

· 中药农业 ·

不同栽培年限人参根区土壤养分 酶活性
及微生物量的变化王天佑^{1,2}, 丁万隆¹, 尹春梅², 王蓉¹, 李勇^{1*}

1. 中国医学科学院 北京协和医学院 药用植物研究所, 北京 100193;

2. 吉林农业大学 中药材学院, 吉林 长春 130118

【摘要】 目的: 阐释不同栽种年限人参根区土壤养分、酶活性及微生物量的变化情况及其相互关系。**方法:** 参照行业标准测定土壤养分含量, 采用比色法测定土壤酶活性、平板稀释计数法测定土壤微生物量。**结果:** 随栽培年限不断增加, 人参(2年生除外)根区土壤真菌、细菌、放线菌量及丰富度均呈逐年降低趋势, 土壤碱解氮含量和过氧化氢酶活性呈先升高后降低再升高趋势, 土壤有效磷含量、纤维素酶以及蔗糖酶活性呈先升高后降低趋势, 土壤脲酶活性呈先降低后升高趋势, 土壤速效钾含量和酸性磷酸酶活性呈逐年升高趋势, 其他土壤养分因子呈不同程度降低趋势。分析发现, 相关系数(r) ≥ 0.2 的数据占全部数据的80.88%。**结论:** 土壤微生物、矿质元素及酶活性等土壤因子具有明显的相关性, 人参栽培过程中土壤微生态失衡及病原物生物量增加是人参连作障碍形成的主要原因之一。

【关键词】 人参; 连作障碍; 土壤酶活性; 土壤养分; 土壤微生物

【中图分类号】 R282.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1673-4890(2021)11-1927-07

doi:10.13313/j.issn.1673-4890.20210104008

Dynamics of Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Microbial Biomass in Rhizosphere of *Panax ginseng* of Different Growing YearsWANG Tian-you^{1,2}, DING Wan-long¹, YIN Chun-mei², WANG Rong¹, LI Yong^{1*}

1. Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100193, China;

2. College of Chinese Medicinal Materials, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China

【Abstract】 Objective: To elucidate the changes of soil nutrients, enzyme activity, and microbial biomass in rhizosphere of *Panax ginseng* of different growing years and their relationship. **Methods:** The content of soil nutrients was determined with standard methods, soil enzyme activity by colorimetry, and soil microorganism biomass with plate dilution method. **Results:** Over time, the biomass and richness of soil fungi, bacteria and actinomycetes in *P. ginseng* (except the 2-year-old plants) rhizosphere decreased, and the content of soil alkali-hydrolyzable nitrogen and catalase activity increased first, then decreased, and finally rose. The content of soil available phosphorus, cellulase activity, and sucrase activity elevated first and then reduced. The activity of soil urease decreased first and then increased. The content of soil available potassium and acid phosphatase activity increased year by year. Other soil nutrient factors decreased to varying degrees. Most (80.88%) of the correlation coefficients were ≥ 0.2 . **Conclusion:** Soil factors such as soil microorganisms, mineral elements, and enzyme activity are significantly correlated. The imbalance of soil microecology and the increase in soil-borne pathogens are among the main reasons for the continuous cropping obstacles of *P. ginseng*.

【Keywords】 *Panax ginseng* C. A. Meyer; continuous cropping obstacle; soil enzyme activity; soil nutrients; soil microorganisms

人参 *Panax ginseng* C. A. Meyer 为五加科多年生宿根草本植物, 以干燥根和根茎入药, 是驰名中

外的补益类中药材, 具有大补元气、复脉固脱、补脾益肺、生津养血、安神益智等功效^[1]。但人参具

[△] [基金项目] 国家中药标准化项目(ZYBZH-C-JL-27); 中国医学科学院医学与健康科技创新工程项目(2016-I2M-3-017)

* [通信作者] 李勇, 研究员, 研究方向: 药用植物栽培及病害防治; Tel: (010) 57833360, E-mail: liyong@implad.ac.cn

有极强的忌连作特性,老参地通常数十年内无法重复栽参^[2],即使通过撂荒、轮作等传统模式加以改良也难以恢复到初始水平^[3]。历史上“伐林栽参”模式虽一定程度上缓解了人参市场的供需矛盾,却引发土壤肥力下降、水土流失、生物多样性减退等诸多生态问题^[4]。深入研究人参连作障碍形成机制、加快老参地循环再利用,不仅能促进中药材生产与自然生态环境和谐发展,还有助于推动人参种植模式优化升级。

已有研究发现,连作导致人参根区土壤营养失衡,根系有机酸分泌量显著增加,最终表现为土壤微生物群落结构、酶活性及理化性状等的变化^[5]。本研究通过对我国人参主产区不同栽培年限人参根区土壤pH、养分含量、酶活性及菌群动态的测定,进而分析人参栽培过程中不同土壤因子的动态变化及其相互联系,为阐明人参连作障碍形成机制提供参考。

1 材料

1.1 试药

牛肉膏、蛋白胨、虎红、链霉素、葡萄糖、琼脂、蔗糖购自奥博星生物技术有限公司;其他试剂均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器

SPX-150型生化培养箱(中仪国科科技有限公司);UV-2450型紫外分光光度计(岛津仪器有限公司);万分之一天平(上海精密科学仪器有限公司);Scout pro型电子天平(奥豪斯电子天平仪器上海有限公司);ZHWHY-100H型恒温培养振荡器(上海智城分析仪器制造有限公司);DH-8D型水浴锅(上海一恒科技有限公司);BSC型生物安全柜(北京东联哈尔仪器制造有限公司);LX-B35L型立式自动电热压力蒸汽灭菌器(合肥华泰医疗设备有限公司)。

1.3 样品

2~5年生栽参农田土(编号为FSG2~FSG5)及对照农田土(FSFL)采自吉林省抚松县北岗镇(N42°26'55", E127°34'41"),平均海拔836 m,气压91.68 kPa。全部土壤样本采用五点法^[6]取样,每个样点随机选取6株健康生长的人参,小心挖出人参根并收集根围土(与主根距离<5 cm)。将土壤中的石块、植物残体、杂草等剔除干净,分别装入无

菌自封袋,记录对应的人参生长年限。

2 方法

2.1 前处理

样品加冰袋带回实验室,立即过2 mm筛,部分用于土壤微生物分析,剩余室温风干后用于土壤酶活性及营养元素分析。

2.2 土壤酶活性测定

土壤脲酶、酸性磷酸酶、纤维素酶和蔗糖酶活性均采用比色法^[7]测定;土壤过氧化氢酶活性采用改良紫外-可见分光光度法测定^[8-9]。

2.3 土壤养分测定

土壤pH测定参照NY/T 1377—2007^[10];土壤有机质测定参照NY/T 1121.6—2006^[11];土壤总氮及总碳测定采用高温燃烧法^[12];土壤全磷及全钾测定采用电感耦合等离子体(ICP)定量法^[13];土壤碱解氮测定参照LY/T 1228—2015^[14];土壤有效磷测定参照NY/T 1121.25—2012^[15];土壤速效钾测定参照NY/T 889—2004^[16]。

2.4 土壤微生物

土壤微生物量采用平板稀释计数法^[17]测定。牛肉膏蛋白胨培养基培养细菌、高氏一号合成培养基培养放线菌、马丁-孟加拉红-链霉素培养基培养真菌。细菌、放线菌30~300个菌落/皿,真菌10~100个菌落/皿为宜。接菌后28℃恒温培养(细菌1~2 d、放线菌3~4 d、真菌3~6 d),按公式(1)计算微生物原始浓度。

微生物原始浓度=(相同稀释度菌落平均数×稀释倍数)/土壤质量

(1)

2.5 数据分析

利用Excel 2016、SPSS 20.0和GraphPad Prism 8.0.2软件进行数据处理、统计分析及作图;单因素方差分析(ANOVA)比较不同处理间土壤因子的显著性差异;Pearson相关分析推测土壤因子间的相互关系;按公式(2)~(5)计算土壤酶活性相对指数、土壤酶活性综合指数、土壤微生物丰富度指数及土壤微生物丰富度综合指数^[18]。

土壤酶活性相对指数=某一土壤酶活性/全部土壤该酶活性的平均值

(2)

土壤酶活性综合指数=(脲酶活性相对指数+酸性磷酸酶活性相对指数+过氧化氢酶活性相对指数+纤维素酶活性相对指数+蔗糖酶活性相对指数)/5 (3)

土壤微生物丰富度指数=土壤中某类型微生物量/全部土壤样品中该微生物量的平均值 (4)

土壤微生物丰富度综合指数=(土壤细菌丰富度指数+土壤真菌丰富度指数+土壤放线菌丰富度指数)/3 (5)

3 结果与分析

3.1 土壤养分分析

本研究中土壤整体偏酸性 (pH 4.5~4.7), 非栽参农田土壤 (pH 4.7) 相较于栽参农田土壤略有改观, 但仍未达到人参最适生长 pH (pH 5.5~6.5)。随连作年限增加, 土壤 pH 差异无统计学意义; 非栽参农田土壤 pH 与栽参 5 年土壤差异无统计学意义, 与其他年生人参栽培土壤差异有统计学意义 ($P<0.05$); 土壤碱解氮和速效钾含量随人参栽培年限增加在土壤中逐渐积累, 且不同年限间差异有统计学意义 ($P<0.05$); 土壤有效磷呈先上升后降低趋势, 在人参栽种 4 年后达到峰值 ($169.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 5 年后骤降至 $88.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 土壤有机质随栽培年限增加呈先缓慢降低后升高趋势, 栽种 4 年后最低 ($46.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 5 年后最高 ($60.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 土壤碳氮比 (C/N) 随人参种植年限增加呈先降低后升高趋势; 土壤全磷和全钾含量随栽培年限增加, 呈先上升后降低再上升趋势 (表 1)。

3.2 土壤酶活性分析

土壤酶活性综合指数由大到小依次为对照农田土、3 年生农田土、4 年生农田土、5 年生农田土、2 年生农田土。随人参栽培年限增加, 土壤酶活性总体呈先上升后下降的趋势, 非栽参土壤相较于老

参地土壤酶活性更高 (表 2)。

3.2.1 脲酶活性 研究发现, 不同栽培年限人参根区土壤脲酶活性差异有统计学意义 ($P<0.05$)。随人参栽培年限增加, 土壤脲酶活性呈先下降后升高趋势, 大致呈 V 型。对照农田土壤脲酶活性最高 ($42.46 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), 3 年生人参根区土壤脲酶活性最低 ($9.37 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), 见图 1。

3.2.2 酸性磷酸酶活性 土壤酸性磷酸酶活性随人参栽培年限增加呈逐渐上升趋势 (图 2), 不同栽培年限人参根区土壤间差异有统计学意义 ($P<0.05$)。其中, 5 年生人参根区土壤酸性磷酸酶活性最高 ($160.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 2 年生人参根区土壤酸性磷酸酶活性最低 ($97.552 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

3.2.3 纤维素酶活性 随栽培年限增加, 土壤纤维素酶活性大致呈倒 V 型变化趋势 (图 3)。2 年生人参根区土壤纤维素酶活性与对照土壤差异无统计学意义, 其余土壤样本差异有统计学意义 ($P<0.05$)。其中, 3 年生人参根区土壤纤维素酶活性最高 ($1.487 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 5 年生人参根区土壤纤维素酶活性最低 ($0.195 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

3.2.4 蔗糖酶活性 土壤蔗糖酶活性随人参栽培年限增加大致呈倒 V 型变化趋势 (图 4), 不同栽培年限人参根区土壤间无统计学意义。对照土壤蔗糖酶活性最高 ($0.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 其次是 3 年生人参根区土壤 (蔗糖酶活性为 $0.72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 2 年生人参根区土壤蔗糖酶活性最低 ($0.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

3.2.5 过氧化氢酶活性 土壤过氧化氢酶活性随栽培年限增加呈 N 型变化趋势 (图 5)。其中 2 年生和 5 年生人参根区土壤过氧化氢酶活性无统计学意义, 其余土壤样本过氧化氢酶活性差异有统计学意义 ($P<0.05$)。连作 3 年人参根区土壤过氧化氢酶活性 ($0.972 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 显著高于其他土壤样本; 4 年生人参根区土壤过氧化氢酶活性最低 ($0.203 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

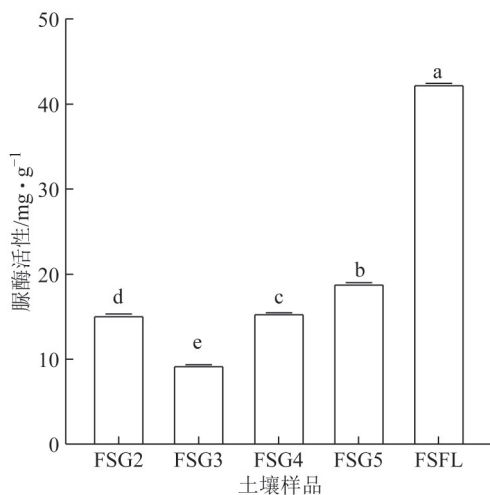
表 1 栽参及对照土壤养分分布

样品编号	pH	质量分数							
		有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	总碳/%	总氮/%	全磷/%	全钾/%	碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
FSG2	4.5b	52.7b	2.83a	0.34bc	0.080c	1.53b	268e	46.9e	166d
FSG3	4.5b	51.0b	2.70a	0.35ab	0.093b	1.58a	305a	72.8d	238c
FSG4	4.5b	46.4c	2.41a	0.27d	0.078d	1.49de	282d	169.5b	259b
FSG5	4.6ab	60.7a	3.06a	0.33c	0.094b	1.50cd	293c	88.7c	268a
FSFL	4.7a	59.2a	3.26a	0.36a	0.131a	1.51c	298b	220.9a	67e

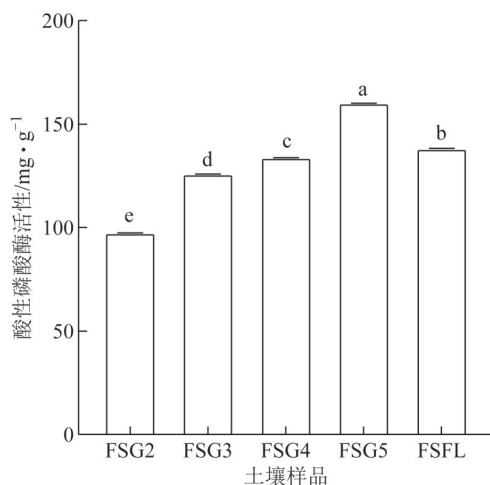
注: 同列不同小写字母表示处理间 $P<0.05$; 表 3 同。

表2 栽参及对照土壤酶活性指数

样品 编号	土壤酶活性相对指数					土壤酶活性 综合指数
	脲酶	酸性磷 酸酶	纤维 素酶	蔗糖酶	过氧化 氢酶	
FSG2	0.78	0.77	0.76	0.72	0.56	0.72
FSG3	0.48	0.99	1.31	1.18	1.70	1.13
FSG4	0.79	1.05	1.19	1.07	0.35	0.89
FSG5	0.97	1.26	0.18	0.84	0.61	0.77
FSFL	2.16	1.09	0.81	1.43	1.21	1.34

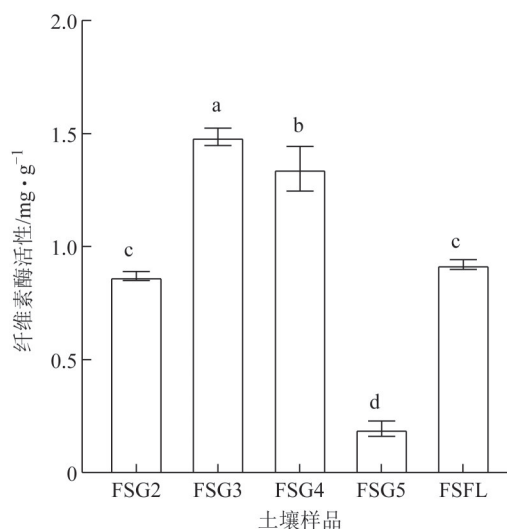
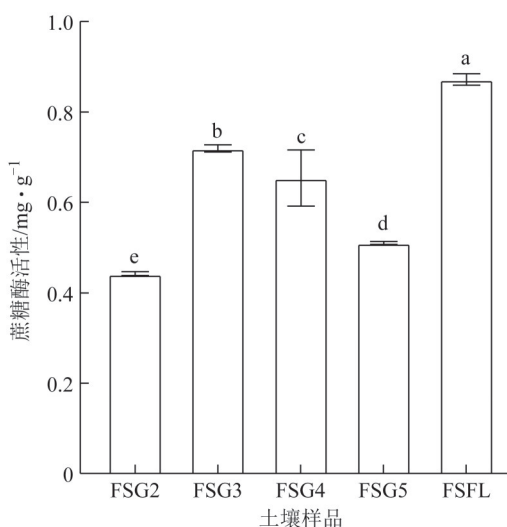
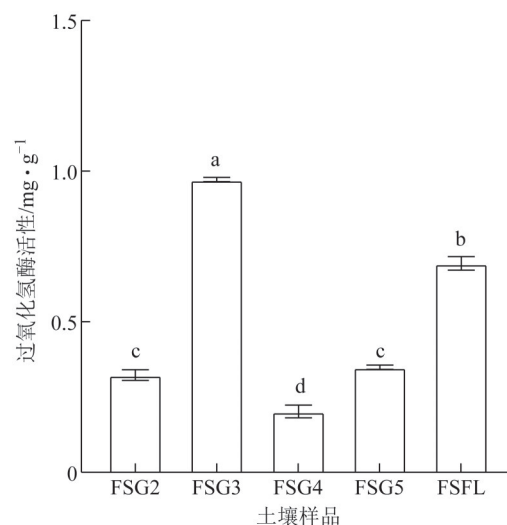


注: 不同小写字母表示处理间 $P < 0.05$; 图2~5同。

图1 栽参及对照土壤脲酶活性 ($\bar{x} \pm s, n=3$)图2 栽参及对照土壤酸性磷酸酶活性 ($\bar{x} \pm s, n=3$)

3.3 土壤微生物量分析

由不同土壤样本3类微生物的统计结果(表3)可知,在对照土壤中细菌生物量显著高于真菌及放线菌;4年生和5年生人参根区土壤真菌生物量显著低于对照组($P < 0.05$),2年生和3年生人参根区土壤真菌生物量显著高于对照组($P < 0.05$);不同

图3 栽参及对照土壤纤维素酶活性 ($\bar{x} \pm s, n=3$)图4 栽参及对照土壤蔗糖酶活性 ($\bar{x} \pm s, n=3$)图5 栽参及对照土壤过氧化氢酶活性 ($\bar{x} \pm s, n=3$)

年生人参根区土壤细菌生物量均显著低于对照组 ($P<0.05$); 4年生和5年生人参根区土壤放线菌生物量显著低于对照组 ($P<0.05$), 3年生人参根区土壤放线菌生物量显著高于对照组 ($P<0.05$), 2年生人参根区土壤放线菌生物量与对照组差异无统计学意义。

研究发现, 供试土壤微生物丰富度综合指数由大到小依次为3年生农田土、非栽参农田土、2年生农田土、4年生农田土和5年生农田土(表4)。整体微生物丰富度随人参栽培年限增加呈先上升后下降趋势, 非栽参土壤微生物丰富度相较于栽参土壤整体水平更高。

3.4 土壤因子相关性分析

如表5所示, 相关系数(r) ≥ 0.2 的数据占全部数据的80.88%。其中, 土壤pH与土壤有机质呈显著正相关($P<0.05$), 与全磷含量及脲酶活性呈极显著正相关($P<0.01$); 土壤有机质含量与土壤纤维素酶活性呈显著负相关($P<0.05$); 土壤C/N与土壤全钾含量呈极显著负相关($P<0.01$), 与真菌和放线菌生物量呈显著负相关($P<0.05$); 土壤全磷含量与土壤脲酶活性呈显著正相关($P<0.05$); 土壤全钾含量与土壤过氧化氢酶活性呈显著正相关($P<0.05$), 与土壤放线菌生物量呈极显著正相关($P<0.01$); 土壤速效钾含量与土壤脲酶活性呈显著负相关($P<0.05$), 与土壤细菌生物量呈极显著负相关($P<0.01$); 土壤酸性磷酸酶活性与土壤真菌生物量呈极显著负相关($P<0.01$); 土壤过氧化氢酶活性与土壤放线菌生物量呈极显著正相关($P<0.01$)。

4 讨论

研究表明, 土壤酸化会引发肥力下降、营养元素流失、重金属积累、微生物群落结构失衡等问题, 这是土壤退化的一个重要表现^[19]。本研究发现, 全部供试土壤均偏酸(pH 4.5~4.7), 这与前人报道基本符合^[20]。土壤总碳及土壤有机质作为土壤肥力

水平的重要指标, 与植物生长及生态环境密切相关。随人参栽培年限增加, 土壤有机质及总碳量逐年降低, 直接影响土壤养分供给, 加剧人参连作障碍, 这与孙海^[21]报道一致。氮、磷、钾在土壤中的浓度高低及存在形式对植物生长具有重要意义。本研究中土壤总氮及碱解氮随栽培年限增加, 均呈现先升高后降低再升高的趋势, 说明其在土壤中的转化与消耗速率接近, 总体水平相对稳定; 土壤全磷和全钾与总氮变化趋势一致, 但有效磷呈现先升高后降低趋势, 速效钾呈逐渐升高趋势, 且这2种有效成分含量与非栽参农田土壤相差较大, 表明在人参种植初期, 土壤中初始的磷素便能满足人参生长初期的消耗, 同时钾的增多显示为了保证栽参土壤具有良好的渗透势以及促进土壤酶系统的活化, 试验地实施了合理有效的人参种植管理方案。

一般来说, 4~5年生人参正处于生长旺盛时期, 对养分需求会比较大, 5年生根区土壤中的养分含量应该低于4年生人参根区土壤, 然而实际检测发现, 5年生人参根区土壤养分反而较4年生人参出现小幅上升, 推测与收获年份为保证人参产量而采取的人为水肥干预有关。

本研究对试验地块进行了严格的肥药管理, 即对该地块实施集免疫调节、促生拮抗、生物刺激、杀菌剂及植物营养类剂于一体的、有效的肥药调控以保持土壤的养分供给。多数肥药剂量以每75 m²施用1单位体积(瓶、袋)为基准(健达、哈茨木霉和荣亚每3 m²施用1单位体积); 所有药剂均按照使用说明溶解, 并以喷灌的方式施用。3~5年生人参肥药管理方案与1~2年生不同, 除池面消毒外, 1~2年生各进行9次肥药喷灌, 而3~5年生进行10次, 且肥药配方中3~5年生使用了更多的杀菌剂和促生拮抗剂, 导致各营养水平最终呈现不同程度的上升趋势。

土壤矿质元素及其形态类型是土壤质量的核心, 其与土壤酶活性及土壤微生物组成紧密相关。本研

表3 栽参及对照土壤微生物种类及生物量 ($\bar{x}\pm s$, $n=3$)

样品编号	微生物量 (10^4) /CFU·g ⁻¹	真菌 (10^4) /CFU·g ⁻¹	细菌 (10^6) /CFU·g ⁻¹	放线菌 (10^5) /CFU·g ⁻¹
FSG2	294.50	1.80±0.18a	2.60±0.36b	3.27±0.70b
FSG3	364.82	1.52±0.18b	2.37±0.22b	12.63±1.72a
FSG4	188.87	0.57±0.05d	1.76±0.10c	1.23±0.23c
FSG5	89.33	0.13±0.04e	0.84±0.09d	0.52±0.01c
FSFL	453.58	0.98±0.19c	4.07±0.30a	4.56±0.21b

表4 栽参及对照土壤微生物丰富度指数

样品编号	土壤微生物丰富度指数			土壤微生物丰富度综合指数
	真菌	细菌	放线菌	
FSG2	1.55	1.24	0.85	1.21
FSG3	1.30	1.13	3.29	1.91
FSG4	0.49	0.84	0.32	0.55
FSG5	0.11	0.40	0.14	0.22
FSFL	0.84	1.94	1.19	1.32

究发现,人参根区土壤纤维素酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性均呈倒V形变化,这与张亚玉等^[22]的报道一致。相关性分析发现,土壤脲酶活性与土壤碱解氮含量正相关;土壤酸性磷酸酶活性与土壤有效磷含量正相关;纤维素酶活性与土壤有机质显著负相关。上述结果说明,土壤酶对土壤养分转化及供给

的正向作用,且土壤脲酶、酸性磷酸酶以及纤维素酶活性的变化趋势与碱解氮、有效磷及有机质含量的变化趋势相对应,从侧面印证了土壤酶在矿质元素转化中的重要作用。

土壤微生物是养分转化的源和库,其在土壤矿质元素转化及养分供给中扮演重要角色。本研究发现,随着人参栽植年限的增加,人参根区土壤真菌、细菌及放线菌丰富度指数均不断降低,微生物种群趋于单一化,这与前人的研究结果一致^[23-24]。分析发现, $r \geq 0.2$ 的数据占全部数据的80.88%。上述研究结果表明,土壤微生物、矿质元素及酶活性等因子间关系非常复杂,人参栽培过程中土壤微生态失衡以及病原物含量的增加,是人参连作障碍形成的主要原因之一。

表5 栽参土壤因子皮尔森相关分析

土壤因子	<i>r</i>															
	pH	有机质	C/N	全磷	全钾	碱解氮	有效磷	速效钾	脲酶	酸性磷酸酶	纤维素酶	蔗糖酶	过氧化氢酶	真菌	细菌	放线菌
pH	1	0.807*	0.621	0.924**	-0.361	0.412	0.658	-0.653	0.934**	0.532	-0.472	0.550	0.188	-0.385	0.469	-0.213
有机质		1	0.493	0.664	-0.179	0.308	0.102	-0.378	0.599	0.502	-0.812*	0.062	0.143	-0.335	0.104	-0.212
C/N			1	0.297	-0.932**	-0.107	0.558	-0.093	0.574	0.651	-0.663	0.017	-0.598	-0.822*	-0.168	-0.858*
全磷				1	-0.034	0.584	0.647	-0.756	0.893*	0.360	-0.160	0.761	0.514	-0.109	0.688	0.154
全钾					1	0.381	-0.523	0.012	-0.414	-0.426	0.483	0.110	0.806*	0.717	0.206	0.945**
碱解氮						1	0.288	-0.003	0.212	0.597	0.144	0.697	0.786	-0.239	0.126	0.581
有效磷							1	-0.487	0.781	0.400	0.142	0.783	0.002	-0.407	0.498	-0.230
速效钾								1	-0.823*	0.280	-0.006	-0.507	-0.278	-0.379	-0.934**	-0.073
脲酶									1	0.284	-0.270	0.612	0.102	-0.209	0.678	-0.243
酸性磷酸酶										1	-0.460	0.269	-0.010	-0.913**	-0.387	-0.282
纤维素酶											1	0.451	0.402	0.512	0.354	0.630
蔗糖酶												1	0.615	-0.041	0.665	0.416
过氧化氢酶													1	0.408	0.468	0.916**
真菌														1	0.530	0.610
细菌															1	0.343
放线菌																1

注: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2015:8.
- [2] 金慧,于树莲,曹志强. 老参地、农田地改造,连续栽培人参、西洋参[J]. 世界科学技术—中医药现代化,2006,8(1):84-87.
- [3] 任跃英,陈红梅,王秀全,等. 人参种植业的若干问题分析[J]. 中药材,2001,24(10):753-755.
- [4] 肖春萍. 人参根际土壤微生物多样性及其生防真菌资源开发研究[D]. 长春:吉林农业大学,2015.
- [5] 李勇,黄小芳,丁万隆. 营养元素亏缺对人参根分泌物主成分的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(8):1688-1693.
- [6] 南京农学院. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,1980:14.
- [7] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:中国农业出版社,1986:274.
- [8] 裴玲芳,范贵鹏,肖美玲,等. 两种方法测定土壤中过氧化氢酶比较[J]. 科技创新与应用,2019(15):145-146,149.

- [9] 杨兰芳,曾巧,李海波,等. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J]. 土壤通报,2011,42(1):207-210.
- [10] 中华人民共和国农业部. 土壤pH的测定:NY/T 1377—2007[S]. 北京:中国农业出版社,2007.
- [11] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第6部分:土壤有机质的测定:NY/T 1121.6—2006[S]. 北京:中国农业出版社,2006.
- [12] 张威,张旭东,韩永娇. 一种土壤中碳氮含量的测定方法:CN103091353A[P]. 2013-05-08.
- [13] 彭靖茹,甘志勇. 微波消解 ICP-OES 法同时测定土壤中全磷和全钾[J]. 中国土壤与肥料,2009(3):79-81.
- [14] 中华人民共和国国家林业局. 森林土壤氮的测定:LY/T 1228—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [15] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第25部分:土壤有效磷的测定 连续流动分析仪法:NY/T 1121.25—2012[S]. 北京:中国农业出版社,2012.
- [16] 中华人民共和国农业部. 土壤速效钾和缓效钾含量的测定:NY/T 889—2004[S]. 北京:中国农业出版社,2004.
- [17] 赵斌,林会,何绍江. 微生物学实验[M]. 2版. 北京:科学出版社,2014:34.
- [18] 蔡伟,王焱,伏兵哲,等. 宁夏引黄灌区苜蓿品种对土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 基因组学与应用生物学,2018,37(10):4349-4356.
- [19] 戴中民. 生物炭对酸化土壤的改良效应与生物化学机理研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.
- [20] 李芳明,王继红,李玲,等. 老参地土壤酸化的研究进展[J]. 吉林农业科学,2015,40(6):59-60.
- [21] 孙海. 人参土壤主要养分及酶活性研究[D]. 北京:中国农业科学院,2010.
- [22] 张亚玉,孙海,宋晓霞,等. 农田栽培人参根区土壤主要养分与土壤酶活性的研究[J]. 特产研究,2010,32(4):43-46.
- [23] 赵东岳,李勇,丁万隆. 人参自毒物质降解细菌的筛选及其降解特性研究[J]. 中国中药杂志,2013,38(11):1703-1706.
- [24] YING Y X, DING W L, LI Y. Characterization of soil bacterial communities in rhizospheric and nonrhizospheric soil of *Panax ginseng*[J]. Biochem Genet, 2012, 50(11/12):848-859.

(收稿日期:2021-01-04 编辑:戴玮)