强酸性土壤磷肥用量对莴笋产量、品质及磷素利用效率的影响^①

杨 东^{1,2}, 陈 益¹, 唐 静¹, 关灿东¹,
王正银¹, 郭 静², 周文超²

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 2. 江西省九江市农业局, 江西 九江 332000

摘要: 在两种不同供磷水平的强酸性菜园土壤上开展大田试验, 研究磷肥用量对莴笋产量、品质和磷素效率的影响。结果表明, 在施磷 P_2O_5 270 kg/hm² 的范围内, 低磷和中磷强酸性土壤莴笋产量随施磷量增加而明显增加 ($p < 0.01$, 下同), 增幅达 8.2%~28.1%, 但超过施磷 P_2O_5 135 kg/hm² 两种土壤莴笋产量增幅减小且边际产量大幅度降低。施磷 P_2O_5 显著提高 ($p < 0.05$, 下同) 两种土壤莴笋叶、茎氨基酸和莴笋叶维生素 C 质量分数。莴笋糖组分在两土壤上的影响以葡萄糖百分比变幅最大 (3.0%~121% 和 13.0%~115.0%), 而还原糖和果糖百分比随施磷量增加先增加后降低。莴笋硝酸盐质量分数在施用磷肥后显著降低 (叶片降幅为 7.3%~17.7% 和 23.4%~39.9%, 茎降幅达 9.2%~35.3% 和 8.7%~41.0%)。两土壤莴笋磷肥利用率、偏生产力 and 磷肥农学效率的影响均呈先升高后降低变化, 且以 P3 处理磷肥利用效率最高。综合莴笋产量、品质及磷素养分效率, 以 P3 处理 (135 kg P_2O_5 /hm²) 效应最佳, 可作为该地莴笋生产中磷肥的合理施用量。

关键词: 强酸性土壤; 磷肥; 莴笋; 产量; 磷素效率

中图分类号: S158.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)01-0158-07

酸性土壤是一类重要的土壤资源^[1-2]。全世界酸性土壤占耕地土壤的 40%^[3], 我国酸性土壤遍及 15 个省区, 总面积约 2.04×10^8 hm², 占全国耕地的 21%^[4]。随着我国乡镇城市化发展, 蔬菜栽培规模扩大和集约化种植, 酸性菜园土壤的比例增大^[5-7]。据统计, 重庆蔬菜基地面积约 1.47×10^4 hm², 其中 pH < 6.5 的土壤约占蔬菜用地总面积的 60%, pH < 5.5 的强酸性土壤几乎占 40%^[8]。在南方湿热气候条件下形成的强酸性菜园土壤缓冲性低, 土壤中钙、镁等营养元素大量淋失, 阳离子交换量 (CEC) 和盐基饱和度 (BS) 较低, 铁、铝质量分数较高, 施用水溶性磷肥会与铁、铝等金属离子发生反应, 被土壤吸附固定转化为闭蓄态磷, 大大降低磷素有效性, 影响蔬菜根系的吸收和利用, 降低产量和品质^[9-11]。蔬菜作物需肥量大且复种指数高, 为了弥补强酸性菜园土壤被吸附固定失效的磷肥和减少劳动力投入, 在重庆地区蔬菜生产中菜农乐于选择通用型复合肥 (氮磷钾养分 1:1:1), 施肥数量大^[12], 常此以往必然造成菜园土壤磷素富集, 增加对水环境污染的潜在风险^[13-14]。可见, 强酸性菜园土壤上磷肥的高效施用已日趋重要。

近年来, 国内有关施用磷肥对粮食作物的报道较多^[15-16], 而对于酸性土壤特别是强酸性菜园土壤蔬菜磷肥合理施用的研究甚少。为此, 选择重庆市 2 种强酸性菜园土壤 (低磷和中磷), 研究不同施磷水平对莴笋产量、品质和磷素吸收、利用效率的影响, 旨在为强酸性菜园土壤上蔬菜高产优质生产和合理利用磷肥资源提供理论依据。

① 收稿日期: 2015-01-29

基金项目: 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201203013-5); 国际植物营养研究所 (IPNI) 资助项目 (2012-Chongqing-02)。

作者简介: 杨 东 (1988-), 男, 甘肃庆阳人, 硕士, 主要从事植物营养与品质方面的研究。

通信作者: 王正银, 教授, 博士研究生导师。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试强酸性土壤分别系重庆市江津区吴滩镇郎家村蔬菜基地由侏罗纪沙溪庙组发育的灰棕紫泥和重庆市北碚区槽上镇玉凤村蔬菜基地由三叠纪嘉陵江石灰岩发育的黄壤,两基地均已种植蔬菜多年,其土壤有效磷和基本农化性状列于表 1. 按文献[17]分别将沙溪庙组灰棕紫泥作为低磷土壤,石灰岩黄壤作为中磷土壤. 供试莴笋品种为大白甲,系生产上广泛应用的高产品种. 供试肥料为尿素(N, 46%)、磷酸一铵(N, 11%; P₂O₅, 52%)、氯化钾(K₂O, 60%).

表 1 供试土壤基本农化性状

试验地点	pH	有机质/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	有效磷/(mg · kg ⁻¹)		速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
				Olsen 法	Black 法	
江津吴滩(低磷土壤)	4.56	18.4	96.0	40.9	42.6	155
北碚槽上(中磷土壤)	4.62	21.3	68.8	79.6	84.3	173

注:土壤有效磷相对较低的土壤为低磷土壤,较高者为中磷土壤,下同.

1.2 试验设计

试验设 6 个施磷(P₂O₅)水平,分别为 0,45,90,135,180,270 kg/hm²;各处理均施 N 300 kg/hm² 和 K₂O 150 kg/hm². 小区面积 10 m² (4.50 m × 2.22 m). 采用随机区组设计,3 次重复. 中磷和低磷土壤田间试验分别于 2012 年 3 月~5 月和 2012 年 9 月~11 月进行. 试验时在莴笋移栽前将磷肥和钾肥作为基肥一次性撒施入各小区,氮肥做追肥按返青期 30%、开盘期 30%、旺长期 40%施用. 试验期间田间管理措施与当地大田栽培相同. 收获时测定莴笋生物产量,同时取样测定可食部分硝酸盐、营养品质以及莴笋植株磷素养分.

1.3 测定内容和方 法

土壤 pH、碱解氮、有效磷(Olsen 法和 Black 法)、速效钾和有机质的测定采用常规方法^[18];莴笋叶和茎糖组分采用碘量法^[19],维生素 C 采用 2,6-二氯靛酚滴定法、游离氨基酸采用水合茚三酮显色分光光度法、硝酸盐采用紫外分光光度法测定,莴笋叶和茎全磷采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化、钼黄比色法测定^[18].

1.4 数据处 理

数据结果采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件进行统计分析^[20].

1.5 磷肥利用率计算

- 1) 莴笋吸磷量(kg/hm²) = 莴笋干样磷素含量 × (1 - 水分含量) × 莴笋产量
- 2) 磷肥偏生产力[PFP(kg/kg)] = 施磷处理莴笋产量 / 磷肥施用量
- 3) 磷肥农学效率[AE(kg/kg)] = (施磷处理作物产量 - 无磷处理作物产量) / 磷肥施用量
- 4) 磷肥利用率[RE(%)] = (施磷处理莴笋总吸磷量 - 无磷处理莴笋总吸磷量) / 磷肥施用量 × 100

2 结果与分 析

2.1 磷肥用量对莴笋产量的影响

在两种强酸性土壤上,随着磷肥施用量的增加,与不施磷处理(P₀)相比,莴笋产量明显增加,其中低磷土壤增产 8.2%~28.1%,中磷土壤增产 9.9%~25.8%,两土壤的增产序列均为 P₅>P₄>P₃>P₂>P₁ (表 2),莴笋边际产量随施磷量的增加均大幅降低,表现出增产效应一致性,且两种强酸性土壤上的莴笋产量、边际产量及变化趋势无明显差异. 莴笋产量随磷肥用量的增加而提高,但当施磷量超过 P₃(135 kg P₂O₅/hm²)时,再增施 1 个单位(P₄ 处理)和 3 个单位(P₅ 处理)的磷素养分,两土壤莴笋产量仅增加 4.4%~8.1%(表 2). 表明在供试低磷和中磷强酸性土壤上,莴笋对磷敏感,适量施用磷肥增产效应大,而在强酸性菜园土上,土壤中阳离子交换量较低,铁、铝质量分数较高,过量施用磷肥后会与其发生反应,被土壤固体吸附固定转化为闭蓄态磷,导致磷素有效性降低,因此莴笋产量增幅逐渐减小,造成磷素资源的浪费. 本试验中以 P₃ 处理为土壤的适宜施用量,即 135 kg P₂O₅/hm².

表 2 不同磷肥处理莴笋产量和边际产量

处理	低磷土壤			中磷土壤		
	产量/(kg·hm ⁻²)	增产率/%	边际产量	产量/(kg·hm ⁻²)	增产率/%	边际产量
P0	25 600±950De	100.0	—	25 900±416dC	100.0	—
P1	27 700±780cB	108.2	47.82	28 500±794cB	109.9	44.83
P2	29 800±760abB	116.3	37.45	29 700±400bB	114.5	34.67
P3	31 400±1 200abA	122.7	27.09	31 500±306aA	121.3	24.51
P4	32 200±1 280aA	125.8	16.72	32 200±208aA	124.4	14.36
P5	32 800±1 100aA	128.1	-4.018	32 600±153aA	125.8	-5.955

2.2 磷肥用量对莴笋品质的影响

2.2.1 维生素 C

人体需要的维生素 C 主要摄自蔬菜和水果, 因此维生素 C 是衡量蔬菜营养品质的重要指标^[21]. 低磷和中磷强酸性土壤施用磷肥分析结果均有统计学意义($p < 0.05$)增加莴笋叶维生素 C 质量分数, 增幅分别为 11.7%~28.0%和 6.2%~17.5%, 低磷土壤以 P5 处理增加作用最大, 而中磷土壤以 P3 处理最好(表 3). 施用磷肥使两种土壤的莴笋茎维生素 C 质量分数降低, 可能与莴笋叶维生素 C 质量分数大幅度提高有关(表 3), 莴笋茎和叶维生素 C 质量分数的相关分析具有统计学意义($r = -0.830^{**}$).

2.2.2 氨基酸

两种强酸性土壤施用磷肥均明显提高莴笋叶和茎氨基酸质量分数, 莴笋叶增幅为 11.7%~212.6%和 0.2%~45.3%, 且均以 P5 处理增加作用最大; 莴笋茎增幅为 5.4%~47.5%和 33.3%~80.4%; 莴笋茎氨基酸质量分数均明显高于叶, 但叶的增幅高于茎(表 3), 而低磷强酸性土壤上氨基酸质量分数普遍较低与中磷土壤, 可见土壤磷素水平直接影响到莴笋氨基酸的合成, 而且低磷土壤上莴笋在夏季种植, 生育期较短, 可能减少了氨基酸的合成与累积.

2.2.3 硝酸盐

蔬菜尤其是叶类蔬菜是一类高累积硝酸盐的植物^[22], 其质量分数高低是衡量蔬菜卫生品质的重要指标, 施肥是控制蔬菜硝酸盐质量分数的一个重要措施. 在低磷和中磷强酸性土壤上, 施用磷肥可以显著降低莴笋硝酸盐质量分数, 其中莴笋叶降幅为 7.3%~17.7%和 23.4%~39.9%, 茎降幅达 9.2%~35.3%和 8.7%~41.0%, 可使莴笋硝酸盐质量分数控制在国家无公害叶菜的限量标准 $\leq 3\ 000$ mg/kg. 低磷强酸性土壤以 P5 处理硝酸盐质量分数最低, 而中磷强酸性土壤则以 P4 处理降低作用最好, P5 处理次之(表 3). 可见, 强酸性土壤合理施用磷肥对控制莴笋硝酸盐质量分数具有重要作用. 施磷能显著降低莴笋硝酸盐质量分数, 是因为磷可以促进莴笋体内氮素的转移和同化^[10]; 而且磷素参与合成氨基酸, 提高了 tRNA 合成酶活化促进蛋白质的合成, 进一步促进了氮素的转移, 显著降低了硝酸盐质量分数^[11]. 中磷强酸性土壤上对照(P0)处理硝酸盐质量分数明显高于低磷强酸性土壤, 这是因为中磷强酸性土壤有效氮质量分数较低, 加之无磷肥施用, 氮、磷、钾养分不平衡, 从而导致硝酸盐质量分数较高. 可见养分不均衡会抑制硝酸盐在叶菜体内的转移和转化, 适当的养分比率对控制莴笋叶硝酸盐质量分数具有决定性作用.

2.3 磷肥用量对莴笋糖百分比及组分的影响

糖类是叶类蔬菜又一重要的营养指标. 在蔬菜中糖分质量分数明显影响蔬菜的口感(风味品质), 其中以葡萄糖、果糖和蔗糖对风味品质的影响最大. 两种强酸性土壤增施磷肥莴笋葡萄糖百分比变化最大, 增幅分别达 3.0%~121.0%, 13.0%~115.0%(表 4). 这可能与葡萄糖是植物光合作用原初产物, 而叶类蔬菜生长期短, 其收获期一般在营养生长期, 此时施肥对蔬菜的影响最易体现在葡萄糖百分比差异上^[3]. 施用磷肥后, 莴笋叶、茎葡萄糖百分比均有显著提高, 且中磷强酸性土壤莴笋葡萄糖百分比明显高于低磷强酸性土壤, 这与供试土壤的其他肥力因素(表 1)有关. 此外, 随着施磷量的增加莴笋还原糖和果糖百分比先增加后降低, 且以中磷土壤 P4 处理增加最为明显, 肥料施用量太大, 植株吸收磷素过多, 体内碳水化合物消耗过快, 盈余的可溶性糖转化为碳架, 导致高磷水平下可溶性糖百分比降低^[23]; 而蔗糖百分比明显降低, 可能是因为植物体内蔗糖磷酸合成酶和蔗糖合成酶活性增强, 促进了可溶性糖的合成及转移^[23]. 莴笋总糖百分比以叶片变化幅度小于茎. 低磷强酸性土壤的莴笋还原糖、果糖、葡萄糖、蔗糖和总糖百分比均低于中磷强酸性土壤. 此外, 产量明显增加所产生的稀释效应也是造成氨基酸和糖分质量分数有所降低的重要原因.

表 3 不同磷肥处理莴笋品质

mg · kg⁻¹

土壤类型	处理	维生素 C		氨基酸		硝酸盐	
		叶	茎	叶	茎	叶	茎
低磷土壤	P0	453±22d	101±6a	736±44e	3 772±226c	3 229±194a	3 251±195a
	P1	529±32b	89.5±5.5ab	822±49de	3 974±238bc	299±179ab	2 950±177ab
	P2	458±27d	67.7±4d	990±59d	4 415±265b	2 909±175ab	2 813±169b
	P3	478±29c	78.7±5bc	1 274±76c	5 562±334a	2 741±164b	2 210±133c
	P4	513b±31c	78.8±4.5bc	1 559±94b	4 454±267b	2 657±159bc	2 189±131c
	P5	580±35a	87.8±5b	2 301±138a	4 034±242bc	2 335±140c	2 103±126c
中磷土壤	P0	355±21c	206±12a	3 037±182b	2 713±163d	4 051±243a	3 710±223a
	P1	398±24ab	190±11ab	3 042±183b	3 616±217c	3 103±186b	3 386±203b
	P2	402±24ab	176±11b	3 045±183b	4 292±258b	2 903±174bc	2 987±179c
	P3	417±25a	188±11ab	3 067±184b	4 348±261ab	2 881±173bc	2 451±147d
	P4	413±25a	184±11ab	3 437±206b	4 893±294a	2 434±146cd	2 189±131d
	P5	377±23ab	175±10.5b	4 412±265a	4 427±266ab	2 548±153d	2 236±134d

表 4 不同磷肥用量对莴笋糖百分比及组分的影响

%

土壤类型	处理	还原糖		果糖		葡萄糖		蔗糖		总糖	
		叶	茎	叶	茎	叶	茎	叶	茎	叶	茎
低磷土壤	P0	1.27±0.08c	1.11±0.07b	0.92±0.06bc	0.97±0.06b	0.351±0.021b	0.140±0.008d	0.824±0.049a	2.41±0.14a	2.09±0.13a	2.11±0.13a
	P1	1.31±0.08bc	1.41±0.08a	0.94a±0.06bc	1.19±0.07ab	0.365±0.022b	0.226±0.014c	0.331±0.020b	1.88±0.11b	1.64±0.10c	2.07±0.12a
	P2	1.36±0.08bc	1.52±0.09a	0.99±0.06abc	1.28±0.08a	0.372±0.022b	0.242±0.015bc	0.293±0.018b	1.55±0.09c	1.66±0.10bc	2.00±0.12a
	P3	1.65±0.10a	1.67±0.10a	1.13±0.07a	1.42±0.09a	0.518±0.031a	0.251±0.015bc	0.197±0.012c	1.49±0.09cd	1.85±0.11ab	1.57±0.09b
	P4	1.58a±0.09b	1.69±0.10a	1.08±0.06ab	1.41±0.08a	0.505±0.030a	0.283±0.017ab	0.13±0.008cd	1.47±0.09d	1.71±0.10c	1.56±0.09b
	P5	1.37±0.08bc	1.66±0.10a	0.848±0.05c	1.35±0.08a	0.523±0.031a	0.315±0.019a	0.090±0.005d	1.40±0.08d	1.46±0.09c	1.48±0.09b
中磷土壤	P0	1.73±0.10b	2.24±0.13ab	1.14±0.07c	1.93±0.12a	0.594±0.036b	0.310±0.019c	0.500±0.030b	1.53±0.09a	2.23±0.13a	1.62±0.10a
	P1	1.85±0.11b	2.29±0.14a	1.23±0.07bc	1.82±0.11ab	0.620±0.037b	0.475±0.029b	0.845±0.051a	1.24±0.07b	2.70±0.16a	1.30±0.08b
	P2	2.07±0.12ab	1.52±0.09c	1.34±0.08abc	1.03±0.06c	0.727±0.044ab	0.491±0.029b	0.343±0.021c	1.30±0.08b	2.41±0.14a	1.37±0.08b
	P3	2.26±0.14a	2.15±0.13ab	1.47±0.09ab	1.54±0.09b	0.784±0.047a	0.619±0.037a	0.310±0.019c	0.95±0.06c	2.57±0.15a	1.00±0.06c
	P4	2.34±0.14a	2.25±0.14ab	1.52±0.09a	1.62±0.10b	0.828±0.050a	0.629±0.038a	0.162±0.010d	0.76c±0.05d	2.51±0.15a	0.80±0.05cd
	P5	2.12±0.13ab	1.87±0.11bc	1.28a±0.09bc	1.20±0.07c	0.834±0.050a	0.665±0.040a	0.388±0.023c	0.70±0.04d	2.51±0.15a	0.74±0.04d

2.4 磷肥用量对莴笋磷素吸收和利用效率的影响

磷肥施用明显提高莴笋磷素吸收量,且随着磷肥用量增加吸收量明显增大(表 5)。两种强酸性菜园土壤莴笋磷肥利用率、偏生产力、农学效率和生理效率均先升高后降低,均以 P3 处理(135 kg P₂O₅/hm²)为最高,其中低磷和中磷酸性土壤莴笋磷肥利用率分别为 6.18%和 7.85%。

表 5 不同磷肥处理莴笋磷素吸收和利用效率

土壤类型	处理	磷吸收量/ (kg · hm ⁻²)	利用效率/ %	偏生产力/ (kg · kg ⁻¹)	农学效率/ (kg · kg ⁻¹)	生理效率/ (kg · kg ⁻¹)
低磷土壤	P0	7.42	—	—	—	—
	P1	11.5	2.54	55.0	4.34	60.3
	P2	12.2	5.33	56.4	4.82	27.9
	P3	16.4	6.18	115	8.38	61.2
	P4	17.8	5.08	101	7.32	53.5
	P5	20.0	4.44	83.6	5.23	33.0
中磷土壤	P0	8.82	—	—	—	—
	P1	10.9	3.77	71.7	4.81	164
	P2	14.6	6.89	149	6.12	35.4
	P3	16.7	7.85	140	10.2	74.3
	P4	18.0	6.17	85.6	6.22	45.4
	P5	19.6	3.56	65.0	4.32	65.1

3 讨论

3.1 强酸性菜园土壤的磷肥效率

化肥利用效率是施肥增产效应的综合体现,施肥数量、作物种类和管理措施都会影响化肥利用效率的高低.一般农作物磷肥当季利用率为10%~25%.长期大量施用磷肥不仅使0~20 cm耕层土壤磷素大量积累,20~40 cm土层磷素均有不同程度的增加.为追求高经济利益,我国蔬菜生产普遍存在超量施用化肥,具有高投入、高产出、高度集约化和高复种指数等特点,蔬菜生产更多地依赖肥料的施用.在两种强酸性土壤上磷肥利用率、偏生产力、磷肥农学效率和磷肥生理效率均先增大后减小,且较低,这是因为一方面在强酸性土壤上,铁、铝、氧化铁和氧化铝质量分数高,土壤溶液中又含有质量分数较高的 H^+ ,黏粒矿物表面的 OH^- 被质子化,形成 OH_2^+ ,其吸附活性强,磷肥大量施入土壤后, OH_2^+ 对磷产生吸持作用,降低了磷的有效性^[3].另一方面,磷肥施入土壤后所形成的磷酸离子,可与土壤中的铁、铝发生离子反应,生成单独固相的磷酸铁铝化合物,生成物质量分数积常数相继增大,溶解度变小,进一步水解转化为磷酸盐如粉红磷铁矿和磷铝石,再转化为稳定的闭蓄态磷酸盐,导致磷素有效性大大降低^[3].此外,由于蔬菜生产具有较高的附加值,市郊以及广大农村的蔬菜种植面积发展迅速,同时人们为了获得更高的产量,肥料的投入量往往是蔬菜生产理论需肥量的数倍.为节省劳力,菜农普遍乐于大面积撒施化学磷肥,磷肥进入土壤后,被土壤中的金属离子沉淀或吸附固定后,移动距离较小,一般不超过1~3 cm,绝大部分在0.5 cm范围内,加之莴笋根系浅、根表面积较小且对磷素的需求适中,导致磷肥在强酸性菜园土壤上莴笋较低的磷肥利用效率.

磷肥在农业种植中的作用明显,适当施用磷肥可以增加产量,但过量施磷时农作物产量不会增加,甚至减产,这方面有许多报道^[24-25].两土壤上随着磷肥用量的增加,当磷肥用量达135 kg P_2O_5/hm^2 时,适宜的磷质量分数下,莴笋的生物量显著增加,莴笋增产达到极显著水平,磷肥利用率也最高,主要是因为磷肥用量由亏缺转为最适宜,氮磷钾比率趋于最佳所致.磷肥效应必须在氮钾肥平衡施用的基础上才能发挥出来,若磷肥用量过大,养分比率严重失衡,不仅不会增产,还会导致经济效益降低^[26].而且氮、磷之间的交互作用大,钾肥对氮、磷起辅助作用,可见氮磷钾配合施用有利于各类肥料肥效的充分发挥,提高产量^[27-28].因此,养分的平衡施用亦是强酸性菜园土壤莴笋高产优质的决定性因素.

3.2 强酸性菜园土壤磷素缺乏临界值

土壤的有效磷质量分数分级标准直接影响肥料用量、施肥方式和施肥时期,也是影响作物产量及养分利用效率的关键,是测土配方施肥的根基,因此,及时明确土壤有效磷分级标准对指导磷肥高效施用意义深远.对于不同供磷水平及不同土壤施用磷肥对作物的研究很多^[6, 10, 14],但几乎没有提及和明确土壤有效磷质量分数的分级标准,迄今仅章永松等提出过菜园土壤的有效磷分级标准,并指出菜园土壤磷素缺乏临界值 <60 mg/kg,适宜范围为60~90 mg/kg^[17].按照该标准,本试验中低磷强酸性土壤有效磷为40.9~42.6 mg/kg系缺磷土壤,而中磷强酸性菜园土壤有效磷为79.6~84.3 mg/kg也表现出施用磷肥的极大增产效应.供试两种强酸性土壤上莴笋产量无明显差异,磷肥利用率、偏生产力、磷肥农学效率和磷肥生理效率在两种酸性土壤上变化趋势类似,且磷肥利用率均以P3(135 kg P_2O_5/hm^2)最高(分别为6.18%和7.85%).莴笋品质效应的变化趋势亦无显著差异,但莴笋的产量及品质效应均略优于低磷强酸性土壤.可见,对于强酸性土壤有效磷在小于80 mg/kg时仍无法充分提供莴笋在整个生育期的磷素营养,仍然需要补充和有效磷缺乏土壤相近的磷肥用量来满足莴笋生长的需要.因此,对于强酸性菜园土壤有效磷在40~80 mg/kg范围应属于有效磷缺乏土壤,生产中应该注意增施磷肥以确保养分均衡、持久供应.有关强酸性土壤有效磷缺乏临界值的确定以及菜园土壤有效磷的分级标准,仅本研究结果是很不够的,尚需有更多的试验研究加以确认.

3.3 低磷强酸性菜园土壤磷肥的施用量

肥料用量和施肥时期是施肥技术的核心,也是影响磷肥利用率的重要因素.莴笋产量随磷肥用量的增加而提高,呈一定的正相关.本研究结果以P3处理(135 kg P_2O_5/hm^2)莴笋产量、品质及磷素养分效率均为最佳,可作为低磷强酸性菜园土壤莴笋磷肥的合理施用量.但在该地蔬菜生产中,菜农为节省劳力,采用

撒施化学磷肥的施肥方法,这势必造成磷肥施用量大而利用率大大降低,这与许多研究报道一致^[10, 23].在强酸性菜园土中,化学磷肥应当采用穴(或窝)施等相对集中施用的方法,尽量减少磷肥与土壤接触面积,增加植物根系直接吸收的区间,可以减少磷肥施用量.此外,在这类强酸性菜园土壤上提倡施用钙镁磷肥,可以配合施用有机肥以提高磷素有效性,促进作物对磷素的吸收利用.

4 结 论

在不同供磷水平(40~80 mg/kg)的强酸性菜园土壤施磷均能明显改善莴笋生长状况、促进莴笋对磷素等养分的吸收利用.在施磷 0~270 kg P₂O₅/hm² 的范围内,莴笋产量随磷肥用量的增加而提高,但超过 135 kg P₂O₅/hm² 增产率减小且边际产量大幅度降低.适量增加磷肥用量可以明显改善莴笋品质,提高莴笋维生素 C、氨基酸、葡萄糖、果糖、还原糖百分比,显著降低硝酸盐质量分数.磷肥利用率、偏生产力、磷肥农学效率和磷肥生理效率以施磷量 135 kg P₂O₅/hm² 为高.供试两种强酸性菜园土壤均属于缺磷土壤,以 P3 处理(135 kgP₂O₅/hm²)综合效应最佳.

参考文献:

- [1] PROCHNOW B L. Soil Acidity Evaluation and Management [J]. Better Crops, 2014, 98(1): 20-25.
- [2] 曾路生,高岩,李俊良,等.寿光大棚蔬菜地酸化与土壤养分变化关系研究[J].水土保持学报,2010,24(4): 157-161.
- [3] 廖红,严小龙.高级植物营养学[M].北京:科学出版社,2003.
- [4] 赵其国.中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M].北京:科学出版社,2002.
- [5] 张定煌,林森馨,卢维盛,等.中山市菜园土壤肥力的调查与评价[J].广东农业科学,2011,38(18): 44-46.
- [6] 李洁,谭珊珊,罗兰芳,等.不同施肥结构对红菜园土有机质、酸性和交换性能的影响[J].水土保持学报,2013,27(4): 258-262.
- [7] 梁金凤,贾小红,金强.北京市设施蔬菜施肥状况变化分析[J].中国蔬菜,2013,1(19): 18-22.
- [8] 胡小凤,李文一,王正银.缓释复合肥料对酸性菜园土壤微生物数量特征的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(8): 1594-1601.
- [9] 孙倩倩,王正银,赵欢,等.定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响[J].生态学报,2012,32(8): 2539-2549.
- [10] 李银水,鲁剑巍,廖星,等.磷肥用量对油菜产量及磷素利用率的影响[J].中国油料作物学报,2011,33(1): 52-56.
- [11] 张彦才,李若楠,王丽英,等.磷肥对日光温室番茄磷营养和产量及土壤酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(6): 1193-1199.
- [12] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant Acidification in Major Chinese Croplands [J]. Science, 2010, 327(19): 1008-1010.
- [13] 张风华,廖文华,刘建玲.连续过量施肥磷和有机肥的产量效应及环境风险评价[J].植物营养与肥料学报,2009,15(6): 1280-1287.
- [14] 李学平,石孝均,邹美玲.紫色土稻田磷素流失潜能及其水分管理研究[J].水土保持学报,2010,24(2): 160-164.
- [15] 张立花,张辉,黄玉芳,等.施磷对玉米吸磷量、产量和土壤磷含量的影响及其相关性[J].中国生态农业学报,2013,21(7): 801-809.
- [16] 孟晓瑜,王朝辉,杨宁,等.底墒和磷肥对渭北旱源冬小麦产量与水、肥利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(5): 1083-1090.
- [17] 王正银,胡尚钦,孙彭寿.作物营养与品质[M].中国农业科技出版社,1999.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2007.
- [19] [苏]X. H. 波钦诺克.植物生物化学分析方法[M].荆家海,丁种荣,译.北京:科学出版社,1976.
- [20] 白厚义.试验方法及统计分析[M].北京:中国林业出版社,2005.
- [21] 肖懿,唐家良,朱波,等.丘陵区紫色土不同土地利用方式下磷的吸附解吸特性[J].西南师范大学学报(自然科学版),2015,40(1): 58-64.
- [22] L'HIRONDEL J.硝酸盐与人类健康[M].梁国庆,李书田,译.北京:中国农业出版社,2005.
- [23] 陈钢,吴礼树,李煜华,等.不同供磷水平对西瓜产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(6):

1189-1192.

- [24] 刘建玲, 李仁岗, 廖文华, 等. 白菜-辣椒轮作中磷肥的产量效应及土壤磷积累研究 [J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1616-1620.
- [25] 李慧英, 朱永官. 不同磷锌施肥量对大麦产量及其吸收的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(4): 51-53.
- [26] 王激青. 我国主要粮食作物施肥增产效应和养分利用率的分析 and 评价 [D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- [27] 段玉, 妥德宝, 张君, 等. 氮磷钾平衡施用对油用向日葵产量及肥料效率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 767-771.
- [28] 李光庆, 谢祝捷, 姚雪琴. 花椰菜氮磷钾平衡施肥和阶段施氮效应函数的建立及在配方施肥中的应用 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(10): 2070-2080.

Effect of Phosphate Fertilizer on Yield, Quality and Efficiency of Phosphorus of Lettuce in Strong Acidic Soil

YANG Dong^{1,2}, CHEN Yi¹, TANG Jing¹, GUAN Can-dong¹,
WANG Zheng-yin¹, GUO Jing², ZHOU Wen-chao²

1. School of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400716, China;

2. Agricultural Bureau of Jiujiang, Jiujiang Jiangxi 332000, China

Abstract: Field experiments were conducted to study effects of phosphate fertilizer on yield, quality and efficiency of phosphorus of lettuce. Results indicated that yields of lettuce were increased (8.2%~28.1%) significantly in the acidic soils. Lettuce yield increases with the amount of fertilizer, when the amount of phosphorus over 135 kg P₂O₅/hm², the yield increased not significant. Phosphorus significantly increased lettuce amino and Vc in the leaves in two soils. Lettuce reducing sugar and fructose content showed an increasing trend after the first reduction. Lettuce nitrate content decreased significantly, which the leaf decreased from 0.3% to 212.6%, the stem decreased from 9.2% to 41.0%. The efficiency of phosphorus partial productivity and agronomic efficiency showed a change after the first increasing and then decreased and the maximum efficiency of agricultural fertilizer and phosphate fertilizer was P3 treatment. Considering the lettuce yield, quality and efficiency of phosphorus, the best treatment is P3 (135 kg P₂O₅/hm²) which can be applied as a reasonable amount of land lettuce production of phosphate fertilizer.

Key words: strong acidic soil; phosphate; lettuce; yield; efficiency of phosphorus

责任编辑 陈绍兰

实习编辑 包颖