

不同生境对人工结皮发育及表土氮、磷含量及其代谢酶活性的影响^①

吴易雯^{1,2}, 饶本强^{1,3}, 刘永定¹, 李根保^{1*}, 李敦海¹

(1 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 信阳师范学院生命科学院, 河南信阳 464000)

摘要: 土壤生物结皮对于改善荒漠地区的生态环境和土壤的增肥改良具有重要作用。本研究以库布齐沙漠固定沙丘(迎风坡、坡顶、背风坡和丘间地)披碱草和沙蒿群落下长期发育(8年生)的人工藻结皮为研究对象, 测定不同生境下人工结皮对表层土壤氮、磷元素含量以及相关土壤酶活性的影响。结果表明, 在不同立地条件下, 沙丘顶部结皮叶绿素a和土壤可溶磷含量最高, 分别为4.24 mg/g和2.926 mg/kg。丘间地结皮层土壤碱性磷酸酶活性、总磷含量及脲酶活性为最高, 迎风坡结皮生物量和土壤碱解氮、速效磷含量以及土壤酶活性明显高于背风坡结皮层土壤。在相同立地条件下, 披碱草下结皮生物量、碱解氮、速效磷含量和脲酶及碱性磷酸酶活性显著高于沙蒿下的结皮土壤。本研究表明生境的差异性导致人工结皮发育程度不同, 进而对表土氮、磷含量及其代谢酶产生不同影响, 人工生物结皮的发育程度与表土氮磷含量及其代谢酶活性之间存在显著相关性。不同植被群落对生物结皮发育具有不同的作用, 披碱草对人工生物结皮影响的正效应高于沙蒿。

关键词: 生境; 土壤生物结皮; 立地条件; 人工藻结皮; 氮磷含量; 土壤酶

中图分类号: S153.6; S154.3

土壤生物结皮广泛分布在全世界的干旱和半干旱地区, 在一些地区, 结皮的覆盖率可以达到40%~70%^[1]。生物结皮是由蓝藻、绿藻、苔藓、地衣、真菌和细菌以及许多非维管束植物成分形成的十分复杂的生物聚合体^[2-3]。按照结皮发育演替的不同, 可分为蓝藻结皮、藻类结皮、地衣结皮、苔藓结皮等^[4-5]。从生态功能上讲, 生物土壤结皮可以固定沙质土壤表层防止土壤流失、抑制扬尘, 直接或者间接改变土壤的营养水平^[6-7], 例如, 藻类结皮或蓝藻-地衣结皮能够进行生物固氮^[8-9], 是荒漠地区土壤中主要的氮来源^[10-11]。此外, 生物结皮的表层土壤有机质积累与土壤营养元素如P、K、Ca、Mg和Mn的捕获量和持有量增加有关^[12-13]。在荒漠地区, 土壤微生物对土壤酶积累的贡献突出^[14], 而土壤酶的主要作用是参与C、N、P、S等重要营养元素的生物地球化学循环, 在土壤营养物质的转化过程中起着重要作用, 加速成土过程^[15]。其中脲酶能专一地促进尿素水解生成氨、二氧化碳和水, 在土壤氮代谢过程中起着重要作用,

磷酸酶是表征土壤中有效磷状况的主要酶类, 能加速有机磷的脱磷速度, 释放出无机磷供植物和土壤微生物利用, 是评价土壤磷素生物转化方向和强度的重要指标^[15-16]。

由于风况等因素的不同, 沙丘各地貌部位的物质组成^[17], 理化环境均会出现不同程度的差异^[18-19]。有文献报道, 沙丘的迎风坡是流沙治理的关键部位^[20]; 而背风坡具有静力稳定性^[21], 受到风的干扰较小。关于生物土壤结皮与维管束植物的相互影响作用研究, 一方面, 是关于生物结皮的存在对维管束植物种子的萌发以及生长的影响^[22], 另一方面, 维管束植物的存在也影响着结皮生物成分的存活与生长。例如维管束植物可以降低土壤表面的温度, 提供荫庇以及由此提高土壤的含水量, 减小到达土壤表面的风速^[23]等, 而有关维管束植物群落对土壤生物结皮以及结皮表层土壤的理化性质是否有影响以及影响大小方面的研究探索却少有文献报道。本文着眼于固定沙丘不同立地条件和不同维管束植物群落对人工藻类结皮

①基金项目: 淡水生态与生物技术国家重点实验室项目(2008FBZ21), 武汉市科技局与内蒙古自治区发改委重大科技产业化专项(200720112031), 国家科技支撑计划项目(2009BAC54B01)和中国博士后科学基金项目(2010048920)资助。

* 通讯作者(ligb@ihb.ac.cn)

作者简介: 吴易雯(1985—), 女, 河南洛阳人, 博士研究生, 主要从事生物结皮的肥岛效应研究。E-mail: likeflower0819@hotmail.com

的作用研究,比较了不同立地条件两种沙生植物群落沙蒿和碱草对人工藻结皮生长发育、土壤氮磷含量以及氮磷转化酶活性的影响,以期为利用人工藻结皮进行固沙抑尘、促进土壤改良的工程化技术和荒漠化治理提供一些理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究位点

内蒙古自治区达拉特旗实验站(40° 21' N, 109° 51' E)位于库布齐沙漠南缘,鄂尔多斯高原北部。该地区属于温带大陆性季风气候,盛行西北风,年平均气温 6.1℃,年平均降雨量 240~360 mm,降水主要集中在 6—8 月,蒸发量 2 160 mm,极端最高气温 40.2℃,最低气度-34.5℃,沙面最高温度 66℃,最低温度-39℃。年平均风速为 3.3 m/s。天然植被的主要优势种有披碱草(*Elymus dahuricus*)、沙蒿(*Artemisia desteriorum*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、苦菜(*Ixeris chinensis*)、决明子(*Catsia tora*)、虫实(*Corispermum hyssopifolium*)等,植被覆盖率为 30%~60%。人工种植的主要优势种有沙柳(*S. cheilophila*)、柠条(*Caragana microphua*)等。土壤以风沙土和盐化草甸土为主。立地类型主要为流动沙地,固定、半固

定沙地和丘间低地。

1.2 样品采集

采样地点位于达拉特旗实验站内,于 2010 年 7 月 26—30 日进行样品采集。选取 2002 年人工培育形成的人工藻类结皮,结皮生长发育时间为 9 年。接种时,藻种为工程化培养的具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)和爪哇伪枝藻(*Scytonema javanicum*)。采样地点沙丘呈东西走向且常年盛行西北风,故将整座沙丘分为迎风坡(即阴坡)、坡顶、背风坡(即阳坡)和丘间地(两沙丘之间的凹地)4 种立地条件。在每种立地条件下,采集不同植物群落(沙蒿和披碱草)下的结皮土壤样品。人工藻结皮调查和样品采集时,同一植被群落下,随机选取 3 块样方(1 m×1 m),每个样方以 5 点取样法取 5 个样本。在每个样方内,用环刀(直径 5 cm,高度 5 cm)采集结皮层土样(约 25 g)。将每一样方的样品均匀混合成一个样品,放置于灭菌后的采样袋密封,带回实验室。在实验室对结皮样品进行研磨,过筛后测定相关指标。

表 1 为采样地点的植被分布情况。沙蒿和披碱草为样地植被的优势种群落。由于两种植物的形态特征不同,其对地形的适应也有所不同,披碱草可以在迎风坡茂盛地生长,株高可达 55.9 cm,而背风坡对沙蒿的生长更有利。

表 1 采样点植被分布概况
Table 1 Distribution status of vegetation at sampling sites

立地类型	坡度	优势种	株高(cm)	伴生种	植被盖度(%)
迎风坡	>30 °	披碱草	55.9 ± 9.31	沙蒿、苜蓿、沙蓬	34
		沙蒿	37.6 ± 10.27	披碱草、虫实	26
坡顶	>30 °	披碱草	30.0 ± 6.72	梭梭	14
		沙蒿	39.6 ± 11.10	披碱草	40
背风坡	>30 °	披碱草	48.8 ± 8.42	决明子	24
		沙蒿	44.1 ± 8.35	沙蓬、苦菜	32
丘间地	>30 °	披碱草	46.4 ± 8.30	沙蓬、虫实、苦菜、苦豆子	92
		沙蒿	30.5 ± 9.37	披碱草、沙蓬	22

1.3 样品测定方法

1.3.1 结皮生物量测定 结皮生物量用叶绿素 a 含量表示。取结皮样品 1.00 g,加 80% 丙酮充分混匀,4℃避光提取 24 h,8 000 r/min 离心取上清液,用分光光度计(722 型紫外/可见光分光光度计)在 663 和 645 nm 波长下分别测定吸光值,由公式 $C_a = 12.7 D_{663} - 2.69 D_{645}$ 计算出叶绿素 a 的含量^[24]。

1.3.2 结皮层土壤理化性质测定 取未经研磨的结皮样品,用游标卡尺测量结皮厚度,取适量结皮在鼓风干燥箱内于 105℃烘干 24 h 测定结皮含水量。

取研磨、过筛后的结皮土样,按常规方法分别测定全氮(半微量凯氏定氮法)、全磷(硫酸-高氯酸钼锑抗比色法)、碱解氮(碱解蒸馏法)、速效磷(碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法)含量,土壤 pH 采用 1:1 土水比的悬液测定^[25]。

1.3.3 结皮土壤酶活性测定 脲酶和碱性磷酸酶为结皮层土壤氮磷代谢与转化的典型土壤酶类,分别测定这两种土壤酶活性。脲酶采用苯酚钠-次氯酸钠比色法^[26]测定,脲酶活性以 24 h、37℃下 1 g 土壤中酶促反应催化底物产生氨氮的微克数表示(NH₃-N

μg/(g·d))。碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法^[26]测定,碱性磷酸酶活性以 2 h、37℃下 1 g 土壤中酶促反应催化底物产生酚的微克数表示(Phenol μg/(g·2 h))。

1.4 数据处理

采用统计分析软件 SPSS13.0 对数据进行分析。数据差异性分析选用 One way-ANOVA 方法。数据相关性分析选用 Pearson 相关系数进行处理。

2 结果

2.1 结皮发育特征比较

由表 2 可以看出,有人工藻结皮存在的地方,其

结皮叶绿素 a 和含水量显著高于对照流沙。同时,在不同立地条件下人工藻结皮的生物量存在显著差异($P<0.05$)。位于沙丘丘顶的结皮生物量为最高,可达 4.24 mg/g ;位于迎风坡的结皮生物量和厚度显著高于背风坡($P<0.05$)。方差分析表明,在相同立地条件下,两种植被下藻结皮生物量也存在显著性差异($P<0.05$),其中披碱草下的结皮生物量显著高于沙蒿下的结皮生物量($P<0.05$)(图 1)。与流沙的酸碱度相比,有结皮覆盖的地方,土壤酸碱度有不同程度的降低,其中在迎风坡结皮生物量较大的地方,土壤酸碱度发生明显的改变。此外,迎风坡结皮层土壤含水量高于其他立地条件下的结皮土壤,丘间地次之。

表 2 不同立地条件下人工结皮发育特征比较

Table 2 Developing characteristics of artificial crusts at experimental sites

立地类型	颜色	厚度(mm)	结皮盖度(%)	叶绿素 a (mg/g)	含水量(g/kg)	pH
迎风坡	灰绿色	5.45 ± 1.49 a	75	1.82 ± 0.36 a	5.1 ± 1.7 a	8.63 ± 0.21 a
坡顶	灰黑色	3.73 ± 0.83 b	83	4.24 ± 0.55 c	4.8 ± 0.8 a	8.98 ± 0.17 a
背风坡	灰黑色	3.10 ± 1.05 b	82	1.29 ± 0.24 a	4.2 ± 1.1 a	8.68 ± 0.17 a
丘间地	黑绿色	4.92 ± 1.23 ab	93	0.79 ± 0.34 b	4.9 ± 0.4 a	8.68 ± 0.17 a
流沙	浅黄色	—	—	0.14 ± 0.03 c	3.7 ± 0.9 b	9.5 ± 0.07 b

注：“—”表示无法测定；表中数值为平均值±标准差；同列不同小写字母表示不同立地类型各指标差异在 $P<0.05$ 水平显著；下同。

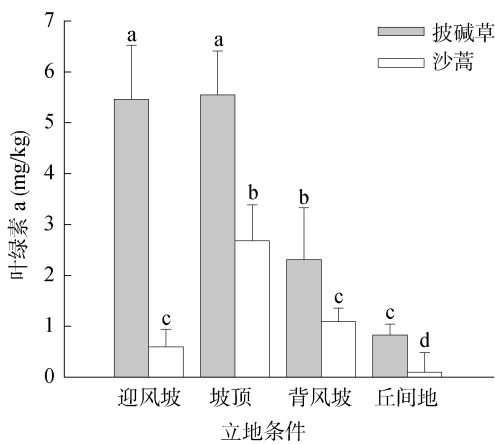


图 1 不同生境下人工藻结皮生物量的比较
Fig. 1 Crusts biomass under different habitat conditions

2.2 结皮土壤磷素含量比较

由图 2 可见,在同一立地条件的不同植被下,生物结皮层土壤的总磷含量差异不显著($P>0.05$),但在不同立地条件的相同植被下结皮层土壤的总磷含量却存在显著性差异($P<0.05$)。丘间地结皮层土壤总磷含量最高,可达 0.433 g/kg ;背风坡最低,只有 0.277 g/kg ;迎风坡土壤总磷高于背风坡。在不同植被下不同立地条件下,结皮层土壤的速效磷含量均存在显著性差异($P<0.05$)。在同一立地条件下,以披碱草为优

势种的植被群落下结皮层土壤的速效磷含量均显著高于以沙蒿为优势种的植被群落下的结皮层土壤 ;在相同植被群落下,位于坡顶的结皮层土壤速效磷含量较其他立地条件均为最高,平均值可达 2.926 mg/kg ;而迎风坡结皮层土壤速效磷含量高于背风坡。

2.3 结皮土壤氮素含量比较

由图 3 可知,不同立地条件下结皮层土壤的总氮含量存在差显著异($P<0.05$),但在相同立地条件不同植被之间差异不显著($P>0.05$)。迎风坡结皮层土壤总氮含量为最高,达 1.626 g/kg,为背风坡的 1.73 倍。而在相同立地条件不同植被下的结皮层土壤碱解氮含量差异显著($P<0.05$)。披碱草群落下结皮层土壤碱解氮含量较沙蒿高,且其含量变化趋势与结皮生物量变化趋势相同,均表现为坡顶含量为最高,迎风坡含量高于背风坡含量。相比之下,沙蒿群落下结皮对土壤的碱解氮含量影响差异并不显著($P>0.05$)。

2.4 结皮层土壤酶活性比较

在图 4 中发现,同一植被下,立地条件不同结皮层土壤酶活性有很大不同。同为披碱草群落,位于不同立地条件,其结皮表层土壤中,两种土壤酶活性均呈现显著差异($P<0.05$),丘间地结皮层土壤脲酶和碱性磷酸酶活性分别达到最高水平,分别达到 $\text{NH}_3\text{-N}$ 34.020 μg/(g·d)和 Phenol 5.567 μg/(g·2h),为坡顶的

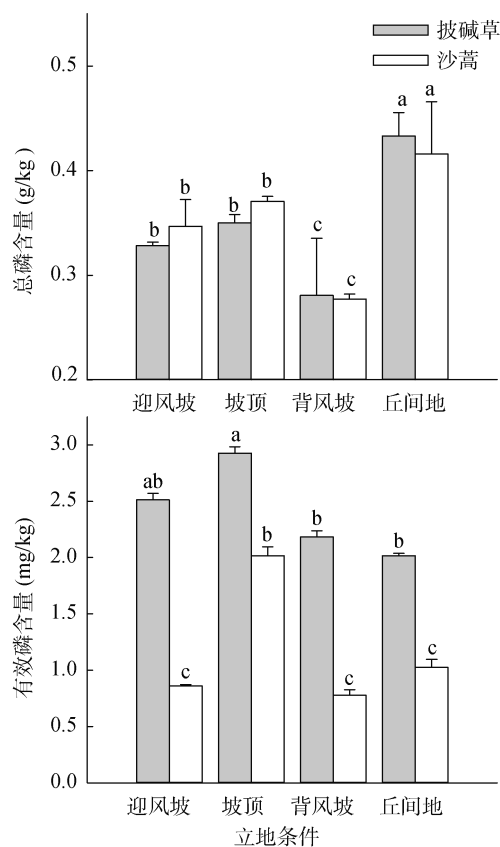


图 2 不同生境下人工藻结皮土壤磷素含量比较

Fig. 2 Soil phosphorus contents under different habitat conditions

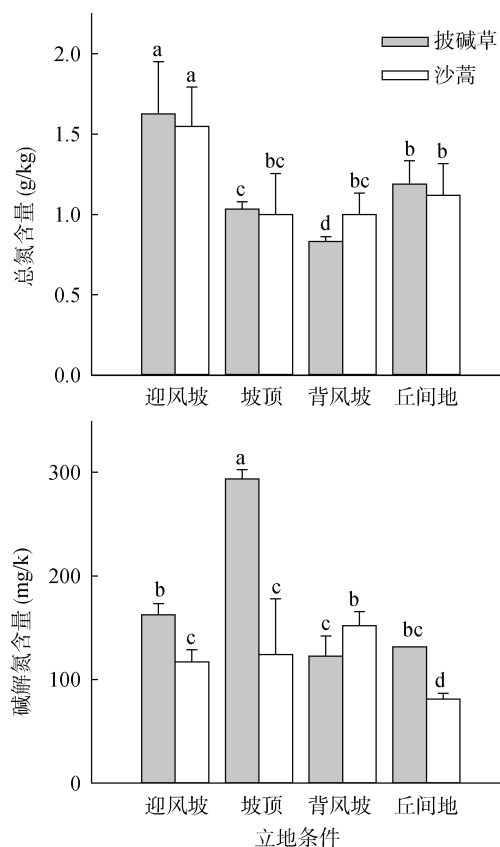


图 3 不同生境下人工藻结皮土壤氮素含量比较

Fig. 3 Soil nitrogen contents under different habitat conditions

2.46 倍和 1.69 倍；且迎风坡结皮层土壤酶活性显著高于背风坡。这说明地形对结皮表层土壤中的土壤酶活性存在影响。在沙蒿群落下，地形不同，土壤中脲酶活性具有显著性差异 ($P < 0.05$)，迎风坡结皮层中脲酶活性好于背风坡，而碱性磷酸酶活性差异却不显著 ($P > 0.05$)。这表明不同植被群落受地形影响不同，进而对结皮土壤的影响作用不同。本实验结果表明，披碱草对结皮层土壤碱性磷酸酶酶活性的影响大于沙蒿 ($P < 0.05$)，而两种植被对土壤脲酶的活性影响作用

相当 ($P > 0.05$)。

2.5 结皮与土壤因子的相互关系

由相关性分析可知(表 3)，人工藻结皮生物量与土壤全氮含量呈极显著性相关 ($P < 0.01$)，与土壤的碱解氮、速效磷、pH 值、碱性磷酸酶及脲酶含量之间均存在显著性相关 ($P < 0.05$)，与土壤全磷及含水量呈负相关。土壤 pH 值与土壤的全氮及碱解氮含量之间呈显著相关 ($P < 0.05$)。土壤脲酶活性与土壤碱解氮含量、碱性磷酸酶活性之间呈显著性相关 ($P < 0.05$)。

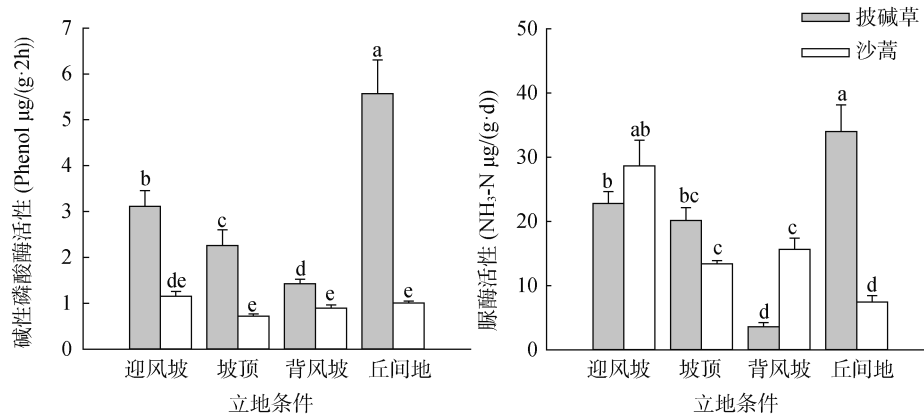


图 4 不同生境下土壤酶活性比较

Fig. 4 Soil enzyme activities under different habitat conditions

表 3 不同生境下人工藻结皮生物量与结皮土壤因子相关系数矩阵
Table 3 Correlation coefficient matrix of crust soil factors and artificial algal crust biomass under different topographical conditions

	生物量	总氮	碱解氮	总磷	速效磷	含水量	pH	碱性磷酸酶	脲酶
生物量	1								
总氮	0.744*	1							
碱解氮	0.810**	0.578	1						
总磷	-0.102	0.412	0.578	1					
速效磷	0.778*	0.475	0.648	0.022	1				
含水量	-0.324	0.054	-0.403	0.376	-0.546	1			
pH	0.821*	0.783*	0.804*	0.019	0.597	-0.515	1		
碱性磷酸酶	0.376 *	0.040	0.175	0.467	0.437	-0.224	0.111	1	
脲酶	0.438*	-0.073	0.503*	0.416	0.025	-0.009	-0.011	0.857**	1

注：表中 ** 表示在 $P<0.05$ 水平显著相关，* 表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关。

3 讨论

3.1 立地条件和植被对人工藻结皮生长发育的影响
土壤是一个不均一体,影响它的因素是错综复杂的,有自然因素和人为因素。其中,自然因素包括地形(如高度、坡度)、风况、温度、湿度等,人为因素如耕作和施肥等^[23]。而生物土壤结皮主要分布在干旱、半干旱荒漠区,人为因素影响较小,自然因素的影响则占主导作用。立地条件的差异导致土壤微环境不同,这可能造成生物土壤结皮中物质循环及能量转化有所差异。本研究中,在同一沙丘的不同坡面,自然环境如坡度、光强、风力和水分蒸散,土壤基质条件、土壤理化特性和地表稳定性的差异等,对人工藻结皮的生长发育产生了不同的生态影响^[3]。在本研究的野外试验中,沙丘的背风坡为沙丘的阳面,迎风坡为沙丘的阴面。沙丘迎风坡较背风坡日照时间短,表土温度略低,更适宜生物结皮的生长发育,故其结皮生物量、结皮厚度、结皮土壤含水量和土壤 pH 值均显著高于背风坡($P<0.05$),这可能意味着该地区光照对结皮的干扰胁迫作用高于风况。本研究还表明,维管植物对人工藻结皮的生长发育也有着显著的影响。维管束植物可以从水平及垂直方向上为结皮生长和发育提供有利条件,如其地上部分可以降低到达结皮表面的风速,为结皮提供庇荫作用,遮挡强烈紫外线辐射^[23]。维管植物的地下部分可以保持土壤湿润和提高土壤养分^[27],向土壤中分泌植物激素等,影响土壤微生物的生长发育。本实验样地的土著植被披碱草属于草本植物,地上部分营养体主要由叶组成,叶宽可达 6~8 mm,株高可达 50 cm 以上;而沙蒿则属于半灌木,叶仅 1~6 cm 长。披碱草的庇荫效果好于沙蒿,这可能有利于帮助土壤微生物抵御荒漠地区的强烈辐射。有研究结果表明,生物结皮可以利用空气

中的水分进行生长繁殖^[3],而披碱草叶片长度是沙蒿的 10 倍以上,通过其蒸腾作用,可以增加微环境中的空气湿度,为生物结皮提供一个较湿润的微环境,从而使得结皮微生物更好地生长和发育。本研究也正证实相同立地条件下,披碱草下的结皮生物量显著高于沙蒿($P<0.05$)。饶本强等^[28]研究了库布齐沙漠丘间地、草方格和沙柳林下接种 3 年的人工结皮的发育特征,也表明不同的植被条件对人工结皮的生长发育产生很大的影响。

3.2 立地条件和植被对人工藻结皮氮素和磷素含量的影响

本研究表明,生物结皮的形成可以显著影响或改变表层土壤的营养特性,如增加表层土壤的氮输入和可提高土壤磷素的有效性^[29],此结果支持 Jafarill 等^[30]的发现,即生物结皮区表层 0~5 cm 土层土壤磷素含量略高于无结皮区地表。据估计在荒漠化地区,每年由生物结皮固定的氮素可达 2~365 kg/hm²,而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^[31]。董锡文等^[32]研究了固定沙丘土壤氮素的空间分布特征,表明迎风坡、顶坡和背风坡不同深度土层的氮素含量随着土层加深而呈现出减少的趋势,且不同坡位间存在显著差异。荒漠藻可通过光合作用和固氮作用增加土壤中碳、氮和有机质含量。在光照适宜、水分充足的沙丘坡面,结皮的生物量较高,所以对土壤的改良作用也会比较显著。本研究中沙丘迎风坡的土壤速效磷、碱解氮和总氮的含量高于背风坡($P<0.05$),但是总磷含量差异不显著($P>0.05$),沙丘的阴坡即本实验样地沙丘的迎风坡的土壤的可利用的氮素和磷素含量高于阳坡。在相同立地条件下,披碱草下的结皮层土壤的碱解氮、速效磷的含量均高于沙蒿($P<0.05$),但是总氮、总磷含量的

差异不显著($P>0.05$),由此,披碱草对结皮生物的生长发育的促进作用比沙蒿强。郭轶瑞等^[31]对人工林下结皮对表土养分的影响研究表明,生物土壤结皮中的养分变化与人工林下的结皮的发育程度密切相关。在人工结皮发育过程中,有效提高了沙地土壤的养分和土壤肥力,这也为沙生植物的拓殖和演替创造了条件。有研究表明,植物密度的变化与土壤氮、磷的变化密切相关,生境的干旱化能够影响植物吸收磷的能力以及土壤中磷的可利用率^[33]。本研究结果也表明,人工藻结皮对土壤物质循环的加速和土壤生物学活性具有重要作用,可以显著改善荒漠土壤的养分条件。

3.3 立地条件和植被对人工藻结皮氮、磷代谢酶活性的影响

土壤酶主要来源于土壤中的微生物、植物根系和动物,参与土壤的形成和发育,能够表征土壤的生物化学转化过程^[34]。有研究指出,在干旱地区荒漠藻类对土壤酶的累计贡献率较大,而土壤酶的存在加速了沙土中各种有机物质的酶促反应,促进了有机化合物循环,提高了沙土肥力,使其利于植物和土壤微生物的生长繁殖,从而促进了结皮层的形成^[35]。本研究中,人工结皮的形成显著增加了沙土表层的脲酶和磷酸酶活性,而脲酶和磷酸酶活性越强,越利于加快土壤中氮、磷素循环的转化速度。这意味着生物结皮的存在使得沙土中土壤生物化学转化加速,使沙土的土壤生物学活性和理化特性得到改善,而这些变化又进一步促进了沙土的抗风蚀性能。试验还发现,不同立地条件下人工结皮表层土壤中这两种与氮磷代谢有关的土壤酶活性存在明显差异,并且两种沙生植物对土壤酶活性的影响也不同。由于丘间地是位于沙丘之间,受到沙丘的荫庇作用,直接接触日照时间较沙丘阳坡短,而土壤含水量与其他地形差异不显著($P>0.05$),适宜其他土壤微生物如细菌、放线菌的生长繁殖,这可能是丘间地结皮层土壤的土壤酶活性最高的原因($P<0.05$)。由于土壤中的微生物,植物和动物等均可分泌土壤酶^[23],且植物的根系分泌物对土壤的影响作用也各不相同,因此位于不同立地条件的沙蒿群落下的结皮层土壤的土壤酶活性差异不显著($P>0.05$),其中原因还有待研究。而披碱草对土壤碱性磷酸酶的活性影响较沙蒿大($P<0.05$),但是对脲酶活性的影响与沙蒿相比,差异不显著($P>0.05$)。同时,披碱草对土壤酶活性的影响呈现出随立地条件变化的规律性,即丘间地活性最高,迎风坡、坡顶次之,背风坡最低。赵吉等^[36]研究也发现,库布齐沙地的

结皮层具有较高的生物学活性,表现为土壤酶活性显著增强和土壤微生物数量增多。由人工藻结皮形成所带来的土壤氮、磷积累和土壤酶活性增强以及土壤养分的可利用性提高,显著促进了荒漠土壤的发育。

3.4 人工藻结皮生物量与氮磷转化之间的相关性

生物土壤结皮中的蓝藻是荒漠生境中的先锋拓殖群落,具有育土培肥的功能。有报道称,蓝藻可以转化土壤中难溶的磷酸酶为植物可以吸收利用的可溶性磷酸盐^[37],提高土壤磷素的有效性^[38]。本研究结果表明,人工藻结皮生物量与结皮层土壤全氮含量、碱解氮、速效磷、pH 值、碱性磷酸酶及脲酶含量之间均存在显著性相关($P<0.05$),表明结皮中藻类生物量的增加有利于增加土壤的氮素、有效磷素的养分积累和氮、磷转化酶的活性。进而伴随着生物结皮的发育,土壤表层的生物地球化学循环速度得到加快^[39],土壤理化性质也得到相应改善。本研究还表明,土壤 pH 值与土壤氮素含量之间呈显著相关($P<0.05$),土壤脲酶活性与土壤碱解氮含量、碱性磷酸酶活性之间也呈显著性相关($P<0.05$)。结皮层土壤的速效磷与碱解氮含量呈现正相关性($P<0.05$),这种土壤氮和磷的相对有效性的改变也已经被越来越多的实验结果证明^[33]。同时,采样区土壤的 pH 均在 8.5 以上,没有结皮覆盖的对照流沙的 pH 更高达 9.5。有文献表明,伴随着结皮中微生物的生长,有机质逐渐积累和生物残体腐败产生的腐殖酸,植物根系分泌酸性物质^[40],这些都导致结皮层土壤的碱度较无结皮区以及结皮下层土壤低,使其可以渐渐适合更多微生物和植物的生存。结皮土壤生境的改善,有利于演替过程中的后续生物的生存和发展。也有研究发现,土壤电导率与氮素含量呈显著正相关,而 pH 与氮素含量呈显著负相关^[33]。

4 结论

(1) 不同立地条件和植被群落对人工藻结皮的生长发育具有不同的影响,表现为沙丘的迎风坡(阴坡)即结皮生物量高于沙丘的背风坡(阳坡);沙蒿对结皮的生长发育促进作用好于披碱草。

(2) 不同立地条件和植被群落对人工藻结皮土壤氮素、磷素含量以及相关土壤酶活性之间具有不同的影响。表现为沙丘的迎风坡的土壤可利用的氮素和磷素以及土壤酶活性高于沙丘的背风坡;丘间低地的土壤酶活性最高,背风坡最低;披碱草对结皮层土壤酶活性的促进作用以及对土壤的改良作用大于沙蒿。

(3) 人工藻结皮经过较长期的野外生长发育,能

够显著提高沙化土壤的氮磷养分, 促进土壤养分循环, 改变土壤理化性质等多种生态功能。同时能够固定流动沙丘, 有效阻止流沙移动和减少土壤侵蚀, 有利于沙生植物的生长发育, 从而起到防沙治沙作用。

参考文献:

- [1] Belnap J, Harper KT, Warrens D. Surface disturbance of cryptobiotic soil crusts: Nitrogenase activity, chlorophyll content and chlorophyll degradation[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1994, 8: 1–8
- [2] Belnap J, Lange OL, Steve L. *Biological Soil Crust: Structure, Function and Management*[M]. Berlin: Springer, 2001: 3–5
- [3] 饶本强. 生态环境因子对荒漠藻及其结皮生长发育的影响研究(博士学位论文)[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2009
- [4] 李新荣, 马凤云, 龙立群, 贾晓红. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J]. *中国沙漠*, 2001, 21: 217–22
- [5] Rivera AV, Godinez AH, Manuell I, Rodriguez Zaragoza S. Physical effects of biological soil crusts on seed germination of two desert plants under laboratory conditions[J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63: 344–352
- [6] Su YG, Li XR, Cheng YW, Tan HJ, Jia RL. Effects of biological soil crusts on emergence of desert vascular plants in North China[J]. *Plant Ecol.*, 2007, 191: 11–19
- [7] Castillo MAP, Maestre FT, Delgado BM, Gallardo A. Biological soil crusts modulate nitrogen availability in semi-arid ecosystems: Insights from a Mediterranean grassland[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1): 21–34
- [8] Mayland HF, McIntosh TH, Fuller WH. Fixation of isotopic nitrogen on a semiarid soil by algal crust organisms[J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1966, 30: 56–60
- [9] Roberta MV, Deborah AN, Thomas RW. Nitrogen fixation and leaching of biological soil crust communities in mesic temperate soils[J]. *Microbial Ecology*, 2006, 51(2): 189–196
- [10] Rychert RC, Skujinš J. Nitrogen fixation by blue-green algae-lichen crusts in the Great Basin Desert[J]. *Soil Society of America Proceedings*, 1974, 38: 768–771
- [11] Evans RD, Ehleringer JR. A break in the nitrogen cycle in arid lands? Evidence from delta ^{15}N of soils[J]. *Oecologia*, 1993, 94: 314–317
- [12] Fletcher JE, Martin WP. Some effects of algae and molds in the rain-crust of desert soils[J]. *Ecology*, 1948, 29: 95–100
- [13] Shem TS, Zaady E, Groffman PM, Gutterman Y. Soil carbon content along a rainfall gradient and inhibition of germination: a potential mechanism for regulating distribution of *Plantago coronopus*[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 1 209–1 217
- [14] 唐东山, 王伟波, 李敦海, 胡春香, 刘永定. 人工藻结皮对库布齐沙地土壤酶活性的影响[J]. *水生生物学报*, 2007, 31(3): 339–344
- [15] 关松荫, 等. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274–276, 192–193, 338, 1–4
- [16] Badiane NNY, Chotte JL, Pate E. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semiarid tropical regions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18: 229–238
- [17] 李恩菊, 董治宝, 赵景波. 巴丹吉林沙漠典型高大沙山迎风坡粒度特征[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(3): 471–478
- [18] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 196–201
- [19] Lajcaster N. *Geomorphology of Desert Dunes*[M]. London: Routledge, 1995: 526
- [20] 卜建华, 杨刚. 沙丘迎风坡沙柳深栽技术研究[J]. *现代农业科技*, 2009(21): 164–168
- [21] 王建成, 武生智, 马崇武, 慕青松. 沙丘背风坡的静力稳定性分析[J]. 2001, 21: 84–86
- [22] Su YG, Li XR, Zheng JG, Huang G. The effect of biological soil crusts of different successional stages and conditions on the germination of seeds of three desert plants[J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73: 931–936
- [23] Belnap J, Lange OL. *Biological Soil Crusts: Structure, Function and Management*[M]. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2001: 299–300
- [24] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [26] 严旭升. 土壤肥力研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1988
- [27] Belnap J, Warren S. Measuring restoration success: A lesson from Patton's tank tracks[J]. *Ecological Bulletin*, 1998, 79: 33
- [28] 饶本强, 王伟波, 兰书斌, 李敦海, 胡春香, 刘永定. 库布齐沙地三年生人工藻结皮发育特征及微生物分布[J]. *水生生物学报*, 2009, 33(5): 193–200
- [29] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from south-east Utah, USA[J]. *Biol. Fertil. Soils*, 2002, 35: 128–135
- [30] Jafari M, Tavili A, Zargham N. Comparing some properties of crusted and uncrusted soils in Alagol region of Iran[J]. *Pak. J. Nutr.*, 2004, 3: 273–277
- [31] 郭铁瑞, 赵哈林, 赵学勇, 左小安, 罗亚勇. 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): 1 000–1 006
- [32] 董锡文, 张晓珂, 姜思维, 蒋德明, 汪景宽. 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
- [33] 邹畏, 何兴东, 张宁, 王海涛, 马迪. 油蒿群落演替中的植物密度对土壤氮/磷比的响应[J]. *土壤学报*, 2009, 46(3): 472–479
- [34] 陈祝春. 沙丘结皮层形成过程的土壤微生物和土壤酶活

- 性[J]. 环境科学, 1991, 12(1): 19–23
- [35] 吴楠, 潘伯荣, 张元明. 土壤微生物在生物结皮形成中的作用及生态学意义[J]. 干旱区研究, 2004, 21(4): 444–450
- [36] 赵吉, 邵土琴. 库布齐沙地土壤的生物学活性研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1997, 28(5): 664–66
- [37] 韦人卿, 唐东山, 傅华龙. 3 种藻类植物对矿石磷转化利用程度的研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 1998, 35(6): 957–960
- [38] 贾宝全, 张红旗, 张志强, 慈龙骏. 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): 1 442–1 448
- [39] 唐东山, 韦人卿, 傅华龙, 兰利琼. 利用土壤微藻改良贫瘠土壤的研究[J]. 四川大学学报(自然科学版) 2003, 40(2): 352–355
- [40] 胡春香, 刘永定, 张德禄, 黄泽波, Paylaen BS. 荒漠藻结皮的胶结机理[J]. 科学通报, 2002, 47 (12): 931–937

Effects of Different Habitats on Artificial Crust Development and Surface Soil Nitrogen, Phosphorus Contents and Enzymes Activities

WU Yi-wen^{1,2}, RAO Ben-qiang^{1,3}, LIU Yong-ding¹, LI Gen-bao^{1*}, LI Dun-hai¹

(1 State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 College of Life Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: Biological soil crusts play significant roles in improving soil nutrients and ecological environment in arid and semi-arid area. To understand the effects of habitat diversity on the crust and surface soil, eight-year-old man-made algal crusts in Hopq Desert under *Elymus dahuricus* and *Artemisia desteriorum* vegetation communities at four different topographical conditions: windward, peak, leeward and slack of the sand dune, were studied. The results showed that the crust biomass and soil available phosphorus were highest at the peak of the dune, reached to 4.24 mg/g and 2.926 mg/kg respectively, while total phosphorus and the activities of phosphatase and urease were highest at the dune slack. The crust biomass, soil available nitrogen, available phosphorus and the soil enzyme activity in the soil at the windward of the dunes were higher than those of the leeward obviously. At the same topographical condition, the crust biomass, available nitrogen, available phosphorus, and the activities of phosphatase and urease in the surface soil under the *Elymus dahuricus* community were all higher than those of the *Artemisia desteriorum*. The results indicated that the developing degree of the cultured algal crust had significant correlation with the surface soil nitrogen, phosphorus and soil enzyme activities. The habitat diversities resulted in different effects of the biological soil crust on the contents of nitrogen, phosphorus and the activities of soil enzymes, and different vegetation communities above the biological soil crusts produced different effects on the crust, generally the effects of the *Elymus dahuricus* community were higher than those of the *Artemisia desteriorum*.

Key words: Habitat, Biological soil crust, Habitat condition, Cultured algal crust, Contents of N and P, Soil enzyme