

氨基酸态氮和硝态氮混合营养下番茄生长及其生态化学计量学特征^①

袁 伟^{1,2,3,4}, 董元华^{1,2*}, 王 辉^{1,2}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 中国科学院南京土壤研究所-

香港浸会大学土壤与环境联合开放实验室, 南京 210008; 3 中国科学院研究生院, 北京 100049;

4 江苏省农业科学院农业经济与信息研究所, 南京 210014)

Growth of Tomato and Its Ecological Stoichiometry Characteristics Under Hydroponic Condition with Mixture Nitrogen Nutrition of Amino Acid and Nitrate

YUAN Wei^{1,2,3,4}, DONG Yuan-hua^{1,2}, WANG Hui^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 Joint Open Laboratory of Soil and the Environment, Institute of Soil Science and Hongkong Baptist University, Nanjing 210008, China;

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4 Institute of Agricultural Economy and Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

摘 要: 在水培条件下, 设计了 7 种试验处理其 N 源分别为 NO_3^- -N、 NO_3^- -N + 谷氨酸态氮、 NO_3^- -N + 苯丙氨酸态氮、 NO_3^- -N + 谷氨酸态氮 + 苯丙氨酸态氮、谷氨酸态氮、苯丙氨酸态氮、谷氨酸态氮 + 苯丙氨酸态氮, 这些处理中除了 N 素形态不同外, 其 N、P、K 的含量均相同。研究不同处理对番茄生长的影响, 并在此基础上利用生态化学计量学的方法研究了氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合营养下番茄生长及其与生态化学计量学特征之间相关关系。研究表明, 番茄植株光合速率与其地上部 C/P 之间存在显著正相关关系; 番茄地上部硝酸盐含量、亚硝酸盐含量、游离氨基酸含量、硝酸还原酶活性和谷氨酰胺合成酶活性与其地上部 N/P、C/N、C/P 和 P/K 之间均不存在显著相关关系; 和 N 源为 NO_3^- -N 的处理相比, 氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合营养促进番茄(地上部和根系)生长, 两种氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合的营养效应好于单一氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合的营养效应。

关键词: 生态化学计量学; 氨基酸态氮; 硝态氮; 番茄; 生长

中图分类号: S141

许多报道指出 N 肥的过量施用可使蔬菜体内硝酸盐含量和亚硝酸盐含量超标, 其中叶菜类尤为严重^[1]。近年来的研究表明以氨基酸态氮代替肥料中部分的 NO_3^- -N 可减轻肥料 N 对环境的压力, 降低蔬菜体内的硝酸盐含量和亚硝酸盐含量^[2-4], 提高蔬菜食用的安全性。另外, 氨基酸肥料能促进作物的生长, 但 N 源为单一氨基酸却抑制作物生长^[5]。在中国, 番茄栽培面

积较广, 是人们经常食用的一种蔬菜。一些研究结果表明氨基酸态氮能被番茄直接吸收且能提高番茄的产量^[6-7], 但关于不同形态 N 混合营养是否能提高番茄产量和品质尚未有系统研究, 此外, 番茄是蔬菜作物中首个进行基因组测序的, 且基因组测序即将完成, 是

①基金项目: 科技部国家农业科技成果转化资金项目(2009GB24910540)、江苏省科技支撑计划项目(BE2009698)、国家公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903011-02)和国家科技支撑计划项目(2008BADA7B01)资助。

* 通讯作者(yhdong@issas.ac.cn)

作者简介: 袁伟(1979—), 女, 江苏徐州人, 博士研究生, 主要从事环境污染与生态修复方向研究。E-mail: wyuan@issas.ac.cn

(2009GB24910540)、江苏省科技支撑计划项目(BE2009698)、国家公

管前人进行了番茄氨基酸营养方面的研究工作^[8-10],但

是在水培条件下应用生态化学计量学研究氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合营养对番茄生长和品质影响的工作开展较少。因此,本研究以番茄为材料,在水培试验条件下以 3 种 N 素形态即两种不同的氨基酸态氮和 NO_3^- -N 之间进行相互配比,以传统农化分析和生理生化分析为技术平台,研究了氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合营养下(不同形态 N)番茄体内 C、N、P、K 的化学计量学特征及其与番茄生长的相关关系,为进一步研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 植物材料和培养条件

番茄(*Solanum lycopersicum* L)为上海合作 906,用 20 g/kg 次氯酸钠消毒 30 min,催芽露白后播在洗净并灭菌的石英砂中,10 天后移苗进行试验处理。

1.2 试验处理

水培的基本营养液为 1/5 Hoagland 营养液,N 素总水平为 0.6 mmol/L,P 素总水平为 0.2 mmol/L,K 素总水平为 0.4 mmol/L,而 N 源不同,分别为 NO_3^- -N、谷氨酸态氮(Glu)、苯丙氨酸态氮(Phe),其他元素均相同,每 3 天换一次营养液,每天调 pH = 6.0。水培的试验共设 7 个处理:T1(1/5 Hoagland, NO_3^- -N 0.6 mmol/L),T2(1/5 Hoagland, NO_3^- -N 0.3 mmol/L + Glu 0.3 mmol/L),T3(1/5 Hoagland, NO_3^- -N 0.3 mmol/L + Phe 0.3 mmol/L),T4(1/5 Hoagland, NO_3^- -N 0.3

mmol/L + Glu 0.15 mmol/L + Phe 0.15 mmol/L),T5(Glu 0.6 mmol/L),T6(Phe 0.6 mmol/L),T7(Glu 0.30 mmol/L + Phe 0.30 mmol/L)。3 周后采收进行分析处理。

1.3 番茄体内生长及生理生化指标的测定

番茄的总根长、主根长、侧根长和根系表面积采用 WinRHIZo 根系分析仪测定;净光合速率采用 LI-6400 (USA) 光合仪测定;番茄植株游离氨基酸含量采用茚三酮比色法测定^[11];番茄植株硝酸盐和亚硝酸盐含量采用分光光度法测定^[12];番茄植株和根中硝酸还原酶活性采用 Aslam 和 Huffaker^[13]的方法测定;番茄植株和根中谷氨酰胺合成酶活性采用 Taira 等^[14]方法测定;番茄植株全 N、全 P、全 K、总有机 C 测定见文献[15]。番茄植株 N/P, C/N, C/P 和 P/K 化学计量比均分别为 N、P、C 和 K 含量摩尔分子比。每次测定取样品 3 个,每个样品测 3 次。

1.4 统计方法

所有数据采用 SPSS13.0 统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 番茄植株氮、磷、钾、碳含量和生长参数

表 1 结果表明:番茄植株 N、P、C、K 含量在 7 个处理之间均无显著差异。表 2 的结果表明:和 T1 处理相比,T2 和 T3 处理下的光合和地上部鲜重无显著差异,而 T4 处理显著增加,同时 T5、T6 和 T7 处理显著降低了光合速率和地上部鲜重。此外,和 T1 处理相比,其他 6 个处理显著降低了番茄地上部硝酸盐和亚硝酸盐含量而氨基酸总量显著升高。7 个处理之间谷氨酰胺合成酶活性无显著差异;而和 T1 处理相比,其他 6 个处理显著降低了番茄地上部的硝酸还原酶活性,而以 T5、T6 和 T7 的处理最低。

表 1 不同处理番茄地上部 N、P、K、C 含量 (g/kg)

处理	N 含量	P 含量	K 含量	C 含量
T1	42.51 ± 3.49 a	8.34 ± 0.24 a	50.18 ± 1.85 a	412.62 ± 24.21 a
T2	43.63 ± 2.21 a	8.38 ± 0.19 a	50.24 ± 2.14 a	445.39 ± 22.13 a
T3	42.27 ± 4.78 a	8.41 ± 0.15 a	50.19 ± 1.53 a	441.21 ± 18.96 a
T4	43.81 ± 5.03 a	8.35 ± 0.22 a	50.27 ± 2.26 a	443.34 ± 25.03 a
T5	41.12 ± 1.84 a	8.31 ± 0.27 a	50.21 ± 1.87 a	409.86 ± 16.27 a
T6	40.19 ± 3.19 a	8.28 ± 0.20 a	50.14 ± 2.09 a	411.75 ± 22.75 a
T7	42.07 ± 2.52 a	8.23 ± 0.29 a	50.13 ± 2.11 a	405.33 ± 20.33 a

表 2 番茄地上部的生长参数

处理	鲜重 (g/株)	光合速率 (CO_2 , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	氨基酸含量 (mg/kg)	硝酸盐含量 (mg/kg)	亚硝酸盐含量 (mg/kg)	硝酸还原酶活性 (NO_2 , nmol/(g·min))	谷氨酰胺合成酶活性 (GHA, nmol/(g·min))
T1	3.75 ± 0.15 b	18.50 ± 0.51 b	38.1 ± 2.3 c	130.81 ± 100.70 a	1.81 ± 0.15 a	27.89 ± 2.01 a	510.13 ± 59.84 a

T2	3.90 ± 0.10 b	19.00 ± 0.21 b	52.0 ± 5.1 b	830.23 ± 52.20 c	1.24 ± 0.12 b	21.04 ± 1.96 b	519.74 ± 54.62 a
T3	3.86 ± 0.15 b	19.10 ± 0.25 b	51.4 ± 3.0 b	865.49 ± 36.52 c	1.27 ± 0.10 b	21.96 ± 1.14 b	529.50 ± 65.05 a
T4	4.20 ± 0.10 a	20.60 ± 0.62 a	55.3 ± 2.0 b	800.62 ± 27.52 c	1.05 ± 0.12 b	20.11 ± 2.11 b	518.89 ± 52.72 a
T5	3.50 ± 0.32 c	17.10 ± 0.26 c	68.9 ± 3.2 a	925.22 ± 8.21 b	0.52 ± 0.02 c	15.23 ± 1.52 c	509.75 ± 57.91 a
T6	3.12 ± 0.26 c	17.00 ± 0.51 c	69.1 ± 1.6 a	951.14 ± 8.21 b	0.51 ± 0.02 c	15.82 ± 0.98c	500.06 ± 55.68a
T7	3.23 ± 0.27 c	16.50 ± 0.34 c	68.4 ± 2.7 a	917.08 ± 6.52 b	0.54 ± 0.01 c	15.50 ± 1.23c	515.11 ± 50.89a

亚硝酸盐含量而氨基酸总量显著升高。7 个处理之间谷氨酰胺合成酶活性无显著差异；而和 T1 处理相比，其他 6 个处理显著降低了番茄地上部的硝酸还原酶活性，而以 T5、T6 和 T7 的处理最低。

——2

2.2 番茄地上部生长参数及与其地上部生态化学计量学特征的相关关系

表 3 的结果表明：番茄植株光合速率与其地上部 N/P、C/N 和 P/K 之间存在正相关趋势，但是相关关系不显著；番茄植株光合速率与其地上部 C/P 之间存在显著正相关关系 ($p<0.05$)。番茄地上部硝酸盐含量、亚硝酸盐含量、游离氨基酸含量、硝酸还原酶活性和谷氨酰胺合成酶活性与其地上部 N/P、C/N、C/P 和 P/K 之间均不存在显著相关关系。

2.3 番茄根系生长及与其地上部生态化学计量学特征的相关关系

2.3.1 番茄根系的生长参数 表 4 的结果表明：和 T1 处理相比，T2、T3 和 T4 处理显著促进了根系干鲜重，而 T5、T6 和 T7 处理显著降低了根系干鲜重。和

T1 处理相比，其他 6 个处理显著降低了番茄的主根长。但是，T2、T3 和 T4 处理下番茄的总根长、侧根长和根系表面积显著增加，同时以 T4 处理的增加最多，而 T5、T6 和 T7 显著降低了番茄的总根长、侧根长和根系表面积。7 个处理下谷氨酰胺合成酶活性无显著差异，而和 T1 处理相比，其他 6 个处理显著降低了番茄根中的硝酸还原酶活性，而以 T5、T6 和 T7 的处理最低。

2.3.2 番茄根系的生长参数与其地上部生态化学计量学特征的相关关系 表 5 的结果表明：番茄根系鲜重和干重与其地上部 N/P 之间均存在显著正相关关系 ($p<0.05$)；番茄根鲜重与其地上部 C/P 之间存在极显著正相关关系 ($p<0.01$)，而番茄根干重与其地上部 C/P 之间存在显著正相关关系 ($p<0.05$)；番茄根系鲜重和干重与其地上部 C/N 和 P/K 之间均不存在显著相关关系。番茄总根长、侧根长和根表面积与其地上部 N/P 之间均存在显著正相关趋势；番茄总根长和侧根长与其地上部 P/K 之间均存在显

表 3 番茄地上部的生长参数与其地上部生态化学计量学特征的相关系数

	光合速率	硝酸盐含量	亚硝酸盐含量	氨基酸含量	硝酸还原酶活性	谷氨酰胺合成酶活性
N/P	0.4544	0.0406	0.2275	0.0035	0.1606	0.3357
C/N	0.5207	0.1583	0.0386	0.0430	0.0400	0.0006
C/P	0.7309*	0.3666	0.1312	0.1360	0.0728	0.5319
P/K	0.5471	0.0089	0.4756	0.4649	0.3961	0.4396

注： ** 表示 $p<0.01$ 显著水平，*表示 $p<0.05$ 显著水平，下表同。

2.3 番茄根系生长及与其地上部生态化学计量学特征的相关关系

2.3.1 番茄根系的生长参数——表 4 的结果表明：和 T1 处理相比，T2、T3 和 T4 处理显著促进了根系干鲜重，而 T5、T6 和 T7 处理显著降低了根系干鲜重。和 T1 处理相比，其他 6 个处理显著降低了番茄的主根长。但是，T2、T3 和 T4 处理下番茄的总根长、侧根长和根系表面积显著增加，同时以 T4 处理的增加最多，而 T5、T6 和 T7 显著降低了番茄的总根长、侧根长和根系表面积。7 个处理下谷氨酰胺合成酶活性无显著差异，而和 T1 处理相比，其他 6 个处理显著降低了番茄根中的硝酸还原酶活性，而以 T5、T6 和 T7 的处理最低。

表 4 番茄根系的生长参数

处理	鲜重	干重	硝酸还原酶活性	谷氨酰胺合成酶活性	总根长	主根长	侧根长	根表面积
----	----	----	---------	-----------	-----	-----	-----	------

	(g/株)	(mg/株)	(NO ₂ , nmol/(g•min))	(GHA, nmol/(g•min))	—(cm)	(cm)	(cm)	(cm ²)
T1	0.60 ± 0.03 c	14 ± 0.62 bc	25.04 ± 1.89 a	448.85 ± 39.97 a	80.11 ± 5.96 c	12.08 ± 1.02 a	67.87 ± 5.56 bc	5.24 ± 0.39 b
T2	0.68 ± 0.01 b	15 ± 0.51 b	18.11 ± 1.41 b	460.21 ± 42.02 a	92.89 ± 5.11 b	10.11 ± 0.54 b	83.12 ± 7.32 a	6.17 ± 0.52 a
T3	0.66 ± 0.02 b	15 ± 0.48 b	18.87 ± 2.01 b	479.81 ± 43.18 a	92.07 ± 4.08 b	9.80 ± 0.76 b	82.21 ± 6.13 a	6.27 ± 0.64 ab
T4	0.73 ± 0.02 a	17 ± 0.67 a	17.09 ± 1.66 b	471.03 ± 35.73 a	105.78 ± 4.89 a	10.12 ± 0.33 b	95.68 ± 8.09 a	7.11 ± 0.57 ab
T5	0.51 ± 0.02 e	13 ± 0.38 d	11.13 ± 1.05 c	485.12 ± 42.51 a	68.11 ± 4.14 d	9.64 ± 0.56 b	58.04 ± 4.91 c	4.03 ± 0.34 c
T6	0.50 ± 0.03 e	13 ± 0.44 d	12.12 ± 0.99 c	479.24 ± 45.23 a	67.93 ± 5.04 d	9.18 ± 0.95 b	57.21 ± 3.84 dc	4.12 ± 0.31 c
T7	0.55 ± 0.01 d	14 ± 0.43 c	11.49 ± 0.95 c	491.99 ± 50.19 a	66.15 ± 5.10 d	9.47 ± 0.87 b	57.35 ± 5.01 c	3.93 ± 0.28 c

2.3.2 番茄根系的生长参数与其地上部生态化学计量学特征的相关关系——表 5 的结果表明：番茄根系鲜重和干重与其地上部 N/P 之间均存在显著正相关关系 ($p<0.05$)，番茄根鲜重与其地上部 C/P 之间存在极显著正相关关系 ($p<0.01$)，而番茄根干重与其地上部 C/P 之间存在显著正相关关系 ($p<0.05$)；番茄根系鲜重和干重与其地上部 C/N 和 P/K 之间均不存在显著相关关系。番茄总根长、侧根长和根表面积与其地上部 N/P 之间均存在显著正相关趋势；番茄总根长和侧根长与其地上部 P/K 之间均存在显著正相关趋势，而番茄根表面积与其地上部 P/K 之间存在显著正相关关系 ($p<0.05$)；番茄总根长、侧根长和根表面积与其地上部 C/P 之间均存在极显著正相关关系 ($p<0.01$)；番茄总根长、侧根长和根表面积与其地上部 C/N 之间均不存在显著相关关系。番茄主根长、根中硝酸还原酶活性和谷氨酰胺合成酶活性与其地上部 N/P、C/N、C/P 和 P/K 之间均不存在显著相关关系。

表 5 番茄根系的生长参数与其地上部生态化学计量学特征的相关系数

	根系鲜重	根系干重	总根长	主根长	侧根长	根表面积	硝酸还原酶活性	谷氨酰胺合成酶活性
N/P	0.7263*	0.7335*	0.5168	0.1342	0.5364	0.4837	0.1890	0.1941

	根系鲜重	根系干重	总根长	主根长	侧根长	根表面积	硝酸还原酶活性	谷氨酰胺合成酶活性
N/P	0.7263*	0.7335*	0.5168	0.1342	0.5364	0.4837	0.1890	0.1941
C/N	0.0074	0.0133	0.0147	0.2469	0.0131	0.0213	0.0336	0.0293
C/P	0.7800**	0.7415*	0.8528**	0.0029	0.8734**	0.8533**	0.1051	0.0943
P/K	0.4237	0.1912	0.5183	0.0972	0.4944	0.5899*	0.4360	0.2648
C/N	0.0074	0.0133	0.0147	0.2469	0.0131	0.0213	0.0336	0.0293
C/P	0.7800**	0.7415*	0.8528**	0.0029	0.8734**	0.8533**	0.1051	0.0943
P/K	0.4237	0.1912	0.5183	0.0972	0.4944	0.5899*	0.4360	0.2648

著正相关趋势，而番茄根表面积与其地上部P/K之间存在显著正相关关系 ($p<0.05$)；番茄总根长、侧根长和根表面积与其地上部C/P之间均存在极显著正相关关系 ($p<0.01$)；番茄总根长、侧根长和根表面积与其地上部C/N之间均不存在显著相关关系。番茄主根长、根中硝酸还原酶活性和谷氨酰胺合成酶活性与其地上部N/P、C/N、C/P和P/K之间均不存在显著相关关系。

3 结论与讨论

一些研究结果显示：①在水培条件下，当 NO₃⁻-N

的 20% 被甘氨酸或混合氨基酸取代后，洋葱体内硝酸盐含量显著降低，总 N 量显著增加^[16]；②在大田条件下，氨基酸替代 NO₃⁻-N 提高了蔬菜叶片可溶性糖和蛋白质含量^[3]。本文研究结果表明：在水培条件，当 NO₃⁻-N 的 50% 被谷氨酸态氮或苯丙氨酸态氮其中一种取代后，番茄地上部的光合和鲜重无显著差异而根系生长显著增加；当 NO₃⁻-N 的 50% 被这两种氨基酸混合取代后（各占 25%），番茄地上部的光合和鲜重及其根系生长显著增加。这些结果表明，在水培条件下氨基酸态氮和 NO₃⁻-N 混合营养促进番茄地上部和根系的生长，其中两种氨基酸态氮和 NO₃⁻-N 的混合营养比一种氨基酸态氮和 NO₃⁻-N 的混合营养效果要好。硝

酸还原酶和谷氨酰胺合成酶是植物 N 代谢的关键酶^[17]。本文的结果表明, 氨基酸态氮和 NO_3^- -N 的混合营养或单一氨基酸营养可降低番茄体内的硝酸还原酶活性。硝酸还原酶活性的降低可能与番茄地上部硝酸盐的含量较低有关, 也可能是番茄地上部较高的氨基酸反馈调节造成的。

应用生态化学计量学研究植物体内的元素比 (C、N、P、K) 一般只关心它们之间的具体比值和含量, 然后结合这些比值和含量的特征, 运用生态化学计量学的基本理论如元素平衡理论和生长速率理论来判断植物体内的养分平衡和生长的情况, 较少地关注供应元素的形态^[18-20]。例如, 从生长速率的理论来说, 生长快速的有机体通常具有较低的 N/P 比值。本研究的结果显示, 水培 7 种处理下番茄地上部 N、P、C、K 含量和 N/P、C/N、C/P 和 P/K 的比值均无显著差异, 但氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合营养显著促进番茄生长, 两种氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合的营养效应大于单一氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合的营养效应。这些结果表明应用生态化学计量学研究蔬菜体内的元素时, 除了关注元素的比值和含量外, 还应考虑供应元素的形态。

总之, 氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合营养促进番茄 (地上部和根系) 生长, 两种氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合的营养效应好于单一氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合的营养效应。氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合营养提高番茄的光合速率并与其地上部 C/P 之间存在显著正相关关系。氨基酸态氮和 NO_3^- -N 混合营养促进番茄的生长, 但是番茄地上部 N、P、C、K 含量和 N/P、C/N、C/P 和 P/K 的比值均无显著差异。

参考文献:

- [1] 黄东风, 王果, 李卫华, 邱孝煊. 施肥模式对蔬菜产量、硝酸盐含量及模拟土柱氮磷淋失的影响. 生态与农村环境学报, 2009, 25(2): 68-73
- [2] 袁伟, 董元华, 王辉. 植物氨基酸多元素肥料生物效应的研究进展. 土壤, 2009, 41(1): 16-20
- [3] 陈贵林, 高绣瑞. 氨基酸和尿素替代硝态氮对水培不结球白菜和生菜硝酸盐含量的影响. 中国农业科学, 2002, 35(2): 187-191
- [4] 王华静, 吴良欢, 陶勤南. 氨基酸部分取代硝态氮对小白菜硝酸盐累积的影响. 中国环境科学, 2004, 24(1): 19-23
- [5] 吴良欢, 陶勤南. 水稻氨基酸态氮营养效应及其机理研究. 土壤学报, 2000, 37(4): 464-473
- [6] Ge TD, Song SW, Roberts P, Jones DL, Huang DF, Iwasaki K. Amino acids as a nitrogen source for tomato seedlings: The use of dual-labeled (^{13}C , ^{15}N) glycine to test for direct uptake by tomato seedlings. Environmental and Experimental Botany, 2009, 66: 357-361
- [7] Arshad M. Response of *Zea Mays* and *Lycopersicon esculentum* to the ethylene precursors, L-methioine and L-ethionine applied to soil. Plant and soil, 1990, 122: 219-227
- [8] 高新昊, 张志斌, 郭世荣. 氮钾肥不同比例分段追施对日光温室番茄越冬长季节栽培产量与品质的影响. 土壤, 2007, 39(3): 465-468
- [9] 刘伟, 陈殿奎, 李式军. 氨基酸态氮对番茄产量、品质及风味的影响. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(3): 399-403
- [10] 王华静, 吴良欢, 陶勤南. 有机营养肥料研究进展. 生态环境, 2003, 12(1): 110-114
- [11] 汤章城主编. 现代植物生理学实验指南. 上海: 科学出版社, 1999: 91-102
- [12] 李劲峰, 虞贺新. 不同储藏条件下蔬菜硝酸盐及亚硝酸盐的变化. 浙江农业科学, 2008(4): 404-405
- [13] Aslam M, Huffaker RC. Role of nitrate and nitrite in the induction of nitrite reductase in leaves of barley seedlings. Plant Physiology, 1989, 91: 1 152-1 156
- [14] Taira M, Valtersson U, Burkhardt B. Arabidopsis thaliana GLN2-Encoded glutamine synthetase is dual targeted to leaf mitochondria and chloroplasts. Plant Cell, 2004, 16: 2 048-2 058
- [15] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146-226
- [16] Gunes A, Inal A, Aktas M. Reducing nitrate content of NET grown winter onion plants by partial replacement of NO_3^- with amino acid in nutrient solution. Scientia Horticulturae, 1996, 65: 203-208
- [17] 莫良玉, 吴良欢, 陶勤南. 高等植物 GS/GOGAT 循环研究进展. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 223-231
- [18] 高三平, 李俊祥, 徐明策, 陈熙, 戴洁. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片 N、P 化学计量学特征. 生态学报, 2007, 27(3): 947-952
- [19] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1 007-1 019
- [20] Zhang LX, Bai YF, Han XG. Application of N:P stoichiometry to ecology studies. Acta Botanica Sinica 2003, 45(9): 1 009-1 018