

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2018.01725

不同种植年限对枸杞根系及土壤环境的影响

胥生荣^{1,3} 张恩和^{1,*} 马瑞丽^{1,3} 王琦² 刘青林¹ 崔佳佳¹

¹甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州 730070; ²甘肃农业大学草业学院, 甘肃兰州 730070; ³中国科学院西北高原生物研究所 / 青海省青藏高原特色生物资源研究重点实验室, 青海西宁 810008

摘要: 宁夏枸杞是西北干旱地区重要的经济作物, 为了进一步明确不同种植年限枸杞根系及土壤环境的动态变化, 以不同种植年限‘宁杞1号’苗木及其根际土壤为试验材料, 研究枸杞根系生理特性以及土壤酶活性、有机碳、微生物数量和多样性等根际土壤理化特性的变化规律。结果表明, 随着种植年限的增加, 根系比导率先逐渐增大, 种植5年开始逐年减小; 根系活力逐渐减小, 根系相对电导率逐渐增大, 虽然7年生植株根系相对电导率减小, 但减小程度不显著; 根围0~150 cm深处土壤平均含水量在前5年内逐渐增大, 种植7年地块60 cm以上浅层土壤水分显著降低; 根围0~100 cm深处土壤孔隙度不断减小; 土壤微生物总量趋于上升, 其中, 土壤细菌和真菌数量趋于上升, 放线菌数量变化不显著; 土壤微生物平均颜色变化率(AWCD)逐年降低, Shannon指数(H)和丰富度指数(S)变化趋势相对一致, 为先下降后上升; 土壤有机碳活性逐渐下降, 虽然种植5年地块的LFOC活性和种植7年地块的DOC活性有小幅上升, 但总体趋势一致; 土壤脱氢酶活性相对稳定, 没有出现显著的增大或降低; 土壤磷酸酶活性一直处于增大趋势; 土壤脲酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶以及土壤蔗糖酶活性变化趋势相对一致, 均先减小后增大。综合分析表明, 随着种植年限的增加, 土壤活性、肥力和土壤微生物多样性降低, 土壤微环境对根系生物活性的毒害作用增大; 根系生存环境的变化使根系活性降低, 影响枸杞根系导水率和植株对土壤的水分利用。

关键词: 枸杞; 土壤酶; 土壤微生物; 有机碳; 根系

Effects of Planting Years on the Root System and Soil Environment of *Lycium barbarum* L.

XU Sheng-Rong^{1,3}, ZHANG En-He^{1,*}, MA Rui-Li^{1,3}, WANG Qi², LIU Qing-Lin¹, and CUI Jia-Jia¹

¹ College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; ² College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; ³ Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences / Qinghai Key Laboratory of Qinghai-Tibet Plateau Biological Resources, Xining 810008, Qinghai, China

Abstract: In order to clarify the dynamic change of root system, in *Lycium barbarum* L., a main commercial crop distributed in arid land of northwestern China, and soil environment under different planting-years, physiological characteristic of root system, soil enzyme activity, organic carbon, soil microbial quantity and diversity, physical and chemical properties of the rhizosphere soil were monitored for ‘Ningqi 1’ seedlings for five treatments, different continuous cropping years (1, 3, 5, 7, and 10 years). With the increase of planting fixed number of years, the special hydraulic conductivity of roots ($K_{s, root}$) increased first and then decreased, the activity of roots remarkably decreased, the relative electric conductivity of roots gradually increased, the relative electric conductivity of root system began to decrease after planting seven years, but the reduction was not significant. The average moisture content of the soil 0–150 cm deep increased in the first five years, and declined after the planting five years, in particular, showed more effect to soil moisture above 60 cm deep. The average soil average porosity in 0–100 cm layer decreased with the increase of planting fixed number of years; the amount of soil rhizosphere microorganism increased, in this case, the number of soil bacteria

本研究由国家自然科学基金项目(31560380)和青海省青藏高原特色生物资源研究重点实验室开放课题(2017-ZJ-Y10)资助。

The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31560380) and the Open Project of Qinghai Key Laboratory of Qinghai-Tibet Plateau Biological Resources Grant (2017-ZJ-Y10).

* 通信作者(Corresponding author): 张恩和, E-mail: zhangeh@gsau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: xushengrong888@163.com

Received(收稿日期): 2017-10-16; Accepted(接受日期): 2018-08-20; Published online(网络出版日期): 2018-09-06.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20180904.1423.007.html>

and fungi increased, and the number of actinomycetes did not have significant changes. The soil rhizosphere microorganism average well color development (AWCD) decreased with the increase of planting fixed number of years, Shannon index (H) and Richness index (S) decreased firstly and then increased. The soil total organic carbon (TOC) activity decreased with the increase of planting fixed number of years, although light fraction organic carbon (LFOC) activity of planting five years and dissolved organic carbon (DOC) activity of planting seven years had slight rise, their general trend was consistent. The soil dehydrogenase activity was relatively stable, there was no significant change, the soil phosphatase activity increased, urease, catalase, polyphenol oxidase, and sucrose activity had similar changing trend, all of them decreasing first and then increasing. These results suggest that soil activity, fertility and microorganism diversity are decreased with the increase of planting fixed number of years, the toxic effect of soil microenvironment on the biological activity of root system is increased, meanwhile, the root system activity, hydraulic conductivity and water efficiency of soil are decreased by the changes of root system living environment.

Keywords: *Lycium barbarum* L.; soil enzyme; soil microorganism; organic carbon; root system

根系是土壤水分和营养物质进入植物的主要途径,根系生理状况对土壤-植物-大气(SPAC)循环系统中物质和能量交换起着关键作用^[1]。有研究表明,随着蔬菜连作年限增加致使植株矮小,根系活力和生长量降低,产量下降,品质变劣^[2]。土壤是影响生态农业发展和限制农作物生长发育的主要因素。多年生植物随着种植年限的增加,植株根系分泌物含量显著增加,土壤有机质缺乏,根际土壤微生物逐渐单一,使根际微生物群落结构失调及病原菌数量增加,成为影响树体生长及降低产量和品质的重要因素之一^[3]。

土壤多种理化特性都与植株生长和微环境变化有直接或间接的关系。微生物与土壤生态功能相辅相成,根际土壤微生物参与根际生态系统的物质转化和循环,微生物群落的组成及其多样性是衡量土壤性质和功能的一个重要指标^[4],在维持土壤健康方面扮演着重要的角色^[5]。土壤活性有机碳是植物碳循环中的主要来源,与土壤肥力和农业可持续发展有密切联系^[6-7]。土壤酶能加速土壤中有有机物质的化学反应,参与许多重要的生物化学过程^[8],可以表征土壤肥力水平和土壤生物活性。根际土壤的理化环境是根系生理活动的重要影响因子,直接影响植株地上部分的生长发育。因此,进一步了解根系生理状况和土壤微环境变化,对探究植物生长与土壤环境间的内在联系具有重要作用。

宁夏枸杞(*Lycium barbarum* L.)属于茄科(Solanaceae)多年生落叶灌木,具有改良土壤结构、提高土壤肥力、降低盐碱危害的作用,是治理荒漠化土地的优良树种,在西北干旱半干旱地区大面积种植。随着枸杞种植年限的不断增长,植株根际土壤微生态环境对枸杞植株生长势的影响越来越严重,加速其生长势衰弱和病虫害发生。本试验将不同种植年限枸杞根际土壤微环境与植株根系生理变化相

联系,分析其相互之间的关系,旨在系统了解不同种植年限枸杞根际土壤微环境和根系生理状态的变化趋势,为解决西北干旱半干旱地区枸杞早衰问题提供重要科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验区概况

甘肃省古浪县枸杞示范园地处北纬 37°30', 东经 103°29', 海拔 1760 m, 属温带大陆性干旱气候,年平均气温 5.6℃, 年均降水量 300 mm, 无霜期 140 d, 土壤类型以沙壤土为主。园区地势平坦, 果园行间清耕休闲, 果园追肥以尿素、磷酸二铵和氮磷钾复合肥为主, 春季施基肥时以有机肥为主。

1.2 试验材料

试材为 1 年生、3 年生、5 年生、7 年生和 10 年生‘宁杞 1 号’地块和苗木。在枸杞营养生长旺盛期 7 月至 9 月份, 每月上旬随机取各处理 3 株以上, 在距离植株主干四周 20~30 cm 处随机选择 4 个点, 挖取深 20~40 cm 处部分土壤和根系, 抖落非根际土壤, 用毛刷将根际土壤装入自封袋中, 同时将根系装入自封袋中, 重复 3 次。将土样分为 2 份, 1 份鲜样, 1 份风干, 去杂, 过 1 mm (20 目)筛。同时取样测定根际土壤含水量和孔隙度, 在灌水后 10~15 d, 于非施肥点采样, 尽量减少人为因素干扰。

1.3 指标测定

1.3.1 导水率 使用高压流速仪(high pressure flow meter, HPFM, 美国Dynamax公司)于田间测定绝对导水率(hydraulic conductivity, K_h); 比导率(the special conductivity, K_s)为绝对导水率(K_h)除以茎干木质部横截面积(S_{stem})所得的比率($K_s = K_h/S_{stem}$); 用精密数字游标卡尺(0~150 mm digital caliper, NMT-150, 上海美耐特公司)测量茎干直径。

1.3.2 根系活力和相对电导率 采用 TTC 染色法测定根系活力, 在 7 月至 9 月份生长旺盛季节, 采

集距树干 20~30 cm, 深 10~20 cm 处须根, 用单位鲜重根在单位时间内还原的 TTC 毫克数来表示^[9]。将根系用蒸馏水冲洗干净, 滤纸吸干表面水分, 将根尖部分剪成约 1 cm 长段, 称取 1 g 放入试管中, 加 30 mL 蒸馏水, 放入真空干燥器中抽气 10 min, 缓慢放入气体后搅拌, 静止 20 min 后用 DDS-307A 测得电导率 R_1 , 然后沸水浴中煮沸 20 min, 冷却至室温后测出电导率 R_2 , 相对电导率 = $R_1/R_2 \times 100\%$ 。

1.3.3 土壤孔隙度测定和含水量 将 0~100 cm 土壤分为 10 层, 每 10 cm 为一层, 土壤孔隙度测定采用环刀法测定。将 0~150 cm 土壤分为 15 层, 每 10 cm 为一层, 混匀后用烘干法测定土壤含水量。

1.3.4 土壤微生物的计数和多样性 采用平板计数法计数根区土壤细菌、真菌、放线菌, 采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基分离细菌, 采用高氏 1 号培养基分离放线菌, 采用 PDA 培养基分离真菌^[10]。在采样后 48 h 内用 BIOLOG 生态测试板(ECO MicroPlate, Matrix Technologies Corporation, USA)测定土壤微生物群落功能多样性^[11]。

平均颜色变化率^[12] (AWCD) = $(C_i - R)/n$ 。式中, C_i 为第 i 个非对照孔的吸光值, R 为对照孔的吸光值, n 为碳源种类数($n = 31$)。

Shannon 指数^[13] $H = -\sum P_i \ln P_i$ 。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, 即 $P_i = (C_i - R) / \sum(C_i - R)$ 。

丰富度指数^[14] (R), 指被利用的碳源总数目, 本研究中为每孔中 $(C_i - R)$ 的值大于 0.25 的孔数。

1.3.5 土壤酶活性 利用苯酚钠比色法测定脲酶活性; 高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性; 邻苯三酚比色法测定多酚氧化酶活性; 三苯基四氮唑氯化物(TTC)还原法测定脱氢酶活性; 磷酸苯二钠法测定土壤磷酸酶活性; 3,5-二硝基水杨酸比色法测

定土壤蔗糖酶活性。

1.3.6 土壤有机碳 参照张林森等^[11]的方法测定土壤活性有机碳(LFOC)、土壤颗粒有机碳(POC)、微生物量碳(MBC)、易氧化有机碳(ROC)、可溶性有机碳(DOC)和土壤总有机碳(TOC)。

1.4 数据分析及处理

采用 SPSS 17.0 统计分析软件处理所得数据, 首先对不同处理间进行方差分析, 若差异显著, 再进行 LSD 多重比较, 采用 Microsoft Excel 2003 作图。

2 结果与分析

2.1 种植年限对枸杞根系生理特性的影响

根系作为植株与土壤之间相互作用的主要场所, 对于植株水分、营养物质的吸收和利用起到重要作用, 其根系导水率、活力和电导率将直接影响根系对土壤水分和营养物质的吸收能力。由表 1 可以看出, 随着种植年限的增加, 枸杞根系比导率在种植前 3 年内逐渐增大, 在种植第 3 年时达到最大, 然后逐年开始减小, 种植第 10 年时已减小到最大时的 77.9%, 平均每年减小 3.2%; 根系活力从种植 1 年生开始逐渐减小, 10 年生减小到 1 年生的 86.9%, 平均每年减小 1.3%; 根系相对电导率随着种植年限的增大而增大, 7 年生植株相对电导率最大, 达到 1 年生的 125.5%, 平均每年增大 3.6%, 其中, 在种植前 3 年内增大较快, 平均每年增大 6.2%, 种植 3 年后变化相对较小, 平均每年增大 1.4%, 7 年生和 10 年生根系相对电导率略有减小, 但减小程度不显著。

2.2 种植年限对土壤孔隙度和含水量的影响

土壤状况影响土壤水分的存在状态, 是植株根系生长和物质能量交换的主要影响因素; 土壤水分是植株体内水分的主要来源, 土壤水分状况直接影

表 1 种植年限对根系理化性质的影响

Table 1 Effect of planting years on root physicochemical properties in *Lycium barbarum* L.

种植年限 Planting year	根系比导率 Specific conductivity of root ($K_{s,root}$) ($\text{kg MPa}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	根系活力 Activity of root ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	根系相对电导率 Relative electric conductivity of root (%)
1 年 One year	1.32±0.125 b	482.3±34.5 a	29.4±1.39 d
3 年 Three years	1.49±0.201 a	451.7±19.1 b	34.9±2.56 c
5 年 Five years	1.40±0.093 ab	449.2±27.3 b	35.7±2.62 bc
7 年 Seven years	1.25±0.119 b	426.9±20.5 c	36.9±3.29 a
10 年 Ten years	1.16±0.241 c	419.3±14.4 c	36.6±2.84 a

同列内标的不同小写字母的值在 0.05 水平差异显著。

Values within a column followed by different small letters are significantly different at $P < 0.05$.

响植株对土壤水分的吸收,对土壤水分向根系周围运输具有重要意义。从图 1-A 可以看出,枸杞根围土壤孔隙度随着种植年限的增加不断减小。植株生长对土壤孔隙度的影响主要在土壤深 0~60 cm 之间,而对 70~100 cm 处影响较小,在土壤 0~60 cm 深处,平均土壤孔隙度逐渐减小至种植 1 年地块的 93.1%;在土壤 70~100 cm 深处,种植 3 年地块的平均土壤孔隙度最大,随后逐年减小,种植 10 年地块平均土壤孔隙度最小,为最大值的 97.8%。从图 1-B 可以看出,不同种植年限枸杞根围土壤在 0~150 cm 土壤水分含量的垂直分布情况不同,种植前 5 年枸杞地块土壤含水量逐渐增大,种植第 5 年地块土壤含水量最大,从种植第 5 年后逐年降低。植株生长对土壤水分含量的影响主要在土壤 0~60 cm 之间,对 70~150 cm 处影响较小,种植 5 年地块土壤含水量分别增大至种植 1 年地块的 112.2%和 102.9%;种植 10 年地块土壤含水量分别降低到最大时的 86.9%和 93.9%。

2.3 种植年限对根际土壤微生物数量和多样性的影响

农田耕作方式和植物生长状况能够影响土壤温度、水分、有机质含量和存在状态等土壤理化性质,

可以影响土壤微生物的生存环境,从而影响土壤微生物的数量和多样性。由表 2 可知,土壤细菌数量在种植前 5 年内逐渐增多,第 5 年达到最多,年平均增长率为 4.7%,5 年后土壤细菌数量开始减少,年平均下降率为 2.8%;土壤真菌数量在种植前 7 年内逐渐增大,第 7 年达到最多,年平均增长率为 9.8%,第 10 年地块真菌数量有所下降,但减小差异不显著;土壤放线菌数量随种植年限的增加没有明显变化,基本趋于同一水平。土壤微生物总量先上升后下降,在种植前 5 年内微生物总量不断升高,年平均增长率为 4.8%,从第 5 年后逐渐减少,种植 10 年地块土壤微生物总量减少至数量最大时的 90.8%,年平均下降率为 1.8%。土壤微生物群落多样性是土壤微生物群落状态与功能的指标,反映土壤中微生物的生态特征。土壤微生物平均颜色变化率(AWCD)逐年降低,种植 10 年地块降低至最大时的 83.3%,年均下降率为 1.7%,在种植前 5 年内下降速率较大,变化差异显著,种植第 5 年后变化不显著;Shannon 指数(H)和丰富度指数(S)总体变化趋势为逐年减小,种植 5 年地块多样性指数显著减小,但各种种植年限之间差异不显著。

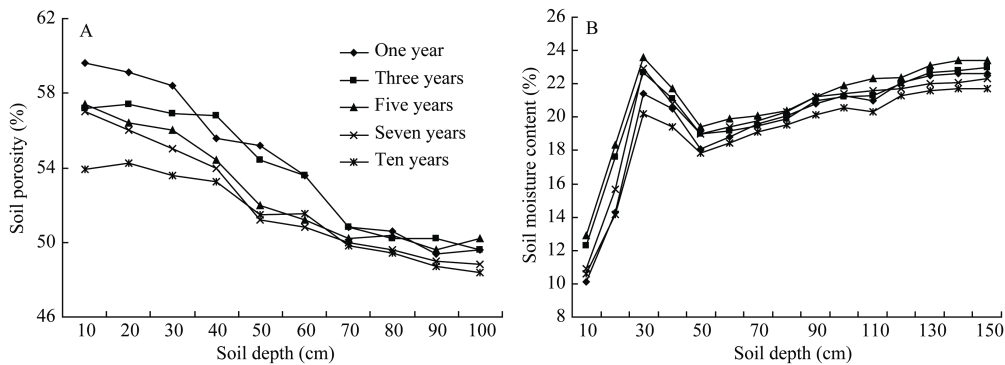


图 1 不同种植年限对 0~100 cm 孔隙度(A)及 0~150 cm 土壤含水量(B)的影响
Fig. 1 Space distribution of soil porosity (A) and soil moisture content (B) under different planting years

表 2 种植年限对根际土壤微生物数量和多样性的影响
Table 2 Effect of planting years on rhizosphere soil microbial population and diversity in *Lycium barbarum* L.

种植年限 Planting year	细菌 Bacterium ($\times 10^6$ CFU g^{-1})	真菌 Fungi ($\times 10^6$ CFU g^{-1})	放线菌 Actinomyces ($\times 10^6$ CFU g^{-1})	微生物总量 Total ($\times 10^6$ CFU g^{-1})	平均颜色 变化率 AWCD	香浓指数 Shannon index (H)	丰富度指数 Richness index (S)
1 年 One year	28.37±1.31 d	3.99±0.19 d	5.27±0.26 b	37.63±1.47 c	0.78 a	3.13 a	27 a
3 年 Three years	30.95±0.93 c	4.83±0.23 c	4.73±0.16 c	40.51±1.14 b	0.73 ab	3.11 a	26 a
5 年 Five years	35.16±2.09 a	5.26±0.11 b	5.98±0.24 a	46.40±2.31 a	0.68 b	2.96 b	21 b
7 年 Seven years	32.81±1.52 b	6.72±0.21 a	5.16±0.15 b	44.69±1.80 a	0.66 b	3.05 ab	24 a
10 年 Ten years	30.19±0.45 c	6.53±0.25 a	5.62±0.17 ab	42.14±0.99 b	0.65 b	3.03 ab	23 ab

同列内标的不同小写字母的值在 0.05 水平差异显著。

Values within a column followed by different small letters are significantly different at $P < 0.05$.

2.4 种植年限对枸杞根际土壤有机碳的影响

土壤有机碳是农田碳循环的重要组成部分, 其累积和分解使含量的变化直接影响着整个系统内部的碳平衡, 对植株生长发育和土壤水分利用也有重要作用。由图 2 可知, TOC 含量与其余 5 种活性有机碳含量的变化趋势一致, 随着年限的增长有机碳含量逐渐下降, 虽然种植 5 年地块的 LFOC 活性

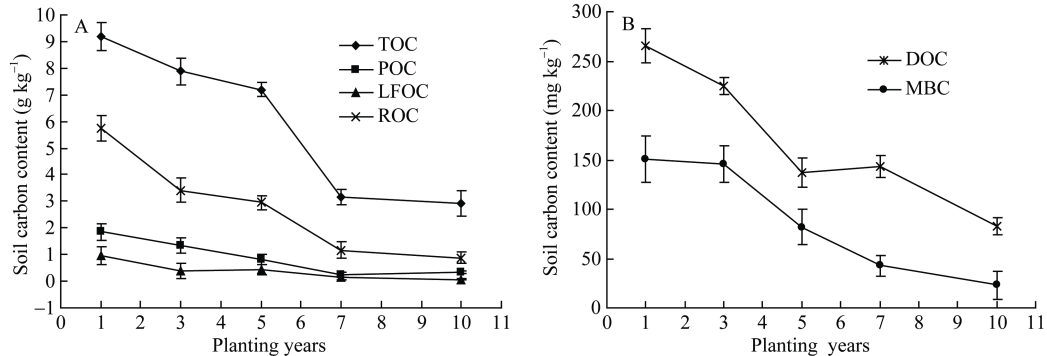


图 2 种植年限对根际土壤 TOC、POC、LFOC、ROC、DOC 和 MBC 含量的影响

Fig. 2 Total organic carbon (TOC), particulate organic carbon (POC), readily oxidizable organic carbon (ROC), light fraction organic carbon (LFOC), dissolved organic carbon (DOC), and microbial biomass organic carbon (MBC) content under different planting years

2.5 种植年限对根际土壤酶活性的影响

土壤酶活性可以在一定程度上用来反映土壤中各种生物化学过程的强度, 参与土壤与植物体之间多种物质能量交换, 是反映土壤生物学活性的指标。由图 3 可以看出, 随着种植年限的增加, 土壤脱氢酶活性相对稳定, 没有出现显著的增大或降低趋

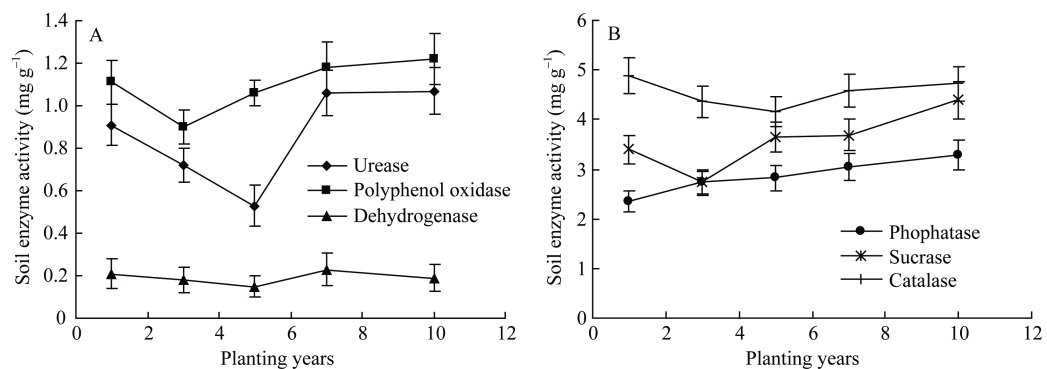


图 3 种植年限对根际土壤酶活性的影响

Fig. 3 Effect of planting years on rhizosphere soil enzyme activity in *Lycium barbarum* L.

3 讨论

根系作为植物与土壤之间相互物质联系的主要途径, 对于植株水分、营养物质的吸收和利用起到重要作用, 根系导水率可以表示根系对土壤水分的

和种植 7 年地块的 DOC 活性有小幅上升, 但总体趋势一致。从种植第 1 年开始至第 10 年, TOC 含量从 9.19 g kg^{-1} 下降至 2.92 g kg^{-1} , 平均年下降率为 3.18%, 其中下降率最大的为 LFOC, 年平均下降率达到 9.3%, 下降率最小的为 DOC, 年平均下降率为 6.9%, 其余 3 种活性有机碳的年平均下降率为 8.2%~8.5%。

势, 保持在 $0.15\sim 0.23 \text{ mg g}^{-1}$ 之间; 土壤磷酸酶一直处于增大趋势, 平均年增长率为 4.0%; 土壤脲酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶以及土壤蔗糖酶活性变化趋势相对一致, 均呈现出先减小后增大, 其中, 土壤多酚氧化酶和蔗糖酶活性在种植 3 年地块最小, 土壤脲酶和过氧化氢酶在种植 5 年地块最小。

吸收能力, 植株中对导水率影响最大的部分发生在根系, 是根系对土壤环境变化响应的直接生理特性指标之一^[15-16]。本研究发现, 随着种植年限的增加, 枸杞根系比导率先逐渐增大, 然后逐年减小。根系导水能力与树木木质部结构和土壤环境有直接的关

系,随着植株的生长,根系木质部逐渐分化,根系导水系统不断完善,有利于根系水分运输,由于树体对土壤环境影响不大,土壤含水量变化小,对根系导水率的影响不明显,从而使根系导水率不断增大;当枸杞植株生长到一定水平,对土壤水分的需求量增大,土壤含水量不断下降,影响根系导水率,由于部分根系老化,导管运输能力降低,导致根系导水率减小。

根系活力和相对电导率是根系生物学活性的主要表现,对根系吸收土壤水分和营养物质有直接的影响。根系活力受到植株自身生长势、土壤微生物活性、化感物质、土壤酶等根际土壤环境因子的影响。本研究发现,随着种植年限的增大,枸杞根系活力逐渐减小,使土壤水分的吸收能力降低,根系水势下降,导致根系木质部导管更容易形成栓塞,影响根系木质部导水率。植物细胞膜对维持细胞的正常代谢作用和微环境起着重要的作用,细胞膜对物质具有选择透过性,当细胞膜受到破坏或环境发生变化后,可使电解质外渗,以至于相对电导率增大。枸杞根系相对电导率随着种植年限的增加而增大,虽然在种植7年后有所减小,但减小程度不显著。相对电导率增大使根系木质部细胞结构和功能发生变化,对木质部导管的水分运输作用也有一定的影响。随着种植年限的增大,根系化感物质在根围土壤不断分泌累积,对根系产生毒害作用,加之土壤微生物种类和多样性的变化,也可以使根系活力降低和相对电导率升高。

当植株受到土壤环境胁迫时,根系首先发出信号,土壤含水量^[17]和通气状况^[18]都能够影响到根系生理状况。土壤通气状况直接影响根系呼吸作用对O₂的吸收和CO₂的排放,当根系周围空气O₂含量降低,CO₂含量升高时,影响根系的呼吸作用和物质能量转化,从而影响根系对土壤水分的吸收能力。由于目前枸杞行间操作主要以浅耕为主,对30 cm以下土壤扰动较小,施肥和采摘等行间作业使土壤孔隙度逐年减小,从而影响土壤空气含量和根系活性。本研究发现,土壤深0~150 cm处平均含水量在种植前5年内逐渐增大,5年后开始逐渐降低,尤其对60 cm以上浅层土壤水分影响显著。在种植前5年,由于植株生物量小,对水分的需求量少,灌水和降雨能够补给土壤水分;随着植株的不断生长,在种植5年后,由于长期农事操作破坏了表层土壤结构,使土壤孔隙度减小,导致表层土壤持水能力

减弱,可利用水分含量降低,加之根系在土壤深层次分布量增大,提高了深层土壤水分贡献率,加快了深层次土壤水分的耗散。

农田生态系统中,土壤微生物是主要组成部分,可以作为反映土壤生态系统功能的主要指标^[19],在土壤营养循环管理^[20]、能量转换^[21]、有机物分解转化^[22]以及土壤养分的形成^[23]等方面具有重要的作用。有研究发现,植物连作会引起土壤微生物区系发生变化,部分真菌种群数量增加,细菌和放线菌种群数量减少,根际微生物群落结构失衡,导致根围土壤理化性状变化,微生物区系由“细菌型”向“真菌型”转化^[24-25]。土壤微生物种群数量变化可以反映土壤生物活性水平,土壤细菌和放线菌种群数量越高,土壤的生物活性就高,而土壤真菌种群数量上升,则会使土壤地力衰竭。本研究发现,随着枸杞种植年限的增长土壤微生物总量趋于上升,其中,土壤细菌和真菌数量趋于上升,而放线菌数量变化不显著,与前人对土壤微生物的研究结果一致^[26-28]。土壤微生物平均颜色变化率(AWCD)逐年降低,Shannon指数(H)和丰富度指数(S)变化趋势相对一致,为先下降后上升。土壤微生物生存环境受到植物种类、生长状况,根系分泌物以及土壤理化特性等多种因素的影响。植物根系分泌物数量和种类随着植物生长状况的不同而变化,对部分微生物具有毒害作用,导致微生物群落数量变化,使单一种群微生物数量增多,微生物多样性降低。

农田土壤有机碳是农田生态系统中碳循环的重要组成部分,受土壤水分、温度、微生物、耕作制度和方式等许多土壤因素的影响,其累积和分解的变化直接影响系统内碳平衡。本研究发现,枸杞地块土壤TOC含量与其余5种活性有机碳含量的变化趋势一致,随着种植年限的增长有机碳含量逐渐下降,虽然种植5年地块的LFOC活性和种植7年地块的DOC活性有小幅上升,但总体趋势一致。土壤活性有机碳主要来源于植物残体、土壤有机质水解、根系分泌物、土壤微生物代谢产物和自身残体以及有机肥的施用。随着种植年限的增长,植物逐年对土壤有机物质利用,使土壤肥力较低,同时较高的收获指数和树体修剪导致土壤有机碳大量消耗,系统内部碳总量逐年减少^[29]。农田耕作措施也会导致土壤活性有机碳的分解,与株内未干扰区相比,行间土壤有机碳含量显著降低^[30]。枸杞地块行间深翻、除草、果实采摘等作业使土壤物理条件变化,破坏

了土壤团聚体结构, 加速了土壤有机碳的分解, 导致土壤有机碳分解和减少。

土壤酶活性可以反映不同栽植条件和模式下土壤的质量, 在评价土壤肥力时部分土壤酶可以作为评价土壤生化过程的指标。土壤酶主要来自于土壤微生物, 定植植物和种植年限都会影响土壤微生物数量和种群多样性^[31], 从而使土壤酶活性变化^[32]。随种植年限的增加, 枸杞地块土壤脱氢酶活性相对稳定, 没有出现显著的变化趋势; 土壤磷酸酶一直处于增大趋势; 土壤脲酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶以及土壤蔗糖酶活性变化趋势相对一致, 均呈现出先减小后增大。本研究枸杞地块过氧化氢酶活性虽先降低后升高, 但总体变化趋势与前人的研究相对一致^[33]。

4 结论

随着枸杞种植年限的增加, 枸杞根系比导率先逐渐增大, 然后随着树体老化开始减小; 根系相对电导率种植前 7 年逐渐增大, 在种植 7 年后有所减小, 但减小程度不显著; 根系活力逐年减小, 对土壤水分的吸收能力降低。土壤平均含水量在种植前 5 年内逐渐增大, 5 年后开始逐渐降低, 尤其对 60 cm 以上浅层土壤水分影响显著; 土壤细菌和真菌数量逐年增加, 放线菌数量变化不显著, 使土壤微生物总量趋于增加, 但土壤微生物多样性却逐年降低; 土壤活性有机碳含量逐渐降低, LFOC 和 DOC 活性在种植 5 年和 7 年后有小幅上升, 但总体趋势一致; 不同土壤酶活性呈现不同变化趋势, 脱氢酶活性相对稳定, 没有出现显著的变化; 土壤磷酸酶逐渐增大; 脲酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶和土壤蔗糖酶活性均为先减小后增大。随着土壤环境因子和根系生理特征变化, 枸杞农田系统物质和能量的内循环发生变化, 影响了植株对土壤营养物质和水分的吸收运输。

References

- [1] Mu Z X, Zhang S Q, Zhang L S, Liang A H, Liang Z S. Hydraulic conductivity of whole root system is better than Hydraulic conductivity of single root in correlation with the leaf water status of maize. *Bot Stud*, 2006, 47: 145–151
- [2] 梁银丽, 陈志杰, 徐福利, 严勇敢, 杜社妮, 张成娥. 日光温室不同连作年限对黄瓜生理特性的影响. *西北植物学报*, 2003, 23: 1398–1401
Liang Y L, Chen Z J, Xu F L, Yan Y G, Du S N, Zhang C E. The effect of continuous cropping year on physiological characteristics of cucumber in sunlight greenhouse. *Acta Bot Boreali-*
- [3] 杜静静. 不同种植年限果园土壤理化性质与酶活性研究. 山西师范大学硕士学位论文, 山西临汾, 2013
Du J J. Research on Soil Physical-chemical Properties and Activities of Soil Enzyme in Apple Orchards with Different Planting Years. MS Thesis of Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi, China, 2013 (in Chinese with English abstract)
- [4] 王娟英, 许佳慧, 吴林坤, 吴红森, 朱铨, 孔露霏, 林文雄. 不同连作年限怀牛膝根际土壤理化性质及微生物多样性分析. *生态学报*, 2017, 37: 1–9
Wang J Y, Xu J H, Wu L K, Wu H M, Zhu Q, Kong L F, Lin W X. Analysis of physicochemical properties and microbial diversity in rhizosphere soil of *Achyranthes bidentata* under different cropping years. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37: 1–9 (in Chinese with English abstract)
- [5] Jacobsen C S, Hjelms M H. Agricultural soil, pesticides and microbial diversity. *Curr Opin Biotechnol*, 2014, 27: 15–20
- [6] 王义祥, 叶菁, 王成己, 翁伯琦, 黄毅斌. 不同经营年限对柑橘果园土壤有机碳及其组分的影响. *生态环境学报*, 2014, 23: 1574–1580
Wang Y X, Ye J, Wang C J, Weng B Q, Huang Y B. Effect of different cultivation years on soil organic carbon pools in citrus orchards. *Ecol Environ Sci*, 2014, 23: 1574–1580 (in Chinese with English abstract)
- [7] 杜俊龙, 孙霞, 黄长福, 李志军, 金俊香, 闫建峰. 典型干旱荒漠绿洲区不同年限枣园土壤有机碳组成及特征. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 33–37
Du J L, Sun X, Huang C F, Li Z J, Jin J X, Yan J F. Composition and characteristics of soil organic carbon in jujube orchard with different planting years in typical arid desert oasis area. *Bull Soil Water Conserv*, 2016, 36(1): 33–37 (in Chinese with English abstract)
- [8] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, Burns R G. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soil and subsoils using various techniques. *Soil Biol Biochem*, 2002, 34: 387–401
- [9] 张帆, 田甜, 金宗来, 黄冲平, 唐桂香, 叶庆富, 周伟军. 新型除草剂丙酯草醚对油菜幼苗生长与根尖细胞活性的影响. *中国农业科学*, 2009, 42: 3522–3529
Zhang F, Tian T, Jin Z L, Huang C P, Tang G X, Ye Q F, Zhou W J. Effect of new herbicide ZJ0273 on seedling growth and root cell viability of *Brassica napus*. *Sci Agric Sin*, 2009, 42: 3522–3529 (in Chinese with English abstract)
- [10] 张亮, 程智慧, 周艳丽, 董小艳, 魏玲. 百合生育期根际土壤微生物和酶活性的变化. *园艺学报*, 2008, 35: 1031–1038
Zhang L, Cheng Z H, Zhou Y L, Dong X Y, Wei L. Variation of microbial biomass and enzyme activities in the rhizosphere soil of lily at different developmental periods. *Acta Horti Sin*, 2008, 35: 1031–1038 (in Chinese with English abstract)
- [11] 张林森, 刘富庭, 张永旺, 李雪薇, 李丙智, 胥生荣, 谷洁, 韩明玉. 不同覆盖方式对黄土高原地区苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响. *中国农业科学*, 2013, 46: 3180–3190
Zhang L S, Liu F T, Zhang Y W, Li X W, Li B Z, Xu S R, Gu J, Han M Y. Effects of different mulching on soil organic carbon fractions and soil microbial community of apple orchard in Loess

- Plateau. *Sci Agric Sin*, 2013, 46: 3180–3190 (in Chinese with English abstract)
- [12] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization. *Appl Environ Microbiol*, 1991, 57: 2351–2359
- [13] Shannon C E. A mathematical theory of communication. In: Eyal de Lara, eds. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC²R). New York, ACM SIGMOBILE. 2001, 5: 3–55
- [14] Rogers B F, Tate R L. Temporal analysis of the soil microbial community along a toposequence in Pineland soils. *Soil Biol Biochem*, 2001, 33: 1389–1401
- [15] Cohen S, Naor A, Bennink J, Grava A, Tyree M. Hydraulic resistance components of mature apple trees on rootstocks of different vigours. *J Exp Bot*, 2007, 58: 4213–4224
- [16] 牛晓丽, 胡田田, 刘亭亭, 吴雪, 冯璞玉, 刘杰, 李康, 张富仓. 适度局部水分胁迫提高玉米根系吸水能力. *农业工程学报*, 2014, 30(22): 80–86
Niu X L, Hu T T, Liu T T, Wu X, Feng P Y, Liu J, Li K, Zhang F C. Appropriate partial water stress improving maize root absorbing capacity. *Trans CSAE*, 2014, 30(22): 80–86 (in Chinese with English abstract)
- [17] North G B, Nobel P S. Hydraulic conductivity of concentric root tissues of *Agave deserti* Engelm. under wet and drying conditions. *New Phytol*, 1995, 130: 47–57
- [18] Kramer P J, Boyer J S. *Water Relation of Plant and Soil*. Orlando: Academic Press, 1995. pp 145–147
- [19] Wang L D, Yao T, Guo C X, Han F G, Wang F L, Sun T, Zhang Y H. Research progress of soil microbiology. *Agric Sci Technol*, 2015, 16: 2367–2371
- [20] Petersen D G, Blazewicz S J, Firestone M, Herman D J, Turetsky M, Waldrop M. Abundance of microbial genes associated with nitrogen cycling as indices of biogeochemical process rates across a vegetation gradient in Alaska. *Environ Microbiol*, 2012, 14: 993–1008
- [21] Pratscher J, Dumont M G, Conrad R. Ammonia oxidation coupled to CO₂ fixation by archaea and bacteria in an agricultural soil. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 4170–4175
- [22] Jackson L E, Bowles T M, Hodson A K, Lazcano C. Soil microbial-root and microbial-rhizosphere processes to increase nitrogen availability and retention in agroecosystems. *Curr Opin Environ Sust*, 2012, 4: 517–522
- [23] Hadar Y, Papadopoulou K K. Suppressive Composts: Microbial ecology links between abiotic environments and healthy plant. *Annu Rev Phytopathol*, 2012, 50: 133–153
- [24] Wu L K, Wang J Y, Huang W M, Wu H M, Chen J, Yang Y Q, Zhang Z Y, Lin W X. Plant-microbe rhizosphere interactions mediated by *Rehmannia glutinosa* root exudates under consecutive monoculture. *Sci Rep*, 2015, 5: 158–171
- [25] 华菊玲, 刘光荣, 黄劲松. 连作对芝麻根际土壤微生物群落的影响. *生态学报*, 2012, 32: 2936–2942
Hua J L, Liu G R, Huang J S. Effect of continuous cropping of sesame on rhizospheric microbial communities. *Acta Ecol Sin*, 2012, 32: 2936–2942 (in Chinese with English abstract)
- [26] 邹春娇, 齐明芳, 马建, 武春成, 李天来. Biolog-ECO 解析黄瓜连作营养基质中微生物群落结构多样性特征. *中国农业科学*, 2016, 49: 942–951
Zou C J, Qi M F, Ma J, Wu C C, Li T L. Analysis of soil microbial community structure and diversity in cucumber continuous cropping nutrition medium by Biolog-ECO. *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 942–951 (in Chinese with English abstract)
- [27] van Bruggen A H C, Semenov A M. In search of biological indicators for soil health and disease suppression. *Appl Soil Ecol*, 2000, 15: 13–24
- [28] Shiomi Y, Nishiyama M, Onizuka T, Marumoto T. Comparison of bacterial community structures in the rhizoplane of tomato plants grown in soils suppressive and conducive towards bacterial wilt. *Appl Environ Microbiol*, 1999, 65: 3996–4001
- [29] Anwar G, Alec M, Brent C, Denls C, Graham S. A literature review of soil carbon under pasture, horticulture and arable land uses. New Zealand: Agresearch, 2009. pp 45–64
- [30] Cakir M, Makineci E, Kumbasli M. Comparative study on soil properties in a picnic and undisturbed area of Belgrad Forest, Istanbul. *J Environ Biol*, 2010, 31: 125–128
- [31] 谷岩, 邱强, 王振民, 陈喜凤, 吴春胜. 连作大豆根际微生物群落结构及土壤酶活性. *中国农业科学*, 2012, 45: 3955–3964
Gu Y, Qiu Q, Wang Z M, Chen X F, Wu C S. Effects of soybean continuous cropping on microbial and soil enzymes in soybean rhizosphere. *Sci Agric Sin*, 2012, 45: 3955–3964 (in Chinese with English abstract)
- [32] 刘建国, 张伟, 李彦斌, 孙艳艳, 卞新民. 新疆绿洲棉花长期连作对土壤理化性状与土壤酶活性的影响. *中国农业科学*, 2009, 42: 725–733
Liu J G, Zhang W, Li Y B, Sun Y Y, Bian X M. Effects of long-term continuous cropping system of cotton on soil physical-chemical properties and activities of soil enzyme in oasis in Xinjiang. *Sci Agric Sin*, 2009, 42: 725–733 (in Chinese with English abstract)
- [33] 何志刚, 王秀娟, 董环, 娄春荣, 牛世伟, 于涛. 日光温室辣椒连作不同年限土壤微生物种群变化及酶活性研究. *中国土壤与肥料*, 2013, (1): 38–42
He Z G, Wang X J, Dong H, Lou C R, Niu S W, Yu T. Study on microbial and enzyme activity of capsicum soil different ages in sunlight greenhouse. *China Soils Fert*, 2013, (1): 38–42 (in Chinese with English abstract)