

宁夏 4 种耐盐植物对根际土壤养分及微生物功能多样性的影响

侯 晖^{1,2}, 龚 佳⁶, 谢沁宓^{1,2}, 赵宏亮³, 程 昊³, 王 芳⁵, 倪细炉^{1,2,4*}

(1. 宁夏大学 生态环境学院西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021;

3. 宁夏大学 农学院, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏贺兰山森林生态系统定位观测研究站, 宁夏 银川 750021;

5. 宁夏大学 地理科学与规划学院, 宁夏 银川 750021; 6. 宁夏迪安乐嘉医学检验中心(有限公司), 宁夏 银川 750021)

摘 要:为探讨盐碱地耐盐植物对根际土壤理化性质及微生物功能多样性的影响,以黑果枸杞、沙棘、银水牛果和怪柳 4 种耐盐植物为材料,分别添加不同浓度的 NaCl 和 NaHCO₃ 溶液模拟不同盐碱胁迫条件,设置中度盐胁迫(T₁, 500 mmol·L⁻¹ NaCl)、重度盐胁迫(T₂, 750 mmol·L⁻¹ NaCl)、中度碱胁迫(T₃, 500 mmol·L⁻¹ NaHCO₃)和重度碱胁迫(T₄, 750 mmol·L⁻¹ NaHCO₃)处理,以浇灌自来水为对照(CK, 0 mmol·L⁻¹),分别测定不同处理根际土壤的理化性质,并采用 Biolog-ECO 微平板技术测定根际微生物功能多样性。结果表明,4 种耐盐植物的土壤有机质随盐碱胁迫的增加呈降低趋势,且种植 1 a 后土壤有机质呈降低趋势;不同盐碱胁迫下土壤全 N、全 P 和全 K 含量也呈降低趋势,但方差分析显示差异不显著,种植 1 a 后的土壤全 N、全 P 和全 K 含量升高。怪柳和黑果枸杞根际土壤的平均每孔颜色变化率(average well color development, AWCD)比沙棘和银水牛果高,但丰富度、Shannon 均匀度和 Simpson 指数在不同处理间没有明显差异。相关性分析表明,土壤全 N 和有机质与 AWCD 呈极显著正相关($P < 0.01$),土壤全 N 与微生物 Shannon 指数呈显著正相关($P < 0.05$),土壤全 P 与丰富度指数呈显著正相关($P < 0.05$)。主成分分析表明,根际土壤微生物群落对碳源利用能力由大到小为胺类、多聚物类、糖类,其次是氨基酸类、羧酸类。因此,耐盐植物有利于提高根际土壤养分,提高根际土壤微生物代谢活性和根际土壤微生物群落功能多样性,是盐碱地区生态恢复的一项有效措施。

关键词:耐盐植物;盐碱胁迫;微生物群落功能多样性;主成分分析

中图分类号:S154.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)04-0061-13

Effects of Four Salt-Tolerant Plants on Rhizosphere Soil Nutrients and Microbial Functional Diversity in Ningxia

HOU Hui^{1,2}, GONG Jia⁶, XIE Qin-mi^{1,2}, ZHAO Hong-liang³, CHENG Hao³, WANG Fang⁵, NI Xi-lu^{1,2,4*}

(1. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China,

School of Ecological and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Key Lab. of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021,

Ningxia, China; 3. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

4. Ningxia Helan Mountain Forest Ecosystem Orientation Observation Research Station, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

5. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

6. Ningxia Dian Lejia Medical Laboratory (CO., Ltd.), Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: In order to explore the effects of planting salt-tolerant plants on rhizosphere soil physicochemical

收稿日期:2022-04-27 修回日期:2022-06-01

基金项目:宁夏重点研发项目(2020BFG03006, 2021BEG02005);宁夏自然科学基金(2020AAC03107);国家自然科学基金(41761066, 42067022);中央引导地方科技发展专项(2022FRD5001)。

第一作者:侯 晖。研究方向:植物生态。E-mail:2447508658@qq.com

* 通信作者:倪细炉,博士,副研究员。研究方向:植物生态。E-mail:nixilu@nxu.edu.cn

properties and microbial functional diversity in Ningxia saline-alkali areas, four halophyte plants, such as *Lycium ruthenicum*, *Hippophae rhamnoides*, *Shepherdia argentea* and *Tamarix chinensis* were selected as the research materials. Five different saline-alkaline stresses were simulated by adding different concentrations of NaCl and NaHCO₃ solutions, i. e., T1 (medium salt stress, 500 mmol · L⁻¹ NaCl), T2 (severe salt stress, 750 mmol · L⁻¹ NaCl), T3 (medium alkaline stress, 500 mmol · L⁻¹ NaHCO₃), T4 (severe alkaline stress, 750 mmol · L⁻¹ NaHCO₃) and control (tap water, 0 mmol · L⁻¹ NaCl or NaHCO₃), physico-chemical properties of their rhizosphere soil were determined in October 2015 and October 2016, and rhizosphere microorganism functional diversity was determined using the Biolog-ECO microplate technology in October 2016. The results were as follows. Soil organic matter content of four salt-tolerant plants decreased with the increase of stress intensity, and it also decreased after planted for one year. Soil total N, total P and total K contents also decreased indistinctly under different saline-alkaline stresses. Soil total N, total P and total K contents increased after planted for one year. The average well color development (AWCD) values of rhizosphere soil in *T. chinensis* and *L. ruthenicum* were higher than *H. rhamnoides* and *S. argentea*, but the richness, Shannon evenness and Simpson index in different saline-alkali treatments were non-significant differences among them. Correlation analysis showed the soil total N and organic matter were extremely significantly and positively correlated with AWCD ($P < 0.01$), and significantly and positively correlated with microbial Shannon index ($P < 0.05$). Soil total P was significantly and positively correlated with richness index ($P < 0.05$). Principal component analysis showed that the carbon source utilization ability of rhizosphere soil microbial communities was: amines, polymers, sugars, and followed by amino acids and carboxylic acids. Therefore, salt-tolerant plants are conducive to enhance rhizosphere soil nutrients, improve microbial metabolic activity and soil microbial community functional diversity in rhizosphere soil. It is an effective measure for ecological restoration in saline-alkali areas.

Key words: salt-tolerant plant; saline-alkaline stress; microbial community functional diversity; principal component analysis

全球约有 10 亿 km² 的盐碱土壤, 占总土地面积的 7.6%, 其中受盐碱危害的耕地面积有 560 万 km², 占全世界耕地面积的 37.3%^[1]。根据土壤中盐的种类来定义盐碱土类型, 将主要含有碳酸钠(Na₂CO₃)和碳酸氢钠(NaHCO₃)的土壤被称为碱性土壤, 而由氯化钠(NaCl)和硫酸钠(Na₂SO₄)存在的土壤被称为盐土。然而, 盐碱土壤很容易混合, 因此被称为盐碱土^[2]。通常 0.2%~0.5% 的土壤盐度对植物生长有负面影响。然而许多地区由于气候干燥、地势低洼、地下水位高等原因, 地下水的蒸发导致了土壤含盐量高, 从而将盐带到土壤表面(犁层), 土壤盐度可达到或超过 1%, 甚至最高可达 10%^[3]。因此, 土壤盐渍化不但对生物圈和生态环境构成威胁, 而且直接影响着农业生产、社会稳定、人类生存、资源与环境的可持续发展。

土壤微生物是许多关键生态系统变化的重要驱动力, 在维持生态系统功能和服务中起关键作用^[4], 土壤微生物多样性是土壤质量变化的重要指标^[5], 其中根际微生物是一类对植物根系有直接影响的土壤范围内生长繁殖的微生物, 与植物根系相互作用、相互促进^[6], 其种群和数量极大地反映了土壤的质

量, 而土壤的品质将会直接影响植物的生长^[7], 同时, 根际与非根际土壤环境、根际与非根际微生物的功能多样性也存在较大差异^[8-9], 不同植物根际土壤微生物种类和数量也不一样^[10]。盐碱土中植物的根际微生物群落研究对于植物的生长发育, 加强对盐生植物资源的开发利用, 以及改良盐碱土壤具有十分重要的意义, 但是大多数研究主要集中于草本或作物种植对盐碱土壤理化性质及土壤微生物的影响^[11-14]。西北地区城市绿化的部分地区也面临着土壤盐碱化问题, 有关本土耐盐木本植物的研究鲜有报道。因此, 本研究从盐碱土壤中植物的根际微生物群落研究入手, 以宁夏本土生长的黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)和银水牛果(*Shepherdia argentea*)4 种园林绿化植物为材料, 利用 Biolog 微平板法分析, 评价模拟盐碱胁迫条件下, 不同植物根际土壤理化性质和微生物群落功能多样性, 以期探寻耐盐植物改良盐碱土的最优策略, 为宁夏退化土壤的生态恢复和保护提供一定的理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2015 年 4 月下旬在银川植物园抗逆性田间模拟实验棚进行,结合宁夏盐碱地植物分布,参考试验区域耐盐植物选育研究等,选择黑果枸杞、沙棘、怪柳、银水牛果 4 种盐生植物为供试材料,试验材料均为 2 年生植物,分别设置 NaCl 的中度(T1, 500 mmol · L⁻¹)、重度(T2, 750 mmol · L⁻¹)和 NaHCO₃ 的中度(T3, 500 mmol · L⁻¹)、重度(T4, 750 mmol · L⁻¹)胁迫处理,并以浇灌自来水的处理为对照(CK, 0 mmol · L⁻¹),为防止出现烧苗现象,每隔 4 d 浇灌 500 mL,共 6 次。挑选生长一致的 4 种植物,分别种植在圆形塑料桶内(25 cm×33 cm,桶底部无穿孔),每个桶内各 1 株,每种植物 5 个处理,

每个处理 10 个重复,共计 200 株,试验周期内不添加施肥措施。土壤定期称重,保持土壤水分维持在田间持水量的 40%~60%。土壤类型采用当地农田的沙壤土(非盐渍化土壤),理化指标见表 1。

1.2 样品采集

利用抖土法采集根际土壤^[15],挖取具有完整根系的土体,先轻轻抖落大块不含根系的土壤,然后用力将根表面附着的土壤全部抖落下来,以便获得根际土壤。采集后的土壤,按照测定指标不同,将刚采集时的新鲜土样装在塑封袋放入土壤保温冷藏箱内,带回实验室,一部分自然风干后磨细过 0.25 mm 和 1 mm 孔径的筛子用于测定土壤理化性质,分别于 2015 年 10 月和 2016 年 10 月进行试验,一部分放入 4℃ 冰箱内冷藏用于测定根际微生物功能多样性,于 2016 年 10 月用于 Biolog 测定。

表 1 土壤理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of experimental soil

指标	田间持水量(%)	孔隙度(%)	土壤容重/(g · cm ⁻³)	pH	电导率/(μS · cm ⁻¹)
试验土壤	25.21±1.44	46.28±2.71	1.48±0.06	8.36±0.32	222.10±13.30
指标	有机质含量/(g · kg ⁻¹)	全 N 含量/(g · kg ⁻¹)	全 P 含量/(g · kg ⁻¹)	全 K 含量/(g · kg ⁻¹)	
试验土壤	13.36±0.72	0.45±0.02	0.61±0.06	10.13±0.41	

1.3 土壤理化性质分析

土壤理化性质指标测定均按照文献^[16]进行。采用水合热重铬酸钾氧化—比色法测定土壤有机质(organic matter, OM)含量,采用半微量凯氏定氮法测定土壤全 N(total nitrogen, TN)含量,采用高氯酸—硫酸法测定土壤全 P(total phosphorus, TP)含量,采用火焰光度法测定土壤全 K(total potassium, TK)含量;采用环刀法测定土壤容重(bulk density)、孔隙度(soil porosity)和田间持水量(field capacity),土壤 pH 采用酸度计电位法测定。

1.4 Biolog 技术的测定方法及数据统计

ECO 板的接种液制备参照 Classen 等^[17]的方法,略作修改,操作步骤如下:称取 11.36 g 鲜土(12%的土壤含水量)置于 250 mL 的三角瓶中,加入 90 mL 的去离子水,制成土悬液;此悬液在 4℃ 摇床上振荡分散 1 h(200 r · min⁻¹);静置 3 min,转移到无菌操作台进行梯度操作,依次稀释得到 1×10⁻³ 悬液。倾倒到加样槽内,方便接种。将 Biolog-ECO 板预热至 25℃。用八道枪向 ECO 板的各孔中加入 150 μL 的稀释液,对照孔加入 150 μL 无菌水。将接种好的微孔板放在保湿的容器中,并放入 25℃ 的恒温培养箱中,分别于 0、24、36、48、72、96、120、144 h 在酶标仪上测定,测定波长为 590 nm,记录吸光度值。

平均每孔颜色变化率(average well color development, AWCD, 公式中用 A_{WCD} 表示)的计算。

$$A_{WCD} = \sum(C_i - R) / n$$
 (1)

式中: C_i 是每个孔(光密度测量)的吸光度, R 为对照孔的吸光度, n 是底物数量(本试验 n=31)。

Shannon 指数

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i (\ln P_i)$$
 (2)

式中: P_i 表示第 i 个非对照孔中的吸光值与所有非对照孔吸光值总和的比值。

丰富度值(F)根据转换系数得到

$$F = (x_i - c) / \sum(x_i - c) / 31$$
 (3)

式中: x_i 代表第 i 个非对照孔的吸光度, c 为对照的吸光度。由转换系数判别每微孔碳源利用情况,若系数>1 则说明该碳源已被利用,将已利用的碳源计数得到 R。

Simpson 指数

$$D = 1 - \sum(P_i \times P_i)$$
 (4)

式中: P_i 为第一孔的相对吸光值与整个平板相对吸光值总和的比率。

碳源利用丰富度指数(S)

$$S = \text{被利用碳源的总数}$$
 (5)

1.5 数据处理

数据经 Excel 2019 整理后,采用 SPSS17.0 统计软件进行单因素方差分析、主成分分析(principal

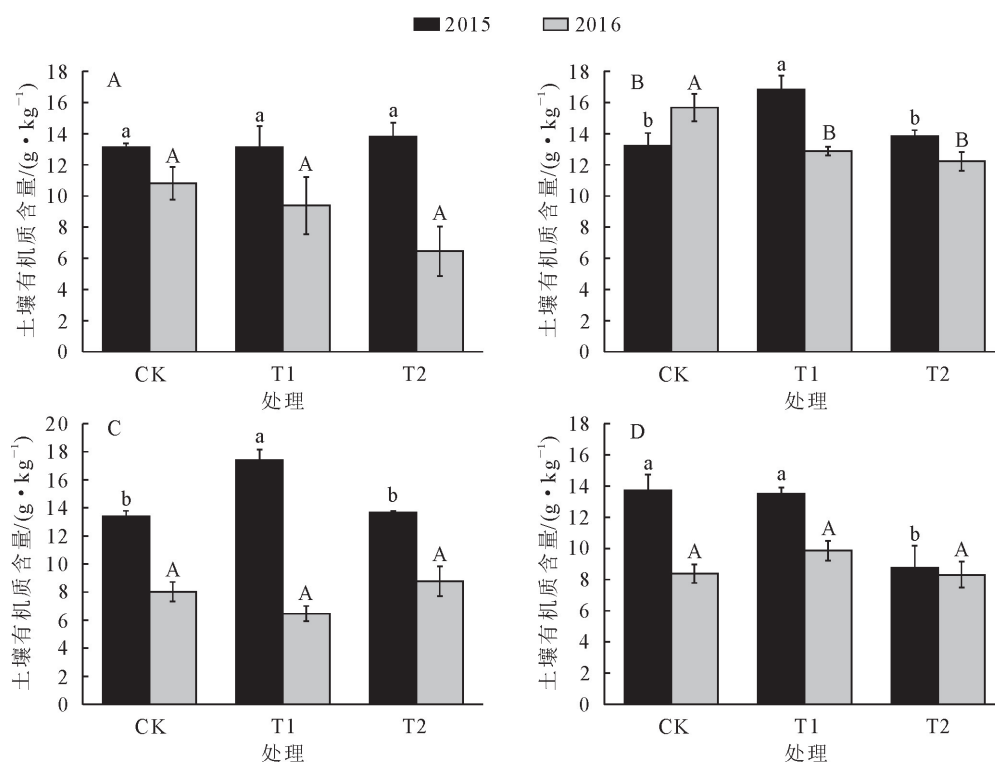
component analysis, PCA) 以及相关性分析, 用 Duncan 检验法进行多重比较, 作图采用 Origin2021 软件进行, 试验结果为平均值 \pm 标准误差。

2 结果与分析

2.1 不同植物对盐胁迫和碱胁迫下根际土壤养分的影响

盐胁迫下第 1 年试验结果表明, 黑果枸杞的土壤有机质含量呈升高趋势, 但各处理之间无显著性差异 ($P > 0.05$); 沙棘和柽柳在 CK-T2 处理下, 均呈先升后降的变化趋势, T1 处理下显著高于其他处

理 ($P < 0.05$); 银水牛果在 CK-T2 处理下呈降低趋势, T1 处理下显著高于 T2 处理 ($P < 0.05$), 与 CK 无显著性差异。第 2 年试验结果表明, 4 种植物的土壤有机质含量整体上呈降低趋势, 黑果枸杞和沙棘在 CK 处理下土壤有机质含量均高于其他处理; 柽柳在 T2 处理下, 银水牛果在 T1 处理下土壤有机质含量较高, 与 CK 无显著差异 ($P > 0.05$), 由此可见, 不同植物对土壤有机质含量的影响不同。第 1 年的土壤有机质含量整体高于第 2 年, 由于试验土壤有机质含量较低, 植物生长过程中消耗量较大导致了此结果 (图 1)。



不同大写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。A 代表黑果枸杞, B 代表沙棘, C 代表柽柳, D 代表银水牛果。下同。

图 1 不同盐胁迫条件下 4 种植物根际土壤有机质含量变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of rhizosphere soil organic matter content of four plant species under different salt stress conditions

碱胁迫下第 1 年试验结果表明, 黑果枸杞的土壤有机质含量呈升高趋势, 与第 1 年的盐胁迫具有一致性, T4 与 CK 间有显著性差异 ($P < 0.05$); 沙棘、柽柳和银水牛果的土壤有机质含量呈降低趋势, CK 下显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。第 2 年试验结果表明, 4 种植物的土壤有机质含量整体上呈降低趋势, CK 下显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。第 1 年的土壤有机质含量整体比第 2 年高 (图 2)。除第 1 年试验的黑果枸杞外, 第 2 年黑水枸杞碱胁迫处理和其余植物 2 a 碱胁迫处理的土壤有机质含量均低于盐胁迫, 这是因为碱胁迫比盐胁迫有更强的抑制性。

盐胁迫下第 1 年试验结果表明, 黑果枸杞和沙

棘的土壤全 N 含量呈先升后降的趋势, 在 T1 处理下土壤全 N 含量达到最大值, 与其他处理间呈显著性差异 ($P < 0.05$), 表明在中度盐胁迫下, 黑果枸杞和沙棘对土壤全 N 的改良效果更好; 柽柳和银水牛果的土壤全 N 含量呈上升趋势。耐盐植物种植第 2 年后, 黑果枸杞、沙棘和柽柳的土壤全 N 含量呈先升后降趋势, 在 T1 处理下达到最大值; 银水牛果的土壤全 N 含量呈先降后升趋势, 在 CK 达到最大值, 与 T1 间呈显著性差异 ($P < 0.05$)。在 CK 处理下, 4 种植物的土壤全 N 含量是第 2 年大于第 1 年; 在 T1 处理下, 沙棘和柽柳的土壤全 N 含量第 2 年高于第 1 年, 黑果枸杞和银水牛果的土壤全 N 含量第 2 年低于第 1 年; 在 T2 处理下, 黑果枸杞和沙棘

的土壤全N含量第2年高于第1年,桤柳和银水牛果的土壤全N含量是第2年低于第1年,可能因为植物的生长速度和根系分布不同,导致不同植物对土壤全N的改良效果不同(图3)。

碱胁迫下第1年试验结果表明,黑果枸杞和沙棘的土壤全N含量均呈降低趋势;桤柳呈上升趋势,在T4处理时达到最大值,且与CK间呈显著性差异

($P < 0.05$);银水牛果呈先升后降的趋势,在T3处理时达到最大值。第2年试验结果表明,4种植物的土壤全N含量均呈降低趋势。黑果枸杞和沙棘的土壤全N含量在第2年含量均高于第1年,但桤柳和银水牛果除CK处理下第2年含量高于第1年外,T1和T2处理下均低于第1年(图4)。碱胁迫下的土壤全N含量低于盐胁迫下的土壤全N含量。

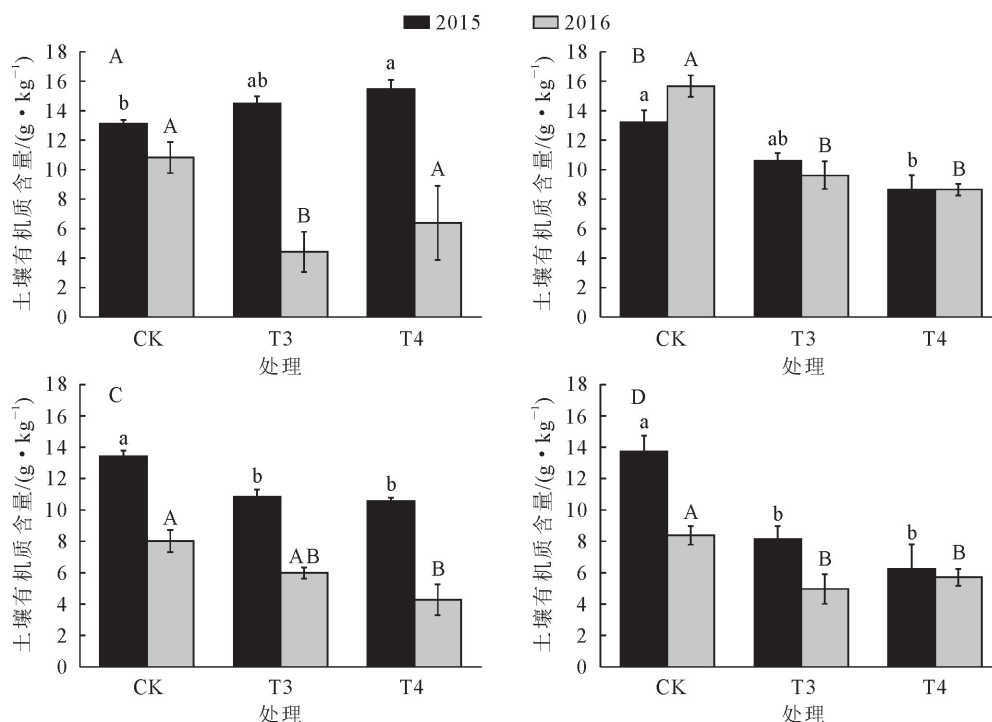


图2 不同碱胁迫条件下4种植物根际土壤有机质含量变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of rhizosphere soil organic matter content of four plant species under different alkali stress conditions

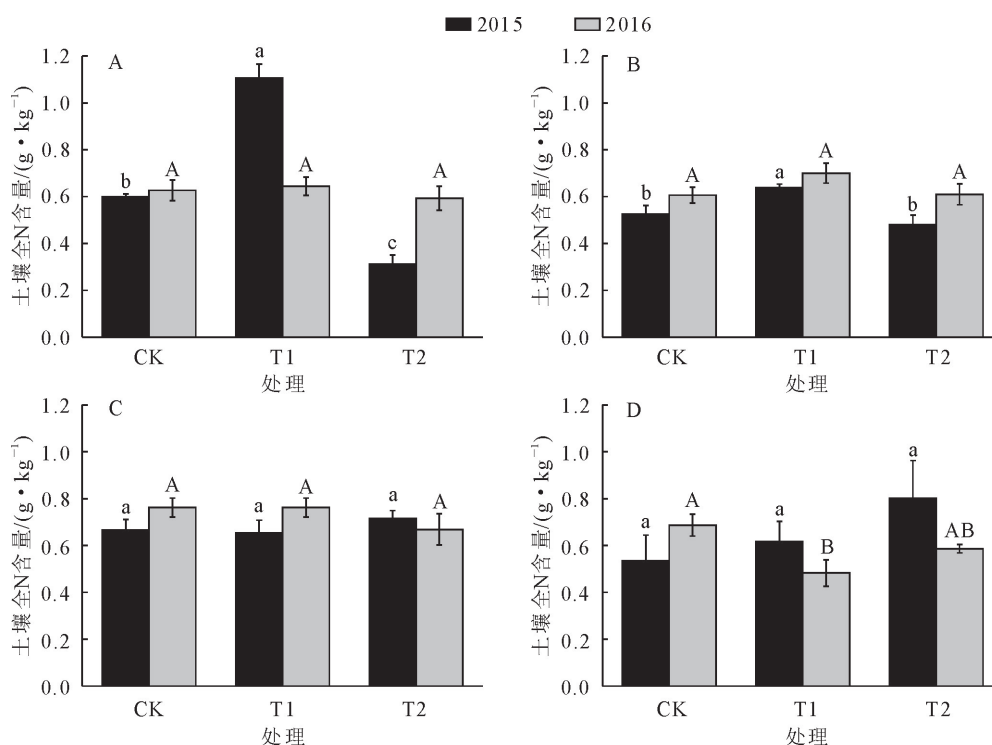


图3 不同盐胁迫条件下4种植物根际土壤全N含量变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of rhizosphere soil total N content of four plant species under different salt stress conditions

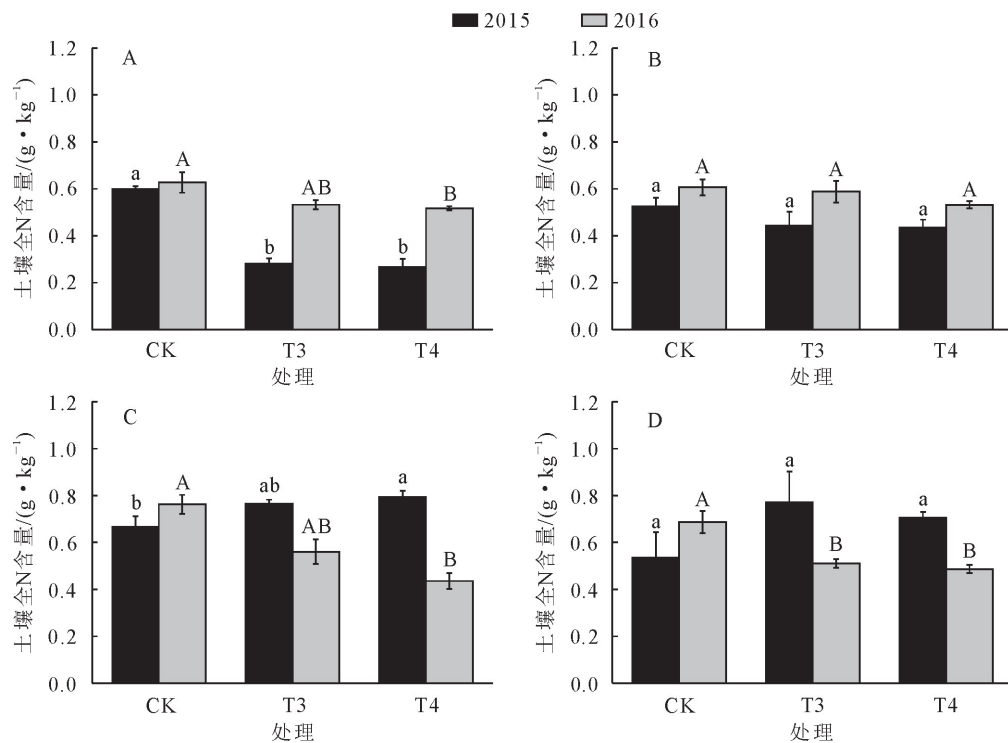


图 4 不同碱胁迫条件下 4 种植物根际土壤全 N 含量变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of rhizosphere soil total N content of four plant species under different alkali stress conditions

盐胁迫下第 1 年试验结果表明,沙棘的土壤全 P 含量呈先升后降趋势,T1 与 CK 间呈显著性差异 ($P < 0.05$),其余 3 种植物的土壤全 P 含量整体上变化趋势不大。耐盐植物种植第 2 年后,黑果枸杞和沙棘的土壤全 P 含量呈上升趋势;怪柳的土壤全 P 含量呈先降后升的趋势,在 T1 处理下最低,且与

其他处理间呈显著性差异 ($P < 0.05$);银水牛果的土壤全 P 含量呈先升后降的趋势,在 T1 达到最大值,与 CK 间呈显著性差异 ($P < 0.05$)。表明银水牛果在 T1 处理下对土壤的改良效果更好,而其余 3 种植物在 T2 处理下更好。4 种植物的土壤全 P 含量的时间变化均表现为升高的趋势(图 5)。

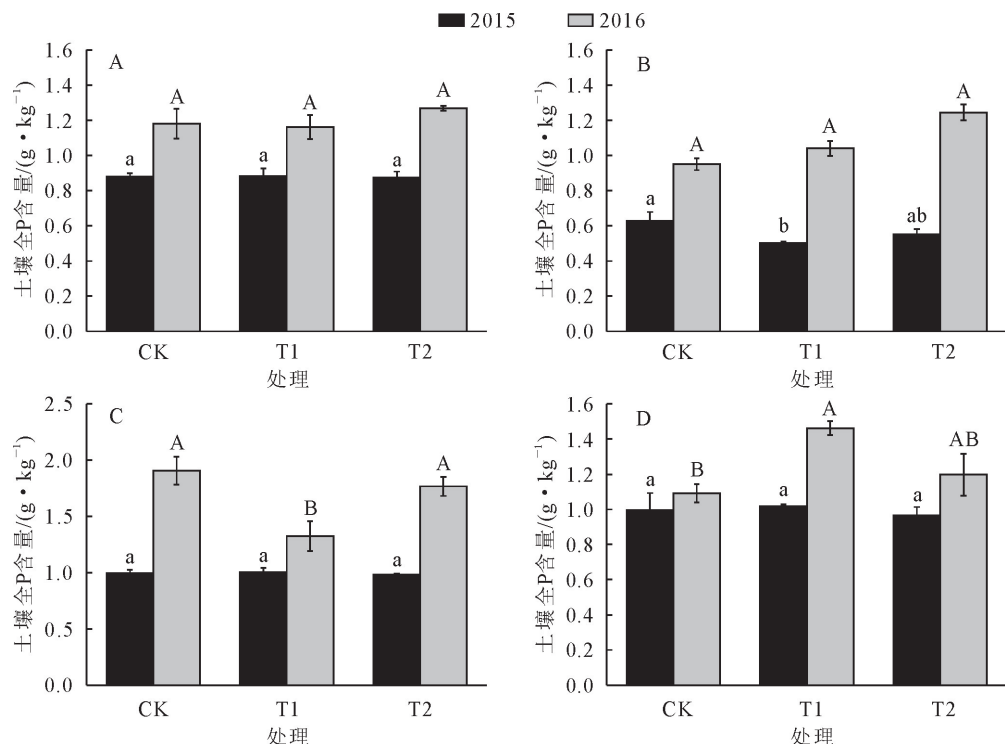


图 5 不同盐胁迫条件下 4 种植物根际土壤全 P 含量变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of rhizosphere soil total P content of four plant species under different salt stress conditions

碱胁迫下第1年试验结果表明,黑果枸杞的土壤全P含量呈先升后降趋势,在T3达到最大值,与T4处理间呈显著性差异($P<0.05$);沙棘和银水牛果的土壤全P含量呈上升趋势;柽柳的土壤全P含量变化不大。第2年试验结果表明,黑果枸杞和沙棘的土壤全P含量与第1年具有一致性;柽柳的土壤全P含量呈降低趋势,T3与T4间呈显著性差异

($P<0.05$);银水牛果的土壤全P含量呈先升后降趋势。种植4种植物第2年后的土壤全P含量均大于第1年,表明在盐碱胁迫条件下种植4种耐盐植物,能提高土壤全P含量(图6)。整体上碱胁迫第2年的土壤全P含量低于第1年,但碱胁迫下的第1年土壤全P含量高于盐胁迫,可能因为植物种特性不同导致的差异。

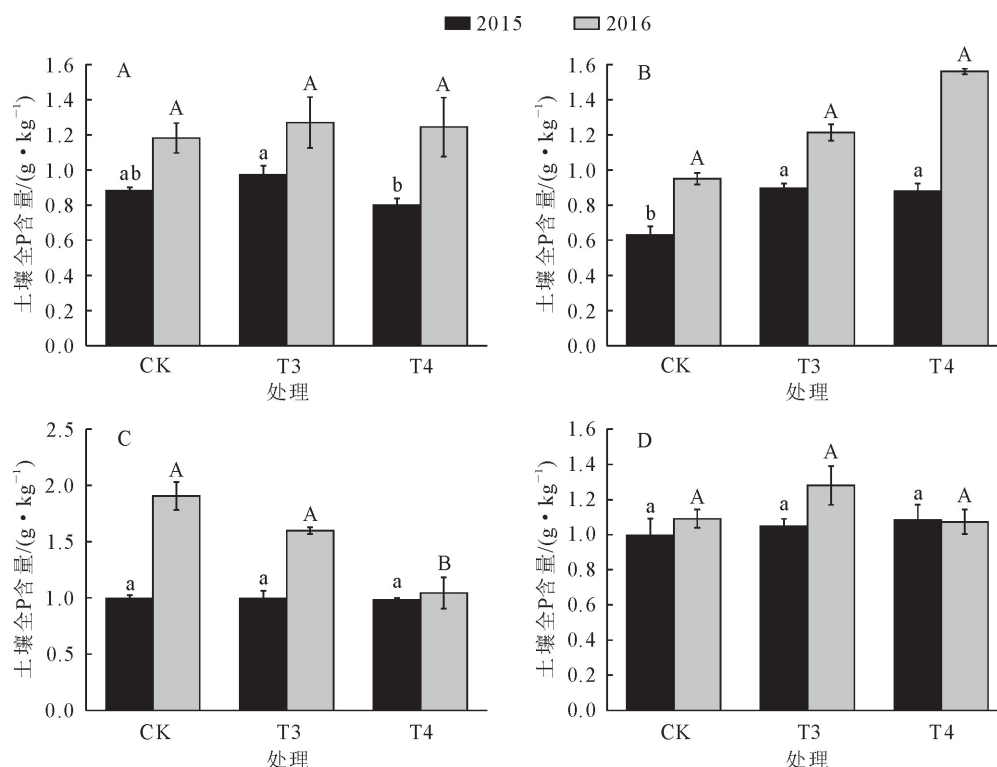


图6 不同碱胁迫条件下4种植物根际土壤全P含量变化特征

Fig. 6 Variation characteristics of rhizosphere soil total P content of four plant species under different alkali stress conditions

盐胁迫下第1年试验结果表明,黑果枸杞的土壤全K含量呈下降趋势,T2与CK间呈显著性差异($P<0.05$);沙棘的土壤全K含量呈上升趋势;柽柳和银水牛果的土壤全K含量呈先升后降的趋势。耐盐植物种植第2年后,黑果枸杞的土壤全K含量变化不大;沙棘和银水牛果的土壤全K含量呈降低趋势;柽柳的土壤全K含量呈先降后升趋势。4种植物的土壤全K含量整体上均为第2年大于第1年(图7)。

碱胁迫下第1年试验结果表明,黑果枸杞的土壤全K含量呈降低趋势,CK与其他处理间呈显著性差异($P<0.05$);沙棘和银水牛果的土壤全K含量呈先升后降趋势,在T3达到最大值,与CK间呈显著性差异($P<0.05$);柽柳的土壤全K含量变化不大。第2年试验结果表明,黑果枸杞的土壤全K含量变化不大;沙棘土壤全K含量呈先升后降趋势,在T3达到最大值,与T4处理间呈显著性差异($P<0.05$);柽柳和银水牛果的土壤全K含量呈降

低趋势,CK与T4间呈显著性差异($P<0.05$)。第2年的土壤全K含量均大于第1年,且碱胁迫下的土壤全K含量整体上低于盐胁迫下(图8)。

2.2 根际土壤微生物对不同类型碳源的利用强度

由图9表明,盐碱土壤微生物对氨基酸类、胺类、多聚物类、酚酸类、羧酸类和碳水化合物类的利用强度存在较大差异。黑果枸杞的不同浓度盐胁迫降低了土壤微生物对碳水化合物类、羧酸类、酚酸类和氨基酸类碳源的利用比例,而多聚物类和胺类的利用比例升高;在不同浓度碱胁迫下除酚酸类外,其余和盐胁迫具有一致性。沙棘的不同浓度盐胁迫降低了土壤微生物对氨基酸类、酚酸类和碳水化合物类碳源的利用比例,胺类、多聚物类和羧酸类的利用比例升高;但在不同浓度碱胁迫下,氨基酸类、多聚物类和碳水化合物类的利用比例升高,胺类、酚酸类的利用比例降低,羧酸类的利用比例在中度碱胁迫下升高,在重度碱胁迫下降低。柽柳种植下,碳水化合物类和羧酸类的利用比例在不同盐碱胁迫下

呈降低趋势;对多聚物类的利用比例呈升高趋势;氨基酸类化合物的利用比例在盐胁迫下降低,而在碱胁迫下呈升高的趋势;酚酸类的利用比例在盐胁迫下变化不大,在碱胁迫下呈降低趋势。胺类的利用比例在盐碱胁迫下整体呈上升趋势。银水牛果种植下,羧酸类和氨基酸类的利用比例在盐胁迫下呈降

低,而在碱胁迫下呈升高趋势;多聚物类的利用比例在盐胁迫下升高,而在碱胁迫下呈降低趋势;不同盐碱胁迫对碳水化合物类的利用率呈降低趋势;酚酸类的利用比例在盐胁迫下呈降低,而在碱胁迫下呈上升趋势;胺类的利用比例在盐碱胁迫下整体呈上升趋势。

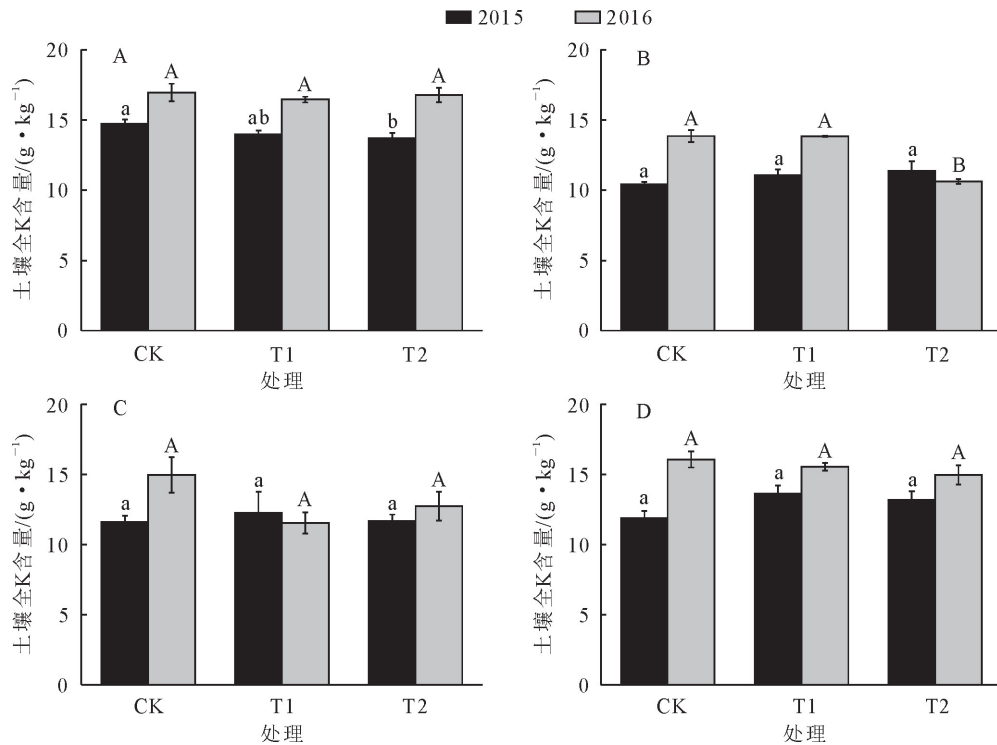


图 7 不同盐胁迫条件下 4 种植物根际土壤全 K 含量变化特征

Fig. 7 Variation characteristics of rhizosphere soil total K content of four plant species under different salt stress conditions

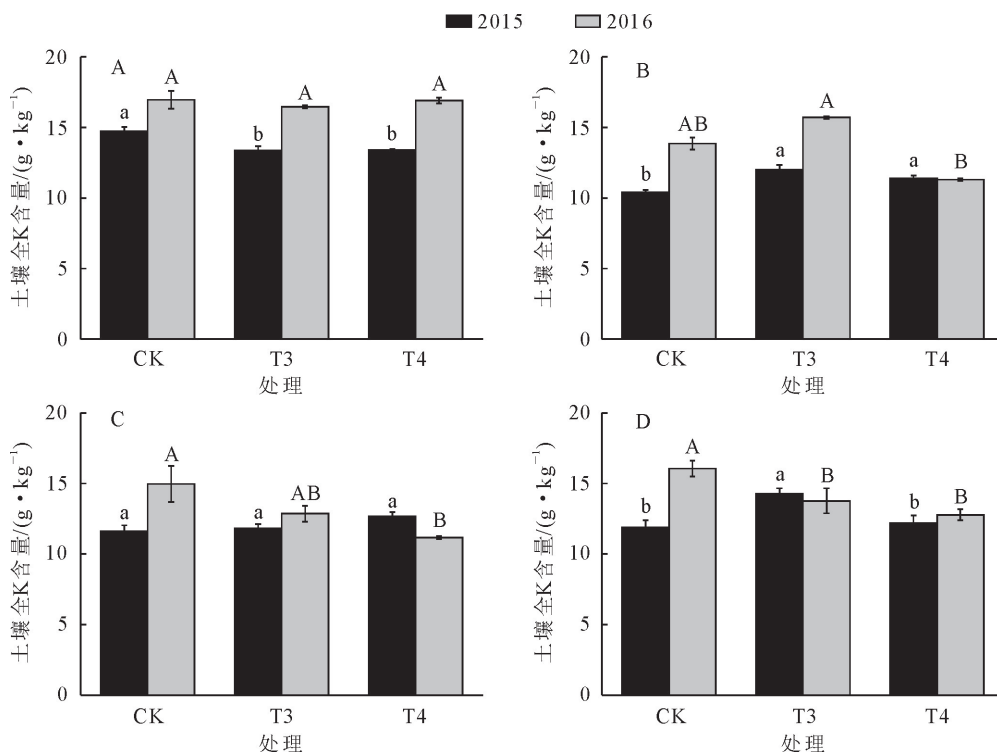
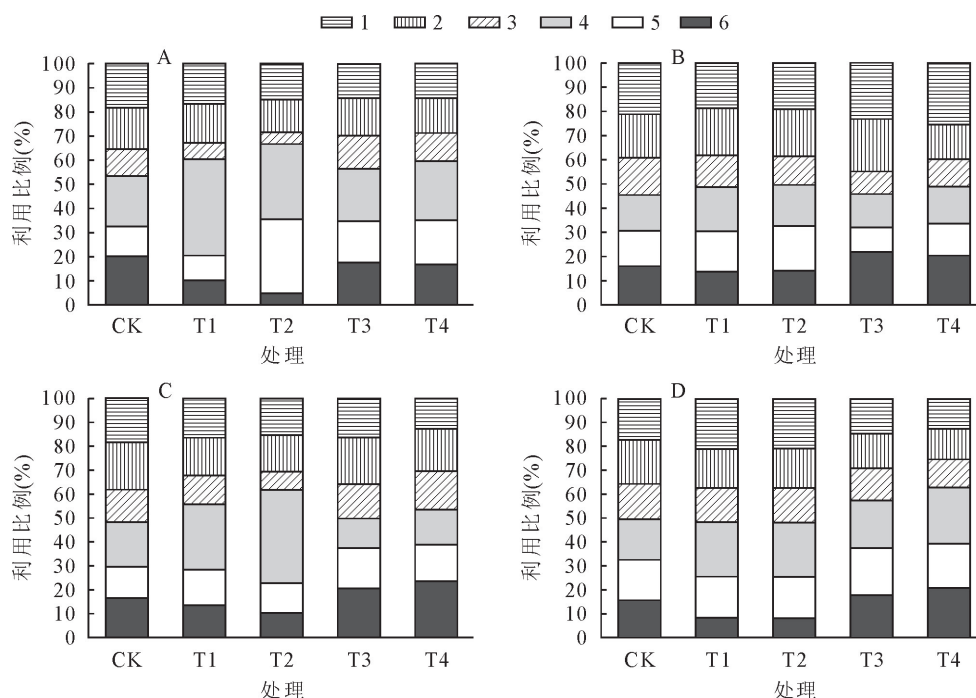


图 8 不同碱胁迫条件下 4 种植物根际土壤全 K 含量变化特征

Fig. 8 Variation characteristics of rhizosphere soil total K content of four plant species under different alkali stress conditions



注:1 代表碳水化合物类;2 代表羧酸类;3 代表酚酸类;4 代表多聚物类;5 代表胺类;6 代表氨基酸类。

图9 不同处理下土壤微生物对不同种碳源的利用比例

Fig. 9 Fraction of utilization for different type of carbon sources by microbes under different treatments

2.3 根际土壤微生物利用碳源的 AWCD 与多样性指数分析

不同程度盐碱胁迫在4种植物作用下土壤微生物利用不同种碳源的情况可以用多样性指数表示(表2)。CK下黑果枸杞的AWCD、Shannon指数分别为0.41和3.17,在胁迫条件下AWCD、Shannon指数都高于CK,但是丰富度、Shannon均匀度和Simpson指数在不同处理间没有明显差异,怪柳与黑果枸杞表现的变化规律相似,说明胁迫刺激会增强其微生物的活性。沙棘和银水牛果的AWCD、Shannon指数都随着胁迫强度增加而降低,且碱胁迫下微生物活性低于盐胁迫。从不同程度胁迫条件下土壤微生物群落AWCD值(96h)结果来看,怪柳>黑果枸杞>银水牛果>沙棘,且在盐胁迫刺激下AWCD均高于碱胁迫(表2)。究其原因,在4种植物中怪柳对胁迫抗性最强,在重度胁迫下仍能正常生长,根系完整,保持良好的微生物生存环境。对各处理土样之间的AWCD、丰富度指数、Shannon指数、Shannon均匀度及Simpson指数值进行方差分析(表3),表明各处理间AWCD和Shannon指数的值有极显著差异($P<0.01$),丰富度指数有显著差异($P<0.05$)。

皮尔逊相关性分析发现,土壤全N与AWCD呈极显著正相关($P<0.01$),与Shannon指数呈显著正相关($P<0.05$),土壤全P与丰富度指数呈显著正相关($P<0.05$),土壤有机质与AWCD呈极显

著正相关($P<0.01$)(表4)。

2.4 根际土壤微生物群落功能多样性的主成分分析

对20个不同处理下培养96h的31种碳源利用情况进行PCA分析。主成分1、主成分2、主成分3和主成分4依次解释变量方差的66.52%、7.15%、4.04%和3.43%,PC1和PC2的累计贡献率达到73.67%,是变异的主要来源,可以解释变异的绝大部分信息(表5)。得出31种碳源在2个主成分上的载荷值(表6)。由表6可知,除丙酮酸甲酯外,其他碳源均集中在第1主成分上,尤其是L-天冬酰胺、甘氨酸-L-谷氨酸和苯乙基胺等碳源与第一主成分相关性最高。而影响主成分2的主要碳源是r-羟基丁酸、I-赤藻糖醇、L-苏氨酸、D-苹果酸和丙酮酸甲酯。综合第1、2主成分结果,被盐碱土壤微生物群落特异利用的碳源非常广泛,氨基酸类、胺类、多聚物类、双亲化合物、羧酸类和糖类等6类化合物都是微生物利用的碳源。

3 结论与讨论

种植4种盐生植物后能有效提高土壤全磷和全钾含量,土壤有机质和全氮含量变化相对较小。盐胁迫下根际土壤养分含量大于碱胁迫下根际土壤养分含量,中度盐碱胁迫处理下大于重度盐碱胁迫。

怪柳和黑果枸杞根际土壤微生物活性大于沙棘和银水牛果,根际微生物利用比例较高的碳源类型为胺类、多聚物类、糖类,其次是氨基酸类和羧酸类。

表 2 盐碱土壤微生物群落 96 h 多样性指数和 AWCD 值

Table 2 AWCD value and diversity index of saline-alkali soil under different treatments

处理方式	植物	平均颜色变化率	丰富度指数	多样性指数	均匀度指数	Simpson 指数
CK	黑果枸杞	0.41±0.05a	31.00±0.00a	3.17±0.04a	0.94±0.01a	0.95±0.00a
	沙棘	0.30±0.07a	31.00±0.00a	3.36±0.04a	0.98±0.01a	0.96±0.00a
	银水牛果	0.39±0.08a	31.00±0.00a	3.28±0.06a	0.96±0.02a	0.96±0.00a
	怪柳	0.23±0.02a	30.33±0.02a	3.33±0.10a	0.97±0.02a	0.96±0.01a
中度盐胁迫 T1	黑果枸杞	0.60±0.02a	31.00±0.00a	3.21±0.10a	0.89±0.02a	0.96±0.04a
	沙棘	0.36±0.08b	23.33±1.76b	2.49±0.59b	0.94±0.03a	0.94±0.01a
	银水牛果	0.43±0.02a	31.00±0.00a	3.30±0.07a	0.96±0.02a	0.96±0.01a
	怪柳	0.79±0.06a	31.00±0.02a	3.41±0.01a	0.99±0.00a	0.97±0.00a
重度盐胁迫 T2	黑果枸杞	0.55±0.03a	31.00±0.07a	3.23±0.20a	0.85±0.11a	0.89±0.02a
	沙棘	0.24±0.02b	25.67±4.18b	1.50±0.22b	0.92±0.06a	0.95±0.02a
	银水牛果	0.37±0.09b	31.00±0.00a	3.30±0.07a	0.96±0.02a	0.96±0.01a
	怪柳	0.73±0.01a	31.00±0.01a	3.23±0.24a	0.93±0.01a	0.93±0.02a
中度碱胁迫 T3	黑果枸杞	0.53±0.04a	31.00±0.00a	3.26±0.01a	0.95±0.00a	0.95±0.00a
	沙棘	0.16±0.01b	23.00±0.00b	3.38±0.01a	0.95±0.00a	0.96±0.00a
	银水牛果	0.16±0.03b	26.67±4.33b	3.01±0.31a	0.92±0.07a	0.95±0.06a
	怪柳	0.45±0.03a	31.00±0.12a	3.33±0.02a	0.97±0.01a	0.96±0.00a
重度碱胁迫 T4	黑果枸杞	0.57±0.06a	31.00±0.00a	3.28±0.02a	0.96±0.01a	0.96±0.00a
	沙棘	0.05±0.01b	23.33±7.67b	2.84±0.48a	0.95±0.02a	0.91±0.00a
	银水牛果	0.04±0.01b	22.17±9.17c	1.80±0.67b	0.92±0.04a	0.90±0.09a
	怪柳	0.56±0.02a	31.00±0.02a	3.40±0.03a	0.99±0.01a	0.97±0.00a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

表 3 各处理组 AWCD 和多样性的方差分析

Table 3 ANOVA results of AWCD and diversity indexes for different treatments

变量	方差来源	偏差平方和	自由度 d_f	均方差	F
AWCD	组间	2.603	19	0.137	22.738**
	组内	0.241	40	0.006	
丰富度指数	组间	1399.6	19	73.66	2.342*
	组内	1258	40	31.45	
Shannon 指数	组间	15.96	19	0.84	4.287**
	组内	7.83	40	0.196	
Shannon 均匀度	组间	0.504	19	0.027	1.914
	组内	0.153	40	0.007	
Simpson 指数	组间	0.141	19	0.007	1.863
	组内	0.103	40	0.003	

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

表 4 土壤微生物多样性指数与土壤化学性质的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of soil microbial diversity index and soil chemical properties

项目	平均吸光度	Shannon 指数	丰富度指数
全 N	0.981**	0.702*	0.283
全 P	-0.192	0.005	0.702*
全 K	0.549	0.368	0.659
有机质	0.874**	0.637	0.545

土壤全 N 与微生物活性呈极显著正相关,与微生物 Shannon 指数呈显著正相关,土壤全 P 与微生

物丰富度指数呈显著正相关,土壤有机质与微生物活性呈极显著正相关。因此,本研究结果为盐碱地生态修复过程中养分和微生物多样性的变化提供新的证据,为盐碱地开发利用提供技术支撑。

表 5 主成分的贡献率与累计贡献率

Table 5 Proportion and cumulative of principles

主成分	PC1	PC2	PC3	PC4
贡献率(%)	66.517	7.150	4.040	3.430
累计贡献率(%)	66.517	73.667	77.707	81.138

黑果枸杞是宁夏盐碱地重要的经济作物之一,其他 3 种植物也具有极强的耐盐特性,种植耐盐植物可较好地改良盐碱地,提高土壤肥力^[18]。本研究发现,4 种耐盐植物在种植 1 a 后,不同处理条件下均能显著提高土壤全 P 和全 K 的含量,主要原因是宁夏土壤的 P 元素和 K 元素比较丰富,耐盐植物对土壤全 P 和全 K 的转化速率大于植物自身的消耗速率;而本试验采用的农田土壤有机质含量较低,仅为 1.0‰~1.5‰,有研究表明随着盐浓度的增加玉米根系分泌物中的有机酸分泌速率降低^[19],导致植物生长过程中消耗的有机质大于植物根系分泌的有机物,所以本试验种植耐盐植物后的第 2 年的土壤有机质和全 N 含量(除黑果枸杞和沙棘)在不同处理下呈降低趋势且小于第 1 年。整体上种植 4 种耐盐植物在盐胁迫条件下的土壤养分含量高于碱胁迫条件下的土壤养分含量,中度盐碱胁迫处理下高于

重度盐碱胁迫,因为碱胁迫 pH 高,会对植物产生更强的抑制效应^[20],而且部分耐盐植物会出现“低促高抑”现象^[21-23]。

表 6 ECO 板上 31 种碳源在第 1、2 主成分上的载荷值

Table 6 Carbon substrate loaded on the first and second principal components in analysis of ECO data

碳源 化学类别	底物	分子式	第 1 主成分	第 2 主成分
氨基酸类	L-精氨酸	C ₄ H ₁₄ N ₄ O ₂	0.891	0.117
	L-天冬酰胺酸	C ₄ H ₈ N ₂ O ₃	0.909	-0.187
	L-苯基丙氨酸	C ₉ H ₁₁ NO ₂	0.773	-0.294
	L-丝氨酸	C ₃ H ₇ NO ₃	0.877	0.132
	L-苏氨酸	C ₄ H ₉ NO ₃	0.732	-0.424
	甘氨酸-L-谷氨酸	C ₇ H ₁₂ N ₂ O ₅	0.926	0.183
胺类	苯乙基胺	C ₈ H ₁₁ N	0.927	0.163
	腐胺	C ₄ H ₁₂ N ₂	0.847	0.289
多聚物类	吐温 40	—	0.833	-0.337
	吐温 80	—	0.865	-0.19
	a-环状糊精	C ₃₆ H ₆₀ O ₃₀	0.872	-0.153
	肝糖	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	0.859	0.191
双亲化合物	丙酮酸甲酯	C ₄ H ₆ O ₃	-0.267	0.436
	葡萄糖-1-磷酸盐	C ₆ H ₁₃ O ₉ P	0.855	-0.062
	D,L-a-甘油	C ₃ H ₉ O ₆ P	0.882	-0.162
羧酸类	2-羟基苯甲酸	C ₇ H ₆ O ₃	0.708	-0.335
	4-羟基苯甲酸	C ₇ H ₆ O ₃	0.777	-0.121
	D-葡萄糖氨基酸	C ₆ H ₁₃ NO ₆	0.862	-0.082
	D-半乳糖醛酸	C ₆ H ₁₀ O ₇	0.613	-0.09
	r-羟基丁酸	C ₄ H ₈ O ₃	0.721	0.638
	衣康酸	C ₅ H ₆ O ₄	0.706	-0.1
	a-丁酮酸	C ₄ H ₆ O ₃	0.797	-0.07
	D-苹果酸	C ₄ H ₆ O ₅	0.772	0.493
	D-半乳糖酸 γ 内酯	C ₆ H ₁₀ O ₆	0.872	0.099
	D-纤维二糖	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	0.873	0.019
糖类	a-D-乳糖	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	0.851	-0.033
	β-甲基 D-葡萄糖苷	C ₇ H ₁₄ O ₆	0.884	-0.004
	D-木糖	C ₅ H ₁₀ O ₅	0.792	0.012
	I-赤藻糖醇	C ₄ H ₁₀ O ₄	0.729	0.598
	D-甘露醇	C ₆ H ₁₄ O ₆	0.889	0.167
	N-乙酰基-D-葡萄糖胺	C ₈ H ₁₅ NO ₆	0.832	-0.331

不同植物对盐碱土壤改良效果也是不同的。一般来说,植物的耐盐能力是由植物的遗传特性决定的,因植物特性不同而有差异^[24]。有研究表明,种植新葵 4 号(向日葵)能显著提高根际土壤碱解 N、速效 P 和速效 K 的含量且效果最佳,但种植新葵 6 号(向日葵)显著降低了根际土壤速效 P 和速效 K 的含量,提高了土壤全 N 含量^[11]。本研究在沙棘作用下的土壤有机质含量在第 2 年时最高,这与植物根系的大小直接关系,根系的作用面积越大,土壤可以吸收根系分泌的有机物就越多;第 2 年柽柳在

T2—T4 处理下和银水牛果在 T1—T4 处理下的土壤全 N 含量均小于第 1 年,但第 2 年黑果枸杞和沙棘的土壤全 N 含量大于第 1 年,能表明随着盐生植物的生长,通过植物根系与土体之间的相互作用,有助于促进土壤中 N 元素含量的提高。根系分泌物的种类是构成不同植物根际微生态特征的关键因素^[25],不同植物的根际分泌物的种类和数量有差异,对根际土壤微环境中的酶活性、养分循环,甚至是根际微生物的生长代谢和多样性都有较大影响^[26],在本研究中,种植沙棘和柽柳对根际土壤养分的影响较大,而黑果枸杞与银水牛果的影响较小,可能是 4 个不同耐盐植物在根系分泌物的种类和数量上有差异,或者黑果枸杞和银水牛果的根系没有其他植物发达,而这些差异使沙棘和柽柳对根际土壤微环境的影响最为显著。

Biolog-ECO 板上每孔的平均吸光度值(AWCD)反映了微生物活性的大小及对碳源利用能力的强弱,对土壤环境胁迫的反映比较敏感,在一定程度上能表征微生物群落数量、结构特性^[27-29],其值越大,说明微生物群落的密度、活性等指标也越高^[30]。选取特定时间的 AWCD 值进行数据分析,是补偿环境因子对试验结果影响的最好方法^[25,31-33],也是利用微生物群落碳源代谢能力来快速评估细菌群落时间和空间差异性的最好方式,可作为评价土壤微生物活性的有效指标^[34-36]。本试验利用 Biolog-ECO 研究盐碱土壤微生物功能多样性结果表明,在中度盐碱胁迫下,4 种植物根际土壤微生物的多样性未发生显著变化,而重度盐碱胁迫对沙棘和银水牛果根际土壤微生物有明显的抑制作用,而黑果枸杞和柽柳仍能保持较高活性,这可能是因为逆境刺激作用。从 4 种植物不同程度胁迫条件下土壤微生物群落 AWCD 值(96 h)结果来看,柽柳>黑果枸杞>银水牛果>沙棘,且在 NaCl 胁迫刺激下 AWCD 都高于 NaHCO₃ 胁迫。究其原因,柽柳对胁迫抗性最强,在重度胁迫下仍能正常生长,根系完整,保持良好的微生物生存环境。各处理土样的 AWCD、丰富度指数、Shannon 指数、Shannon 均匀度及 Simpson 指数值方差分析表明,各处理间 AWCD 和 Shannon 指数的值有极显著差异($P < 0.01$),能更好地表征不同处理间微生物活性的差异。柽柳和黑果枸杞在胁迫环境下会促进微生物的活性,起到改善盐碱土壤微环境的作用。Shannon 指数反映微生物群落碳源利用多样性水平,即微生物功能多样性,多样性指数数值越大,表明土壤微生物群落功能多样性越高,反之,则多样性越低。在本试验结果中 Shannon 指数的结果与 AWCD 结果一

致,不同植物处理之间存在差异。丰富度值(Richness)指被利用的碳源的总数目,Simpson 指数用于评估优势度,但是结果并没有表现出明显的规律。根据化学基团的性质将 ECO 板的 31 种碳源分为 6 类,分别是胺类、氨基酸类、糖类、羧酸类、双亲化合物类和多聚物类,盐碱胁迫后的土壤利用比例较高的碳源类型为胺类、多聚物类、糖类,其次是氨基酸类、羧酸类化合物。

本研究发现,不同的植物处理方式使根际土壤的营养发生了变化,根际土壤营养的改变导致根际微生物群落活性、代谢方式和功能多样性发生变化;而根际微生物不同的群落结构和功能又会影响根际土壤中各种养分的循环转化过程,从而影响土壤养分的数量及形态。整体而言,4 种植物措施下盐碱根际土壤养分得到改善,为根际土壤中一些微生物种类的繁殖创造了有利条件,激发根际微生物的活性,其根系可能产生特异根系分泌物并形成适应于此根系分泌物的微生物群落,间接提高了土壤中微生物栖息地的异质性^[37],因此土壤微生物的多样性被增加,而 N 和有机质含量是影响微生物活性的重要因素。在盐碱土改良时可针对不同胁迫条件有目的地选择合适的植物种类进行修复,以期达到最佳改良效果。

参考文献:

- [1] 余叔文,汤章城.植物生理与分子生物学[M].北京:科学出版社,1998:34-56.
- [2] 潘瑞炽,王晓菁,李娘辉.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2008:13-22.
- [3] 逢焕成,李玉义.西北沿黄灌区盐碱地改良与利用[M].北京:科学出版社,2014:10-26.
- [4] LING N, CHEN D M, GUO H, *et al.* Differential responses of soil bacterial communities to long-term N and P inputs in a semi-arid steppe[J]. *Geoderma*, 2017, 292: 25-33.
- [5] HUANG Z, XU Z, CHEN C. Effect of mulching on labile soil organic matter pools, microbial community functional diversity and nitrogen transformations in two hardwood plantations of subtropical Australia[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(2): 229-239.
- [6] 陈伟立,李娟,朱红惠,等.根际微生物调控植物根系构型研究进展[J].生态学报,2016,36(17):5285-5297.
CHEN W L, LI J, ZHU H H, *et al.* A review of the regulation of plant root system architecture by rhizosphere microorganisms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(17): 5285-5297. (in Chinese)
- [7] 吉丽.盐碱胁迫下大豆根际微生物多样性分析[D].长春:吉林农业大学,2017.
- [8] 崔晓辰.根际微生物与土壤植物关系的研究进展[J].现代农业研究,2021,27(5):34-35,49.
CUI X Z. Research progress on relationship between rhizosphere microorganisms and soil plants[J]. *Modern Agriculture Research*, 2021, 27(5): 34-35, 49. (in Chinese)
- [9] 王博,覃芳,史艳财,等.小花异裂菊根际与非根际微生物功能多样性比较[J].广西师范大学学报:自然科学版,2022,40(6):237-246.
WANG B, QIN F, SHI Y C, *et al.* Comparison of microbial functional diversity between rhizosphere and non-rhizosphere of *Heteroplexis microcephala*, an peculiar plants in karst area[J]. *Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition*, 2022, 40(6): 237-246. (in Chinese)
- [10] 李凤霞,郭永忠,许兴.盐碱地土壤微生物生态特征研究进展[J].安徽农业科学,2011,39(23):14065-14067,14174.
LI F X, GUO Y Z, XU X. Research progress of the microbial characteristics of saline-alkali soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(23): 14065-14067, 14174. (in Chinese)
- [11] 张旭龙,马森,吴振振,等.不同油葵品种对盐碱地根际土壤酶活性及微生物群落功能多样性的影响[J].生态学报,2017,37(5):1659-1666.
ZHANG X L, MA M, WU Z Z, *et al.* Effects of helianthus annuus varieties on rhizosphere soil enzyme activities and microbial community functional diversity of saline-alkali land in Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1659-1666. (in Chinese)
- [12] 杜澄鑫,谢宝明,蔡洪生,等.大庆盐碱地九种植物根际土壤微生物群落结构及功能多样性[J].生态学报,2016,36(3):740-747.
DU Y X, XIE B M, CAI H S, *et al.* Structural and functional diversity of rhizosphere microbial community of nine plant species in the Daqing saline-alkali soil region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 740-747. (in Chinese)
- [13] 李凤霞,王世荣,吴霞,等.长期施肥对宁夏灌淤土壤微生物多样性的影响[J].土壤通报,2016,47(5):1134-1141.
LI F X, WANG S R, WU X, *et al.* Effect of long-term fertilization on soil microbial diversity in irrigation silting soil of Ningxia[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(5): 1134-1141. (in Chinese)
- [14] 柯英,李凤霞.不同改良年限对银川平原盐碱地土壤微生物区系及多样性的影响[J].河南农业科学,2014,43(6):75-79.
KE Y, LI F X. Study on microbial flora and diversity in saline-alkali soil improved for different years in Yinchuan Plain[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(6): 75-79. (in Chinese)
- [15] RILEY D, BARBER S A. Salt accumulation at the soybean (*Glycine max.* (L.) Merr.) root-soil interface[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1970, 34(1): 154-155.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [17] CLASSEN A T, BOYLE S I, HASKINS K E, *et al.* Community-level physiological profiles of bacteria and fungi: plate type and incubation temperature influences on contrasting soils[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, 44(3): 319-321.
- [18] 哈玲津,马媛媛,杨静慧.四种野生植物对天津盐碱地土壤改良效果的研究[J].北方园艺,2009(4):181-184.
HA L J, MA Y Y, YANG J H. Research of salt and alkali soil improvement by four kinds of wild plants[J]. *Northern Horticulture*, 2009(4): 181-184.

- ticulture, 2009(4):181-184. (in Chinese)
- [19] TAHERI S, RONAGHI A, FASAEI R G, *et al.* Co-ordination of root salinity and shoot zinc level with rhizosphere organic acid secretion in maize[J]. *Rhizosphere*, 2020, 14:100197.
- [20] GONG B, WEN D, BLOSZIES S, *et al.* Comparative effects of NaCl and NaHCO₃ stresses on respiratory metabolism, antioxidant system, nutritional status, and organic acid metabolism in tomato roots[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2014, 36(8):2167-2181.
- [21] 许鹤, 于崧, 于立河, 等. 盐碱胁迫对芸豆幼苗生长及根际土壤化学性质的影响[J]. *北方园艺*, 2021(12):1-8.
- XU H, YU S, YU L H, *et al.* Effects of saline-alkali stress on common bean seedling growth and rhizosphere soil chemical properties[J]. *Northern Horticulture*, 2021(12):1-8. (in Chinese)
- [22] AZIZ I, KHAN M A. Experimental assessment of salinity tolerance of *Ceriops tagal* seedlings and saplings from the Indus delta, Pakistan[J]. *Aquatic Botany*, 2001, 70(3):259-268.
- [23] 张凌, 高翱, 张芸香. 4个树种对盐碱胁迫的响应[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(6):56-60, 242.
- ZHANG L, GAO A, ZHANG Y X. Responses of four tree species to saline-alkali stress[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(6):56-60, 242. (in Chinese)
- [24] 隋德宗, 王保松, 施士争, 等. 灌木柳无性系苗期耐盐性指标的筛选和综合评价[J]. *西北林学院学报*, 2011, 26(1):61-64.
- SUI D Z, WANG B S, SHI S Z, *et al.* Selection of identification index and comprehensive evaluation of salt tolerance at seeding stage of shrub willow clones[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(1):61-64. (in Chinese)
- [25] 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. (in Chinese)
- [26] 何欢, 王占武, 胡栋, 等. 根系分泌物与根际微生物互作研究进展[J]. *河北农业科学*, 2011, 15(3):69-73.
- HE H, WANG Z W, HU D, *et al.* Progress on interactions between root exudates and rhizosphere microorganisms[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2011, 15(3):69-73. (in Chinese)
- [27] 宋日权, 褚贵新, 张瑞喜, 等. 覆砂对土壤入渗、蒸发和盐分迁移的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(2):282-288.
- SONG R Q, ZHU G X, ZHANG R X, *et al.* Effects of sand mulching on soil infiltration, evaporation, and salt distribution[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(2):282-288. (in Chinese)
- [28] DANG W, GAO C H, ZHANG Q, *et al.* Screening of preprocessing method of Biolog for soil microbial community functional diversity[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2015, 16(10):2247-2251, 2255.
- [29] 毛如志, 王文鹏, 李彬, 等. Biolog ECO 和 DGGE 数据几种分析方法的比较研究[J]. *土壤与作物*, 2014, 3(2):68-75.
- MAO R Z, WANG W P, LI B, *et al.* Comparison among several methods for Biolog ECO and DGGE data analysis[J]. *Soils and Crops*, 2014, 3(2):68-75. (in Chinese)
- [30] 徐鹏程, 冷翔鹏, 刘更森, 等. 盐碱土改良利用研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(5):293-298.
- XU P C, LENG X P, LIU G S, *et al.* Research progress on improvement and utilization of saline-alkali soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42(5):293-298. (in Chinese)
- [31] 李志斐, 谢骏, 郁二蒙, 等. 基于 Biolog-ECO 技术分析杂交鳊和大口黑鲈高产池塘水体微生物碳代谢特征[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(1):185-192.
- LI Z F, XIE J, YU E M, *et al.* Carbon metabolic diversity of microbial communities in intensive ponds for hybrid snakehead and largemouth bass based on Biolog-ECO plates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1):185-192. (in Chinese)
- [32] 楼骏, 柳勇, 李延. 高通量测序技术在土壤微生物多样性研究中的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(15):256-260.
- LOU J, LIU Y, LI Y. Review of high-throughput sequencing techniques in studies of soil microbial diversity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(15):256-260. (in Chinese)
- [33] 贺纪正, 李晶, 郑袁明. 土壤生态系统微生物多样性-稳定性关系的思考[J]. *生物多样性*, 2013, 21(4):412-421.
- HE J Z, LI J, ZHENG Y M. Thoughts on the microbial diversity-stability relationship in soil ecosystems[J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(4):412-421. (in Chinese)
- [34] 李凤霞, 王学琴, 郭永忠, 等. 宁夏引黄灌区不同盐化程度土壤酶活性及微生物多样性研究[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1):61-65.
- LI F X, WANG X Q, GUO Y Z, *et al.* Study of microbial diversity and the soil enzyme activity in different salinized soil in Ningxia Yellow River irrigation region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(1):61-65. (in Chinese)
- [35] 靳振江, 邵继承, 潘根兴, 等. 荆江地区湿地与稻田有机碳、微生物多样性及土壤酶活性的比较[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(18):3773-3781.
- JIN Z J, TAI J C, PAN G X, *et al.* Comparison of soil organic carbon, microbial diversity and enzyme activity of wetlands and rice paddies in Jingjiang Area of Hubei, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(18):3773-3781. (in Chinese)
- [36] 李鑫, 张会慧, 岳冰冰, 等. 桑树-大豆间作对盐碱土碳代谢微生物多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7):1825-1831.
- LI X, ZHANG H H, YUE B B, *et al.* Effects of mulberry-soybean intercropping on carbon-metabolic microbial diversity in saline-alkaline soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7):1825-1831. (in Chinese)
- [37] PEKKA S, VEIKKO H. Habitat patchiness affects decomposition and faunal diversity: a microcosm experiment on forest floor[J]. *Oecologia*, 1998, 116(3):390-396.