

毛乌素沙地三种植被下苔藓结皮的土壤理化效应

周小泉¹, 刘政鸿², 杨永胜³, 苑森朋⁴

(1. 新疆吉音水利枢纽工程建设管理局, 新疆 和田 848000; 2. 陕西省水土保持生态环境监测中心, 西安 710006;
3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:分析了沙蒿、沙柳、樟子松三种植被下有苔藓结皮、无苔藓结皮(对照)样地 0—2, 2—5, 5—10 cm 剖面土壤的理化指标, 探讨毛乌素沙地苔藓结皮对土壤理化性状的影响及其与植被类型的关系。结果表明: (1) 三种植被下苔藓结皮均能够明显提高土壤稳定性, 增加细砂粒(0.02~0.2 mm)含量、降低粗砂粒(0.2~2 mm)含量。(2) 沙柳及沙蒿植被下苔藓结皮均能够显著提高各层土壤的有机质、全氮、速效钾、全磷含量($P>0.05$), 降低全钾、速效磷含量; 樟子松下苔藓结皮 0—2 cm 剖面的理化效应同沙柳、沙蒿类似, 但 2—5, 5—10 cm 剖面内, 有机质含量显著降低($P>0.05$), 全氮、全钾、全磷、速效磷含量则无显著变化($P<0.05$)。(3) 荒漠生态恢复过程中, 苔藓结皮对土壤理化性状的改善作用主要集中在表层土壤, 改善程度同植被类型的关系密切。

关键词:苔藓结皮; 沙蒿; 沙柳; 樟子松; 土壤粒径分布; 土壤养分

中图分类号: S153

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)06-0340-05

Effects of Moss Dominated Crusts on Soil Physicochemical Properties Under Three Types of Vegetation in Mu Us Sandland

ZHOU Xiao-quan¹, LIU Zheng-hong², YANG Yong-sheng³, YUAN Sen-peng⁴

(1. Jiyin Administration of Hydro-junction and Engineering Construction, Hetian,

Xinjiang 848000, China; 2. Shaanxi Monitoring Center of Soil and Water Conservation and

Ecological Environment, Xi'an 710006, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

4. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The soil physicochemical properties in the sites where were covered and uncovered (control) by moss crusts under *Artemisia ordosica*, *Salix cheilophila* Schneid and *Pinus sylvestris* Linn. var. *mongolica* Litv. at 0—2, 2—5, 5—10 cm depths were analyzed respectively. The effects of moss crusts on the soil physicochemical properties and its relationship between the type of vegetation were discussed. The results are as follows: (1) the moss crusts under three types of vegetation are able to significantly increase the soil stabilization, increase the proportion of fine sand (0.02~0.2 mm) and decrease the proportion (0.02~0.2 mm) of coarse sand; (2) the moss crusts under *Artemisia ordosica* and *Salix cheilophila* Schneid. can significantly increase the contents of soil organic matter, total N, available K and total P. Meanwhile, it's able to decrease the contents of total K and available P in 0—2, 2—5, 5—10 cm depths, respectively. The effects of moss crusts under *Pinus sylvestris* Linn. var. *mongolica* Litv. at 0—2 cm depths were similar with those of *Artemisia ordosica* and *Salix cheilophila* Schneid. The difference is the moss crusts under *Pinus sylvestris* Linn. var. *mongolica* Litv. can significantly decrease the content of soil organic matter and have no significant effects on the contents of total N, total K, total P and available P at 2—5 cm and 5—10 cm depths; (3) in the process of ecology restoration in desert, the improvement of moss crusts on soil hysicochemical

收稿日期: 2014-03-12

修回日期: 2014-03-27

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“毛乌素沙地生物结皮的风蚀和水分效应及其干扰响应”(41071192)

作者简介: 周小泉(1973—), 男, 浙江宁波人, 大学本科, 工程师, 主要从事水利工程建设与管理工。E-mail: 2727548892@qq.com

通信作者: 杨永胜(1987—), 男, 甘肃兰州人, 博士研究生, 主要从事苔藓生物结皮的培育工作。E-mail: yyssolider@126.com

properties mainly focuses on the shallow layer and the improvement degree has close relations with the type of vegetation.

Key words: moss dominated crusts; *Artemisia ordosica*; *Salix cheilophila* Schneid; *Pinus sylvestris* Linn. var. mongolica Litv.; soil size distribution; soil nutrient

生物土壤结皮(以下简称“生物结皮”)是由隐花植物和土壤微生物与表层土壤颗粒胶结形成的复合体^[1]。在荒漠化地区,生物结皮是流动沙丘固定的重要标志,预示荒漠化生境的转变^[2]。生物结皮不仅能够显著增加土壤的稳定性^[3],而且对荒漠地区土壤发育和植被恢复有极大的促进作用,对荒漠系统的能量流动、物质流动和养分循环均产生重要影响和贡献^[1]。近年来,荒漠地区生物结皮的研究受到广泛关注^[4]。

研究表明,生物结皮对表层土壤养分具有明显的富集作用^[5],但对深层土壤的影响并不显著^[6]。有关生物结皮与植被的关系探讨,主要集中在生物结皮对种子萌发^[7]、种苗成活率^[8]以及植被对生物结皮的影响上^[9],很少考虑生物结皮与植被对土壤理化性质的交互影响。同时,生物结皮的土壤理化效应研究报道多来自于科尔沁沙地^[9]、腾格里沙漠^[10]、黄土高原^[11]、古尔班通古特沙漠^[12]等地区,缺乏对年降雨量 400 mm 左右的毛乌素沙地生物结皮的研究。鉴于此,本文选择毛乌素沙地苔藓结皮发育良好的沙蒿(*Artemisia ordosica*)、沙柳(*Salix cheilophila* Schneid)、樟子松(*Pinus sylvestris* Linn. var. mongolica Litv.)三种典型植被样地,测算分析苔藓结皮对不同剖面深度土壤的理化效应,探讨植被类型对其理化效应的影响。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕北毛乌素沙地东南缘的神木县圪丑沟(北纬 38°10′—39°05′,东经 109°40′—110°30′)。该区属于干旱半干旱的大陆性气候,冬季严寒,夏季酷热。多年平均降水量为 440.8 mm,平均蒸发量为 2 092 mm。平均气温 7.8℃,最高月(7 月)平均气温 23.9℃。最低月(1 月)平均气温—9.8℃。区内风沙天气频繁,春、秋两季西北风盛行,平均风速 2.4 m/s,最大风速 19 m/s。区内地下水位浅,海子、湿地星罗棋布,夏、秋两季积水较多。该区土壤水分条件较好,苔藓结皮发育广泛,部分杨树林地的迎风坡上发育有藻类结皮。沙蒿、沙柳是分布最广的优势灌木^[13],樟子松人工林分布较多。

研究区苔藓结皮的藓种主要包括:黄色真藓

(*Bryum pallescens*)、弯形真藓(*B. recurvulum*)、银叶真藓(*B. argenteum*)、双色真藓(*Bryum dichotomum* Hedw),以及少量的扭口藓(*Barbula unguiculata*)。

1.2 试验设计

基于野外调查,于 2010 年 10 月在丘间地选择典型样地(基本情况见表 1)。分别选取蒿沙、沙柳、樟子松下有苔藓结皮、无苔藓结皮(对照)样地,样地大小为:10 m×10 m。每个样地原位测定土壤表面硬度、抗剪强度。利用平铲小心获取结皮层,用电子游标卡尺测定苔藓结皮厚度。同时,每个样地内均匀设置 3 个采样点,分别在 0—2 cm,2—5 cm,5—10 cm 三个剖面由下往上分层采样,其中,植被下有苔藓结皮样地 0—2 cm 土样取自其下伏土壤。土样过 0.25 mm 孔径筛、供速效养分测定,过 0.01 mm 孔径筛、供全量养分测定。

表 1 试验地块基本情况

植被类型	结皮情况	坡度/(°)	植被盖度/%	苔藓结皮盖度/%
沙柳	有结皮	5	30	85
	无结皮	5	35	0
沙蒿	有结皮	15	40	90
	无结皮	15	50	0
樟子松	有结皮	5	30	70
	无结皮	5	30	0

1.3 测定指标和方法

(1) 土壤物理性质测定土壤机械组成:土壤过 1 mm 筛后,利用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测定。苔藓结皮厚度:游标卡尺;硬度:土壤硬度计,型号 TYU-1;抗剪强度:IC0202A 袖珍型剪力测量仪。土壤机械组成做一个重复,其余指标至少 3 个重复。

(2) 土壤化学性质测定土壤全氮:开氏法;土壤有机质:重铬酸钾容量法;土壤全磷:NaOH 熔融;土壤速效磷:0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提,钼锑抗比色法;全钾:NaOH 熔融,火焰光度法;速效钾:1 mol/L NaHCO₃ 浸提,火焰光度法。每个指标均为 3 个重复。

1.4 数据分析

数据使用 Excel 2007 进行处理,利用统计分析软件 Spss 12.0 进行单因素方差分析(ANOVA)比较

不同处理间各个指标的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 三种植被下苔藓结皮对 0—2 cm 剖面土壤理化性质的影响

表 2 显示了三种植被下苔藓结皮对土壤抗剪强度、硬度及粒径分布的影响。显然,三种植被下苔藓结皮均能够显著提高表层土壤硬度及抗剪强度,增加粘粉粒、细砂粒含量。其中,粘粉粒含量提高的顺序依次为:237.5%(樟子松)>78.7%(沙柳)>25.0%

(沙蒿)。这说明苔藓结皮能够明显提高土壤稳定性且能够细化表层土壤颗粒。

表 3 显示,三种植被下苔藓结皮对表层土壤养分均产生了显著影响。三种植被下苔藓结皮样地的有机质、全氮、速效钾、全磷含量均显著增加($P>0.05$),全钾、速效磷含量则有不同程度降低。同时,苔藓结皮的养分效应受植被类型的显著影响,例如有机质含量增加幅度依次为:335.9%(沙柳)>190.2%(樟子松)>118.3%(沙蒿);全钾含量降低幅度依次为17.6%(沙柳)>16.6%(沙蒿)>1.2%(樟子松)。

表 2 三种植被下 0—2 cm 剖面土壤的物理性状(平均值±标准误差)

植被类型	地表情况	厚度/ cm	抗剪强度/ (N·mm ⁻²)	硬度/ (kg·cm ⁻³)	粒径分布(%)			
					黏粒 ≤0.002 mm	粉粒 0.002 ~0.02 mm	细砂粒 0.02 ~0.2 mm	粗砂粒 0.2~2 mm
沙柳	有结皮	1.81±0.61a	3.62±0.85a	4.25±1.21b	1.67	2.44	43.98	51.91
	无结皮	0	0.21±0.01d	1.83±0.3cd	0.80	1.50	14.83	82.87
沙蒿	有结皮	1.85±0.43a	2.03±0.40b	4.1±0.95b	0.50	1.65	26.21	71.63
	无结皮	0	0.25±0.02d	1.65±0.2d	0.11	1.61	14.07	84.21
樟子松	有结皮	1.80±0.38a	4.13±1.09a	8.86±1.63a	0.82	2.42	21.98	74.79
	无结皮	0	0.33±0.01c	2.14±0.6c	0	0.96	21.92	77.12

注:字母相同代表组间差异不显著($P>0.05$),字母不同代表组间差异显著($P<0.05$),下同。

表 3 三种植被下 0—2 cm 剖面土壤养分状况

植被类型	地表情况	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)
沙柳	有结皮	6.8±0.07d	0.27±0.00e	10.57±0.10a	183.56±1.26f	0.35±0.01c	4.89±0.30a
	无结皮	1.56±0.05b	0.06±0.00b	12.82±0.00b	68.82±1.67c	0.22±0.00a	14.39±0.68c
沙蒿	有结皮	1.79±0.00b	0.08±0.00c	10.77±0.67a	85.73±0.82e	0.27±0.02b	18.83±2.42d
	无结皮	0.82±0.16a	0.02±0.00a	12.91±0.26b	72.22±0.68d	0.23±0.01a	21.22±0.29d
樟子松	有结皮	16.8±0.47f	0.21±0.01d	11.10±0.09a	63.67±0.82b	0.29±0.00b	10.40±0.05b
	无结皮	5.79±0.07c	0.07±0.00b	11.23±0.14a	50.61±0.79a	0.23±0.00a	19.06±0.38d

2.2 三种植被下苔藓结皮对 2—5 cm 剖面土壤理化性质的影响

表 4 表明,三种植被下苔藓结皮均能够降低 2—5 cm 剖面土壤粗砂粒含量,而对土壤细砂粒含量则有

较大程度的提高。

例如沙柳、沙蒿、樟子松下苔藓结皮使 2—5 cm 剖面土壤细砂粒含量分别增加 704.4%,110.7%,18.0%。

表 4 三种植被下 2—5 cm 剖面土壤粒径分布特征

植被类型	地表情况	黏粒≤0.002 mm	粉粒 0.002~0.02 mm	细砂粒 0.02~0.2 mm	粗砂粒 0.2~2 mm
沙柳	有结皮	0.36	1.54	44.54	53.56
	无结皮	0.40	2.08	5.54	91.98
沙蒿	有结皮	0	1.22	34.95	63.83
	无结皮	0.18	1.35	16.59	81.88
樟子松	有结皮	0.04	1.44	13.51	85.02
	无结皮	0.11	1.20	11.45	87.25

由表 5 可知,苔藓结皮的养分效应受植被类型的显著影响。表现在沙柳及沙蒿下苔藓结皮样地 2—5 cm 剖面土壤有机质、全氮、速效钾、全磷含量均显著增加($P>0.05$),全钾及速效磷含量则有不同程度的

降低。

而樟子松下的苔藓结皮则显著降低了 2—5 cm 剖面土壤的有机质含量($P>0.05$),对全氮、全钾、速效钾、全磷、速效磷并无显著影响($P<0.05$)。

表 5 三种植被下 2—5 cm 剖面土壤养分特征

植被类型	地表情况	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)
沙柳	有结皮	6.29±0.03f	0.24±0.01c	10.18±0.41a	158.68±1.31d	0.34±0.00c	4.40±0.10a
	无结皮	0.29±0.02a	0.03±0.01a	13.95±0.26d	42.25±0.20a	0.21±0.00a	5.86±0.06ab
沙蒿	有结皮	2.23±0.03e	0.110±0.00b	12.43±0.13c	66.23±0.84c	0.25±0.02b	12.40±0.16b
	无结皮	0.63±0.01b	0.01±0.00a	12.98±0.16c	51.71±0.75b	0.22±0.00a	20.85±3.92c
樟子松	有结皮	1.25±0.06c	0.01±0.00a	11.85±0.08bc	41.35±0.99a	0.25±0.00b	9.99±0.40b
	无结皮	1.97±0.06d	0.02±0.00a	11.72±0.06b	42.06±1.56a	0.26±0.00b	10.30±0.02b

2.3 三种植被下苔藓结皮对 5—10 cm 剖面土壤理化性质的影响

由表 6 可知,无论有无苔藓结皮,三种植被下 5—10 cm 剖面土壤颗粒主要为粗砂粒。但三种植被下

苔藓结皮仍然起到降低粗砂粒含量、增加细砂粒含量的作用。其中,沙柳、沙蒿、樟子松下苔藓结皮使该层细砂粒分别增加 159.8%,40.2%,20.8%,粗砂粒分别降低 11.4%,6.1%,2.8%。

表 6 三种植被下 5—10 cm 剖面土壤粒径分布特征 %

植被类型	地表情况	黏粒<0.002 mm	粉粒 0.002~0.02 mm	细砂粒 0.02~0.2 mm	粗砂粒 0.2~2 mm
沙柳	有结皮	0.04	2.04	14.16	83.76
	无结皮	0	0	5.45	94.55
沙蒿	有结皮	0	0	21.07	78.93
	无结皮	0	0.94	15.03	84.03
樟子松	有结皮	0	0	14.38	85.62
	无结皮	0	0	11.90	88.10

三种植被下苔藓结皮对 5—10 cm 剖面土壤养分的影响因植被类型而异(表 7)。沙柳和沙蒿植被下,苔藓结皮使 5—10 cm 剖面土壤有机质、全氮、速效钾含量均显著增加($P>0.05$),全钾及速效磷含量显著降低($P>0.05$);樟子松植被下,苔藓结皮能够显著

降低 5—10 cm 剖面土壤有机质含量($P>0.05$),显著提高该层速效钾含量,而对全氮、全钾、全磷、速效磷无显著影响($P<0.05$)。苔藓结皮对三种植被下全磷含量均无显著影响,这与赵允格等人的研究结果相一致^[14]。

表 7 三种植被下 5—10 cm 剖面土壤养分特征

植被类型	地表情况	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)
沙柳	有结皮	1.73±0.03f	0.053±0.006d	10.97±0.31a	55.28±0.06e	0.21±0.00a	1.15±0.03a
	无结皮	0.23±0.01a	0.036±0.001c	11.78±0.28b	34.46±0.05b	0.19±0.01a	4.74±0.14c
沙蒿	有结皮	0.79±0.03d	0.016±0.002b	12.29±0.37b	42.13±0.15d	0.20±0.01a	3.84±0.13b
	无结皮	0.45±0.01b	0.004±0.000a	12.89±0.20c	30.24±0.94a	0.21±0.01a	8.87±0.06e
樟子松	有结皮	0.63±0.01c	0.004±0.001a	11.56±0.19ab	42.07±0.16d	0.26±0.01b	7.45±0.17d
	无结皮	0.79±0.04ce	0.003±0.000a	11.80±0.03b	38.78±1.74c	0.26±0.03b	7.14±0.00d

3 结论及讨论

土壤粒径分布对土壤孔隙度、容重等土壤物理性质有直接影响^[11]。本研究中,苔藓结皮能够增加浅层土壤粘粉粒、细砂粒含量,这与前人的结论一致^[15]。空气中的粘粉粒被植被枝叶拦截并降落到地面,当有降雨发生时,雨水能够携带粘粉粒从土壤表层向下运动。沙区苔藓结皮的出现减少了表层土壤孔隙,且生物结皮蓄水^[16]、保水能力较强^[17]。相比之下,携带有粘粉粒的雨水更容易通过植被下无结皮土

壤并向下运动,导致无结皮样地 2—5 cm 剖面土壤粘粉粒含量高于有结皮样地。但该区次降雨量较小,深层土壤孔隙逐渐变小,粘粉粒随雨水的运移深度有限,因此在 5—10 cm 剖面并未出现该现象。

苔藓结皮对土壤细化程度与植被类型有密切关系。樟子松下苔藓结皮提高 0—2 cm 剖面粘粉粒含量的能力最强(237.5%),苔藓结皮对沙柳下 0—2 cm 剖面土壤细砂粒含量的提高最明显(196.6%)。原因是:沙柳属于密丛型灌木、枝条密集,降风滞尘的作用很强,对细砂粒有很强的拦截作用。而樟子松枝

叶稠密、植株高度较高,对粘粉粒的拦截也强于沙柳。沙蒿虽然枝叶较密集,但却植株低矮,对土壤颗粒的拦截作用较弱。

生物结皮能够改变浅层土壤养分状况^[14],但结论却不尽相同。张元明等发现,生物结皮能够富集全N、全P、速效P等养分,且这种作用由上至下依次递减^[5,12];贾宝全等认为生物结皮能够起到降低灌丛沙包表层全N、全P、速效N、速效P含量,增加速效K含量的作用^[18]。分析三种植被下苔藓结皮对不同深度土壤养分的影响程度,三种植被下苔藓结皮能够增加0—2 cm剖面土壤有机质、全氮、速效钾、全磷含量。原因包括:一是生物结皮中各组分的腐烂分解,能够增加土壤养分含量;二是苔藓结皮能够提高土壤抗侵蚀能力,减少土壤养分的流失^[19]。本研究结果显示三种植被下苔藓结皮均会降低0—2 cm剖面全钾含量,这是因为在微生物的作用下,酸性物质有利于钾素的快速释放^[20]。生物结皮缓慢提高^[20]以及降低^[18]速效磷含量的研究均有报道,本研究结果与后者一致。尽管研究区土壤养分受生物结皮与植被的交互作用,但二者作用的深度有限^[9],因此苔藓结皮对土壤养分的影响随深度增加而减小。

此外,生物结皮形成前埋入沙土中的植被枯落物对土壤养分的改善持续发挥作用^[21]。但不同植被枯落物量、分解速率、分解后的元素均有差异。并且,植被冠幅、枝叶密度等形态特征也会影响其对降雨的拦截程度,进而影响雨水对土壤养分的淋溶作用。上述原因,共同造成三种植被下苔藓结皮对不同深度土壤养分的影响差异。

致谢:感谢陕西省神木县生态学会治沙造林基地对本研究工作提供的一切便利条件。

参考文献:

- [1] 李新荣,张元明,赵允格. 生物土壤结皮研究:进展,前沿与展望[J]. 地球科学进展,2009,24(1):11-24.
- [2] 崔燕,吕贻忠,李保国. 鄂尔多斯沙地土壤生物结皮的理化性质[J]. 土壤,2004,36(2):197-202.
- [3] 李聪会,朱首军,陈云明,等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤抗蚀性的影响[J]. 水土保持研究,2013,3(20):6-10.
- [4] Bu C F, Wu S F, Xie Y S, et al. The study of biological soil crusts: hotspots and prospects[J]. CLEAN-Soil Air Water, 2013,41(9):899-906.
- [5] 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.
- [6] 刘利霞,张宇清,吴斌. 生物结皮对荒漠地区土壤及植物的影响研究述评[J]. 中国水土保持科学,2007,5(6):106-112.
- [7] 苏延桂,李新荣,陈应武,等. 生物土壤结皮对荒漠土壤种子库和种子萌发的影响[J]. 生态学报,2007,27(3):938-946.
- [8] 闫德仁,薛英英,韩凤杰,等. 沙漠生物土壤结皮国外研究概况[J]. 内蒙古林业科技,2007,33(1):39-42.
- [9] 赵哈林,郭铁瑞,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):1657-1663.
- [10] 陈荷生. 沙坡头地区生物结皮的水文物理特点及其环境意义[J]. 干旱区研究,1992,9(1):31-38.
- [11] 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):4462-4470.
- [12] 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.
- [13] 姚月锋,满秀玲. 毛乌素沙地不同林龄沙柳表层土壤水分空间异质性[J]. 水土保持学报,2007,21(1):111-115.
- [14] 赵允格,许明祥,王全九,等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮理化性状初报[J]. 应用生态学报,2006,17(8):1429-1434.
- [15] Hancock G R, Willgoose G R. An experimental and computer simulation study of erosion on a mine tailings dam wall[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004,29(4):457-475.
- [16] Duan Z, Xiao H, Li X, et al. Evolution of soil properties on stabilized sands in the Tengger Desert, China [J]. Geomorphology,2004,59(1):237-246.
- [17] Malam Issa O, Défarge C, Trichet J, et al. Microbiotic soil crusts in the Sahel of Western Niger and their influence on soil porosity and water dynamics[J]. Catena,2009,77(1):48-55.
- [18] 贾宝全,张红旗,张志强,等. 甘肃省民勤沙区土壤结皮理化性质研究[J]. 生态学报,2003,23(7):1442-1448.
- [19] Kleiner E F, Harper K T. Soil properties in relation to cryptogamic groundcover in Canyonlands National Park [J]. Journal of Range Management Archives,1977,30(3):202-205.
- [20] 齐雁冰,常庆瑞,惠泱河. 高寒地区人工植被恢复过程中沙表生物结皮特性研究[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(6):98-102.
- [21] 刘新民,赵哈林,赵爱芬. 科尔沁沙地风沙环境与植被[M]. 北京:科学出版社,1996.