

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

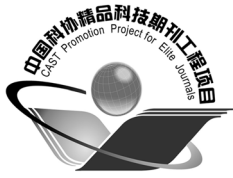


中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

第52卷 第3期

Vol.52 No.3



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 3 期 2015 年 5 月

目次

综述与评论

- 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究····· 蔡祖聪 张金波 黄新琦等 (469)
- 土壤裂隙及其优先流研究进展····· 张中彬 彭新华 (477)

研究论文

- 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征····· 温磊磊 郑粉莉 沈海鸥等 (489)
- 青藏高原永冻土活动层厚度预测指标集的建立及制图····· 陈吉科 赵玉国 赵林等 (499)
- 贡嘎山海螺沟冰川退缩区土壤序列矿物组成变化····· 杨子江 邴海健 周俊等 (507)
- 成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究····· 廖丹 于东升 赵永存等 (517)
- 河北省土壤温度与干湿状况的时空变化特征····· 曹祥会 雷秋良 龙怀玉等 (528)
- 喀斯特小流域土壤饱和导水率垂直分布特征····· 付同刚 陈洪松 王克林 (538)
- 大沽河中游地区土壤水与浅层地下水转化关系研究····· 杨玉峥 林青 王松禄等 (547)
- 化学转化法测定水体中硝酸盐的氮氧同位素比值····· 王曦 曹亚澄 韩勇等 (558)
- ¹³C脉冲标记定量研究施氮量对光合碳在水稻-土壤系统中分布的影响····· 刘萍 江春玉 李忠佩 (567)
- 垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积和作物产量的影响····· 慈恩 王莲阁 丁长欢等 (576)
- 施入¹⁵N标记氮肥在长期不同培肥土壤的残留及其利用····· 赵伟 梁斌 周建斌 (587)
- 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响····· 鲁艳红 廖育林 周兴等 (597)
- 长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响····· 冀建华 侯红乾 刘益仁等 (607)
- 高粱分泌硝化抑制物对羟基苯丙酸与质子泵的关系研究····· 周金泉 张明超 魏志军等 (620)
- 钝化剂-锌肥降低烟草镉含量长期效果研究····· 曹晨亮 王卫 马义兵等 (628)
- 钾肥和腐殖酸互作对烤烟有机钾盐指数的影响····· 郑东方 许嘉阳 许自成等 (637)
- 桉树取代马尾松对土壤养分和酶活性的影响····· 张凯 郑华 陈法霖等 (646)
- 荒漠区生物土壤结皮对土壤酶活性的影响····· 杨航宇 刘艳梅 王廷璞 (654)
- 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响····· 矫丽娜 李志洪 殷程程等 (665)
- 链霉菌JD211对水稻幼苗促生作用及土壤细菌多样性的影响····· 王世强 魏赛金 杨陶陶等 (673)

研究简报

- 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价····· 贡璐 张雪妮 冉启洋 (682)
- 铁膜对水稻根表面电化学性质和氮磷钾短期吸收的影响····· 郑芸芸 李忠意 李九玉等 (690)
- 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化····· 夏昕 石坤 黄欠如等 (697)
- 滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征····· 王合云 李红丽 董智等 (706)

信息

- 2015国际土壤年····· (696)

封面图片：稻田裂隙二维与三维图像 (由张中彬提供)

DOI: 10.11766/trxb201405290256

荒漠区生物土壤结皮对土壤酶活性的影响*

杨航宇¹ 刘艳梅^{2, 3†} 王廷璞²

(1 甘肃林业职业技术学院, 甘肃天水 741020)

(2 天水师范学院生命科学与化学学院, 甘肃天水 741001)

(3 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠试验研究站, 兰州 730000)

摘要 在干旱的沙漠生态系统中, 生物土壤结皮对于沙丘的固定和土壤生物的维持起着相当重要的作用。土壤酶活性能敏感地指示土壤的恢复程度, 是衡量沙区生态恢复与健康的重要生物学属性, 而目前关于生物土壤结皮与土壤酶活性的关系研究很少。为探明生物土壤结皮对土壤酶活性的影响, 以腾格里沙漠东南缘的人工植被固沙区生物土壤结皮覆盖的沙丘土壤为研究对象, 根据固沙时间的不同将样地分为4个不同的区进行采样(57、49、32和22 a 固沙区), 以流沙区(0 a)和红卫天然植被区(> 100 a)为对照。研究表明: 人工植被固沙区的藻-地衣结皮和藓类结皮均可显著提高土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性($p < 0.05$); 结皮类型显著影响土壤酶的活性, 发育晚期的藓类结皮下土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性显著高于发育早期的藻-地衣结皮下土壤酶的活性($p < 0.05$); 固沙年限显著影响土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性, 且与这三种土壤酶活性均存在显著的线性正相关关系($p < 0.05$); 目前, 生物土壤结皮可显著提高0~20 cm 土层碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性($p < 0.05$), 且这种影响随土层的增加而减弱。而且, 生物土壤结皮下土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性表现明显的季节变化, 表现为夏季>秋季>春季和冬季。腾格里沙漠东南缘的人工植被固沙区生物土壤结皮的存在与演替提高了土壤酶的活性, 生物土壤结皮有利于该区土壤及其相应生态系统的恢复。

关键词 生物土壤结皮; 土壤酶活性; 结皮类型; 固沙年限; 土壤深度; 季节变化

中图分类号 Q938.1 **文献标识码** A

生物土壤结皮(Biological soil crusts, BSCs)是由隐花植物如绿藻、硅藻、苔藓和土壤微生物, 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^[1-2]。在大多数干旱半干旱的荒漠地区受非生物因子的调控和胁迫, 尤其是水分的匮乏, 地表不可能支撑大面积相对均一和连续分布的维管束植物群落, 植物群落呈现斑块状分布格局, 而这些植物群落斑块状的分布为生物土壤结皮的拓殖和覆盖提供了适宜的空间和生态位, 使生物土壤结皮广泛分布于干旱半干旱的荒漠地区^[1, 3]。生物土壤结皮作为荒漠生

态系统的生态系统工程师, 对于固定沙面、调节土壤温湿度、促进土壤发育和植被恢复、提高土壤动物的多样性、促进沙地的物质循环和能量流动及干旱半干旱地区的生态修复等均具有重要意义^[4-5]。因而, 关于生物土壤结皮的研究已成为干旱半干旱区地表过程地学和生物学交叉研究的前沿领域之一, 也是实现对荒漠景观进行生态系统管理和可持续发展的一个重要前提。

土壤酶是土壤中最活跃的有机成分之一, 主要来自植物、土壤动物以及土壤微生物, 其变化可敏感反映土壤肥力的变化及健康程度^[6], 是判别退化生态系统修复程度的重要指标之一。在干旱半干

*国家自然科学基金项目(41261014)和甘肃省高等学校项目(2013B-113)资助

†通讯作者, E-mail: lym-781118@163.com

作者简介: 杨航宇(1978—), 男, 甘肃陇南人, 硕士, 副教授, 主要从事干旱区土壤生物的研究

收稿日期: 2014-05-29; 收到修改稿日期: 2014-07-15

早的荒漠地区，由于水分的制约，植物和土壤动物的生长受到限制，因而土壤微生物对土壤酶的形成有着巨大的贡献，影响土壤酶的活性的因素必然影响到土壤微生物活性，因此，可用土壤酶活性评价土壤微生物总体活性，进而表征某些因素对土壤质量及相应生态系统的影响^[7-8]。目前关于生物土壤结皮的报道已有不少，这些研究主要集中在对其功能和作用的研究上，具体表现在生物土壤结皮对土壤稳定性和肥力^[9]、土壤理化性质^[10]、土壤生态水文过程^[2]、维管植物种子的萌发、定居和生长^[11]及土壤动物多样性的影响^[12]。关于生物土壤结皮与土壤酶活性之间的研究也已引起了人们的关注，Zhang等^[13]的报道显示生物土壤结皮的存在可提高土壤脲酶、脱氢酶、过氧化氢酶和蔗糖酶的活性。边丹丹^[14]和阳贵德^[15]的研究分别表明生物土壤结皮能显著提高黄土丘陵区 and 铜陵铜尾矿的土壤脲酶、脱氢酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶的活性。Miralles等^[16]发现西班牙塔韦纳斯沙漠的生物土壤结皮下的几种土壤水解酶活性高于无结皮的土壤，且发育晚期的结皮下土壤水解酶活性高于发育早期的结皮。Wu^[17]和Zhao^[18]等的报道显示结皮类型影响土壤固氮酶的活性。但在结皮广泛分

布的腾格里沙漠关于生物土壤结皮如何影响土壤酶活性，尤其是这种影响的时空动态变化及结皮的发育阶段与土壤酶活性的关系还鲜见报道。为此，在腾格里沙漠东南缘的植被固沙区研究生物土壤结皮与土壤酶活性的关系来指示生物土壤结皮对荒漠区土壤质量的影响，进而揭示生物土壤结皮在荒漠生态系统重建中的作用，为干旱半干旱区退化生态系统的恢复和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

中国科学院沙坡头沙漠试验研究站地处宁夏中卫市境内，位于腾格里沙漠东南缘（37° 32' N，105° 02' E），是荒漠化草原向草原化荒漠的过渡地带，也是沙漠与绿洲的过渡区。该区气候和植被固沙防护体系的具体情况详见前文^[19]。本研究所选样地位于铁路北侧1956年、1964年、1981年和1991年建立的人工植被固沙区（固沙年限分别为57，49，32和22 a），以流沙区（0 a）和红卫天然植被区（> 100 a）为对照。该区样地和对照区土壤理化性状的详细描述见表1^[19-20]。

表1 人工植被固沙区、天然植被区和流沙区表层土壤（0~20 cm）的理化性状

Table 1 Physico-chemical properties of the topsoil (0~20 cm) in artificially revegetated sand areas, natural vegetation areas and mobile sand dunes

固沙年限 Years after revegetation (a)	粒径分布 Soil particle distribution (%)			有机碳 Organic carbon (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	pH	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	结皮及亚土层厚度 The thickness of soil crust and subsoil (cm)
	砂粒 Sand 1~0.05 mm	粉粒 Silt 0.05~0.002 mm	黏粒 Clay <0.002 mm					
>100	13.54e	72.00a	14.45a	20.54a	2.07a	8.28a	1.13d	4.9a
57	66.40d	22.60b	11.01b	7.74b	1.02b	7.99b	1.44c	2.5b
49	66.28d	24.79b	6.93c	7.59b	0.74c	7.95b	1.47b	2.2c
32	71.54e	23.59b	4.87d	4.32c	0.52d	7.90b	1.50a	1.4d
22	78.87b	15.60c	4.45d	1.65d	0.22e	7.82b	1.52a	0.7e
0	99.67a	0.12d	0.21e	0.37e	0.17f	7.42c	1.53a	0f

1.2 试验方法

2013年7月上旬，以57、49、32和22 a建立的人工植被固沙区生物土壤结皮覆盖的沙丘土壤为研究对象，以流沙区和沙坡头地区的红卫天然植被区

为对照，采集各研究区藻-地衣结皮和藓类结皮下0~10、10~20和20~30 cm的土壤样品，共采集72个结皮下土样和9个流沙对照，分别测定土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性；为明确生物

土壤结皮下土壤酶的季节变化,本研究选取1956年的人工植被固沙区和沙坡头地区的红卫天然植被区为研究区域,分别于2013年4月、7月、10月和2014年1月采集这两个地区藻-地衣结皮和藓类结皮下0~10、10~20和20~30 cm的土壤样品,4次共采集土样144个,分别测定土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性的季节变化。本研究具体的采样方法见前文^[19]。

土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性依次采用对硝基酚磷酸钠比色法^[21]、福林酚比色法^[21]和3,5-二硝基水杨酸比色法^[22]测定。

1.3 数据分析

数据经Excel整理后,采用SPSS 16.0软件进行Duncan多重比较,显著性水平均为0.05。方差分析用于分析生物土壤结皮、结皮类型、固沙年限和季节变化对土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性的影响,Pearson相关性分析用于分析土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性与固沙年限之间的相关关系。

2 结果

2.1 生物土壤结皮对土壤酶活性的影响

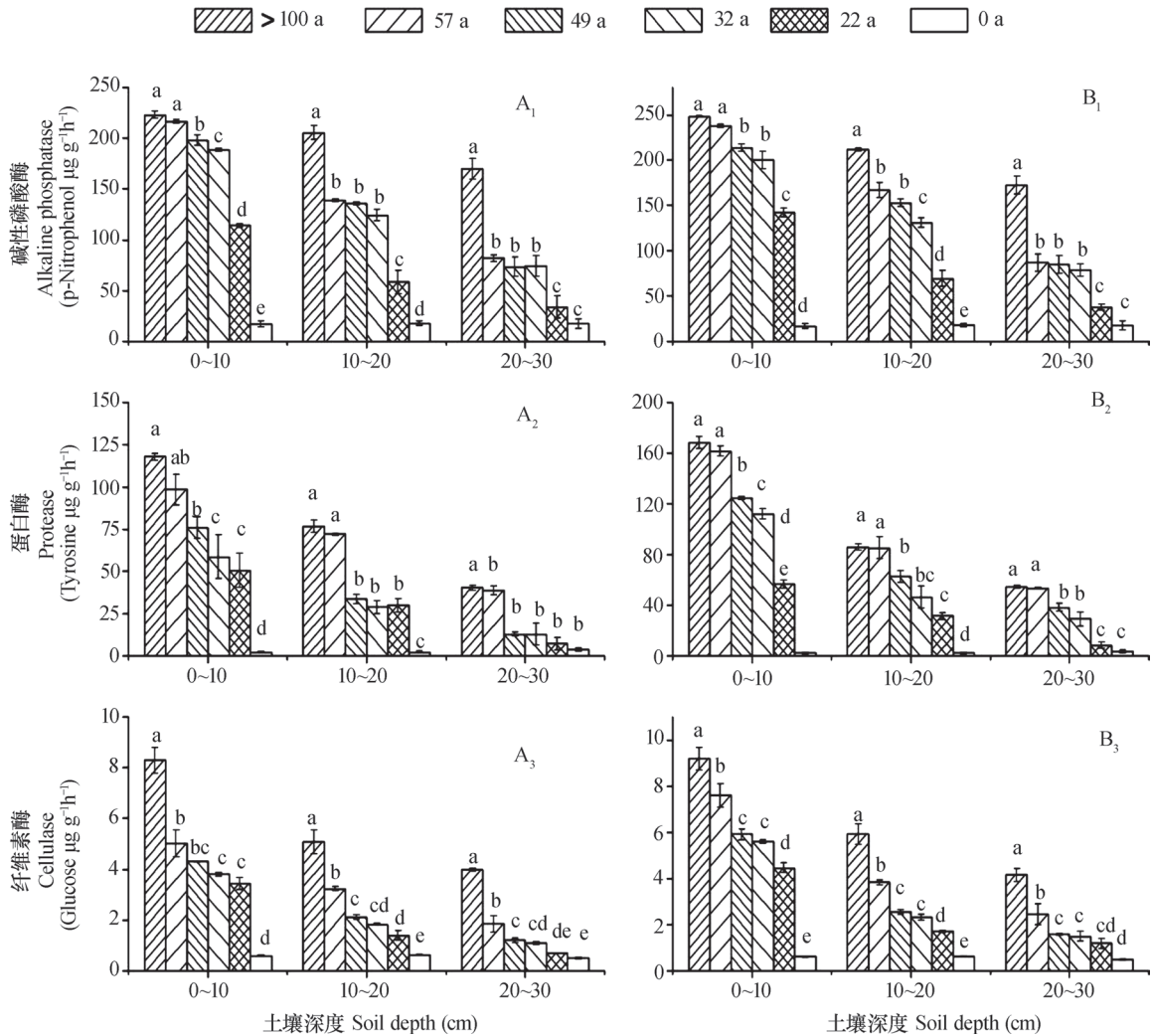
由图1A₁和图1B₁可见,藻-地衣结皮和藓类结皮下0~10 cm土层碱性磷酸酶活性的变化为:天然植被区藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤碱性磷酸酶活性最高,57 a和49 a人工植被固沙区次之,32 a和22 a人工植被固沙区再次之,流沙区最低,且天然植被区和人工植被固沙区藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤碱性磷酸酶活性均与流沙区差异显著($p < 0.05$)。藻-地衣结皮和藓类结皮下10~20 cm土层碱性磷酸酶活性的变化也是如此,天然植被区 $> 57 a > 49 a > 32 a > 22 a >$ 流沙区,且各固沙区均与流沙区差异显著($p < 0.05$)。在20~30 cm土层,天然植被区和人工植被固沙区的藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤碱性磷酸酶活性高于流沙对照,除22 a固沙区与流沙对照差异不显著外,其他均与流沙对照之间差异显著($p < 0.05$)。可见,藻-地衣结皮和藓类结皮均可显著提高0~20 cm土层碱性磷酸酶活性($p < 0.05$),但这种影响随土层的增加而逐渐减弱。

由图1A₂和图1B₂可见,藻-地衣结皮和藓类结皮下0~10 cm土层蛋白酶活性的变化为:天然植

被区藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤蛋白酶活性最高,57 a和49 a人工植被固沙区次之,32 a和22 a人工植被固沙区再次之,流沙区最低,且天然植被区和人工植被固沙区藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤蛋白酶活性均与流沙区差异显著($p < 0.05$)。藻-地衣结皮和藓类结皮下10~20 cm土层蛋白酶活性的变化也是如此,天然植被区 $> 57 a > 49 a > 32 a > 22 a >$ 流沙区,且各固沙区均与流沙区差异显著($p < 0.05$)。在20~30 cm土层,天然植被区和人工植被固沙区藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤蛋白酶活性虽高于流沙区,但多数与流沙区差异不显著。可见,藻-地衣结皮和藓类结皮均可显著提高0~20 cm土层蛋白酶活性($p < 0.05$),但这种影响随土层的增加而逐渐减弱。

由图1A₃和图1B₃可见,藻-地衣结皮和藓类结皮下0~10 cm土层纤维素酶活性的变化为:天然植被区藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤纤维素酶活性最高,57 a和49 a人工植被固沙区次之,32 a和22 a人工植被固沙区再次之,流沙区最低,且天然植被区和人工植被固沙区的藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤纤维素酶活性均与流沙区差异显著($p < 0.05$)。藻-地衣结皮和藓类结皮下10~20 cm土层纤维素酶活性的变化也是如此,天然植被区 $> 57 a > 49 a > 32 a > 22 a >$ 流沙区,且各固沙区均与流沙区差异显著($p < 0.05$)。在20~30 cm土层,天然植被区和人工植被固沙区藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤纤维素酶活性虽然高于流沙区,但大多数与流沙区差异不显著。可见,藻-地衣结皮和藓类结皮均可显著提高0~20 cm土层纤维素酶活性($p < 0.05$),但这种影响随土层的增加而逐渐减弱。

表2统计分析结果显示,结皮类型显著影响土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性,藓类结皮下土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性显著高于藻-地衣结皮下土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性($p < 0.05$)。固沙年限也显著影响土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性,且与土壤深度之间交互作用显著;而且,固沙年限与藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性均存在显著的线性正相关关系,它与藻-地衣结皮下土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性的相关系数 r 分别为0.957 2、0.957 2和0.977 9($p < 0.05$),与藓类结皮下土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性的相关系数 r 分别为0.964 6、



注：误差线为标准误。下同 Notes: Error bars show standard error. The same below

图1 藻-地衣结皮 (A₁, A₂, A₃) 和藓类结皮 (B₁, B₂, B₃) 对土壤酶活性的影响

Fig.1 Effects of cyanobacteria-lichen (A₁, A₂ and A₃) and moss crusts (B₁, B₂ and B₃) on soil enzyme activities

0.985 3和0.968 0 ($p < 0.05$), 这表明固沙年限越长, 结皮下土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性越高。同时, 生物土壤结皮下土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性随土壤深度的变化而有所差异, 它们随着土壤深度的增加而明显减小。

2.2 生物土壤结皮下土壤酶活性的季节动态

由图2A和图2B可见, 人工植被固沙区的藻-地衣结皮和藓类结皮下0~10 cm 土层碱性磷酸酶活性的季节变化为: 夏季藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤碱性磷酸酶活性最高, 分别为216.6和237.4 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; 秋季次之, 分别为171.6和220.3 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; 冬季再次之, 分别为146.1 和165.0 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; 春季最低, 分别为82.52和86.94 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。人工植被固沙区藻-地衣结皮和藓类结皮下10~20和

20~30 cm土层碱性磷酸酶活性的季节变化趋势亦是如此, 夏季>秋季>冬季>春季。由图2C和图2D可见, 人工植被固沙区藻-地衣结皮和藓类结皮下0~10 cm土层蛋白酶活性的季节变化规律为: 夏季藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤蛋白酶的活性最高, 分别为98.33和161.5 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; 秋季次之, 分别为60.31和83.89 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; 春季再次之, 分别为54.11和66.05 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; 冬季最低, 分别为40.82和44.04 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; 人工植被固沙区藻-地衣结皮和藓类结皮下10~20和20~30 cm土层蛋白酶活性的季节变化趋势亦是夏季>秋季>春季>冬季。由图2E和图2F可见, 人工植被固沙区藻-地衣结皮和藓类结皮下0~10 cm 土层纤维素酶活性的季节变化为: 夏季藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤纤维

表2 藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤酶活性的统计分析

Table 2 Statistical analysis of activities of the soil enzymes under cyanobacteria-lichen and moss crusts

土壤酶 Soil enzyme	变异来源 Source of variation	平方和 Type III Sum of Squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F值 F value
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	结皮类型	3 209.7	1	3 209.7***	26.8
	土壤深度	147 905.2	2	73 952.6***	617.2
	固沙年限	388 975.5	5	77 795.1***	649.3
	结皮类型 × 土壤深度	685.7	2	342.9	2.9
	结皮类型 × 固沙年限	915.1	5	183.0	1.5
	土壤深度 × 固沙年限	42 690.6	10	4 269.1***	35.6
	结皮类型 × 土壤深度 × 固沙年限	704.9	10	70.5	0.6
蛋白酶 Protease	结皮类型	11 060.4	1	11 060.4***	163.1
	土壤深度	67 703.5	2	33 851.8***	499.1
	固沙年限	99 043.9	5	19 808.8***	292.1
	结皮类型 × 土壤深度	3 777.4	2	1 888.7***	27.8
	结皮类型 × 固沙年限	4 992.6	5	998.5***	14.7
	土壤深度 × 固沙年限	19 127.1	10	1 912.7***	28.2
	结皮类型 × 土壤深度 × 固沙年限	1 979.3	10	197.9**	2.9
纤维素酶 Cellulase	结皮类型	13.5	1	13.5***	74.0
	土壤深度	193.9	2	96.9***	533.3
	固沙年限	311.7	5	62.3***	343.0
	结皮类型 × 土壤深度	5.3	2	2.6***	14.5
	结皮类型 × 固沙年限	3.9	5	0.8**	4.3
	土壤深度 × 固沙年限	42.1	10	4.2***	23.2
	结皮类型 × 土壤深度 × 固沙年限	3.0	10	0.3	1.6

** , $p < 0.01$; *** , $p < 0.001$

素酶活性最高, 分别为 5.19 和 $7.60 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; 秋季次之, 分别为 4.80 和 $5.28 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; 春季再次之, 分别为 3.54 和 $4.82 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; 冬季最低, 分别为 3.49 和 $4.59 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。人工植被固沙区藻-地衣结皮和藓类结皮下 $10 \sim 20$ 和 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层纤维素酶活性的季节变化趋势亦是夏季>秋季>春季>冬季。因此, 人工植被固沙区藻-地衣结皮和藓类结皮下 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土层, 碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性存在明显的季节变化, 均表现为夏季>秋季>春季和冬季。藻-地衣结皮和藓类结皮下 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土

层碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性的季节变化明显, 随着土层的加深这种季节变化有所减弱。

由图3A和图3B可见, 天然植被区的藻-地衣结皮和藓类结皮下 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层碱性磷酸酶活性的季节变化为: 夏季藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤碱性磷酸酶活性最高, 分别为 222.9 和 $247.9 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; 秋季次之, 分别为 186.4 和 $231.3 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; 冬季再次之, 分别为 163.6 和 $197.5 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; 春季最低, 分别为 86.41 和 $87.74 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。藻-地衣结皮和藓类结皮下 $10 \sim 20$ 和 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层碱性磷

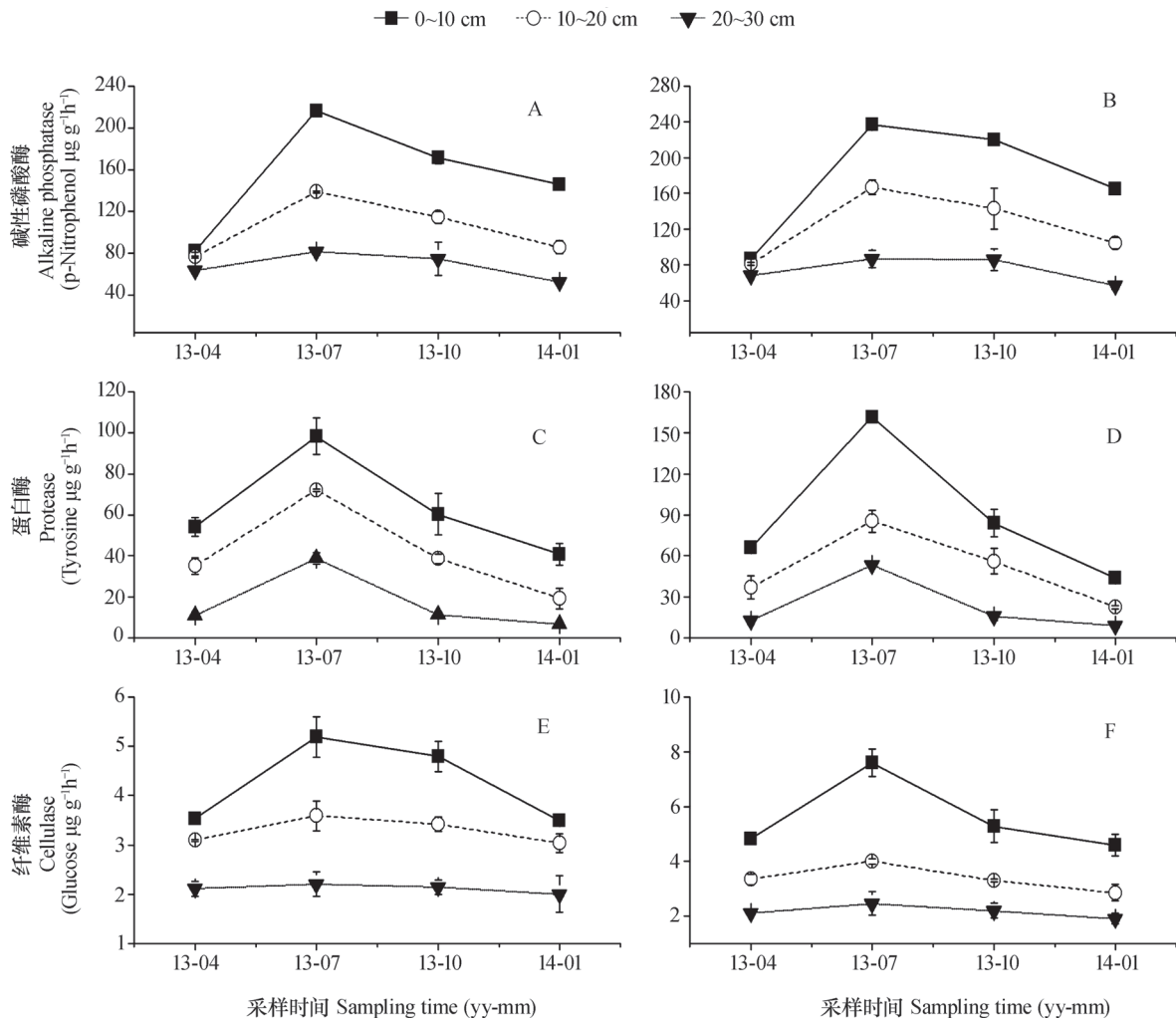


图2 人工植被固沙区藻-地衣结皮 (A, C, E) 和藓类结皮 (B, D, F) 下土壤酶活性的季节变化

Fig.2 Seasonal variations of activities of the soil enzymes under cyanobacteria-lichen (A, C and E) and moss crusts (B, D and F) in the artificially revegetated areas

酸酶活性的季节变化趋势亦是如此, 夏季>秋季>冬季>春季。由图3C和图3D可见, 天然植被区藻-地衣结皮和藓类结皮下0~10 cm土层蛋白酶活性的季节变化规律为: 夏季藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤蛋白酶的活性最高, 分别为117.8和168.2 $\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$; 秋季次之, 分别为62.47和91.37 $\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$; 春季再次之, 分别为56.01和82.58 $\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$; 冬季最低, 分别为44.81和49.56 $\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$; 藻-地衣结皮和藓类结皮下10~20和20~30 cm土层蛋白酶活性的季节变化趋势亦是夏季>秋季>春季>冬季。由图3E和图3F可见, 天然植被区的藻-地衣结皮和藓类结皮下0~10 cm土层纤维素酶活性的季节变化为: 夏季藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤纤

维素酶活性最高, 分别为8.29和9.19 $\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$; 秋季次之, 分别为6.29和6.87 $\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$; 春季再次之, 分别为5.04和5.95 $\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$; 冬季最低, 分别为4.96和5.45 $\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$ 。藻-地衣结皮和藓类结皮下10~20和20~30 cm土层纤维素酶活性的季节变化趋势亦是夏季>秋季>春季>冬季。因此, 天然植被区的藻-地衣结皮和藓类结皮下0~30 cm土层, 碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性存在明显的季节变化, 均表现为夏季>秋季>春季和冬季。藻-地衣结皮和藓类结皮下0~10 cm土层碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性的季节变化明显, 随着土层的加深这种季节变化有所减弱。

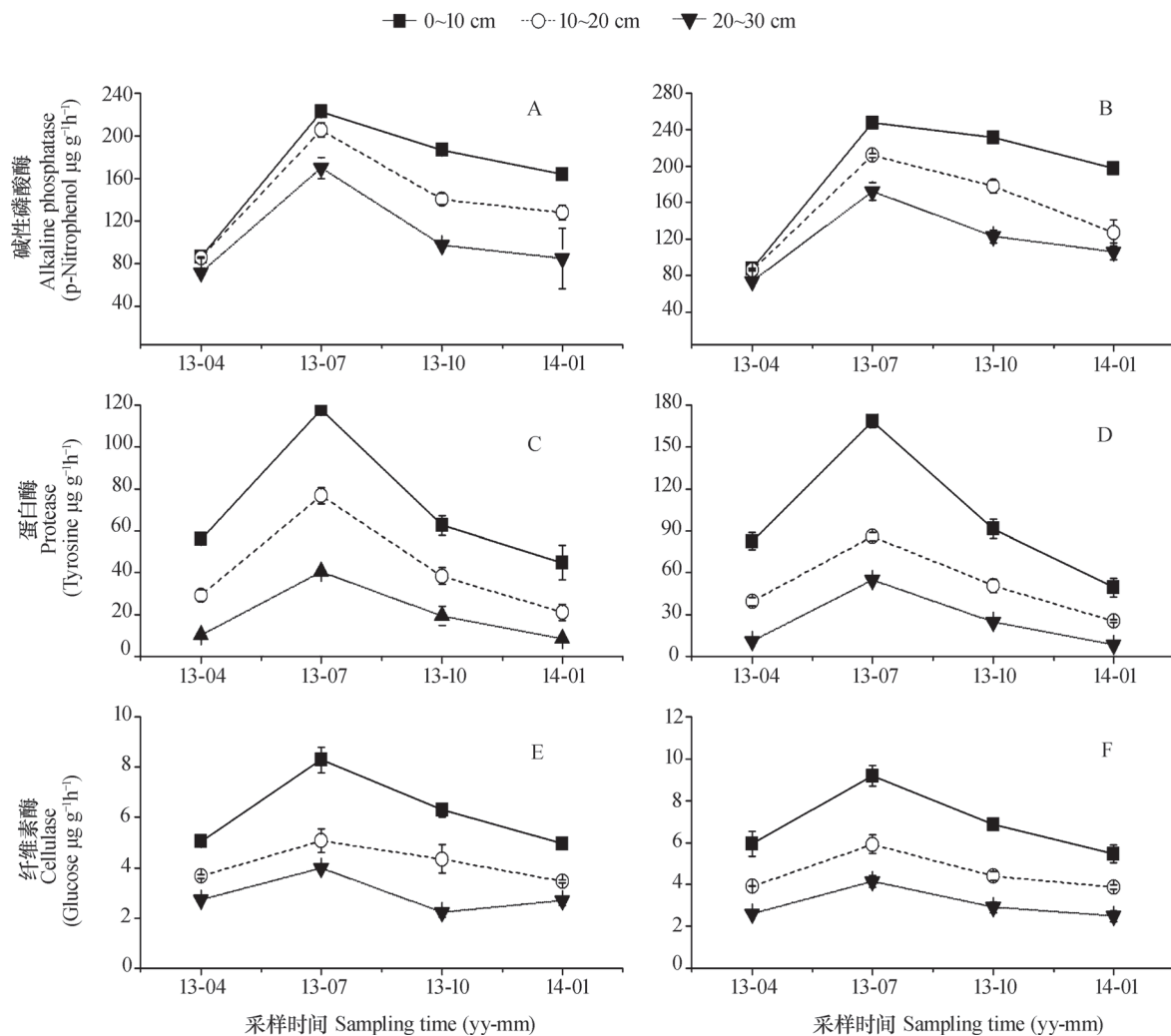


图3 天然植被区藻-地衣结皮 (A, C, E) 和藓类结皮 (B, D, F) 下土壤酶活性的季节变化

Fig.3 Seasonal variations of activities of the soil enzymes under cyanobacteria-lichen (A, C and E) and moss crusts (B, D and F) of natural vegetation areas

3 讨论

腾格里沙漠人工植被固沙区的藻-地衣和藓类结皮均能显著提高表层土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性, 与无结皮的流沙对照差异显著 ($p < 0.05$), 这说明生物土壤结皮明显提高了土壤微生物活性。生物土壤结皮不仅为土壤微生物提供重要的食物来源的同时, 也提供了适宜的生存环境^[23-24], 这些生存条件的改善促进了土壤微生物生长与繁殖, 由于在干旱半干旱的荒漠地区土壤微生物是土壤酶的形成重要因素^[7-8], 因而, 土壤微生物的生长与繁殖保证了土壤酶活性的提高。阳贵德^[15]和陈政^[25]等的研究也得到类似的结果, 即铜陵铜尾矿上生物土壤结皮的存在提高了土壤酶的

活性。我们的研究发现, 结皮类型明显影响土壤酶的活性, 发育晚期的藓类结皮下土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性高于发育早期的藻-地衣结皮下土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性。Miralles等^[16]也发现了类似的结果, 西班牙塔韦纳斯沙漠的发育晚期的结皮下的几种土壤水解酶活性高于发育早期的结皮。这些研究表明, 相对于发育早期的藻-地衣结皮而言, 发育晚期的藓类结皮更有利于土壤微生物的生存, 也就更有利于土壤酶活性的增加。相对于藻-地衣结皮, 在干旱半干旱的荒漠地区藓类结皮为土壤微生物能够提供更多、更丰富的食物来源、更适宜的土壤温度、更高的土壤湿度和有机质含量和更稳定的食物网结构^[26], 这些藓类结皮下相对优越的生存条件保证

了更高的土壤微生物数量和活性，也就有利于土壤酶活性的增加。

腾格里沙漠植被固沙区，其固沙年限越长，结皮层越厚，土壤微生物量越大，土壤酶活性越高。前人的研究也发现了类似的规律：固沙年限越长，结皮层越厚，土壤微生物量越大^[19, 27]。应该指出的是，虽然人工植被固沙区土壤酶的活性显著高于无结皮的流沙区，但与天然植被区相比，人工植被固沙区土壤酶的活性明显低于天然植被区，这指示了人工植被固沙区的生物土壤结皮已经改善了土壤质量，有利于退化荒漠生态系统的恢复，但是土壤质量及相应退化生态系统的恢复可能需要更长的时间。我们认为，随着固沙年限的增加，土壤质量及相应退化生态系统的恢复效果将更显著。

藻-地衣结皮和藓类结皮可显著增加0~20 cm 土层碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性，且呈现明显的垂直分布特性，即随着土层的加深，酶活性逐渐减弱，这与大多数关于土壤酶垂直分布的研究结果一致^[28]。其主要的原因可能是：（1）相对于下层土壤微生物而言，表层土壤微生物很容易从生物土壤结皮获得充足营养，充分保证了微生物生长与繁殖^[19]，土壤酶的活性也相应提高；（2）生物土壤结皮的存在还改善了表层土壤的理化性质，这包括有机质含量的增加、土壤养分含量和有效性、土壤持水量的增加、土壤稳定性的增加、土壤pH的改变等^[20]，这些均为微生物的生存提供了适宜的条件，从而有利于增加土壤酶的活性。从固沙年限和土壤深度的交互作用来分析，虽然生物土壤结皮当前仅仅明显增加了表层土壤酶的活性，其指示了生物土壤结皮已经提高了表层土壤的质量，对于20 cm以下的土壤质量还没有明显改善，但是随着固沙年限的增加，生物土壤结皮下20 cm以下的土壤质量也会得到改善。

腾格里沙漠植被固沙区藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤碱性磷酸酶的活性季节变化，表现为夏季>秋季>冬季>春季；土壤蛋白酶和纤维素酶的活性，表现为夏季>秋季>春季>冬季。可见，不同的酶类，其季节变化规律不完全相同，这与许多的研究结果相一致^[29]。土壤微生物及地面植被覆盖等是土壤酶活性的控制因素，土壤酶活性的季节动态是对这些因子的综合响应。在季节变化过程中，随着季节的变化，光照、温度、水分等对土壤微生物和植被生长有重要影响的自然条件也随之变化，

这些变化也直接和间接地影响着土壤酶活性。藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤酶的活性最高值均出现在夏季，这一结果与许多国内外的研究结果是一致的^[29-31]。夏季温度高，土壤湿度大，结皮生长旺盛，土壤代谢速率快，微生物数量和活性增加，土壤酶活性相应增加。而秋季，虽然土壤含水量较大，但土壤温度偏低，影响微生物的生长和繁殖，微生物代谢速率变慢，导致土壤酶活性出现下降的趋势。冬季和春季干旱少雨，温度低，结皮生长减弱，微生物的生长和繁殖更慢，微生物代谢速率也变的更慢，土壤酶活性明显降低。

4 结 论

研究表明，腾格里沙漠植被固沙区的生物土壤结皮可显著提高土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性，这指示了生物土壤结皮可提高土壤微生物的活性，有利于荒漠区土壤的修复和改良；结皮类型显著影响土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性，发育晚期的藓类结皮下这3种土壤酶的活性明显高于发育早期的藻-地衣结皮。土壤酶的活性也因固沙年限的不同而不同，土壤酶的活性随固沙年限的增长而增加；此外，生物土壤结皮仅仅显著提高0~20 cm土层碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性（ $p < 0.05$ ），这指示了生物土壤结皮已经明显改善表层土壤的质量，但随着固沙年限的增加，生物土壤结皮下20 cm以下的土壤质量也会得到改善。生物土壤结皮下土壤碱性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶的活性呈现明显的季节变化，表现为夏季>秋季>冬季和春季。腾格里沙漠东南缘的人工植被固沙区生物土壤结皮的存在与演替提高了土壤酶的活性，生物土壤结皮有利于该区土壤及其相应生态系统的恢复。

参 考 文 献

- [1] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions. *Advances in Ecological Research*, 1990, 20: 179—223
- [2] Belnap J, Lange O L. *Biological soil crust: Structure, function and management*. Berlin: Springer-Verlag, 2003
- [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. *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 (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2009, 24 (1): 11—24
- [4] 张元明, 王雪芹. 荒漠地表生物土壤结皮形成与演替特征概述. *生态学报*, 2010, 30 (16): 4484—4492. Zhang Y M, Wang X Q. Summary on formation and developmental characteristics of biological soil crusts in desert areas (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (16): 4484—4492
- [5] 刘艳梅, 李新荣, 赵昕, 等. 生物土壤结皮对荒漠土壤线虫群落的影响. *生态学报*, 2013, 33 (9): 2816—2824. Liu Y M, Li X R, Zhao X, et al. Effects of biological soil crusts on desert soil nematode communities (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (9): 2816—2824
- [6] Lebrun J D, Trinsoutrot-Gattin I, Vincelas-Akpa M, et al. Assessing impacts of copper on soil enzyme activities in regard to their natural spatiotemporal variation under long-term different land uses. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 49: 150—156
- [7] Bergstrom D W, Monreal C M, King D J. Sensitivity of soil enzyme activities to conservation practices. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62 (5): 1286—1295
- [8] Trasar C, Leirós M C, Gil S F. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40 (9): 2146—2155
- [9] Zhang Y M. The microstructure and formation of biological soil crusts in their early developmental stage. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50 (2): 117—121
- [10] Li X J, Li X R, Song W M, et al. Effects of crust and shrub patches on runoff, sedimentation, and related nutrient (C, N) redistribution in the desertified steppe zone of the Tengger Desert, Northern China. *Geomorphology*, 2008, 96 (1/2): 221—232
- [11] Zhao H L, Guo Y R, Zhou R L, et al. The effects of plantation development on biological soil crust and topsoil properties in a desert in Northern China. *Geoderma*, 2011, 160 (3/4): 367—372
- [12] Liu Y M, Li X R, Xing Z S, et al. Responses of soil microbial biomass and community composition to biological soil crusts in the revegetated areas of the Tengger Desert. *Applied Soil Ecology*, 2013, 65: 52—59
- [13] Zhang W, Zhang G S, Liu G X, et al. Bacterial diversity and distribution in the southeast edge of the Tengger Desert and their correlation with soil enzyme activities. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24 (11): 2004—2011
- [14] 边丹丹. 黄土丘陵区不同植被状况下土壤生物结皮对土壤生物学性质的影响. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2011. Bian D D. Effects of soil biological crust on biological characters under different vegetations in the Loess Hilly Region (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2011
- [15] 阳贵德. 铜陵铜尾矿废弃地生物土壤结皮细菌多样性研究. 合肥: 安徽大学, 2010. Yang G D. Diversity of bacteria in biological soil crusts growing on wastelands of copper mine tailings, Tongling (In Chinese). Hefei: Anhui University, 2010
- [16] Miralles I, Domingo F, Cantón Y, et al. Hydrolase enzyme activities in a successional gradient of biological soil crusts in arid and semi-arid zones. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 53: 124—132
- [17] Wu N, Zhang Y M, Downing A. Comparative study of nitrogenase activity in different types of biological soil crusts in the Gurbantungut Desert, Northwestern China. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73 (9): 828—833
- [18] Zhao Y, Xu M, Belnap J. Potential nitrogen fixation activity of different aged biological soil crusts from rehabilitated grasslands of the hilly Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74 (10): 1186—1191
- [19] 刘艳梅, 杨航宇, 李新荣. 生物土壤结皮对荒漠区土壤微生物生物量的影响. *土壤学报*, 2014, 51 (2): 394—401. Liu Y M, Yang H Y, Li X R. Effects of biological soil crusts on soil microbial biomass in desert area (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (2): 394—401
- [20] Li X R, He M Z, Duan Z H, et al. Recovery of topsoil physicochemical properties in revegetated sites in the sand-burial ecosystems of the Tengger Desert, Northern China. *Geomorphology*, 2007, 88 (3/4): 254—265
- [21] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006. Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, et al. Soil microbial biomass—Methods and application (In Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2006
- [22] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986. Guan S Y. Soil enzymes and its research methods (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986
- [23] Steinberger Y. Energy and protein budgets of the desert isopod *Hemilepistus reaumuri*. *Acta Oecologia*, 1989, 10: 117—134

- [24] 李新荣, 陈应武, 贾荣亮. 生物土壤结皮: 荒漠昆虫食物链的重要构建者. 中国沙漠, 2008, 28 (2): 245—248. Li X R, Chen Y W, Jia R L. Biological soil crusts: A significant food source for insects in the arid desert ecosystems. *Journal of Desert Research*, 2008, 28 (2): 245—248
- [25] 陈政, 阳贵德, 孙庆业. 生物结皮对铜尾矿废弃地土壤微生物量及酶活性的影响. 应用生态学报, 2009, 20 (9): 2193—2198. Chen Z, Yang G D, Sun Q Y. Effects of bio-crust on soil microbial biomass and enzyme activities in copper mine tailings (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20 (9): 2193—2198
- [26] Darby B J, Neher D A, Belnap J. Soil nematode communities are ecologically more mature beneath late-than early-successional stage biological soil crusts. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35 (1): 203—212
- [27] 邵玉琴, 赵吉. 不同固沙区结皮中微生物生物量和数量的比较研究. 中国沙漠, 2004, 24 (1): 68—71. Shao Y Q, Zhao J. Comparative research on microbial biomass and number in soil microbiotic crust of different fixing sand dunes (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2004, 24 (1): 68—71
- [28] Enowashu E, Poll C, Lamersdorf N, et al. Microbial biomass and enzyme activities under reduced nitrogen deposition in a spruce forest soil. *Applied Soil Ecology*, 2009, 43: 11—21
- [29] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期不同施肥条件下土壤微生物量及土壤酶活性的季节变化特征. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (5): 1093—1099. Li J, Zhao B Q, Li X Y, et al. Seasonal variation of soil microbial biomass and soil enzyme activities in different long-term fertilizer regimes (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15 (5): 1093—1099
- [30] Acosta-Martínez V, Cruz L, Sotomayor-Ramírez D, et al. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35 (1): 35—45
- [31] 曹成有, 陈家模, 邵建飞, 等. 科尔沁沙地四种固沙植物群落土壤微生物生物量及酶活性的季节动态. 生态学杂志, 2011, 30 (2): 227—233. Cao C Y, Chen J M, Shao J F, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass and enzyme activities in four sand-fixation plantations on Horqin sandy land (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30 (2): 227—233

EFFECTS OF BIOLOGICAL SOIL CRUSTS ON SOIL ENZYME ACTIVITIES IN DESERT AREA

Yang Hangyu¹ Liu Yanmei^{2, 3†} Wang Tingpu²

(1 Gansu Forestry Technology College, Tianshui, Gansu 741020, China)

(2 School of Life Science and Chemistry, Tianshui Normal University, Tianshui, Gansu 741001, China)

(3 Shapotou Desert Research and Experiment Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract Biological soil crusts (BSCs) play an important role in fixation of sand dunes and maintenance of soil biota in arid desert ecosystems. Soil enzyme activities could be used as significant bioindicators of extent of soil restoration and important biological indices in evaluating ecological restoration and health in sandy areas. However, so far little has been reported on relationship between BSCs and soil enzyme activities. To understand how BSCs affect soil enzyme activities, sand dune soil under BSCs in the artificially revegetated areas at the southeastern edge of the Tengger Desert, China was taken as object of this study. Four sample lots different in sand-fixing history (57, 49, 32 and 22 a, respectively) were set for soil sampling, and a tract of mobile sand dunes (0 a) and a tract of natural vegetation land (>100 a) in Hongweiof Shapotou were set as control. Results show that cyanobacteria-lichen and moss crusts could significantly increase activities of soil alkaline phosphatase, protease and cellulase in the artificial revegetation sand fixing areas ($p < 0.05$). Type of crust significantly affected soil enzyme activities.

The effects of moss crusts, typical of the late stage development of BSCs on activities of soil alkaline phosphatase, protease and cellulase were much higher than cyanobacteria-lichen crusts, typical of the early stage development of BSCs ($p < 0.05$). Sand-fixing history also significantly affected activities of the soil enzymes, displaying a positive linear relationship with activities of the soil enzymes ($p < 0.05$). BSCs significantly enhanced activities of the soil enzymes in the 0 ~ 20 cm soil layer ($p < 0.05$) and the effects weakened with increasing soil depth. Moreover, activities of the soil enzymes under the crusts varied with the season, following an order of summer > autumn > spring and winter. Therefore, apparently, the presence and succession of BSCs increases activities of the soil enzymes. The findings indicate that BSCs are beneficial to restoration of soil and corresponding ecological systems in the artificially revegetated desert areas at the southeastern edge of the Tengger Desert.

Key words Biological soil crusts; Soil enzyme activities; Crust type; Sand-fixing history; Soil depth; Seasonal change

(责任编辑: 卢 萍)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Application of reductive soil disinfection to suppress soil-borne pathogens Cai Zucong, Zhang Jinbo, Huang Xinqi, et al. (475)
 A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow...Zhang Zhongbin, Peng Xinhua (488)

Research Articles

- Characteristics of soil aggregate loss in croplands in the typical black soil region of Northeast China Wen Leilei, Zheng Fenli, Shen Haiou, et al. (498)
 Construction of an index set for predicting thickness of active layer of permafrost in Qinghai-Tibet Plateau and for mapping Chen Jike, Zhao Yuguo, Zhao Lin, et al. (506)
 Variation of mineral composition along the soil chronosequence at the Hailuoguo Glacier foreland of Gongga Mountain Yang Zijiang, Bing Haijian, Zhou Jun, et al. (515)
 Composition of organic carbon in paddy soil in typical area of Chengdu and its influencing factors Liao Dan, Yu Dongsheng, ZhaoYongcun, et al. (526)
 Spatio-temporal variation of soil temperature and soil moisture regime in Hebei Province Cao Xianghui, Lei Qiuliang, Long Huaiyu, et al. (536)
 Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment Fu Tonggang, Chen Hongsong, Wang Kelin (546)
 Transformation between soil water and shallow groundwater in the middle reaches of the Dagu River Yang Yuzheng, Lin Qing, Wang Songlu, et al. (556)
 Determination of nitrogen and oxygen isotope ratio of nitrate in water with a chemical conversion method Wang Xi, Cao Yacheng, Han Yong, et al. (565)
 Quantitative research on effects of nitrogen application rate on distribution of photosynthetic carbon in rice-soil system using ¹³C pulse labeling technique Liu Ping, Jiang Chunyu, Li Zhongpei (574)
 Effects of no-tillage ridge-cultivation on soil organic carbon accumulation in ridges and crop yields in paddy fields Ci En, Wang Liange, Ding Changhuan, et al. (585)
 Residual of applied ¹⁵N fertilizer in soils under long-term different patterns of fertilization and its utilization Zhao Wei, Liang Bin, Zhou Jianbin (595)
 Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system Lu Yanhong, Liao Yulin, Zhou Xing, et al. (605)
 Effects of long-term fertilization on yield variation trend, yield stability and sustainability in the double cropping rice system Ji Jianhua, Hou Hongqian, Liu Yiren, et al. (618)
 Relationship between exudation of nitrification inhibitor MHPP and plasma membrane proton pump of sorghum root Zhou Jinquan, Zhang Mingchao, Wei Zhijun, et al. (527)
 Effects of long-term amendment with passivant and zinc fertilizer on cadmium reduction in tobacco growing in a Cd contaminated field Cao Chenliang, Wang Wei, Ma Yibing, et al. (635)
 Effects of interaction between potassium and humic acid on index of organic potassium salt in flue-cured tobacco Zheng Dongfang, Xu Jiayang, Xu Zicheng, et al. (645)
 Impacts of replacement of *Pinus* with *Eucalyptus* on soil nutrients and enzyme activities Zhang Kai, Zheng Hua, Chen Falin, et al. (653)
 Effects of biological soil crusts on soil enzyme activities in desert areas Yang Hangyu, Liu Yanmei, Wang Tingpu (663)
 Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation Jiao Lina, Li Zhihong, Yin Chengcheng, et al. (671)
 Effect of *Streptomyces* JD211 promoting growth of rice seedlings and diversity of soil bacteria Wang Shiqiang, Wei Saijin, Yang Taotao, et al. (681)

Research Notes

- Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim River based on minimum data set Gong Lu, Zhang Xueni, Ran Qiyang (689)
 Effect of iron plaque on surface electrochemical properties and short-term N, P and K uptake by rice rootsZheng Yunyun, Li Zhongyi, Li Jiuyu, et al. (695)
 The changes of microbial community structure in red paddy soil under long-term fertilization Xia Xin, Shi Kun, Huang Qianru, et al. (705)
 Salinization characteristics of afforested coastal saline soil as affected by species of trees used in afforestation Wang Heyun, Li Hongli, Dong Zhi, et al. (712)

Cover Picture: Two dimensional and three dimensional images of soil cracks in paddy field (by Zhang Zhongbin)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 3 期 2015 年 5 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 3 May, 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

