

# 祁连山东段 3 种中草药根际与非根际土壤 化学性质与酶活性研究

孟令军<sup>1</sup>, 耿增超<sup>1,2\*</sup>, 王海涛<sup>1</sup>, 殷金岩<sup>1</sup>, 吉鹏飞<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 宁夏贺兰山森林生态系统定位研究站, 宁夏 银川 750000)

**摘 要:**以祁连山东段不同生境下 3 种中草药金露梅、银露梅和玉竹的根际与非根际土壤为对象, 对其根际与非根际土壤化学性质及酶(脲酶、转化酶、过氧化氢酶、中性磷酸酶)活性作了研究。结果表明:除土壤全钾和过氧化氢酶外,其他养分和土壤酶在金露梅和银露梅处均表现出根际聚集现象,而在玉竹根际呈现出与此相反的趋势。在 3 种植物根际,土壤有机质与脲酶和转化酶均呈极显著负相关;除脲酶外,土壤全氮、速效氮、全磷、速效磷与其他 3 种酶都呈极显著正相关;除转化酶外,土壤 pH 与其他 3 种酶都负相关,且与过氧化氢酶和中性磷酸酶均呈显著负相关;土壤阳离子交换量 CEC 与 4 种酶都呈负相关,且与脲酶和转化酶均呈极显著负相关;在 3 种植物非根际,土壤有机质与转化酶和中性磷酸酶均呈极显著正相关;土壤全氮、全磷、速效钾、CEC 与四种土壤酶都呈极显著正相关;土壤 pH 与脲酶呈显著正相关,与其他三种酶都呈极显著正相关。银露梅和金露梅根际土壤肥力水平综合得分均高于非根际土壤,而玉竹则相反。3 种植物根际与非根际土壤肥力水平综合得分表现为玉竹>银露梅>金露梅。

**关键词:**中草药; 根际; 土壤化学性质; 土壤酶活性; 土壤肥力评价

**中图分类号:**S714.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2013)01-0026-07

## Soil Chemical Properties and Enzyme Activities of Three Traditional Chinese Herbal Drugs in the Rhizosphere and Non-rhizosphere on the East Section of Qilian Mountain

MENG Ling-jun<sup>1</sup>, GENG Zeng-chao<sup>1,2\*</sup>, WANG Hai-tao<sup>1</sup>, YIN Jin-yan<sup>1</sup>, JI Peng-fei<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Ningxia Helan Mountain Forest Ecosystem Orientational Research Station, Yinchuan, Ningxia 750000, China)

**Abstract:** Chemical properties and enzyme activities of the rhizosphere and non-rhizosphere soils collected from 3 traditional Chinese herbal drugs in different habitats on the east section of Qilian Mountain were investigated, including *Potentilla fruticosa*, *Potentilla glabra*, and *Polygonatum odoratum*. The results showed that except for soil total potassium and catalase, other nutrients and soil enzymes presented aggregation trends in the rhizosphere of *P. fruticosa* and *P. glabra*, while an opposite trends were observed in the rhizosphere of *P. odoratum*. Correlation analysis showed that in the rhizosphere of three plants, soil organic matter exhibited a significantly negative correlation with urease and invertase. Soil total nitrogen, available nitrogen, total phosphorus and available phosphorus demonstrated a significantly positive correlation with other three enzymes except for urease. Soil pH was correlated with other three enzymes except for invertase, and it presented a significantly negative correlation with catalase and neutral phosphatase. Soil CEC was significantly and negatively correlated with 4 enzymes, and presented a significantly negative

收稿日期:2012-08-23 修回日期:2012-09-05

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(200904004)。

作者简介:孟令军,男,硕士研究生,主要研究方向:森林土壤生物与化学。

\* 通信作者:耿增超,男,教授,主要研究方向:森林土壤及农林废弃物转化。E-mail:gengzengchao@126.com

correlation with urease and invertase. In the non-rhizosphere of three plants, soil organic matter exhibited a very significantly positive correlation with catalase and neutral phosphatase. Soil total nitrogen, total phosphorus, available potassium and CEC showed a significantly positive correlation with four enzymes. Soil pH was significantly correlated with urease, and showed a very significantly positive correlation with other three enzymes. Overall, soil fertility comprehensive scores in the rhizosphere of *P. fruticosa* and *P. glabra* were higher than those in the non-rhizosphere, while it performed opposite in *P. odoratum*. Soil fertility comprehensive scores in the rhizosphere and non-rhizosphere of three plants were in the order of *P. odoratum* > *P. glabra* > *P. fruticosa*.

**Key words:** traditional Chinese herbal drug; rhizosphere; soil chemical properties; soil enzyme activity; soil fertility evaluation

根际是植物、土壤、微生物共同影响的特殊生态领域,1904 年, Hiltner 最初将其定义为根系周围、受根系生长影响的土体,同时,根际也是植物与土壤环境最紧密的接触面,对环境极为敏感,具有特殊的物理、化学及生物学特性,已经成为植物营养学、土壤学、酶学等多学科研究的交汇处<sup>[1-2]</sup>。研究植物根际对反映植物生境变化具有重要的作用,因而受到许多国外学者的重视<sup>[3-4]</sup>。秦嗣军<sup>[5]</sup>等研究樱桃根际脲酶、磷酸酶活性与氮、磷、钾动态变化及其相互关系,表明土壤脲酶、磷酸酶活性与氮磷钾土壤营养元素含量间存在着一定的相关性。李国辉<sup>[6]</sup>等研究黄土高原典型植物根际对土壤微生物生物量碳、氮、磷和基础呼吸的影响表明,土壤微生物生物量碳、氮可以作为判断土壤肥力状况的生物学指标。但尚未见关于祁连山区野生中草药根际土壤酶活性及其与土壤养分变化关系的研究报道<sup>[7-8]</sup>。拟对祁连山东段 3 种中草药根际与非根际土壤化学性质与酶活性间的关系进行研究,为评价土壤肥力水平、促进森林中草药可持续发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区设在青海互助县北山林场,位于大通河中下游,介于互助土族自治县东北部的青石岭和冷龙峡之间,属祁连山脉东端,海拔 2 200~4 308 m,属于山地寒温性针叶林草原区。辖区总面积约 11.27 万  $\text{hm}^2$ ,其中林业用地 7.86 万  $\text{hm}^2$ 。年均降水量 403 mm,且多集中于 4~9 月,年均相对湿度 62%左右,年蒸发量 1 283 mm。年均温  $-2\sim 3.4^\circ\text{C}$ ,日温差  $25\sim 50^\circ\text{C}$ 。冬季长达 6 个月以上,盛行西北风,夏末秋初多东南风。区域内植被类型丰富,针叶林、阔叶林与高山灌木丛、高山草甸共同构成了北山特殊性的自然景观<sup>[9]</sup>。森林覆盖率为 68.4%,主要树种为青海云杉(*Picea crassifolia*)、山杨(*Populus davidiana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)和祁

连圆柏(*Sabina przewalskii*);灌木主要有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、银露梅(*Potentilla glabra*)、鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)、红花忍冬(*Lonicera syringantha*)等;林下植被主要有三穗苔草(*Carex tristachya*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、早熟禾(*Poa annua*)、玉竹(*Polygonatum odoratum*)、蒿属(*Artemisia*)及苔藓植物等。主要土壤类型包括棕钙土、灰褐土、栗钙土和高山草甸土。

### 1.2 研究方法

土壤样品采集依据 3 种中草药的分布位置选择有代表性的 3 块林地作为研究对象(表 1)。林地大小根据环境条件确定为约  $50\text{ m}\times 20\text{ m}$ ,并在各林地内设置 3 个面积为  $10\text{ m}\times 10\text{ m}$  的样方作为重复。土壤样品采集于 2010 年 9 月,采用抖落法采集根际土和非根际土。对灌木植物(金露梅和银露梅),每种植物在各自的植物群落中按“S”型路线选择 4~5 株植物,取其根际与非根际土壤,分别混合,再按四分法取一部分土壤。对草本植物(玉竹),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,装入无菌袋内,混匀,视为非根际土壤,然后将根表面附着的土壤全部抖落下来,便获得根际土壤。采集后的土壤样品均在互助县北山林场实验站密封、阴凉处低温( $10^\circ\text{C}$ )保存。将土样带回实验室后风干研磨过筛,过孔径 1 mm 筛后分别测定土壤有效养分和酶活性,测定土壤全量养分使用过孔径 0.25 mm 筛土样,土壤化学分析采用森林土壤标准分析方法测定<sup>[10]</sup>。过氧化氢酶用高锰酸钾滴定法,酶活性以单位质量消耗的高锰酸钾毫升数表示;脲酶用苯酚钠比色法,酶活性以 24 h 后每 g 土生成的氨的毫克数来表示;转化酶用 3,5-二硝基水杨酸比色法,酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中葡萄糖的毫克数表示;磷酸酶用磷酸苯二钠法,酶活性以 12 h 每 g 土产生的酚毫克数表示<sup>[11-12]</sup>。以上测定均重复 3 次。

表 1 立地条件和植被组成

Table 1 Site features and vegetation composition

植物	坡度 /(°)	坡向	坡位 /(°)	地理位置	海拔/m	土壤 类型	土壤母质 类型	植被盖 度/%	枯枝落 叶层 /cm	主要植物
PFL	31	E(90°)	中坡	N 36°55. 81' E 102°21. 15'	2 930	灰褐土	残积母质	85	1	青海云杉、油松、黄柏刺 ( <i>Berberis virgetorum</i> )、山石榴 ( <i>Catunaregam spinosa</i> )、节节草 ( <i>Equisetum ramosissimum</i> )、莎草 ( <i>Cyperus rotundus</i> )
PGL	26	SE(135°)	上坡	N 36°55. 81' E 102°23. 65'	2 850	灰褐土	残积母质	88	2	青海云杉、祁连圆柏、狗尾巴草 ( <i>Setaira viridis</i> )、莎草、水蒿 ( <i>Artemisia selengensis</i> )、苔草 ( <i>Carex</i> )
POD	36	W(270°)	中坡	N 36°55. 81' E 102°26. 25'	2 650	灰褐土	坡积母质	95	5	青海云杉、红桦 ( <i>Betula albo-sinensis</i> )、石菖蒲 ( <i>Acorus tatarinowii</i> )、淫羊藿 ( <i>Epimedium</i> )、青莢叶 ( <i>Helwingia japonica</i> )、珍珠梅 ( <i>Sorbaria sorbifolia</i> )、苔草

注:PFL:金露梅;PGL:银露梅;POD;玉竹。(表 2、图 1、表 7 同)。

1.3 数据处理

利用 Excel 和 SPSS18.0 软件进行数据统计分析。采用富集率(ER)表示根际对土壤养分与酶活性的富集程度<sup>[13]</sup>。

$$ER = ((\text{根际含量} - \text{非根际含量}) / \text{非根际含量}) \times 100\%$$

(1)

2 结果与分析

2.1 3种植物根际和非根际土壤化学性质

3种植物根际与非根际土壤化学性质均表现出不同的根际效应(表 2)。根际土壤有机质含量大小为金露梅>银露梅>玉竹,非根际土壤有机质含量大小为玉竹>金露梅>银露梅。土壤有机质在金露梅和银露梅处均表现为根际高于非根际(ER=0.88、11.27),而玉竹表现为根际低于非根际(ER=-12.02),且差异均不显著。土壤全氮含量根际大小为玉竹>银露梅>金露梅,而非根际大小为玉竹>金露梅>银露梅。其中土壤全氮含量在银露梅根际富集最高(ER=73.16),而在玉竹根际表现为负

富集(ER=-25.30),且达到显著水平。土壤全磷在金露梅和银露梅根际富集率均较高(ER=47.06、48.48),在玉竹根际表现为负富集(ER=-19.88)。全钾在玉竹根际富集最高(ER=26.88),在金露梅和银露梅根际富集均较低(ER=1.15,-0.84),且在根际与非根际均表现为金露梅>银露梅>玉竹。土壤有效氮含量在金露梅和银露梅根际富集较高,ER值分别为15.18和19.85,而在玉竹根际表现为负富集(ER=-7.33),且在根际与非根际均表现为玉竹>金露梅>银露梅。土壤有效磷含量在银露梅根际富集最高(ER=23.28),而在玉竹根际富集最低(ER=-12.02)。土壤速效钾在金露梅和银露梅根际富集均较高(ER=14.55、18.72),而在玉竹根际富集较低(ER=6.25)。土壤 pH 在金露梅和玉竹根际处低于非根际,而在银露梅根际处高于非根际。土壤 CEC 在金露梅和银露梅根际表现为正富集(ER=8.37、0.81),而在玉竹根际表现为负富集(ER=-2.79)。

表 2 3种植物的根际和非根际土壤化学性质

Table 2 Soil chemical properties in the rhizosphere and non-rhizosphere of three plants ( $\bar{x} \pm SD, n=3, p=0.05$ )

植物	部位 根深 (cm)	有机质(OM) /(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮(TN) /(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷(TP) /(g·kg <sup>-1</sup> )	全钾(TK) /(g·kg <sup>-1</sup> )	速效氮(AN) /(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷(AP) /(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾(AK) /(mg·kg <sup>-1</sup> )	pH	阳离子交换量 (CEC) /(cmol·kg <sup>-1</sup> )
PEL	R(14)	119.10±2.91a	3.91±0.29a	0.75±0.01a	17.62±0.23a	13.43±0.47a	12.39±0.21a	225.69±9.57a	7.04±0.43a	21.74±1.02a
	S	118.06±6.08a	3.56±0.37a	0.51±0.08b	17.42±0.85a	11.66±0.65a	10.53±0.49a	197.03±10.53b	7.15±0.21a	20.06±0.95a
	ER/%	0.88	9.83	47.06	1.15	15.18	17.66	14.55	—	8.37
PGL	R(15)	113.90±1.98a	4.00±0.19a	0.49±0.06a	16.48±1.32a	11.11±0.16a	15.94±0.98a	145.44±6.23a	7.06±0.01a	20.03±0.85a
	S	102.36±2.93a	2.31±0.32b	0.33±0.00b	16.62±1.69a	9.27±0.67a	12.93±1.06a	122.51±1.05b	6.99±0.26a	19.87±0.79a
	ER/%	11.27	73.16	48.48	-0.84	19.85	23.28	18.72	—	0.81
POD	R(5)	111.99±3.05a	7.41±0.49b	1.29±0.14a	14.68±0.18a	47.01±4.05a	39.47±0.97a	305.94±15.21a	7.04±0.10a	20.21±1.81a
	S	127.29±4.91a	9.92±0.91a	1.61±0.06a	11.57±1.03b	50.73±1.02a	44.86±1.09a	326.32±4.07a	7.26±0.08a	20.79±1.45a
	ER/%	-12.02	-25.30	-19.88	26.88	-7.33	-12.02	-6.25	—	-2.79

注:R表示根际,括号内为深度;S表示非根际。(表 3、表 4 同)

2.2 3种植物根际和非根际土壤酶活性变化状况

土壤中一切生物化学反应的进行都是在酶的催

化下进行的,因此酶活性的高低,通常是土壤中生物活性和土壤肥力的重要标志<sup>[14]</sup>。由图 1 知,与非根

际土壤相比,不同植物根际土壤脲酶活性变化幅度介于 0.51%~24.16%。与非根际土壤相比,3 种植物根际土壤转化酶活性变化幅度介于-0.31%~2.31%,且在银露梅根际土壤显著高于非根际土壤。不同植物根际土壤过氧化氢酶活性分别高出非根际

土壤,变化幅度介于-2.01%~6.42%,且银露梅表现为负富集。不同植物根际土壤中性磷酸酶活性比非根际土壤变化幅度介于-9.13%~30.05%,且玉竹表现为负富集。

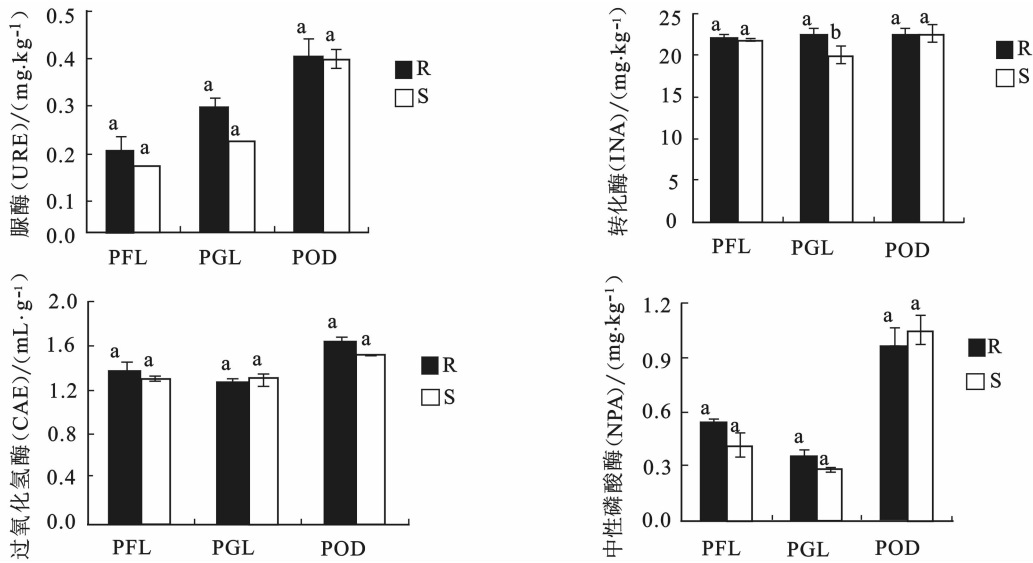


图 1 土壤酶活性

Fig. 1 Changes of soil enzymatic activity

### 2.3 3 种植物根际和非根际土壤养分与酶活性的相关分析

2.3.1 根际土壤养分与酶活性的相关分析 对 3 种植物根际土壤化学性质与酶活性相关分析(表 3)表明:土壤有机质与脲酶和转化酶均呈极显著负相关;除脲酶外,土壤全氮、有效氮、全磷、有效磷与其

他 3 种酶都呈极显著正相关;土壤全钾与 4 种酶都呈极显著负相关;土壤有效钾与过氧化氢酶和中性磷酸酶均呈极显著正相关;除转化酶外,土壤 pH 与其他 3 种酶都负相关,且与过氧化氢酶和中性磷酸酶均呈显著负相关;土壤 CEC 与 4 种酶都呈负相关,且与脲酶和转化酶均呈极显著负相关。

表 3 根际土壤养分与酶活性相关分析

Table 3 Correlation analysis of soil nutrients and enzyme activities in the rhizosphere soil

项目	OM	TN	TP	TK	AN	AP	AK	pH	CEC
URE	-0.942**	0.914**	0.721*	-0.967**	0.878**	0.949**	0.569	-0.082	-0.764*
INA	-0.980**	0.571	0.258	-0.831**	0.503	0.649	0.062	0.446	-0.988**
CAE	-0.511	0.963**	0.947**	-0.799**	0.982**	0.932**	0.963**	-0.699*	-0.177
NPA	-0.459	0.945**	0.953**	-0.762*	0.969**	0.909**	0.977**	-0.740*	-0.118

注:URE:脲酶,INA:转化酶,CAE:过氧化氢酶,NPA:中性磷酸酶。\*表示 0.05 水平上差异显著,\*\*表示 0.01 水平上差异显著,n=9。(表 4、表 6 同)

2.3.2 非根际土壤养分与酶活性的相关分析 对 3 种植物非根际土壤化学性质与酶活性相关分析(表 4)表明:土壤有机质与转化酶和中性磷酸酶均呈极显著正相关;土壤全氮、全磷、有效钾、CEC 与 4 种土壤酶都呈极显著正相关;土壤全钾与 4 种酶都

呈负相关,且与脲酶、过氧化氢酶和中性磷酸酶都呈极显著负相关;土壤有效磷与脲酶、过氧化氢酶和中性磷酸酶都呈极显著正相关,与转化酶呈显著正相关;土壤 pH 与脲酶呈显著正相关,与其他 3 种酶都呈极显著正相关。

表 4 非根际土壤养分与酶活性相关分析

Table 4 Correlation analysis of soil nutrients and enzyme activities in the non-rhizosphere soil

项目	OM	TN	TP	TK	AN	AP	AK	pH	CEC
URE	0.644	0.939**	0.946**	-0.997**	0.969**	0.991**	0.843**	0.676*	0.923**
INA	0.919**	0.844**	0.831**	-0.662	0.784*	0.709*	0.939**	0.936**	0.866**
CAE	0.782*	0.988**	0.954**	-0.962**	0.983**	0.988**	0.932**	0.808**	0.981**
NPA	0.877**	0.992**	0.989**	-0.956**	0.993**	0.973**	0.980**	0.897**	0.961**

### 2.4 3种植物根际和非根际土壤肥力的评价分析

为了更好地反映出土壤酶活性与土壤化学性质之间的关系,选择适用于不同中草药生境土壤肥力的评价指标,对研究区域内土壤 pH、CEC、养分和酶活性共 13 个指标进行主成分分析。可以看出(表 5),第 1 主成分的方差贡献率最大,为 72.566%,对该土壤系统起着主导作用;第 2 主成分方差贡献率为 13.934%;2 个主成分的累计方差贡献率达到了 88.930%,超过了 85%的信息,所以能反映不同植物根际与非根际土壤各指标的相对重要性及其之间的关系。

表 5 土壤主成分特征根

Table 5 Principal component eigenvalues of soil

项目	特征根	方差贡献率/%	累计贡献率/%
F1	9.434	72.566	72.566
F2	1.811	13.934	86.500

表 6 土壤主成分因子载荷矩阵

Table 6 Factor loading matrix of main composition of soil

项目	OM	TN	TP	TK	AN	AP	AK	pH	CEC	URE	INA	CAE	NPA
F1	0.660	0.994	0.994	-0.891	0.970	0.956	0.954	0.653	0.277	0.866	0.671	0.889	0.985
F2	0.720	-0.021	0.004	0.208	-0.227	-0.285	0.107	0.412	0.716	-0.387	0.434	-0.290	-0.050

通过将因子载荷换算为规格化特征向量后,可以得到反映土壤肥力水平的 2 个主成分表达式:

$$F1=0.215x_1+0.324x_2+0.324x_3-0.290x_4+0.316x_5+0.311x_6+0.311x_7+0.213x_8+0.090x_9+0.282x_{10}+0.218x_{11}+0.289x_{12}+0.321x_{13} \tag{2}$$

$$F2=0.535x_1-0.016x_2+0.003x_3+0.154x_4-0.169x_5-0.211x_6+0.080x_7+0.306x_8+0.532x_9-0.287x_{10}+0.323x_{11}-0.215x_{12}-0.037x_{13} \tag{3}$$

式中: $x_1, x_2, \cdots, x_{15}$  分别代表有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、pH、CEC 等土壤化学性质及脲酶、转化酶、过氧化氢酶、中性磷酸酶的酶促反应特征值。将不同植物根际与非根际土壤 pH、CEC、养分含量和酶活性共 13 个指标代入表达式,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,得到不同植物生境下反映土壤肥力水平的综合得分(表 7)。结果表明,银露梅和金露梅根际土壤肥力水平综合得分均高于非根际土壤,而玉竹则相反,这可能与不同林分下根际环境和土壤特性有关。3 种植物根际与非根际土壤肥力水平综合得分表现为玉竹>银露梅>金露梅。值得注意的是,玉竹根际与非根际得分均较高,而银露梅和金露梅根际与非根际得分均较低,这主要是由于在玉竹生境,土壤全氮、全

对 13 个土壤肥力因子在各主成分上的因子载荷进行分析,结果(表 6)表明,全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾和中性磷酸酶对第 1 主成分影响较大,综合了土壤全氮、全磷、有效养分以及中性磷酸酶活性相关的信息,可命名为养分活化因子(F1)。第 2 主成分中,土壤有机质和 CEC 载荷较高,包含了有机质及土壤中交换性阳离子相关的信息,表明它们在土壤物质循环以及提高土壤肥力中发挥着重要的作用,反映了土壤供给植物肥力的能力,同时反映了土壤养分的总储量,因此,命名为保肥因子(F2)。因此,从评价 3 种植物根际与非根际土壤肥力的角度来看,土壤全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾是可选的养分指标,有机质和 CEC 也扮演着重要的角色,而中性磷酸酶是可选的土壤酶指标。

磷、有效氮、有效磷、有效钾含量和中性磷酸酶活性均较高,且它们对第 1 主成分影响较大。

表 7 主成分因子得分及土壤肥力水平综合得分

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

植物	部位	F1	F2	综合得分	综合排名
PFL	R	-0.250	0.214	-0.036	3
	S	-0.468	0.102	-0.365	4
PGL	R	-0.430	0.006	-0.424	5
	S	-0.901	-0.193	-1.093	6
POD	R	0.755	-0.183	0.573	2
	S	1.293	0.053	1.346	1

## 3 结论与讨论

### 3.1 根际和非根际土壤养分与酶活性变化差异

祁连山东段不同生境下 3 种中草药金露梅、银露梅和玉竹的根际与非根际土壤中,除全钾和过氧化氢酶外,其他养分和土壤酶在金露梅和银露梅处均表现出根际聚集现象,而在玉竹根际表现出与此呈现相反的趋势,这可能与不同植物生境有关,在很大程度上受到根际环境和生物综合因素的影响<sup>[15-16]</sup>。此外,土壤 pH 在金露梅和玉竹根际处低于非根际,而在银露梅根际处高于非根际,这可能是由于不同植物间根系养分吸收相偶联的质子的作用和有机酸的分泌而使阴阳离子吸收不平衡影响所致<sup>[17]</sup>。值得注意的是,除金露梅外,其他两种植物均表现为当根际土壤氮素和磷素含量低于非根际土

壤时,土壤 pH 也表现出根际低于非根际土壤,这与范晓晖<sup>[18]</sup>等的研究相似,其与植物根系分泌物有着密切的关系。根系分泌物在保持根际微域生态系统活力方面扮演着关键因素<sup>[19]</sup>。当逆境胁迫或养分含量降低时,植物根系分泌物(包括有机化合物、高分子粘胶物质、质子和无机离子等)数量一般都明显增多,它们可以缓解植物养分缺乏的生长状态<sup>[20]</sup>。此外,根系分泌的还原物质还直接影响养分的有效性,其可通过改变根际物理、化学及生物学性质,改善和缓解植物的养分缺乏状况<sup>[21]</sup>。土壤中养分元素的丰缺直接影响着根系分泌物的组成与数量,而根系分泌物在很大程度上受根际环境因素和生物因素的影响和制约。

### 3.2 根际和非根际土壤养分与酶活性之间的相关性

祁连山东段不同生境下 3 种植物根际和非根际土壤有机质、氮素、磷素和 pH 与酶活性均表现出一定的相关性,表明土壤酶活性可以反映 3 种植物根际和非根际土壤的养分水平。在 3 种植物根际,除土壤 pH 与转化酶活性表现出正相关外,土壤有机质、pH 和阳离子交换量与其他酶均表现为负相关,而在非根际土壤均表现为正相关关系,且相关系数均较高,这表明植物根际受根际分泌物影响较大,而在非根际,除受根际分泌物影响外,还受到土壤母质和枯枝落叶层的综合影响。由于祁连山东段几种中草药生境郁闭度较高,常年堆积的枯枝落叶和根系腐殖物在土壤中不断积累、矿化,而植物残体在分解过程中产生酸类物质又促进土壤中难溶性物质的转化而供植物吸收利用,从而使土壤中的有机质含量及土壤酶活性增加<sup>[22]</sup>。杨玉盛通过对格氏栲林枯枝落叶层的研究也表明枯枝落叶层对林地长期生产力维持具有重要作用<sup>[23]</sup>。在 3 种植物根际和非根际间,有效氮与脲酶表现为极显著正相关,说明土壤脲酶活性有利于土壤中氮素的转化及分解,提高土壤中氮素的有效性。与此类似,土壤中磷酸酶活性也对提高土壤中磷素的有效性有着重要的作用。值得注意的是,在 3 种植物根际和非根际间,土壤全钾与 4 种酶均呈负相关,而速效钾与 4 种酶均呈正相关,这可能是在研究区土壤全钾含量较高时,无效钾(主要是矿物质态钾)的固定降低了土壤酶活性,而土壤酶活性的降低在一定程度上会抑制土壤钾素的活化。与根际土壤相比,非根际土壤速效氮、速效磷、速效钾含量与酶活性相关性均较高,这可能是由于非根际区域除受植物与土壤接触面共同作用外,还受土壤凋落物和土壤母质影响较大<sup>[24]</sup>。陆雅海<sup>[25]</sup>等研究表明,根际环境随着土壤类型和植物种

类存在很大变异,根际微生物也受土壤、植物等多重因子的复合影响。所以,保护好祁连山区森林中草药生境凋落物,对于促进森林中草药可持续发展以及改善生态环境具有重大意义。

### 3.3 3 种植物根际和非根际土壤肥力的评价分析

祁连山东段不同生境下 3 种植物根际与非根际土壤肥力水平综合得分表现为玉竹>金露梅>银露梅。这主要是玉竹生长在海拔较低处阴湿的山坡,植被覆盖率较高,土壤腐殖质层较厚,而金露梅和银露梅都处于较高海拔且在其生境植被较稀少。对祁连山东段 3 种植物土壤养分与酶活性的肥力评价,还有待于从根际微生物生态方面进一步深入研究。

**致谢:**感谢农业部黄土高原农业资源与环境修复重点开放实验室、农业部西北植物营养与农业环境重点实验室在土壤样品分析测定过程中给予的大力帮助。

### 参考文献:

[1] LYNCH J P. Root architecture and plant productivity[J]. *Plant Physio*,1995,109:7-13.

[2] 薛梓瑜,周志宇,詹媛媛,等. 干旱荒漠区旱生灌木根际土壤磷变化特征[J]. *生态学报*,2010,30(2):341-349.

XUE Z Y,ZHOU Z Y,ZHAN Y Y,*et al.* Changing characteristics of phosphorus in the rhizosphere soil of the xeromorphic shrubs in arid deserts[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2010,30(2):341-349. (in Chinese)

[3] MARIANNE K, JORG S, CHRISTINA K, *et al.* Microbial processes and community composition in the rhizosphere of European beech-The influence of plant C exudates[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2011,43:551-558.

[4] NIE M,ZHANG X D,WANG J Q,*et al.* Rhizosphere effects on soil bacterial abundance and diversity in the Yellow River Deltaic ecosystem as influenced by petroleum contamination and soil salinization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2009,41:2535-2542.

[5] 秦嗣军,吕德国,李作轩,等. 樱桃根际土壤酶活性与土壤养分动态变化及其关系研究[J]. *土壤通报*,2006,37(6):1175-1178.

QIN S J, LV D G, LI Z X, *et al.* Dynamic changes of soil enzyme activities and nutrients in cherry rhizosphere[J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2006,37(6):1175-1178. (in Chinese)

[6] 李国辉,陈庆芳,黄懿梅,等. 黄土高原典型植物根际对土壤微生物生物量碳、氮、磷和基础呼吸的影响[J]. *生态学报*,2010,30(4):976-983.

LI G H, CHEN Q F, HUANG Y M, *et al.* Soil microbial biomass C, N, P and basal respiration in rhizosphere soil of typical plants on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2010,30(4):976-983. (in Chinese)

[7] GIANFREDA L, SANNINO F, VTOANTE A. Pesticide effects on the activity of tree, immobilized and invertase[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,1995,27(9):1201-1208.

[8] 马永俊,王金叶,刘兴明,等. 祁连山保护区森林生态系统现状与保护对策[J]. 西北林学院学报,2005,20(4):5-8.  
MA Y J,WANG J Y,LIU X M,*et al.* Status of forestry ecosystem and protection countermeasure in the protection areas in Qilian mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University,2005,20(4):5-8. (in Chinese)

[9] CHEN Z. Butterfly diversity in different habitat types at the Huzhu northern mountain national forest park, Qinghai[J]. Biodiversity Science,2006,14(6):517.

[10] 中华人民共和国林业局. 森林土壤分析方法:中华人民共和国林业行业标准[S]. 北京:中国标准出版社,1999.

[11] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.

[12] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京:科学出版社,1989.

[13] 马斌,周志宇,张彩萍,等. 超旱生灌木根际土壤磷的含量特征[J]. 草业学报,2005,14(3):106-110.  
MA B,ZHOU Z Y,ZHANG C P,*et al.* The character of phosphorus concentrations in rhizosphere soil of super-xerophytic shrubs[J]. Acta Prataculturae Sinica,2005,14(3):106-110. (in Chinese)

[14] 杨承栋,焦如珍. 关于杉木人工林根际土壤性质变化的研究[J]. 林业科学,1999,35(6):2-9.  
YANG C D,JIAO R Z. Research on change of rhizosphere soil properties of chinese fir plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae,1999,35(6):2-9. (in Chinese)

[15] 陈龙池,廖利平,汪思龙,等. 根系分泌物生态学研究[J]. 生态学杂志,2002,21(6):57-62.  
CHEN L C,LIAO L P,WANG S L,*et al.* A review f or research of root exudates ecology[J]. Chinese Journal of Ecology,2002,21(6):57-62. (in Chinese)

[16] 黄刚,赵学勇,张铜会,等. 科尔沁沙地 3 种灌木根际土壤 pH 值及其养分状况[J]. 林业科学,2007,43(8):138-142.  
HUANG G,ZHAO X Y,ZHANG T H,*et al.* pH and nutrition properties of rhizosphere soils of three shrub species in horqin sandy land[J]. Scientia Silvae Sinicae,2007,43(8):138-142. (in Chinese)

[17] 张福锁,曹一平. 根际动态过程与植物营养[J]. 土壤学报,1992,29(3):239-250.  
ZHANG F S,CAO Y P. Rhizosphere dynamics and plant nutrition[J]. Acta Pedologic Sinica,1992,29(3):239-250. (in Chinese)

[18] 范晓晖,刘芷宇. 根际 pH 环境与磷素利用研究进展[J]. 土壤通报,1992,23(5):238-240.  
FAN X H,LIU Z Y. Rhizosphere pH environment and phosphorus utilization[J]. Chinese Journal of Soil Science,1992,23(5):238-240. (in Chinese)

[19] 张福锁. 环境胁迫与植物根际营养[M]. 北京:中国农业出版社,1997.

[20] 张福锁. 根系分泌物及其在植物营养中的作用[J]. 中国农业大学学报,1992,18(4):353-356.  
ZHANG F S. Root exudates and their role in plant nutrition [J]. Journal of China Agricultural University,1992,18(4):353-356. (in Chinese)

[21] 李春俭. 土壤与植物营养研究新动态(第 4 卷)[M]. 北京:中国农业大学出版社,2001.

[22] 郭曼,郑粉莉,和文祥,等. 黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J]. 土壤学报,2010,47(5):979-986.  
GUO M,ZHENG F L,HE W X,*et al.* Variation of vegetation diversity and its relationship with soil nutrient and enzyme activity in lands of different abandoned years in the loess hilly-gully region[J]. Acta Pedologica Sinica,2010,47(5):979-986. (in Chinese)

[23] 杨玉盛,郭剑芬,林鹏,等. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库[J]. 生态学报,2004,24(2):359-367.  
YANG Y S,GUO J F,LIN P,*et al.* Carbon and nutrient pools of forest floor in native forest and monoculture plantations in subtropical China[J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(2):359-367. (in Chinese)

[24] 刘建军. 林木根系生态研究综述[J]. 西北林学院学报,1998,13(3):74-78.  
LIU J J. A review on root ecology of forest trees[J]. Journal of Northwest Forestry University,1998,13(3):74-78. (in Chinese)

[25] 陆雅海,张福锁. 根际微生物研究进展[J]. 土壤,2006,38(2):113-121.  
LU Y H,ZHANG F S. The advances in rhizosphere microbiology[J]. Soils,2006,38(2):113-121. (in Chinese)