

DOI: 10.5846/stxb201303180448

邱权, 李吉跃, 王军辉, 王宁, 孙奎, 何茜, 苏艳, 潘昕. 西宁南山 4 种灌木根际和非根际土壤微生物、酶活性和养分特征. 生态学报, 2014, 34(24): 7411-7420.

Qiu Q, Li J Y, Wang J H, Wang N, Sun K, He Q, Su Y, Pan X. Microbes, enzyme activities and nutrient characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils under four shrubs in Xining Nanshan, Prefecture, China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(24): 7411-7420.

## 西宁南山 4 种灌木根际和非根际土壤微生物、 酶活性和养分特征

邱 权<sup>1</sup>, 李吉跃<sup>1,\*</sup>, 王军辉<sup>2</sup>, 王 宁<sup>3</sup>, 孙 奎<sup>3</sup>, 何 茜<sup>1</sup>, 苏 艳<sup>1</sup>, 潘 昕<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学林学院, 广州 510642; 2. 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

3. 青海省农林科学院野生植物资源研究所, 西宁 810016)

**摘要:** 西宁南山区植被退化情况严重, 人工造林植被恢复被看作是最有效的恢复手段, 其中选择合适造林树种尤为关键。选择人工种植的唐古特白刺 *Nitraria tangutorum*、柠条 *Caragana korshinskii*、西北小檗 *Berberis verna* 和短叶锦鸡儿 *Caragana brevifolia* 共 4 种灌木树种造林试验区为研究对象, 通过测定根际和非根际土壤微生物数量、酶活性及养分含量, 综合比较种植 4 种灌木树种根际和非根际土壤肥力差异, 科学评价其对土壤的改善效果。研究表明: (1) 土壤微生物数量和酶活性总体呈现出根际高于非根际的规律, 仅放线菌数量和脲酶活性出现了根际低于非根际现象。(2) 土壤养分方面, 4 种灌木根际土壤和非根际土壤 pH 值、全 N、全 P、全 K 含量差异不显著, 有机质、有效 P、速效 K 含量均呈现出根际 > 非根际, 而碱解 N 则是根际 < 非根际。(3) 土壤酶活性与土壤微生物数量相关性不显著, 土壤有机质含量与土壤细菌、真菌数量呈极显著正相关, 有效 P 含量与土壤细菌、真菌和放线菌数量呈极显著正相关, 速效 K 含量与过氧化氢酶、酸性磷酸酶活性呈显著正相关, 全 N、碱解 N 含量均与脲酶活性呈显著正相关。(4) 从土壤肥力综合水平来看, 根际 > 非根际, 其中根际土壤中西北小檗 > 柠条 > 短叶锦鸡儿 > 唐古特白刺, 研究结果表明西北小檗和柠条能大幅提高土壤肥力, 改良土壤效果较好。

**关键词:** 根际和非根际; 土壤微生物; 土壤酶活性; 土壤养分; 西宁南山

## Microbes, enzyme activities and nutrient characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils under four shrubs in Xining Nanshan, Prefecture, China

QIU Quan<sup>1</sup>, LI Jiyue<sup>1,\*</sup>, WANG Junhui<sup>2</sup>, WANG Ning<sup>3</sup>, SUN Kui<sup>3</sup>, HE Qian<sup>1</sup>, SU Yan<sup>1</sup>, PAN Xin<sup>1</sup>

1 College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2 Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Institute of Wild Plant Resources, Qinghai Academy of Agricultural and Forestry, Xining 810016, China

**Abstract:** Afforestation is the most effective method of revegetation and choosing suitable afforestation tree species is regarded as a key performance criterion. In this study, 4 shrub species (*Nitraria tangutorum*, *Caragana korshinskii*, *Berberis verna* and *Caragana brevifolia*, planted in Xining Nanshan, Prefecture, China in 2009) were studied to measure microbial abundance, enzyme activities and nutrient characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils. The variables measured included abundance of soil bacteria, fungi and actinomycetes, catalase activity, acid phosphatase activity, urease activity, pH, organic matter (OM), total nitrogen (N), total phosphorus (P), total potassium (K), hydrolysis N, available P and available K. The effects of shrubs on soil properties were evaluated by making a comprehensive comparison

**基金项目:** 林业公益性行业科研专项 (200904033); 农业科技成果转化资金项目 (2011GB24320010)

**收稿日期:** 2013-03-18; **网络出版日期:** 2014-03-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljyymy@vip.sina.com

of the soil fertility of rhizosphere and non-rhizosphere soils. The results showed: 1) Microbial abundance and enzyme activities of rhizosphere soil were generally higher than non-rhizosphere soil except for the abundance of actinomycetes and urease activity. Specifically, only the total microbial abundance of rhizosphere soil under *N. tangutorum* was less than that of non-rhizosphere soil, and urease activity in rhizosphere soils under all 4 shrubs were lower than their non-rhizosphere soils; 2) Soil pH, N, P and total K contents of rhizosphere and non-rhizosphere soils were not significantly different. OM, P and available K of rhizosphere soils were significantly higher than non-rhizosphere soils, whereas available N was higher in non-rhizosphere than rhizosphere soils. These results showed that the presence of the 4 shrubs could improve soil OM, available P and available K contents through root aggregation; 3) There was no significant correlation between soil enzyme activities and soil microbial abundance, OM was significantly correlated with soil bacterial and fungal abundance, and soil available P content was significantly correlated with abundance of soil bacteria, fungi and actinomycetes. The soil available P content was significantly correlated with soil catalase and acid phosphatase activities and the soil total N and available N were significantly positively correlated with urease activity. From these results, the correlation between soil nutrients and enzyme activities differed from the correlation between soil nutrients and microbial abundance, thus soil enzyme activities and microbial abundance were proven to have a significant influence on soil nutrients; 4) The results of principal component analysis showed that soil bacterial abundance, fungal abundance, catalase activity, acid phosphatase activity, pH, OM, total N, total K and available P contents showed high factor loadings and these indexes could provide important information on soil fertility. In addition, principal component factor scores and synthetic scores of soil fertility levels showed that soil fertility of rhizosphere soils was significantly higher than non-rhizosphere soils. It showed that the soil fertility of rhizosphere soils ranked as follows: *B. verna* > *C. korshinskii* > *C. brevifolia* > *N. tangutorum*. These results indicated that the soil improvement effect of *B. verna* and *C. korshinskii* were better than the other 2 species, indicating that they may be suitable for afforestation in Xining Nanshan. *B. verna* and *C. korshinskii* could be selected as afforestation tree species to help improve soil fertility and make contributions to revegetation. *N. tangutorum* was not suitable for afforestation in Xining Nanshan. Our research could provide important basic data and theoretical support for choosing suitable afforestation tree species for revegetation by artificial afforestation in Xining Nanshan.

**Key Words:** Rhizosphere and non-rhizosphere; soil microbes; soil enzyme activities; soil nutrients; Xining Nanshan

根际是研究植物、土壤、微生物之间相互联系的重要生态领域<sup>[1]</sup>,很多学者在园林绿化、土壤退化<sup>[2-3]</sup>、人工造林<sup>[4-5]</sup>、土壤修复<sup>[6]</sup>等相关领域已经开展了植物根际相关研究,而且根际土壤与非根际土壤之间土壤特性的差异性研究得到关注较多。土壤酶活性、微生物数量特征及养分特征对于了解土壤质量和养分状况有重要意义<sup>[7-8]</sup>,一直是研究植物根际土壤和非根际土壤特性的热点内容。在现有研究报告中,已有学者针对秦岭山区<sup>[9]</sup>、宁南山区<sup>[10]</sup>、黄河三角洲<sup>[2-3]</sup>、若尔盖湿地<sup>[11]</sup>等地区重点研究了土壤微生物、酶活性及营养元素含量之间相关性以及土壤肥力状况综合评价,但对于青藏高原干旱区根际土壤和非根际土壤相关内容研究较少。在最新的报道中,孟令军等<sup>[12]</sup>对秦岭太白山区 6 种草药根际和非根际土壤研究表明,土壤化学性质与土壤酶活

性之间表现出一定的相关性,而且 6 种草药之间酶活性、化学性质以及综合肥力存在明显差异,而白世红等<sup>[2]</sup>和王迪等<sup>[3]</sup>也得出土壤微生物、酶活性和养分之间存在一定相关性的结论。青海西宁南山位于青海省西宁市南侧,属大陆高原半干旱气候,土壤贫瘠,水土流失严重,植被退化情况严峻,人工造林植被恢复被看作是一项最有效工作,其中树种筛选是该项工作中重点内容。有研究表明,白刺 *Nitraria sibirica*、小叶锦鸡儿 *Caragada microphylla* 等灌木树种通过根际效应对土壤特性产生不同改良效果<sup>[13-14]</sup>,主要与各灌木树种间根系活动规律差异性产生的土壤肥力影响机制不同有关。因此从植物种植后根际和非根际土壤特性角度研究人工种植植物对土壤的改善效果,对于科学筛选和评价造林树种具有重大意义。本研究以 2009 年西宁南山人工栽

植的 4 种灌木造林试验区为研究对象,通过测定根际和非根际土壤酶活性、微生物数量及养分含量,并对土壤肥力进行综合评价,以期通过比较人工种植 4 种灌木改善土壤特性效果差异,对西宁南山区人工造林植被恢复工作中树种筛选提供基础数据和理论支持。

## 1 研究地区概况

造林试验区在青海西宁南山干旱区,位于东经  $101^{\circ}51'—101^{\circ}55'$ 、北纬  $36^{\circ}13'—36^{\circ}28'$ ,属大陆高原半干旱气候。该区四周环山,海拔在 2460—2600 m,属山地阳坡。主要气候特征是:日照时间长,辐射量大,冬季漫长,夏季凉爽,全年平均气温  $6.2^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为 400 mm,年蒸发量为 1363.6 mm,年日照时数为 1939.7 h,雨热同期,最暖月气温  $16—17^{\circ}\text{C}$ ,生长季 180 d。冬春干旱多风,年平均风速为  $1.8\text{ m/s}$ 。土壤为栗钙土,植被以禾本科、菊科、豆科等草本为主,盖度达 35%。

## 2 研究材料与方法

### 2.1 研究材料

选择人工种植的唐古特白刺 *Nitraria tangutorum*、柠条 *Caragana korshinskii*、西北小檗 *Berberis verna* 和短叶锦鸡儿 *Caragana brevifolia* 共 4 种灌木树种为研究对象。此 4 种灌木于 2009 年 8 月进行造林,沿等高线进行水平沟整地,在水平沟上每隔 3 m 挖长 0.8 m、宽 0.6 m、高 0.5 m 的大穴。在试验区内按种类将同种栽植于同一区域内,在每个大穴中均匀栽植 3 杯容器苗。唐古特白刺为蒺藜科 (Zygophyllaceae) 白刺属 (*Nitraria*) 灌木,是我国特有种,分布于西藏东北部、甘肃、青海、新疆、内蒙古西部、宁夏西部、陕西北部的湖盆地区和风沙沿线,具有抗旱、抗寒、抗风沙、耐盐碱、抗热、耐贫瘠等生态适应特性,在稳定沙漠、保护绿洲中起着重要作用。柠条为蝶形花科 (Papilionoideae) 锦鸡儿属 (*Caragana*) 落叶大灌木,产内蒙古 (伊克昭盟西北部、巴彦淖尔盟、阿拉善盟)、宁夏、甘肃 (河西走廊),生于半固定和固定沙地。柠条耐旱、耐寒、耐高温,根系极为发达,主根入土深,株高为 40—70 cm,最高可达 2 m 左右,常为优势种,是优良固沙植物和水土保持植物。西北小檗为小檗科 (Berberidaceae) 小檗属 (*Berberis*) 产于甘

肃、青海、四川,生于河滩地或山坡灌丛中。短叶锦鸡儿为蝶形花科 (Papilionoideae) 锦鸡儿属 (*Caragana*) 灌木,产四川西部、西藏东部、甘肃南部、青海南部,生于 2000—3000 m 的河岸、山谷、山坡杂木林间。

### 2.2 土样采集

土壤样品于 2012 年 8 月采集,根际土壤采集方法参考 Riley 等<sup>[15-16]</sup>的抖落法,即每种灌木在各自分布区里按“S”型路线选择 6 株植物,在土层 0—20 cm 深度下取其根际土壤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,便获得根际土壤,按树种分别混合,按四分法取一部分土壤,3 次重复。非根际土壤在 4 种灌木各自分布区里各选 3 个取样点,于株间处土层 0—20 cm 深度下取出,将所有非根际土壤按四分法取一部分土壤进行混合,3 次重复。

### 2.3 测定方法

#### 2.3.1 土壤微生物测定

土壤微生物数量采用平板接种法<sup>[17]</sup>。细菌选用牛肉膏蛋白胨培养基培养,真菌采用马铃薯葡萄糖琼脂培养基 (PDA) 培养。放线菌采用高氏一号培养基培养,菌种分离和计数采取平板稀释法。将涂好平板的培养皿放入  $28^{\circ}\text{C}$  的培养箱中培养。

#### 2.3.2 土壤酶活性测定

过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,结果以 1 g 风干土壤滴定所需  $0.1\text{ mol/L KMnO}_4$  的体积 ( $\text{mL}_{0.1\text{ mol/L KMnO}_4}$ ) 表示;酸性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,酶活性测定结果以 24 h 后 1 g 土产生的酚的质量 (mg) 表示,本研究采用换算成 1 kg 干土产生酚的质量 (mg) 表示;脲酶采用苯酚钠比色法测定,酶活性测定结果以 24 h 后 1 g 土生成的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的质量 (mg) 表示,本研究采用换算成 1 kg 土生成的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的质量 (mg) 表示<sup>[18-19]</sup>。

#### 2.3.3 土壤化学性质测定

土壤化学分析采用森林土壤标准分析方法<sup>[20]</sup>测定,其中 pH 值采用水:土 = 2.5:1 玻璃电极法;有机质采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法,全氮采用开氏-蒸馏滴定法;全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法;全钾采用氢氧化钠熔融-火焰原子吸收分光光度法;减解氮采用减解扩散法;有效磷采用盐酸-氟化铵提取-钼锑抗比色法;速效钾采用乙酸铵提取-火焰

原子吸收分光光度法。

## 2.4 数据分析

采用 Excel 2007 进行作图, SPSS 19.0 对实验数据进行 ANOVA 方差分析、多重比较 (Duncans 法)、相关性分析以及主成分分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 灌木根际和非根际土壤微生物比较

土壤微生物主要包含细菌、放线菌和真菌 3 大类微生物, 其活动和代谢作用促进或抑制根系分泌物的释放。方差分析和多重比较结果表明, 4 种灌木树种根际和非根际土壤细菌、真菌、放线菌以及土壤微生物总数量均存在显著性差异 ( $P < 0.01$ )。由表 1 可以看出, 4 种灌木树种中西北小蘗根际土壤细菌、真菌、放线菌均显著高于非根际土壤和其它 3 种灌

木根际土壤。而唐古特白刺根际土壤微生物数量在 4 种灌木树种根际土壤中最少, 其细菌和真菌数量与非根际土壤无明显差异, 但放线菌数量显著少于非根际土壤, 导致其微生物总数量仅为  $(233.90 \pm 13.17) \times 10^4$  个/g, 甚至比非根际土壤低 12.22%。短叶锦鸡儿根际土壤细菌、真菌显著高于非根际土壤, 放线菌数量比非根际土壤低, 但总量显著高于非根际土壤。柠条根际土壤细菌、真菌、放线菌与非根际土壤无明显差异, 但其总量显著高于非根际土壤。就微生物总数量而言, 根际土壤中西北小蘗、短叶锦鸡儿、柠条均显著高于非根际土壤, 说明人工种植此 3 种灌木显著促进了微生物数量的增加, 而唐古特白刺根际土壤微生物数量比非根际土壤更低, 表明其对于土壤微生物数量增加的作用效果为负向。

表 1 灌木根际与非根际土壤微生物数量

Table 1 Contents of soil microorganisms of the rhizosphere and non-rhizosphere soils of shrubs

土壤类型 Soils type	细菌/( $\times 10^4$ 个/g) Bacteria	真菌/( $\times 10^4$ 个/g) Fungi	放线菌/( $\times 10^4$ 个/g) Actinomycetes	总量/( $\times 10^4$ 个/g) Total
非根际 non-rhizosphere	163.29 $\pm$ 29.61c	0.20 $\pm$ 0.04c	103.44 $\pm$ 10.06b	266.93 $\pm$ 39.71d
唐古特白刺 <i>N. tangutorum</i>	178.91 $\pm$ 4.83c	0.31 $\pm$ 0.05c	54.68 $\pm$ 8.29c	233.90 $\pm$ 13.17e
柠条 <i>C. korshinskii</i>	215.99 $\pm$ 19.60c	0.68 $\pm$ 0.04bc	91.44 $\pm$ 6.79b	308.11 $\pm$ 26.43c
西北小蘗 <i>B. verna</i>	756.30 $\pm$ 117.78a	4.34 $\pm$ 0.72a	157.77 $\pm$ 11.51a	918.41 $\pm$ 130.01a
短叶锦鸡儿 <i>C. brevifolia</i>	343.93 $\pm$ 84.68b	1.01 $\pm$ 0.17b	59.90 $\pm$ 5.16c	404.84 $\pm$ 90.01b
Sig	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

不同字母表示同一列中数值在 0.05 水平上存在显著性差异 (Duncan's 法)

### 3.2 灌木根际和非根际土壤酶活性比较

土壤酶主要来源于植物根系和微生物的活动, 它参与土壤各种生物化学过程和物质循环。方差分析和多重比较结果表明, 4 种灌木树种根际土壤和非根际土壤酶活性存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。表 2 中可以看出, 过氧化氢酶活性方面, 柠条根际土壤显著

高于其它 3 种灌木根际土壤和非根际土壤, 分别比唐古特白刺、短叶锦鸡儿、西北小蘗根际土壤和非根际土壤高 34.81%、35.81%、38.94% 和 40.26%。酸性磷酸酶活性方面, 柠条显著高于短叶锦鸡儿和西北小蘗, 分别高 129.58% 和 136.34%, 而非根际土壤和唐古特白刺根际土壤最低。脲酶方面, 4 种灌木树种

表 2 灌木根际土壤和非根际土壤酶活性比较

Table 2 Soil enzyme activity of the rhizosphere and non-rhizosphere soils of shrubs

土壤类型 Soils type	过氧化氢酶/(mL/g) Catalase	酸性磷酸酶/(mg/kg) Acid phosphatase	脲酶/(mg/kg) Urease
非根际 non-rhizosphere	3.261 $\pm$ 0.154b	42.467 $\pm$ 4.819c	1935.640 $\pm$ 331.926a
唐古特白刺 <i>N. tangutorum</i>	3.393 $\pm$ 0.241b	45.819 $\pm$ 3.924c	864.125 $\pm$ 240.556c
柠条 <i>C. korshinskii</i>	4.574 $\pm$ 0.109a	135.948 $\pm$ 23.124a	1521.082 $\pm$ 132.010b
西北小蘗 <i>B. verna</i>	3.292 $\pm$ 0.230b	59.216 $\pm$ 8.141b	948.039 $\pm$ 90.115c
短叶锦鸡儿 <i>C. brevifolia</i>	3.368 $\pm$ 0.356b	57.521 $\pm$ 10.29b	785.527 $\pm$ 60.487c
Sig	0.001	<0.001	<0.001



根际土壤均显著低于非根际土壤,此 4 种灌木中柠条根际土壤最高,占非根际土壤 78.58%,唐古特白刺最低,仅占非根际土壤 44.64%,而西北小蘗和短叶锦鸡儿根际土壤居中。总体而言,白柠条根际土壤酶活性高于其它 3 种灌木根际土壤和非根际土壤,与非根际土壤相比,西北小蘗和短叶锦鸡儿根际土壤酶活性有一定的提高,但研究结果显示唐古特白刺根际土壤酶活性显著低于非根际土壤,可见其对于土壤酶活性产生了不利影响。

3.3 灌木根际和非根际土壤 pH 值和土壤养分比较

表 3 可以看出,4 种灌木根际土壤和非根际土壤有机质、碱解 N、有效 P、速效 K 存在显著差异,而土壤 pH 值、全 N、全 P、全 K 无明显差异。有机质方

面,根际土壤中白柠条>西北小蘗>短叶锦鸡儿>唐古特白刺,并且 4 种灌木树种根际土壤均高于非根际土壤。4 种灌木根际土壤有效 P 和有效 K 均高于非根际土壤,但其大小顺序不一致,分别为:西北小蘗>短叶锦鸡儿>柠条>唐古特白刺和短叶锦鸡儿>柠条>西北小蘗>唐古特白刺。值得注意的是,4 种灌木根际土壤碱解 N 均显著低于非根际土壤,柠条、短叶锦鸡儿、西北小蘗和唐古特白刺根际土壤碱解 N 分别占非根际土壤 77.76%、74.64%、46.00% 和 36.56%,说明种植此 4 种灌木后,使得土壤 N 素有效成分降低。综合来看,与非根际土壤相比,种植 4 种灌木提高了土壤有机质含量和土壤有效养分(有效 P、速效 K),仅碱解 N 含量出现下降现象。

表 3 灌木根际土壤和非根际土壤 pH 值和土壤养分比较  
Table 3 The pH value and soil nutrition of the rhizosphere and non-rhizosphere soils of shrubs

土壤类型 Soils type	pH	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	全钾 Total K/ (g/kg)	碱解氮 Available N/ (mg/kg)	有效磷 Available P/ (mg/kg)	速效钾 Available K/ (mg/kg)
非根际 non-rhizosphere	8.75±0.09a	10.88±1.32c	1.97±0.16a	0.59±0.08a	19.54±0.61a	74.28±0.90a	1.66±0.23c	80.70±1.93c
唐古特白刺 <i>N. tangutorum</i>	8.60±0.27ab	12.16±1.41c	0.61±0.06a	0.63±0.02a	18.82±0.84a	27.16±2.30c	1.80±0.12c	96.67±5.56b
柠条 <i>C. korshinskii</i>	8.55±0.15ab	30.45±2.33a	1.67±0.21a	0.64±0.05a	18.99±0.61a	57.76±5.38b	3.54±0.34b	113.19±3.50a
西北小蘗 <i>B. vernae</i>	8.42±0.14ab	25.43±2.07b	0.93±0.13a	0.63±0.03a	18.67±0.59a	34.17±4.09c	7.75±0.96a	106.24±11.51ab
短叶锦鸡儿 <i>C. brevifolia</i>	8.59±0.01b	23.36±1.26b	1.56±0.19a	0.66±0.02a	19.23±0.62a	55.44±5.39b	4.34±1.13b	113.78±9.68a
Sig	0.230	<0.001	0.589	0.452	0.552	<0.001	<0.001	0.001

3.4 根际和非根际土壤养分与微生物数量、酶活性相关性分析

表 4 可以看出,土壤细菌、真菌、放线菌之间呈极显著正相关,表明 3 种土壤微生物之间在参与不同土壤生化过程中仍存在着密切联系,而土壤酶中仅过氧化氢酶和酸性磷酸酶呈极显著正相关,其中脲酶与过氧化氢酶和酸性磷酸酶之间相关性不显著,说明 3 种土壤酶中过氧化氢酶和酸性磷酸酶在参与土壤生化过程中联系更加密切。需要注意的是,本研究中土壤酶活性与土壤微生物数量相关性程度均较低(相关系数小于 0.4),可见土壤微生物数量对于土壤酶活性作用规律不明显。土壤酶(脲酶、磷酸酶等)可以一定程度反映土壤中氮、碳、磷、钾的转化强度,在营养元素物质交换过程中占据着非常

重要的地位<sup>[21-22]</sup>,细菌在氨化过程中作用十分重要,而真菌则在土壤碳素和能源循环过程中起着巨大作用,放线菌与土壤腐殖质含量有关,同化无机氮,分解碳水化合物及脂类、丹宁等难分解的物质,在土壤中对物质转化也起一定作用<sup>[4,23]</sup>。由表 5 可以看出,土壤 pH 值和土壤各养分含量与土壤微生物、酶活性相关性有所不同。其中,土壤有机质含量与土壤细菌和真菌数量呈极显著正相关,有效 P 与土壤细菌、真菌和放线菌数量均呈极显著正相关,速效 K 含量与过氧化氢酶和酸性磷酸酶呈显著正相关,全 N 和碱解 N 含量均与脲酶显著正相关,说明 N 素转化与脲酶活性具有密切联系,此外,全 N 含量还与放线菌数量极显著正相关。其它土壤养分指标含量与土壤微生物数量、酶活性之间相关性程度均不显著。

表 4 根际和非根际土壤微生物数量和酶活性相关系数

Table 4 Correlation coefficients between contents of soil microorganisms and enzyme activity in rhizosphere and non-rhizosphere soils

相关系数 Correlation coefficients	过氧化氢酶 Catalase	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	脲酶 Urease	细菌 Bacteria	真菌 Fungi	放线菌 Actinomycetes
过氧化氢酶 Catalase	1	0.860 **	0.303	-0.174	-0.166	-0.029
酸性磷酸酶 Acid phosphatase		1	0.160	-0.079	-0.047	0.036
脲酶 Urease			1	-0.383	-0.334	0.242
细菌 Bacteria				1	0.986 **	0.762 **
真菌 Fungi					1	0.814 **
放线菌 Actinomycetes						1

\* 表示在 0.05 水平上显著相关; \* \* 表示在 0.01 水平上显著相关,  $n=18$ 

表 5 根际和非根际土壤养分与微生物数量、酶活性相关系数

Table 5 Correlation coefficients between soil nutrition and contents of soil microorganisms and enzyme activity in rhizosphere and non-rhizosphere soils

相关系数 Correlation coefficients	pH	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	碱解氮 Available N	有效磷 Available P	速效钾 Available K
过氧化氢酶 Catalase	-0.004	0.362	-0.045	0.328	0.008	0.200	0.016	0.555 *
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	-0.242	0.428	-0.256	0.144	-0.073	0.179	0.106	0.529 *
脲酶 Urease	0.467	-0.314	0.544 *	-0.099	0.288	0.724 **	-0.382	-0.441
细菌 Bacteria	-0.482	0.602 *	0.377	0.205	-0.171	-0.388	0.968 **	0.415
真菌 Fungi	-0.479	0.578 *	0.382	0.121	-0.245	-0.413	0.946 **	0.354
放线菌 Actinomycetes	-0.277	0.359	0.735 **	-0.058	-0.116	0.005	0.711 **	0.010

### 3.5 灌木根际和非根际土壤肥力评价

为了更好地评价 4 种灌木根际土壤和非根际土壤肥力状况,选择土壤微生物数量、土壤酶活性、土

壤 pH 和土壤养分共 14 个相关指标进行主成分分析。由表 6 可以看出,第一主成分的方差贡献率最大,达到了 47.678%,对土壤肥力状况其主要作用,

表 6 主成分因子载荷矩阵及主成分特征根

Table 6 Factor loading matrix of main composition and principal component eigenvalues

因子 Factors	$F_1$	$F_2$	$F_3$
过氧化氢酶 Catalase	0.070	-0.537	0.830
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.211	-0.444	0.870
脲酶 Urease	-0.669	0.383	0.605
细菌 Bacteria	0.853	0.497	-0.068
真菌 Fungi	0.854	0.519	-0.009
放线菌 Actinomycetes	0.484	0.796	0.328
pH	-0.995	0.032	-0.089
有机质 Organic matter	0.853	0.055	0.399
全氮 Total N	-0.069	0.945	0.192
全磷 Total P	0.572	-0.656	-0.049
全钾 Total K	-0.869	0.202	0.115
碱解氮 Available N	-0.691	0.259	0.513
有效磷 Available P	0.892	0.361	0.101
速效钾 Available K	0.640	-0.635	0.075
特征根 Eigenvalue	6.675	3.753	2.422
方差贡献率 Rate of variance/%	47.678	26.806	17.928
累计贡献率 Cumulative rate/%	47.678	74.484	91.872

第一、二主成分累积方差贡献率达到了 74.484%, 基本包含了主要的土壤肥力信息。3 个主成分累积方差贡献率达到了 91.872%, 能反映出 4 种灌木根际与非根际土壤各指标的相对重要性及其之间的相互关系。对 14 个土壤肥力因子在各主成分上的因子载荷分析(表 6)表明, 土壤细菌、真菌、pH 值、有机质、全 K、有效 P 对第一主成分影响较大, 主要包含了土壤微生物和养分相关信息, 可将  $F_1$  命名为微生物因子。第二主成分中, 全 N 载荷较高, 土壤中 N 元素储存状况, 可命名为 N 素因子( $F_2$ )。第三主成分中, 过氧化氢酶、酸性磷酸酶载荷较高, 集中反映了土壤酶活性状况, 可命名为酶活性因子( $F_3$ )。

将因子载荷换算为规格化特征向量<sup>[24]</sup>后, 可以得到反映土壤肥力水平的 3 个主成分表达式:

$$F_1 = 0.027x_1 + 0.082x_2 - 0.259x_3 + 0.330x_4 + 0.3318x_5 + 0.187x_6 - 0.385x_7 + 0.330x_8 - 0.027x_9 + 0.221x_{10} - 0.336x_{11} - 0.267x_{12} + 0.345x_{13} + 0.248x_{14}$$

$$F_2 = -0.277x_1 - 0.229x_2 + 0.198x_3 + 0.257x_4 + 0.268x_5 + 0.411x_6 + 0.017x_7 + 0.028x_8 + 0.488x_9 - 0.339x_{10} + 0.104x_{11} + 0.134x_{12} + 0.186x_{13} - 0.328x_{14}$$

$$F_3 = 0.533x_1 + 0.559x_2 + 0.389x_3 - 0.044x_4 - 0.006x_5 + 0.211x_6 - 0.057x_7 + 0.256x_8 + 0.123x_9 - 0.031x_{10} + 0.074x_{11} + 0.330x_{12} + 0.065x_{13} + 0.048x_{14}$$

式中,  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$  分别代表过氧化酶、酸性磷酸酶、脲酶、细菌、真菌、放线菌、pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾。将 4 种灌木根际土壤和非根际土壤过氧化酶、酸性磷酸酶、脲酶、细菌、真菌、放线菌、pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾共 14 个指标分别代入表达式, 计算各主成分的得分, 再以各主成分的方差贡献率为权数, 对所提取的得分进行加权求和, 得到不同灌木树种根际土壤和非根际土壤反映土壤肥力水平的综合得分(表 7)。结果表明, 土壤肥力水平根际土壤总体大于非根际土壤, 说明种植此 4 种灌木能一定程度改善土壤肥力状况。在 4 种灌木中, 西北小蘗根际土壤肥力综合得分最高, 柠条和短叶锦鸡儿居中, 唐古特白刺得分较低, 基本与非根际土壤接近。

表 7 主成分因子得分及土壤肥力水平综合得分

Table 7 Principal component factor scores and synthetic scores of soil fertility levels

土壤类别 Soils type	$F_1$	$F_2$	$F_3$	综合得分 Comprehensive score	综合排名 Comprehensive rank
非根际 Non-rhizosphere	-3.630	2.093	0.199	-1.135	5
唐古特白刺 <i>N. tangutorum</i>	-0.348	-1.617	-1.734	-0.910	4
柠条 <i>C. korshinskii</i>	0.248	-1.581	2.443	0.132	2
西北小蘗 <i>B. verna</i>	3.621	2.111	-0.102	2.275	1
短叶锦鸡儿 <i>C. brevifolia</i>	0.109	-1.006	-0.805	-0.362	3

## 4 结论与讨论

### 4.1 灌木根际和非根际土壤酶活性、微生物数量及养分特征比较

微生物是土壤中最活跃的部分, 其种类、数量、生态分布及活性在很大程度上可以反映土壤肥力的状况与变化<sup>[25]</sup>, 从微生物数量上总体来看, 同种类微生物与植物根系相互作用效果不同, 其中根际土壤细菌和真菌高于非根际土壤, 放线菌低于非根际土壤(西北小蘗除外), 原因可能是放线菌是对高温、干燥、碱性条件适应力强的一类微生物, 在非根际环境中占有优势<sup>[26]</sup>。土壤酶活性方面, 有大量研究表

明植物根际土壤和非根际土壤酶活性之间存在显著差异<sup>[27-29]</sup>, 此结论在本研究中得到了证实。过氧化氢酶和酸性磷酸酶总体表现出根际土壤高于非根际土壤的规律, 符合前人的结论<sup>[30]</sup>。而脲酶则出现了根际土壤低于非根际土壤的现象, 与周国英等<sup>[31]</sup>和陈闯竣等<sup>[32]</sup>认为根际土壤脲酶活性高于非根际土壤的研究结论存在差异, 可能土壤环境或植物根系对脲酶产生了抑制作用, 但缺乏直接证据。另一方面, 研究表明 4 种灌木根际土壤有机质含量和土壤有效养分(有效 P、速效 K)均高于非根际土壤, 呈现了明显的根际聚集现象<sup>[12]</sup>。值得注意的是, 根际土壤碱解 N 含量低于非根际土壤, 主要由于根际土

壤中脲酶活性普遍低于非根际土壤所致,因为脲酶主要负责催化水解有机物生成氨和  $\text{CO}_2$ ,是 N 素的直接来源,而本研究中也证实碱解 N 含量与脲酶含量显著正相关。就养分特征而言,人工种植 4 种灌木通过根际聚集,能不同程度提高土壤有效养分含量,特别是有效 P 和有效 K。

#### 4.2 土壤养分、微生物数量及酶活性之间的相关性

大量研究表明,土壤养分、微生物数量及酶活性之间存在密切联系<sup>[2-5,12]</sup>。本研究中土壤酶活性与土壤微生物数量相关性不显著,并且规律性不明显,与大多数认为土壤酶活性与土壤微生物数量总体呈正相关的研究结论<sup>[3-5]</sup>存在差异,可能与其它土壤酶产生过程(根系分泌和动植物残体腐解)有关,因为一般认为土壤酶主要来源于土壤微生物的代谢过程、植物根系分泌物和动植物残体腐解过程中释放的酶<sup>[6,33-34]</sup>,土壤酶活性会受到微生物以外很多因素影响,其具体原因有待进一步研究。很多报道中普遍认为土壤养分与酶活性、微生物数量之间均呈显著性相关<sup>[2-4,28,35]</sup>。其中孟令军等<sup>[35]</sup>研究表明鹿蹄草 *Pyrola rotundifolia* 根际土壤中有机质、速效钾含量与脲酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶活性均呈极显著正相关,有效氮、速效磷含量与脲酶呈极显著正相关。另据戴雅婷等<sup>[26]</sup>研究表明土壤微生物数量与土壤养分含量之间存在着不同程度的相关关系。本研究中土壤养分与土壤微生物数量和酶活性之间相关性程度也有所不同,其中土壤有机质含量与土壤细菌和真菌数量呈极显著正相关,有效 P 与土壤细菌、真菌和放线菌数量均呈极显著正相关,速效 K 含量与过氧化氢酶和酸性磷酸酶呈显著正相关,全 N 和碱解 N 含量均与脲酶显著正相关,可能与土壤养分与土壤微生物、酶活性之间存在专性作用有关。

#### 4.3 灌木根际和非根际土壤肥力综合评价

4 种灌木根际土壤和非根际土壤之间土壤酶活性、微生物数量以及养分含量有明显差异,从土壤综合肥力来看,根际土壤高于非根际土壤,4 种灌木根际土壤中,西北小蘗总体肥力状况最佳,柠条次之,短叶锦鸡儿和唐古特白刺较差。可见人工种植此 4 种灌木,改善土壤状况效果有所不同,从研究结果来看,4 种灌木中西北小蘗和柠条效果较好,能大幅提高土壤肥力,在进行西宁南山干旱区人工造林时可以给予重点考虑。而短叶锦鸡儿和唐古特白刺总体

效果不佳,尤其是唐古特白刺,人工种植后其根际土壤肥力水平接近非根际土壤,而且其土壤微生物数量和酶活性甚至显著低于非根际土壤,因此不适宜作为西宁南山区造林树种。由于唐古特白刺天然分布限于荒漠草原及荒漠,生于沙漠边缘、湖盆低地、河流阶地的微盐渍化沙地、堆积风积沙的龟裂土上以及干旱山前平原区<sup>[36]</sup>,其主要以“白刺包”形式广泛分布于沙漠边缘地带<sup>[37]</sup>,而西宁南山区山地不是唐古特白刺适生区,因此其人工栽植后生长表现不佳。

植物根际和非根际土壤微生物、酶活性及土壤养分之间存在复杂的联系,很多的研究结论会受到地理位置、树种、森林起源、季节变化等因素影响。本研究所得结论主要基于青海西宁南山干旱区 4 种灌木树种人工造林在生长季节的根际和非根际土壤特征,能一定程度反映出人工种植 4 种灌木对南山土壤不同的改善效果,但具有一定的局限性。在今后的研究工作中,将重点开展根际和非根际土壤季节变化特征以及后期连续监测其年变化特征,以期科学反映植被恢复进程中根际和非根际土壤动态变化规律。

#### References:

- [1] Lynch J P. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology*, 1995, 109(1): 7-13.
- [2] Bai S H, Ma F Y, Li S S, Yao X F. Relational analysis of soil enzyme activities, nutrients and microbes in *Robinia pseudoacacia* plantations in the Yellow River Delta with different degradation degrees. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(11): 1478-1483.
- [3] Wang D, Ma F Y, Yao X F, Xin H, Song X, Zhang Z X. Properties of soil microbes, nutrients and soil enzyme activities and their relationship in a degraded wetland of Yellow River Delta. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(5): 94-98.
- [4] Xu J W, Wang W D, Li C. The correlation among soil microorganism, enzyme and soil nutrient in different types of mixed stands of *Pinus thunbergii*. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(1): 51-55.
- [5] Jiao R Z, Yang C D. The changes of the soil microorganism in rhizosphere and outside in different developing stages of the Chinese fir plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(1): 53-59.
- [6] Nie M, Zhang X D, Wang J Q, Jiang L F, Yang J, Quan Z X, Cui X H, Fang C M, Li B. Rhizosphere effects on soil bacterial



- abundance and diversity in the Yellow River Deltaic ecosystem as influenced by petroleum contamination and soil salinization. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(12): 2535-2542.
- [ 7 ] Xue L, Kuang L G, Chen H Y, Tan S M. Soil nutrients, microorganisms and enzyme activities of different stands. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 280-285.
- [ 8 ] Li J H, Shen Q R, Chu G X, Wei C Z, Qiao X, Yang X M. Effects of application amino acid fertilizer on soil enzyme activity and available nutrients in cotton rhizosphere and bulk soils. *Soils*, 2011, 43(2): 277-284.
- [ 9 ] Fu G, Liu Z W, Cui F F. The feature of soil enzyme activity and quantity of microorganism under artificial forests and their relationships with soil nutrient in Qinling Mountain Area. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2008, 36(10): 88-94.
- [ 10 ] An S S, Li G H, Chen L D. Soil microbial functional diversity between rhizosphere and non-rhizosphere of typical plants in the hilly area of southern Nixia. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5225-5234.
- [ 11 ] Wu L S, Tang J, Luo Q, Tang B, Nie Y Y, WANG X T, Yang Z R, Sun Q, Feng S, Zhang J. Study on the relationship between soil enzyme activities and soil physico-chemical properties with microorganism of degraded soil from Zoige wetland. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(1): 52-59.
- [ 12 ] Meng L J, Geng Z C, Yin J Y, Wang H T, Ji P F. Chemical properties and enzyme activities of rhizosphere and non-rhizosphere soils under six Chinese herbal medicines on Mt. Taibai of Qinling Mountains, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10): 2685-2692.
- [ 13 ] Xing S J, Zhang J F, Xi J B, Song Y M. Effect of *Nitraria sibirica* afforestation on soil amelioration in heavy saline-alkali Soils. *Journal of Northeast Forestry University*, 2003, 31(6): 96-98.
- [ 14 ] Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H. Influencing mechanism of several shrubs and subshrubs on soil fertility in Keerqin sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7): 802-806.
- [ 15 ] Riley D, Barber S A. Bicarbonate accumulation and pH changes at the soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) root-soil interface. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33(6): 905-908.
- [ 16 ] Riley D, Barber S A. Salt accumulation at the soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) root-soil interface. *Soil Science Society of America Journal*, 1970, 34(1): 154-155.
- [ 17 ] Cheng L J, Xue Q H. *Laboratory Manual of Microbiology*. Xi'an: The World Publish Press Company, 2000: 33-84.
- [ 18 ] Guan S Y. *Soil Enzyme and Its Research Methods*. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 260-359.
- [ 19 ] Zhou L K. *Soil Enzymology*. Beijing: Science Press, 1987: 263-267.
- [ 20 ] Lu R K. *Analysis Methods of Soil Agricultural Chemistry*. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000: 106-195.
- [ 21 ] Diamantidis G, Effosse A, Potier P, Bally R. Purification and characterization of the first bacterial laccase in the rhizospheric bacterium *Azospirillum lipoferum*. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(7): 919-927.
- [ 22 ] Zhang Y M, Zhou G Y, Wu N. A review of studies on soil enzymology. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2000, 12(1): 83-90.
- [ 23 ] Sun Z G, Liu J S. Development in study of wetland litter decomposition and its responses to global change. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1606-1618.
- [ 24 ] Yu C H. *SPSS Statistical Analysis*. Beijing: Electronic Industry Press, 2007: 491-507.
- [ 25 ] Deng X, Hong K, Li Q F, Hou X W, Li G Y. Relationship between soil microorganisms and soil properties in the banana (*Musa paradisiaca*) plantation systems in Hainan Province. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, 31(4): 530-535.
- [ 26 ] Dai Y T, Run Z J, Wang H, Wu H X. The relationships between the number of microorganisms in rhizospheric soil of *Artemisia ordosica* and soil nutrients. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(2): 71-75.
- [ 27 ] Yang Y S, He Z M, Zou S Q, Yu X T. A study on the soil microbes and biochemistry of rhizospheric and total soil in natural forest and plantation of *Castanopsis kauakamii*. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(2): 198-202.
- [ 28 ] Meng Y L, Wang L G, Zhou Z G, Wang Y, Zhang L Z, Bian H Y, Zhang S P, Chen B L. Dynamics of soil enzyme activity and nutrient content in intercropped cotton rhizosphere and non-rhizosphere. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2076-2080.
- [ 29 ] Zhang X L, Yang S J, Zhang B X, Yuan C L. Comparative research on rhizosphere soil and non-rhizosphere soil properties in different stand age of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand-fixation forest. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2005, 25(1): 80-84.
- [ 30 ] Fang F, Wu C Z, Hong W, Fan H L, Song P. Study on the relationship between rhizospheric or non-rhizospheric soil enzyme and microbe in different plants. *Subtropical Agriculture Research*, 2007, 3(3): 209-215.
- [ 31 ] Zhou G Y, Chen X Y, Li Q Y, Lan G H. Ecological distribution of soil microorganisms and activity of soil enzymes in oiltea *Camellia* stands. *Economic Forest Researches*, 2001, 19(1): 9-12.
- [ 32 ] Chen H J, Li C H. Comparison in enzyme activities between the soils in rhizosphere and non-rhizosphere of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. *Scientia Silvae Sinicae*, 1994, 30(2): 170-175.

- [33] Bandick A K, Dick R P. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(11): 1471-1479.
- [34] Zimmermann S, Frey B. Soil respiration and microbial properties in an acid forest soil: effects of wood ash. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(11): 1727-1737.
- [35] Meng L J, Geng Z C, Yin J Y, Jiang L, Lin W D. Soil nutrients and enzyme activities of *Pyrola* in rhizosphere and non-rhizosphere on Mt. Tai bai of Qinling Mountains. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2012, 40(5): 157-165.
- [36] Wang Y G, Yang X H, Yu C T, Hu Z S. The actuality, ecological function and protective measures of genus *Nitraria*. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(3): 74-79.
- [37] Wang S D, Kang X Y. Current Research situation and suggestion on *Nitraria tangutorum* Bobr. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2005, 6(2): 231-235.
- [2] 白世红, 马风云, 李树生, 姚秀粉. 黄河三角洲不同退化程度人工刺槐林土壤酶活性、养分和微生物相关性研究. *中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1478-1483.
- [3] 王笛, 马风云, 姚秀粉, 辛贺, 宋雪, 张钟心. 黄河三角洲退化湿地土壤养分、微生物与土壤酶特性及其关系分析. *中国水土保持科学*, 2012, 10(5): 94-98.
- [4] 许景伟, 王卫东, 李成. 不同类型黑松混交林土壤微生物、酶及其与土壤养分关系的研究. *北京林业大学学报*, 2000, 22(1): 51-55.
- [5] 焦如珍, 杨承栋. 杉木人工林不同发育阶段根际与非根际土壤微生物变化趋势. *林业科学*, 1999, 35(1): 53-59.
- [7] 薛立, 邝立刚, 陈红跃, 谭绍满. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究. *土壤学报*, 2003, 40(2): 280-285.
- [8] 李俊华, 沈其荣, 褚贵新, 危常州, 乔旭, 杨兴明. 氨基酸有机肥对棉花根际和非根际土壤酶活性和养分有效性的影响. *土壤*, 2011, 43(2): 277-284.
- [9] 付刚, 刘增文, 崔芳芳. 秦岭山区典型人工林土壤酶活性、微生物及其与土壤养分的关系. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(10): 88-94.
- [10] 安韶山, 李国辉, 陈利顶. 宁南山区典型植物根际与非根际土壤微生物功能多样性. *生态学报*, 2011, 31(18): 5225-5234.
- [11] 吴俐莎, 唐杰, 罗强, 汤博, 聂远洋, 王晓彤, 杨志荣, 孙群, 冯甦, 张杰. 若尔盖湿地土壤酶活性和理化性质与微生物关系的研究. *土壤通报*, 2012, 43(1): 52-59.
- [12] 孟令军, 耿增超, 殷金岩, 王海涛, 吉鹏飞. 秦岭太白山区6种中草药根际与非根际土壤化学性质及酶活性. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2685-2692.
- [13] 邢尚军, 张建锋, 郝金标, 宋玉民. 白刺造林对重盐碱地的改良效果. *东北林业大学学报*, 2003, 31(6): 96-98.
- [14] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 802-806.
- [17] 程丽娟, 薛泉宏. 微生物学实验技术. 西安: 世界图书出版公司, 2000: 33-84.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986: 260-359.
- [19] 周礼恺. 土壤酶学. 北京: 科学出版社, 1987: 263-267.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 106-195.
- [22] 张咏梅, 周国逸, 吴宁. 土壤酶学的研究进展. *热带亚热带植物学报*, 2004, 12(1): 83-90.
- [23] 孙志高, 刘景双. 湿地枯落物分解及其对全球变化的响应. *生态学报*, 2007, 27(4): 1606-1618.
- [24] 宇传华. SPSS 与统计分析. 北京: 电子工业出版社, 2007: 491-507.
- [25] 邓晓, 洪葵, 李勤奋, 侯宪文, 李光义. 海南香蕉园土壤微生物与土壤因子的关系. *热带作物学报*, 2010, 31(4): 530-535.
- [26] 戴雅婷, 闫志坚, 王慧, 吴洪新. 油蒿根际土壤微生物数量及其与土壤养分的关系. *中国草地学报*, 2012, 34(2): 71-75.
- [27] 杨玉盛, 何宗明, 邹双全, 俞新妥. 格氏栲天然林与人工林根际土壤微生物及其生化特性的研究. *生态学报*, 1998, 18(2): 198-202.
- [28] 孟亚利, 王立国, 周治国, 王瑛, 张立桢, 卞海云, 张思平, 陈兵林. 套作棉根际与非根际土壤酶活性和养分的变化. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2076-2080.
- [29] 张学利, 杨树军, 张百习, 袁春良. 不同林龄樟子松根际与非根际土壤的对比. *福建林学院学报*, 2005, 25(1): 80-84.
- [30] 方昉, 吴承祯, 洪伟, 范海兰, 宋萍. 植物根际、非根际土壤酶与微生物相关性研究进展. *亚热带农业研究*, 2007, 3(3): 209-215.
- [31] 周国英, 陈小艳, 李倩茹, 兰贵洪. 油茶林土壤微生物生态分布及土壤酶活性的研究. *经济林研究*, 2001, 19(1): 9-12.
- [32] 陈弘竣, 李传涵. 杉木根际与非根际土壤酶活性比较. *林业科学*, 1994, 30(2): 170-175.
- [35] 孟令军, 耿增超, 王海涛, 殷金岩, 姜林, 林伟达. 秦岭太白山区鹿蹄草根际与非根际土壤养分及酶活性研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(5): 157-165.
- [36] 王彦阁, 杨晓晖, 于春堂, 胡哲森. 白刺属植物现状、生态功能及保护策略. *水土保持研究*, 2007, 14(3): 74-79.
- [37] 王尚德, 康向阳. 唐古特白刺研究现状与建议. *植物遗传资源学报*, 2005, 6(2): 231-235.