

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.003

引用格式:徐洪娥, 户萌菲, 张博阳, 等. 内生真菌与布顿大麦共生对根际与非根际土壤养分和酶活性的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(1):23-32

XU Hong-e, HU Meng-fei, ZHANG Bo-yang, et al. The Effect of Symbiosis between Endophytic Fungi and *Hordeum Bogdanii* on Nutrients and Enzyme Activities in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):23-32

内生真菌与布顿大麦共生对根际与非根际土壤 养分和酶活性的影响

徐洪娥¹, 户萌菲¹, 张博阳¹, 杨 瑞¹, 王 栋², 陈水红^{1*}

(1. 塔里木大学生命科学与技术学院/塔里木盆地生物资源保护利用兵团重点实验室, 新疆 阿拉尔 843300;

2. 塔里木大学动物科学与技术学院, 新疆 阿拉尔 843300)

摘要:为了探究内生真菌与布顿大麦(*Hordeum bogdanii*)共生对根际和非根际土壤养分含量和酶活性的影响。本试验以新疆温宿县携带 *Epichloë* 内生真菌(E+)与不携带内生真菌(E-)的布顿大麦为材料,种植在2块大田中,测定其根际和非根际土壤全磷、效磷、全钾、速效钾、全氮、和有机碳等养分含量和土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性。结果表明:E+、E-根际土壤速效磷、全钾、速效钾和有机碳等养分含量和土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性均显著高于非根际土壤。在低盐条件下,E+根际土壤速效磷含量和土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性均显著高于E-;在高盐条件下,E+根际土壤全磷、速效磷和速效钾养分含量和脲酶活性显著高于E-。土壤养分和酶活性相关性分析表明,根际土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性与土壤全磷和有机碳含量极显著正相关;非根际土壤中,土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性与有机碳呈显著正相关。此外,土壤养分和酶活性冗余分析表明,有机碳是影响根际土壤酶活性最主要的因素。以上结果表明,内生真菌与布顿大麦共生可以提高根际土壤养分含量和增强根际土壤酶活性,从而改善土壤质量,为土壤改良提供新思路 and 科学依据。

关键词:内生真菌;布顿大麦;根际和非根际土壤;土壤养分;土壤酶活性

中图分类号:S154

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0023-10

The Effect of Symbiosis between Endophytic Fungi and *Hordeum Bogdanii* on Nutrients and Enzyme Activities in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils

XU Hong-e¹, HU Meng-fei¹, ZHANG Bo-yang¹, YANG Rui¹, WANG Dong², CHEN Shui-hong^{1*}

(1. College of Life Science and Technology, Tarim University/Construction Corps Key Laboratory of Protection and Utilization of Biological Resources in Tarim Basin, Alar, Xinjiang 843300, China; 2. School of Animal Science and Technology, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract: In order to explore the effects of symbiosis between endophytic fungi and *Hordeum bogdanii* on nutrient contents and enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere soils, *Hordeum bogdanii* with *Epichloë* endophytic fungi (E+) and without *Epichloë* endophytic fungi (E-) were planted in two fields in Wensu County, Xinjiang in this experiment. The contents of total phosphorus, available phosphorus, total potassium, available potassium, total nitrogen and organic carbon in rhizosphere and non-rhizosphere soils and the activities of soil urease, invertase, catalase and alkaline phosphatase were determined. The results showed that the contents of available phosphorus, total potassium, available potassium and organic carbon, and the activities of

收稿日期:2024-12-25;修回日期:2025-03-26

基金项目:内生真菌调控布顿大麦光合色素合成机理(32260356);塔里木大学校长基金项目(TDZKZD202201);青藏高原种质资源研究与利用实验室开放课题项目(2023SYS01)资助

作者简介:徐洪娥(2000-),女,汉族,贵州毕节人,硕士研究生,主要从事真菌抗逆研究,E-mail:2094932591@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: cshdhy@126.com

urease, sucrase, catalase and alkaline phosphatase in E+ and E- rhizosphere soils were significantly higher than those in non-rhizosphere soils. The correlation analysis of soil nutrients and enzyme activities showed that the activities of urease, sucrase and alkaline phosphatase in rhizosphere soil were significantly positively correlated with soil total phosphorus and organic carbon content. In non-rhizosphere soil, soil urease, invertase and alkaline phosphatase activities were significantly positively correlated with organic carbon. In addition, soil nutrient and enzyme activity redundancy analysis showed that organic carbon was the most important factor affecting rhizosphere soil enzyme activity. The above results showed that the symbiosis of endophytic fungi and *H. bogdanii* could improve the rhizosphere soil nutrient contents and enhance the rhizosphere soil enzyme activities, thereby improving soil quality and providing new ideas and scientific basis for soil improvement.

Key words: Endophytic fungi; *Hordeum bogdanii*; Rhizosphere and non-rhizosphere soils; Soil nutrients; Soil enzyme activity

土壤中的养分和酶活性是衡量土壤质量和评估土壤肥力的重要依据^[1]。土壤养分包括全量养分与速效养分,土壤全量养分是土壤中有可供植物利用的养分总和,土壤速效养分是指能直接被植物吸收利用的营养元素^[2]。土壤酶是由土壤微生物、动植物残体和植物根系分泌的一种高分子活性的蛋白质^[3],是一种生物催化剂,参与土壤养分的转化和循环。而参与土壤碳、氮、磷转化的相关水解酶主要有土壤蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶等,土壤过氧化氢酶可以清除土壤中对植物有害的自由基,减轻逆境胁迫下对植物的损害^[4]。根际是土壤、植物和微生物三者之间相互作用的特殊微域,也是能量和营养物质交换最活跃的区域,在养分循环过程发挥着重要作用^[5]。土壤作为植物生长发育的养分来源,其性质会因植物根系的相互渗透和分泌物发生改变,进而引起根际土壤与非根际土壤生物学和理化特性的差异^[6]。不同植物根系对土壤性质和根际微生物的影响不一样,从而对土壤的养分和酶活性也产生不同的影响^[7-8]。土壤养分在土壤酶的作用下产生有机酸,其会降低因土壤盐渍化而升高的pH值,使得盐渍土壤得到修复^[9]。因此,研究植物根际和非根际土壤之间养分和酶活性的差异和相互关系有利于优化植物种植管理和改良土壤肥力,还能提高土壤资源利用率。

有研究发现,醉马草与禾草内生真菌(*Epichloë*)共生增加了土壤中养分含量和酶活性^[10]。禾草内生真菌是指能与宿主植物共生,在宿主体内完成全部或部分生活史,而不引起宿主植物明显病症的一类真菌^[11]。这类真菌存在于植物地上组织,多为垂直传播,即内生真菌通过种子传播给子代^[12]。有的研究发现,内生真菌与宿主禾草共生能促进生长,且提高抗虫害、抗病等抗生物胁迫的能力^[13, 14]。此外,还能提高抗干旱、抗重金属、抗盐碱等非生物胁迫的能力^[15, 16]。1966年南志标等^[17]研究发现,

内生真菌能侵染布顿大麦(*Hordeum bogdanii*)形成共生体。目前,对内生真菌侵染布顿大麦的研究发现碱胁迫下被内生真菌侵染的布顿大麦纤维含量降低,提高其在食草家畜中的消化率^[16];改变其显微结构,加快对水分、无机盐的吸收和提高植物的气体交换能力^[18];调控离子平衡,减少宿主植物的离子损伤^[19];同时,对内生真菌与布顿大麦共生的研究还涉及对光合色素代谢、土壤微生物多样性、盐胁迫下抗氧化酶活性和以及ASA-GSH循环等的影响。但内生真菌与布顿大麦共生其根际和非根际土壤养分和酶活性及其相互关系的研究相对较少,因此,本试验在大田里种植携带菌布顿大麦(E+)和不携带菌布顿大麦(E-),分析根际和非根际土壤养分和酶活性及其相互关系,以期利用内生真菌和布顿大麦共生体改良土壤质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地与材料

大田试验区位于新疆阿拉尔市塔里木大学动物实验站内,用土钻进行“Z”形五点取样,深度为0~20 cm,测两块大田土壤pH和盐分含量见表1。携带*Epichloë*内生真菌的布顿大麦种子采自于新疆阿克苏地区温宿县。将采集的携带内生真菌的布顿大麦种子一半用真菌杀菌剂(50%)处理后,萌发、种植和成熟后获得不携带内生真菌的布顿大麦种子。

表1 大田样地的盐分含量和pH值
Table 1 Soil salt content and pH of field plots

样地 Sample plot	盐分含量 Salt content/%	pH值
低盐大田 Low salt field	0.15	8.15
高盐大田 High salt field	1.40	8.33

1.2 试验设计

春季将携带菌和不携带菌的种子在温室大棚中进行萌发后,移栽到装有珍珠岩和蛭石(1:4)的穴盘中培育,大棚昼夜温度为 $(28\pm 2)^{\circ}\text{C}/(12\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 。每周用霍格兰营养液浇灌一次,布顿大麦培养到6周后,取叶鞘部位,用苯胺蓝染色法^[20]对布顿大麦进行检菌,携带内生真菌的布顿大麦为E+,不携带内生真菌的布顿大麦为E-。将其移栽至2块大田中,每块大田一半种E+,另一半种E-,其间用0.6 m田埂隔开,行距和株距均为0.2 m。

1.3 样品采集与指标测定

第二年春季采集布顿大麦根际和非根际土壤。根际土壤通过“抖根分离法”采集,即将根系周围的大块土壤抖落,用刷子收集附着在根表面的土壤,作为根际土壤样品^[21]。非根际土壤“Z”形五点取样,即在两株布顿大麦之间选取5个采样点,用土钻取0~20 cm深度的土样,混合后作为非根际土壤样品。所有土样装入密封袋后,用20目筛子筛除杂质,自然阴干后测量指标。

土壤pH值采用pH计测定(土水比为1:2.5)^[22];采用烘干法测定土壤可溶性盐含量^[23];采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定土壤全磷(Total phosphorus, TP)含量^[24];NaHCO₃提取法测定土壤速效磷(Available phosphorus, AP)含量^[25];三酸消煮氧化-火焰光度法测定土壤全钾(Total potassium, TK)含量^[26];乙酸铵浸提-火焰光度法测定土壤速效钾(Available potassium, AK)含量^[25];重铬酸钾加热氧化法测定土壤有机碳(Organic carbon, OC)含量^[25];凯氏定氮法测定土壤全氮(Total nitrogen, TN)含量^[26];硫代硫酸钠滴定法测定土壤过氧化氢酶活性^[27](Soil catalase, S-CAT);磷酸苯二钠比色法测定土壤碱性磷酸酶活性^[27](Soil alkaline phosphatase, S-AKP);靛酚蓝比色法测定土壤脲酶活性^[27](Soil urease, S-URE);3,5-二硝基水杨酸法测定土壤蔗糖酶活性(Soil sucrase, S-SUC)^[27]。

1.4 数据处理及分析

采用Excel 2019计算数据,用SPSS 26软件进行数据分析,用GraphPad prism 10.1作图,采用独立样本t检验方法分别比较在不同盐分条件下,E+

或E-根际与非根际土壤之间养分和酶活性的差异,及E+与E-之间在根际和非根际土壤中养分和酶活性的差异。Pearson相关分析探究在根际和非根际土壤中土壤养分含量和酶性之间的相关性,用Origin 2024作相关性热图。同时,采用Canono 5对根际和非根际土壤养分含量和酶活性进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA),筛选影响土壤酶活性变异的主要因子。数据采用平均值±标准误表示,设置显著性水平为95%。

2 结果与分析

2.1 不同盐分下内生真菌对布顿大麦根际和非根际土壤养分的影响

在低盐和高盐条件下,E+,E-根际土壤中AP、TK、AK和OC含量均显著高于非根际土壤($P<0.05$)(图1b-d、1f)。低盐条件下,E+和E-根际和非根际土壤中的TP含量无显著差异,E+根际土壤中TN含量则显著高于非根际土壤。高盐条件下,E+根际土壤中的TP含量显著高于非根际土壤($P<0.05$),但E-根际和非根际土壤之间TP含量和E+、E-根际和非根际土壤中TN含量则无显著差异(图1a、1e)。低盐条件下,E+根际土壤中AP含量极其显著高于E- ($P<0.001$),高盐条件下,E+根际土壤中TP显著高于E- ($P<0.05$),AP、AK含量极其显著高于E- ($P<0.001$)(图1a-b、1d)。

2.2 不同盐分下内生真菌对布顿大麦根际和非根际土壤酶活性的影响

在低盐和高盐条件下,E+与E-根际土壤中S-CAT, S-AKP, S-URE和S-SUC酶活性显著高于非根际土壤(图2)($P<0.05$),低盐条件下,E-土壤中的S-CAT酶活性与之相反,且高盐条件下,E-土壤中S-URE酶活性差异不显著(图1a、1c)。低盐条件下,E+根际和非根际土壤中S-CAT, S-AKP, S-URE和S-SUC酶活性显著高于E-,E+根际土壤中S-URE酶活性与E-差异不显著;高盐条件下,E+非根际土壤中的S-CAT酶活性显著高于E- ($P<0.05$)(图1a),E+根际土壤中的S-URE酶活性显著高于E-,而S-SUC酶活性与之相反(图1c-d)($P<0.001$)。

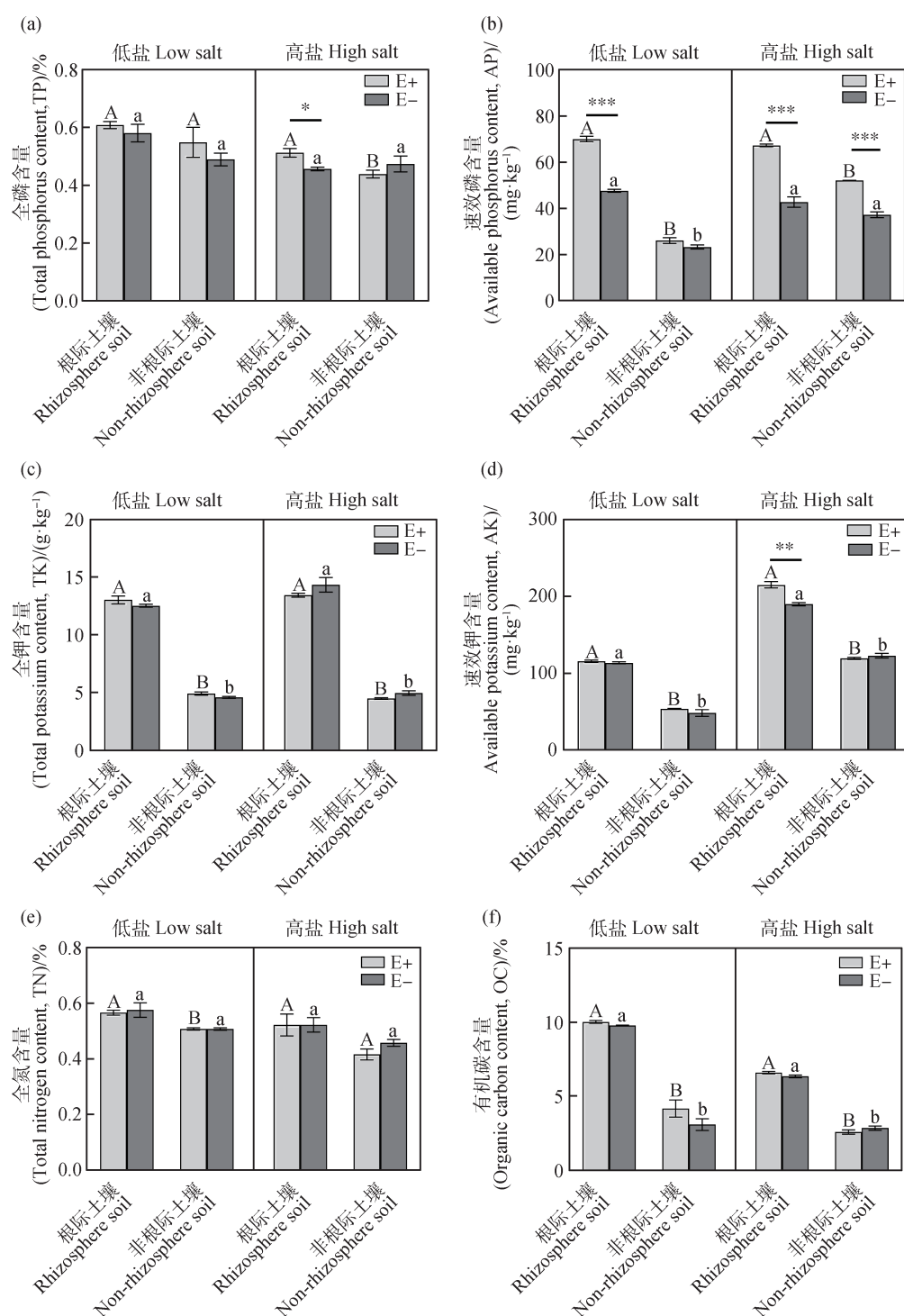


图 1 内生真菌对布顿大麦根际和非根际土壤养分的影响

Fig. 1 The effect of endophytic fungi on nutrients in rhizosphere and non-rhizosphere soil of growing *Hordeum bogdanii*

注: E+ 为携带内生真菌的布顿大麦植株; E- 为不携带内生真菌的布顿大麦植株; 标不同的大写字母表示在相同盐分下 E+ 的根际和非根际土壤之间差异显著 ($P < 0.05$); 标不同的小写字母表示在相同盐分条件下 E- 的根际和非根际土壤之间差异显著 ($P < 0.05$); * 表示在相同处理下, E+ 和 E- 之间差异显著 ($P < 0.05$); ** 表示在 0.01 水平显著; *** 表示在 0.001 水平显著。下同

Note: E+ are *H. bogdanii* plants with endophytic fungi; E- are *H. bogdanii* plants without endophytic fungi; Different lowercase letters indicated that under the same salt conditions, there was a significant difference between the rhizosphere and non-rhizosphere soils of E- ($P < 0.05$); * indicated that there was a significant difference between E+ and E- under the same treatment ($P < 0.05$); ** indicates significant at the 0.01 level; *** indicates significant at the 0.001 level. The same as below

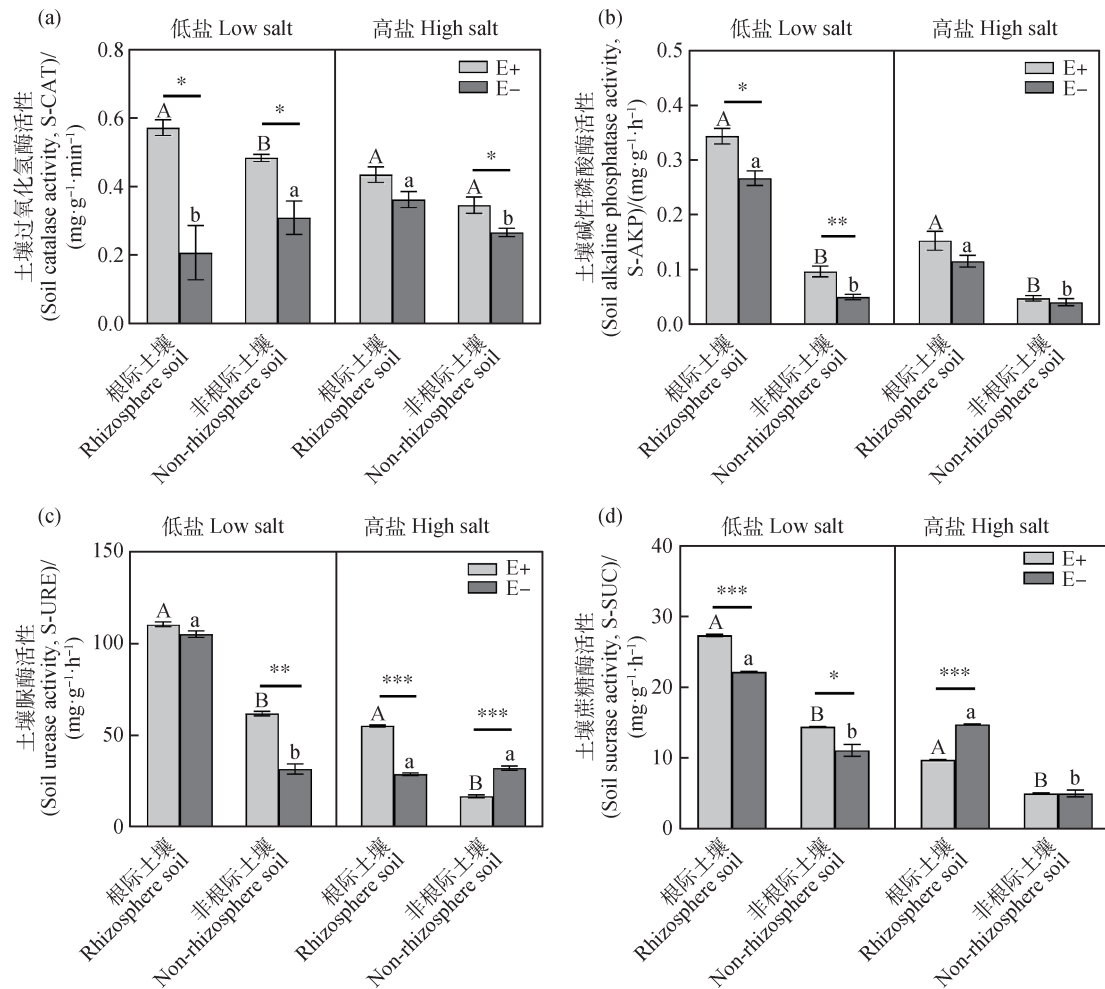


图 2 内生真菌对布顿大麦根际和非根际土壤酶活性的影响

Fig. 2 The effect of endophytic fungi on enzyme activity in rhizosphere and non-rhizosphere soil of *Hordeum bogdanii*

2.3 根际和非根际土壤养分和土壤酶活性的相关性分析

根际土壤中 TP 与 OC, S-URE, S-SUC, S-AKP 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而与 TK 呈显著负相关 ($P < 0.05$), AK 呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 根际土壤中 OC 与 S-URE, S-SUC, S-AKP 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而与 TK 呈显著负相关 ($P < 0.05$), AK 呈显著负相关 ($P < 0.01$); TK 与 AK 呈正相关 ($P < 0.05$); AK 与 S-URE, S-SUC, S-AKP 呈极显著负相关 ($P < 0.01$); S-URE 与 S-SUC, S-AKP 呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 根际土壤中的各养分和酶活与 AP, TN, S-CAT 无显著相关 (图 3a)。

非根际土壤中 TP 与 TK, S-URE, S-SUC 呈显著正相关 ($P < 0.05$); AP 与 AK 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而与 TN, S-SUC 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与 S-URE 呈显著负相关 ($P < 0.05$); OC 与 S-URE, S-SUC 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 S-

AKP 呈显著正相关; AK 与 TN, S-SUC 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与 S-URE 呈显著负相关 ($P < 0.05$); TN 与 S-URE 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 S-SUC 呈极显著正相关 ($P < 0.01$); S-CAT 与 S-URE, S-SUC 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 S-AKP 呈极显著正相关 ($P < 0.01$, 图 3b)。

2.4 根际和非根际土壤养分和土壤酶活性的冗余分析

冗余分析结果如图 4(a) 所示, 在根际土壤中, RDA 的第一轴和第二轴的解釋量分别为 69.41% 和 11.1%, 前两轴累计解釋率为 80.51%。蒙特卡洛置换检验结果表明 OC 含量的解釋率分别是 66.7%, 达到极显著水平 ($P < 0.01$), 是影响土壤酶活性变化的主要影响因素; AK, TK, AP, TN, TP 含量的解釋量分别为 9.1%, 3.5%, 3.2%, 0.4%, 0.1% (表 2)。

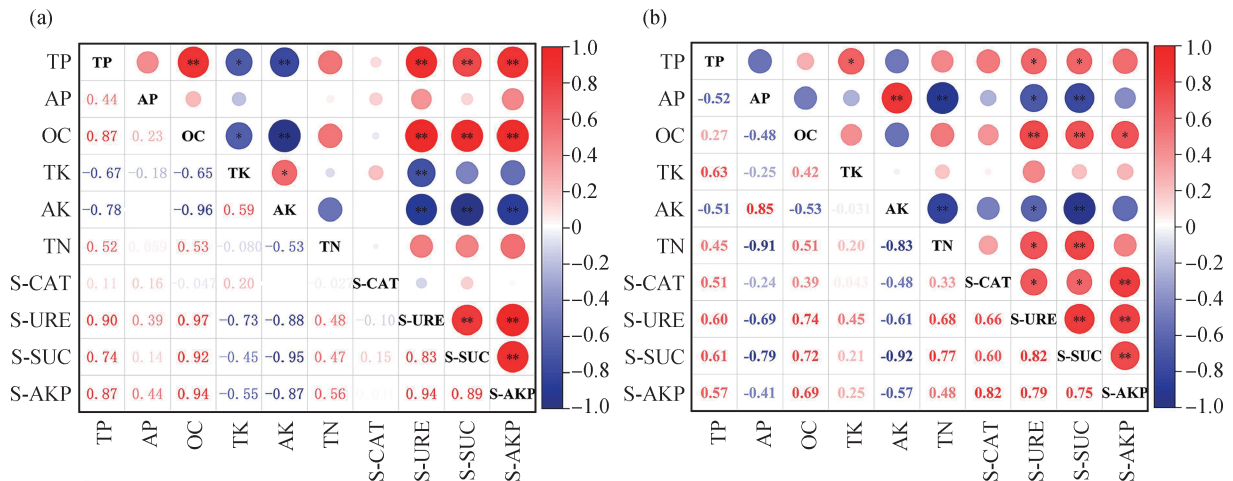


图 3 顿大麦根际(a)和非根际(b)土壤养分与酶活的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of nutrients and enzyme activity in rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Hordeum bogdanii*

注: TP 为全磷; AP 为速效磷; OC 为有机碳; TK 为全钾; AK 为速效钾; TN 为全氮; S-CAT 为土壤过氧化氢酶; S-AKP 为土壤碱性磷酸酶; S-URE 为土壤脲酶; S-SUC 为土壤蔗糖酶; * 表示在 0.05 水平显著; ** 表示在 0.01 水平极显著。下同

Note: TP is total phosphorus; AP is available phosphorus; OC is organic carbon; TK is total potassium; AK is available potassium; TN is total nitrogen; S-CAT is soil catalase; S-AKP is soil alkaline phosphatase; S-URE is soil urease; S-SUC is soil sucrose; * indicates significant at the 0.05 level; ** indicates highly significant at the 0.01 level. The same as below

在非根际土壤中, RDA 的第一轴和第二轴的解釋量分别为 71.67% 和 7.78%, 即前两轴累计解釋量为 79.45%。蒙特卡洛置换检验结果表明 AK 含量对土壤酶活性解釋量为 44.5%,

达到极显著水平 ($P < 0.01$), 是影响土壤酶活性变化的主要影响因素; OC, TK, TP, AP, TN 含量的解釋度为 13.7%, 11.6%, 8.4%, 3.3%, 2.1% (表 2)。

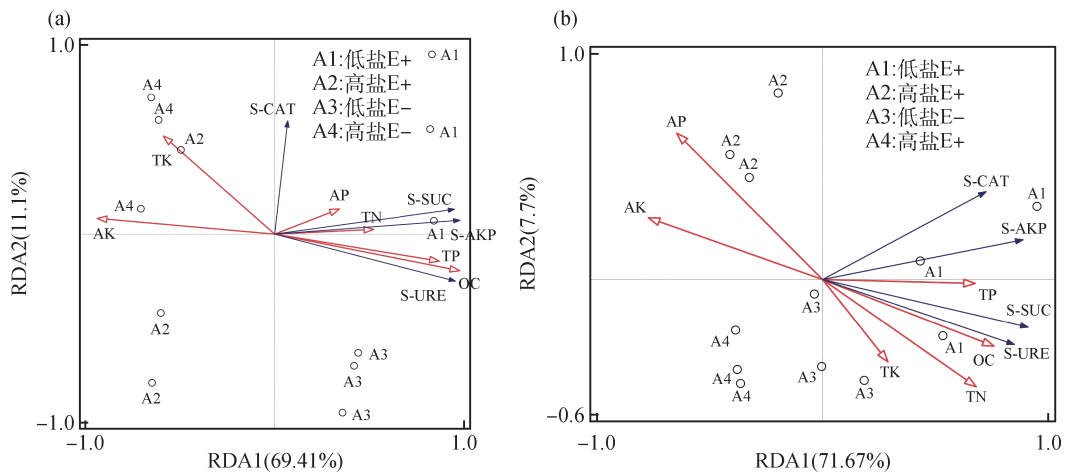


图 4 E+, E-根际(a)和非根际(b)土壤养分与酶活性冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of soil nutrients and enzyme activities in E+, E- rhizosphere(a) and non-rhizosphere(b) soils

3 讨论

3.1 布顿大麦及与内生真菌共生对根际和非根际土壤养分的影响

土壤养分是植物生长发育所必需的, 是评价土壤自然肥力的主要因素之一^[2]。研究发现不同的植物根系的分泌物和对 C, N, P 和 K 等养分吸收偏好

的不同, 根际土壤中的养分含量也会产生不同的变化^[28]。本研究发现种植布顿大麦后, E+, E-根际土壤中的 AP, TK, AK, OC 养分含量均显著高于非根际土壤, 表现出根际正效应^[29]。这可能是由于布顿大麦根系的分泌物、大量脱落的根毛、根冠细胞、细胞碎片及掉落物聚集在根际, 并在大量的土壤微生物作用下分解, 增加了根际土壤碳、磷、钾养分的含

表 2 根际和非根际土壤养分对土壤酶活性解释度排序和显著性检验

Table 2 Ranking and significance test of the explanatory rate of soil enzyme activities by rhizosphere and non-rhizosphere soil nutrients

根际土壤(Rhizosphere soil)					非根际土壤(Non-rhizosphere soil)				
土壤养分 Soil nutrients	解释量 Explanatory quantity/ %	贡献率 Contribution rate/ %	F	P	土壤养分 Soil nutrients	解释量 Explanatory quantity/ %	贡献率 Contribution rate/ %	F	P
OC	66.7	80.3	20.0	0.002**	AK	44.5	53.2	8.0	0.006**
AK	9.1	10.9	3.6	0.074	OC	13.7	16.4	2.9	0.088
TK	3.5	4.2	1.1	0.308	TK	11.6	13.8	3.7	0.066
AP	3.2	3.9	1.0	0.380	TP	8.4	10.0	2.0	0.184
TN	0.4	0.5	0.1	0.828	AP	3.3	4.0	1.1	0.358
TP	0.1	0.1	<0.1	0.966	TN	2.1	2.5	0.6	0.574

注:**表示在 0.01 水平极显著
Note:** indicates significant at the 0.01 level

量^[30]。这与咎看卓等^[5]研究发现不同秋眠类型紫花苜蓿根际土壤中养分含量显著高于非根际土壤的结果相似。此外,微生物与植物共生会对对植物根际土壤养分含量产生一定影响^[31]。有研究发现从钾矿区优势蕨类植物芒萁植物中分离出的曲霉属(*Aspergillus*)内生真菌可以显著提高土壤中的有效磷和有效钾的含量^[32]。在本研究中,在高盐条件下,E+根际土壤中的速效养分(AP、AK)的含量均显著高于E-,但在非根际土壤中不显著。这可能是*Epichloë*内生真菌与布顿大麦共生能分泌有机酸和磷酸酶等物质,将根际土壤中难溶的磷和钾转化为可溶性的磷和钾,提高根际土壤速效养分含量^[10]。可能是改变了根际土壤中微生物的组成,招募一些溶磷菌和解钾菌到根际土壤中,显著增加了根际土壤中有效养分的含量^[33]。

3.2 布顿大麦及与与内生真菌共生对根际和非根际土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤生态系统中最为活跃的生物活性物质,是衡量土壤肥力的重要指标之一^[34]。有研究表明,植物的种类是影响土壤酶活的重要因素之一^[35-36],本研究发现,E+根际土壤中过氧化氢酶、碱性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶活性均显著高于非根际土壤。这与李丽娟等^[37]研究发现三峡库区消落带4种适生植物根际碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性显著高于非根际土壤的结果一致。推测可能是布顿大麦根系分泌物,包括糖类、有机酸和蛋白质等物质,为微生物提供碳源,刺激微生物合成土壤胞外酶的代谢分泌,从而提高根际土壤酶活性^[38]。此外,研究发现,甘肃内生真菌可以提高磷酸酶活性,高羊茅内生真菌也能增加水解酶活性^[39]。同时,本

研究发现在低盐条件下,E+根际和非根际土壤中的过氧化氢酶、碱性磷酸酶、和蔗糖酶活性均显著高于E-,这与户萌菲等^[9]研究结果一致。说明内生真菌可以提高布顿大麦根际土壤酶活性,推测这可能是内生真菌与布顿大麦共生,改变植物生理、代谢等特性,从而引起土壤酶活性的变化^[40]。

3.3 根际和非根际土壤中养分和酶活性的相关性

本研究对布顿大麦根际和非根际土壤酶活性和养分含量相关性分析发现,土壤中的养分和酶活性存在不同程度的相关性,在根际土壤环境中,碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性与土壤TP和OC含量呈极显著正相关,土壤酶参与土壤养分循环和转化,土壤碱性磷酸酶可以将有机磷水解为能被微生物和植物直接吸收利用的无机磷,TP作为碱性磷酸酶的底物,其含量增加驱动土壤微生物分泌碱性磷酸酶^[4]。而AP与碱性磷酸酶无显著相关性,则可能是植物根系分泌有机酸来矿化有机磷增加土壤中速效磷^[41]。土壤蔗糖酶可以水解蔗糖分子为植物和微生物容易吸收利用的单糖,参与碳循环^[42]。同时,冗余分析表明,在根际土壤中OC是影响土壤酶活性最主要的因素,土壤酶的主要来自于土壤微生物的代谢和植物的残体的分解,而OC是土壤微生物的主要碳源,可以驱动微生物的代谢,提高土壤酶活性^[43],这与一些学者^[3, 44]研究结果一致。根际土壤中的各土壤养分因子与土壤酶活性之间的关系与非根际土壤环境中存在不同。在非根际土壤中,土壤TN含量与脲酶呈显著正相关,土壤脲酶可以催化TN中的尿素水解为植物所需的氮,故TN作为底物,其含量增加,脲酶活性提高^[45]。而根际土壤中,TN与脲酶活性相关性不显著,这可能是根系

释放出大量的分泌物,提供微生物的碳源,驱动土壤微生物影响脲酶活性^[46]。

4 结论

综上所述,本研究发现E+、E-根际土壤AP、TK、AK、OC等养分含量和土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性均显著高于非根际土壤;内生真菌与布顿大麦共生能显著提高根际土壤AP、AK养分含量和土壤脲酶活性;有机碳是影响根际土壤酶活性最主要的因素。研究探索内生真菌与布顿大麦共生根际和非根际土壤养分与酶活性的变化及其之间的关系,为土壤肥力的改良提供了理论基础和实践依据。

参考文献

- [1] 巩晓芳,赵毅,彭轶楠,等. 新疆天山盐碱荒地土壤开垦种植效应分析[J]. 土壤通报,2024,55(3):622-633
GONG X F, ZHAO Y, PENG Y N, et al. Cultivation effect on improving saline-alkali wasteland soil in tianshan mountain of xinjiang[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(3): 622-633
- [2] 张雪倩,李子菲,张添棋,等. 根腐病花椒根际和非根际土壤养分特征研究[J]. 陕西林业科技, 2023, 51(2): 12-17
ZHANG X Q, LI Z F, ZHANG T Q, et al. Nutrient characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soil of chinese prickly ash with root rot disease[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2023, 51(2): 12-17
- [3] 杨雄伟,刘娇,侯孟月,等. 凤庆县不同古茶园根际与非根际土壤酶活性及其化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(6): 1418-1425
YANG X W, LIU J, HOU M Y, et al. Enzyme activities and stoichiometric characteristics of rhizometric and nonrhizosphere soil in different ancient tea gardens in Fengqing County, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, 29(6): 1418-1425
- [4] 廖远行,舒英格,王昌敏,等. 喀斯特地区不同植被类型土壤微生物量磷、碱性磷酸酶及植酸酶的变化特征[J]. 南方农业学报, 2023, 54(6): 1762-1770
LIAO Y X, SHU Y G, WANG C M, et al. Change characteristics of soil microbial phosphorus, alkaline phosphatase and phytase under different vegetation types in karst area[J]. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(6): 1762-1770
- [5] 咎看卓,阿山江·伊米尼江,刘丛,等. 不同休眠类型紫花苜蓿根际与非根际土壤理化性质及化学计量特征[J]. 草地学报, 2022, 30(4): 957-965
ZAN K Z, A S J, YI M N J, et al. Physicochemical properties and stoichiometric characteristics of rhizosphere and bulk soils of alfalfa of different fall dormancy types[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(4): 957-965
- [6] ZOU Y, ZHANG Y, TESTERINK C. Root dynamic growth strategies in response to salinity[J]. Plant Cell Environment, 2022, 45(3): 695-704
- [7] 陈永成,李肖,蔡宜东,等. 昆仑山沙区旱作紫花苜蓿根际/非根际土壤理化性质及真菌群落特征[J]. 草业科学, 2023, 40(5): 1232-1242
CHEN Y C, LI X, CAI Y D, et al. Physicochemical properties and fungal community characteristics of dry-cultivated alfalfa rhizosphere and non-rhizosphere soils in the sandy area of Kunlun Mountains[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(5): 1232-1242
- [8] 于童洲,张天宇,周立业. 少花蒺藜草与不同牧草混播根际与非根际土壤酶活性变化[J]. 草原与草坪, 2022, 42(1): 96-101
YU T Z, ZHANG T Y, ZHOU L Y. Changes of enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere soil of *Cenchrus pauciflorus* at different growth stages under substitution competition[J]. Grassland and Turf, 2022, 42(1): 96-101
- [9] 卢萌菲,陈胜,刘小珍,等. 布顿大麦内生真菌扩张对土壤酶活和养分的影响[J]. 生物学杂志, 2024, 41(4): 57-64
HU M F, CHEN S, LIU X Z, et al. Effects of endophytic fungi expansion of *Hordeum bogdanii* on soil enzyme activity and nutrients[J]. Journal of Biology, 2024, 41(4): 57-64
- [10] 刘荣贵,邓茂桦,张瀚文,等. 内生真菌对醉马草不同生长期土壤酶活性和养分的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(6): 1770-1778
LIU R G, DENG M H, ZHANG H W, et al. Effects of *epichloë gansuensis* endophyte on soil enzyme activities and nutrients at different growth periods of *Achnatherum inebrians* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(6): 1770-1778
- [11] LONG F, HU M F, CHEN S, et al. Endophytic fungi regulate HbNHX1 expression and ion balance in *Hordeum bogdanii* under alkaline stress[J]. Journal of Fungi, 2023, 9(3): 331
- [12] 刘欢,陈焘,夏超. 植物-土壤反馈对禾草内生真菌响应[J]. 草业科学, 2020, 37(1): 65-74
LIU H, CHEN T, XIA C. On the response of plant-soil feedback to grass endophytes[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(1): 65-74
- [13] LEE K, MISSAOUI A, MAHMUD K, et al. Interaction between grasses and *Epichloë* endophytes and its significance to biotic and abiotic stress tolerance and the rhizosphere [J]. Microorganisms, 2021, 9(11): 2184
- [14] 赛牙热木·哈力甫,邓勋,宋小双,等. 外生菌根真菌对植物促生抗逆作用机制研究进展[J]. 世界林业研究, 2021, 34(1): 19-24
HALIFU S Y R M, DENG X, SONG X S, et al. Research Progress in the Working Mechanism of Ectomycorrhizal Fungi for Plant Growth Promotion and Stress Resistance [J]. World Forestry Research, 2021, 34(1): 19-24
- [15] 李春杰,姚祥,南志标. 醉马草内生真菌共生体研究进展[J]. 植物生态学报, 2018, 42(8): 793-805
LI C J, YAO X, NAN Z B. Advances in research of Ach-

- natherum inebrians-Epichloë endophyte symbionts[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(8):793-805
- [16] 王凯, 林利栋, 龙凤, 等. 碱胁迫下内生真菌对结实期布顿大麦纤维和粗脂肪含量的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2022(9): 99-104
- WANG K, LIN L D, LONG F, et al. Effect of endophytic fungi on fiber and crude fat content of *Hordeum bogdanii* at fruiting stage under alkali stress[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2022(9):99-104
- [17] 南志标. 内生真菌对布顿大麦草生长的影响[J]. 草业科学, 1996(1):16-18
- NAN Z B. Effects of endophytic fungi on the growth of *Hordeum bogdanii*[J]. Pratacultural Science, 1996(1):16-18
- [18] 龙凤, 户萌菲, 陈胜, 等. 碱胁迫下内生真菌对宿主布顿大麦显微结构的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(2):358-364
- LONG F, HU M F, CHEN S, et al. Effects of endophytic fungi on the anatomical structure of the host *Hordeum bogdanii* under alkali stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(2): 358-364
- [19] 龙凤. *Hordeum bogdani* 内生真菌对碱胁迫下布顿大麦生长及离子平衡的影响[D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2023:14-19
- LONG F. *Epichloë bromicola* Effects of endophytic fungi on growth and ionbalance of *Hordeum bogdanii* under alkaline stress[J]. Aral: Tarim University, 2023:14-19
- [20] 韩丹, 龙凤, 陈胜, 等. 布顿大麦 TB1 基因的克隆及内生真菌对其表达量的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(8):176-185
- HAN D, LONG F, CHEN S, et al. Cloning of TB1 gene in *Hordeum bogdanii* and the effect of endophytic fungi on its expression level[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(8): 176-185
- [21] 张英, 张常洪, 汪其同, 等. 氮沉降下西南山地针叶林根际和非根际土壤固碳贡献差异[J]. 植物生态学报, 2023, 47(9): 1234-1244
- ZHANG Y, ZHANG C H, WANG Q T, et al. Difference of soil carbon sequestration between rhizosphere and bulk soil in a mountain coniferous forest in southwestern China under nitrogen depositions[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(9):1234-1244
- [22] 赵芳草, 陈鸿飞, 王一昊, 等. 盐渍化草地根际土壤理化性质对降水改变和氮添加的响应[J]. 草地学报, 2022, 30(9): 2430-2437
- ZHAO F C, CHEN H F, WANG Y H, et al. Response of rhizosphere soil properties to changed precipitation and nitrogen addition in a salinized grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(9):2430-2437
- [23] 谢森祥. 盐碱土测定方法之一土壤可溶盐总量的测定[J]. 土壤肥料, 1975(1):57-59
- XIE S X. One of the methods for determining saline-alkali soil: Determination of total soluble salts in soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences, 1975(1):57-59
- [24] 钱淑萍. 土壤全磷测定方法讨论[J]. 新疆农业科技, 2001(4):24-25
- QIAN S P. Discussion on the determination methods of total phosphorus in soil[J]. Xinjiang Agricultural Science and Technology, 2001(4):24-25
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000:638
- LU R K. Analytical methods for soil agrochemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:638
- [26] 姚祥. 醉马草内生真菌共生体对草地植物组成及土壤微生物群落多样性的影响[D]. 兰州:兰州大学, 2019:11-19
- YAO X. Effects of *Achnatherum inebrians-Epichloëgansuensis* symbiont on plant composition and soil microbial community diversity in rangelands [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019:11-19
- [27] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986:376
- GUANG S Y. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986:376
- [28] LONG F, HU M, CHEN S, et al. Endophytic fungi regulate HbNHX1 expression and ion balance in *Hordeum bogdanii* under Alkaline Stress[J]. Journal of Fungi. 2023, 9(3):331
- [29] 杨阳, 刘秉儒. 荒漠草原不同植物根际与非根际土壤养分及微生物量分布特征[J]. 生态学报, 2015, 35(22):7562-7570
- YANG Y, LIU B R. Distribution of soil nutrient and microbial biomass in rhizosphere versus nonrhizosphere area of different plant species in desertified steppe [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22):7562-7570
- [30] WANG Y S, JENSEN C R, LIU F L. Nutritional responses to soil drying and rewetting cycles under partial root-zone drying irrigation [J]. Agricultural water management. 2017, 179: 254-259
- [31] 笙万庆. 草甘膦对桉树林地土壤酶活性的影响[J]. 现代农业科技, 2023(15):160-162
- SHENG W Q. Effects of glyphosate on soil enzyme activities in eucalyptus forest land [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(15):160-162
- [32] 詹寿发, 卢丹妮, 毛花英, 等. 2株溶磷、解钾与产 IAA 的内生真菌菌株的筛选、鉴定及促生作用研究[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3):142-151
- ZHAN S F, LU D N, MAO H Y, et al. Isolation of two phosphate/potassium-solubilizing and IAA-producing strains of endophytic fungi and their plant growth promoting function[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(3):142-151
- [33] 陈明会, 莫明和, 马莉, 等. 滇池富磷区土壤中溶磷真菌的筛选及其对油菜的促生作用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(Sup1):209-215
- CHEN M H, MO M H, MA L, et al. Screening of phosphate-solubilizing fungi from phosphate-rich soils in Dianchi and its effect on growth promoting in *Brassica napus*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(Sup1):209-215
- [34] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 等. 土壤酶学研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(1):12-21

- WANG L D, WANG F L, GUO C X, et al. Progress of soil enzymology[J]. Soils, 2016, 48(1):12-21
- [35] 彭姐. 贺兰山不同植被类型土壤酶活性及其影响因素分析[D]. 银川:宁夏大学, 2023:13-18
- PENG N. Analysis of soil enzyme activity and its influencing factors in different vegetation types in Helan Mountains [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023:13-18
- [36] 王思霖, 国艳春, 曾路生, 等. 碱蓬播种量对滨海盐碱地土壤酶活性和团聚性的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(12):179-185
- WANG S J, GUO Y C, ZENG L S, et al. Effects of suaeda planting rate on soil enzyme activity and aggregation of coastal saline alkali land[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(12):179-185
- [37] 李丽娟, 谢婷婷, 张松林, 等. 三峡库区消落带4种适生植物根际与非根际土壤养分与酶活性特征研究[J]. 生态学报, 2020, 40(21):7611-7620
- LI L J, XIE T T, ZHANG S L, et al. Characteristics of nutrient content and enzyme activity in the rhizosphere and bulk soils of four suitable plant species in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21):7611-7620
- [38] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J]. 植物生态学报, 2014, 38(3):298-310
- WU L K, LIN X M, LIN W X. Advances and perspective in research on plant-soil-microbe interactions mediated by root exudates[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(3):298-310
- [39] 高越. 中华羊茅内生真菌共生体对垂穗披碱草生长及根际微生物的影响[D]. 兰州:兰州大学, 2023:30-23
- GAO Y. Effects of festuca sinensis-*Epichloë* endophyte symbionts on growth of Elymus nutans and rhizosphere microorganism [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023:30-23
- [40] JI X, XIA Y, ZHANG H, et al. The microscopic mechanism between endophytic fungi and host plants: From recognition to building stable mutually beneficial relationships [J]. Microbiological Research, 2022, 261:127056
- [41] 路鹏. 长期不同施肥及土地利用对壤土中 phoD 基因编码的细菌及碱性磷酸酶的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2023:9-21
- LU P. Effects of long-term fertilization and management on phoD harboring microbial community and alkaline phosphatase on Loess soil [D]. Yanglin: Northwest Agriculture and Forestry University, 2023:9-21
- [42] 侯文军, 邹明, 李宝福, 等. 草甘膦对桉树人工林土壤酶活性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(11):76-79
- HOU W J, ZOU M, LI B F, et al. Effect of glyphosate on soil enzyme activities in eucalyptus plantations [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(11):76-79
- [43] 陈卓. 祁连山草地植被-土壤养分-酶化学计量特征研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2024:31-10
- CHEN Z. Qilian Mountain grassland vegetation-soil nutrients-enzyme stoichiometry characteristics study [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2024:31-10
- [44] 王姝婧, 王利娜, 孙佳, 等. 外源有机碳对新疆骏枣园土壤肥力及土壤酶活性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(4):134-143
- WANG S J, WANG L N, SUN J, et al. Effects of exogenous organic carbon on soil fertility and soil enzyme activity of the Jun Jujube orchard in Xinjiang [J]. Journal of Central South University of Forestry Technology, 2023, 43(4):134-143
- [45] 孙慧, 张建锋, 许华森, 等. 余姚滨海不同盐碱度土壤微生物群落组成及土壤酶活性的变化[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10):3361-3370
- SUN H, ZHANG J F, XU H S, et al. Variations of soil microbial community composition and enzyme activities with different salinities on Yuyao coast, Zhejiang, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10):3361-3370
- [46] 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 等. 黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2):895-904
- MO X, CHEN F J, YOU C, et al. Characteristics and factors of soil enzyme activity for different plant communities in Yellow River Delta [J]. Environmental Science, 2020, 41(2):895-904

(责任编辑 付 宸)