

黄土高原水蚀风蚀交错区藓结皮对土壤酶活性的影响

王彦峰¹ 肖波^{1,2*} 王兵³ 马爽¹ 姚小萌¹

(¹ 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; ² 中国科学院水利部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; ³ 山西大学环境与资源学院, 太原 030006)

摘要 以黄土高原水蚀风蚀交错区黄绵土和风沙土上发育 30 年的典型藓结皮为对象, 分 6 层采集 0~12 cm 土层土样, 研究了藓结皮对不同土层 4 种水解酶活性的影响及其与土壤养分的关系。结果表明: 与无结皮相比, 黄绵土藓结皮的脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和蛋白酶活性分别提升了 2.4、7.6、20.7、2.4 倍, 而风沙土藓结皮的这 4 种水解酶活性分别提升了 3.5、22.2、22.3、2.0 倍; 黄绵土和风沙土藓结皮的体积含水量分别降低了 6.5% 和 0.8%, 温度分别降低了 0.8 和 2.5 °C; 黄绵土藓结皮的有机质、碱解氮和速效磷含量分别提升了 2.5、2.9 和 3.6 倍, 风沙土分别提升了 3.6、3.0 和 6.6 倍。4 种水解酶的活性与土壤养分含量呈显著正相关, 与土壤含水量呈显著负相关; 而土壤温度与脲酶活性呈显著正相关, 与蛋白酶活性呈显著负相关。黄土高原水蚀风蚀交错区 2 种土壤藓结皮均能显著提升水解酶活性, 这是藓结皮加速土壤养分周转的重要因素; 通过改变土壤含水量和温度等酶促反应条件间接影响酶活性, 是藓结皮促进土壤酶活性的重要途径。

关键词 生物结皮; 藓结皮; 土壤酶活性; 土壤养分; 黄土高原

Effects of moss-dominated biological soil crusts on soil enzyme activities in water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau of China. WANG Yan-feng¹, XIAO Bo^{1,2*}, WANG Bing³, MA Shuang¹, YAO Xiao-meng¹ (¹College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; ²State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³College of Environmental and Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China).

Abstract: The 30-year-old biological soil crusts dominated by mosses (hereafter moss crusts) and corresponding uncrusted soil (hereafter no crust) were sampled on loess soil and aeolian soil at 0–12 cm depth on the Loess Plateau of China. Afterwards, the hydrolase activities of the samples were measured, and their correlations with soil physicochemical properties were analyzed. Compared with no crust, the activities of urease, alkaline phosphatase, invertase, and protease of the moss crusts were 2.4, 7.6, 20.7, 2.4 times higher on loess soil, respectively; while they were 3.5, 22.2, 22.3, 2.0 times higher on aeolian soil, respectively. Compared with no crust, the soil water content of the moss crusts was decreased by 6.5% and 0.8% on loess soil and aeolian soil, and the soil temperature of the moss crusts was decreased by 0.8 and 2.5 °C, respectively; the contents of soil organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen, and available phosphorus of the moss crusts were 2.5, 2.9 and 3.6 times higher on the loess soil, and they were 3.6, 3.0 and 6.6 times higher on the aeolian soil, respectively. The soil hydrolase activities were positively correlated with the soil nutrient content and negatively correlated with the soil water content. Soil temperature was positively correlated with the urease activity and negatively correlated with the protease activity. The moss crusts significantly improved soil nutrients and fertility through increasing soil enzyme activities on the Loess Plateau of

本文由国家自然科学基金项目(41671221)和中央高校基本科研业务费专项(2017QC048, 2017QC126)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41671221) and the Special Program of the Fundamental Research Fund for the Central Universities (2017QC048, 2017QC126).

2017-04-11 Received, 2017-08-15 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaobo@cau.edu.cn

China, and these effects were reasonably attributed to the moderate soil water content and temperature regulated by the moss crusts.

Key words: biological soil crust; moss crust; soil enzyme activity; soil nutrient; Loess Plateau.

土壤酶是特殊的生物催化剂,在土壤生物化学过程中起重要作用^[1].目前发现的土壤酶有数十种,按作用不同可将其归为水解酶、氧化还原酶、转移酶和裂合酶4类,其中,水解酶类在加速土壤养分积累和促进土壤养分循环方面作用明显^[2].有研究发现,水解酶中脲酶能加速尿素水解,为土壤生物提供氮素营养^[3];磷酸酶能增加有机磷化合物的脱磷速度,释放可供植物和土壤微生物利用的无机磷^[3];蔗糖酶能催化蔗糖水解生成葡萄糖和果糖^[4];蛋白酶能促进蛋白质水解^[4].同时,土壤酶活性对土壤含水量、温度以及动植物和微生物等变化的响应十分灵敏^[5-6],因此被认为是土壤肥力和环境变化的生物活性指标.

生物结皮是由隐花植物(苔藓、地衣、绿藻、蓝藻等)和土壤微生物通过菌丝、假根和分泌物与土壤颗粒胶结形成的复合体^[7].有研究表明,生物结皮能提高地表抵抗风、水侵蚀的能力,固定沙丘、防止水土流失,固持碳氮、改善土壤肥力,加速土壤营养元素循环,调节表层土壤温、湿度使其利于种子萌发,参与食物网的构成等^[8-12].近年来,随着退耕还林(草)工程的实施,以藓结皮为代表的生物结皮在黄土高原广泛发育,覆盖度高达60%~70%^[13],已成为该地区陆地生态系统的重要组成部分.目前,关于黄土高原生物结皮的研究较多,有关生物结皮的空间分布因素^[14-15]、形成过程和发育特征^[16]、水土保持功能^[17]、土壤养分积累^[18]以及对土壤理化性质的影响^[19]等均有报道.其中,生物结皮对土壤酶活性的影响也受到较多关注.例如,孟杰等^[20]研究发现,陕北黄土高原生物结皮能显著提高土壤酶活性;张国秀等^[21]指出,黄土丘陵区生物结皮可通过

提高碱性磷酸酶活性进而提高土壤磷的有效性.目前,黄土高原地区生物结皮影响土壤酶活性的研究多集中于生物结皮对土壤酶活性的直接影响,缺乏对其间接途径的关注,有关生物结皮对土壤酶活性影响途径的研究尚不全面,同时土壤酶与土壤养分之间的影响机制尚不明晰.为此,本研究以黄土高原水蚀风蚀交错区黄绵土和风沙土上发育约30年的典型藓结皮为对象,分析了藓结皮对4种水解酶活性的影响以及这4种水解酶活性与土壤理化性质的关系,为认识和理解生物结皮在缓解黄土高原水蚀风蚀的作用提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原北部的陕西省神木县六道沟流域(38°46'—48°51' N, 110°21'—110°23' E),海拔1094.0~1273.9 m.黄土高原北部是黄土高原向毛乌素沙漠的过渡地带,生态环境脆弱,风蚀、水蚀交错,水土流失严重;同时,该地区又位于晋陕蒙能源“黑三角”,煤炭资源丰富,经济活动频繁,人为干扰强烈.研究区属中温带半干旱气候,降雨集中在6—9月,年降水量408.5 mm^[18].流域为典型的盖沙黄土丘陵地貌,分为东西两半,西部多为固定沙丘,以风沙土为主,占流域总面积的13.5%,东部则大部分为黄绵土覆盖,占流域总面积的86.5%^[18].

1.2 样地选择与样品采集

2015年9月12—15日15:00—18:00采集样品4次.针对黄绵土和风沙土有、无藓结皮4种处理,各选3个样地(表1).每种土壤上藓结皮和无结皮样

表1 样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of the plot

项目 Item	黄绵土藓结皮 Moss crusts on loess soil	风沙土藓结皮 Moss crusts on aeolian soil
土壤质地 Soil texture	砂质壤土 Sandy loam soil	砂土 Sandy soil
藓结皮覆盖度 Coverage of moss crusts (%)	47.31±1.22a	95.47±5.14b
藓结皮厚度 Moss thickness (mm)	22.51±2.56a	15.35±3.13a
藓结皮生物量 Moss biomass (g·m ⁻²)	89.49±9.35a	152.99±12.43b
藓植株密度 Moss density (plant·cm ⁻²)	29.81±0.74a	55.93±1.37b
藓种 Moss species		
优势藓种 Dominant moss species	真藓 <i>Bryum argenteum</i>	尖叶对齿藓 <i>Didymodon. constrictus</i>
伴生藓种 Auxiliary moss species	极地真藓 <i>Bryum arcticum</i> 、土生扭口藓 <i>Barbula vinealis</i> 、细叶扭口藓 <i>Barbula perobtus</i>	极地真藓 <i>Bryum arcticum</i> 、真藓 <i>Bryum argenteum</i> 、土生扭口藓 <i>Barbula vinealis</i> 、细叶扭口藓 <i>Barbula perobtus</i>

同行不同字母表示差异显著($P<0.05$) Different letters in the same row meant significant difference at 0.05 level.

地邻近.在每个样地随机选择 4 个样点,样品采集从藓结皮层开始,采集 0~2、2~4、4~6、6~8、8~10、10~12 cm 土层土壤样品,将同一样地中 4 个样点的同层次样品混合.4 种处理 \times 3 个样地 \times 6 个土层,共采集 72 个样品.样品使用直径 100 mm、高 20 mm 的无菌塑料培养皿采集,将样品存于密封采样袋中于 4 °C 下冷藏.

1.3 土壤酶活性测定

脲酶活性采用奈氏比色法测定^[22],以 37 °C 下 1 g 土样 1 h 生成 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的 μg 数表示;碱性磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定^[22],以 37 °C 下 1 g 土样 1 h 生成酚的 μg 数表示;蔗糖酶活性用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定^[22],以 37 °C 下 1 g 土样 1 h 生成葡萄糖的 μg 数表示;蛋白酶活性用铜盐比色法测定^[22],以 37 °C 下 1 g 土样 1 h 酶解蛋白质释放酪氨酸的 μg 数表示.

1.4 土壤理化性质测定

土壤有机质用重铬酸钾氧化法测定,碱解氮用碱扩散法测定,速效磷用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定.9 月 12—15 日使用土壤水分和温度传感器 (5TM, 美国 Decagon 公司) 搭配手持式读表 (Pro-Check, 美国 Decagon 公司),对每个样点的土壤体积含水量和温度进行原位测定,观测时间为 8:00—18:00,每 2 h 测定一次,观测期间天气晴好.

1.5 数据处理

采用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析,使

用 t 检验分析藓结皮与无结皮之间土壤酶活性和理化性质的差异显著性,采用 Pearson 相关分析判定土壤酶活性与土壤理化性质之间的相关关系 ($\alpha = 0.05$).使用 OriginPro 9.2 软件作图.

2 结果与分析

2.1 藓结皮对土壤酶活性的影响

如图 1 所示,黄绵土藓结皮 6 个土层的脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和蛋白酶活性分别为 20.00、50.90、905.66 和 27.95 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,分别是无结皮的 2.4、7.6、20.7 和 2.4 倍.可见,藓结皮大幅提升了 4 种土壤水解酶的活性,其中对蔗糖酶活性的提升幅度最高.黄绵土藓结皮与无结皮的土壤蛋白酶活性在 0~6 cm 土层差异显著,但脲酶活性、碱性磷酸酶活性和蔗糖酶活性仅在 0~2 cm 土层差异显著,表明黄绵土藓结皮对蛋白酶活性的影响深度大于其他 3 种水解酶.

与黄绵土类似,风沙土藓结皮对土壤水解酶活性同样有明显的提升作用,但其作用程度视水解酶种类而不同(图 2).风沙土藓结皮与无结皮的碱性磷酸酶、蔗糖酶和蛋白酶活性在 0~6 cm 土层均差异显著,但脲酶活性仅在 0~2 cm 差异显著.风沙土藓结皮对碱性磷酸酶、蔗糖酶和蛋白酶活性的影响深度大于脲酶.风沙土藓结皮的脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和蛋白酶活性分别是无结皮的 3.5、22.2、22.3 和 2.0 倍.表明风沙土藓结皮对碱性磷酸酶和蔗糖

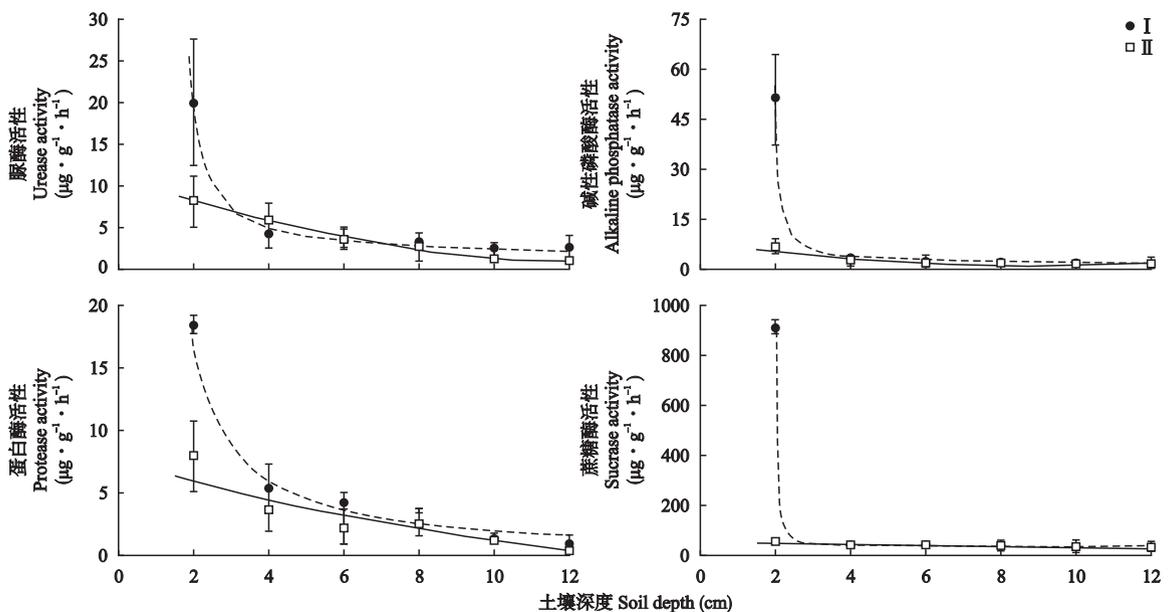


图 1 黄绵土藓结皮和无结皮土壤的水解酶活性

Fig.1 Soil hydrolase activity in the moss crusts and no crust on loess soil.

I: 藓结皮 Moss crust; II: 无结皮 No crust. 下同 The same below.

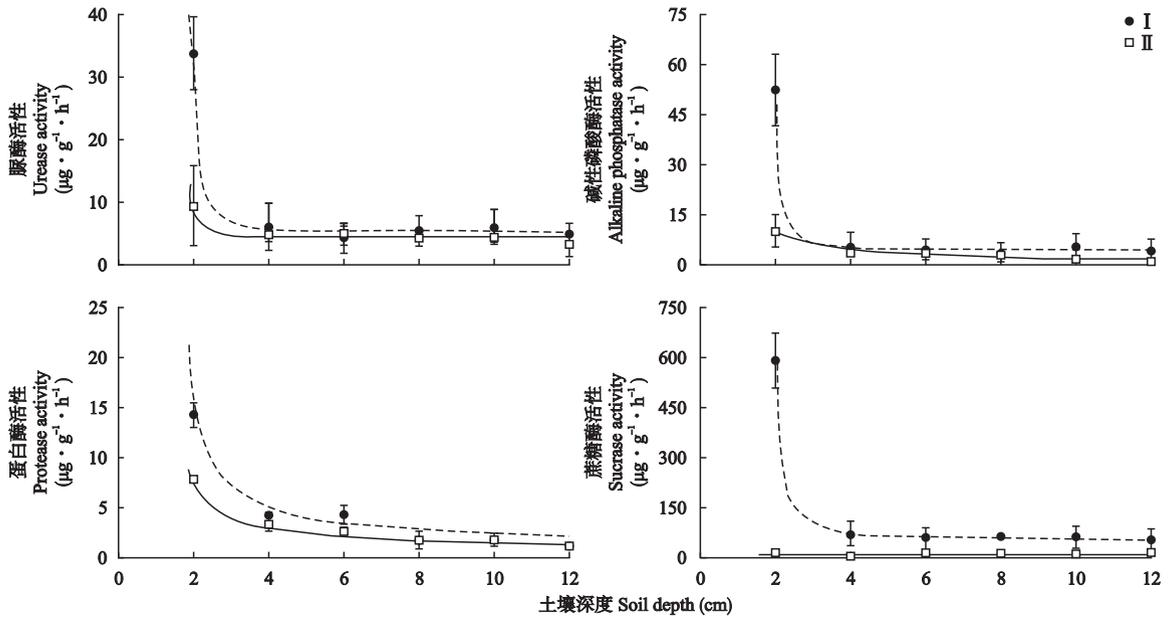


图2 风沙土藓结皮和无结皮的水解酶活性

Fig.2 Soil hydrolase activity in the moss crusts and no crust on aeolian soil.

酶活性的提升幅度大于脲酶和蛋白酶,对蔗糖酶活性的提升幅度最大,达到 $693.68 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

2.2 藓结皮对土壤含水量和温度的影响

2种土壤上,藓结皮和无结皮的土壤含水量均随土壤深度增加而增加,但藓结皮减缓了土壤含水量的增加趋势(图3).黄绵土藓结皮与无结皮的土壤含水量在0~2和6~10 cm土层差异显著,而风沙土两者在0~12 cm土层均无显著差异.可见,黄绵土藓结皮对土壤含水量的影响深度大于风沙土.在0~

12 cm土层,黄绵土藓结皮对土壤含水量的平均降幅为6.5%,而风沙土平均降幅仅为0.9%.可见,黄绵土藓结皮对土壤含水量的降幅明显大于风沙土.

藓结皮和无结皮的土壤温度均随土壤深度增加而降低,且2种土壤上藓结皮的土壤温度大多低于无结皮(图4).黄绵土和风沙土藓结皮在0~12 cm土层的平均温度分别比无结皮低0.81和2.49℃,表明2种土壤藓结皮均降低了土壤温度,且风沙土藓结皮对土壤温度的降幅大于黄绵土.此外,黄绵土

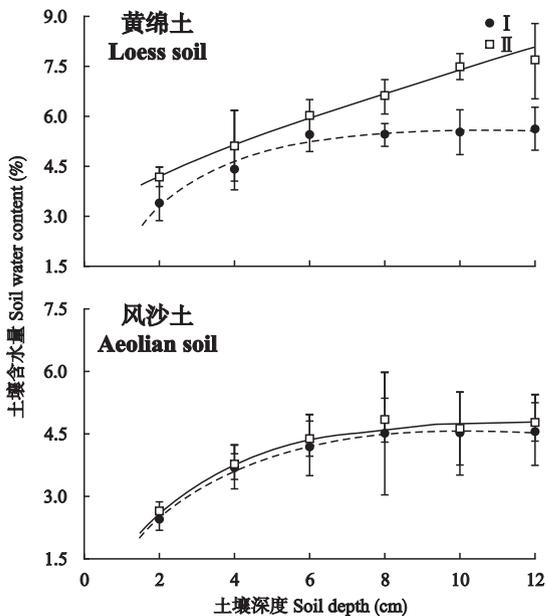


图3 藓结皮对土壤含水量的影响

Fig.3 Effects of the moss crusts on soil water content.

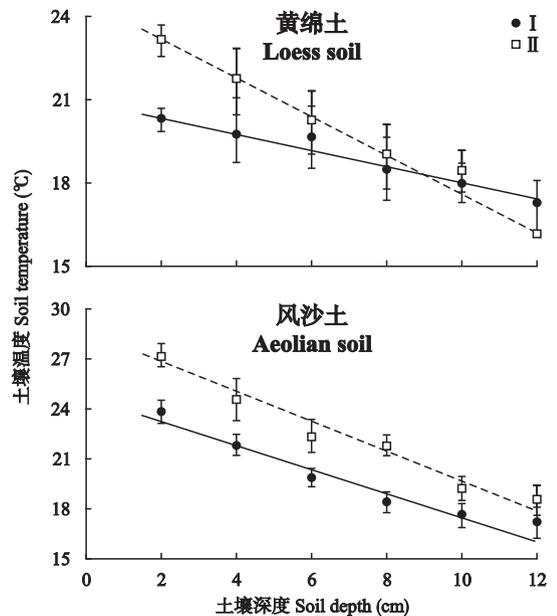


图4 藓结皮对土壤温度的影响

Fig.4 Effects of the moss crusts on soil temperature.

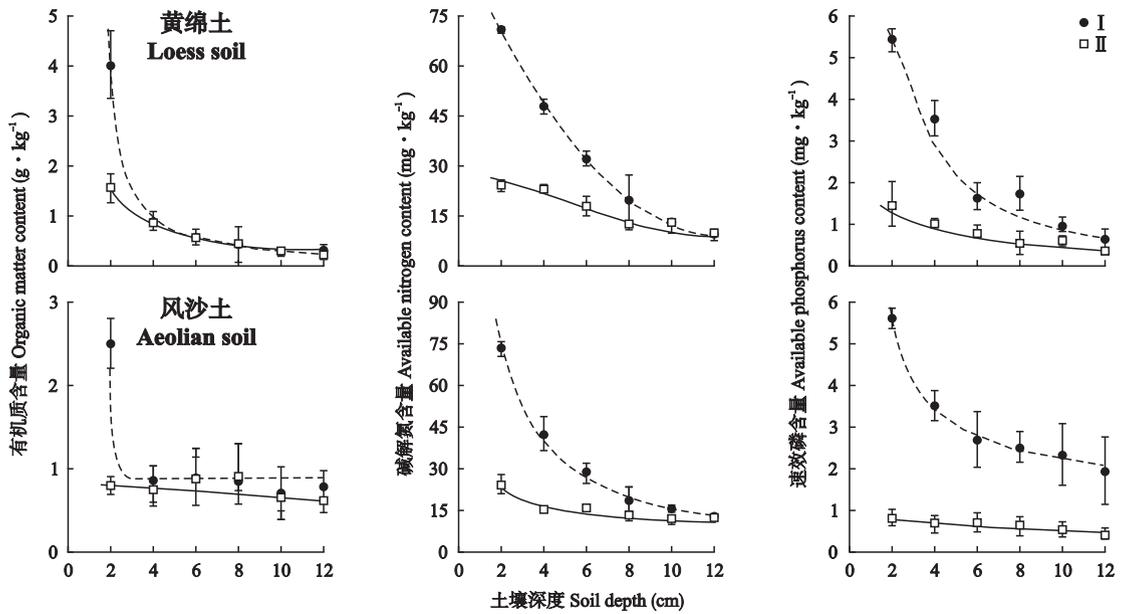


图5 藓结皮对土壤有机质、碱解氮和速效磷含量的影响

Fig.5 Effects of the moss crusts on the contents of soil organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus.

藓结皮与无结皮的土壤温度仅在0~4 cm土层存在显著差异,而在风沙土上两者在0~6 cm土层存在显著差异,可见风沙土藓结皮对土壤温度的影响深度大于黄绵土。

2.3 藓结皮对土壤有机质、碱解氮和速效磷含量的影响

如图5所示,2种土壤上藓结皮的有机质、碱解氮和速效磷含量均表现出明显的垂直分布特征,即有机质、碱解氮和速效磷含量均随土壤深度增加而降低,表聚特征明显。黄绵土藓结皮与无结皮的速效磷含量在0~12 cm土层均差异显著,碱解氮含量在0~8 cm土层差异显著,而有机质含量仅在0~2 cm土层差异显著。风沙土藓结皮与无结皮的碱解氮和速效磷含量在0~12 cm土层存在显著差异,但有机质含量仅在0~2 cm土层存在显著差异。这表明,风沙土藓结皮对碱解氮和速效磷含量的影响深度大于黄绵土。在受藓结皮显著影响的表层土壤中,黄绵土藓结皮的有机质、碱解氮和速效磷含量分别是无结皮的2.5、2.9和3.6倍,而风沙土分别是无结皮的3.6、3.0和6.6倍。可见,2种土壤上藓结皮对速效磷含量的提升幅度最大,碱解氮和有机质次之,且风沙土的提升幅度大于黄绵土。

2.4 土壤酶活性与理化性质的相关性

如表2所示,土壤含水量与脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和蛋白酶活性呈显著负相关;土壤温度与脲酶活性呈显著正相关,与蛋白酶活性呈显著负相关,

表2 土壤酶活性与理化性质的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between soil enzyme activities and physicochemical properties

	脲酶活性 Urease activity	碱性磷 酸酶活性 Alkaline phosphatase activity	蔗糖酶活性 Sucrase activity	蛋白酶活性 Protease activity
含水量 Water content	-0.466 **	-0.433 **	-0.345 **	-0.498 **
温度 Temperature	0.223 *	0.160	0.105	-0.445 **
有机质 Organic matter	0.567 **	0.682 **	0.767 **	0.886 **
碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen	0.724 **	0.729 **	0.730 **	0.804 **
速效磷 Available phos- phorus	0.660 **	0.794 **	0.694 **	0.744 **

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

但与碱性磷酸酶和蔗糖酶活性的相关性不显著。此外,土壤水解酶活性与土壤养分含量呈显著正相关。

如表3所示,碱解氮含量对4种水解酶活性的直接途径系数均大于间接途径系数,而土壤含水量、温度、有机质和速效磷含量对4种水解酶活性的间接途径系数大于直接途径系数。对土壤酶活性与理化性质的通径分析表明,碱解氮含量对4种土壤酶活性的提升有直接作用,而含水量、温度、有机质和速效磷含量主要通过间接途径影响4种水解酶活性的提升。

3 讨论

3.1 藓结皮对土壤酶活性的影响

本研究中,2种土壤上藓结皮均可显著提升土

表 3 土壤酶活性与理化性质的通径分析

Table 3 Path analysis between soil enzyme activities and physicochemical properties

	通径系数 Path coefficient	土壤性质 Soil property				
		含水量 Water content	温度 Temperature	有机质 Organic matter	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen	速效磷 Available phosphorus
脲酶	直接通径系数 Direct path coefficient	0.040	-0.338	0.159	0.861	0.245
Urease	间接通径系数 Indirect path coefficient	-0.617	0.870	0.616	-0.016	0.544
碱性磷酸酶	直接通径系数 Direct path coefficient	0.010	-0.430	0.106	0.994	0.231
Alkaline phosphatase	间接通径系数 Indirect path coefficient	-0.609	0.922	0.669	-0.082	0.564
蔗糖酶	直接通径系数 Direct path coefficient	-0.003	-0.375	0.079	0.929	0.226
Sucrase	间接通径系数 Indirect path coefficient	-0.603	0.902	0.687	-0.053	0.575
蛋白酶	直接通径系数 Direct path coefficient	-0.014	-0.050	0.150	0.770	0.106
Protease	间接通径系数 Indirect path coefficient	-0.620	0.739	0.631	0.165	0.699

壤水解酶活性,其中,黄绵土藓结皮使脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和蛋白酶活性分别提升了 2.4、7.6、20.7 和 2.4 倍,而风沙土分别提升了 3.5、22.2、22.3 和 2.0 倍,这与其他研究区的结果基本一致.例如:在腾格里沙漠,发育约 20 年的藓结皮使土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性分别提升了 4.4、8.1 和 2.9 倍;在科尔沁沙地,藓结皮的脲酶、蛋白酶、蔗糖酶以及多酚氧化酶活性分别是无结皮的 3.3、14.2、9.6 和 6.5 倍^[23].这些研究表明,藓结皮对土壤酶活性有大幅提升作用,其原因可能主要有三方面:1) 藓结皮可通过假根和凋落物向周围土壤分泌酶,进而提高土壤酶活性^[24];2) 藓结皮改变了结皮层下土壤微生物的数量和多样性,影响了土壤微生物的酶分泌能力,继而影响了土壤酶活性^[25];3) 藓结皮对土壤含水量、温度和 pH 值等酶促反应条件的改变间接促进了土壤酶活性^[22].不同研究区藓结皮对土壤酶活性的影响程度存在较大差异,这可能主要取决于不同地区藓结皮的不同特征.受气候和人为因素影响,不同研究区藓结皮的藓种、发育年限、覆盖度、厚度、藓密度和生物量等特征存在较大差异,这不仅导致了藓结皮向周围土壤分泌酶的能力不同,同时还导致了结皮层下土壤微生物数量和多样性的差异,以及结皮层土壤含水量、温度、pH 值等酶促反应条件的差异.本研究中,风沙土藓结皮对脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和蛋白酶活性的提升幅度大于黄绵土.这一方面是由于 2 种土壤的结构不同,孔隙度和热性质等物理性质、土壤酸碱度、缓冲性以及土壤养分等化学性质的差异导致风沙土藓结皮的优劣势藓种、盖度、厚度、生物量和植株密度与黄绵土不同,进而导致风沙土藓结皮向周围土壤分泌酶的能力高于黄绵土;另一方面,两种土壤的理化性质不同致使风沙土藓结皮的土壤含水量、温度、pH 值等酶

促反应条件优于黄绵土,因此风沙土藓结皮 4 种酶活性的提升幅度大于黄绵土.

本研究表明,无论是风沙土还是黄绵土,藓结皮的 4 种水解酶活性均随着土壤深度的增加而递减,藓结皮的水解酶活性呈现明显的垂直分布特性.孟杰等^[20]在该地区的研究和张国秀等^[21]在黄土丘陵区的研究也得到了相似的结论.其原因一方面是,生物结皮层能有效改善土壤环境、富集营养物质为土壤微生物提供有利生存环境,相对于土壤下层,表层的土壤微生物有更适宜的生存环境,这保证了结皮层土壤微生物的生长和繁殖,进而提高了结皮层的土壤酶活性;另一方面,土壤酶在土壤中不能单独存在,而是以物理或化学结合形式吸附在土壤有机和无机颗粒上,或与腐殖质络合.本研究表中,土壤有机质随着土壤深度的增加而逐渐降低,从而使得与其络合的土壤酶随着土壤深度的增加而降低.

3.2 土壤含水量和温度对酶活性的影响

植物、土壤动物和土壤微生物是土壤酶的主要来源^[24-25],因此土壤含水量可通过改变植物、土壤动物和土壤微生物的群落结构、多样性、生物量等影响土壤酶活性,但其影响过程较为复杂.例如:玛伊努尔·依克木等^[26]研究表明,藓结皮的土壤含水量与蔗糖酶和脲酶活性呈正相关,但与碱性磷酸酶活性不相关;Waldrop 等^[27]研究发现,土壤水解酶的活性并不随土壤湿度变化而变化.本研究中,土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和蛋白酶的活性与土壤含水量之间均存在显著负相关关系,这与玛伊努尔·依克木等^[26]的研究结果不同,其原因可能有以下三方面:1) 不同区域藓结皮发育状况的差异导致了藓结皮对土壤水分利用的差异,继而造成了不同区域藓结皮影响下土壤酶活性与土壤含水量关系的差异.2) 在干旱和半干旱地区,土壤微生物是土壤水分的

主要利用者.不同区域藓结皮发育状况的不同导致了藓结皮的土壤微生物数量、多样性和丰度的不同,进而导致了土壤微生物对土壤水分利用的不同,最终影响了土壤酶活性与土壤含水量的关系.3)研究方法不同.玛伊努尔·依克木等^[26]的研究主要针对藓结皮影响下土壤酶活性与土壤含水量的季节变化关系,而本研究主要针对藓结皮影响下土壤酶活性与土壤含水量的垂直变化关系.

除土壤水分外,土壤温度是影响酶活性的另一个重要因素.一方面,土壤温度是酶促反应的重要条件,多数酶促反应均有特定的适宜温度,温度过高或过低都会导致土壤酶的失活和钝化,因此土壤温度可通过酶动力学影响土壤酶活性^[28].另一方面,土壤温度可通过改变土壤微生物的数量和活动、植物的根系生产以及养分矿化速率等^[29-30]影响土壤酶活性.例如,徐振峰等^[31]认为,土壤酶活性随温度升高而增加;玛伊努尔·依克木等^[26]发现,土壤温度与蔗糖酶活性呈正相关,但与碱性磷酸酶和脲酶的活性不相关;陈晓丽等^[32]指出,增温会降低土壤酶活性.本研究中,土壤温度对土壤酶活性的影响因水解酶种类不同而有所差异.其中,脲酶活性与土壤温度呈显著正相关,这与陈晓丽等^[32]和玛伊努尔·依克木等^[26]的研究结果不同,这可能因为脲酶酶促反应所需的适宜温度较高,因此脲酶活性会随土壤温度的升高而增加.同时,本研究中,碱性磷酸酶和蔗糖酶的活性与土壤温度没有显著相关性,这也与玛伊努尔·依克木等^[26]的研究结果不同,其原因可能是碱性磷酸酶和蔗糖酶酶促反应所需的温度较宽泛,因此酶活性不随土壤温度的变化而发生明显变化.此外,本研究中,蛋白酶活性与土壤温度呈显著负相关,可能是因为蛋白酶自身对黄土高原的气候较为适应,温度增加反而不利于蛋白酶活动,从而降低了蛋白酶的活性.

3.3 有机质、碱解氮和速效磷含量对土壤酶活性的影响

土壤氮是藓结皮生长必需的大量矿质元素,而碱解氮可直接为藓结皮吸收利用,因此碱解氮可通过影响藓结皮的发育来影响土壤酶活性.本研究表明,碱解氮含量对4种水解酶活性有重要作用,这与徐华勤等^[33]、安韶山等^[34]和叶协锋等^[35]的研究结论一致.通径分析表明,碱解氮含量对4种土壤酶活性的提升有直接作用,而含水量、温度、有机质和速效磷含量主要通过间接途径影响4种水解酶活性的提升.但也有研究认为,土壤酶活性与土壤氮没有明

显相关性.例如,Sakorn^[36]指出,虽然脲酶和蛋白酶能促进碱解氮的转化,但三者之间无明显相关关系.这可能与不同研究区土壤氮的积累差异有关.有机质和速效磷的生物有效性可通过影响土壤微生物来影响酶活性.叶协锋等^[35]和徐华勤等^[33]研究表明,有机质和速效磷与土壤酶呈正相关,而Tian等^[37]研究认为,速效磷与有机质含量无显著相关性.本研究表明,有机质和速效磷与4种水解酶呈显著相关,且有机质和速效磷在促进酶活性提升方面有间接作用,这与叶协锋等^[35]和徐华勤等^[33]的研究结果一致,而与Tian等^[37]的研究结果不同.

参考文献

- [1] Yang H-Y (杨航宇), Liu Y-M (刘艳梅), Wang T-P (王廷璞). Effects of biological soil crusts on soil enzyme activities in desert area. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2015, **52**(3): 654-664 (in Chinese)
- [2] Wang J (王娟), Liu S-Y (刘淑英), Wang P (王平), et al. Effect of different fertilization on the dynamical changes of soil enzyme activities. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2008, **39**(2): 299-303 (in Chinese)
- [3] Gu F-X (顾峰雪), Wen Q-K (文启凯), Pan B-R (潘伯荣), et al. Research on soil enzyme activities of aeolian soil under artificial plantation in Taklimakan Desert Heartland. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2000, **20**(3): 62-66 (in Chinese)
- [4] Zhou Z-B (周智彬), Xu X-W (徐新文). Distribution characteristics of soil enzymes of Tarim Desert Highway Shelter-Forest and their relations with soil organic matter. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(5): 10-14 (in Chinese)
- [5] Zhang BC, Zhou XB, Zhang YM. Responses of microbial activities and soil physical-chemical properties to the successional process of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Xinjiang. *Journal of Arid Land*, 2015, **7**: 101-109
- [6] Liu C-Q (刘存歧), Lu J-J (陆健健), Li H-P (李贺鹏). The landward changes of soil enzyme activities in a tidal flat wetland of the Yangtze River estuary and correlations with physico-chemical factors. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(9): 3663-3669 (in Chinese)
- [7] Belnap J, Lange OL. *Biological Soil Crust: Structure, Function and Management*. Berlin: Springer, 2002: 129-130
- [8] Bu C-F (卜崇峰), Cai Q-G (蔡强国), Zhang X-C (张兴昌), et al. Mechanism and erosion effect of development of soil crust of Loess. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2009, **46**(1): 16-23 (in Chinese)
- [9] Xiao B, Hu KL, Ren TS, et al. Moss-dominated biological soil crusts significantly influence soil moisture and temperature regimes in semiarid ecosystems. *Geoderma*,

- 2016, **263**: 35–46
- [10] Bowker MA, Mau RL, Maestre FT, *et al.* Functional profiles reveal unique ecological roles of various biological soil crust organisms. *Functional Ecology*, 2011, **25**: 787–795
- [11] Su YG, Li XR, Cheng YW, *et al.* Effects of biological soil crusts on emergence of desert vascular plants in North China. *Plant Ecology*, 2007, **191**: 11–19
- [12] Wu L (吴丽), Yang H (杨红), Lan S-B (兰书斌), *et al.* Effects of drought and rehydration on photosynthetic characteristics of artificial algal crusts. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2015, **52**(5): 1173–1179 (in Chinese)
- [13] Wang Y-H (王一贺), Zhao Y-G (赵允格), Li L (李林), *et al.* Distribution patterns and spatial variability of vegetation and biocrusts in revegetated lands in different rainfall zones of the Loess Plateau region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2016, **36**(2): 377–386 (in Chinese)
- [14] Yuan F (袁方), Zhang Z-S (张振师), Zhang P (张朋), *et al.* Path analysis of influencing factors of spatial distribution of biological soil crust in small watershed of Northern Shaanxi. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2015, **22**(6): 30–35 (in Chinese)
- [15] Bu C-F (卜崇峰), Zhang P (张朋), Ye J (叶菁), *et al.* Spatial characteristics of moss-dominated soil crust and its impact factors in small watershed in wind-water erosion crisscross region, Northern Shaanxi Province. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2014, **29**(3): 490–499 (in Chinese)
- [16] Meng J (孟杰), Bu C-F (卜崇峰), Zhang X-C (张兴昌), *et al.* Developmental characteristics of biological soil crust under different vegetation types in wind-water erosion crisscross region, Northern Shaanxi Province. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2011, **26**(4): 41–46 (in Chinese)
- [17] Xiao B (肖波), Zhao Y-G (赵允格), Shao M-A (邵明安). Artificial cultivation of biological soil crust and its effects on soil and water conservation in wind-water erosion crisscross region of Loess Plateau. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2008, **16**(1): 28–33 (in Chinese)
- [18] Xiao B (肖波), Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥), *et al.* Soil nutrients accumulation and their loss risk under effects of biological soil crust in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(5): 1019–1026 (in Chinese)
- [19] Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥), Wang Q-J (王全九), *et al.* Physical and chemical properties of soil bio-crust on rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(8): 1429–1434 (in Chinese)
- [20] Meng J (孟杰), Bu C-F (卜崇峰), Zhao Y-J (赵玉娇), *et al.* Effects of biological soil crust on soil enzyme activities and nutrients content in wind-water erosion crisscross region, Northern Shaanxi Province. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2010, **25**(11): 1864–1874 (in Chinese)
- [21] Zhang G-X (张国秀), Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥), *et al.* Impacts of biological soil crust on availability of phosphorus and phosphatase activity in hilly regions of the Loess Plateau. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(3): 621–628 (in Chinese)
- [22] Guan S-Y (关松荫). *Soil Enzymes and Its Research Methods*. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 19–20 (in Chinese)
- [23] Xu J (徐杰), Ning Y-Y (宁远英). Impact of microbial crust on soil enzyme activities in the process of grazing disturbance natural recovery in Horqin Sandland. *Journal of Inner Mongolia Normal University* (内蒙古师范大学学报), 2010, **39**(3): 302–307 (in Chinese)
- [24] Aon MA, Colaneri AC. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil. *Applied Soil Ecology*, 2001, **18**: 255–270
- [25] Taylor JP, Wilson B, Mills MS, *et al.* Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**: 387–401
- [26] Yikim M (玛伊努尔·依克木), Zhang B-C (张丙昌), Sulayman M (买买提明·苏来曼). Seasonal variations of microbial biomass and soil enzyme activity in biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2013, **33**(4): 1091–1097 (in Chinese)
- [27] Waldrop MP, Firestone MK. Altered utilization patterns of young and old soil C by microorganisms caused by temperature shifts and N additions. *Biogeochemistry*, 2004, **67**: 235–248
- [28] Kang H, Freeman C. Phosphatase and arylsulphatase activities in wetland soils: Annual variation and controlling factors. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**: 449–454
- [29] Tscherko D, Kandeler E, Jones TH. Effect of temperature on below-ground N-dynamics in a weedy model ecosystem at ambient and elevated atmospheric CO₂ levels. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**: 491–501
- [30] Majdi H. Interactive effects of soil warming and fertilization on root production, mortality, and longevity in a Norway spruce stand in Northern Sweden. *Global Change Biology*, 2004, **10**: 182–188
- [31] Xu Z-F (徐振锋), Tang Z (唐正), Wan C (万川), *et al.* Effects of simulated warming on soil enzyme activities in two subalpine coniferous forests in west Sichuan. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(11): 2727–2733 (in Chinese)
- [32] Chen X-L (陈晓丽), Wang G-X (王根绪), Yang Y (杨燕), *et al.* Response of soil surface enzyme activities to short-term warming and litter decomposition in a mountain forest. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(21): 7071–7079 (in Chinese)

- [33] Xu H-Q (徐华勤), Zhang J-E (章家恩), Feng L-F (冯丽芳), *et al.* Effects of typical soil types and land use patterns on soil enzyme activities in Guangdong Province. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(6): 1464–1471 (in Chinese)
- [34] An S-S (安韶山), Huang Y-M (黄懿梅), Li B-C (李璧成), *et al.* The relation between soil enzyme activities and soil properties of different land use way in loess hilly region by canonical correlation analysis. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2005, **11**(5): 704–709 (in Chinese)
- [35] Ye X-F (叶协锋), Yang C (杨超), Li Z (李正), *et al.* Effects of green manure in corporation on soil enzyme activities and fertility in tobacco-planting soils. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2013, **19**(2): 445–454 (in Chinese)
- [36] Sakorn PP. Urease activity and fertility status of some lowland rice soils in the central plain. *Thai Journal of Agricultural Science*, 1987, **20**: 173–186
- [37] Tian L, Dell E, Shi W. Chemical composition of dissolved organic matter in agroecosystems: Correlations with soil enzyme activity and carbon and nitrogen mineralization. *Applied Soil Ecology*, 2010, **46**: 426–435

作者简介 王彦峰, 男, 1988 年生, 硕士研究生. 主要从事干旱区生态恢复研究. E-mail: skriten@163.com

责任编辑 孙菊

封面说明

封面图片由中国农业大学资源与环境学院肖波于 2015 年 8 月在陕西省神木市六道沟流域拍摄, 为黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮景观. 该区约 17.8 万 km², 位于 35°25′—40°38′ N, 103°00′—113°53′ E, 属半干旱草原地带, 年均降水量 250~450 mm. 由于气候、地形以及人为因素的综合作用, 区内植被稀疏退化、水土流失剧烈、土地沙化严重; 近年来营造了大面积人工乔灌林, 但因干旱缺水大多生长不良, 成为只见树干、不见树叶的“小老树”. 受益于人工林的防风固土作用, 稀疏人工林下逐渐发育了以苔藓为主要成分的生物结皮(干旱环境下由细菌、真菌、苔藓、藻类和地衣等微生物与表层土壤相互作用形成的复合物), 盖度达 50%~90%. 生物结皮可对土壤水分循环、养分循环、热量平衡、碳氮固持、水土流失、生物多样性以及植被恢复等过程产生重要影响, 是地表植被的关键组成部分. 生长不良的稀疏人工林和林下发育良好的藓结皮共同构成了黄土高原水蚀风蚀交错区的地表植被景观. 图片中为树龄约 30 年但生长不良的小叶杨, 地表为发育约 20 年的藓结皮.