植物营养与肥料学报 2012,18(3):621-628
Plant Nutrition and Fertilizer Science

黄土丘陵区生物结皮对土壤磷素有效性及碱性磷酸酶活性的影响

张国秀[1,2], 赵允格[2], 许明祥[2*], 高丽倩[2]
(1 西北农林科技大学林学院,陕西杨凌 712100;
2 西北农林科技大学水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要: 黄土丘陵区生物结皮广泛发育,可影响土壤磷素有效性。目前鲜见生物结皮对土壤磷素有效性的研究报道。本文以该区不同年限退耕地的生物结皮为研究对象,通过野外调查和室内分析,研究了生物结皮对土壤全磷、有效磷及碱性磷酸酶活性的影响。结果表明,1)生物结皮的形成可显著提高结皮层土壤全磷含量,而下层(0—10 cm)全磷含量差异不显著;2)生物结皮的形成可显著提高结皮层土壤有效磷含量,研究区生物结皮层土壤有效磷含量为3.27～5.87 mg/kg,占到同层土壤全磷含量的0.57%～0.95%,生物结皮层磷酸酶活性高于下层(0—10 cm) 3～81倍;3)生物结皮对土壤磷素有效性及碱性磷酸酶活性的影响与生物结皮发育阶段有关;4)生物结皮主要通过提高结皮层土壤碱性磷酸酶活性和有机质含量,降低土壤pH,进而提高了土壤磷素有效性。本文研究结果表明,生物结皮的形成有助于提高黄土丘陵区退耕地土壤磷素有效性。

关键词: 生物结皮;发育动态;磷;剖面分布;退耕地
中图分类号: S153;S154.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)03-0621-08

Impacts of biological soil crust on availability of phosphorus and phosphatase activity in hilly regions of the Loess Plateau, China

ZHANG Guo-xiu[1,2], ZHAO Yun-ge[2], XU Ming-xiang[2*], GAO Li-qian[2]
(*1 College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling 712100; 2 Institute of Soil Water Conservation, Northwest A & F University/State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, China*)

Abstract: Biocrusts (biological soil crusts), as ubiquitous living covers on soil surface of the revegetated grasslands in hilly regions of the Loess Plateau, are potential influence factors on the availability of soil P (phosphorus). However, researches focus on the relationship between soil P availability and development of biocrusts were still fresh so far. Impacts of biocrusts on soil total P, available P and phosphatase activity were investigated in revegetated grasslands at different stages of biocrusts developed after the survey of biocrusts distribution. The objects of the study were to determine the influences of biocrusts development on the availability of soil P in the region. The results show that the biological crusts could significantly improve soil total phosphorus contents in the biocrusts layers, while the contents of total phosphorus in 0-10 cm layers are not significant. Soil available phosphorus contents of the biocrusts in the study area are in the range of 3.27-5.87 mg/kg, which are accounting for 0.57%-0.95% of total P in the same layer. The alkaline phosphatase activities in biocrusts are significantly higher than those of the lower soils (0-10 cm) 3-81 times. The effects of biological crusts on the availability of soil P and phosphatase activity are related to the developmental stages of biocrusts. The biological crusts increase alkaline phosphatase activity and organic matter, and reduce the crusts on soil pH, finally improve the availability of soil phosphorus. These results suggest that the availability of soil P could be significantly

收稿日期: 2011-10-12　　**接受日期:** 2011-12-13
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40971174);中国科学院"西部之光"人才培养计划项目。
作者简介: 张国秀(1986—),女,甘肃兰州人,硕士研究生,主要从事生物结皮对土壤质量影响的研究。E-mail: 1986zhangguoxiu79@163.com
*通讯作者 Tel: 029-87012411, E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

enhanced for the formation of biocrusts.

Key words: biological soil crust; developmental dynamics; phosphorus; distribution in soil profile; revegetated grassland

生物土壤结皮(生物结皮)是由生长在土壤表面的藻类、苔藓、地衣以及一些微小真菌、细菌、放线菌等个体微小的生物与土壤复合而形成的有机复合层[1]。近年来,干旱半干旱地区极端的生态环境引起了国内外相关领域学者的广泛关注,作为干旱半干旱地区普遍存在的地被物,生物结皮的种类、分布及其对土壤理化属性与水分循环的影响等在国内外已有不少研究报道[2-7]。Belnap 等就生物结皮的结构、组成及功能等已进行了广泛的研究,认为生物结皮的形成为荒漠草地提供了部分氮和磷[1,8-10]。Jafari 和 Tavili[11]通过对比有结皮与无结皮土壤 0—5 cm 土层中的氮、磷和有机碳后发现,两者之间也有显著的差异。Rao 和 Burns[12]研究发现,藻类的形成能够提高土壤中部分酶类的活性。此外,国内的学者就生物结皮也做了大量的研究,如近年来李新荣等、胡春香等在对生物结皮的种类、分布、结构与功能的研究基础上,分别深入研究了生物结皮对荒漠化防治的功效、生物结皮的生物学特性及其对土壤理化性状的影响等[2-3]。赵允格等[6-7]研究表明,生物结皮的形成能够降低土壤 pH,提高土壤有机质,氮、磷等速效养分含量。部分研究甚至发现,生物结皮在其发育的早期阶段就能够极显著的提高表层土壤中碱性磷酸酶的活性[4-5]。

黄土丘陵区土壤总磷储量丰富,但有效性较低,是土壤质量的限制性因素之一[13-14]。近年来,由于退耕还林还草工程的实施,生物结皮在该区广泛发育,平均盖度可达60%～70%,甚至更高[15-16],显著影响土壤理化性质。但关于生物结皮对土壤磷素有效性的研究略显薄弱,特别就生物结皮的发育过程与土壤有效磷的关系鲜见报道。本文通过野外调查与室内分析相结合,研究不同发育年限的生物结皮对土壤磷素有效性及土壤碱性磷酸酶活性的影响,以期为该区植被恢复建设和生态循环提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

调查采样于 2010 年 7 ～ 8 月在中国科学院安塞水土保持综合试验站试验场及纸坊沟小流域不同年限的退耕坡地上进行。该站位于陕西省延安市安塞县,东经 109°19′,北纬 36°51′,地处黄土高原中部,属典型黄土丘陵沟壑区。气候区划上属暖温带半干旱季风气候,平均海拔 1200 m,相对高差 100 ～ 300 m。年均气温 8.8℃,年均降水量 500 mm 左右,年日照 2300 ～ 2400 h,≥0℃的积温为 3733℃,≥10℃的积温为 3282℃,干燥度指数 K = 1.48,无霜期 160 d 左右。降水年度分配不均,7 ～ 9 月降水量占年总降水量的 60% 左右,且多暴雨。

1.2 样品采集

以研究区不同年限退耕地为研究对象,结合生物土壤结皮的发育特征及其生物量选择人为扰动少、生物结皮相对完整的典型研究样地 13 个,以该区农地为对照,样地基本概况见表 1。

每种年限样地选择 3 ～ 4 个重复,每个样地随机设立 10 个 25 cm × 25 cm 的生物结皮的调查样方,运用 25 样点法分别调查生物结皮的盖度、厚度及物种组成等。同时记录样地的海拔、坡度、坡向、植被类型、植被盖度等立地条件。每个样地采用 5 点混合法分别采集生物结皮层、0—2 cm、2—5 cm、5—10 cm 等不同深度的土壤样品,采集完毕后同层混合作为一个土壤分析样品。每个采样点用培养皿(内径 9 cm,深 1 cm)采集生物结皮样品,用于结皮生物量的测定。每样地重复 5 次。

1.3 分析项目及测定方法

1.3.1 土壤全磷、有效磷及碱性磷酸酶的测定　全磷采用酸溶—钼锑抗比色法[15],有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法[15],碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠显色法[16]测定。

1.3.2 苔藓结皮生物量的测定　首先将培养皿内风干的生物结皮表面喷湿,保证生物结皮能够恢复活力状态,随后用打孔器采取培养皿内一定面积(0.95 cm^2)的生物结皮,并将其放入网筛中在自来水管下冲洗,收集网筛中所有的苔藓植物后放入称量瓶,先于 85℃烘箱中杀青 30 min,其后于 65℃下烘干至恒重,然后置干燥器中 30 min 后称量,换算成单位面积苔藓结皮生物量(g/dm^2)。

表 1　样地调查情况

Table 1　Characteristics of the sampling sites

样地编号 Plot code	苔藓结皮生物量 Biomass (g/dm^2)	生物量等级 Biomass grade	结皮盖度 Biocrust coverage (%)	退耕年限 Revegation age (a)	植被盖度 Vegetation coverage (%)
F24				坡耕地 Farmland	
F19	藻结皮 Cyanobacteria	1	89.20	3	50
F22	1.66	2	88.93	5	50
F13	1.67	2	85.73	17	45
F9	1.84	2	83.20	6	80
F18	2.76	3	91.80	20	70
F10	2.86	3	62.30	30	60
F5	2.78	3	85.73	12	75
F17	3.86	4	91.10	20	70
F1	3.07	4	76.67	13	45
F12	3.23	4	71.23	20	75
F16	4.22	5	81.00	30	70
F6	4.17	5	80.40	16	40
F11	8.38	6	73.60	15	60

1.3.3 藻结皮生物量的测定　藻类结皮生物量测定参照陈宇炜和高锡云提出的方法。在暗处用研钵研磨结皮,使藻体与沙粒分离,并使藻体分散。取(2 ± 0.01) g 样品装入具塞刻度试管中,向试管中加入 10 mL 二甲基亚砜(DMSO),置于 65℃的恒温水浴锅中遮光萃取 1 h,之后用滤纸过滤取上清液于波长 665 和 750 nm 处测定吸光值,然后加 5 滴 1 mol/L盐酸酸化,10 min 后置于波长 665 nm 和 750 nm 处再测吸光值。藻类叶绿素 a 含量的计算公式为:

$$Chla_{DMSO} = 26.73 \times [(E_{665} - E_{750}) - (A_{665} - A_{750})] \times V/M$$

式中: $Chla_{DMSO}$ 为 DMSO 法测定的叶绿素 a 含量(μg/g); E_{665} 和 E_{750} 分别为 DMSO 法萃取液酸化前于波长 665 nm 和 750 nm 处的吸光值; A_{665} 和 A_{750} 分别为 DMSO 法萃取液酸化后于波长 665 nm 和 750 nm 处的吸光值; V 为萃取液体积(mL); M 为结皮土样质量(g)。

1.3.4 生物量等级划分　因藻结皮生物量是以叶绿素含量表示,不易与苔藓结皮生物量联系,故本文中生物量等级以苔藓结皮的生物量划分。生物量等级划分原则: 生物量以单位面积苔藓重量来表征(g/dm^2)。等级划分以苔藓植物覆盖度(%)及生物量为标准:1 等级苔藓植物覆盖度为 0,即藻结皮,生物量(以叶绿素含量表示)为 3.34 ±0.04 μg/g;2 等级苔藓植物覆盖度为 10% ~ 30%,生物量 1.71 ± 0.05 g/dm^2;3 等级苔藓植物覆盖度 30% ~ 50%,生物量 2.91 ± 0.12 g/dm^2;4 等级苔藓植物覆盖度 50% ~ 60%,生物量 3.31 ±0.05 g/dm^2;5 等级苔藓植物覆盖度 60% ~ 80%,生物量 4.31 ± 0.12 g/dm^2;6 等级苔藓植物覆盖度 >80%,生物量 8.84 ±0.27 g/dm^2。

1.4　数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 15.0 软件进行数据处理和统计分析,对不同生物量等级的生物结皮层及其下层土壤的全磷、有效磷、碱性磷酸酶活性及生物结皮的生物量分别进行了单因素方差分析及多重比较。

2　结果分析

2.1　生物结皮对土壤全磷和有效磷的影响

2.1.1 土壤全磷含量　由图 1A 可知,该区生物结皮层土壤全磷含量变化区间为 0.57 ~ 0.62 g/kg,耕

地土壤(CK)与不同年限退耕地的0—2 cm、2—5 cm及5—10 cm土壤全磷含量无显著差异,总体在0.50～0.58 g/kg之间,而生物结皮层全磷含量显著高于下层(0—10 cm)土壤($P<0.05$),说明生物结皮的形成可能提高了结皮层土壤磷素含量。

生物结皮的形成,改变了土壤磷素的剖面分布。以研究区退耕15 a后发育较稳定的生物结皮层及其下0—10 cm土层全磷含量的剖面分布为例,退耕15 a生物结皮层全磷含量达0.62 g/kg,5—10 cm全磷含量0.54 g/kg,生物结皮层土壤全磷含量显著高于下层土壤,0—2 cm、2—5 cm及5—10 cm全磷含量无显著差异。其它年限退耕地不同土层土壤全磷含量也有类似变化趋势。

2.1.2 土壤有效磷含量 图1B显示,不同年限退耕地生物结皮层土壤有效磷含量为3.27～5.87 mg/kg,是不同年限退耕地下层0—10 cm土壤有效磷含量(0.18～1.56 mg/kg)的4～18倍,由于施肥的缘故,耕地土壤(CK)有效磷含量显著高于不同年限退耕地0—2 cm、2—5 cm及5—10 cm土层。生物结皮层有效磷含量可占到全磷含量的0.57%～0.95%,而下层(0—10 cm)土壤有效磷含量仅为全磷含量的0.03%～0.27%。表明生物结皮的形成可能提高土壤磷素的有效性。以研究区退耕15 a后发育较稳定的生物结皮层及其下0—10 cm土层有效磷含量的剖面分布为代表,退耕15 a生物结皮层土壤有效磷含量达5.87 mg/kg,是0—2 cm土层有效磷含量(1.63 mg/kg)的3.6倍,是5—10 cm土层有效磷含量(0.51 mg/kg)的11倍。同时,结皮层有效磷含量占到全磷含量的0.95%,而0—2 cm有效磷含量仅占全磷含量的0.2%,5—10 cm有效磷含量仅占全磷含量的0.09%。以上结果表明,生物结皮的形成可能会提高生物结皮土壤磷素的有效性。其它年限退耕地上土壤有效磷的剖面分布均有类似规律。

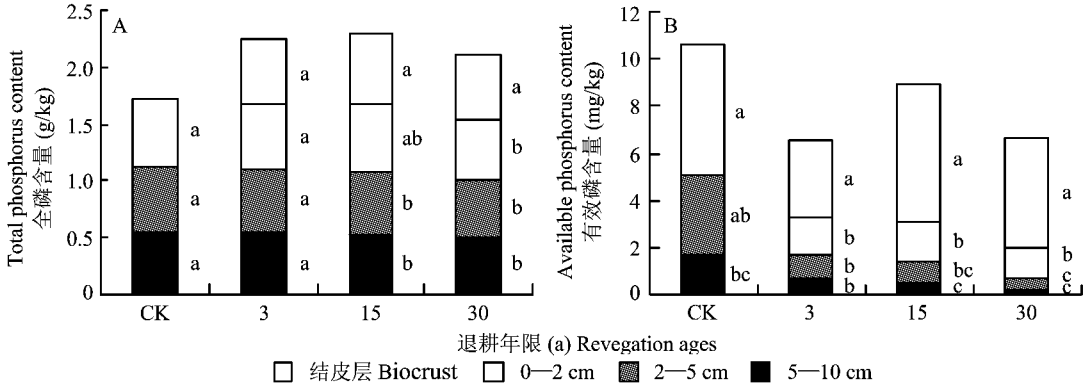

图1 土壤全磷和有效磷含量随退耕年限的剖面分布

Fig. 1 Distributions of total phosphorus and available phosphorus in soil profile with different revegation ages

[注(Note):图中不同字母表示同一时期处理间差异达到5%显著水平 Different letters at the same stage mean significant at the 5% level.]

2.2 生物结皮对碱性磷酸酶的影响

土壤磷酸酶活性高低直接影响着土壤中有机磷的分解转化及其生物有效性。由图2可知,研究区不同年限退耕地生物结皮层土壤碱性磷酸酶活性为2654～3405苯酚 mg/(kg·d),耕地土壤(CK)与不同年限退耕地的0—2 cm、2—5 cm及5—10 cm土壤碱性磷酸酶活性无规律性变化,总体在40～1663苯酚 mg/(kg·d)之间。退耕3 a,结皮层土壤碱性磷酸酶活性是下层5—10 cm的81倍;退耕6 a,结皮层土壤碱性磷酸酶活性是下层5—10 cm的3倍;退耕15 a,结皮层土壤碱性磷酸酶活性是下层5—10 cm的4倍,说明生物结皮可能提高结皮层碱性磷酸酶的活性。退耕15 a后生物结皮层的碱性磷酸酶活性达3405苯酚 mg/(kg·d),是0—2 cm碱性磷酸酶活性的2倍,是2—5 cm土层的3倍,是5—10 cm土层的4倍。以上结果表明,生物结皮的形成可能提高土壤碱性磷酸酶的活性。其他年限退耕地上碱性磷酸酶活性的剖面分布也呈现这种规律性变化。

2.3 生物结皮生物量对土壤全磷和有效磷含量的影响

2.3.1 生物结皮生物量对土壤全磷的影响 由生物结皮层全磷含量对结皮生物量的响应曲线(图3A)可知,在生物结皮生物量达第1等级(3.34±0.03 μg/g)时,生物结皮层全磷含量已平均达到0.567 g/kg,之后随着生物结皮生物量的不断提高,生物结

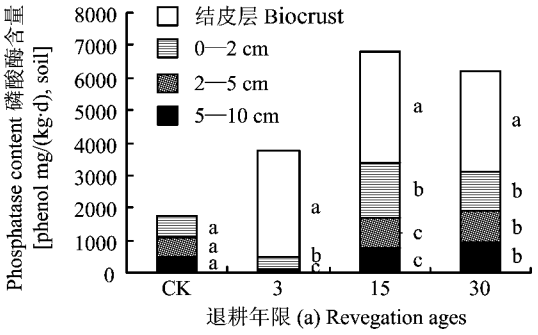

图 2　土壤磷酸酶含量随退耕年限的剖面分布

Fig. 2　Distribution of phosphatase in soil profile with different Revegation ages

[注(Note):图中不同字母表示同一时期处理间差异达到 5% 显著水平 Different letters at the same stage mean significant at the 5% level.]

皮层土壤全磷含量呈缓慢增长趋势,总体处于 0.537 ~ 0.637 g/kg 之间,且生物结皮生物量与土壤全磷含量呈显著正相关($P = 0.933$),表明生物结皮生物量对结皮层全磷含量有显著影响。

2.3.2 生物结皮生物量对土壤有效磷含量的影响

由生物结皮层有效磷含量对生物结皮生物量的响应曲线(图 3B)可知,在生物结皮生物量达第 1 等级(3.34 ±0.03 μg/g)时,生物结皮层有效磷含量平均可达 3.27 mg/kg;当生物量增加到第 3 等级(2.91 ±0.12 g/dm^2)时,生物结皮层有效磷含量平均达到 4.66 mg/kg,较第 1 等级显著增加了 30%,到第 6 等级(8.84 ±0.27 g/dm^2)时,生物结皮层有效磷含量平均已达到 5.87 mg/kg,较第 3 等级的有效磷含量显著增加了 21%。生物结皮层土壤有效磷含量随生物结皮生物量的提高呈逐步上升趋势,两者呈正相关关系($P = 0.944$)。

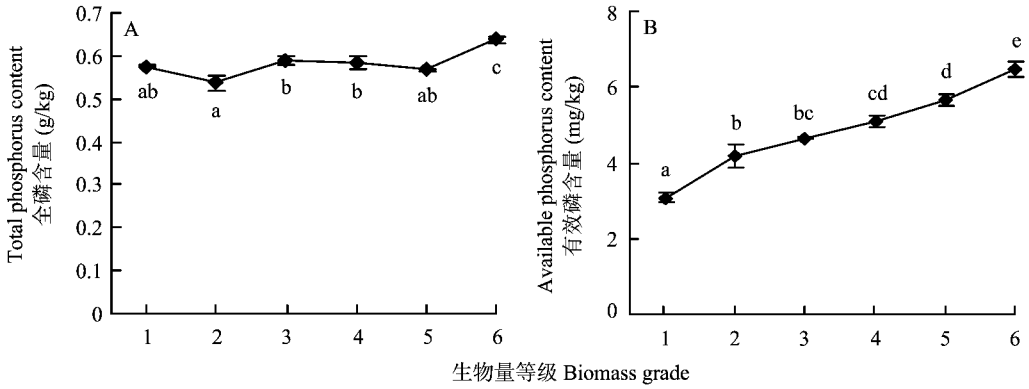

图 3　全磷和有效磷含量随生物结皮生物量等级的变化趋势

Fig. 3　The trend of total phosphorus and available phosphorus with biological crust biomass grade

[注(Note):图中不同字母表示处理间差异达到 5% 显著水平 Different letters mean significant between different biomass grades at the 5% level.]

2.4　生物结皮生物量对碱性磷酸酶活性的影响

由碱性磷酸酶对生物结皮生物量的响应曲线(图 4)可知,在生物结皮生物量达第 1 等级(3.34 ± 0.03 μg/g)时,生物结皮层碱性磷酸酶活性平均已达到 3211 苯酚 mg/(kg·d),之后随着生物结皮生物量的逐渐增高,生物结皮层碱性磷酸酶活性呈缓慢上升趋势,总体处于 2855 ~ 3405 苯酚 mg/(kg·d)之间,且生物结皮生物量与碱性磷酸酶活性呈显著正相关关系($P = 0.887$),表明生物结皮生物量对结皮层碱性磷酸酶活性有显著的影响,并进一步影响到结皮层土壤磷素的有效性。

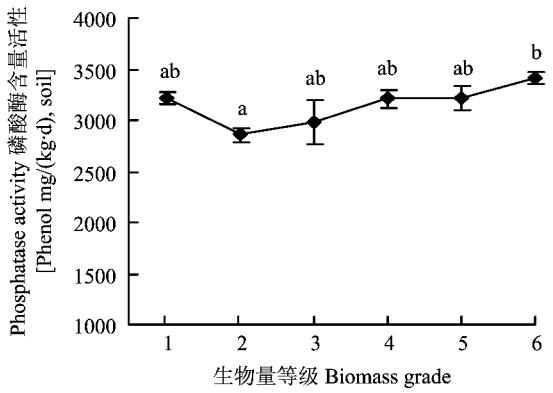

图 4　碱性磷酸酶活性随生物结皮生物量等级的变化趋势

Fig. 4　The trend of phosphatase activity with biological crust biomass grade

[注(Note):图中的不同字母表示处理间差异达到 5% 显著水平 Different letters mean significant between different biomass grades at the 5% level.]

3　讨论

磷素是一种沉积性矿物,在植物需要的各种营

养元素中,磷在风化壳中的迁移是最小的。磷素的风化、淋溶、富集迁移是成土过程中各种因素共同作用的结果。黄土高原区坡耕地土壤剖面上,0—2 cm 土壤有效磷含量5.5 mg/kg 占全磷含量0.59 g/kg 的0.93%,2—5 cm 中占0.59%,5—10 cm 中占0.30%;在不同年限的退耕地上,退耕3 a,结皮层土壤有效磷含量为3.27 mg/kg,占到该层土壤全磷含量0.58 g/kg的0.57%;退耕6 a,结皮层土壤有效磷含量为4.37 mg/kg,占到该层土壤全磷含量0.55 g/kg 的0.79%;退耕15 a,结皮层土壤有效磷含量为5.87 mg/kg,占到该层土壤全磷含量0.62 g/kg 的0.94%。将坡耕地与退耕地上土壤有效磷含量的比重对比可知,在退耕初期,土壤有效磷含量较坡耕地土壤有下降趋势,但是,随着生物结皮的形成,表层土壤有效磷含量又逐渐上升甚至超过坡耕地的水平。可见,生物结皮的形成可能是土壤磷素提高的原因。

磷素的有效性受很多因素的制约,碱性磷酸酶活性、土壤 pH 与有机质是最直接的影响因子。生物结皮的形成显著地提高结皮层碱性磷酸酶活性(图2),在生物结皮生物量达第1等级(3.34 ±0.03 μg/g)时,生物结皮层碱性磷酸酶活性平均已达到3211 苯酚 mg/(kg·d),之后随着生物结皮生物量的逐渐增高,生物结皮层碱性磷酸酶活性呈缓慢上升趋势(图4),即生物结皮生物量对生物结皮层碱性磷酸酶活性有一定的影响。关松荫认为土壤碱性磷酸酶能够促进土壤有效磷的转化,对其有强烈的正效应[18],所以生物结皮的形成可能影响到结皮层土壤磷素的有效性。

大量研究表明,在缺磷胁迫下,植物可通过增加低分子量有机酸的分泌,促进自身对土壤中难溶性含磷化合物的利用,改善其体内磷营养状况,其中土壤 pH 是通过改变土壤的酸碱度从而影响磷素的存在形态及其生物有效性[4, 17-18]。土壤 pH 对生物结皮生物量的响应曲线(图5)表明,随着生物结皮生物量的提高,结皮层土壤 pH 显著下降($P<0.05$),且生物结皮的生物量与 pH 之间呈显著负相关关系($P=-0.818$),可见生物结皮可降低土壤 pH 值,可能进而提高土壤磷素的有效性。

土壤有机质对土壤磷素的影响很复杂。一方面,有机质自身可被看作一种固磷基质,在北方钙质土壤中,磷的行为主要受土壤中含量不是很多的碳酸钙的影响,有机质中腐殖质具有络合作用,腐殖质能和磷离子形成络合物或螯合物,避免难溶性磷酸盐的沉淀,提高有效磷的数量;另一方面,土壤有机质,特别是胡敏酸类腐殖质具有明显的凝胶特性,能以胶膜的形态包被在粘粒矿物、氧化铁、铝以及碳酸钙等无机物固体表面形成有机-无机复合体,有效降低土壤矿物胶体对磷素的物理化学吸附潜能,使得吸附在土壤表面的磷更容易被解吸回土壤溶液之中。总之,土壤有机质可通过降低土壤对磷的吸附强度,促进磷的解吸,从而提高土壤磷素的有效性[19-20]。而生物结皮的形成,可显著增加土壤有机质含量,随着研究区生物结皮生物量的提高,土壤有机质含量增加,生物结皮生物量与有机质之间呈显著正相关关系($P=0.859$)(图6),这可能是生物结皮土壤磷有效性增加的原因之一。

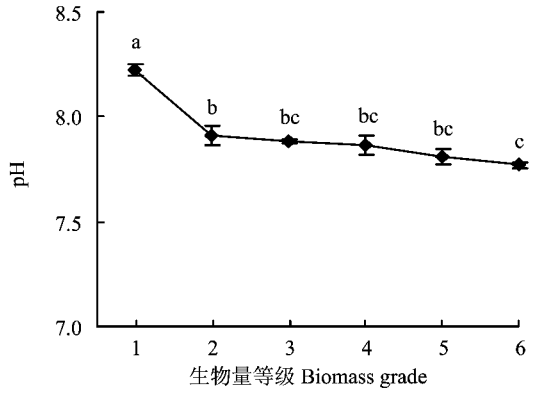

图5 土壤 pH 随生物结皮生物量等级的变化趋势

Fig. 5 The trend of soil pH with biological crust biomass grade

[注(Note):图中的不同字母表示处理间差异达到5%显著水平 Different letters mean significant between different biomass grades at the 5% level.]

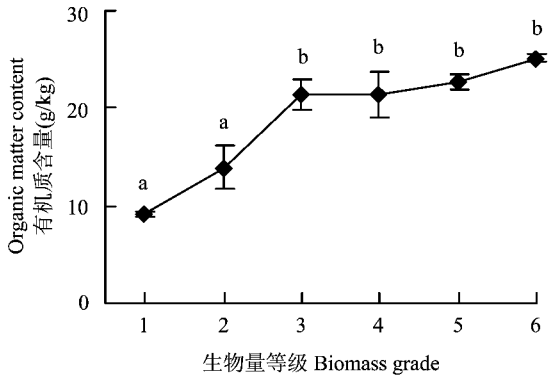

图6 有机质含量随生物结皮生物量等级的变化趋势

Fig. 6 The trend of organic matter with biological crust biomass grade

[注(Note):图中不同字母表示处理间差异达到5%显著水平 Different letters mean significant between different biomass grades at the 5% level.]

综上所述,生物结皮的形成不仅可提高土壤碱性磷酸酶的活性,还可以降低土壤 pH,提高土壤有机质含量,而土壤有效磷含量又与以上三因素紧密相关,因而,生物结皮的形成可能活化并提高土壤磷素的有效性。

4 结论

1)生物结皮的形成可显著提高结皮层土壤全磷含量,研究区生物结皮层土壤全磷含量为 0.57 ~ 0.62 g/kg,结皮层下 0—10 cm 土层全磷含量无显著差异。

2)生物结皮的形成可极显著提高结皮层土壤有效磷含量。

3)生物结皮主要通过提高结皮层土壤碱性磷酸酶活性和有机质,并降低结皮层土壤 pH 值,进而提高了土壤磷素有效性。

4)生物结皮对土壤磷素有效性及碱性磷酸酶活性的影响与生物结皮的发育阶段有关。

感谢中国科学院安塞水土保持综合试验站对本实验野外工作的支持。

参 考 文 献:

[1] Belnap J, Lange O L. Biological soil crusts: structure, function, and management[M]. New York: Springer, 2001.

[2] 胡春香, 刘永定, 张德禄, 等. 荒漠藻结皮的胶结机理[J]. 科学通报, 2002, 47(12): 931-937.
Hu C X, Liu Y D, Zhang D L *et al*. Cementation mechanism of desert algae[J]. Sci. Bull., 2002, 47(12): 931-937.

[3] 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.
Li X R, Zhang Y M, Zhao Y G. A Study of biological soil crusts recent development trend and prospect[J]. Adv. Earth Sci., 2009, 24(1): 11-24.

[4] 孟杰, 卜崇峰, 赵玉娇, 张兴昌. 陕北水蚀风蚀交错区生物结皮对土壤酶活性及养分含量的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1864-1874.
Meng J, Bu C F, Zhao Y J, Zhang X C *et al*. Effects of biological soil crust on soil enzyme activities and nutrients content in wind-water erosion crisscross region northern Shaanxi Province, China [J]. J. Nat. Res., 2010,25(11): 1864-1874.

[5] 唐东山, 王伟波, 李敦海, 等. 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.
Tang D S, Wang W B, Li G H *et al*. Effect of artificial crust in soil enzyme activities of hopq desert, China[J]. Acta Hydrobiol. Sin., 2007, 31(3): 339-344.

[6] 赵允格, 许明祥, 王全九, 邵明安. 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.
Zhao Y G, Xu M X, Wang Q J Shao M A *et al*. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in Hilly Loess Plateau, China[J]. J. Nat. Res., 2006, 21(3): 441-448.

[7] 赵允格, 许明祥, 王全九, 邵明安. 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.
Zhao Y G, Xu M X, Wang Q J, Shao M A *et al*. Physical and chemical properties of soil bio-crust on rehabilitated grassland in Hilly Loess Plateau of China[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(8): 1429-1434.

[8] Barger N N, Herrick J E, Van Zee J *et al*. Impacts of biological soil crust disturbance and composition on C and N loss from water erosion[J]. Biogeochemistry, 2006, 77(2): 247-263.

[9] 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.

[10] Darby B J, Neher D A, Belnap J. Impact of biological soil crusts and desert plants on soil microfaunal community composition[J]. Plant Soil, 2010, 328(1-2): 421-431.

[11] Jafari M, Tavili A. Comparing some properties of crusted and uncrusted soils in Alagol region of Iran[J]. Pakistan J. Nutr., 2004, 3(5): 273-277.

[12] Rao D L N, Burns R G. The effect of surface growth of blue-green algae and bryophytes on some microbiological, biochemical, and physical soil properties[J]. Biol. Fert. Soils, 1990, (9): 239-244.

[13] 许明祥, 刘国彬, 卜崇峰. 黄土丘陵区人工林地土壤肥力评价[J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1367-1371.
Xu M X, Liu G B, Bu C F. Soil fertility evaluation of planted forest land on the hilly gullied Loess Plateau[J]. Acta Bot. Bor-Occid. Sin., 2003, 23(8): 1367-1371.

[14] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究[J]. 应用生态学报. 2005,16(10): 1843-1848.
Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Assessment indicators of soil quality in hilly Loess Plateau[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(10): 1843-1848.

[15] 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.
Liu G S. Soil physical and chemical analysis and profile description[M]. Beijing: China Standards Press, 1996.

[16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 274-276.
Guan S Y. Soil enzyme and its researching methods [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986. 274-276.

[17] 陆文龙, 曹一平, 张福锁. 根分泌的有机酸对土壤磷和微量元素的活化作用[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3): 379-382.
Lu W L, Cao Y P, Zhang F S. Role of root-exuded organic acids in mobilization of soil phosphorus and micronutrients[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 1999, 10(3): 379-382.

[18] 陆文龙，王敬国，曹一平，张福锁. 低分子量有机酸对土壤磷释放动力学的影响[J]. 土壤学报，1998，35(4)：493-500.
Lu W L, Wang J G, Cao Y P, Zhang F S. Kinetics of phosphorus release from soils, as affected by organic acids with low-molecular-weight[J]. Acta Pedol. Sin., 1998, 35(4): 493-500.

[19] 张海涛，刘建玲，廖文华，等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附-解吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(2)：284-290.
Zhang H T, Liu J L, Liao W H *et al*. Effect of phosphate fertilizer and manure on properties of phosphorus sorption and desorption in soils with different phosphorus levels[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(2): 284-290.

[20] 夏海勇，王凯荣. 有机质含量对石灰性黄潮土和砂姜黑土磷吸附-解吸特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(6)：1303-1310.
Xia H Y, Wang K R. Effects of soil organic matter on characteristics of phosphorus adsorption and desorption in calcareous yellow fluvo-aquic soil and lime concretion black soil[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(6): 1303-1310.