

· 中药农业 ·

林下种植重楼和珠子参根际土壤与原生林地土壤特征差异[△]

高静¹, 王楠^{2*}, 万修福³, 徐蓉蓉², 关思静¹, 黄文静², 宋忠兴², 李铂², 张伟⁴

1. 陕西中医药大学 药学院, 陕西 西安 712046;

2. 陕西中医药大学 陕西中药资源产业化省部共建协同创新中心/秦药特色资源研究开发国家重点实验室(培育), 陕西 咸阳 712083;

3. 中国中医科学院 中药资源中心/道地药材国家重点实验室培育基地, 北京 100700;

4. 宁强县中药材产业发展中心, 陕西 汉中 724400

[摘要] **目的:** 比较林下种植重楼和珠子参根际土壤与原生林地土壤特征差异, 了解植被变化对土壤特征的影响。**方法:** 以林下移栽种植重楼和珠子参为对象, 测定根际土壤特征并与相对应的原生林地土壤数据进行比较。**结果:** 珠子参根际土壤有机碳(46.14 g·kg⁻¹)、有机质(79.55 g·kg⁻¹)、全钾(9.65 g·kg⁻¹)和硝态氮(0.006 g·kg⁻¹)质量分数较高, 而全磷(0.49 g·kg⁻¹)、速效磷(0.03 g·kg⁻¹)和铵态氮(0.01 g·kg⁻¹)质量分数的最高值出现在重楼根际土壤中。原生林地土壤中蔗糖酶(51.66 mg·g⁻¹·d⁻¹)、脲酶(372.6 μg·g⁻¹·d⁻¹)、过氧化氢酶(9.65 μmol·g⁻¹·d⁻¹)和亚硝酸还原酶(932.04 μmol·g⁻¹·d⁻¹)活性最高。重楼根际土壤脲酶活性高于珠子参根际土壤, 亚硝酸还原酶活性则与之相反, 其他几种酶的活性在2种药用植物根际土壤间差异无统计学意义。主成分分析和冗余分析发现, 3种土壤在养分构成、理化性质和酶活性方面的变化趋势不同。**结论:** 土壤特征之间差异表明, 植被类型养分需求和获取策略有所不同, 酶活性及其与土壤理化性质的相关性受到植株自身生理状态和环境条件的双重影响, 且往往出现复杂的网状联系。探明药用植物适宜的土壤类型差异能为引种栽培区域划分提供参考。

[关键词] 根际; 林下种植; 酶活性; 养分; 重楼; 珠子参

[中图分类号] R282.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-4890(2022)02-0304-10

doi: 10.13313/j.issn.1673-4890.20210121004

Soil Characteristics of Original Forest and Rhizosphere of Understory Cultivated *Paris polyphylla* Sm. and *Panax japonicus* C. A. Mey. var. *major* (Burk.) C. Y. Wu et K. M. Feng

GAO Jing¹, WANG Nan^{2*}, WAN Xiu-fu³, XU Rong-rong², GUAN Si-jing¹, HUANG Wen-jing², SONG Zhong-xing², LI Bo², ZHANG Wei⁴

1. College of Pharmacy, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xi'an 712046, China;

2. State Key Laboratory of Research & Development of Characteristic Qin Medicine Resources (Cultivation), Shaanxi Collaborative Innovation Center of Chinese Medicinal Resources Industrialization, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712083, China;

3. State Key Laboratory of Dao-di Herbs Breeding Base, National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China;

4. Traditional Chinese Medicine Industry Development Center of Ningqiang County, Hanzhong 724400, China

[Abstract] **Objective:** To study the effects of vegetation change on soil characteristics by comparing the differences between the rhizosphere soil of *Paris polyphylla* Sm. and *Panax japonicus* C. A. Mey. var. *major* (Burk.) C. Y. Wu et K. M.

[△] **[基金项目]** 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助项目; 国家重点研发计划项目(2017YFC1700701); 中医药公共卫生服务补助专项(财社〔2018〕43号); 省部共建秦药特色资源研究开发国家重点实验室(培育)开放课题(QY202104)

* **[通信作者]** 王楠, 副教授, 研究方向: 药用植物生理生态; Tel: 029-38182202, E-mail: gosouth@hotmail.com

Feng and the original forest soil. **Methods:** The soil characteristics of the rhizosphere of *P. polyphylla* and *P. japonicus*, which were transplanted understory, were measured and compared with the data of original forest soil. **Results:** The organic carbon ($46.14 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), organic matter ($79.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), total potassium ($9.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) and nitrate nitrogen ($0.006 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) had the highest content in the rhizosphere soil of *P. japonicus*, while the highest values of total phosphorus ($0.49 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), available phosphorus ($0.03 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) and ammonium nitrogen ($0.01 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) were found in the rhizosphere soil of *P. polyphylla*. The activities of sucrose ($51.66 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$), urease ($372.6 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$), catalase ($9.65 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) and nitrite reductase ($932.04 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) were the highest in the original forest soil. The urease activity in the rhizosphere soil of *P. polyphylla* exceeded that in the rhizosphere soil of *P. japonicus*, but the activity of nitrite reductase was in a reverse situation. There was no significant difference in the activities of other previous enzymes between the rhizosphere soils of the two medicinal plants. Principal component analysis and redundancy analysis showed that the three soils had different changing trends in terms of nutrient composition, physicochemical properties and enzyme activity. **Conclusion:** The soil characteristics indicated that nutrient requirements and acquisition strategies differed among various vegetation types, and enzyme activity and its correlation with soil physicochemical properties were influenced by both physiological status and environmental conditions of plants, where complex network connections appeared. Exploring suitable soil types of medicinal plants facilitated the regional division of introduction and cultivation.

[Keywords] rhizosphere; understory cultivation; enzyme activity; nutrient; *Paris polyphylla* Sm.; *Panax japonicus* C. A. Mey. var. *major* (Burk.) C. Y. Wu et K. M. Feng

森林生态系统的功能健全离不开林下植被的有序参与, 养分含量、水分资源及光照强弱等能够影响森林生态系统物种多样性和群落稳定性的关键因素都会随着林下植被的更替而发生变化^[1]。已有研究通过对多个气候区域不同林分构成下的灌木层、草本层及苔藓层进行去除与添加植物物种试验发现, 土壤理化性质和酶活性的差异是林下植被变化导致土壤微生物群落特征改变的关键因素^[2]。因此, 探查林下植被对土壤理化性质和酶活性的调控机制, 对深入了解森林生态系统的运转模式具有重要的理论和实践意义。本课题组前期已经对重楼和珠子参根际土壤微生物量碳、氮、磷及其生态化学计量进行了相关探索^[3], 本研究通过将高海拔区域育苗的重楼和珠子参移栽到遮阴条件相似且林下植被均已去除的中海拔区域, 对2种移栽植物的根际土壤酶活性、养分含量及理化特征与中海拔区域原生林地土壤相应数据进行对比, 分析2种移栽植物对原生林地土壤特征的影响模式, 为人工选择重楼和珠子参适宜生长区域土壤划分标准提供试验数据和理论参考。

1 材料

1.1 样品

试验样地位于陕西省西南隅秦岭和巴山两大山系交汇地带的宁强县鹰咀岩区域, 此地区年平均降雨量1200 mm, 年均温13℃。样地所处海拔1500 m

左右, 样地主要分布树种为白桦、麻栎、漆树、千金榆, 华山松等, 草本植物多为蒿类、白茅、莎草等。将样地草本全部挖除后, 进行重楼和珠子参的移栽工作, 移栽时间选取在9月。本试验取样地点集中于上层乔木为千金榆和华山松的混交地带。实验材料由陕西中医药大学陕西中药资源产业化省部共建协同创新中心李铂副教授鉴定为重楼 *Paris polyphylla* Sm. 和珠子参 *Panax japonicus* C. A. Mey. var. *major* (Burk.) C. Y. Wu et K. M. Feng。土壤采集于2019年7月上旬(当地高温时段, 土壤化学过程较为剧烈), 在重楼和珠子参林下栽培周边且未开发区域采集原生林地土壤。由于原生林地下层植物茂密, 此土壤样本不区分是否为根际土。取样深度0~20 cm, 在25 m×25 m的区域内使用5点法取样, 混合土样除去植物残体和土壤动物。统一选择移栽苗龄3年的重楼和珠子参根系不易抖落结合紧密的土壤部分(厚度1~3 mm)作为根际土, 在连片种植区域为达到重复实验效果, 3组土壤获取区域间隔10 m以上。上述土壤过2 mm筛, 置4℃冰箱保存待测定。

1.2 试剂

盐酸、硫酸、甲基红、溴甲基绿、碳酸钠、酒石酸锶钾、抗坏血酸、钼酸铵、磷酸二氢钾、硫酸钾、氢氧化钠、柠檬酸、氢氧化钾、苯酚、甲醇、乙醇、丙酮、次氯酸钠、硫酸铵、葡萄糖、酒石酸

钾钠、亚硫酸钠、草酸钠、高锰酸钾、脲、硝酸钾、硫酸银、氢氧化钙、碳酸钙均为分析纯，购自国药集团化学试剂有限公司；对氨基苯磺酸和 α -萘胺盐酸盐均为分析纯，购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.3 仪器

Vario MACRO cube 型元素分析仪（德国Elementar公司）；K1160型凯氏定氮仪（海能未来技术集团股份有限公司）；UV-1800PC型紫外分光光度计（上海美谱达仪器有限公司）；FP640型火焰光度计（上海精工科技有限公司）；Select TOC型总有机碳分析仪（德国Elementar公司）；ICAP-7200型电感耦合等离子体发射光谱仪、Micro 17R型离心机均购于美国赛默飞世尔科技公司；230T型超声破碎仪（昆山市超声仪器有限公司）；SpectraMax190型全波长酶标仪（美国分子仪器公司）；JCS-2000型电子天平（中国凯丰集团有限公司）；DIKW-4型水浴锅（北京中兴伟业仪器有限公司）。

2 方法

2.1 样品测定

土壤总碳（soil total carbon, TC）、有机碳（total organic carbon, TOC）、全氮（total nitrogen, TN）、全磷（total phosphorus, TP）、全钾（total kalium, TK）、速效钾（available kalium, AK）、速效磷（available phosphorus, AP）、有机质（total organic matter, TOM）、土壤微生物量碳（soil microbial biomass carbon, MBC）、土壤微生物量氮（microbial biomass nitrogen, MBN）、土壤微生物量磷（microbial biomass phosphorus, MBP）、铵态氮（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ）、硝态氮（ $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ）采用元素分析仪、硫酸-重铬酸钾氧化容量法、浓硫酸消煮-凯氏定氮法、氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法、火焰光度法、重铬酸钾外加热法、三氯甲烷熏蒸 K_2SO_4 法、三氯甲烷熏蒸-容量分析法、Brookes法、分光光度法等进行测定^[49]。土壤脲酶（urease, URE）、蔗糖酶（sucrase, SUC）、酸性磷酸酶（acid phosphatase, ACP）、过氧化氢酶（catalase, CAT）、硝酸还原酶（nitrate reductase, NR）、亚硝酸还原酶（nitrite reductase, NiR）活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法、3, 5-二硝基水杨酸比色法、对硝基苯磷酸盐比色法、高锰酸钾滴定法、酚二磺酸比色法，苯磺

酸-乙酸- α 萘胺比色法测定^[10-14]。土壤pH、电导率（electrical conductivity, EC）和含水量（water content, WC）分别使用pH计、电导率仪和称质量法测定。

2.2 数据统计与分析

使用主成分分析（principal component analysis, PCA）对数据进行降维处理，进行PCA时将数据进行如下标记：TOC（ X_1 ）、TN（ X_2 ）、TP（ X_3 ）、TK（ X_4 ）、MBC（ X_5 ）、MBN（ X_6 ）、MBP（ X_7 ）、TOC:TN（ X_8 ）、TOC:TP（ X_9 ）、TOC:TK（ X_{10} ）、TN:TP（ X_{11} ）、TN:TK（ X_{12} ）、TP:TK（ X_{13} ）、MBC:MBN（ X_{14} ）、MBC:MBP（ X_{15} ）、MBN:MBP（ X_{16} ）、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ （ X_{17} ）、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ （ X_{18} ）、AP（ X_{19} ）、AK（ X_{20} ）、pH（ X_{21} ）、EC（ X_{22} ）、WC（ X_{23} ）、ACP（ X_{24} ）、NiR（ X_{25} ）、NR（ X_{26} ）、CAT（ X_{27} ）、URE（ X_{28} ）、SUC（ X_{29} ）、TC（ X_{30} ）、TOM（ X_{31} ）。采用单因素方差分析（One-way ANOVA）检验各指标不同处理间的差异，最小显著性差异法（LSD）进行多重比较，显著性水平为 $P<0.05$ 。采用 t -value双序图研究土壤特征对酶活性的影响，当箭头完全落入空白或灰色圆圈，分别代表与限定酶活性呈现显著正相关或显著负相关。使用冗余分析（RDA）将3种不同来源土壤特征的多变量集中于同一坐标系中，直观反映因子变化的贡献差异。由于TN与TOM、TC与TOC在分析时有较大的重叠，因此在 t -value双序图与RDA中去除TOM与TC数据。MBC、MBN、MBP、生态化学计量等相关分析已在本课题组前期发表文章中进行讨论^[3]。

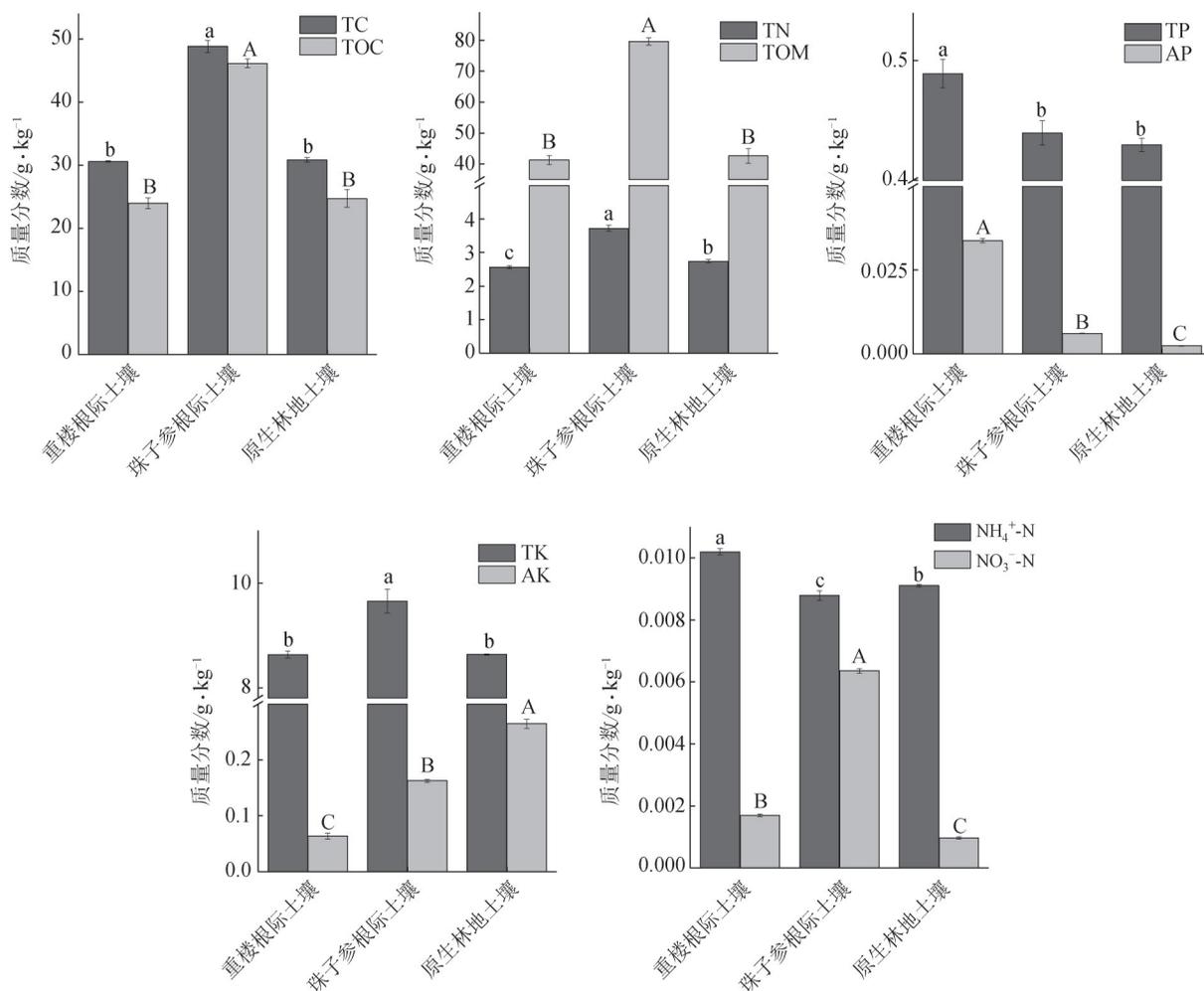
3 结果与分析

3.1 不同来源土壤养分含量和理化性质比较

由图1可知，珠子参根际土壤TC和TOC质量分数显著高于重楼根际和原生林地土壤的TC和TOC质量分数（ $P<0.05$ ），TC是后两者的1.59倍和1.58倍，TOC是后两者的1.92倍和1.86倍，而重楼根际和原生林地土壤的指标之间差异无统计学意义。珠子参根际土壤TN质量分数显著高于原生林地土壤TN质量分数（ $P<0.05$ ），达到后者的1.36倍；原生林地土壤TN质量分数显著高于重楼根际土壤TN质量分数（ $P<0.05$ ），是后者的1.07倍。珠子参根际土壤TOM质量分数显著高于重楼根际和原生林地土壤TOM质量分数（ $P<0.05$ ），分

别达到后两者的1.92倍和1.87倍,而重楼根际和原生林地土壤的指标之间差异无统计学意义。重楼根际土壤TP质量分数显著高于珠子参根际和原生林地土壤TP质量分数 ($P<0.05$),分别达到后两者的1.11倍和1.14倍,珠子参根际和原生林地土壤TP质量分数之间差异无统计学意义。重楼根际土壤AP质量分数显著高于珠子参根际土壤AP质量分数 ($P<0.05$),达到后者的5.5倍;珠子参根际土壤AP质量分数显著高于原生林地土壤AP质量分数 ($P<0.05$),是后者的2.57倍。珠子参根际土壤TK质量分数显著高于重楼根际和原生林地土壤TK质量分数 ($P<0.05$),达到后两者的1.12倍,重楼根际和原生林地土壤TK质量分数之间差异无统计学意义。原生林地土壤AK质量分数显著高于珠子参根际土壤AK质量分数 ($P<0.05$),达到后者的1.63倍;珠子参根际土壤AK质量分数显著高于重楼根际土

壤AK质量分数 ($P<0.05$),是后者的2.56倍。重楼根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数显著高于原生林地土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数 ($P<0.05$),达到后者的1.12倍;原生林地根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数显著高于珠子参根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数 ($P<0.05$),是后者的1.04倍。珠子参根际土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量分数显著高于重楼根际土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量分数 ($P<0.05$),达到后者的3.74倍;重楼根际土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量分数显著高于原生林地土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量分数 ($P<0.05$),是后者的1.75倍。由表1可知,3种土壤间pH、EC及WC差异均有统计学意义 ($P<0.05$),pH为原生林地土壤>重楼根际土壤>珠子参根际土壤,EC和WC为重楼根际土壤>珠子参根际土壤>原生林地土壤。上述结果表明植物会通过碳、氮、磷、钾相关元素的获取间接影响土壤环境,进而改变土壤性质。



注:不同大、小写字母表示相同物质间 $P<0.05$;图2同。

图1 不同来源土壤养分相关元素质量分数 ($\bar{x}\pm s, n=3$)

表1 不同来源土壤理化性质特征 ($\bar{x}\pm s, n=3$)

土壤类型	pH	EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	WC/%
重楼根际土壤	5.66±0.01b	117.70±1.27a	29.08±0.003a
珠子参根际土壤	4.91±0.03c	103.00±0.62b	27.42±0.003b
原生林地土壤	5.96±0.02a	83.80±1.11c	26.06±0.001c

注: 不同小写字母表示组间 $P<0.05$ 。

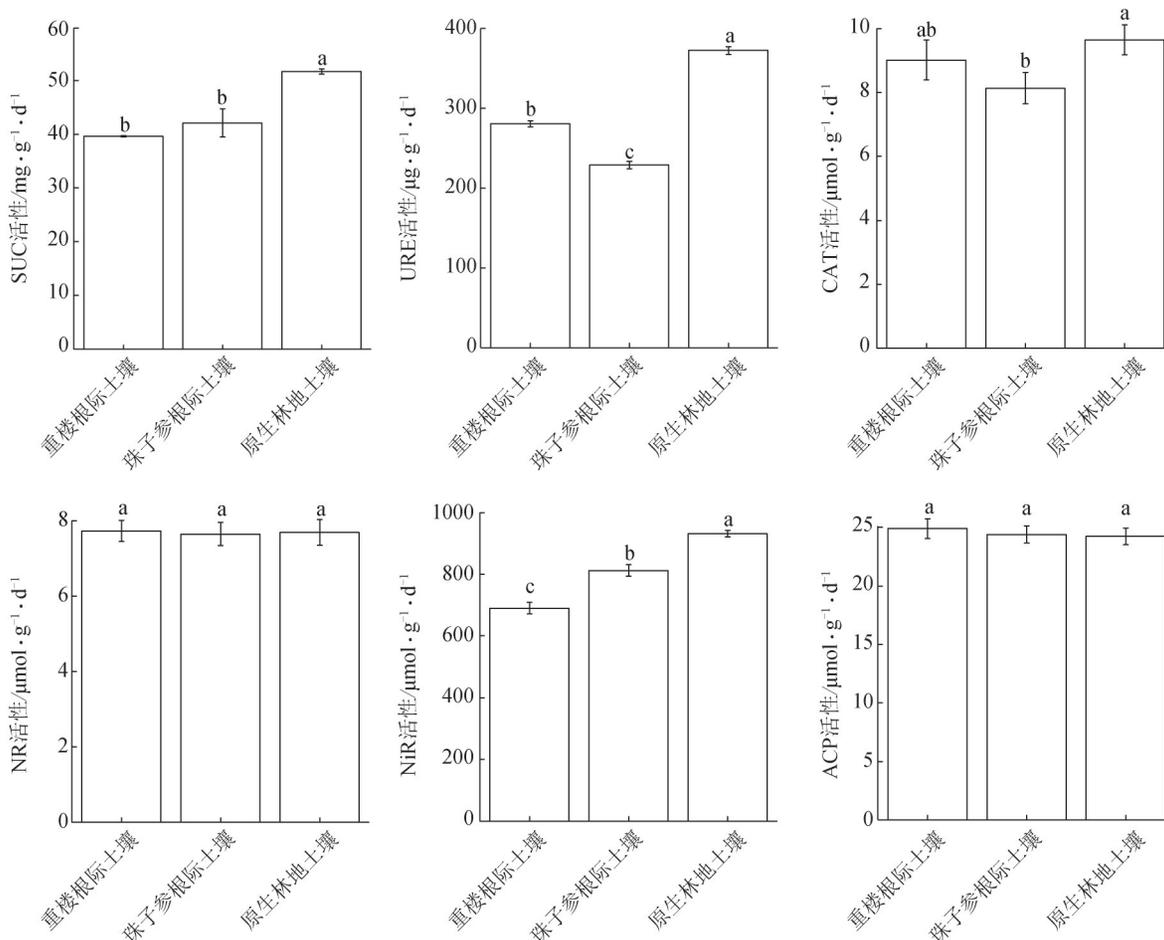
3.2 不同来源土壤酶活性的比较

由图2可知, 原生林地土壤SUC活性显著高于重楼根际和珠子参根际土壤SUC活性 ($P<0.05$), 达到后两者的1.30倍和1.23倍, 而重楼和珠子参之间差异无统计学意义。原生林地土壤URE活性显著高于重楼根际土壤URE活性 ($P<0.05$), 达到后者的1.33倍; 重楼根际土壤URE活性又显著高于珠子参根际土壤URE活性 ($P<0.05$), 达到后者的1.22倍。原生林地土壤CAT活性显著高于珠子参根际土壤CAT活性 ($P<0.05$), 达到后者的1.19倍; 重楼根际土壤CAT活性与其他2种土壤之间差异无统计学意义。原生林地土壤NiR活性显著高于珠子参根

际土壤NiR活性 ($P<0.05$), 达到后者的1.15倍; 珠子参根际土壤NiR活性显著高于重楼根际土壤NiR活性 ($P<0.05$), 达到后者的1.18倍。3种土壤间的NR和ACP活性差异无统计学意义。酶活性差异受到植株自身生理状态和环境条件的双重影响, 一段时间内的酶活性只能表征当前时期不同植被类型和微环境小气候对不同酶类活动的影响。

3.3 土壤特征与酶活性的相关性

从 t -value 双序图 (图3) 可以看出, TOC : TP 和 TN : TP 与 ACP 活性呈现显著负相关关系。AK、MBC : MBP、MBN : MBP、TOC : TP、TOC : TK、TOC : TN、TN : TP、TN : TK、TOC、TN、TK、 NO_3^- -N、MBN 与 NiR 活性呈现显著正相关关系, pH、MBC : MBN、TP : TK、 NH_4^+ -N、MBP、TP、AP、WC、EC 与 NiR 活性呈现显著负相关关系。TOC : TP、TOC : TK 和 TN : TP 与 NR 活性呈现显著正相关关系, MBC : MBN、TP : TK 与 NR

图2 不同来源土壤酶活性特征 ($\bar{x}\pm s, n=3$)

活性呈现显著负相关关系。MBC : MBN、TP : TK 与CAT活性呈现显著正相关关系, TOC : TP、TOC : TK、TN : TP、TOC、NO₃⁻-N与CAT活性呈现显著负相关关系。pH、MBC : MBN、TP : TK、NH₄⁺-N与URE活性呈现显著正相关关系, MBN : MBP、TOC : TP、TOC : TN、TOC : TK、TN : TP、TN : TK、TOC、NO₃⁻-N、TN、TK、MBN与URE活性呈现显著负相关关系。没有指标与SUC活性表现出显著相关性。指标间的相关关系往往会出现复杂的网状联系, 酶活性虽然与养分含量及其相对占比有很高的关联度, 但是由于植物生长状态及环境的不断变化, 这种关系并不一定是时刻紧密对应的。

3.4 土壤特征的PCA

从表2可知, 前三轴能够解释95.424%的变异(第一轴58.426%、第二轴33.063%、第三轴3.935%)。主成分表达式为公式(1)~(3), 主成分综合模型为公式(4)。

$$F_1=0.221ZX_1+0.228ZX_2-0.153ZX_3+0.214ZX_4-0.119ZX_5+0.217ZX_6-0.174ZX_7+0.206ZX_8+0.228ZX_9+0.221ZX_{10}+0.234ZX_{11}+0.230ZX_{12}-0.220ZX_{13}-0.233ZX_{14}+$$

$$0.148ZX_{15}+0.228ZX_{16}-0.209ZX_{17}+0.206ZX_{18}-0.166ZX_{19}+0.083ZX_{20}-0.186ZX_{21}-0.068ZX_{22}-0.096ZX_{23}-0.066ZX_{24}+0.086ZX_{25}-0.030ZX_{26}-0.141ZX_{27}-0.115ZX_{28}+0.011ZX_{29}-0.219ZX_{30}+0.221ZX_{31} \quad (1)$$

$$F_2=0.106ZX_1+0.072ZX_2-0.227ZX_3+0.111ZX_4+0.249ZX_5+0.111ZX_6+0.208ZX_7+0.137ZX_8+0.071ZX_9+0.103ZX_{10}+0.005ZX_{11}+0.049ZX_{12}+0.089ZX_{13}-0.013ZX_{14}-0.238ZX_{15}-0.059ZX_{16}+0.137ZX_{17}+0.149ZX_{18}+0.220ZX_{19}-0.291ZX_{20}-0.189ZX_{21}+0.297ZX_{22}-0.282ZX_{23}+0.114ZX_{24}-0.287ZX_{25}+0.014ZX_{26}-0.189ZX_{27}-0.270ZX_{28}-0.301ZX_{29}-0.110ZX_{30}+0.106ZX_{31} \quad (2)$$

$$F_3=0.042ZX_1-0.003ZX_2-0.037ZX_3+0.084ZX_4-0.194ZX_5-0.074ZX_6-0.029ZX_7+0.105ZX_8+0.036ZX_9+0.031ZX_{10}-0.003ZX_{11}-0.049ZX_{12}-0.070ZX_{13}-0.008ZX_{14}-0.015ZX_{15}-0.036ZX_{16}+0.064ZX_{17}-0.023ZX_{18}-0.026ZX_{19}+0.006ZX_{20}+0.010ZX_{21}-0.014ZX_{22}-0.067ZX_{23}+0.495ZX_{24}-0.035ZX_{25}+0.803ZX_{26}+0.043ZX_{27}-0.016ZX_{28}+0.136ZX_{29}-0.005ZX_{30}+0.042ZX_{31} \quad (3)$$

$$F=0.612F_1+0.346F_2+0.041F_3 \quad (4)$$

式中, ZX₁~ZX₃₁是X₁~X₃₁的标准化转换值。

主成分综合模型得分说明, 3种土样在养分状

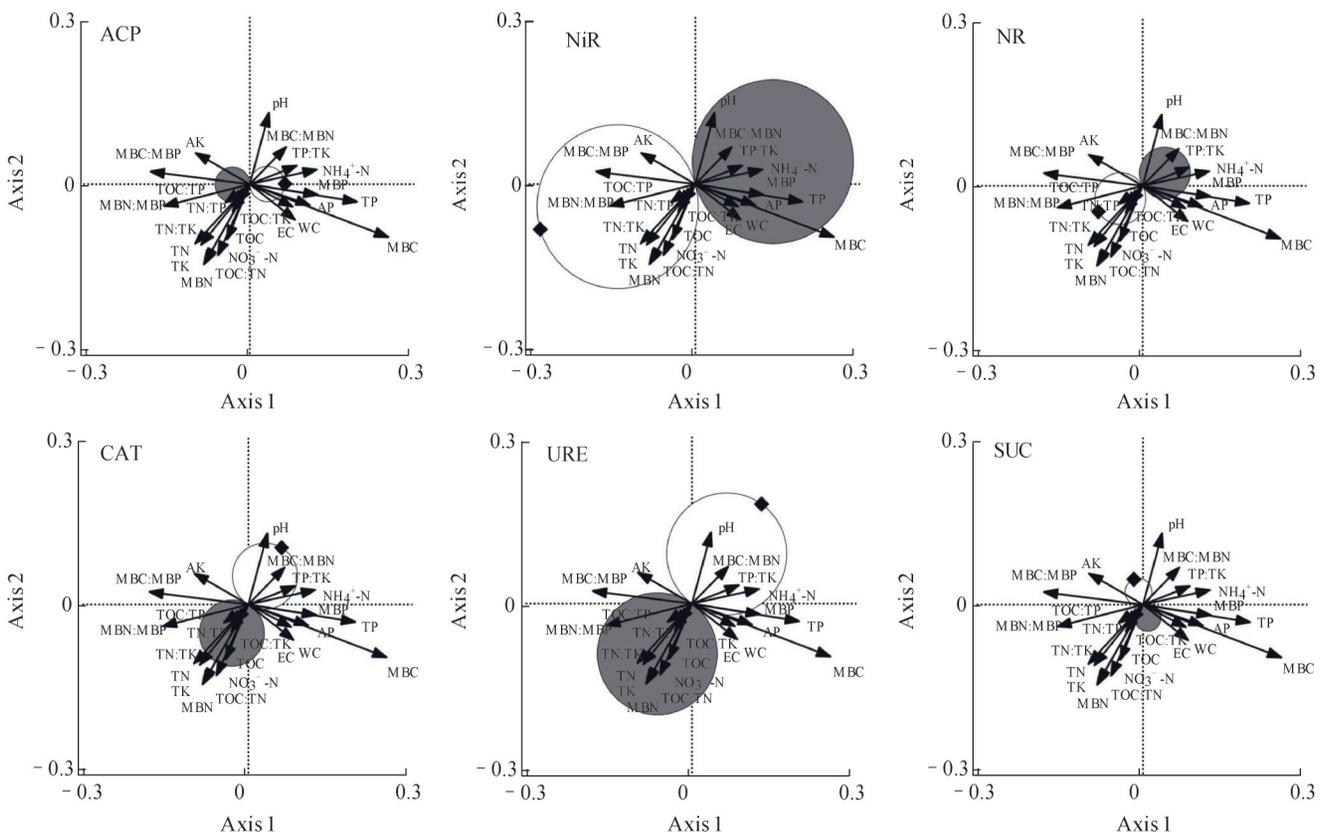


图3 土壤酶活性与土壤特征因子间的响应关系

表2 土壤特征的方差分解主成分提取分析

主成分	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	18.112	58.426	58.426
2	10.250	33.063	91.489
3	1.220	3.935	95.424
4	0.768	2.476	97.900
5	0.383	1.237	99.137
6	0.129	0.417	99.554
7	0.103	0.332	99.886
8	0.035	0.114	100.000
9	1.657×10^{-15}	5.345×10^{-15}	100.000
10	8.013×10^{-16}	2.585×10^{-15}	100.000
11	6.615×10^{-16}	2.134×10^{-15}	100.000
12	5.453×10^{-16}	1.759×10^{-15}	100.000
13	4.115×10^{-16}	1.327×10^{-15}	100.000
14	3.677×10^{-16}	1.186×10^{-15}	100.000
15	3.229×10^{-16}	1.041×10^{-15}	100.000
16	2.927×10^{-16}	9.441×10^{-16}	100.000
17	2.635×10^{-16}	8.498×10^{-16}	100.000
18	1.651×10^{-16}	5.325×10^{-16}	100.000
19	5.871×10^{-17}	1.894×10^{-16}	100.000
20	2.327×10^{-17}	7.507×10^{-17}	100.000
21	-5.368×10^{-17}	-1.732×10^{-16}	100.000
22	-1.515×10^{-16}	-4.889×10^{-16}	100.000
23	-1.986×10^{-16}	-6.407×10^{-16}	100.000
24	-3.485×10^{-16}	-1.124×10^{-15}	100.000
25	-4.047×10^{-16}	-1.305×10^{-15}	100.000
26	-4.703×10^{-16}	-1.517×10^{-15}	100.000
27	-5.796×10^{-16}	-1.870×10^{-15}	100.000
28	-8.008×10^{-16}	-2.583×10^{-15}	100.000
29	-9.759×10^{-16}	-3.148×10^{-15}	100.000
30	-3.119×10^{-15}	-1.006×10^{-14}	100.000
31	-4.999×10^{-15}	-1.613×10^{-14}	100.000

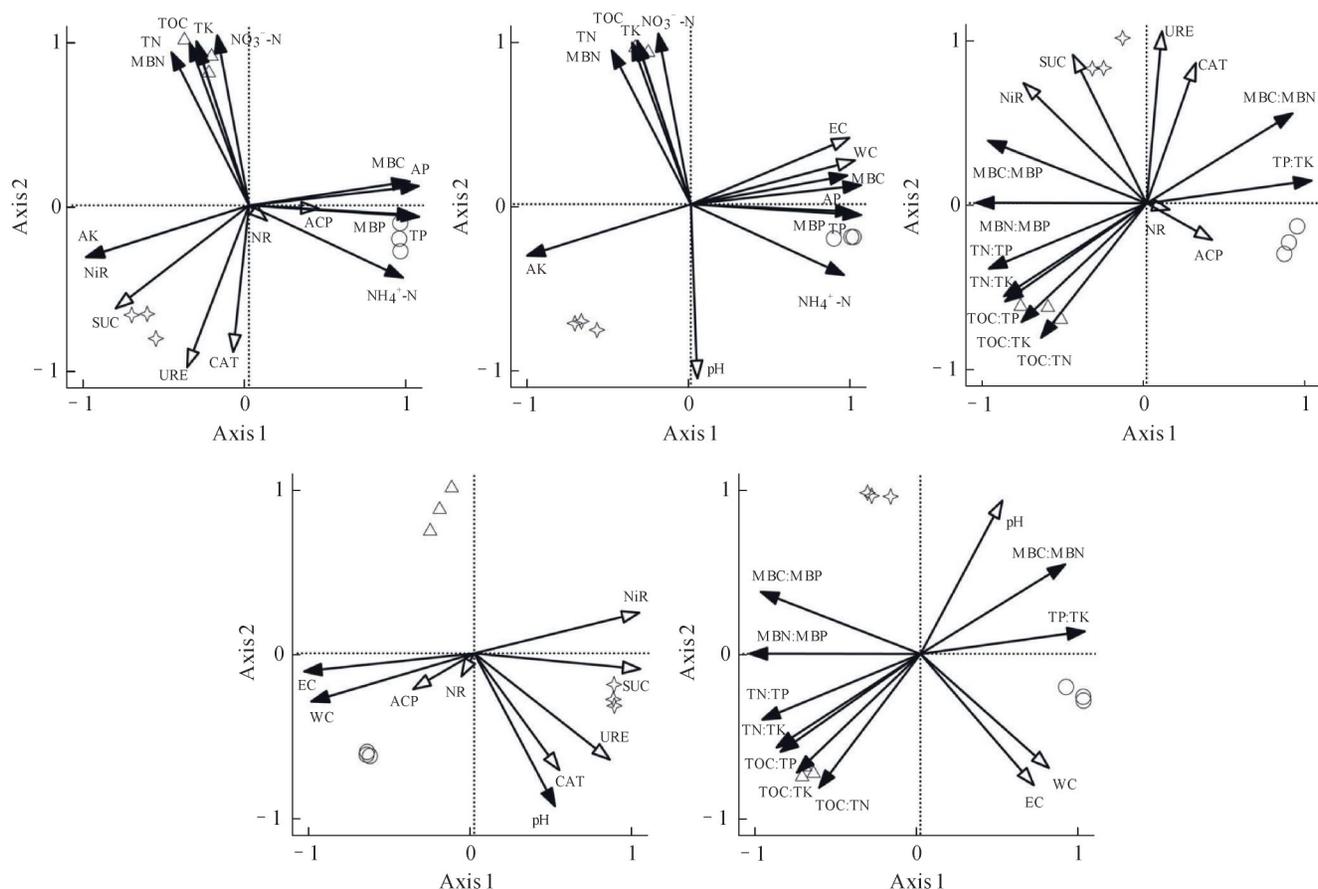
态和酶反应的综合条件下存在较大的差异(表3)。RDA表明,重楼根际土壤特征与磷素类、 NH_4^+ -N相关性较高,ACP相比其他酶类有较高的参与度。珠子参根际土壤特征与大部分氮素类、TOC、TK及 NO_3^- -N相关性较高。原生林地土壤则是AK、SUC、URE、NiR、CAT较为活跃(图4)。

表3 不同来源土壤综合主成分分值及排名

土壤类型	F_1 (排名)	F_2 (排名)	F_3 (排名)	F (排名)
重楼根际土壤	-4.424 (3)	2.653 (1)	-0.040 (3)	-1.791 (2)
珠子参根际土壤	5.269 (1)	1.558 (2)	-0.009 (2)	3.765 (1)
原生林地土壤	-0.845 (2)	-4.210 (3)	0.050 (1)	-1.974 (3)

4 讨论

根际是土壤养分流动与植物营养生理生态过程有机结合的重要区域。在本研究中,珠子参根际土壤TC和TN均高于重楼根际土壤和原生林地土壤。结合TOC和TOM数据可以推断,TOC占比能够决定TC总量,而TOM对TN含量上升具有较高的贡献。大量研究通过对不同地貌环境(山区、沙地、平原等)差异性植被类型(草地、作物、森林等)根际及土壤养分进行分析,同样得出TOC与TC、TOM与TN间存在显著正相关关系^[5,15-18]。林下移栽过程中深松处理属于保护性耕作,在此过程中的人为活动和耕作扰动使更多 CO_2 和风积灰尘进入土壤,影响了土壤氮素的平衡和迁移转化,产生碳、氮元素表层富集效应^[18],有利于浅根系植物的吸收。在本研究中,珠子参根际土壤TC和TN较高的原因可能是其相比于重楼对表层土壤碳、氮养分的利用率更高。有研究报道,通过对柠条*Caragana korshinskii* Kom.、短花针茅*Stipa breviflora* Griseb.和蒙古冰草*Agropyron mongolicum* Keng进行比较,发现根际与非根际TC和TN的含量存在不规律的变化形式,成因复杂,可能由植被差异介导的地表水资源汇流及再分配过程和根系对土壤理化性质及微生物种群的调节能力不同等方面原因导致^[4]。根际土壤氮素含量既可以由根部土层养分决定,也可以被凋落物所含养分影响。然而,杉木*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.、林下中华鳞毛蕨*Dryopteris chinensis* (Bak.) Koidz.、淡竹叶*Lophatherum gracile* Brongn.、毛冬青*Ilex pubescens* Hook. et Arn.和紫珠*Callicarpa bodinieri* Levl.等植物根际与非根际氮素含量被凋落物的差异化影响则说明,虽然凋落物也是林下土壤养分的主要来源之一,但凋落物所含养分的迁移是一个极其复杂的生态现象,有可能经历多次富集和再释放过程^[19]。在本研究中,重楼根际土壤TP和AP均高于珠子参根际土壤和原生林地土壤。森林土壤磷素主要来源于矿物质风化,因此较难得到补充。磷素有向根际迁移的趋势,但是由于环境条件和植物吸收与转化能力差异,根际与非根际土壤磷素相对含量也随之变化^[20]。对本试验样地分析后发现,珠子参种植密度大、间隙小,而重楼种植密度小且形态高瘦,由此可见,磷素的种间差异可能与淋溶程度有关^[6]。钾离



注：圆形、三角形和星形分别代表重楼、珠子参和原生林地。

图4 不同来源土壤特征的RDA

子移动性较强，AK易受土壤质地和地形的影响^[21]，林下物种的差异加剧了本研究中AK含量的变化。

土壤酶来源广泛，植物根系、微生物及动物残体均能产生，且土壤中的多数生物化学与土壤环境运行、发展与转变过程均有土壤酶的参与^[22-23]。由于土壤酶能转变固定态土壤养分，加速土壤有效态养分释放，因此土壤酶活性成为土壤肥力高低的衡量标准之一。土壤酶活性受到生物（植物、微生物与动物）和非生物（土壤水分、温度与理化性质）的综合影响^[24]。在本研究中，重楼和珠子参根际土壤SUC活性较为接近，但两者URE活性差异较大。李焜等^[11]对比了远志 *Polygala tenuifolia* Willd. 和北柴胡 *Bupleurum chinense* DC. 的根际土壤SUC和URE的活性，也得到了与本研究相同的结果。土壤SUC能将蔗糖分解为葡萄糖和果糖，以便于植物和微生物吸收利用^[22]。SUC还能促进土壤易溶性营养物质增加，有利于为土壤微生物提供TOC，提高土壤微生物活性^[13]。土壤URE的酶促反应只能酶解尿素转

变为氨，其活性与土壤氮素含量具有一定关联^[23]。在本研究中，重楼根际土壤TN含量低于珠子参的现象可能暗示重楼对氮素的需求更大，导致微生物代谢更为活跃，这一点也可以被重楼根际土壤MBC含量较高所验证^[3]，所以造成重楼根际土壤URE活性提高。土壤ACP能对磷素进行分解，促进有机磷矿化，当解磷微生物感知环境磷素含量降低这一信号时，会以胞吐形式向土壤释放ACP，侧面帮助植物获得磷素^[13]。然而，在本研究中ACP活性高低与TP、AP并没有直接的对应关系。SUC、URE和ACP是土壤中碳、氮和磷素流动与循环的关键酶，其活性大小时常受到土壤养分水平、微生物组成结构和植物生长状态的相互影响，因此ACP活性与TP、AP含量的复杂关系及如何受到其他环境因素制约还需要进一步研究。过氧化氢类物质会对植物的生长发育产生危害，而CAT能有效破坏土壤中这类物质^[22]。有研究证实，CAT活性和土壤有机质积累程度也有关联^[25]。但也有文章和本研究结果类似，

指出氮素含量不一定会影响到CAT活性,由此可见氮素的转运效率差异也起到一定作用^[20]。向土壤中添加肥料对NR活性通常有激活作用^[25],然而也有研究证实毛竹 *Phyllostachys edulis* (Carriere) J. Houzeau 原生林带土壤NR活性最高且人工外源施加氮素对土壤NR活性具有显著抑制作用^[13]。由于不同植被类型的根系形状和生理过程不同,引起土壤理化性质和微生物群落的改变,不同的反硝化作用体现差异化的土壤NR活性^[26]。另一方面,底物和不同酶抑制物含量及底物分解速率是影响NR和NiR在氮素转化环节上相互关系的重要因素^[27]。在本研究中,3种土壤NR活性差距不大,但NiR活性表现出较大差异,可能是前期不同土壤NR均能够促进反硝化作用,为NiR提供了不同的底物数量^[27],而此时的NR却因元素转化周期活性降低。此外,在本研究中原生林地土壤的6种酶都保持不低的活性,可以表明植被物种多样性对酶活性具有一定的调节能力,能够有效提高土地生产力,增强生态系统组分的功能^[28]。

土壤酶活性、养分含量和理化性质受到植被类型的显著影响,正、负响应均有发生。根据由主成分表达式得到的 F_1 、 F_2 、 F_3 值和主成分综合模型得到的 F 值可以认为,本研究中的3种土样在酶活性、养分含量和理化性质方面存在差异,重楼和珠子参移栽后对原生林地土壤特征的影响方向不同。在本研究中,RDA显示重楼根际的磷素响应和珠子参根际的碳氮反应较为突出,而原生林地土壤的酶活性更加显著。本研究中3种土样的SUC、URE、ACP活性与碳、氮、磷素含量变化不一致、相关性不显著的问题可能与移栽物种在适应新环境过程中能表现出类似入侵植物的特征,改变了养分循环效率有关^[29]。通常,成熟林带土壤酶活性较高,这与本研究中原生林地土壤情况类似。然而,有研究表明,虽然近熟林酶促底物略有欠缺,但其部分酶活性和养分含量高于成熟林,原因归结于物种年轻、发育迅速且有效养分比重相对较高^[30]。这一点也在本研究中重楼和珠子参的根际土壤中有所表现。因此,酶活性与养分含量相关性的变化,由植被组成、物种年龄、环境条件、采样时间等限制。此外,根部生理作用的周期变化也会带来酶活性与养分含量的剧烈变化,导致重楼与珠子参根际土壤养分相较于原生林地出现富集作用。本研究中RDA结果显示,

重楼、珠子参与土壤养分、酶活性的正、负相关关系和土壤p值具有较大的关联。有研究也表明,常绿阔叶林下的土壤pH和养分含量适合重楼、珠子参的生长^[31-32],且2种植物的次生代谢产物与生长特性均与土壤养分含量呈现显著相关关系^[33-36]。宁强县属于多雨气候类型地区,更应注意土壤养分的存在形式, NH_4^+ -N有助于保护土壤肥力, NO_3^- -N在潮湿的环境下容易流失,而 NO_3^- -N增多伴随的土壤pH降低对硝化细菌有抑制作用,影响酶活性^[37]。

土壤特征与植被类型是一个相互影响的过程。与原生林地相比,进行林下种植后的土壤由于物种改变导致的养分需求变化必然会带来酶活性的差异。因此,应开展林下种植适应性研究,针对不同药用植物特征展开相应抚育工作,根据药用植物生长需求选择相应原生林地类别,缩短药用植物移栽后的适应周期,推动药用植物生态种植发展。

参考文献

- [1] 郑琳琳,赵琼,曾德慧. 林下植被去除对樟子松人工林土壤酶活性的影响[J]. 生态学杂志,2017,36(11):3056-3063.
- [2] 张坤,包维楷,杨兵,等. 林下植被对土壤微生物群落组成与结构的影响[J]. 应用与环境生物学报,2017,23(6):1178-1184.
- [3] 王楠,高静,万修福,等. 林下种植重楼和珠子参根际土壤与微生物量碳(C),氮(N),磷(P)生态化学计量特征研究[J]. 中国中药杂志,2020,45(18):4373-4381.
- [4] 张义凡,陈林,李学斌,等. 不同荒漠草原植被根际与非根际土壤养分及碳库管理指数特征[J]. 草业学报,2017,26(8):24-34.
- [5] 张海欧,王欢元,孙婴婴. 毛乌素沙地玉米不同种植年限砒砂岩与沙复配土壤有机质与全氮的关系[J]. 水土保持通报,2019,39(2):242-245,252.
- [6] 王传杰,王齐齐,徐虎,等. 长期施肥下农田土壤-有机质-微生物的碳氮磷化学计量学特征[J]. 生态学报,2018,38(11):3848-3858.
- [7] 陈安磊,王凯荣,谢小立,等. 不同施肥模式下稻田土壤微生物生物量磷对土壤有机碳和磷素变化的响应[J]. 应用生态学报,2007,18(12):2733-2738.
- [8] 戴雅婷,侯向阳,闫志坚,等. 库布齐沙地两种植被恢复类型根际土壤微生物和土壤化学性质比较研究[J]. 生态学报,2016,36(20):6353-6364.
- [9] 董琴,李启权,王昌全,等. 成都平原不同土地利用方式对土壤剖面钾素分布的影响[J]. 应用生态学报,2019,30(4):1389-1396.

- [10] 沈震,武玉荷,党鹏,等.黄土高原丘陵沟壑区2种起源油松林更新苗根际土壤酶活性和养分含量比较研究[J].西北林学院学报,2019,34(1):19-24.
- [11] 李焜,刘怡.晋东南3种道地药材植物根际真菌群落特性[J].生态环境学报,2019,28(7):1388-1393.
- [12] 关颂娜,吴凤芝,姜爽.不同氮素水平对不同氮效率黄瓜生长及其根际土壤酶活性的影响[J].作物杂志,2013(1):68-72.
- [13] 彭春菊,李全,顾鸿昊,等.模拟氮沉降及经营方式对毛竹林土壤酶活性的影响[J].应用生态学报,2017,28(2):423-429.
- [14] 林玉,聂富育,杨万勤,等.四川盆地西缘4种人工林土壤氮转化酶的季节动态[J].应用与环境生物学报,2019,25(3):634-639.
- [15] 袁子茹,任灵,陈建纲,等.祁连山不同草地类型土壤有机质与全氮分布的关系[J].草原与草坪,2016,36(3):12-16.
- [16] 郑然,郑宝林.冀北栗钙土区耕层土壤有机质和全氮的空间变异特征[J].干旱区资源与环境,2018,32(5):123-129.
- [17] 李英,韩红艳,王文娟,等.黄淮海平原不同土地利用方式对土壤有机碳及微生物呼吸的影响[J].生态环境学报,2017,26(1):62-66.
- [18] 宋霄君,吴会军,武雪萍,等.长期保护性耕作可提高表层土壤碳氮含量和根际土壤酶活性[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1588-1597.
- [19] 李张敏,陈伏生,方向民,等.残落物去除对杉木林4种林下植物养分含量和化学计量比的影响[J].生态学杂志,2018,37(7):2092-2099.
- [20] 王晓锋,刘婷婷,龚小杰,等.三峡库区消落带典型植物根际土壤磷形态特征研究[J].生态学报,2020,40(4):1342-1356.
- [21] 李龙,姚云峰,秦富仓.黄花甸子流域土壤全氮、速效磷、速效钾的空间变异[J].生态学杂志,2015,34(2):373-379.
- [22] 雷丽,郭巧生,王长林,等.复合种植对丹参根际土壤理化性质与土壤酶活性的影响[J].中国中药杂志,2018,43(12):2480-2488.
- [23] 王德立,齐耀东.蛇足石杉不同天然居群的土壤酶活性研究[J].中国现代中药,2019,21(10):1407-1410.
- [24] 马志良,赵文强,刘美.高寒灌丛生长季根际和非根际土壤多酚氧化酶和过氧化氢酶活性对增温的响应[J].应用生态学报,2019,30(11):3681-3688.
- [25] 陈鸿飞,庞晓敏,张仁,等.不同水肥运筹对再生季稻根际土壤酶活性及微生物功能多样性的影响[J].作物学报,2017,43(10):1507-1517.
- [26] 谢泽宇,罗珠珠,李玲玲,等.黄土高原不同粮草种植模式土壤碳氮及土壤酶活性[J].草业科学,2017,34(11):2191-2199.
- [27] 杨帆,杨万勤,吴福忠,等.茶对川西亚高山森林土壤呼吸、养分和酶活性的影响[J].应用生态学报,2017,28(6):1779-1785.
- [28] 杨媛媛,陈奇伯,黎建强,等.滇中高原华山松植物多样性与土壤生物肥力特征[J].土壤,2017,49(1):90-96.
- [29] 王锦文,王君丽,王江,等.加拿大一枝黄花入侵对土壤酶活性的影响研究[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):117-123.
- [30] 葛晓改,肖文发,曾立雄,等.三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系[J].应用生态学报,2012,23(2):445-451.
- [31] 阮召群.华重楼种植基地土壤肥力综合评价[J].福建农业科技,2016(11/12):1-4.
- [32] 杨新杰,许苗苗,宋蓓,等.土壤因子对珠子参药材质量的影响研究[J].中药材,2014,37(9):1513-1517.
- [33] 张欣,闫耀莉,张丽,等.灯台七的品质评价及其与土壤因子的相关性分析[J].中国药师,2019,22(1):52-56.
- [34] 左应梅,杨维泽,杨美权,等.珠子参表型性状变异及其与地理-土壤养分因子的相关性分析[J].西南农业学报,2019,32(7):1594-1600.
- [35] 刘哲,钟海蓉,戚则日沙,等.氮、磷、钾配施对华重楼根茎的产量和有效成分含量的影响[J].中草药,2019,50(24):6103-6113.
- [36] 赵新礼.珠子参生态学和生物学特性的研究[J].现代中药研究与实践,2015,29(6):14-17.
- [37] 莫江明,郁梦德,孔国辉.鼎湖山马尾松人工林土壤硝态氮和铵态氮动态研究[J].植物生态学报,1997,21(4):335-341.

(收稿日期:2021-01-21 编辑:戴玮)