

水肥处理对竹叶花椒土壤养分和微生物的影响

唐海龙, 龚 伟, 王景燕, 舒正悦, 黄 帅, 赵昌平, 周书玉

(四川农业大学 林学院 林业生态工程四川省重点实验室, 四川 成都 611130)

摘要: 为了解水肥措施对竹叶花椒 *Zanthoxylum armatum* 土壤养分含量和微生物数量的影响, 通过盆栽设置土壤含水量(20.0%, 40.0%, 60.0%和 80.0%的田间持水量), 氮肥(氮施肥量分别为 0, 75.0, 150.0 和 300.0 kg·hm⁻²), 磷肥(五氧化二磷施肥量分别为 0, 30.0, 60.0 和 120.0 kg·hm⁻²)和钾肥(氧化钾施肥量分别为 0, 75.0, 150.0 和 300.0 kg·hm⁻²)4 因素 4 水平正交试验, 研究水肥耦合对盆栽竹叶花椒生长、土壤有效养分含量和微生物数量的影响。结果表明: 竹叶花椒地径(D), 苗高(H)和 D^2H , 土壤细菌、放线菌、真菌, 总微生物数量、碱解氮和有效磷质量分数均随土壤水分含量的增加呈先增加后降低的变化趋势。地径、苗高和 D^2H , 碱解氮、有效磷和速效钾质量分数随施肥量的增加而增加, 土壤细菌、放线菌、真菌和总微生物数量随施肥量的增加呈先增加后降低的变化趋势。土壤微生物数量和养分含量与竹叶花椒地径和苗高均呈显著相关; 土壤肥力隶属度和 D^2H 呈显著相关。通过对土壤肥力隶属度(y)与土壤含水量(x_1), 氮肥(x_2), 磷肥(x_3)和钾肥(x_4)的多元回归预测得到, 最适宜竹叶花椒幼苗土壤养分和微生物提高的水肥组合为: 土壤含水量为 61.5%, 施肥量为 244.3 kg·hm⁻² 氮肥, 112.4 kg·hm⁻² 磷肥和 240.1 kg·hm⁻² 钾肥。图 3 表 3 参 29

关键词: 植物营养学; 水肥耦合; 有效养分; 微生物数量; 竹叶花椒

中图分类号: S725.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)02-0318-08

Nutrients and microbes in soils of *Zanthoxylum armatum* with water and fertilizer treatments

TANG Hailong, GONG Wei, WANG Jingyan, SHU Zhengyue, HUANG Shuai, ZHAO Changping, ZHOU Shuyu

(Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

Abstract: To explore water and fertilizer coupling effects on growth, nutrient content, and microbial populations in soils of *Zanthoxylum armatum*, a pot experiment with soil field water capacity (FWC, including 20.0%, 40.0%, 60.0%, and 80.0% field water-holding capacity), nitrogen (including 0, 75.0, 150.0, and 300.0 kg·hm⁻²), phosphate (including 0, 30.0, 60.0, and 120.0 kg·hm⁻²), and potassium (including 0, 75.0, 150.0, and 300.0 kg·hm⁻²) fertilizers, four factors and four levels in an orthogonal design, was conducted a randomized block design was used with three replicates of each of the sixteen treatments. Results showed that with an increase in soil water content, ground diameter (D), height (H), and D^2H of *Z. armatum*; populations of soil bacteria, actinomycete, fungi, and total microbes; as well as content of hydrolysis-N and available-P increased first and then decreased. The D , H , and D^2H of *Z. armatum*, and content of hydrolysis-N, available-P, and available-K increased with a rise of fertilization (N, P₂O₅, and K₂O) levels. The soil microbial populations and nutrient content were significantly correlated to D and H of *Z. armatum* ($P<0.05$), and the degree of subordination for soil fertility was significantly correlated to D^2H ($P<0.05$). The regression relationships of soil fertility mem-

收稿日期: 2018-03-09; 修回日期: 2018-05-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1000605); 四川省农作物育种攻关项目(2016NYZ0035); 四川省农业科技成果转化项目(16NZ0067)

作者简介: 唐海龙, 博士研究生, 从事经济林培育和水肥管理研究。E-mail: tanghl2010@163.com。通信作者: 龚伟, 教授, 博士, 从事森林培育及经济林研究。E-mail: gongwei@sicau.edu.cn

bership (y) with soil water content (x_1), nitrogen fertilizer (x_2), phosphorus fertilizer (x_3), and potassium fertilizer (x_4) were analyzed, and the obtained optimal combination of water and fertilizer was 61.5% field water capacity, 244.3 kg·hm⁻² of nitrogen fertilizer, 112.4 kg·hm⁻² of phosphate fertilizer, and 240.1 kg·hm⁻² of potassium fertilizer. [Ch, 3 fig. 3 tab. 29 ref.]

Key words: plant nutrition; water and fertilizer coupling; available nutrient; microbial population; *Zanthoxylum armatum*

竹叶花椒 *Zanthoxylum armatum* 属芸香科 Rutaceae 花椒属 *Zanthoxylum* 植物, 其果实是重要的调味料、香油料和中药材, 因其具有适应性广、生长迅速、早实丰产、抗病性强和盛产期长, 以及耐干旱瘠薄、根系发达和固土保水保肥能力强等优点, 在退耕还林工程中, 作为经济价值高、生态效益好的经济树种广泛栽植^[1]。竹叶花椒以其叶片狭长如同竹叶状而得名, 又因其成熟后鲜果碧绿色、干果灰绿色而又被称为“青花椒”^[2-3]。目前, 竹叶花椒已成为低海拔山丘区新的经济增长点, 在国家实施精准扶贫带动山区农民脱贫致富过程中发挥了重要作用。另外, 竹叶花椒喜热喜肥, 不耐水淹, 适宜在排水良好和湿润肥沃的土壤条件下生长^[4-5]。因此, 进行科学的水肥管理对促进竹叶花椒更好生长和尽早挂果投产具有重要作用^[6]。目前, 有关土壤水分和施肥对土壤养分含量和微生物特性的研究较多, 如韦泽秀等^[7]研究发现: 适当的水肥处理使土壤有效养分含量和微生物多样性显著提高, 土壤生产潜力增加; 陈鸿飞等^[8]研究发现: 合理的水肥调控有利于增加土壤中养分的有效性, 提高土壤微生物的功能多样性; 王景燕等^[9]研究发现: 水肥耦合对汉源花椒 *Z. buugeaum* ‘Hanyuan’ 的地径、苗高和生物量有显著提高作用。有关水肥管理对花椒土壤养分和微生物影响等方面的研究尚未见报道, 难以满足当前花椒产业发展需要。本研究以竹叶花椒新品种汉源葡萄青椒 *Z. armatum* ‘Hanyuan Putaoqing’ 为对象, 通过水肥处理盆栽试验明确不同土壤含水量和氮、磷、钾配方施肥量对竹叶花椒生长、土壤有效养分和微生物特性的影响, 为竹叶花椒栽培管理过程中, 水肥管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 盆栽试验设计

供试土壤为四川农业大学成都校区周边农田耕层(0~20 cm)沙壤土。多点采集有代表性的土壤样品共计约 1.0 kg, 土样自然风干去除杂质过 5 mm 筛混匀后待用, 用于测定土壤理化性质本底值。盆栽前土壤理化性质: pH 7.5, 土壤含水量为 25.2% 的田间持水量, 有机质 16.6 g·kg⁻¹, 全氮 1.0 g·kg⁻¹, 碱解氮 80.3 mg·kg⁻¹, 全磷 0.48 g·kg⁻¹, 有效磷 15.4 mg·kg⁻¹, 全钾 23.9 g·kg⁻¹ 和速效钾 22.5 mg·kg⁻¹。栽植前, 取风干土 6.3 kg(相当于 6.0 kg 烘干土), 其中 2/3 先装入聚乙烯塑料盆内(盆口直径 22 cm, 盆底直径 20 cm, 高 23 cm)中, 另外 1/3 与需添加的肥料充分混匀后再装在上部, 盆内土壤厚度约 20 cm。

水肥耦合试验采用 4 因素 4 水平正交试验设计, 共计 16 个处理(表 1), 3 次重复, 每重复栽植 3 盆, 总计 9 盆·处理⁻¹, 共计 144 盆。土壤含水量设置为 20.0%, 40.0%, 60.0% 和 80.0% 的田间持水量, 氮肥(尿素, 氮质量分数为 46.4%, 施肥量以氮计)施肥量设置为 0, 75.0, 150.0 和 300.0 kg·hm⁻², 磷肥(过磷酸钙, 五氧化二磷质量分数为 12.0%, 施肥量以五氧化二磷计)施肥量设置为 0, 30.0, 60.0 和 120.0 kg·hm⁻², 钾肥(硫酸钾, 氧化钾质量分数为 51.0%, 施肥量以氧化钾计)施肥量设置为 0, 75.0, 150.0 和 300.0 kg·hm⁻²。盆内具体的施肥量按照单位面积进行折算, 所有肥料均一次性施入。在 2016 年 4 月中旬将苗高约 10 cm 的竹叶花椒 ‘汉源葡萄青椒’ 幼苗移植于各处理盆栽土壤中, 试验在温室大棚内完成(本试验中温室大棚只避雨不控制温度和湿度)。整个试验过程中, 各处理土壤田间持水量采用每日定时称量补水法进行调控。

1.2 测定项目及方法

于 2016 年 11 月中旬, 用游标卡尺和卷尺测定竹叶花椒幼苗地径和苗高。将竹叶花椒苗从盆中移出后采集土壤样品, 一份带回实验室风干后用于测定土壤碱解氮、有效磷和速效钾质量分数; 另外一份用无菌袋装好, 带回实验室用于测定土壤细菌、放线菌和真菌数量。碱解氮采用碱解-扩散法, 有效磷采用 Olsen 法, 速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法^[10]; 微生物数量采用稀释平板法^[11]。

1.3 数据处理

采用 SPSS 22.0 和 Excel 2013 对数据进行统计分析; 用单因素方差分析(one-way ANOVA)对各处理竹叶花椒苗高、地径、土壤速效养分和土壤微生物数量进行方差分析; 采用最小显著差异法(SSR)和多因素方差分析对处理间各指标进行多重比较。数据为平均值 $\pm$ 标准差。指标间相关性采用 Pearson 相关性分析。采用隶属函数法对每个处理土壤碱解氮、有效磷和速效钾质量分数, 细菌、放线菌、真菌和总微生物数量进行转换, 数据转换公式为: $x(u)=(x-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})$ 。其中: $x(u)$, x , $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别表示各指标隶属度值、指标测定值、该指标值的最小值和最大值; 然后将每个处理土壤碱解氮、有效磷和速效钾质量分数隶属度相加得到土壤养分隶属度, 细菌、放线菌、真菌和总微生物数量隶属度值相加得到土壤微生物隶属度, 所有土壤肥力指标的隶属度值累加得到土壤肥力隶属度, 值越大土壤肥力就越高。

2 结果与分析

2.1 苗高和地径

由表 1 可知: 不同水肥处理竹叶花椒幼苗地径和苗高差异显著。与 $W_{20}N_0P_0K_0$ 处理(ck)相比, 其他各处理的地径和苗高均显著增加。地径和苗高以 $W_{60}N_{300}P_{30}K_0$ 处理的最大, 分别比 ck 增加 107.5%和 76.2%。地径平方与苗高的乘积(D^2H)在各水肥处理下的变化规律与地径相似, 以 $W_{60}N_{300}P_{30}K_0$ 处理最高, 比 ck 增加 648.1%。由表 2 多因素方差分析可知: 土壤含水量和氮肥施入量对 D^2H 影响显著($P<0.05$)。说明适量的土壤水分和较高的氮肥施入有利于竹叶花椒的高粗生长。

表 1 4 因素 4 水平正交试验方案处理及植株地径和苗高

Table 1 4 factors and 4 levels orthogonal test scheme processing, ground diameter (D) and height (H) of seedlings

处理编号	施肥处理	含水量/%	施肥量/($kg \cdot hm^{-2}$)			地径 D/cm	苗高 H/cm	D^2H
			氮	五氧化二磷	氧化钾			
1	$W_{20}N_0P_0K_0$ (ck)	20	0	0	0	0.40 ± 0.02 f	52.2 ± 2.9 f	8.4 ± 0.6 f
2	$W_{20}N_{75}P_{30}K_{75}$	20	75	30	75	0.52 ± 0.02 e	59.9 ± 2.6 e	16.0 ± 1.3 f
3	$W_{20}N_{150}P_{60}K_{150}$	20	150	60	150	0.63 ± 0.03 d	69.3 ± 3.4 cd	27.6 ± 2.2 e
4	$W_{20}N_{300}P_{120}K_{300}$	20	300	120	300	0.65 ± 0.03 cd	71.5 ± 3.2 cd	29.8 ± 3.5 de
5	$W_{40}N_0P_{30}K_{150}$	40	0	30	150	0.63 ± 0.04 d	66.2 ± 3.5 de	26.6 ± 2.4 e
6	$W_{40}N_{75}P_0K_{300}$	40	75	0	300	0.70 ± 0.03 cd	72.8 ± 3.7 cd	35.3 ± 4.1 cde
7	$W_{40}N_{150}P_{120}K_0$	40	150	120	0	0.71 ± 0.04 cd	75.4 ± 4.3 bcd	38.0 ± 5.5 cde
8	$W_{40}N_{300}P_{60}K_{75}$	40	300	60	75	0.73 ± 0.04 bc	80.8 ± 3.7 ab	43.4 ± 5.5 bc
9	$W_{40}N_0P_{60}K_{300}$	60	0	60	300	0.69 ± 0.03 cd	76.9 ± 4.0 bc	36.9 ± 4.6 cde
10	$W_{60}N_{75}P_{120}K_{150}$	60	75	120	150	0.77 ± 0.03 ab	88.8 ± 3.5 a	53.0 ± 5.6 ab
11	$W_{60}N_{150}P_0K_{75}$	60	150	0	75	0.81 ± 0.05 a	89.9 ± 3.6 a	58.6 ± 9.1 a
12	$W_{60}N_{300}P_{30}K_0$	60	300	30	0	0.83 ± 0.05 a	92.0 ± 5.0 a	63.1 ± 9.4 a
13	$W_{80}N_0P_{120}K_{75}$	80	0	120	75	0.66 ± 0.04 cd	70.4 ± 3.9 cd	30.5 ± 4.6 de
14	$W_{80}N_{75}P_{60}K_0$	80	75	60	0	0.73 ± 0.03 bc	78.5 ± 4.0 bc	41.4 ± 5.3 bcd
15	$W_{80}N_{150}P_{30}K_{300}$	80	150	30	300	0.75 ± 0.04 bc	82.7 ± 4.7 ab	46.2 ± 6.5 bc
16	$W_{80}N_{300}P_0K_{150}$	80	300	0	150	0.73 ± 0.04 bc	78.8 ± 4.7 bc	41.5 ± 2.8 bcd

说明: 数值后同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

2.2 土壤有效养分质量分数

由图 1 可知: 不同水肥处理下土壤碱解氮、有效磷和速效钾质量分数差异显著。与 ck 相比, 其他各处理的有效养分质量分数均显著增加, 土壤碱解氮、有效磷和速效钾质量分数均随氮磷钾施肥量的增加而增加。 $W_{60}N_{300}P_{30}K_0$ 处理的碱解氮质量分数最高, 比 ck 增加 51.3%; $W_{60}N_{75}P_{120}K_{150}$ 处理的有效磷质量分数最高, 比 ck 增加 39.7%; $W_{80}N_{150}P_{30}K_{300}$ 处理的速效钾质量分数最高, 比 ck 增加 37.9%。利用隶属函数对碱解氮、有效磷和速效钾质量分数转化, 三者之和为土壤养分隶属度。由表 2 多因素方差分析可知: 土壤水分和氮磷钾肥施入量对土壤养分隶属度影响显著($P<0.05$)。说明适当的增加土壤施肥量可显著提高土壤有效养分质量分数。

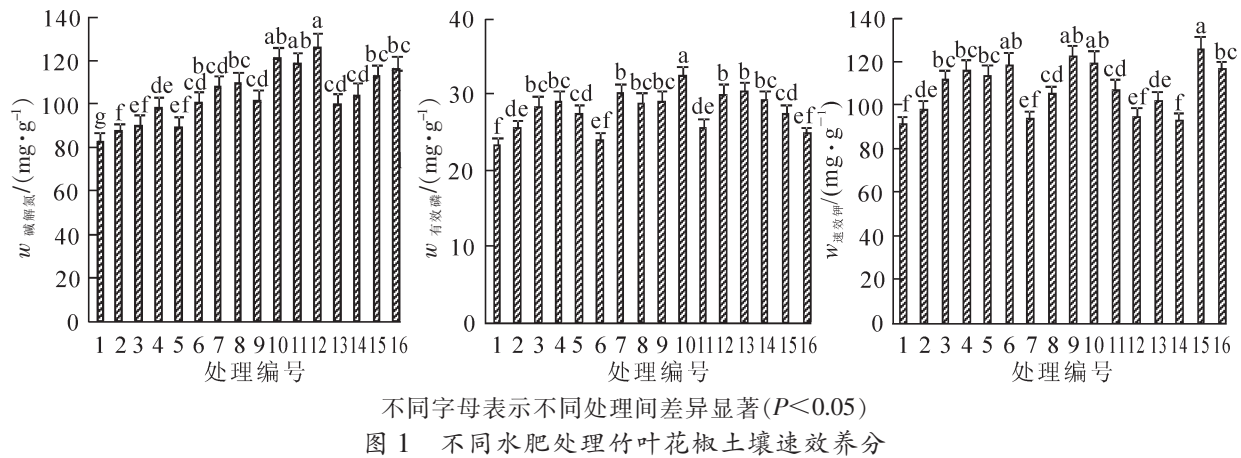


Figure 1 Soil available nutrients of *Zanthoxylum armatum* under different water and fertilizer treatments

2.3 土壤微生物数量

由图 2 可知：不同水肥处理土壤细菌、放线菌、真菌和总微生物数量差异显著。与 ck 相比，其他各处理的细菌、放线菌、真菌和总微生物数量均显著增加。细菌和总微生物数量以 $W_{60}N_{150}P_0K_{75}$ 处理的最高，分别比 ck 增加 341.9%和 307.5%；放线菌和真菌数量以 $W_{60}N_{300}P_{30}K_0$ 处理的最高，分别比 ck 增加 271.6%和 208.2%。利用隶属函数对细菌、放线菌、真菌和总微生物数量转化，相加之和为土壤微生物隶属度。由表 2 多因素方差分析可知：土壤水分和氮肥施入量对土壤微生物隶属度影响显著($P<0.05$)。说明保证磷钾养分充足的基础上，着重调节土壤水分和氮肥施入量可以提高竹叶花椒土壤微生物数量。

2.4 综合评价与相关分析

由图 3 可知：不同水肥处理下竹叶花椒幼苗土壤肥力隶属度差异显著。与 ck 相比，其他各处理的土壤肥力隶属度均显著增加，比 ck 的增加 41.5%~307.5%。土壤肥力隶属度以 $W_{60}N_{75}P_{120}K_{150}$ 处理的最高。 D^2H 和土壤肥力隶属度呈显著相关($R^2=0.904$)。相关分析表明(表 3)：竹叶花椒幼苗地径、苗高和 D^2H ，

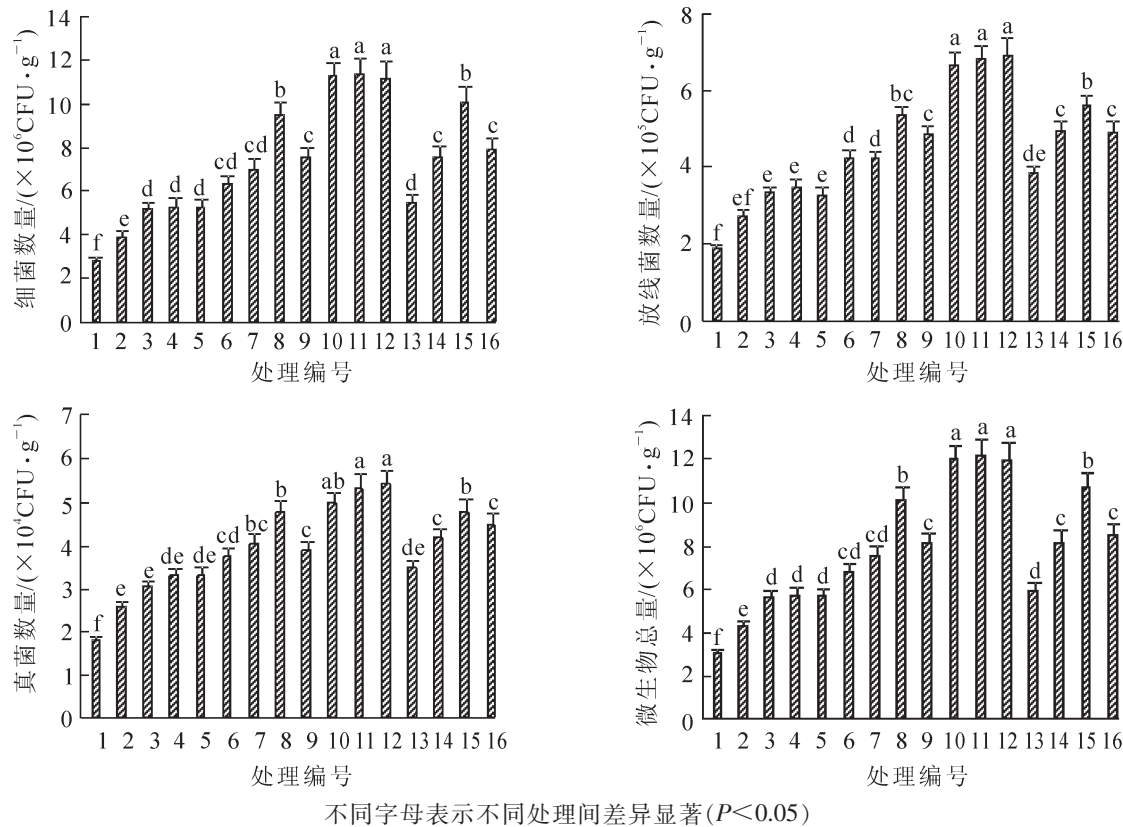


Figure 2 Soil microbial population of *Zanthoxylum armatum* under different water and fertilizer treatments

表 2 竹叶花椒 D^2H 与土壤肥力多因素方差分析

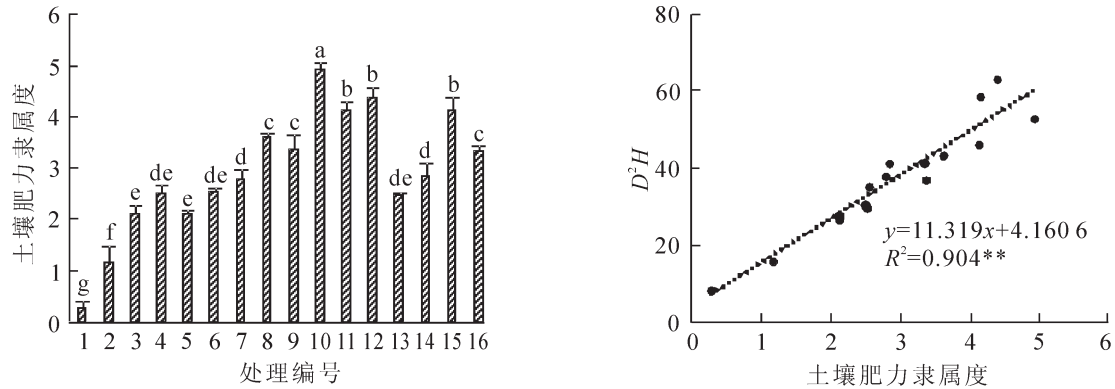
Table 2 Multifactor variance analysis of the D^2H and soil fertility of *Zanthoxylum armatum*

指标	因素	S_s	d_f	F	P	R	指标	因素	S_s	d_f	F	P	R
D^2H	土壤含水量	6 424.549	3	63.342	0.000	32.421	养分隶属度	土壤含水量	4.912	3	49.771	0.000	0.882
	氮	2 598.600	3	25.620	0.000	18.842		氮	1.216	3	12.318	0.000	0.422
	五氧化二磷	30.339	3	0.299	0.826	2.022		五氧化二磷	1.801	3	18.255	0.000	0.544
	氧化钾	3.733	3	0.037	0.990	0.693		氧化钾	2.359	3	23.900	0.000	0.524
微生物隶属度	土壤含水量	20.109	3	173.981	0.000	1.812	土壤肥力隶属度	土壤含水量	44.833	3	167.813	0.000	2.694
	氮	7.165	3	61.989	0.000	0.985		氮	14.197	3	53.142	0.000	1.407
	五氧化二磷	0.109	3	0.942	0.431	0.128		五氧化二磷	2.301	3	8.613	0.000	0.605
	氧化钾	0.102	3	0.884	0.459	0.128		氧化钾	2.590	3	9.696	0.000	0.568

说明： S_s , d_f , F , P 和 R 分别表示离均差平方和，自由度， F 值，显著水平和极差

土壤碱解氮和有效磷质量分数及细菌、放线菌、真菌和总微生物数量显著相关($P<0.05$)，而与速效钾质量分数相关性不显著。土壤肥力隶属度与土壤碱解氮、有效磷和速效钾质量分数及细菌、放线菌、真菌和总微生物数量相关性显著($P<0.05$)。说明土壤肥力隶属度在一定程度上能表征竹叶花椒苗木品质的高低。

通过对土壤肥力隶属度(y)与土壤含水量(x_1)、氮肥(x_2)、磷肥(x_3)和钾肥(x_4)的多元回归，分别拟合得到方程 $y=-0.001\ 4x_1^2+0.174x_1-1.527(R^2=0.779)$ ， $y=-0.000\ 025x_2^2+0.012x_2+2.076(R^2=0.763)$ ， $y=-0.000\ 045x_3^2+0.010x_3+2.609(R^2=0.793)$ 和 $y=-0.000\ 011x_4^2+0.005\ 2x_4+2.562(R^2=0.821)$ ，建立竹叶花椒土壤肥力隶属度与水肥条件的关系。通过以上方程预测得到在土壤水分含量为 61.47%，施肥量为 244.28 kg·hm⁻² 氮、112.36 kg·hm⁻² 五氧化二磷和 240.05 kg·hm⁻² 氧化钾时，能显著增加土壤肥力，提高青椒苗木品质。



不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

图 3 不同水肥处理竹叶花椒土壤肥力隶属度

Figure 3 Soil fertility subordinate degree of *Zanthoxylum armatum* under different water and fertilizer treatments

表 3 竹叶花椒土壤养分、微生物数量与生长的相关性

Table 3 Correlative coefficient between soil nutrients, microbial biomass and growth of *Zanthoxylum armatum*

指标	碱解氮	有效磷	速效钾	细菌	放线菌	真菌	微生物总量	土壤肥力隶属度
地径 D	0.814**	0.396*	0.271	0.855**	0.883**	0.909**	0.859**	0.894**
苗高 H	0.868**	0.400*	0.224	0.928**	0.930**	0.932**	0.930**	0.928**
D^2H	0.858**	0.343*	0.171	0.913**	0.930**	0.927**	0.916**	0.898**
碱解氮	1.000	0.292	0.148	0.895**	0.893**	0.903**	0.896**	0.895**
有效磷	0.292	1.000	0.026	0.352*	0.364*	0.345*	0.353*	0.496**
速效钾	0.148	0.026	1.000	0.206	0.195	0.206	0.206	0.396*
土壤肥力隶属度	0.895**	0.496**	0.396*	0.947**	0.945**	0.940**	0.949**	1.000

说明：**和* 分别表示在 0.01 和 0.05 水平显著； $n=48$

3 讨论

土壤水分和养分含量是植株生长的基础，在栽培管理过程中合理的水肥管理措施能显著促进植株生长^[12]。本研究发现，土壤含水量过低过高都会影响竹叶花椒植株生长，在土壤含水量为 60% 时竹叶花椒的地径、苗高和 D^2H 达到最大值。这与张志亮等^[13]和张楠等^[14]的研究结果相似，在土壤水分含量为 46.1%~70.0% 时，能显著促进苗木的生长。而刘杜玲等^[15]的研究发现，轻度干旱胁迫有利于花椒幼苗叶片叶绿素的合成，增加光合产物的形成和积累，从而促进植株的生长。这可能是本研究的竹叶花椒幼苗为长期水分梯度处理，而刘杜玲等^[15]的研究为短期水分胁迫处理。王景燕等^[9]通过建立汉源花椒幼苗生长隶属度与水肥关系的方程，预测适宜汉源花椒幼苗生长和苗木品质提高的施肥量。本研究通过建立方程，预测施肥量为 $244.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥， $112.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷肥和 $240.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 钾肥时，竹叶花椒的生长最佳，可能是随着施肥量的增加，植物生长及生物量也会随之增加，超过最适量后，植物生长受到肥料胁迫，生长和生物量下降^[16]。

土壤水分作为土壤微生物活动的关键因子，其含量过高或过低均会对土壤微生物产生胁迫^[17]。微生物作为土壤生态过程的直接参与者，促进土壤能量流动和物质循环，提高土壤养分含量。本研究中，随着土壤水分含量的增加，土壤细菌、放线菌、真菌和总微生物数量均增加，超过 60% 土壤含水量后，又呈降低趋势。这与曾成城等^[18]和 BROCKETT 等^[19]的研究结果相似。适宜的水分条件能促进植物生长，加快土壤熟化，为土壤微生物提供充足的营养，使土壤微生物数量增加^[20-21]。本研究还发现：土壤碱解氮含量随土壤含水量的增加呈先增加后减少的变化趋势，在 60% 土壤含水量时达到最大值，而有效磷和速效钾含量随土壤含水量的增加无显著差异，可能是由于盆栽试验条件下，土壤养分淋失较慢，且本研究土壤养分供给量超过竹叶花椒生长所需的量。

施肥是作物种植和土壤管理的基本措施，适量施肥能快速增加土壤养分、改善土壤环境和促进作物生长^[22]。微生物作为土壤生化反应的参与者，对土壤环境变化敏感，与施肥种类及施肥量关系密切^[23]。本研究发现，施肥处理土壤细菌、放线菌、真菌和总微生物数量均显著高于未施肥处理，且配方施肥土壤微生物数量更高，随氮、磷、钾施肥量的增加，土壤微生物数量呈先增加后降低的变化趋势；土壤有效养分随施肥量的增加而增加。这与马冬云等^[24]和陈立新^[25]研究结果基本一致。而代景忠等^[22]的研究发现，施肥显著增加了土壤中真菌的数量，随施肥水平增加，真菌和放线菌数量逐渐增大，细菌数量则逐渐减小。这可能与本研究中的土壤特性和施肥量梯度有关。也有研究^[26-28]发现：随施肥水平的增加，土壤微生物数量降低，可能与土壤 pH 降低和土壤表层板结有关，且肥料偏施导致土壤养分失衡，抑制植物生长和微生物繁殖^[29]。因此，合理的配方施肥比例和施肥量是提高土壤有效养分含量和微生物数量的关键。

4 结论

本研究水肥处理显著增加了竹叶花椒植株地径和苗高，促进土壤有效养分含量和微生物数量的增加。植株苗高和地径、土壤微生物数量、碱解氮和有效磷质量分数均随土壤水分含量的增加呈先增加后降低的变化趋势。植株苗高和地径及土壤有效养分质量分数随施肥量的增加而增加，土壤细菌、放线菌、真菌和总微生物数量随施肥量的增加呈先增加后降低的变化趋势。土壤微生物数量与碱解氮、有效磷和速效钾质量分数显著相关，土壤微生物数量与地径和苗高显著相关；土壤肥力隶属度与 D^2H 显著相关。多元回归拟合方程预测，适宜于植株生长、养分含量提高和微生物数量增加的土壤水分含量为 61.47%，氮、磷（五氧化二磷）和钾（氧化钾）施肥量分别为 244.3 、 112.4 和 $240.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时对促进竹叶花椒幼苗生长，提高土壤肥力具有重要作用。

5 参考文献

- [1] 张华，叶萌. 青花椒的分类地位及成分研究现状[J]. 北方园艺，2010(14): 199 – 203.
ZHANG Hua, YE Meng. Research status on the taxonomic and component of green *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. [J]. *Northern Hortic*, 2010(14): 199 – 203.

- [2] 黄成就. 中国植物志第43卷第2分册[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [3] 王景燕, 龚伟, 肖千文, 等. 抗寒青花椒新品种‘汉源葡萄青椒’[J]. 园艺学报, 2016, **43**(7): 1425 – 1426.
WANG Jingyan, GONG Wei, XIAO Qianwen, *et al.* A new cold tolerance green Chinese prickly ash cultivar ‘Hanyuan Putao Qingjiao’ [J]. *Acta Horti Sin*, 2016, **43**(7): 1425 – 1426.
- [4] CHEN Lijuan, FENG Qi, WEI Yongping, *et al.* Effects of saline water irrigation and fertilization regimes on soil microbial metabolic activity [J]. *J Soil Sed*, 2016, **17**(2): 1 – 8.
- [5] SHANG Fangze, REN Shumei, YANG Peiling, *et al.* Effects of different irrigation water types, N fertilizer types, and soil moisture contents on N₂O emissions and N fertilizer transformations in soils [J]. *Water Air Soil Pollut*, 2016, **227**(7): 1 – 18.
- [6] BOSSIO D A, FLECK J A, SCOW K M, *et al.* Alteration of soil microbial communities and water quality in restored wetlands [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38**(6): 1223 – 1233.
- [7] 韦泽秀, 梁银丽, 井上光弘, 等. 水肥处理对黄瓜土壤养分、酶及微生物多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(7): 1678 – 1684.
WEI Zexiu, LIANG Yinli, INOUE I, *et al.* Effects of different water and fertilizer supply on cucumber soil nutrient content, enzyme activity, and microbial diversity [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **20**(7): 1678 – 1684.
- [8] 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.
CHEN Hongfei, PANG Xiaomin, ZHANG Ren, *et al.* Effects of different irrigation and fertilizer application regimes on soil enzyme activities and microbial functional diversity in rhizosphere of ratooning rice [J]. *Acta Agron Sin*, 2017, **43**(10): 1507 – 1517.
- [9] 王景燕, 唐海龙, 龚伟, 等. 水肥耦合对汉源花椒幼苗生长、养分吸收和肥料利用的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, **40**(3): 33 – 40.
WANG Jingyan, TANG Hailong, GONG Wei, *et al.* Effects of water and fertilizer coupling on growth, nutrients absorption and fertilizer use of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim ‘Hanyuan’ seedling [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2016, **40**(3): 33 – 40.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [12] WANG Yu, FU Delong, PAN Lulu, *et al.* The coupling effect of water and fertilizer on the growth of tea plants (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntz) [J]. *J Plant Nutr*, 2016, **39**(5): 620 – 627.
- [13] 张志亮, 张富仓, 郑彩霞, 等. 土壤水分与氮营养对果树幼苗生长和水分传导的影响[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(6): 46 – 51.
ZHANG Zhiliang, ZHANG Fucang, ZHENG Caixia, *et al.* Effects of soil water and nitrogen nutrition on growth and hydraulic conductivity of fruit tree seedling [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2009, **25**(6): 46 – 51.
- [14] 张楠, 杨雪芹, 曹德昌, 等. 土壤水肥因子对胡杨幼苗生长权衡和木质化的影响[J]. 西北植物学报, 2013, **33**(4): 771 – 779.
ZHANG Nan, YANG Xueqin, CAO Dechang, *et al.* Soil water and fertilizer factors on the trade-off of growth and lignification of populus [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2013, **33**(4): 771 – 779.
- [15] 刘杜玲, 刘淑明. 不同花椒品种抗旱性比较研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, **28**(6): 183 – 189.
LIU Duling, LIU Shuming. Comparative drought resistance of different varieties of *Zanthoxylum bungeanum* [J]. *Agric Res Arid Areas*, 2010, **28**(6): 183 – 189.
- [16] 董雯怡, 赵燕, 张志毅, 等. 水肥耦合效应对毛白杨苗木生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(9): 2194 – 2200.
DONG Wenyi, ZHAO Yan, ZHANG Zhiyi, *et al.* Coupling effects of water and fertilizer on the biomass of *Populus tomentosa* seedlings [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(9): 2194 – 2200.
- [17] LANDESMAN W J, DIGHTON J. Response of soil microbial communities and the production of plant-available nitrogen to a two-year rainfall manipulation in the New Jersey Pinelands [J]. *Soil Biol Biochem*, 2010, **42**(10): 1751 – 1758.
- [18] 曾成城, 陈锦平, 魏虹, 等. 水淹生境下秋华柳对Cd污染土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报,

- 2017, **37**(13): 4327 – 4334.
- ZENG Chengcheng, CHEN Jinping, WEI Hong, *et al.* Effects of *Salix variegata* on soil microorganisms and enzymatic activity in contaminated soils under flooding conditions [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(13): 4327 – 4334.
- [19] BROCKETT B F T, PRESCOTT C E, GRAYSTON S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada [J]. *Soil Biol Biochem*, 2012, **44**(1): 9 – 20.
- [20] TAYLOR J P, WILSON B, MILLS M S, *et al.* Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques [J]. *Soil Biol Biochem*, 2002, **34**(3): 387 – 401.
- [21] GUO Peng, WANG Congyan, FENG Xiaoguang, *et al.* Mixed inorganic and organic nitrogen addition enhanced extracellular enzymatic activities in a subtropical forest soil in East China [J]. *Water Air Soil Pollut*, 2011, **216**(1/4): 229 – 237.
- [22] 代景忠, 闫瑞瑞, 卫智军, 等. 短期施肥对羊草草甸割草场土壤微生物的影响[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(9): 2431 – 2437.
- DAI Jingzhong, YAN Ruirui, WEI Zhijun, *et al.* Effects of short-term fertilization on soil microorganisms in a mown *Leymus chinensis* meadow [J]. *Chin J Ecol*, 2017, **36**(9): 2431 – 2437.
- [23] 李慧杰, 徐福利, 林云, 等. 施用氮磷钾对黄土丘陵区山地红枣林土壤酶与土壤肥力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, **30**(4): 53 – 59.
- LI Huijie, XU Fuli, LIN Yun, *et al.* Effects of N, P and K fertilization on soil enzyme activities and soil fertility in mintane Jujube forest of hilly loess region [J]. *Agric Res Arid Areas*, 2012, **30**(4): 53 – 59.
- [24] 马冬云, 郭天财, 宋晓, 等. 尿素施用量对小麦根际土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2007, **27**(12): 5222 – 5228.
- MA Dongyun, GUO Tiancai, SONG Xiao, *et al.* Effects of urea application rate on the quantity of microorganisms and activity of enzymes in wheat rhizosphere [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27**(12): 5222 – 5228.
- [25] 陈立新. 落叶松人工林施肥对土壤酶和微生物的影响[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(6): 1000 – 1004.
- CHEN Lixin. Effect of fertilization on soil enzymes and microbes in *Larix gmelinii* plantations [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15**(6): 1000 – 1004.
- [26] 张学林, 徐钧, 安婷婷, 等. 不同氮肥水平下玉米根际土壤特性与产量的关系[J]. 中国农业科学, 2016, **49**(14): 2687 – 2699.
- ZHANG Xuelin, XU Jun, AN Tingting, *et al.* Relationship between rhizosphere soil properties and yield of maize at different nitrogen levels [J]. *Sci Agric Sin*, 2016, **49**(14): 2687 – 2699.
- [27] 马亚娟, 徐福利, 王渭玲, 等. 氮磷提高华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(3): 664 – 674.
- MA Yajuan, XU Fuli, WANG Weiling, *et al.* Increase of soil nutrients and enzymatic activity by adding nitrogen and phosphorus to *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2015, **21**(3): 664 – 674.
- [28] 刘赛, 徐荣, 陈君, 等. 宁夏中宁不同施肥方式下土壤肥力及枸杞子品质比较研究[J]. 中国中药杂志, 2011, **36**(19): 2641 – 2644.
- LIU Sai, XU Rong, CHEN Jun, *et al.* Comparative study on soil fertility and quality of Ningxia Zhongning medlar under different fertilization modes [J]. *China J Chin Mater Med*, 2011, **36**(19): 2641 – 2644.
- [29] YING Jiaoyan, LI Xiaoxiao, WANG Nana, *et al.* Contrasting effects of nitrogen forms and soil pH on ammonia oxidizing microorganisms and their responses to long-term nitrogen fertilization in a typical steppe ecosystem [J]. *Soil Biol Biochem*, 2017, **107**: 10 – 18.