

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190127

杨仕曦, 吕广斌, 黄云, 向华辉, 王正银. 九龙坡花椒种植区地形、土壤肥力与花椒产量的关系[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1823–1832

YANG S X, LYU G B, HUANG Y, XIANG H H, WANG Z Y. Relationships of *Zanthoxylum bungeanum* yield with topography and soil fertility in Jiulongpo area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(12): 1823–1832

九龙坡花椒种植区地形、土壤肥力与花椒产量的关系*

杨仕曦¹, 吕广斌¹, 黄云^{1**}, 向华辉², 王正银¹

(1. 西南大学资源环境学院 重庆 400716; 2. 重庆市九龙坡区农业技术推广中心 重庆 400039)

摘要: 为了解九龙坡花椒种植区土壤养分状况及该区地形因子、土壤肥力因子与花椒产量的关系, 为科学合理制定花椒高效施肥措施提供理论依据, 本研究采用田间调查研究 and 室内分析的方法, 研究了九龙坡花椒种植区低、中、高产区的海拔、坡度及土壤 pH、有机质、大量微量元素含量和交换性能的变化特征, 及其与花椒产量的关系。研究表明: 九龙坡花椒普遍种植于 200~500 m 海拔范围, 高产区集中在 300 m 左右的海拔; 从低产区到高产产区坡度略有增加, 但未达显著水平。土壤均属酸性土, pH<6.5。土壤肥力总体属高水平范围, 但各养分因子差异很大, 其中土壤阳离子交换量(CEC)、有效磷、有效钙、有效镁、有效铁、有效锰、有效铜、有效锌含量丰富, 分别为 27.2 cmol(+)-kg⁻¹、35.2 mg·kg⁻¹、3 289.8 mg·kg⁻¹、271.8 mg·kg⁻¹、48.6 mg·kg⁻¹、62.1 mg·kg⁻¹、1.5 mg·kg⁻¹、4.5 mg·kg⁻¹; 有机质、碱解氮、速效钾、交换性酸属适中水平, 分别为 19.1 mg·kg⁻¹、114.9 mg·kg⁻¹、107.0 mg·kg⁻¹、8.1 cmol(+)-kg⁻¹; 水溶性硼缺乏, 为 0.28 mg·kg⁻¹。相关分析表明花椒产量与有效钙、CEC、pH、有效锰、水溶性硼呈显著正相关; 通径分析结果表明有效钙、CEC、交换性酸、有效铜、有效铁、有效锌是影响花椒产量的主要因子, 逐步回归分析构建了有效钙(X_0)与花椒产量(Y)的最优回归线性方程: $Y=11.693+0.003X_0$ 。综上所述, 九龙坡花椒种植区土壤养分失衡较为严重, 施肥应注重养分的平衡, 增施有机肥, 改善土壤理化性状, 治理土壤酸化。

关键词: 花椒; 地形; 土壤肥力; 产量; 养分平衡

中图分类号: S158.3

文章编号: 2096-6237(2019)12-1823-10

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Relationships of *Zanthoxylum bungeanum* yield with topography and soil fertility in Jiulongpo area *

YANG Shixi¹, LYU Guangbin¹, HUANG Yun^{1**}, XIANG Huahui², WANG Zhengyin¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Extension Centre of Agricultural Techniques of Jiulongpo District in Chongqing, Chongqing 400039, China)

Abstract: The relationships of soil nutrient conditions and topography with production in Jiulongpo *Zanthoxylum bungeanum* planting areas was studied through a field investigation-based research and lab analysis to provide a theoretical basis for scientific and effective fertilization practices. The characteristics of altitude and slope, and soil pH, organic matter content, macro- and micro-elements content, cation exchange capacity (CEC) and exchange acidity as well as *Z. bungeanum* yield in low-, medium and

* 国家自然科学基金重点项目(41530855)和国际植物营养研究所(IPNI)项目(2013-Chongqing-02)资助

** 通信作者: 黄云, 主要研究方向为植物营养与施肥。E-mail: huangyun1622@126.com

杨仕曦, 研究方向为植物营养与土壤酸化改良技术。E-mail: 751743470@qq.com

收稿日期: 2019-02-21 接受日期: 2019-07-20

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41530855) and the International Plant Nutrition Institute (IPNI) Funded Project (2013-Chongqing-02).

** Corresponding author, E-mail: huangyun1622@126.com

Received Feb. 21, 2019; accepted Jul. 20, 2019

high-yield areas of *Z. bungeanum* were investigated. The results showed that *Z. bungeanum* was generally planted at altitudes between 200 and 500 meters in Jiulongpo, and the altitude of the high-yield area was approximately 300 meters. The slope from low- to high-yield areas appeared to be slight increase but not obvious. The soil was acidic, with a pH < 6.5; and soil fertility was high, with large differences in nutrient factors. CEC and available phosphorus, calcium, magnesium, iron, manganese, copper, and zinc were abundant at 27.2 cmol(+)-kg⁻¹, 35.2 mg·kg⁻¹, 3 289.8 mg·kg⁻¹, 271.8 mg·kg⁻¹, 48.6 mg·kg⁻¹, 62.1 mg·kg⁻¹, 1.5 mg·kg⁻¹, and 4.5 mg·kg⁻¹, respectively. Organic matter and available nitrogen, potassium and exchange acid were at a moderate levels of 19.1 mg·kg⁻¹, 114.9 mg·kg⁻¹, 107.0 mg·kg⁻¹ and 8.1 cmol(+)-kg⁻¹, respectively. The content of water-soluble boron was a relatively low 0.28 mg·kg⁻¹. *Z. bungeanum* yield exhibited a positive correlation with available calcium, CEC, pH, available manganese, and water-soluble boron. Available calcium, CEC, exchange acidity, and available copper, iron, and zinc were the main influencing factors on yield. An optimal linear regression equation of available calcium (X_6) and yield (Y) was established based on stepwise regression analysis ($Y = 11.693 + 0.003X_6$). In conclusion, soil nutrient in Jiulongpo *Z. bungeanum* area was imbalanced seriously, more attention should be paid to balancing fertilization, increasing organic fertilizer, improving the physical and chemical properties of soil, and relieving soil acidification.

Keywords: *Zanthoxylum bungeanum*; Topography; Soil fertility; Yield; Nutrient balance

花椒 (*Zanthoxylum bungeanum*) 为芸香科 (Rutaceae) 花椒属植物, 在我国已有两千多年的栽培历史; 花椒是我国特有的食用香辛料树种, 广泛种植于四川、重庆、甘肃、陕西等省(市), 其中以四川、重庆的花椒最为著名^[1-2]。花椒根系发达, 耐寒、耐干旱瘠薄^[3], 是我国极力推广的一种生态经济型树种, 在促进山区经济发展中具有重要作用^[4]。近年来, 随着花椒产业不断发展, 农户为提高产量, 化学肥料用量不断增加, 有机肥用量不足, 造成土壤养分失调、土壤酸化、土壤肥力下降的现象日益严重^[5]。

地形和土壤肥力是影响作物产量的两个重要因素^[6-7]。研究表明, 土壤养分含量的分布往往与地形的空间变异性有关, 且独特地形形成的小气候也能对作物产量造成影响。土壤是最重要的农业生产资料, 它不仅提供了作物吸收养分的环境条件, 同时也是产量的制约因素之一^[8]。土壤的养分丰缺程度和分布情况直接影响到作物生长及营养特征, 了解土壤肥力状况及其不同区域的分布差异, 对充分利用土地资源, 制定合理施肥措施, 实现优质生产和构建生态经济型农业有重要意义^[9]。目前, 关于花椒的研究主要集中在花椒营养需求、品种选育、苗期管理、化感作用等方面, 但关于地形因子、土壤肥力与花椒产量的关系研究尚鲜见相关报导。本研究对九龙坡花椒种植区地形因子差异、土壤养分分布特征及其与花椒产量的关系进行了研究分析, 确定土壤肥力是产量的主要限制因子, 旨在掌握九龙坡花椒种植区土壤养分丰缺状况, 为科学、合理地制定花椒高效施肥措施提供理论依据。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

本研究区选择在重庆市九龙坡花椒生产区西彭

镇和陶家镇(29°20'N, 106°19'E), 属于中亚热带湿润季风气候, 年平均气温 19.2℃, 年平均降水量 1 204 mm, 无霜期 347 d。土壤类型以沙溪庙组发育的灰棕紫泥土和遂宁组发育的红棕紫泥土为主。地貌类型以丘陵、山地为主。供试花椒品种为当地主导品种‘九叶青’。

1.2 样品采集与测定方法

通过大量实地调查, 根据研究区域地貌特点、土壤类型以及农户花椒种植情况, 结合农户多年种植经验, 将研究区划分为高产区(产量>25 kg·株⁻¹)、中产区(产量为 15~25 kg·株⁻¹)、低产区(产量<15 kg·株⁻¹)。2017 年 3 月, 经过实地走访调查, 随机选择花椒种植连片、种植规模相当、花椒树龄、种植模式、田间管理基本一致的 30 户有代表性的农户作为采样点。用 GPS 记录该点的海拔, 同时测定坡度。采集的土壤为春季花期尚未施肥的基础土壤, 选择长势基本一致的 5 棵花椒树, 环绕每棵树采集距离树根 15~25 cm 处 0~20 cm 土层的土壤(不破坏花椒主根), 同时作采样标志。将采集的土壤样品混合, 在自然条件下风干、研磨, 过 0.25 mm 筛备用, 测定土壤理化性质。在选择这 30 个采样点的同时, 详细调查每个农户近几年花椒产量情况, 结合本次产量划分出高、中、低产量水平各 10 户。2017 年 8 月, 选择有采样标记的花椒树, 收获花椒, 除去茎、叶, 并测定花椒鲜重, 计算每棵花椒树的平均产量。

采集的土壤经风干、研磨、过筛后, 进行养分含量测定。测定方法 pH 采用玻璃电极法^[10], 有机质采用重铬酸钾容量法^[10], 碱解氮采用碱解扩散法^[10], 有效磷采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法^[10], 有效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法^[10], 阳离子交换量采用乙酸铵交换-原子吸收分光光度法^[10], 土壤交换性

酸采用氯化钡-三乙醇胺法^[10], 土壤有效钙、有效镁采用 KCl 浸提-原子吸收分光光度法^[10], 有效铁、有效锰、有效铜、有效锌采用 DTPA 浸提-原子吸收分光光度法^[10], 土壤水溶性硼采用姜黄素比色法^[10]。

1.3 数据处理

所有数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 20.0 统计软件进行分析, 采用描述性统计分析, ANOVA 方差分析, LSD 法进行多重比较, Pearson 相关分析法、通径分析法和逐步回归分析法。

2 结果与分析

2.1 不同产区的花椒产量水平状况

由表 1 可以看出, 不同产区的花椒产量差异达显著水平($P < 0.05$); 不同产区产量变幅为中产区 \approx 高产区 $>$ 低产区。从变异系数来看, 3 个产区均属中等变异, 变异系数最大的为中产区, 其次为低产区, 高产区最小, 表明花椒高产区产量整齐度优于中低产区。

表 1 不同产区花椒产量水平

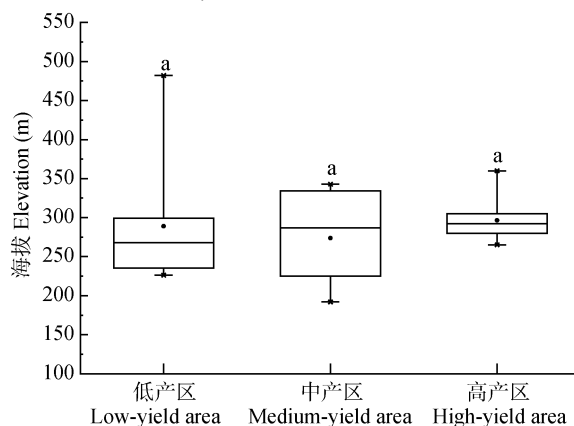
Table 1 Production levels of *Zanthoxylum bungeanum* in different yield areas

产区	Yield area	产量 Yield (kg·tree ⁻¹)	变幅 Range (kg·tree ⁻¹)	变异系数 CV (%)
低产区	Low-yield area	12.77 \pm 1.68c	9.84~14.73	13.1
中产区	Medium-yield area	19.97 \pm 2.74b	15.68~23.37	13.7
高产区	High-yield area	28.32 \pm 2.84a	25.51~33.12	10.1

产量表示为平均值 \pm 标准差, 同列不同小写字母表示不同产区间差异显著($P < 0.05$)。Yield was expressed as mean \pm S.D., and different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level among different yield areas.

2.2 花椒不同产区地形因子状况

由图 1 可以看出, 花椒不同产区海拔高度的变



化幅度为低产区 $>$ 中产区 $>$ 高产区, 低产区集中分布在海拔 240~300 m, 中产区集中分布在海拔 230~340 m, 高产区集中分布在海拔 290~320 m。不同产区之间的海拔差异不显著, 从 3 个产区海拔高度来看, 九龙坡花椒生产区的海拔普遍在 200~500 m, 而高产区主要集中于 300 m 左右的海拔高度。花椒不同产区地面坡度差异不大, 在 0°~15°均有分布, 且集中分布在 3°~14°, 其中低产区平均坡度为 7.7°, 中产区平均坡度为 8.6°, 高产区平均坡度为 10.4°(如箱图中黑点所示), 随着产量提高, 坡度略有增加, 但未达显著差异。

2.3 花椒不同产区土壤肥力特征

2.3.1 pH

由表 2 可见, 九龙坡花椒种植区土壤为酸性土, pH 均在 6.5 以下。其中 pH $<$ 5.5 的强酸性土占 66.7%, pH $<$ 4.5 的极强酸性土占 23.3%。从平均 pH 来看, 全产区的平均 pH 为 5.1, 各产区平均 pH 表现为高产区 $>$ 中产区 $>$ 低产区, 高产区与低产区之间差异显著, 中产区与低、高产区的 pH 差异不显著。3 个产区 pH 变化幅度为低产区 $>$ 中产区 $>$ 高产区。从变异系数来看, 高产区变异系数最大, 低产区次之, 中产区最小, 且均属中等变异。

2.3.2 有机质

土壤有机质在维持土壤肥力、土壤环境质量、作物产量上有着重要的作用^[11-12]。根据全国第 2 次土壤普查养分分级标准(下同), 九龙坡花椒种植区土壤有机质含量处于中低等水平(表 2), 其中 $<$ 10 g·kg⁻¹的土壤占 10%, 10~20 g·kg⁻¹的土壤占 43.3%, 20~30 g·kg⁻¹的土壤占 36.7%, $>$ 30 g·kg⁻¹的土壤占 10%。全产区有机质平均含量为 19.1 g·kg⁻¹, 各产区平均含量表现为中产区 $>$ 高产区 $>$ 低产区, 3 个产区之间差异不显著, 低产区有机质平均含量较低, 仅为 16.6 g·kg⁻¹,

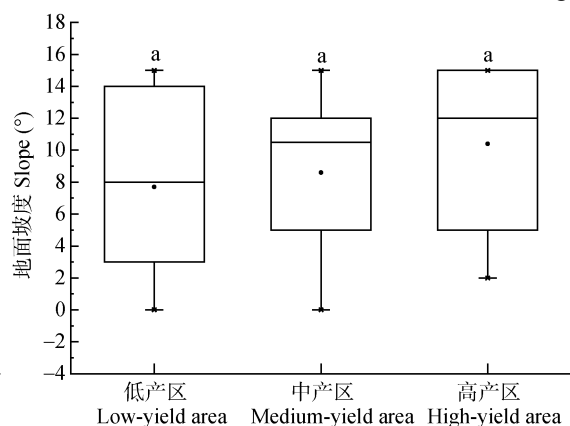


图 1 不同花椒产区海拔与坡度因子分布状况

Fig. 1 Distribution of elevation and slope factors in different *Zanthoxylum bungeanum* yield areas

不同字母表示不同产区间差异显著($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level among different yield areas.

表 2 花椒不同产区土壤肥力特征
Table 2 Characteristics of soil fertility in different yield areas of *Zanthoxylum bungeanum*

指标 Index	项目 Item	全产区 Entire region	低产区 Low-yield area	中产区 Medium-yield area	高产区 High-yield area
pH	平均值 Mean	5.1±0.7	4.8±0.7b	5.1±0.7ab	5.4±0.7a
	变幅 Range	4.0~6.4	4.0~6.1	4.4~6.4	4.4~6.3
	CV (%)	13.82	13.69	12.74	13.82
有机质 Organic matter	平均值 Mean (g·kg ⁻¹)	19.1±7.3	16.6±5.8a	20.6±9.2a	20.3±6.7a
	变幅 Range (g·kg ⁻¹)	8.7~36.9	8.7~25.3	10.2~36.9	8.7~30.7
	CV (%)	35.06	44.51	33.30	38.41
碱解氮 Available N	平均值 Mean (mg·kg ⁻¹)	114.9±47.5	129.7±49.6a	108.8±48.7a	106.2±45.5a
	变幅 Range (mg·kg ⁻¹)	43.2~215.0	75.0~213.9	43.2~187.4	60.1~215
	CV (%)	38.26	44.74	42.83	41.34
有效磷 Available P	平均值 Mean (mg·kg ⁻¹)	35.2±33.9	30.2±19.1a	34.2±39.4a	41.3±41.6a
	变幅 Range (mg·kg ⁻¹)	2.1~124.0	5.2~63.6	2.1~123.4	4.6~124.0
	CV (%)	63.09	115.36	100.71	96.43
速效钾 Available K	平均值 Mean (mg·kg ⁻¹)	107.0±75.8	89.8±56.8b	125.0±97.4a	106.2±71.6ab
	变幅 Range (mg·kg ⁻¹)	15~293	15~210	25~270	33~293
	CV (%)	63.22	77.96	67.43	70.88
有效钙 Available Ca	平均值 Mean (mg·kg ⁻¹)	3 289.8±1 536.5	2 486.0±1 562.4b	2 868.6±966.6b	4 515.0±1 284.2a
	变幅 Range (mg·kg ⁻¹)	605.1~6 282.5	605.1~4 619.6	1 809.4~4 499.4	1 931.3~6 282.5
	CV (%)	62.85	33.70	28.44	46.71
有效镁 Available Mg	平均值 Mean (mg·kg ⁻¹)	271.8±75.1	238.7±67.4b	265.7±94.2ab	311.1±42.2a
	变幅 Range (mg·kg ⁻¹)	127.5~435.5	127.5~326.5	167.3~435.5	241.1~366.9
	CV (%)	28.22	35.44	13.57	27.61
阳离子交换量 Cation exchange capacity	平均值 Mean [cmol(+)·kg ⁻¹]	27.2±7.9	22.7±7.5b	25.3±5.5b	33.6±6.5a
	变幅 Range [cmol(+)·kg ⁻¹]	13.0~42.4	13.0~32.8	14.8~31.0	20.9~42.4
	CV (%)	32.86	21.97	19.28	29.02
交换性酸 Exchange acidity	平均值 Mean [cmol(+)·kg ⁻¹]	8.1±3.2	8.25±3.6a	8.23±4.0a	7.8±2.2a
	变幅 Range [cmol(+)·kg ⁻¹]	1.52~13.71	1.52~13.30	3.05~13.70	4.57~11.10
	CV (%)	43.29	48.97	27.53	39.91
有效铁 Available Fe	平均值 Mean (mg·kg ⁻¹)	48.6±74.5	63.2±92.1a	61.1±82.5a	21.3±36.8b
	变幅 Range (mg·kg ⁻¹)	1.2~288.0	1.4~288.0	1.2~214.5	1.2~102.0
	CV (%)	145.67	134.85	172.95	153.41
有效锰 Available Mn	平均值 Mean (mg·kg ⁻¹)	62.1±34.1	43.6±25.3b	64.7±41.4ab	78.0±27.2a
	变幅 Range (mg·kg ⁻¹)	10.7~160.0	10.7~79.2	19.2~160.0	33.1~116.0
	CV (%)	57.90	63.87	34.81	54.94
有效铜 Available Cu	平均值 Mean (mg·kg ⁻¹)	1.5±1.2	1.9±1.7a	1.5±0.9a	1.1±0.7a
	变幅 Range (mg·kg ⁻¹)	0.21~6.06	0.21~6.06	0.42~2.94	0.23~1.96
	CV (%)	90.20	61.08	61.58	79.70
有效锌 Available Zn	平均值 Mean (mg·kg ⁻¹)	4.5±3.1	3.5±2.1a	5.4±4.6a	4.5±1.5a
	变幅 Range (mg·kg ⁻¹)	0.10~15.54	0.10~6.24	0.33~15.54	1.67~6.85
	CV (%)	59.79	85.76	33.59	68.61
水溶性硼 Water soluble B	平均值 Mean (mg·kg ⁻¹)	0.28±0.12	0.23±0.10b	0.28±0.10ab	0.35±0.13 a
	变幅 Range (mg·kg ⁻¹)	0.09~0.64	0.09~0.36	0.13~0.47	0.17~0.64
	CV (%)	44.46	38.42	38.49	42.82

同行不同小写字母表示不同产区间差异显著($P < 0.05$)。Different lowercase letters in the same line indicate significant differences at 0.05 level among different yield areas.

表明花椒低产地区应适当增加有机肥的施用。不同产区有机质含量变化幅度为中产区>高产区>低产区;从变异系数来看,低产区变异系数最大,高产区次之,中产区最小,且均属中等变异。

2.3.3 大量元素

九龙坡花椒产区大量元素含量水平变幅较大(表 2)。其中碱解氮缺乏的土壤($<90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)占 36.7%,碱解氮适中的土壤($90\sim 120 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)占 23.3%,碱解氮丰富的土壤($>120 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)占 40.0%。全产区碱解氮平均含量为 $114.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从不同产区看,碱解氮平均含量为低产区>中产区>高产区,但各产区之间碱解氮含量未达显著差异。不同产区碱解氮变化幅度为高产区>中产区>低产区,变异系数为低产区>中产区>高产区,且均属于中等变异。由此可见,九龙坡花椒种植区土壤碱解氮缺乏的地区应注意氮肥的施用,而碱解氮含量丰富的区域应该注意氮肥减量施用。

九龙坡花椒种植区有效磷平均含量属于丰富水平,但变幅很大,变异系数属于强变异。有效磷极度缺乏的区域($<5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)占 10.0%,有效磷缺乏的区域($5\sim 10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)占 16.7%,有效磷适中的区域($10\sim 20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)占 20.0%,有效磷含量丰富的区域($>20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)占 53.3%。从不同产区看,有效磷平均含量为高产区最大,中产区次之,低产区最小,但各产区之间差异不显著。3 个产区有效磷含量变化幅度为中产区>高产区>低产区,且变异系数均属于强变异。

花椒种植区速效钾平均含量属于适中水平,但变幅较大,其中约 20%的土壤速效钾含量属于极缺乏水平($<50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),36.7%的土壤速效钾属缺乏水平,23.3%的土壤速效钾含量适中,土壤速效钾丰富的土壤约占 20%。从不同产区来看,速效钾平均含量为中产区>高产区>低产区,中产区与低产区之间差异显著,而高产区与中、低产区之间差异均不显著。不同产区变幅为高产区>中产区>低产区,从变异系数看,3 个产区均属强变异。可见,在速效钾平均含量缺乏的低产区,应注重钾肥的合理施用。

九龙坡花椒种植区土壤有效钙平均含量属于丰富水平,其中,有效钙含量丰富的土壤($>1200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)约占 90%,变异系数属强变异。从不同产区看,土壤有效钙平均含量为高产区>中产区>低产区,高产区与中、低产区之间差异显著,中、低产区之间差异不显著。3 个产区的平均有效钙含量均属丰富水平,变幅为高产区>低产区>中产区;变异系数

高产区>低产区>中产区,且均属于中等变异。由此可见,九龙坡花椒种植区土壤有效钙含量丰富,可以满足作物对钙的需求。

花椒种植区土壤有效镁平均含量属丰富水平,有效镁含量丰富的土壤($>180 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)占 90%,变异系数为中等变异。从不同产区看,从高产区到低产区土壤有效镁平均含量呈逐步降低趋势,且高产区与低产区之间差异显著,而中产区与其他两个产区差异均不显著。不同产区的有效镁含量变幅为中产区>低产区>高产区;3 个产区的变异系数均属中等变异。可见,花椒种植区土壤有效镁含量丰富,可满足作物对镁的需求。

2.3.4 土壤交换性能

土壤阳离子交换量(CEC)是土壤的基本特性和重要肥力因素之一,它反映了土壤保蓄、供应和缓冲阳离子养分的能力^[13]。九龙坡花椒种植区土壤平均 CEC 处于高水平范围,CEC $>20 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 80%,变异系数为中等变异(表 2)。从不同产区来看,从高产区到低产区土壤的 CEC 呈逐渐降低趋势,其中高产区与中、低产区差异显著,中、低产区之间差异不显著。土壤 CEC 变幅为高产区>低产区>中产区;从变异系数看,高产区最大,其次为低产区,中产区最小。可见,花椒种植区 CEC 处于高水平,土壤的保肥能力较好,但中低产区中有一部分土壤 CEC 较低,这一部分土壤应该注重优化施肥,防止土壤酸化现象加重。

土壤交换性酸主要由土壤胶体吸附的 H^+ 和 Al^{3+} 构成^[14],花椒种植区平均土壤交换性酸总量为 $8.1 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$,从全产区来看, $<5 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 16.7%, $5\sim 10 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 56.6%, $>10 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 26.7%;交换性酸变化幅度为 1.52~13.71,变异系数为中等变异。从不同产区看,交换性酸总量低产区>中产区>高产区,3 个产区之间差异均不显著;变幅最大的是低产区,中产区次之,最小的是高产区。变异系数低产区>高产区>中产区,且均为中等变异。由此可见,花椒种植区土壤交换性酸总量为适中水平,土壤交换性酸与 pH 之间存在极显著负相关关系,在 pH 较强的强酸性土壤,交换性酸由交换铝主导, Al^{3+} 对作物根系有毒害作用,因此,在这一部分区域应该注重土壤的酸性改良,提高土壤 pH。

2.3.5 微量元素

九龙坡花椒种植区有效铁平均含量丰富,变幅很大,属强变异(表 2)。从有效铁分布频率来看, >10

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 46.7%, $4.5\sim 10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 16.6%, $<4.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 36.6%。土壤有效铁平均含量以低产区最高, 中产区次之, 高产区最低, 其中高产区与中、低产区之间差异均显著, 中、低产区之间差异不显著。3 个产区变幅顺序为低产区>中产区>高产区, 且变异系数均属于强变异。可见, 中低产区的土壤有效铁含量极其丰富。

花椒种植区有效锰平均含量丰富, 变异系数属强变异, 从分布频率看, $>30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 83.3%, $15\sim 30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 10.0%, $<15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 6.7%。土壤有效锰平均含量以高产区最高, 中产区次之, 低产区最低, 其中高、低产区之间差异显著, 中产区与高、低产区差异均不显著。3 个产区有效锰含量变异幅度中产区>高产区>低产区, 中产区变异系数属中等变异, 高、低产区变异系数均属强变异。

九龙坡花椒种植区有效铜平均含量属于较丰富水平, 变幅较大, 变异系数属强变异。从分布频率来看, $<1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 43.3%, $1.0\sim 2.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 33.4%, $>2.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 23.3%。3 个产区有效铜平均含量以低产区最高, 中产区次之, 高产区最低, 3 个产区之间差异均不显著; 其变化幅度低产区>中产区>高产区, 从变异系数看, 均属于强变异。

九龙坡花椒种植区有效锌平均含量为 $4.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 属于含量丰富范围, 变异系数属强变异。从有效锌分布频率来看, $>3.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占全区的 66.7%, $1.0\sim 3.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 26.6%, $<1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 6.7%。土壤有效锌平均含量最高的是中产区, 高产区次之, 低产区最低, 3 个产区之间差异不显著。土壤有效锌变幅中产区>低产区>高产区; 中产区的变异系数属中等变异, 低、高产区为强变异。

花椒种植区水溶性硼平均含量属于缺乏水平, 变异系数为中等变异。从分布频率来看, $<0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 56.7%, $0.3\sim 0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 40.0%, $0.5\sim 1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤占 3.3%。土壤水溶性硼平均含量从低产区到高产区呈逐渐升高趋势, 高产区与低产区之间差异显著, 而中产区与其他两个产区均差异不显著。土壤水溶性硼变幅高产区>中产区>低产区, 3 个产区的变异系数均属强变异。可见, 九龙坡区土壤水溶性硼含量缺乏, 施肥时应注意硼肥的施用。

2.4 地形因子和土壤肥力对花椒产量的影响

2.4.1 地形因子、土壤肥力因子间及其与产量的相关分析

由表 3 可知, 花椒产量与土壤有效钙和阳离子

交换量(CEC)呈极显著正相关, 与 pH、有效锰和水溶性硼呈显著正相关。海拔、坡度因子与花椒产量及其他土壤肥力因子的相关性均不显著。从土壤肥力因子间相互关系来看, 土壤 pH 与土壤有效钙、有效镁、有效锰呈显著正相关, 而与交换性酸、有效铁、有效铜呈显著负相关; 土壤有机质与速效钾、有效锌呈显著正相关; 土壤速效钾与有效锌呈显著正相关, 而与有效铁、有效铜呈显著负相关; 土壤有效钙与有效镁、阳离子交换量、有效锰呈显著正相关, 而与有效铁、有效铜呈显著负相关; 土壤有效镁与阳离子交换量、有效锰呈显著正相关; 土壤阳离子交换量与有效锰呈显著正相关, 而与有效铁呈显著负相关; 土壤交换性酸与有效锌呈显著正相关; 土壤有效铁与有效铜呈显著正相关。可见, 地形因子与产量及其他因子相关性不大, 可以先行排除; 而各土壤肥力因子之间存在着错综复杂的关系, 各因子相互影响、相互制约, 且通过彼此间的相互作用间接对花椒产量造成影响。因此, 不能简单地看产量与各因子的相关性, 忽视各因子间的相互作用。

2.4.2 土壤肥力与花椒产量的通径分析

为进一步了解土壤肥力因子对花椒产量的影响, 以花椒产量(Y)为因变量, 各土壤肥力因子(X_i)为自变量, 利用通径分析^[15], 将各因子(X_i)与产量(Y)间的相关系数(r_{iy})分解为直接作用和间接作用, 计算每个因子对产量(Y)的直接通径系数(b_i)和间接通径系数($r_{ij}b_j$), 评估每个因子对花椒产量的作用及因子间的相互影响(表 4)。从直接通径系数看, 各土壤肥力因子对花椒产量的直接作用有效钙>CEC>交换性酸>有效铜>有效铁>有效锌>速效钾>有效磷>有效镁>有效锰>pH>水溶性硼>有机质>碱解氮。表明在九龙坡花椒种植区各土壤肥力因子中, 有效钙、CEC、交换性酸、有效铜、有效铁、有效锌是影响产量的主要因子。其中有效钙、交换性酸、有效铁、有效锌对花椒产量的直接作用为正, CEC、有效铜对花椒产量直接作用为负。有效钙的直接作用最大, 对产量的影响也最显著。但从间接通径系数来看, 有效钙通过其他因子间接作用于花椒产量时, 其间接通径系数大多为负, 表明在各因子的相互作用中, 有效钙对产量的效应有一部分被抑制了, 其中 CEC、交换性酸、有效铁、有效锰对有效钙抑制作用最强烈, 这可能是因为该研究区土壤有效钙含量过于丰富, 从而导致部分有效钙的效果没有发挥作用, 造成钙

表 3 花椒产量与地形因子、土壤肥力因子的相关矩阵(*r* 值)

Table 3 Correlation matrix (*r* value) of *Zanthoxylum bungeanum* yield and topographic and soil fertility factors

	Ele	Slo	pH	OM	AN	AP	AK	ACa	AMg	CEC	EA	AFe	AMn	ACu	AZn	WB
Y	0.090	0.187	0.403*	0.145	-0.142	0.065	0.002	0.587**	0.346	0.570**	-0.140	-0.211	0.390*	-0.309	0.019	0.388*
Ele		-0.040	0.079	0.176	-0.196	0.186	-0.282	-0.080	-0.099	-0.021	0.194	0.006	0.027	-0.041	-0.047	0.330
Slo			0.220	0.113	0.055	0.121	0.330	0.356	0.111	0.304	-0.174	-0.079	0.226	-0.221	0.272	0.265
pH				0.052	0.047	-0.100	0.189	0.543**	0.442*	0.332	-0.616**	-0.378*	0.381*	-0.524**	-0.090	0.235
OM					0.931**	0.330	0.406*	0.097	-0.086	0.180	0.194	-0.014	0.189	0.060	0.638**	0.144
AN						-0.306	-0.315	-0.043	0.130	-0.139	-0.252	-0.014	-0.199	-0.162	-0.537**	-0.156
AP							0.433*	0.199	-0.294	0.350	0.411*	-0.319	0.059	-0.243	0.201	0.054
AK								0.268	0.050	0.288	0.003	-0.385*	0.170	-0.404*	0.526**	0.147
ACa									0.636**	0.912**	-0.360	-0.438*	0.708**	-0.391*	-0.088	0.309
AMg										0.613**	-0.286	-0.306	0.597**	-0.324	0.007	0.276
CEC											0.046	-0.449*	0.782**	-0.339	0.109	0.323
EA												0.076	0.021	0.233	0.415*	-0.052
AFe													-0.347	0.786**	-0.110	-0.268
AMn														-0.312	0.066	0.157
ACu															-0.013	-0.139
AZn																0.268

Y: 产量; Ele: 海拔; Slo: 坡度; OM: 有机质; AN: 碱解氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾; ACa: 有效钙; AMg: 有效镁; CEC: 阳离子交换量; EA: 交换性酸; AFe: 有效铁; AMn: 有效锰; ACu: 有效铜; AZn: 有效锌; WB: 水溶性硼。*表示在 0.05 水平上显著相关($P < 0.05$); **表示在 0.01 水平上显著相关($P < 0.01$)。Y: yield; Ele: elevation; Slo: slope; OM: organic matter; AN: alkali-hydrolysis nitrogen; AP: available phosphorus; AK: available potassium; ACa: available calcium; AMg: available magnesium; CEC: cation exchange capacity; EA: exchangeable acid; AFe: effective iron; AMn: effective manganese; ACu: effective copper; AZn: effective zinc; WB: water-soluble boron. * indicates a significant correlation at 0.05 level; ** indicates a significant correlation at 0.01 level.

表 4 土壤肥力因子对花椒产量(Y)的通路系数

Table 4 Path coefficients of soil fertility factors to *Zanthoxylum bungeanum* yield (Y)

因子 Factor	直接通路系数 Direct path coefficient	间接通路系数 Indirect path coefficient														合计 Total
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	
X ₁	0.215		-0.007	0.005	0.030	-0.067	1.642	-0.123	-0.609	-0.751	-0.166	-0.084	0.305	-0.035	0.049	0.188
X ₂	-0.140	0.011		0.097	-0.100	-0.145	0.293	0.024	-0.330	0.236	-0.006	-0.042	-0.035	0.251	0.030	0.285
X ₃	0.104	0.010	-0.130		0.093	0.112	-0.130	-0.036	0.255	-0.307	-0.006	0.044	0.094	-0.211	-0.032	-0.246
X ₄	-0.303	-0.021	-0.046	-0.032		-0.154	0.602	0.082	-0.642	0.501	-0.140	-0.013	0.141	0.079	0.011	0.368
X ₅	-0.356	0.041	-0.057	-0.033	-0.131		0.811	-0.014	-0.528	0.004	-0.169	-0.037	0.235	0.207	0.030	0.358
X ₆	3.024	0.117	-0.014	-0.004	-0.060	-0.095		-0.177	-1.673	-0.439	-0.192	-0.156	0.228	-0.035	0.064	-2.437
X ₇	-0.279	0.095	0.012	0.013	0.089	-0.018	1.924		-1.124	-0.349	-0.134	-0.131	0.189	0.003	0.057	0.625
X ₈	-1.834	0.071	-0.025	-0.014	-0.106	-0.103	2.758	-0.171		0.056	-0.197	-0.172	0.197	0.043	0.067	2.404
X ₉	1.219	-0.132	-0.027	-0.026	-0.125	-0.001	-1.089	0.080	-0.084		0.033	-0.005	-0.136	0.163	-0.011	-1.359
X ₁₀	0.439	-0.081	0.002	-0.001	0.097	0.137	-1.325	0.085	0.824	0.093		0.076	-0.458	-0.043	-0.055	-0.650
X ₁₁	-0.220	0.082	-0.026	-0.021	-0.018	-0.061	2.141	-0.167	-1.434	0.026	-0.152		0.182	0.026	0.032	0.610
X ₁₂	-0.582	-0.113	-0.008	-0.017	0.074	0.144	-1.183	0.090	0.622	0.284	0.345	0.069		-0.005	-0.029	0.273
X ₁₃	0.394	-0.019	-0.089	-0.056	-0.061	-0.187	-0.266	-0.002	-0.200	0.506	-0.048	-0.015	0.008		0.055	-0.375
X ₁₄	0.207	0.050	-0.020	-0.016	-0.016	-0.052	0.935	-0.077	-0.593	-0.063	-0.118	-0.035	0.081	0.106		0.181

X₁: pH; X₂: 有机质; X₃: 碱解氮; X₄: 有效磷; X₅: 速效钾; X₆: 有效钙; X₇: 有效镁; X₈: 阳离子交换量; X₉: 交换性酸; X₁₀: 有效铁; X₁₁: 有效锰; X₁₂: 有效铜; X₁₃: 有效锌; X₁₄: 水溶性硼。X₁: pH; X₂: organic matter; X₃: alkali-hydrolysis nitrogen; X₄: available phosphorus; X₅: available potassium; X₆: available calcium; X₇: available magnesium; X₈: cation exchange capacity; X₉: exchangeable acid; X₁₀: available iron; X₁₁: available manganese; X₁₂: available copper; X₁₃: available zinc; X₁₄: water soluble boron.

素的浪费; 同时, 有效钙的直接通路系数大于其间接通路系数之和, 表明有效钙的作用是通过直接作用来体现。另一方面, pH、有效磷、速效钾、有效镁、

CEC、有效锰、水溶性硼通过有效钙间接作用于花椒产量时, 使得这些因子的效应得到增强。CEC 对产量的直接通路系数为负, 但相关分析表明, CEC

与产量之间有显著的正相关关系,原因是当CEC通过pH、有效钙、交换性酸、有效铜、有效锌、水溶性硼间接作用于产量时,CEC对产量的作用得到增强,且间接途径系数之和大于直接途径系数,说明CEC对产量的影响主要由间接作用体现。由此可见,各土壤肥力因子之间的相互关系复杂,施肥时应注重优化施肥,改善土壤理化性状,调节各元素之间的平衡。

2.4.3 土壤肥力因子与花椒产量的逐步回归分析

为进一步明确土壤肥力因子与花椒产量的数量

关系,在相关分析和通径分析的基础上,利用逐步回归分析方法,剔除不显著变量,建立了有效钙(X_6)与花椒产量(Y)的最优回归方程: $Y=11.693+0.003X_6$ (表5、表6);经检验, $R^2=0.344$, $F=14.712$, $P<0.01$,回归方程达极显著水平;回归方程系数经检验也达到显著水平,说明回归方程具有统计学意义。表明在九龙坡花椒种植区,土壤有效钙含量与花椒产量有显著正效应,可以根据土壤有效钙含量预测花椒产量水平。

表 5 花椒产量与土壤有效钙的逐步回归分析模型汇总

Table 5 Summary of stepwise regression analysis model of *Zanthoxylum bungeanum* yield and soil available calcium

模型 Model	R	R ²	调整 R ² Adjust R ²	标准估计误差 Standard estimate error
1	0.587 ^a	0.344	0.321	5.677 91

表 6 花椒产量与土壤有效钙的逐步回归方程系数及检验

Table 6 Coefficients and test of stepwise regression equation of *Zanthoxylum bungeanum* yield and soil available calcium

模型 Model	非标准系数 Unstandardized coefficient		标准系数试用版		t	Sig.
	Beta in	标准误差 Standard Error	Standard coefficient of trial version			
1	常量 Constant	11.693	2.484		4.707	0
	X_6	0.003	0.001	0.587	3.836	0.001

a: 预测变量(常量); X_6 : 有效钙。a: predictor (constant); X_6 : available calcium.

3 讨论

地形的差异往往导致土壤养分的空间变异^[16-17],独特地形条件产生的“小气候”对作物生长也有影响^[18]。本研究中,花椒种植区普遍处于200~500 m海拔范围内,且高产区的海拔集中分布于300 m左右。相关分析表明,海拔因子与土壤肥力、花椒产量的相关性不显著,这可能是九龙坡花椒种植区地貌类型为丘陵山地,海拔差异不大。相关分析表明,坡度因子与花椒产量关系更密切,从低产区到高产区,坡度逐渐增大,但未达显著差异。地形因子与土壤肥力因子的相关关系不显著,这可能是该研究区范围较小,且地形地貌类型差异不大的原因。

土壤养分主要由土壤pH、有机质、有效养分和交换性能构成,与作物产量具有显著的相关性^[19-23]。本研究中,花椒种植区土壤pH均<6.5,从低产区到高产区,pH逐渐增大;相关分析表明,土壤pH与花椒产量有显著相关关系。土壤pH能影响作物营养成分的吸收利用,适宜的pH能减少作物缺素症和不良元素的毒害作用^[24-25]。通径分析表明,适宜的土壤pH能增强有效钙对花椒产量的促进作用,同时抑制交换性酸、有效铜的不良作用。花椒更合适在pH较高的土壤上生长,在pH较低的花椒低产区,应注重有机肥和碱性肥料的施用。本研究中通径分析表明,

有机质对产量的间接途径系数之和大于直接途径系数,表明有机质主要通过间接作用影响产量;但九龙坡花椒种植区土壤有机质含量属中低量水平,特别是低产区,土壤有机质水平低下,因此应注意有机肥的施用,提高土壤理化性状。

土壤有效养分含量是土壤对作物养分供应能力的体现,是评价土壤肥力的重要标准^[26]。本研究中,九龙坡花椒不同产区养分丰缺情况不同,但总体来说高产区肥力水平最高,中产区次之,低产区最差。相关分析表明,土壤有效钙、有效锰、水溶性硼对花椒产量有极显著的正效应。钙能增强植物运输能力和光合效率,且能提高细胞壁的稳定性^[27-28]。通径分析表明,有效钙对花椒产量的直接作用最大,但丰富的钙离子富集于花椒根系,可能会使其他离子难以被根系吸收。锰是植物必需的微量营养元素,对光合作用、维持细胞器正常结构有重要作用^[29]。九龙坡花椒种植区锰含量丰富,能满足作物对锰的需求,从低产区到高产区锰含量逐渐升高。硼是作物必需的微量营养元素之一,硼在稳定细胞壁结构、维持细胞生命活动中有重要意义^[30]。花椒种植区土壤水溶性硼属缺乏水平,硼对花椒产量有显著的正效应,九龙坡花椒种植区硼含量缺乏,施肥时应该注意硼肥的施用。

九龙坡花椒CEC属于高水平范围,从低产区到

高产区 CEC 逐渐增加。相关分析表明, CEC 不仅与花椒产量存在显著正相关性, 且与有效钙、有效镁、有效铁、有效锰也存在显著相关性, 说明 CEC 在土壤中与多个土壤养分因子有相互作用, 关系错综复杂。通径分析表明, CEC 对产量的直接作用为负, 但 CEC 的直接通径系数小于间接通径系数之和, 因此, CEC 对产量的作用主要由间接作用体现。交换性酸含量高的土壤中铝、锰和重金属的活性较强, 容易导致作物缺素和元素毒害, 影响作物正常生长^[31-33]。本研究中, 从低产区到高产区土壤交换性酸含量逐渐下降; 交换性酸与 pH 存在极显著负相关关系, 酸度越高的土壤, 交换性酸含量越高; 且花椒产量与交换性酸也存在负相关效应, 通径分析进一步表明, 交换性酸通过其他因子对花椒产量产生作用时, 其间接通径系数为负, 且间接通径系数之和大于直接通径系数, 表明交换性酸以间接作用体现, 且对花椒产量的影响为负效应。说明在土壤酸化严重的地区, 应该注重施用碱性肥料, 如石灰、硅钙钾镁肥等, 调节土壤 pH, 防止土壤酸化程度进一步加深, 同时配施有机肥, 调理土壤理化性状, 改良土壤质量。

4 结论

九龙坡花椒种植区高产区海拔集中在 300 m 左右, 坡度随产量提高略有增加, 但未达显著水平; 总的来说, 地形因子对花椒产量影响不显著。九龙坡花椒种植区土壤均属酸性土, 土壤肥力属中高水平范围, 土壤变异幅度较大, 高产区土壤肥力最高, 中产区次之, 低产区最差。花椒产量与土壤 pH、有效钙、CEC、有效锰、水溶性硼有显著的正相关效应, 其中与有效钙的显著性最强。土壤肥力因子之间的相互作用复杂, 通径分析表明, 有效钙的直接作用最大, 但丰富的有效钙含量会减弱其他土壤肥力因子对花椒产量的作用, 逐步回归分析构建了有效钙与花椒产量的最优回归方程: $Y=11.693+0.003X_6$ 。综上所述, 九龙坡花椒种植区施肥应该注重土壤养分之间的平衡, 低产区应该注重土壤酸化的改良, 合理使用碱性肥料(如石灰、硅钙钾镁肥等), 配施有机肥, 调理土壤理化性状。

参考文献 References

[1] 侯丽秀, 魏安智, 王丽华, 等. 花椒转录组 SSR 信息分析及其分子标记开发[J]. 农业生物技术学报, 2018, 26(7): 1226-1236
HOU L X, WEI A Z, WANG L H, et al. Analysis of SSR loci and development of molecular markers in *Zanthoxylum bungeanum* transcriptome[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2018, 26(7): 1226-1236

[2] 王景燕, 龚伟, 包秀兰, 等. 水肥耦合对汉源花椒幼苗叶片光合作用的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1321-1330
WANG J Y, GONG W, BAO X L, et al. Coupling effects of water and fertilizer on diurnal variation of photosynthesis of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim 'hanyuan' seedling leaf[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): 1321-1330

[3] 何腾兵, 刘元生, 李天智, 等. 贵州喀斯特峡谷水保经济植物花椒土壤特性研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 55-59
HE T B, LIU Y S, LI T Z, et al. Soil characteristics of *Zanthoxylum bungeanum* with soil and water conservation benefits in Karst valley of Guizhou Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(2): 55-59

[4] 王进闯, 潘开文, 吴宁, 等. 花椒农林复合生态系统的简化对某些相关因子的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(1): 36-39
WANG J C, PAN K W, WU N, et al. Effect of simplified agro-forest system of Sichuan pepper (*Zanthoxylum avicennia*) on some ecological factors[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2005, 11(1): 36-39

[5] 张立新, 耿增超, 张朝阳, 等. 韩城市花椒园土壤养分状况及施肥研究[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(4): 65-67
ZHANG L X, GENG Z C, ZHANG C Y, et al. Study on soil nutrient condition and fertilizer application in Chinese prickly ash orchard in Hancheng[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(4): 65-67

[6] 郑海峰, 赵新峰, 马岩. 地形和土壤属性对大豆产量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(6): 1348-1352
ZHENG H F, ZHAO X F, MA Y. Soybean yields related to topography and soil properties[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(6): 1348-1352

[7] 周国朋, 谢志坚, 曹卫东, 等. 稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 157-163
ZHOU G P, XIE Z J, CAO W D, et al. Co-incorporation of high rice stubble and Chinese milk vetch improving soil fertility and yield of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 157-163

[8] 于君宝, 刘景双, 王金达, 等. 典型黑土 pH 值变化对营养元素有效态含量的影响研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(5): 404-408
YU J B, LIU J S, WANG J D, et al. Effect of soil pH value on the effective content of nutrient elements in typical black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(5): 404-408

[9] LI J R, OKIN G S, ALVAREZ L, et al. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities[J]. Biogeochemistry, 2008, 88(1): 73-88

[10] 鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000
BAO S D. Soil Agrochemical Analysis[M]. Third Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000

[11] GONG W, YAN X Y, WANG J Y, et al. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools under a wheat-maize cropping system in North China Plain[J]. Plant and Soil, 2009, 314(1/2): 67-76

[12] 孟凡乔, 吴文良, 辛德惠. 高产农田土壤有机质、养分的变化规律与作物产量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 370-374
MENG F Q, WU W L, XIN D H. Changes of soil organic matter and nutrients and their relationship with crop yield in high yield farmland[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(4): 370-374

- [13] 范庆锋, 虞娜, 张玉玲, 等. 设施蔬菜栽培对土壤阳离子交换性能的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1132–1137
FAN Q F, YU N, ZHANG Y L, et al. Effects of vegetable cultivation on soil cation exchange capacity in greenhouse[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5): 1132–1137
- [14] 李忠意, 白颖艳, 程永毅, 等. 几种土壤交换性酸测定方法的效果比较[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1210–1215
LI Z Y, BAI Y Y, CHENG Y Y, et al. Comparison of soil exchangeable acidities by different measured methods[J]. *Soils*, 2017, 49(6): 1210–1215
- [15] Kozak M, Kang M S. Note on modern path analysis in application to crop science[J]. *Communications in Biometry and Crop Science*, 2006, 1(1): 32–34
- [16] 张晓光, 黄标, 张贝尔, 等. 盐渍化平原区玉米产量空间变异与地形关系研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 51–57
ZHANG X G, HUANG B, ZHANG B E, et al. Spatial variability of maize yield and relations to terrain attributes in salinized plain region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(11): 51–57
- [17] 雷斯越, 赵文慧, 杨亚辉, 等. 不同坡位植被生长状况与土壤养分空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 86–91
LEI S Y, ZHAO W H, YANG Y H, et al. Spatial distribution characteristics of soil nutrients and vegetation growth status in different slopes[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 86–91
- [18] 余玲, 王彦荣, 毛玉林, 等. 黄土高原地形对苜蓿种子产量和质量的影响[J]. 草业学报, 2002, 11(4): 62–67
YU L, WANG Y R, MAO Y L, et al. Effect of topography on seed yield and quality of alfalfa grown in the Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2002, 11(4): 62–67
- [19] 李春喜, 韩蕊, 邵云, 等. 黄淮海地区麦玉周年土壤肥力与玉米产量相关和通径分析[J]. 玉米科学, 2019, 27(3): 127–133
LI C X, HAN R, SHAO Y, et al. Correlation and path analysis between soil fertility and maize yield in wheat-maize rotation system of Huang-Huai-Hai region[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(3): 127–133
- [20] 彭卫福, 吕伟生, 黄山, 等. 土壤肥力对红壤性水稻土水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(18): 3614–3624
PENG W F, LYU W S, HUANG S, et al. Effects of soil fertility on rice yield and nitrogen use efficiency in a red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(18): 3614–3624
- [21] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 等. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(14): 2886–2894
ZENG X M, HAN B J, XU F S, et al. Effect of optimized fertilization on grain yield of rice and nitrogen use efficiency in paddy fields with different basic soil fertilities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(14): 2886–2894
- [22] 鲁艳红, 廖育林, 周兴, 等. 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 597–606
LU Y H, LIAO Y L, ZHOU X, et al. Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 597–606
- [23] 汤珧华, 潘建萍, 邹福生, 等. 上海松柏古树生长与土壤肥力因子的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1402–1408
TANG Y H, PAN J P, ZOU F S, et al. Relationship between soil fertility factors and growth of old pines and cypress in Shanghai[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, 23(5): 1402–1408
- [24] 张强, 魏钦平, 刘旭东, 等. 北京昌平苹果园土壤养分、pH与果实矿质营养的多元分析[J]. 果树学报, 2011, 28(3): 377–383
ZHANG Q, WEI Q P, LIU X D, et al. Multivariate analysis of relationship between soil nutrients, pH and fruit mineral nutrition in Fuji apple orchards of Changping, Beijing[J]. *Journal of Fruit Science*, 2011, 28(3): 377–383
- [25] MARTINSEN V, ALLING V, NURIDA N L, et al. pH effects of the addition of three biochars to acidic Indonesian mineral soils[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 61(5): 821–834
- [26] 王倩, 李军, 宁芳, 等. 渭北旱作麦田长期保护性耕作土壤肥力特征综合评价[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9): 2925–2934
WANG Q, LI J, NING F, et al. Comprehensive assessment of soil fertility characteristics under different long-term conservation tillages of wheat field in Weibei Highland, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(9): 2925–2934
- [27] 王飞, 何春梅, 李清华, 等. 外源钙水平与花生下针期不同土壤水分对植株生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 623–631
WANG F, HE C M, LI Q H, et al. Effects of exogenous calcium and soil moisture at acicula forming stage of peanut on some physiological characteristics of plants[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3): 623–631
- [28] 张大庚, 栗杰, 刘慧. 外源低分子量有机酸对土壤中钙素迁移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 152–155
ZHANG D G, LI J, LIU H. Effect of exogenous low molecular weight organic acids on calcium migration in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 152–155
- [29] 董珊珊, 李宁冉, 杨海燕, 等. 蓝莓根系对土壤锰胁迫的生理影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2019, 43(3): 169–173
DONG S S, LI N R, YANG H Y, et al. Physiological response of blueberry roots to Mn²⁺ stress in soil[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2019, 43(3): 169–173
- [30] 卢晓佩, 刘秀红, 董肖昌, 等. 南丰和衢州柑橘产区土壤及叶片硼含量状况分析[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(6): 61–65
LU X P, LIU X H, DONG X C, et al. Analyzing boron contents in soil and leaf of *Citrus* orchards in the Nanfeng and Quzhou[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2015, 34(6): 61–65
- [31] 冀建华, 李梨花, 刘秀梅, 等. 硅钙钾镁肥对南方稻田土壤酸度的改良作用[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 895–906
JI J H, LI X H, LIU X M, et al. Effect of Si-Ca-K-Mg fertilizer remedying acid paddy soil in South China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 895–906
- [32] Kirkham J M, Rowe B A, Doyle R B. Persistent improvements in the structure and hydraulic conductivity of a ferrosol due to liming[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(3): 218–223
- [33] SARNO, IJIMA M, LUMBANRAJA J, et al. Soil chemical properties of an Indonesian red acid soil as affected by land use and crop management[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 76(2): 115–124