

磷肥对日光温室番茄磷营养和产量 及土壤酶活性的影响

张彦才¹, 李若楠¹, 王丽英¹, 刘孟朝¹, 武雪萍^{2*}, 吴会军², 李银坤²

(1 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 河北石家庄 050051; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 采用盆栽方法进行了不同施磷 (P_2O_5) 水平下, 日光温室番茄产量、不同生育期番茄磷素分配、干物质积累、土壤速效磷含量和酶活性研究, 并确定了适宜番茄生长的最佳施磷量与土壤速效磷含量。结果表明, 随着磷肥施用量的增加, 土壤速效磷含量及番茄各组织含磷量相应增加; 当施用 P_2O_5 达到 0.53 g/kg (处理 5) 时, 土壤速效磷含量在 60~77 mg/kg 时, 较适宜番茄生长, 番茄产量和单果重达最高, 根系和茎叶干物质积累也达到最好水平。当施磷量超过 0.53 g/kg 时, 造成土壤和植株磷累积过高, 易引起土壤盐害, 降低土壤酶活性, 从而降低干物质积累和番茄产量, 影响土壤的可持续利用。

关键词: 磷肥; 番茄; 产量; 磷营养; 土壤酶活性

中图分类号: S641.23; S143.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2008)06-1193-07

Effect of phosphorus fertilization on tomato phosphorus nutrition, yield and soil enzyme activities

ZHANG Yan-cai¹, LI Ruo-nan¹, WANG Li-ying¹, LIU Meng-chao¹, WU Xue-ping^{2*}, WU Hui-jun², LI Yin-kun²

(1 Institute of Agro-Resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China;

2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Phosphorus (P) is one of the most important macronutrient elements for plant growth. High residual P in greenhouse soils was frequently found because P is relatively insoluble and has a long residence time in the soil. In order to find an optimal level of soil available phosphorus for tomato production, a pot experiment was conducted to investigate the effect of phosphorus (P_2O_5) on tomato yield, phosphorus partitioning in different organs of tomato, dry matter accumulation, soil available P and enzyme activities. The results showed that with the increase of P application rate, the content of available P in soil and P content in all organs of tomato significantly increased. The tomato yield, signal fruit weight and dry matter accumulation reached maximum when P_2O_5 were 0.53 g/kg. The optimal content of soil available P was 60-77 mg/kg for tomato production. Excessive P application (> 0.53 g/kg) caused a high accumulated P in soil and plant, resulting in the salt toxicity, low soil enzyme activities, declined dry matter and low tomato yield.

Key words: phosphate fertilizer; tomato; yield; phosphorus nutrition; enzyme activities of soil

番茄是需肥较大的蔬菜之一, 合理的氮、磷、钾养分供应对于提高番茄的产量和品质起着重要的作用^[1]。研究表明, 在温室黄瓜上增施磷肥可增加黄瓜产量、单株果实数和单果重, 提高品质; 而过量施磷则会影响番茄生长发育^[2-3]。吴建繁等^[4]对京郊保护地番茄的研究发现, 土壤有效磷含量超过 100

mg/kg, 磷肥基本无效, 且随施磷量增加, 产量有降低趋势。目前, 蔬菜生产上由于盲目地大量施用氮、磷、钾复合肥料, 造成土壤磷素富集, 严重影响了农田可持续利用。河北省大棚蔬菜普查结果^[5]表明, 磷素化肥平均施用量超过了需要量的 9.2~19.1 倍, 75% 大棚土壤速效磷含量超出适宜水平, 造成土

收稿日期: 2008-03-21

接受日期: 2008-06-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2007CB1109305); 河北省自然科学基金(C2006000758); 河北省科技支撑计划(07220901D)资助。

作者简介: 张彦才(1956—), 男, 河北武邑县人, 研究员, 从事植物营养与施肥技术研究。E-mail: zyc1956@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Tel: 010-82108665, E-mail: xpwu@caas.ac.cn

壤养分严重不平衡。有关番茄施肥的研究主要集中在氮、磷、钾肥配合施用对番茄产量和品质的影响,对不同磷水平条件下番茄产量、磷含量和土壤酶活性方面的研究较少。本研究针对目前生产上存在的施肥问题,采用盆栽试验探讨华北平原日光温室番茄最佳施磷水平和适宜的土壤速效磷含量,为提高日光温室番茄产量、合理施用磷肥、降低保护地土壤磷素积累提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在河北省农林科学院农业资源环境研究所日光温室进行。盆栽用土壤为轻壤质石灰性褐土,该土壤 pH 值为 7.8,有机质含量为 13.2 g/kg,全 N 为 0.61 g/kg、碱解 N 56.6 mg/kg、速效磷 (P_2O_5) 38.7 mg/kg、速效 K 104.5 mg/kg。供试番茄 (*Lycopersicon esculentum*) 品种为毛 T 5。

试验设 9 个施磷水平,即: P_2O_5 0、0.04、0.20、0.36、0.53、0.85、1.51、2.49 g/kg (分别用代号 1 至 8 表示)。每个处理 9 次重复,随机区组排列。整个生育期各处理施氮量均为 N 0.3 g/kg,施钾量均为 K_2O 0.3 g/kg。氮肥和钾肥按照基追比 1:2 施用,追肥分别在第一穗果膨大期和第二穗果膨大期进行;磷肥一次性底施。用过磷酸钙(含 P_2O_5 16.0%)、尿素(含 N 46.0%)、硫酸钾(K_2O 50.0%)作肥源。试验采用 40 cm × 25 cm 塑料盆,每盆装风干土 12 kg,装盆时将土与过磷酸钙和基施的尿素、硫酸钾 3 种肥料混匀。每盆栽种番茄幼苗 1 株。保持土壤水分含量在 16%~23%(称重法);温度 15~29℃。生长到开花期后,留 4 穗果后打顶。其他按常规管理。

1.2 采样和测定项目与方法

分别于苗期、开花期、结果初期(第一穗果结果期及第二果穗膨大期)、结果盛期(第二穗果结果期及第三穗果膨大期)和拉秧期取植株样,将其全株清洗干净后分为根、茎叶和果实 3 部分,105℃杀青 30 min,60~70℃烘干,测定干物重和 NPK 含量;在距番茄根茎 10 cm 处取土测定土壤电导率、土壤速效磷含量、脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性。

土壤速效磷含量采用钼锑钒比色法^[6]测定;土壤电导率采用 DDSJ-308A 型电导仪测定;植株全磷测定采用钒钼黄比色法^[6]。脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法^[7]测定,以 24 h 土壤质量中 NH_3-N 的毫克数表示;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法^[7]测定,以土壤消耗的 0.1 mol/L 高锰酸钾的

mL/g 量值表示;蔗糖酶活性采用二硝基水杨酸比色法^[7]测定,以 37℃ 下单位土壤质量 24 h 释放的葡萄糖毫克数表示。

数据分析采用 DPS 软件 3.01 版。

2 结果与分析

2.1 施磷对番茄产量的影响

不同磷肥施用水平对番茄产量的影响(表 1)看出,随着磷肥用量的增加,番茄单果重先增加后降低,以处理 5 (P_2O_5 0.53 g/kg)的单果重最高,为 83.46 g,比对照增重 27.33%。各处理番茄果数在 11.00~12.40 之间波动,处理 8 (P_2O_5 2.49 g/kg)的果数最多,达 12.40 个/株,与对照相比,差异达到显著水平。随着磷肥施用量的增加,番茄产量也以处理 5 番茄产量最高,比对照增产 41.22%。对处理 1 至处理 6 数据拟合,得施磷量与产量方程为: $y = 737.89 + 932.99x - 984.73x^2$, r 值为 0.8999,说明番茄产量和适宜的磷肥施用量之间具有极显著回归关系。利用模型求出最高产量施磷量为 0.474 g/kg,对应番茄产量为 958.88 g/株。

表 1 不同磷肥水平对番茄产量的影响

Table 1 The effects of phosphorus level on tomato yield

处理号 Treatment	单果重 Signal fruit wt (g)	果数 Fruit number (No./plant)	产量 Yield (g/plant)
1	65.51 cB	11.0 bA	721.0 cC
2	70.71 bcB	11.6 abA	820.2 bcBC
3	73.43 bB	11.6 abA	851.4 bBC
4	74.04 bAB	12.2 abA	902.4 abAB
5	83.42 aA	12.2 abA	1018.2 aA
6	71.68 bcB	11.2 abA	804.8 bcBC
7	67.60 bcB	12.2 abA	819.0 bcBC
8	64.89 cB	12.4 aA	804.6 bcBC

注:不同大、小写字母分别表示处理间差异达 1% 和 5% 显著水平,下同。

Note: Different capital and small letters mean significant among treatments at 1% and 5% levels, respectively. The same below.

2.2 施磷对番茄干物质积累与分配的影响

表 2 表明,随着番茄植株的生长,根、茎叶、果实干物质积累量随之增加。随着磷肥施用量的增加,苗期、开花期、结果初期、结果盛期和拉秧期根系干物质积累总体上呈现先升高后降低的趋势;根系干物质积累高峰主要在开花期至结果初期。苗期和开花期以处理 4 (P_2O_5 0.36 g/kg)根系干物质积累最多,

占到该生育期总干物重的 11.71% 和 9.52% ; 结果初期、结果盛期和拉秧期以处理 5 根系干物质积累最多, 分别占到该生育期总干物质积累的 4.65%、4.84% 和 5.21%。说明适量施用磷肥, 可以促进番茄根系的发育, 增加根干重, 过量施磷则不利于根系干物质的积累。

随着磷肥施用量的增加, 苗期、开花期、结果初期、结果盛期和拉秧期茎叶干物积累均呈现先升高后降低的趋势, 干物质积累高峰也主要出现在开花期至结果初期。在苗期和开花期处理 6 (P_2O_5 0.85 g/kg) 茎叶干物质积累最多; 结果初期和拉秧期为处理 5 积累最多, 分别占总干物质积累的 80.60% 和 65.83%; 结果盛期为处理 8 积累最多, 占总干物质积累的 80.08%。

结果初期、结果盛期和拉秧期番茄果实干物积累也随着磷肥施用量的增加呈先升后降趋势。果实干物质积累主要在结果盛期至拉秧期; 其中均以处

理 5 果实干物质积累最多; 对应 3 个时期, 分别占到总干物质积累的 14.76%、19.31% 和 28.96%。

2.3 施磷对番茄磷素养分吸收与分配的影响

各处理番茄全株磷素含量从苗期到拉秧期呈现先升高后降低的趋势, 以结果初期磷含量最高。随着磷肥施用量的增加, 各生育期番茄全株磷含量呈现不断增加的趋势。除苗期处理 8 略有下降外, 其余各生育期植株磷含量基本上都随磷肥施用量的增加而增加(图 1)。植株磷素含量与磷肥施用量呈极显著曲线相关, 对应各生育期的回归方程分别为:

$$y = 0.2334 + 0.4508x - 0.1388x^2;$$

$$y = 0.2156 + 0.5627x - 0.1546x^2;$$

$$y = 0.1597 + 0.3770x - 0.0679x^2;$$

$$y = 0.1691 + 0.2026x - 0.0154x^2;$$

$$y = 0.1468 + 0.1757x - 0.0024x^2;$$

r 值为 0.9721、0.9590、0.9813、0.9660 和 0.9957。

表 2 不同磷肥水平对番茄干物质积累与分配的影响(g/plant)

Table 2 The effects of phosphorus level on tomato dry matter accumulation and distribution

生育期 Growth Stage	器官 Organs	处理号 Treatments							
		1	2	3	4	5	6	7	8
苗期 SS	根 R	1.3	1.4	2.3	2.4	2.1	1.8	1.7	1.7
	茎叶 SL	8.0	10.0	17.0	18.0	17.9	20.0	17.0	19.0
	果实 F	—	—	—	—	—	—	—	—
开花期 FS	根 R	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	3.3	5.0	4.0
	茎叶 SL	39.0	45.0	49.0	57.0	50.4	61.0	49.0	52.0
	果实 F	—	—	—	—	—	—	—	—
结果初期 EHS	根 R	6.0	8.0	7.0	6.0	9.0	7.7	9.0	8.0
	茎叶 SL	105.0	112.0	118.0	144.0	156.0	153.0	144.0	140.0
	果实 F	18.5	22.5	26.2	27.1	28.6	20.2	17.8	19.7
结果盛期 MHS	根 R	7.0	9.0	8.0	10.0	11.0	7.7	9.0	11.0
	茎叶 SL	122.0	132.0	138.0	172.0	172.0	170.0	175.0	177.0
	果实 F	34.2	34.9	34.7	37.8	43.8	34.7	33.3	33.0
拉秧期 LHS	根 R	7.6 eD	9.7 dCD	10.3 cdBC	12.3 bAB	14.7 aA	12.1 bcBC	12.7 bAB	12.3 bAB
	茎叶 SL	149.0 cB	169.3 bA	176.7 abA	184.3 aA	185.2 aA	178.9 abA	181.8 abA	178.0 abA
	果实 F	57.7 eE	65.6 dCD	68.1 cC	72.2 bB	81.5 aA	64.4 dD	65.5 dCD	64.4 dD

注 (Note): R—Root; SL—Stem and leaf; F—Fruit; SS—Seeding stage; FS—Flowering stage; EHS—Early of the harvest season; MHS—Middle of the harvest season; LHS—Late of the harvest season. 下同 The same below.

番茄果实磷素含量的变化(图 1)看出, 在结果初期、结果盛期和拉秧期果实磷含量也随着磷肥施用量的增加而增加; 果实磷素含量与磷肥的施用量呈极显著曲线相关。对应结果初期、结果盛期和拉秧期方程为:

$$y = 0.3619 + 0.2559x - 0.0738x^2;$$

$$y = 0.3300 + 0.1059x - 0.019x^2;$$

$$y = 0.3297 + 0.3226x - 0.0856x^2;$$

r 值分别为 0.9251、0.9574 和 0.9851。

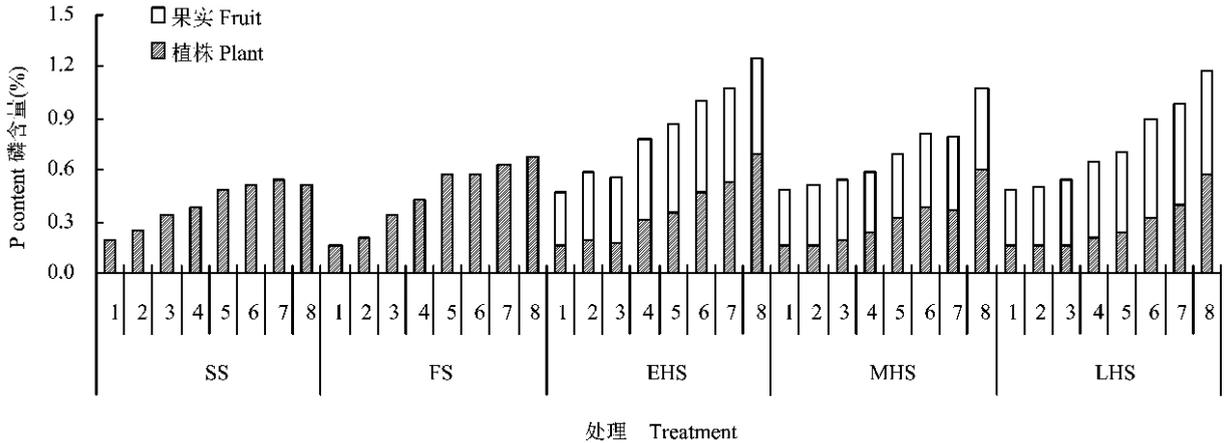


图 1 不同磷肥水平对番茄不同时期 P 养分含量与分配的影响

Fig. 1 The effects of phosphorus level on tomato phosphorus content and distribution at different growth stages

2.4 施磷对土壤电导率、速效磷和土壤酶活性的影响

2.4.1 施磷对土壤电导率的影响 土壤电导率反映土壤盐分的累积状况。各处理番茄土壤电导率从苗期到拉秧期呈现上升趋势(图 2)。从苗期至拉秧

期随着磷肥施用量的增加,土壤电导率相应增加,处理 8 达到最高值。在我们的试验中,对应产量结果,番茄结果期土壤电导率超过 0.65 mS/cm,会显著影响番茄单果重和产量。

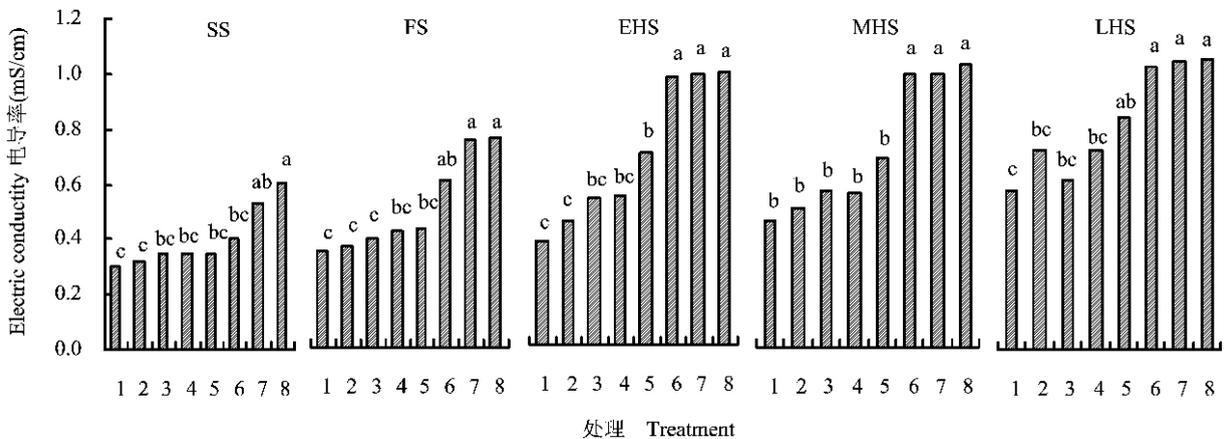


图 2 不同施磷水平对土壤电导率的影响

Fig. 2 The effects of phosphorus level on soil electric conductivity

2.4.2 施磷对土壤速效磷的影响 各处理土壤速效磷含量从苗期到拉秧期呈现下降趋势(图 3)。随着番茄的生长,土壤中的速效磷被吸收和土壤吸附固定。而各生育期随着磷肥施用量的增加,土壤速效磷含量均显著增加,处理 8 达到最大值,对应各生育期分别为 351.1、270.9、300.8、261.3 和 183.8 mg/kg。土壤速效磷含量与磷肥施用量之间呈现极显著正相关,对应各时期相关系数 r 值分别为 0.9777、0.9880、0.9914、0.9861 和 0.9976。说明施用磷肥极显著影响土壤速效磷含量。当番茄干物质积

累和产量最高时(处理 5),土壤速效磷含量在 60~77 g/kg,当磷肥施用量超过 0.53 g/kg,则出现磷过量累积,养分不平衡,不利于番茄高产。

2.4.3 施磷对土壤酶活性的影响 表 3 表明,番茄在苗期、开花期和结果初期,随着磷肥施用量的增加,脲酶的活性呈下降趋势。由于各处理土壤含氮量相同,随着磷肥施用量的增加,土壤中氮磷比直接影响着土壤脲酶的活性。到了结果初期,追施了氮肥,脲酶的活性又有所上升;在结果盛期和拉秧期,随着磷肥用量的增加,土壤脲酶活性均表现为先升

后降,说明结果期适当增加土壤磷含量可以促进脲酶的活性。

土壤过氧化氢酶活性各生育期都较低,处理

1—5 土壤过氧化氢酶的活性相近,当施磷量较高(处理 6—8)时,土壤过氧化氢酶的活性呈现下降态势。

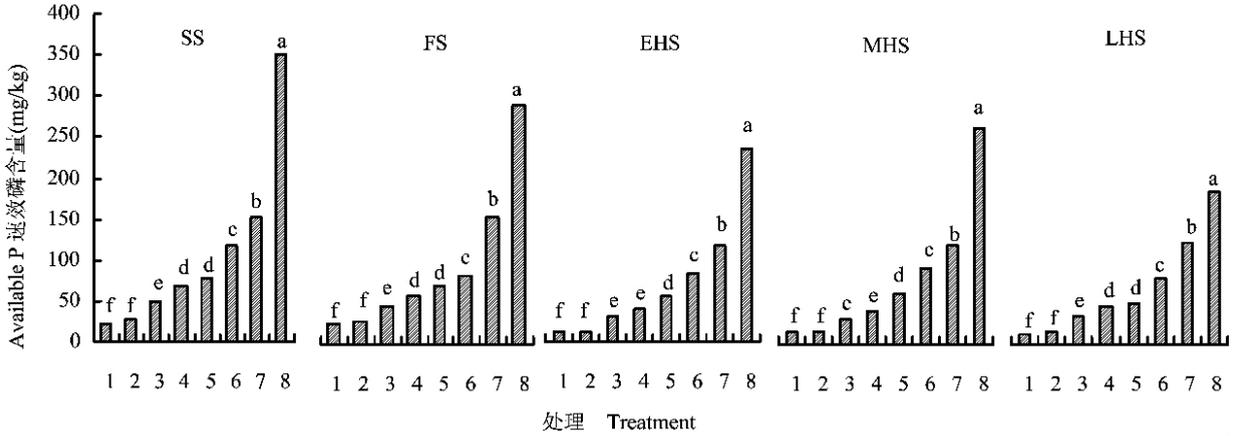


图 3 不同磷肥水平对土壤速效磷的影响

Fig.3 The effects of phosphorus level on soil available P

表 3 不同磷肥水平对土壤酶活性的影响

Table 3 The effects of phosphorus level on enzyme activities of soil

土壤酶	处理号	苗期	开花期	结果初期	结果盛期	拉秧期
Soil enzymes	Treatments	SS	FS	EHS	MHS	LHS
脲酶 (NH ₃ -N mg/g)	1	15.78 aA	9.89 aA	19.10 aA	16.11 bB	10.39 bB
	2	12.35 bB	8.78 bB	16.40 bB	15.92 dD	8.34 fF
	3	11.96 cC	8.04 cC	13.71 cC	15.99 cdCD	9.04 eE
	4	11.74 dD	7.89 dD	12.20 dD	16.98 aA	10.11 cC
	5	8.79 eE	5.72 gG	8.64 fF	16.04 bcBC	11.22 aA
	6	8.56 fF	6.24 fF	8.73 fF	15.10 eE	9.28 dD
	7	7.71 gG	6.47 eE	9.58 eE	8.62 fF	6.83 gG
	8	5.94 hH	4.82 hH	6.20 gG	4.36 gG	6.26 hH
过氧化氢酶 (0.1mol/L KMnO ₄ mL/g)	1	0.34 abcA	0.34 aA	0.36 aA	0.34 bAB	0.36 aA
	2	0.35 abA	0.30 abcABC	0.37 aA	0.31 cC	0.36 aA
	3	0.36 aA	0.30 bcABC	0.3 cCD	0.31 cC	0.35 bAB
	4	0.34 abcA	0.32 abAB	0.33 bB	0.33 bB	0.34 cBC
	5	0.35 abcA	0.30 bcABC	0.3 cCD	0.34 bAB	0.32 eD
	6	0.32 cAB	0.34 aA	0.31 cC	0.31 cC	0.33 dCD
	7	0.33 bcAB	0.27 cdBC	0.28 dD	0.35 aA	0.30 gE
	8	0.29 dB	0.26 dC	0.27 eE	0.28 dD	0.30 fE
蔗糖酶 (mg/g, DW)	1	0.93 abAB	0.95 aA	1.15 eD	1.14 dCD	1.16 deDE
	2	0.91 bcdABC	0.9 cB	1.1 gE	1.09 fE	1.19 cdCD
	3	0.87 eC	0.90 bcB	1.32 bB	1.12 eD	1.21 cbBC
	4	0.94 aA	0.91 bB	1.24 cC	1.22 bB	1.24 bB
	5	0.92 abcAB	0.9 bcB	1.21 dC	1.17 cC	1.38 aA
	6	0.91 cdBC	0.9 cB	1.55 aA	1.27 aA	1.14 eE
	7	0.9 dBC	0.95 aA	1.13 fDE	1.21 bB	1.16 deDE
	8	0.94 aA	0.91 bB	1.1 gE	1.21 bB	1.17 deCDE

幼苗期、开花期和结果盛期,土壤蔗糖酶活性变化不大;结果初期和拉秧期,随着磷肥施用量的增加,蔗糖酶活性表现出先增后降趋势,但无显著相关。说明施用磷肥会一定程度上增加蔗糖酶活性,但影响效果不显著。

3 结论与讨论

3.1 试验结果表明,在番茄各生育期,随着磷肥施用量的增加,根系干物质积累、茎叶干物质积累均呈先升高后降低的趋势,根系干物质积累高峰在苗期至结果初期;茎叶干物质积累高峰主要出现在开花期至结果初期;施磷对番茄产量和单果重有显著影响,当施用 P_2O_5 达到 0.53 g/kg (处理 5)时,番茄产量最高,单果重也达到最好水平。此时番茄全株干物质积累也达到最高值,而过高的施磷量会导致番茄产量和干物质积累的下降。

3.2 在本研究基础土壤供磷水平下,番茄各生育期随着磷肥施用量的增加,土壤速效磷含量均显著增加,土壤速效磷含量与磷肥施用量之间呈现极显著正相关(r 值达到 0.98 以上)。当磷肥(P_2O_5)用量为 0.53 g/kg (处理 5)时,土壤速效磷含量在 $60 \sim 77 \text{ g/kg}$,番茄产量最高;超过此用量时会引起土壤磷的累积,不利于番茄生长。对照菜地土壤养分分级结果^[8],当土壤速效磷含量在 $60 \sim 90 \text{ mg/kg}$ 时适宜蔬菜生长,本试验结果与该结论及其他研究报告^[9-11]一致。

3.3 施磷对各个生育期番茄植株和果实磷素含量有较大影响。随着施磷量的增加,番茄各组织含磷量相应增加。在第一穗果结果期和第二穗果膨大期,番茄全株磷含量达到最大值。这与番茄整个生育期内磷的吸收高峰出现在盛果期的结论相一致^[12]。因此,生产上施用肥料应根据番茄养分需求合理分配磷肥,在番茄进入生殖生长期尤其是结果期,应注意适当增施磷肥。

3.4 我国北方大棚蔬菜生产盐害问题严重,致使温室使用 5 年,有的甚至仅 2—3 年就出现蔬菜生长障碍,严重影响大棚的可持续利用。本研究表明,随着磷肥施用量的增加,土壤电导率相应增加,当施磷量过高时,番茄结果期土壤电导率超过 0.65 mS/cm ,显著影响番茄单果重和产量。可见,大棚土壤的盐害问题与盲目施肥直接相关。

3.5 脲酶活性高低在一定程度上反应了土壤供氮水平状况,而蔗糖酶的活性则反应了土壤熟化程度和肥力水平,对增加土壤中易溶性营养物质起重要

作用^[13]。据报道适宜的磷素通过提高酶的活性来促进植株氮的代谢,而过量的磷限制植株对氮的吸收从而减低酶的活性^[14-15]。本试验结果也表明,在番茄结果期适当提高土壤磷含量可以提高脲酶的活性。同时,施用磷肥会一定程度上增加蔗糖酶活性,但影响效果不显著。

近几年来,大棚蔬菜发展很快,但盲目过量施肥现象普遍存在,实际施肥量远远超过了蔬菜养分需求,以磷的超量最为严重;施用氮磷钾比例与蔬菜需求比例有很大差距。河北省大棚生产磷素化肥养分平均施用量超出需要量 9.2~19.1 倍^[5],造成土壤磷素累积,养分不平衡,土壤盐化严重,不仅降低了产量,而且导致资源浪费和环境恶化。本试验在轻壤质石灰性褐土大棚番茄施用磷肥的最佳用量,可为番茄施肥提供参考。

参考文献:

- [1] 王进,田丽萍,白丽,等. 覆膜滴灌条件下氮磷钾肥配施对加工番茄生物学性状与产量的影响[J]. 石河子大学学报, 2006, 24(2): 205-209.
Wang J, Tian L P, Bai L *et al.* Effects of NPK matches on the growth and yield of processing tomato under plastic mulched drip irrigation [J]. J. Shihezi Univ., 2006, 24(2): 205-209.
- [2] 李冬梅,魏琨,张海森,等. 氮磷钾不同用量及配比对日光温室黄瓜产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(7): 262-265.
Li D M, Wei M, Zhang H S *et al.* Effect of different amounts and ratios of N, K, P on yield and quality of cucumber in solar greenhouse [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2005, 21(7): 262-265.
- [3] 李远新,李进辉,何莉莉,等. 氮磷钾配施对保护地番茄产量及品质的影响[J]. 中国蔬菜, 1997, (4): 10-13.
Li Y X, Li J H, He L L *et al.* Effects of NPK on yield and quality of tomato in green house [J]. China Veget., 1997, (4): 10-13.
- [4] 吴建繁,王运华,贺建德,等. 京郊保护地番茄氮磷钾肥料效应及其吸收分配规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 409-416.
Wu J F, Wang Y H, He J D *et al.* Study on the effect, absorption and distribution of NPK on tomato in greenhouse of Beijing suburb [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2000, 6(4): 409-416.
- [5] 张彦才,李巧云,翟彩霞,等. 河北省大棚蔬菜施肥状况分析与评价[J]. 河北农业科学, 2005, 9(3): 61-67.
Zhang Y C, Li Q Y, Zhai C X *et al.* The condition and appraisal of the vegetable apply fertilizer in greenhouse in Hebei Province [J]. J. Hebei Agric. Sci., 2005, 9(3): 61-67.
- [6] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
Institute of Soil Science, CAS. Soil physical and chemical properties analysis [M]. Shanghai: Shanghai Science & Technological Press, 1978.

- [7] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
Guan S Y. Research methods of soil enzyme[M]. Beijing: China Agric. Press, 1986.
- [8] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
Lu R J. Soil-plant nutrition principle and fertilization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998.
- [9] 苏德纯, 杨奋翮, 张福锁. 北京郊区蔬菜保护地土壤磷空间及形态分布特征[J]. 中国蔬菜, 1999 (4): 7-11.
Su D C, Yang F R, Zhang F S. Fraction and distribution characteristics of phosphorus in vegetable soil of Beijing[J]. China Veg., 1999, (4): 7-11.
- [10] 梁成华, 唐咏, 须湘成, 等. 日光温室菜园土的磷素形态及吸附和解吸特征[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(4): 345-351.
Liang C H, Tang Y, Xu X C *et al.* Fractions and adsorption-desorption characteristics of P in solar greenhouse vegetable soils[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(4): 345-351.
- [11] 曲均峰, 李菊梅, 徐明岗, 戴建军. 长期不施肥条件下几种典型土壤全磷和 Olse-P 的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 90-98.
Qu J F, Li J M, Xu M G, Dai J J. Total-P and Olsen-P dynamics of long term experiment without fertilization[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(1): 90-98.
- [12] 刘枫, 叶舒娅, 王文军, 刘英. 茄果类蔬菜营养特性及施肥效应研究[J]. 安徽农业科学, 1997, 25(4): 346-351.
Liu F, Ye S Y, Wang W J, Liu Y. Nutrition characters of solanaceae vegetables and fertilization effect[J]. J. Anhui Agric. Sci., 1997, 25(4): 346-351.
- [13] 王芸, 韩宾, 史忠强, 等. 保护性耕作对土壤微生物特性及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 120-123.
Wang Y, Han B, Shi Z Q *et al.* Effects of conservation tillage on soil microbial characters and soil enzyme activities[J]. J. Soil Water Conserv., 2006, 20(4): 120-123.
- [14] 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.
Chen G, Wu L S, Li Yu H *et al.* Effect of different phosphorous supply levels on yield and quality of watermelon[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(6): 1189-1192.
- [15] 孙慧敏, 于振文, 颜红, 史桂萍. 施磷量对小麦品质和产量及氮素利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(2): 135-138.
Sun H M, Yu Z W, Yan H, Shi G P. Effect of phosphorus rate applied on quality, yield and nitrogen utilization in winter wheat[J]. J. Triticeae Crops, 2006, 26(2): 135-138.