皮的发育阶段和土层深度的增加而表现出差异性和复杂性。

参考文献:

- [1] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions[J]. *Advances in Eco-logical Research*, 1990, 20: 179—223.
- [2] Eldridge D J, Greene R S B. Microbiotic soil crusts: a view of their roles in soil and ecological processes in the range lands of Australia[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32: 389—415.
- [3] Belnap J, Lange O L. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management* [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001.
- [4] 郑云普, 赵建成, 张丙昌, 等. 荒漠生物结皮中藻类和苔藓植物研究进展[J]. *植物学报*, 2009, 44(3): 371—378.
- [5] 魏江春. 沙漠生物地毯工程——干旱沙漠治理的新途径[J]. *干旱区研究*, 2005, 22(3): 287—288.
- [6] 李超, 董治宝, 崔俊甲. 腾格里沙漠东南缘不同发育阶段横向沙丘粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 129—135.
- [7] 王小平, 岳乐平, 薛祥煦. 末次冰期以来浑善达克沙地粒度组成的环境记录[J]. *干旱区地理*, 2003, 26(3): 233—238.
- [8] 毛东雷, 雷加强, 李生字, 等. 新疆策勒绿洲-沙漠过渡带地表沙物质理化性质空间差异[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 136—144.
- [9] 沈亚萍, 张春来, 李庆, 等. 中国东部沙区表层沉积物粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(1): 150—157.
- [10] 杨转玲, 钱广强, 董治宝, 等. 库姆塔格沙漠北部三垄沙地区风成沉积物粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 589—596.
- [11] 陈新闯, 郭建英, 董智, 等. 乌兰布和沙漠流动沙丘下风向降尘粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(2): 295—301.
- [12] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(6): 1357—1364.
- [13] 桂洪杰. 黄河宁蒙河段四大沙漠粒度和元素特征对比研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [14] 李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等. 雅鲁藏布江山南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 4981—4992.
- [15] 马倩, 武胜利, 刘永泉, 等. 艾比湖流域抛物线沙丘表层沉积物粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 650—657.
- [16] 张伟民. 金字塔沙丘粒度变化及表面过程的初步研究[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(6): 1615—1621.
- [17] 唐进年, 王继和, 苏志珠, 等. 库姆塔格沙漠羽毛状沙丘表面沙粒度分布特征[J]. *干旱区地理*, 2008, 31(6): 918—925.
- [18] 吴霞, 哈斯, 杜会石, 等. 库布齐沙漠南缘抛物线形沙丘表面粒度特征[J]. *沉积学报*, 2012, 30(5): 937—944.
- [19] 哈斯, 庄燕美, 王蕾, 等. 毛乌素沙地南缘横向沙丘粒度分布及其对风向变化的响应[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(6): 42—51.
- [20] 王翠, 雷加强, 李生字, 等. 策勒绿洲-沙漠过渡带风沙流挟沙粒度的垂直分异[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(2): 230—238.
- [21] 张洪, 靳鹤龄, 苏志珠, 等. 全新世浑善达克沙地粒度旋回及其反映的气候变化[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(1): 3—9.
- [22] 胡凡根, 李志忠, 靳建辉, 等. 基于释光测年的福建晋江海岸沙丘粒度记录的风沙活动[J]. *地理学报*, 2013, 68(3): 343—356.
- [23] 贾宝全, 张红旗, 张志强, 等. 甘肃民勤沙区土壤结皮理化性质研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(7): 1442—1448.
- [24] 陈荣毅, 张元明, 潘伯荣, 等. 古尔班通古特沙漠土壤养分空间分异与干扰的关系[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(2): 257—265.
- [25] 贾晓红, 李新荣, 王新平, 等. 流沙固定过程中土壤性质变异初步研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 46—50.
- [26] 焦雯珺, 朱清科, 张宇清, 等. 陕北黄土区退耕还林地生物结皮分布及其影响因子研究[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 102—107.
- [27] 宋阳, 严平, 张宏, 等. 荒漠生物结皮研究中的几个问题[J]. *干旱区研究*, 2004, 21(4): 439—442.
- [28] Rüdiger P, Reinhard B. Effect of microbiotic soil surface crusts on emergence of vascular plants[J]. *Plant Ecology*, 2000, 150: 65—75.
- [29] Belnap J, Gillette D A. Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance [J]. *Journal of Arid environments*, 1998, 39(2): 133—142.
- [30] 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.
- [31] 张元明, 杨维康, 王雪芹, 等. 生物结皮影响下的土壤有机质分异特征[J]. *生态学报*, 2005, 25(12): 3420—3425.
- [32] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(3): 441—448.
- [33] 吴丽, 陈晓国, 张高科, 等. 人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究[J]. *环境科学*, 2014(03): 1138—1143.
- [34] Onofriok O, Singer M J. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48: 1138—1143.
- [35] 吴发启, 范文波. 坡耕地黄壤土结皮的理化性质分析[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(4): 22—24.
- [36] 郭铁瑞, 赵哈林, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地结皮发育对土壤理化性质影响的研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 135—139.
- [37] 赵哈林, 郭铁瑞, 周瑞莲, 等. 人工林建设对沙地土壤结皮发育及其表土理化特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 202—207.
- [38] 周小泉, 刘政鸿, 杨永胜, 等. 毛乌素沙地三种植被下苔藓结皮的土壤理化效应[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 340—344.
- [39] 陈小红, 段争虎. 我国干旱沙漠地区不同类型土壤结皮的理化性质研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 28(9): 134—138.
- [40] 肖波, 赵允格, 邵明安. 陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤理化性质的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(11): 4662—4670.
- [41] 党晓宏, 高永, 虞毅, 等. 库布其沙漠北缘8种荒漠灌丛生物量预测模型研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(5): 168—

174.

[42] 丁国栋. 风沙物理学[M]. 北京:中国林业出版社,2010.

[43] Folk R L,Ward W C. Brazos River bar;a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology,1957,27(1):3—26.

[44] 卢连战,史正涛. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析[J]. 环境科学与管理,2010,35(6):54—60.

[45] 金秉福. 粒度分析中偏度系数的影响因素及其意义[J]. 海洋科学,2012,36(2):129—136.

[46] 高丽倩,赵允格,秦宁强,等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响[J]. 自然资源学报,2012,27(8):1316—1326.

[47] 包艳丽,刘左军. 生物土壤结皮的研究进展[J]. 安徽农业科学,2011,39(8):4667—4668.

[48] 段争虎,刘新民,屈建军. 沙坡头地区土壤结皮形成机理的研究[J]. 干旱区研究,1996,13(2):31—36.

[49] 郭铁瑞,赵哈林,赵学勇,等. 科尔沁沙地人工林下结皮发育对表土特性影响的研究[J]. 中国沙漠,2007,27(6):1000—1006.

[50] Danin A,Bar-or Y,Dor I,et al. The role of cyanobacteria in stabilization of sand dunes in Southern Israel[J]. Horizons in Geography,1990,31:169—178.

[51] 董治宝,李振山. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(4):2—6.

[52] 邵玉琴,赵吉,包青海. 库布齐固定沙丘土壤微生物生物量的垂直分布研究[J]. 中国沙漠,2001,21(1):88—92.

[53] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等. 生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(1):115—120.

Effect of Biological Soil Crusts on Features of Grain Size in the Northern Margin of Hobq Desert

Xiao Weiqiang, Dong Zhibao, Chen Hao, Shao Tianjie, Cui Xujia, Li Chao,
Song Shaopeng, Xiao Nan, Li Lulu

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: Grain size features of biological soil crusts and its subsoil in the northern margin of Hobq Desert at different developmental stages are studied by the method of particle-size analysis in this article. The fine sand and medium sand dominate the drifting sand and algal crust surface, and the fine sand and very fine sand prevail on the surface of moss crusts. The content of clay, medium silt, coarse silt and very fine sand on the crust surface are much more than that of same samples under the crust. The moss and algal crusts are very poor in sorting feature, however, soil under the crust is medium. Moreover, curves of drifting sand, moss crust and algal crust are all asymmetric in positive skewed distribution. The peaky curves of moss crust and algal crust are moderate, but that of drifting sand is very sharp. Therefore, soil formation effect of biological crust displays the difference and complexity at the different developmental stages and depth of the soil.

Key words: grain size; biological soil crusts; Hobq Desert