植物营养与肥料学报 2012,18(3):706-716
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同钾肥对番茄幼苗酚类物质代谢作用的影响

王 千[1,2], 依艳丽[2]*, 张淑香[1]*
(1 农业部作物营养与施肥重点开放实验室,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081;
2 沈阳农业大学土地与环境学院,沈阳 110866;)

摘要: 采用水培试验,研究不同钾肥水平(K 0、4.0、8.0、1.6 mmol/L)、钾肥品种(KNO_3、K_2SO_4)对"中杂 106(ZZ106)"和"毛粉 802(MF820)"两种番茄幼苗生长、酚类物质代谢作用的影响。结果表明,两种钾肥均在倍增浓度(8.0 mmol/L)处理中的番茄叶片、根部酚类物质代谢最活跃。施用 K_2SO_4 处理植株鲜重、干重和植株钾含量均显著高于 KNO_3,但 KNO_3 处理番茄苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性、总酚、类黄酮、木质素含量均高于 K_2SO_4。"中杂 106"的代谢酶活性及代谢产物、鲜重、干重、叶片钾含量均显著高于"毛粉 802",但根系钾含量显著低于"毛粉 802"。总之,施钾有利于番茄叶片和根系 PAL、多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)活性的提高以及总酚、类黄酮和木质素的合成,供钾不足、过量均会降低代谢酶的活性以及影响酚类物质和木质素的含成。K_2SO_4 比 KNO_3 更能促进番茄植株生长发育,但施用 KNO_3 的处理番茄植株酚类物质代谢能力优于 K_2SO_4。"中杂 106"的生长发育及酚类物质代谢能力均优于"毛粉 802"。

关键词: 硝酸钾; 硫酸钾; 番茄; 酶活性; 酚类物质
中图分类号: S641.2.601　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)03-0706-11

Effects of different potassium on phenol metabolism of tomato seedlings

WANG Qian[1,2], YI Yan-li[2]*, ZHANG Shu-xiang[1]*
(*1 Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;*
2 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Based on the water culture, the different levels of K (0, 4.0, 8.0 and 16.0 mmol/L), different potash fertilizers (KNO_3 and K_2SO_4) and two tomato cultivars (ZZ106 and MF802) were selected to study the effects of potassium on seedling growth and phenol metabolism of tomato. The results show that the contents of secondary protective enzyme activities and secondary substances of the leaves and roots in the treatment of (8.0 mmol/L) are higher than those of other treatments. The biomasses and contents of K of the plants in the treatments of K_2SO_4 are higher than those in the treatments of KNO_3, while the PAL activities, total phenol, flavonoids and lignin contents in the treatments of K_2SO_4 are lower than those of KNO_3. The secondary protective enzyme activities and secondary substances, biomasses and K contents of leaves of the ZZ106 are significantly higher than those of the MF802, while the K contents of roots of the ZZ106 are significantly lower than those of the MF802. In short, K in leaves and roots can improve phenol metabolism. The potassium deficiency and over dose can reduce the activities of metabolic enzymes and contents of phenolic, flavonoids and lignin. K_2SO_4 can promote tomato plant growth, but KNO_3 is an advantage over K_2SO_4 on phenol metabolism. The growth and the contents of phenolic compounds of the ZZ106 are better than those of the MF802.

Key words: potassium nitrate; potassium sulphate; tomato; enzyme activity; phenolic compounds

---

收稿日期: 2011-10-14　　**接受日期:** 2012-03-13
基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAD11B05)资助。
作者简介: 王千(1986—),女,辽宁大连人,硕士研究生,主要从事农业环境与生态方面的研究。E-mail: wangqian0710@126.com
* 通讯作者 E-mail: yiyanli@126.com; E-mail: sxzhang@caas.ac.cn

番茄（*Solanum lycopersicum*）在我国已有大面积温室、塑料大棚及其它保护地设施栽培。由于人工控制形成的特殊生态环境、复种指数提高以及多年连作使番茄产量下降、品质变劣、根结线虫病害严重的现象普遍发生，严重影响了番茄生产的可持续发展[1]。长期以来，人们多以化学防治的方法防治番茄病虫害，然而长期、大量使用农药不仅使病原体产生抗药性，而且加重了环境压力。因此通过合理施肥、发掘作物抗病潜力、减轻环境和农产品污染已经成为农作物病害防治的重要手段。

目前已有许多关于酚类物质代谢与作物抗病性相关研究的报道[2-6]。酚类化合物具有毒性，可抑制昆虫的取食和病原物的侵染，同时也是木质素合成的前体物质。苯丙氨酸解氨酶（PAL）、多酚氧化酶（PPO）和过氧化物酶（POD）都是酚类物质代谢过程中的关键酶，对酚类物质的形成、氧化以及木质素的合成具有重要作用。Tobin 等[7]研究认为 POD 活性与番茄抗病性密切关系。木质素作为酚类物质的代谢产物之一，可以机械保护细胞壁的糖类物质免受真菌酸酶分解，阻止真菌中酶和毒素向寄主扩散。虽然钾肥对很多作物抗病效果的研究大部分是肯定的，但不同钾肥用量、品种对作物次生物质代谢的影响仍存在争议。Awad 等[8]研究认为，在大田试验中施用钾肥，苹果皮中总酚、类黄酮含量没有显著增加。在钾肥施用量相同（K 454 kg/hm^2）的情况下，与硫酸钾相比施用氯化钾能降低玉米茎腐病的发病率一半以上[9]。Sanogo 等[10]的研究表明，施用氯化钾能降低由腐皮镰刀菌引起的大豆猝死症 36%，而施用硫酸钾和硝酸钾则分别提高了发病率 43%、45%。这些均说明钾肥能够使作物产生抗病性，除钾素起作用外，其陪伴阴离子 Cl^-、SO_4^{2-}、NO_3^- 等也对作物抗病性有很大作用。氯元素具有参与光合作用、调节气孔运动和养分吸收等多种生理功能，通过增强植株的生长势而间接提高其抗病性[11]。如大田生产条件下，施用氯化钾对冬小麦的白粉病、叶锈病均有一定的抑制作用，其中起作用的是氯离子[12]。虽然钾素影响植物酚类代谢的报道已有很多，但钾肥用量和不同钾肥品种以及其交互作用与作物酚类物质、其前体、产物和相关的酶活性的关系及机理等方面的研究较少，因此本实验选用硝酸钾和硫酸钾作为供试钾肥，研究其在不同浓度水平下对番茄幼苗酚类物质代谢的影响，进一步探讨其机理，以期为番茄生产中钾肥品种的选择和合理用量提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验于 2010 年 11 月～2011 年 2 月在中国农业科学院农业资源与农业区划研究所温室进行。供试番茄为生产上常用品种“中杂 106（ZZ106）”和“毛粉 802（MF802）”。“中杂 106”是中国农业科学院蔬菜花卉研究所最新育成的保护地番茄一代杂种，抗叶霉病、番茄花叶病毒、枯萎病，耐黄瓜花叶病毒，产量可达 67500～127500 kg/hm^2。“毛粉 802”是西安市蔬菜研究所 1985 年育成的杂交种，高抗烟草花叶病毒，耐黄瓜花叶病毒，一般产量 60000～75000 kg/hm^2。

1.2　试验设计

本试验采用水培方式，试验设 3 个因子：钾肥水平、品种和番茄品种。营养液采用日本山崎番茄营养液配方，微量元素采用通用营养液配方。KNO_3 处理的大量元素配方为 $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 354 mg/L、$(NH_4)_2HPO_4$ 77 mg/L、$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 246 mg/L；K_2SO_4 处理的大量元素配方为 $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 354 mg/L、$(NH_4)_2HPO_4$ 77 mg/L、$Mg(NO_3)_2$ 128 mg/L。钾水平（K）分别为：缺 K（0 mmol/L）、营养液正常浓度（4.0 mmol/L）、倍增浓度（8.0 mmol/L）和过量浓度（16.0 mmol/L）。完全试验方案，共 14 个处理，每个处理 6 次重复。

挑选饱满番茄种子常温清水中浸泡 4 h 后在 10% 的磷酸三钠溶液中消毒 30 min，清水冲洗干净，置于铺有浸湿滤纸的培养皿中，于 28℃ 恒温培养箱中催芽；种子露白后播种于盛有草炭、蛭石培养基的穴盘中；第一片真叶完全展开后，移栽至装有 2L 1/3 浓度的正常营养液中水培；3 d 后供应正常浓度。营养液 pH 调至 6.0 ± 0.2，在培养过程中每天用增氧泵连续通气，每 3d 换 1 次营养液，每箱 4 株。移栽 27d 后采集 2 株测定生物量、2 株测定钾含量、2 株顶端叶片和根系测定生理指标。

1.3　测定项目和方法

生物量的测定：植株从水培箱中完整取出，用蒸馏水快速冲洗干净地上部分表面的灰尘，并小心地将根部冲洗干净，用吸水纸吸干表面水分，称取鲜重。将新鲜材料置 105℃ 烘箱杀青 20 min 后，65℃

烘干至恒重,称得干重。

番茄幼苗植株全钾含量的测定采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮—火焰光度计法。

苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性参照薛应龙等[13]的方法测定;多酚氧化酶(PPO)活性采用紫外分光光度法[15]测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法[14]测定。以每分钟减少0.01个A值所需的酶量为1个活性单位(U),酶活性以U/(g·min),FW表示。总酚和类黄酮含量采用福林酚比色法[16]测定,总酚含量以mg/g, FW表示,类黄酮含量用 OD_{325}/g, FW表示;木质素含量的测定参照Sancho等[17]的方法。

1.4 数据统计分析

试验数据用Excel 2003进行处理,使用SAS 6.1(8.0)统计软件中单因变量(Factorial ANOVA)做统计和方差分析,并进行钾水平、钾肥品种和番茄品种之间的交互作用分析。

2 结果与分析

2.1 不同钾肥处理对不同品种番茄幼苗生长的影响

由表1可知,随钾水平的提高,植株鲜重、干重呈先升高后降低的趋势。两种钾肥过量浓度(16.0 mmol/L)处理植株鲜重、干重显著降低。倍增浓度(8.0 mmol/L)处理鲜重达到最大值,与对照处理相比,施用 KNO_3"中杂106"和"毛粉802"的鲜重分别提高93.5%、86.0%,施用 K_2SO_4 分别提高93.8%、88.0%,其中,以"中杂106"施用 K_2SO_4 的组合处理最高,鲜重59.88g,干重3.74g。两个品种番茄根冠比随钾水平升高基本呈现降低的趋势,其中"毛粉802"在 K_2SO_4 过量浓度(16 mmol/L)水平下根冠比显著升高。施用 K_2SO_4 处理的植株鲜重、干重显著高于施用 KNO_3,分别提高15.7%、20.4%。两种钾肥处理中"中杂106"的鲜重、干重均显著高于"毛粉802",分别提高16.4%、10.1%。钾水平、钾肥品种和钾水平×钾肥品种×番茄品种的交互作用对植株鲜重、干重及根冠比的影响均显著,番茄品种、钾水平×番茄品种交互作用只对植株鲜重、根冠比的影响显著。

2.2 不同钾肥处理对不同品种番茄幼苗钾含量的影响

从表2可以看出,"中杂106"施用 KNO_3、K_2SO_4 0～8.0 mmol/L范围内,地上部钾含量随钾水平升高显著增加,但浓度过量(16.0 mmol/L)其地上部钾含量均显著下降。"毛粉802"施用 KNO_3 0～8.0 mmol/L范围内,地上部钾含量均随供钾水平升高而增加,过量浓度(16.0 mmol/L)与倍增浓度(8.0 mmol/L)差异不大,施用 K_2SO_4 4.0～16.0 mmol/L地上部钾含量差异不显著。"中杂106"施用两种钾肥根系钾含量均在过量浓度(16.0 mmol/L)最高,倍增浓度(8.0 mmol/L)和正常浓度(4.0 mmol/L)次之,对照最低。"毛粉802"施用 KNO_3 根系钾含量在倍增浓度(8.0 mmol/L)最高,过量浓度(16.0 mmol/L)和正常浓度(4.0 mmol/L)次之,对照最低;施用 K_2SO_4 根系钾含量随供钾水平升高而显著增加。K_2SO_4 处理番茄植株地上部和根系钾含量均显著高于 KNO_3 处理,相比分别提高6.3%和28.6%。"中杂106"植株地上部钾含量比"毛粉802"高4.1%,而根系钾含量低于"毛粉802"5.4%。钾水平对植株地上部和根系钾含量的影响极显著,钾水平与钾肥品种的交互作用对植株地上部和根系钾含量也有显著影响。

2.3 不同钾肥处理对不同品种番茄叶片次生代谢相关防御酶活性及其代谢产物的影响

表3显示,从钾水平看,缺钾处理番茄叶片PAL、PPO活性显著低于其他各处理,表明施钾有利于番茄叶片PAL、PPO活性的提高。在缺钾(CK)处理下,两种番茄叶片POD活性均显著高于正常浓度(4.0 mmol/L),而倍增浓度(8.0 mmol/L)处理POD活性最高。倍增浓度(8.0 mmol/L)处理,两种番茄叶片PAL、PPO活性最高,正常浓度(4.0 mmol/L)和过量浓度(16.0 mmol/L)次之,CK最低。KNO_3 处理"毛粉802"叶片的PPO活性,除CK外,其他各处理差异不明显。"中杂106"植株叶片的PAL、POD、PPO活性受钾水平的影响变化幅度较大,而"毛粉802"品种变化幅度较小。K_2SO_4 处理番茄叶片PPO、POD活性均略高于 KNO_3 处理,但差异不显著。施用两种钾肥"中杂106"叶片的PAL、PPO和POD活性均高于"毛粉802",分别高14.8%、5.1%和19.0%。钾水平对植株叶片PAL、PPO、POD活性的影响均为极显著,钾肥品种、番茄品种和钾水平与番茄品种的交互作用只对植株叶片POD活性有显著影响。

表 1　不同钾肥处理对不同品种番茄植株鲜重、干重及根冠比的影响

Table 1　Effects of different potassium treatments on fresh and dry weight of plant and root/shoot ratio of different tomato cultivars

钾肥处理 K treatment (mmol/L)		鲜重 Fresh weight (g/plant)			地上部干重 Shoot dry weight (g/plant)			根系干重 Root dry weight (g/plant)			根冠比 Root/Shoot ratio		
		中杂 106 ZZ106	毛粉 802 MF802	平均 Mean	中杂 106 ZZ106	毛粉 802 MF802	平均 Mean	中杂 106 ZZ106	毛粉 802 MF802	平均 Mean	中杂 106 ZZ106	毛粉 802 MF802	平均 Mean
CK		3.07 d	5.99 c		0.34 d	0.57 c		0.09 c	0.10 c		0.26 a	0.18 a	
KNO_3	4.0	46.98 b	34.28 a	36.77 b	2.89 b	2.12 a	2.18 b	0.38 a	0.29 a	0.27 b	0.13 b	0.15 b	0.12 a
	8.0	57.33 a	38.00 a		3.23 a	2.03 a		0.35 a	0.26 a		0.10 c	0.13 b	
	16.0	17.82 c	26.24 b		1.02 c	1.71 b		0.17 b	0.14 b		0.17 b	0.08 c	
K_2SO_4	4.0	40.17 b	45.42 a	42.55 a	2.47 b	3.08 a	2.60 a	0.32 b	0.36 a	0.35 a	0.13 b	0.10 c	0.14 a
	8.0	59.88 a	47.71 a		3.74 a	2.94 a		0.47 a	0.39 a		0.15 b	0.14 c	
	16.0	37.79 b	24.33 b		2.34 b	1.50 b		0.27 b	0.30 b		0.10 c	0.22 a	
平均 Mean			33.17 a	28.49 b		2.01 a	1.82 b		0.27 a	0.25 a		0.17 a	0.14 a

F 值 *F* value

项目 Item	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	根冠比 Root/Shoot ratio
钾水平 K rate (KR)	70.81**	43.21**	24.27**
钾肥品种 K variety (KV)	3.26*	4.05*	4.94*
番茄品种 Tomato cultivars(TC)	4.52*	1.25	4.68*
钾水平×钾肥品种 KR×KV	0.71	0.67	2.58
钾水平×番茄品种 KR×TV	2.41*	1.68	6.15**
钾肥品种×番茄品种 KV×TC	0.03	0.44	2.85
钾水平×钾肥品种×番茄品种 KR×KV×TC	3.07*	3.05*	9.56**

注(Note)：ZZ106—Zhongza106；MF802—Maofen802. 同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.
* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著 Indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表2 不同钾肥处理对不同品种番茄地上、根系钾含量的影响

Table 2 Effects of different potassium treatments on K contents of shoot and root of different tomato cultivars

钾肥处理 K treatment (mmol/L)		地上部钾含量(%) K content of shoot			根系钾含量(%) K content of root		
		中杂106 ZZ106	毛粉802 MF802	平均 Mean	中杂106 ZZ106	毛粉802 MF802	平均 Mean
CK		0.84 c	0.90 c		0.85 c	0.46 c	
KNO_3	4.0	8.11 b	8.71 b	9.16 b	2.22 b	2.56 b	2.52 b
	8.0	10.14 a	9.08 a		2.26 b	2.84 a	
	16.0	9.85 b	9.09 a		2.59 a	2.64 b	
K_2SO_4	4.0	9.34 b	9.23 a	9.74 a	2.58 b	2.87 c	3.24 a
	8.0	10.86 a	9.53 a		2.96 b	3.39 b	
	16.0	9.60 b	9.86 a		3.74 a	3.91 a	
平均 Mean		7.45 a	7.16 b		2.26 b	2.39 a	

项目 Item	*F*值 *F* value 地上部钾含量 K content of shoot	根系钾含量 K content of root
钾水平 K rate (KR)	414.18**	44.18**
钾肥品种 K variety (KV)	2.53	3.10
番茄品种 Tomato cultivars(TC)	0.05	0.11
钾水平×钾肥品种 KR×KV	3.10*	2.93*
钾水平×番茄品种 KR×TV	2.06	0.71
钾肥品种×番茄品种 KV×TC	1.73	0.11
钾水平×钾肥品种×番茄品种 KR×KV×TC	0.70	0.09

注(Note): ZZ106—Zhongza106; MF802—Maofen802. 同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level. *和**分别表示在0.05和0.01水平显著 Indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

缺钾处理(CK)番茄叶片的总酚、类黄酮和木质素含量均显著低于其他钾水平处理(表4),表明施钾有利于番茄叶片内总酚、类黄酮和木质素的合成。两种番茄均在倍增浓度(8.0 mmol/L)处理下叶片的总酚、类黄酮和木质素含量最高,正常浓度和过量浓度次之,缺钾处理最低。

KNO_3 处理番茄叶片总酚、类黄酮和木质素含量均略高于 K_2SO_4 处理,分别高17.0%、8.8%和15.9%。施用两种钾肥"中杂106"叶片总酚、类黄酮和木质素含量均高于"毛粉802",分别比"毛粉802"高7.8%、5.3%和43.0%。钾水平对植株叶片总酚、类黄酮和木质素含量的影响均极显著,钾水平与番茄品种的交互作用只对植株叶片类黄酮含量有显著影响。

2.4 不同钾肥处理对不同品种番茄根系次生代谢相关防御酶活性及其代谢产物的影响

表5可看出,从钾水平方面分析,缺钾(CK)处理的番茄根系PAL、POD、PPO活性显著低于其他各处理,表明施钾有利于番茄根PAL、POD、PPO活性的提高。"中杂106"和"毛粉802"植株根系在倍增浓度(8.0 mmol/L)处理下PAL、POD、PPO活性最高,而正常浓度(4.0 mmol/L)和过量浓度(16.0 mmol/L)次之,CK处理最低。KNO_3 处理番茄根系PAL、POD活性均高于 K_2SO_4 处理,分别高24.2%、6.8%,但番茄根系PPO活性比 K_2SO_4 处理低14.4%。施用两种钾肥"中杂106"根系PPO、POD

表 3　不同钾肥处理对不同品种番茄叶片次生代谢相关防御酶活性影响

Table 3　Effects of different potassium treatments on the contents of secondary protective enzyme activities of leaves in two tomato cultivars

钾肥处理 K treatment (mmol/L)		PAL 活性 PAL activity [U/(g·min), FW]			PPO 活性 PPO activity [U/(g·min), FW]			POD 活性 POD activity [U/(g·min), FW]		
		中杂 106 ZZ106	毛粉 802 MF802	平均 Mean	中杂 106 ZZ106	毛粉 802 MF802	平均 Mean	中杂 106 ZZ106	毛粉 802 MF802	平均 Mean
CK		30.12 c	23.92 b		28.81c	28.14 b		107.18 b	89.58 b	
KNO_3	4.0	41.62 b	40.12 a	45.31a	32.83 b	38.07 a	39.96 a	99.26 c	80.72 c	99.14 a
	8.0	53.40 a	48.40 a		55.62 a	40.70 a		120.06 a	95.13 a	
	16.0	45.06 b	43.26 a		34.42 b	38.13 a		108.30 b	91.37 b	
K_2SO_4	4.0	43.20 b	42.46 a	44.38 a	32.83 b	37.27 b	40.17 a	96.08 c	86.13 c	103.05 a
	8.0	55.18 a	46.66 a		54.34 a	44.23 a		128.33 a	102.66 a	
	16.0	46.68 b	32.12 b		37.12 b	35.21 b		105.65 b	99.42 b	
平均 Mean		43.18 a	37.61 b		38.09 a	36.24 a		109.63 a	92.14 b	

F 值 *F* value

项目 Item	PAL 活性 PAL activity	PPO 活性 PPO activity	POD 活性 POD activity
钾水平 K rate (KR)	67.26**	26.37**	35.28**
钾肥品种 K variety (KV)	2.45	1.15	4.00*
番茄品种 Tomato cultivars(TC)	1.17	0.67	113.92**
钾水平×钾肥品种 KR×KV	1.04	0.97	1.11
钾水平×番茄品种 KR×TV	0.56	0.55	3.65*
钾肥品种×番茄品种 KV×TC	0.08	0.59	3.15
钾水平×钾肥品种×番茄品种 KR×KV×TC	0.07	1.25	1.00

注(Note)：ZZ106—Zhongza106；MF802—Maofen802. 同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level. * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著 Indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

活性均高于“毛粉 802”，分别高 11.4% 和 15.6%，但根系 PAL 活性比“毛粉 802”低 31.4%。钾水平对植株根系 PAL、PPO、POD 活性的影响均为极显著；番茄品种只对植株根系 PAL、PPO 活性有显著影响，钾水平与番茄品种的交互作用只对植株根系的 PAL 活性有显著影响。

表 6 结果表明，缺钾处理(CK)的总酚、类黄酮和木质素含量均显著低于其他钾水平处理，表明施钾有利于番茄根系总酚、类黄酮和木质素的合成。两种钾肥处理中，“中杂 106”、“毛粉 802”均在倍增浓度(8.0 mmol/L)处理下总酚、类黄酮和木质素含量最高，正常浓度和过量浓度次之，缺钾处理的最低。KNO_3 处理番茄根部总酚、类黄酮和木质素含量均高于 K_2SO_4 处理，分别高 12.3%、20.7% 和 9.8%。施用两种钾肥处理中“中杂 106”根系总酚、类黄酮和木质素含量均高于“毛粉 802”，分别高 19.8%、15.6% 和 9.3%。钾水平对植株根系总酚、类黄酮和木质素含量的影响均极显著，钾肥品种只对植株根系的总酚、类黄酮含量有显著影响，钾肥品种与番茄品种的交互作用只对植株根系的类黄酮含量有显著影响，钾水平与钾肥品种和番茄品种三者的交互作用只对植株根部总酚含量有显著影响。

表4 不同钾肥处理对不同品种番茄叶片次生代谢相关产物的影响

Table 4 Effects of different potassium treatments on the contents of secondary metabolites of leaves in two tomato cultivars

钾肥处理 K treatment (mmol/L)		总酚含量(mg/g, FW) Total phenol content			类黄酮含量(OD_{325}/g, FW) Flavnonid content			木质素含量(OD_{280}/g, FW) Lignin content		
		中杂106 ZZ106	毛粉802 MF802	平均 Mean	中杂106 ZZ106	毛粉802 MF802	平均 Mean	中杂106 ZZ106	毛粉802 MF802	平均 Mean
CK		4.64 c	3.99 c		30.60 b	25.82 c		1.02 c	0.55 c	
KNO_3	4.0	6.38 b	5.92 b	7.03 a	30.91 b	28.86 b	32.14 a	1.12 b	0.87 b	1.09 a
	8.0	8.95 a	7.89 a		41.60 a	35.73 a		1.43 a	1.02 a	
	16.0	7.12 b	5.89 b		30.61 b	28.68 b		1.13 b	0.96 a	
K_2SO_4	4.0	4.59 c	5.93 a	6.01 b	32.54 a	27.67 b	29.54 a	1.07 b	0.63 b	0.94 b
	8.0	7.30 a	6.69 a		34.38 a	35.30 a		1.26 a	0.98 a	
	16.0	5.91 b	5.64 a		30.99 b	26.38 b		0.98 b	0.74 b	
平均 Mean		6.19 a	5.74 a		31.09 a	29.53 a		1.13 a	0.79 b	

项目 Item	F值 F value 总酚含量 Total phenol content	类黄酮含量 Flavnonid content	木质素含量 Lignin content
钾水平 K rate (KR)	4.52**	3.47**	28.26**
钾肥品种 K variety (KV)	1.75	0.98	0.13
番茄品种 Tomato cultivars(TC)	0.33	0.01	0.12
钾水平×钾肥品种 KR×KV	0.76	0.16	0.53
钾水平×番茄品种 KR×TV	0.50	1.17*	0.32
钾肥品种×番茄品种 KV×TC	0.13	0.16	0.25
钾水平×钾肥品种×番茄品种 KR×KV×TC	0.29	0.58	0.28

注(Note): ZZ106—Zhongza106; MF802—Maofen802. 同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level. *和**分别表示在0.05和0.01水平显著 Indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 讨论与结论

3.1 不同钾肥处理对番茄生长、钾素吸收的影响

适量提高营养液中钾浓度,能够促进番茄幼苗生长,并且有利于钾素吸收。叶协锋等[18]研究认为以 KNO_3 为基础的钾肥处理比以 K_2SO_4 为基础的钾肥处理更能促进烟株的生长发育。而本实验结果表明,与 KNO_3 处理相比,施用 K_2SO_4 更能促进植株生长,与邓兰生研究结果一致[19]。尽管较高的生物量是形成经济产量的基础,但番茄生长特点是营养生长与生殖生长同时进行,保持二者平衡是一个关键问题[20-21]。刘汝亮等[22]研究认为马铃薯施用硝酸钾块茎中钾含量显著优于硫酸钾。同样,硝酸钾在提高烟叶钾含量方面优于硫酸钾,高浓度 SO_4^{2-} 对钾素吸收有明显抑制作用,NO_3^- 则更能促进烟草对钾的吸收[23-24]。本实验结果中,施用硫酸钾的番茄植株地上部和根系钾含量均显著高于硝酸钾,说明 SO_4^{2-} 更能促进番茄苗期对钾的吸收。

3.2 不同钾肥水平对番茄酚类物质代谢的影响

酚类物质是植物重要的次生代谢物(secondary mctabolites),它在寄主与病原菌相互作用过程中的迅速积累是植物抗病性的一种表现[25-27]。适量的钾素供给能增加油菜、棉籽、茶叶叶片中酚类物质、木质素含量以增强作物的抗病力[28-29]。李文娟等[30]研究表明,施用氯化钾可以提高接菌后玉米茎髓中 PAL 的诱导活性,加速 PPO 活性的升高,提高

表 5　不同钾肥处理对不同品种番茄根系次生代谢相关防御酶活性的影响

Table 5　Effects of potassium on the secondary protective enzyme activities of roots in two tomato cultivars

钾肥处理 K treatment (mmol/L)		PAL 活性 PAL activity [U/(g·min), FW]			PPO 活性 PPO activity [U/(g·min), FW]			POD 活性 POD activity [U/(g·min), FW]		
		中杂 106 ZZ106	毛粉 802 MF802	平均 Mean	中杂 106 ZZ106	毛粉 802 MF802	平均 Mean	中杂 106 ZZ106	毛粉 802 MF802	平均 Mean
CK		4.98 c	7.44 c		9.47 c	11.91 c		187.5 c	99.5 d	
KNO_3	4.0	16.12 b	17.68 b	20.08 a	16.34 b	21.14 b	22.00 b	252.3 b	260.6 b	252.70 a
	8.0	23.46 a	39.52 a		25.79 a	29.87 a		271.1 a	305.8 a	
	16.0	14.44 b	9.28 c		20.19 b	18.66 b		239.4 b	187.0 c	
K_2SO_4	4.0	9.76 b	20.74 b	16.17 b	32.97 b	24.58 a	25.71a	216.7 b	237.3 a	236.55 a
	8.0	18.52 a	32.20 a		45.35 a	24.73 a		268.8 a	252.9 a	
	16.0	6.28 c	9.52 c		13.83 c	12.81 b		225.0 b	185.4 b	
平均 Mean		12.32 b	17.97 a		21.68 a	19.46 b		235.2 a	203.5 b	

F 值 *F* value

项目 Item	PAL 活性 PAL activity	PPO 活性 PPO activity	POD 活性 POD activity
钾水平 K rate (KR)	21.82**	17.78**	4.84**
钾肥品种 K variety (KV)	1.59	1.70	0.31
番茄品种 Tomato cultivars(TC)	6.58*	5.54*	0.05
钾水平×钾肥品种 KR×KV	0.49	2.90*	0.11
钾水平×番茄品种 KR×TV	2.65*	1.87	0.42
钾肥品种×番茄品种 KV×TC	0.61	1.46	0.04
钾水平×钾肥品种×番茄品种 KR×KV×TC	0.40	0.82	0.16

注(Note)：ZZ106—Zhongza106；MF802—Maofen802. 同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level. * 和 ** 分别表示在0.05 和0.01 水平显著 Indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

POD 活性的峰值；此外，施钾还有利于增加茎髓中固有木质素的含量。本研究结果也表明，施钾有利于番茄叶片和根系 PAL、POD、PPO 活性的提高以及总酚、类黄酮和木质素的合成，尤其在“中杂 106”番茄品种中表现更明显。段榕琦等[31]研究认为低钾处理的 PAL 活性并不上升，反而略有下降，高钾处理叶片中 POD 和 PPO 的活性高于低钾处理，从而高浓度钾离子培养的小麦抗病性更强。而本实验结果表明，在钾倍增浓度(8.0 mmol/L)处理下番茄地上部和根系的酚类物质代谢最活跃，供钾不足或过量均会降低代谢酶的活性以及影响酚类物质和木质素的含成，这说明番茄植株体内酚类物质、木质素代谢的强弱与植株体内钾素水平不完全一致，这与 Vijaya[32]、刘大会等[33]的研究结果相似。产生这种现象可能是由于在钾过量浓度(16.0 mmol/L)处理中，植株中钾与钙、镁等阳离子之间存在着拮抗作用，施钾过高会降低植株的 Ca/K、Mg/K，导致植株养分不平衡，影响了植物的次生代谢过程。

低钾胁迫可以激发植株保护性酶活性的增加，王晓光等[34]研究认为，适度低钾胁迫会激发大豆植株保护酶活性，本试验也得到了类似的结果，两个番茄品种在缺钾处理(CK)下，叶片 POD 活性均显著高于正常浓度，这是由于在低钾营养

表6 不同钾肥处理对不同品种番茄根系次生代谢相关产物的影响

Table 6 Effects of different potassium treatments on the contents of secondary metabolites of roots in two tomato cultivars

钾肥处理 K treatment (mmol/L)		总酚含量(mg/g, FW) Total phenol content			类黄酮含量(OD_{325}/g, FW) Flavnonid content			木质素含量(OD_{280}/g, FW) Lignin content		
		中杂106 ZZ106	毛粉802 MF802	平均 Mean	中杂106 ZZ106	毛粉802 MF802	平均 Mean	中杂106 ZZ106	毛粉802 MF802	平均 Mean
CK		0.86 c	0.75 c		1.69 c	2.14 b		1.78 b	0.77 c	
KNO_3	4.0	2.13 b	2.45 a	2.66 a	4.49 b	3.88 a	4.14 a	1.93 b	2.35 b	2.24 a
	8.0	3.16 a	3.70 a		6.43 a	4.06 a		2.93 a	2.86 a	
	16.0	2.98 a	1.53 b		2.14 c	3.84 a		1.70 b	1.69 b	
K_2SO_4	4.0	1.20 b	2.10 a	2.22 b	2.31 b	2.25 b	3.43 b	1.82 b	1.39 b	2.04 b
	8.0	3.93 a	2.24 a		6.85 a	3.89 a		2.84 a	2.38 a	
	16.0	2.21 b	1.63 b		2.86 b	2.41 b		1.76 b	2.09 a	
平均 Mean		2.35 a	2.05 b		3.56 a	3.08 b		2.11 a	1.93 a	

项目 Item	*F*值 *F* value 总酚含量 Total phenol content	类黄酮含量 Flavnonid content	木质素含量 Lignin content
钾水平 K rate (KR)	14.42**	8.70**	4.78**
钾肥品种 K variety (KV)	3.69*	5.99*	1.05
番茄品种 Tomato cultivars(TC)	0.19	2.99	0.06
钾水平×钾肥品种 KR×KV	0.61	1.52	0.80
钾水平×番茄品种 KR×TV	1.54	1.10	0.08
钾肥品种×番茄品种 KV×TC	0.38	4.23*	0.29
钾水平×钾肥品种×番茄品种 KR×KV×TC	2.62*	1.10	0.19

注(Note): ZZ106—Zhongza106; MF802—Maofen802. 同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level. * 和 ** 分别表示在0.05和0.01水平显著 Indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

胁迫下植物产生更多活性氧,过氧化物酶(POD)能够将 H_2O_2 转化为 H_2O 和 O_2,是植物对逆境的应激反应,但缺钾处理番茄根部没有出现这种情况。吴敏等[35]研究认为不同钾水平处理巴西橡胶树幼苗各器官中的POD酶活性差异不显著,而本实验中番茄根系的POD活性远远高于植株叶片。

3.3 不同钾肥品种对番茄酚类物质代谢的影响

施用 KNO_3 处理番茄地上部和根系的PAL活性、总酚、类黄酮和木质素含量均高于 K_2SO_4 处理,这可能是由于氮、钾元素共同作用使硝酸钾促进番茄叶片酚类代谢的能力优于硫酸钾。卢国理等[36]研究认为适度氮素供给也能提高植株叶片总酚、类黄酮含量。然而,施用 KNO_3 的植株地上部和根系的PPO活性显著低于施用 K_2SO_4,这可能是由于 NO_3^- 浓度过量不利于番茄植株PPO活性的提高。在实际生产中,大多注重氮、磷肥的施用,当氮肥用量过高时,钾素提高作物的抗病能力的作用受到抑制。刘玲玲等[37]研究认为过量施氮处于主导地位时,其产生的副作用无法通过施钾来消除,而在氮肥管理适宜的条件下,钾肥具有降低稻瘟病的发病率和病情指数的作用。

综上所述,钾倍增浓度(8.0 mmol/L)处理下番茄生长发育最佳,酚类物质代谢最活跃,供钾不足或过量均会降低代谢酶的活性以及影响酚类物质和木质素的含成。施用 K_2SO_4 植株鲜重、干重、植株钾含量均显著高于 KNO_3,但 KNO_3 处理的番茄PAL活性、总酚、类黄酮、木质素含量以

及根部 POD 活性均高于 K_2SO_4。番茄品种“中杂 106”的代谢酶活性及代谢产物、鲜重、干重、叶片钾含量均显著高于“毛粉 802”,但根系钾含量显著低于“毛粉 802”。K_2SO_4 比 KNO_3 更能促进番茄植株的生长发育,但施用 KNO_3 的处理番茄植株酚类物质代谢能力优于 K_2SO_4。“中杂 106”品种的生长发育及酚类物质代谢能力均优于“毛粉 802”。

参 考 文 献:

[1] 喻景权. 蔬菜设施栽培可持续发展中的连作障碍问题[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31 (1): 124-126.
Yu J Q. On the reasons of continuous cropping obstacles in vegetable facility gardening [J]. J. Shenyang Agric. Univ., 2000, 31 (1): 124-126.

[2] 张宇, 刘世琦, 张自坤, 等. 苯丙烷代谢与嫁接黄瓜抗南方根结线虫的关系[J]. 中国蔬菜, 2010, (22): 54-58.
Zhang Y, Liu S Q, Zhang Z K *et al*. Relationship between phenylpropanes metabolism and grafted cucumber resistance to southern root-knot nematode [J]. China Veget., 2010, (22): 54-58.

[3] 郭红莲, 程根武, 陈捷, 等. 玉米灰斑病抗性反应中酚类物质代谢作用的研究[J]. 植物病理学报, 2003, 33(4): 342-346.
Guo H L, Cheng G W, Chen J *et al*. The function of phenolic metabolism in resistant mechanism of gray leaf spot of corn [J]. Acta Phytopathol. Sin., 2003, 33(4): 342-346.

[4] 徐小明, 徐坤, 于芹. 茄子砧木根系苯丙烷代谢与抗南方根结线虫水平的关系[J]. 植物保护学报, 2008. 35(1): 43-46.
Xu X M, Xu K, Yu Q. The relationship between resistance to meloidogyne incognita and phenylpropanes metabolism in roots of eggplant rootstock[J]. Acta Phytophyl. Sin., 2008, 35 (1): 43-46.

[5] 史娟, 杨为之. 葡萄体内苯丙烷代谢与其对霜霉病抗性的关系[J]. 西北农业学报, 2006, 15(4): 100-104.
Shi J, Yang W Z. The relation between metabolism of phenylalanine in grapevine and resistance of grapevine to downy mildew[J]. Acta Agric. Bor-Occid. Sin., 2006, 15 (4): 100-104.

[6] 陈玉惠, 叶建仁, 魏初奖. 松材线虫侵染对马尾松苯丙烷类代谢的影响[J]. 林业科学, 2006, 42(2): 73-77.
Chen Y H, Ye J R, Wei C J. Effect of pine wood nematode (PWN) infection on phenylpropanes metabolism in masson pine seedlings[J]. Sci. Silv. Sin., 2006, 42(2): 73-77.

[7] Tobin L P, Verna J H. Electrolyte leakage, lipoxygenase, and lipid peroxidation induced in tomato leaf tissue by specific and nonspecific elicitors from *Cladosporium fulvum* [J]. Plant Physiol., 1989, 90: 867-875.

[8] Awad M A, de Jager A. Relationship between fruit nutrients and concentrations of flavonoids and chlorogenic acid in 'Elstar' apple skin [J]. Sci. Hortic., 2002, 92: 265-276.

[9] Heckman J R. Corn stalk rot suppression and grain yield response to chloride [J]. J. Plant Nutr., 1998, 21: 149-155.

[10] Sanogo S, Yang X B. Relation of sand content, pH, and potassium and phosphorus nutrition to the development of sudden death syndrome in soybean [J]. Can. J. Plant Pathol., 2001, 23: 174.

[11] 贾伯华. 氯离子对农作物生理作用的评述[J]. 科技通报, 1995, 11(3): 175-179.
Jia B H. Review of chlorine on to crops physiological function [J]. Bull. Sci. Technol., 1995, 11(3): 175-179.

[12] Enge R E, 白朴. 氯肥对冬小麦产量、粒重和抗病性的影响[J]. 国外农学: 麦类作物, 1995, (6): 10-12.
Effect of chlorine fertilizer on wheat yield, grain weight and disease resistances [J]. Foreign Agric.: Wheat Crops, 1995, (6): 10-12.

[13] 薛应龙, 王敬文. 植物苯丙氨酸解氨酶的研究[J]. 植物生理学报, 1982, 8(1): 35-41.
Xue Y L, Wang J W. Research of plant PAL[J]. Acta Phytophysiol. Sin., 1982, 8(1): 35-41.

[14] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 四川: 四川科技出版社, 2003. 115-117.
Xiong Q E. Tutorial of plant physiology experiments[M]. Sichuan: Sichuan Science and Technology Press, 2003. 115-117.

[15] 朱广廉, 钟诲文, 张爱琴. 植物生理学实验[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990. 51-249.
Zhu G L, Zhong H W, Zhang A Q. Plant physiology experiments[M]. Beijing: Beijing University Press, 1990. 51-249.

[16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 70-97.
Li H S. Principle and technology of plant physiology and biochemistry experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 70-97.

[17] Sancho M A, Forchetti S M, Pliego F *et al*. Peroxidase activity and isoenzymes in the culture medium of NaCl adapted tomato suspension cells[J]. Plant Cell Tissue Org. Cult., 1996, 44: 161-167.

[18] 叶协锋, 朱海滨, 靳冬梅. 不同种类钾肥对烤烟生长过程中几种酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2007, 22 (2): 67-70.
Ye X F, Zhu H B, Jin D M. Influence of different potassium fertilizer on some enzyme activities of growing flue-cured tobacco[J]. Acta Agric. Boreali-Sin., 2007, 22(2): 67-70.

[19] 邓兰生, 林翠兰, 龚林, 等. 滴施不同钾肥对马铃薯生长及产量的影响[J]. 华南农业大学学报, 2010, 31 (2): 12-14.

Deng L S, Lin C L, Gong L *et al*. Effect of different potassium fertilizers on growth and production of potato under fertigation[J]. J. South China Agric. Univ., 2010, 31(2): 12-14.

[20] Higashi D, Shimaji H, Takaich I. Effects of diurnal control in the mineral concentration of nutrient solution on tomato yield and nutrient absorption in hydroponics [J]. Acta Hortic., 1997, 440: 326-331.

[21] Chung S J, Seo B S, Lee B S. Effects of nitrogen, potassium levels and their interaction on the growth and development of hydroponically grown tomato [J]. J. Jap. Soc. Hortic. Sci., 1992, 33: 244-251.

[22] 刘汝亮，李友宏，王芳，等. 两种钾源对马铃薯养分累积和产量的影响[J]. 西北农业学报，2009，18(1): 143-146.
Liu R L, Li Y H, Wang F *et al*. Effect of different style potassium fertilizer on potato nutrient elements accumulation and yield[J]. Acta Agric. Bor-Occid. Sin., 2009, 18(1): 143-146.

[23] 冯文强，涂仕华，成本喜，等. 氮、钾肥类型对烟草产量及吸钾量差异的研究[J]. 西南农业学报，2008，21(1): 117-120.
Feng W Q, Tu S H, Cheng B X *et al*. Effect of different N and K carriers on yield and K uptake by tobacco [J]. Southwest China J. Agric. Sci., 2008, 21(1): 117-120.

[24] 韩锦峰，杨素勤，王永华，等. 不同相伴阴离子钾肥对烤烟光合特性、钾含量及化学成分的影响[J]. 中国烟草学报，2002，8(3): 22-25.
Han J F, Yang S Q, Wang Y H *et al*. The effects of different potassium fertilizer on potassium content and photosynthetic characteristics in flue-cured tobacco leaves [J]. J. China Tob., 2002, 8(3): 22-25.

[25] Lozovaya V V, Lygin A V, Hartman G L, Widholm J M. Biochemical response of soybean roots to fusarium solanif. SP. glyeines infection [J]. Crop Sci., 2004, 44: 819-826.

[26] Terry L A, Joyee D C, Adikaram N K. Preformed antifungal compounds in Strawberry fruit and flower tissues [J]. Postharvest Biol. Technol., 2004, 31: 201-212.

[27] Wurms K V, George M P, Lauren D R. Involvement of phenolic compounds in host resistance against botrytis cinerea leaves of the two commercially important kiwifruit cultivar [J]. New Zealand J. Crop Hortic. Sci., 2005, 31: 231-233.

[28] Sharama S R, Kolte S J. Effect of soil-applied NPK fertilizers on severity of black spot disease (*Alternaria brassicae*) and yield of oil seed rape [J]. Plant soil, 1994, 167: 313-320.

[29] Ruan J, Wu X, Hardter R. Effects of potassium and magnesium nutrition on quality components of different types of tea[J]. J. Sci. Food Agric., 1999, 79: 47-51.

[30] 李文娟，何萍，金继运. 氯化钾对玉米茎腐病抗性反应中酚类物质代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(3): 508-514.
Li W J, He P, Jin J Y. Effect of potassium chloride on phenolic metabolism in resistant response to corn stalk rot [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(3): 508-514.

[31] 段榕琦，张祖新，杨淑华，等. 钾对小麦叶片感染叶锈病的减轻作用及对几种酶活性的影响[J]. 南开大学学报(自然科学)，2000，33(3): 89-92.
Duan R Q, Zhang Z X, Yang S H *et al*. The reducing effect of potassium on severity of wheat leaf rust and its effects on activities of several enzymes[J]. Acta Sci. Natur. Univ. Nankaiensis, 2000, 33(3): 89-92.

[32] Vijaya B C, Rama R G, Reddykb. Effect of nitrogen and potassium nutrition on sheath rot incidence and phenol content in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Ind. J. Plant Physiol., 2001, 6: 254-257.

[33] 刘大会，杨特武，朱端卫. 不同钾肥用量对福田河白菊产量和质量的影响[J]. 中草药，2007，38(1): 120-124.
Liu D H, Yang T W, Zhu D W. Effect of potassium application at various rates on yield and quality of flower in Chrysaf-themum morifolium from Futianhe region[J]. Chin. Trad. Herbal Drug, 2007, 38(1): 120-124.

[34] 王晓光，王岩，李兴涛. 低钾胁迫对大豆叶片膜脂过氧化及保护酶活性的影响[J]. 中国油料作物学报，2010，32(4): 512-517.
Wang X G, Wang Y, Li X T. Effects of low potassium on membrane lipid peroxidation and protective enzyme activity of soybean leaves[J]. Chin. J. Oil Crop Sci., 2010, 32(4): 512-517.

[35] 吴敏，何鹏，韦家少. 钾水平对巴西橡胶树幼苗MDA含量和保护酶活性的影响[J]. 热带作物学报，2010，3(31): 376-380.
Wu M, He P, Wei J S. Influence of potassium levels on MDA content and activities of protective enzymes on hevea brasiliensis seedlings[J]. Chin. J. Trop. Crops, 2010, 3(31): 376-380.

[36] 卢国理，汤利，楚轶欧. 单/间作条件下氮肥水平对水稻总酚和类黄酮的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(6): 1064-1069.
Lu G L, Tang L, Chu Y O. Effect of nitrogen levels on changes of phenol and flavonoid contents under rice monocropping and intercropping system [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(6): 1064-1069.

[37] 刘玲玲，彭显龙，刘元英，等. 不同氮肥管理条件下钾对寒地水稻抗病性及产量的影响[J]. 中国农业科学，2008，41(8): 2258-2262.
Liu L L, Peng X L, Liu Y Y *et al*. Effects of K on rice blast and yield under different nitrogen managements in cold area of China[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(8): 2258-2262.