植物营养与肥料学报 2015,21(3):709-718 doi: 10.11674/zwyf.2015.0318
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 阈值的初步研究

梁 欢, 尚庆茂*
(农业部园艺作物生物学与种质创制重点实验室,中国农业科学院蔬菜花卉研究所,北京 100081)

摘要:【目的】NO_3^--N 阈值是氮营养状况的评价标准,是蔬菜苗期养分精准管理的重要依据,受品种、施肥、温度、光照等因素的影响。因此,研究不同品种、施肥和外界环境条件下番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)幼苗的组织 NO_3^--N 含量的变化程度,以明确番茄幼苗组织 NO_3^--N 阈值,为快速准确诊断幼苗养分状况提供依据。**【方法】**首先采用穴盘育苗试验,以番茄 17 个主栽品种为试材,采用水杨酸-硫酸比色法测定了不同组织 NO_3^--N 含量。在该试验基础上,选其中两个品种('佳红 4 号'和'中杂 105 号')继续进行穴盘育苗试验。设施 N(26、210、840 mg/L), P(4、31、248 mg/L), K(29、234、1875 mg/L), 温度(32℃/22℃、28℃/18℃、20℃/10℃), 光照(不遮荫、50%遮荫), 灌水时间(灌水后 2 h 取样、灌水后 10 h 取样、灌水后 24 h 取样)6 因素多水平试验,测定处理后番茄幼苗不同组织中的 NO_3^--N 含量。**【结果】**番茄幼苗同一品种不同组织 NO_3^--N 含量变化范围为 0.79~4.42 g/L,同一组织不同品种间 NO_3^--N 含量变化范围为 2.84~4.42 g/L,均达到差异极显著水平;与正常对照相比,氮盈余供应可使组织 NO_3^--N 含量提高 1.86 倍,而亏缺供应使组织 NO_3^--N 含量降低了 97.3%;磷、钾亏缺供应、低温、弱光条件下番茄幼苗组织 NO_3^--N 含量呈降低趋势,最大降低幅度达 49.6%,磷、钾盈余供应、高温、灌水时间则因组织 NO_3^--N 含量表现出不同的变化趋势。**【结论】**番茄幼苗组织 NO_3^--N 含量在多元因素的影响下波动变化。以番茄 17 个品种不同组织 NO_3^--N 含量为基础值,以环境条件作用最大增幅和最大减幅进行校正,获得番茄幼苗组织 NO_3^--N 含量阈值,即下胚轴 1.75~2.72 g/L、茎 2.07~4.04 g/L、第 1 叶位叶柄 2.18~4.83 g/L、第 1 叶位叶片 0.62~1.52 g/L、第 2 叶位叶柄 2.31~5.10 g/L、第 2 叶位叶片 0.73~1.50 g/L、第 3 叶位叶柄 2.79~4.09 g/L、第 3 叶位叶片 0.40~1.53 g/L、第 4 叶位叶柄 2.44~4.20 g/L、第 4 叶位叶片 0.40~2.13 g/L。

关键词: 番茄幼苗; 穴盘; NO_3^--N 阈值
中图分类号: S625.5+4; S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)03-0709-10

Preliminary study on NO_3^--N threshold in tomato seedlings grown in plug tray

LIANG Huan, SHANG Qing-mao*
(*Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops*, *Ministry of Agriculture*; *Institute of Vegetables and Flowers*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing 100081*, *China*)

Abstract:【Objectives】 The NO_3^--N threshold was an interpretation standard for N status and an important basis for vegetable seedling nutrient site-specific management, influenced by the cultivar, fertilizer, temperature, light intensity and other factors. Therefore, the NO_3^--N content change degree in tissues of tomato seedlings(*Lycopersicon esculentum* Mill.) under different varieties, fertilization and environmental conditions was studied, in order to obtain a NO_3^--N threshold in tissues of tomato plug seedlings. **【Methods】** Firstly, 17 tomato cultivars were used as materials to analysis the NO_3^--N content in different tissues by salicylic acid-sulfuric spectrometry. Then, 'Jiahong No. 4' and 'Zhongza No. 105' were chosen from the 17 cultivars to start the second plug tray experiment. The treatments include: three NPK rates(N 26, 210 and 840 mg/L, P 4, 31 and 248 mg/L, and K 29, 234 and 1875 mg/L); three temperatures (32℃/22℃, 28℃/18℃ and 20℃/10℃, day/night); two light intensity conditions (no shaded and 50% shaded); sampling times (2, 10 and 24 h after watering). The NO_3^--N contents in different

收稿日期: 2014-02-17 **接受日期:** 2014-10-16 **网络出版日期:** 2015-02-04
基金项目: 国家自然科学基金项目(31172001); 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-25); 公益性行业科研专项(201303014); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-IVFCAAS)资助。
作者简介: 梁欢(1990—),女,山西临汾人,硕士研究生,主要从事蔬菜苗期发育调控方面的研究。E-mail:lianghuanconf@126.com
* 通信作者 E-mail:shangqingmao@caas.cn

tissues were measured. 【**Results**】The NO_3^--N contents vary significantly among different cultivars and tissues. The NO_3^--N thresholds among different tissues of the same cultivar are from 0.79 to 4.42 g/L, and those in a same tissue of different cultivars are from 2.84 to 4.42 g/L. Compared to the NO_3^--N content in the seedlings supplied with normal N, the NO_3^--N content in the seedlings supplied with excessive N is increased by 1.86-fold, while in the seedlings fertilized with low N, the NO_3^--N content is reduced by 97.3%. Furthermore, the NO_3^--N contents in the seedlings are decreased under the low levels of P or K, or the low temperature or low light intensity. However, in the seedlings fertilized with excessive P or K, or exposed to high temperature, or sampled at different times after watering, the NO_3^--N contents display distinct changing patterns in different tissues. 【**Conclusions**】The NO_3^--N contents in tissues of tomato seedlings were fluctuated under different varieties, fertilization and environmental conditions. The basic values of the NO_3^--N contents of the 17 cultivars are corrected with these environmental factors. The NO_3^--N thresholds in tissues of tomato plug seedlings are 1.75-2.72 g/L in hypocotyls, 2.07-4.04 g/L in stems, 2.18-4.83 g/L in the first leaf petioles, 0.62-1.52 g/L in the first leaves, 2.31-5.10 g/L in the second leaf petioles, 0.73-1.50 g/L in the second leaves, 2.79-4.09 g/L in the third leaf petioles, 0.40-1.53 g/L in the third leaves, 2.44-4.20 g/L in the fourth leaf petioles, and 0.40-2.13 g/L in the fourth leaves.

Key words: tomato seedling; plug tray; NO_3^--N threshold

多孔一体式穴盘育苗具有节能、省力、适合机械化操作、生产效率高等显著特点,是我国蔬菜集约化育苗的主要形式。与传统营养钵育苗相比,穴盘育苗采用的人工混配轻型基质,通气孔隙度增大,单株基质容量减小,管理不当极易导致幼苗矿质养分盈亏,实时准确判断蔬菜穴盘苗养分状况对壮苗育成至关重要。目前,蔬菜矿质营养诊断方法主要分为培养介质(包括土壤和人工混配基质)分析法和组织分析法[1-2],介质分析仅能反映根系可从介质获得的潜在营养水平,分析结果常因取样方法、贮存条件和养分提取技术而产生偏差。组织分析剔除了介质特性、环境因素对矿质养分吸收的影响,更能直接反映植株矿质营养状况,研究与应用也更加广泛。

氮(N)是细胞生命分子如氨基酸、蛋白质、核酸、叶绿素和多种激素的重要组成元素,与幼苗生理生化代谢及形态建成密切相关,氮营养诊断是蔬菜苗期养分精准管理的重要依据。基于氮水平与叶绿素含量的相关性,20世纪70～80年代,日本和中国学者先后研制出了叶色票和叶色卡[3],建立了叶色等级评判标准来评定氮的盈亏。此后,利用叶色卡相似的原理,研发出叶绿素仪(SPAD)分析技术[4-7]、叶绿素荧光分析技术[8]、图象及机器视觉技术等[9-10]。这些技术简便、快捷、对植株无损伤,但易受品种类型、测定位点的影响,准确性和重复性较差。基于组织氮含量的分析有全氮分析法[11]、硝态氮(NO_3^--N)分析法[12-13]、铵态氮(NH_4^+-N)分析法[14]、硝酸还原酶(Nitrate reductase, NR, EC 1.7.1.1)分析法[15]。NO_3^--N为非代谢物质,以氮素的半储备状态存在于植株体内,较其它形态N更能灵敏地反映植株氮需求[16],因此,组织NO_3^--N分析法被广泛用于蔬菜氮盈亏快速诊断。蔬菜穴盘育苗技术在我国推广应用时间尚短,蔬菜穴盘苗NO_3^--N诊断研究明显不足,为此,本研究以番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)穴盘苗为材料,测定分析不同品种和组织位点NO_3^--N含量及其与环境因子的相关性,以期明确番茄穴盘苗组织NO_3^--N阈值,为番茄穴盘苗N盈亏快速诊断提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

共采集了番茄17个品种,'中杂9号'(Zhongza 9)、'中杂15号'(Zhongza 15)、'中杂101号'(Zhongza 101)、'中杂105号'(Zhongza 105)、'中杂106号'(Zhongza 106)、'中杂108号'(Zhongza 108)、'中杂109号'(Zhongza 109)、'美樱2号'(Meiying 2)、'北京樱桃番茄'(Beijing cherry tomato)来自中国农业科学院蔬菜花卉研究所。'佳红4号'(Jiahong 9)、'佳红5号'(Jiahong 5)、'佳粉18号'(Jiafen 18)、'硬粉8号'(Yingfen 8)、'仙客1号'(Xianke 1)、'仙客5号'(Xianke 5)、'京丹红小果'(Jingdan red cherry tomato)、'京丹黄小果'(Jingdan yellow cherry tomato)来自北京京研益农科技发展中心。

育苗穴盘采用标准规格(长×宽=540 mm×

280 mm)72 孔塑料穴盘，购自台州隆基塑业有限公司，单穴容积 40 cm^3。配制育苗基质所需草炭来自乌鲁木齐成美园林有限公司，蛭石和珍珠岩来自河北灵寿县腾达矿产品加工厂，全部采用园艺级，粒径 3～5 mm。

化学测定所用试剂均购自国药集团化学试剂北京有限公司，AR 级。

1.2　试验设计

品种差异试验：于 2013 年 2～4 月在济南市金农夫农业科技有限公司日光温室中进行。育苗基质采用草炭、蛭石、珍珠岩混合基质(4∶2∶1，v/v)，选取饱满、大小一致种子，室温下浸种 6 h，5% 次氯酸钠消毒 15 min，自来水淋洗 4 遍，播于 72 孔穴盘中，每穴一粒，覆盖 1.5 cm 厚蛭石。子叶平展后，间隔喷灌水与 1/2 浓度 Hoagland 营养液，第 2 片真叶平展后，改为间隔喷灌水与完全 Hoagland 营养液，第 4 片真叶平展后(播种后 42 d)取样测定。共 17 个品种，每品种重复 4 次，随机区组排列。

N、P、K 盈亏供应试验：于 2013 年 4～6 月在中国农业科学院蔬菜花卉研究所玻璃温室进行。选取‘佳红 4 号’和‘中杂 105 号’为试材，育苗基质配方、育苗方法同品种间差异试验。番茄第 2 片真叶平展(播种后 22 d)，分别进行 N、P、K 盈亏供应。共设 7 个处理，对照(CK)是完全 Hoagland 营养液氮、磷、钾含量分别为 210、31 和 234 mg/L)，盈亏处理除目标元素相应增减外，其余元素同对照，即氮亏缺(氮 26 mg/L)、氮盈余(氮 840 mg/L)、磷亏缺(磷 4 mg/L)、磷盈余(磷 248 mg/L)、钾亏缺(钾 29 mg/L)、钾盈余(钾 1875 mg/L)。处理后 9 d 取样测定。每处理重复 3 次。

环境因子试验：于 2013 年 4～6 月在中国农业科学院蔬菜花卉研究所玻璃温室进行。试验材料、育苗方法等同 N、P、K 盈亏供应试验。第 3 片真叶平展(播种后 30 d)后，置人工气候箱进行温度处理，共 32℃/22℃、28℃/18℃、20℃/10℃(昼/夜)3 个处理，光照强度 200 μmol/(m^2 · s)，光周期 10 h，80% 空气相对湿度；光照处理采用遮阳网覆盖方式，分不遮荫、50% 遮荫率 2 个处理。温度、光照处理周期均是 7 d。灌水时间处理于第 4 片真叶平展后(播种后 37 d)进行，灌溉后 2 h、10 h、24 h 依次取样。每处理均 3 次重复，每重复 72 株。

1.3　测定方法

每重复随机选取番茄穴盘苗 25 株，将下胚轴、茎(子叶节至顶端生长点)、各叶位叶柄和叶片分别取样，剪成 1 cm 小段(下胚轴、茎、叶柄)或 1 cm × 1 cm 小块(叶片)，压蒜器榨取汁液，收集至 1.5 mL 离心管，4℃冰箱保存备测。

NO_3^--N 含量测定采用水杨酸－硫酸比色法[17]。将收集的组织汁液，1000 ×g 离心 3 min，取上清液，加适量蒸馏水稀释，取 0.1 mL 于玻璃试管中，加入 0.4 mL 5% 水杨酸－硫酸溶液，混匀后置室温下 20 min，然后加入 9.5 mL 8% NaOH 溶液，混匀冷却至室温后，分光光度计读取 OD_{410} 值。

采用 Microsoft Excel 2003 和 SAS 9.2 进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　番茄不同品种穴盘苗组织 NO_3^--N 含量的变化

番茄不同品种同一组织或同一品种不同组织 NO_3^--N 含量均存在显著差异(表 1)。所有供试品种，‘佳红 5 号’第 3 叶位叶片 NO_3^--N 含量最低，‘美樱 2 号’第 2 叶位叶柄 NO_3^--N 含量最高，高者为低者的 7 倍。不同品种相同组织位点，第 4 叶位叶片 NO_3^--N 含量的变异最大，变异系数约 90%；第 3 叶位叶柄 NO_3^--N 含量的变异最小，变异系数约 5%。同一品种不同组织，‘佳红 5 号’组织间 NO_3^--N 含量变异最大，变异系数约 160.6%；‘中杂 101 号’组织间 NO_3^--N 含量变异最小，变异系数约 107.6%。

2.2　氮、磷、钾盈亏供应对番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 含量的影响

氮供应水平直接影响番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 含量(表 2)。氮亏缺供应使番茄穴盘苗所有组织 NO_3^--N 含量显著降低，氮盈余供应则使所有组织 NO_3^--N 含量显著提高。如 N 亏缺供应下，‘中杂 105 号’第 4 叶位叶柄 NO_3^--N 含量与对照相比降低了 95.5%，而盈余供应下，‘佳红 4 号’第 1 叶位叶片 NO_3^--N 含量与对照相比提高了 186.1%。

番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 含量还与磷、钾供应水平有关。钾亏缺供应，番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 含量均减小，如‘佳红 4 号’，第 4 叶位叶片 NO_3^--N 含量较对照降低了 22.4%，第 2 叶位叶柄 NO_3^--N 含量较对照降低了 3.2%；磷盈余供应，使番茄穴盘苗下胚轴、茎、叶柄 NO_3^--N 含量下降，叶片 NO_3^--N 含

表1 番茄穴盘苗不同组织 NO_3^--N 含量(g/L)

Table 1 The contents of NO_3^--N in different tissues of tomato seedlings

品种 Cultivar	下胚轴 Hypocotyl	茎 Stem	第1叶位叶柄 The 1st leaf petiole	第1叶位叶片 The 1st leaf	第2叶位叶柄 The 2nd leaf petiole	第2叶位叶片 The 2nd leaf	第3叶位叶柄 The 3rd leaf petiole	第3叶位叶片 The 3rd leaf	第4叶位叶柄 The 4th leaf petiole	第4叶位叶片 The 4th leaf	*CV*(%)	差异显著性 Significance
Zhongza 9	2.40±0.26	3.36±0.37	3.10±0.46	1.02±0.19	3.28±0.30	1.08±0.15	3.52±0.44	0.97±0.14	3.13±0.19	0.75±0.07	122.30	**
Zhongza 15	2.20±0.06	2.49±0.66	3.24±0.04	1.02±0.23	3.98±0.10	1.08±0.20	3.52±0.85	0.74±0.13	3.31±0.13	0.71±0.02	146.70	**
Zhongza 101	2.45±0.10	3.05±0.21	3.63±0.03	1.06±0.25	3.13±0.61	1.12±0.15	3.58±0.17	1.14±0.19	3.54±0.15	1.23±0.05	107.60	**
Zhongza 105	2.25±0.17	2.86±0.39	3.01±0.74	1.08±0.26	3.43±0.54	1.14±0.07	3.69±0.43	1.16±0.03	3.17±0.14	1.09±0.06	114.06	**
Zhongza 106	2.16±0.23	2.84±0.87	3.04±0.52	1.04±0.30	3.47±0.41	1.12±0.06	3.53±0.24	1.13±0.12	3.13±0.23	1.36±0.03	108.85	**
Zhongza 108	2.28±0.18	2.89±0.37	3.51±0.66	1.05±0.24	4.14±0.17	1.12±0.30	3.53±0.47	1.16±0.08	3.15±0.06	1.42±0.06	127.41	**
Zhongza 109	2.27±0.31	2.98±0.39	3.53±0.15	1.04±0.22	4.02±0.56	1.09±0.32	3.52±0.08	1.04±0.12	3.72±0.58	0.98±0.35	125.42	**
Meiying 2	2.38±0.14	3.48±0.38	3.77±0.21	1.02±0.33	4.42±0.33	1.09±0.45	3.54±0.30	1.01±0.04	3.40±0.24	0.79±0.24	145.83	**
Beijing cherry tomato	2.27±0.25	2.96±0.42	3.55±0.08	1.02±0.03	3.49±0.59	1.08±0.16	3.54±0.29	0.99±0.28	3.14±0.11	0.73±0.04	123.92	**
Jiahong 4	2.18±0.52	2.57±0.78	2.74±0.06	1.06±0.06	3.07±0.71	1.13±0.01	3.50±0.54	1.13±0.02	3.15±0.33	1.18±0.04	112.18	**
Jiahong 5	2.11±0.06	2.88±0.09	2.69±0.19	1.02±0.08	4.13±0.55	1.08±0.07	3.52±0.23	0.60±0.09	3.30±0.02	0.64±0.01	160.62	**
Yingfen 8	2.16±0.29	2.66±0.49	3.16±0.45	1.04±0.19	4.16±0.67	1.11±0.19	3.53±0.36	1.05±0.07	3.13±0.49	0.95±0.07	139.71	**
Jiafen 18	2.27±0.32	2.85±0.42	3.02±0.78	1.06±0.15	3.05±0.11	1.12±0.11	3.51±0.33	1.08±0.17	3.14±0.26	1.11±0.05	110.46	**
Xianke 1	2.30±0.18	3.04±0.18	3.51±0.21	1.04±0.13	3.61±0.22	1.10±0.11	3.55±0.65	1.03±0.13	3.16±0.81	0.99±0.12	112.18	**
Xianke 5	2.29±0.09	2.81±0.28	3.04±0.23	1.04±0.10	3.37±0.18	1.10±0.12	3.56±0.32	1.06±0.11	3.13±0.22	1.10±0.12	112.05	**
Jingdan red cherry tomato	2.18±0.11	2.59±0.48	2.63±0.63	1.02±0.04	2.87±0.74	1.09±0.13	3.52±0.52	0.89±0.01	3.14±0.29	0.90±0.04	126.28	**
Jingdan yellow cherry tomato	2.16±0.40	2.52±0.26	2.76±0.25	1.02±0.05	2.84±0.65	1.08±0.02	3.51±0.20	0.98±0.16	3.12±0.01	1.57±0.05	117.13	**
CV(%)	14.90	34.46	36.03	6.70	44.53	5.56	5.46	55.85	18.50	90.06		
显著性 Significance	NS	NS	*	NS	**	NS	NS	**	NS	**		

注(Note): NS—差异未达到显著水平 Not significant; *—$P \leq 0.05$; **—$P \leq 0.01$.

表 2　氮、磷、钾盈亏供给对番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 含量的影响(g/L)

Table 2　Effects of N, P and K fertilization levels on contents of NO_3^--N in tissues of tomato plug seedlings

品种 Cultivar	处理 Treatment	下胚轴 Hypocotyl	茎 Stem	第 1 叶位叶柄 The 1st leaf petiole	第 1 叶位叶片 The 1st leaf	第 2 叶位叶柄 The 2nd leaf petiole	第 2 叶位叶片 The 2nd leaf	第 3 叶位叶柄 The 3rd leaf petiole	第 3 叶位叶片 The 3rd leaf	第 4 叶位叶柄 The 4th leaf petiole	第 4 叶位叶片 The 4th leaf
Jiahong 4	CK	1.70 ±0.07	2.23 ±0.05	2.19 ±0.1	0.54 ±0.01	2.61 ±0.13	0.67 ±0.04	2.70 ±0.13	0.69 ±0.04	2.89 ±0.02	0.72 ±0.01
	氮亏缺 N deficiency	0.074 ±0.007	0.109 ±0.001	0.157 ±0.005	0.086 ±0.002	0.17 ±0.004	0.097 ±0.005	0.101 ±0.005	0.125 ±0.002	0.077 ±0.001	0.16 ±0.001
	氮盈余 N excess	4.56 ±0.03	4.73 ±0.20	4.97 ±0.18	1.56 ±0.10	5.10 ±0.15	1.52 ±0.07	4.97 ±0.22	1.71 ±0.04	5.03 ±0.13	1.50 ±0.01
	磷亏缺 P deficiency	1.48 ±0.15	1.97 ±0.05	2.58 ±0.12	0.72 ±0.06	2.53 ±0.03	0.72 ±0.04	2.47 ±0.11	0.67 ±0.02	2.41 ±0.01	0.56 ±0.01
	磷盈余 P excess	1.62 ±0.04	1.92 ±0.11	2.10 ±0.06	0.55 ±0.12	2.32 ±0.11	0.91 ±0.14	2.16 ±0.08	1.01 ±0.12	2.23 ±0.05	0.94 ±0.23
	钾亏缺 K deficiency	1.55 ±0.05	1.94 ±0.06	2.15 ±0.05	0.47 ±0.05	2.33 ±0.06	0.54 ±0.05	2.5 ±0.01	0.65 ±0.03	2.28 ±0.09	0.54 ±0.01
	钾盈余 K excess	1.82 ±0.04	2.42 ±0.06	2.96 ±0.1	0.56 ±0.04	3.1 ±0.09	0.59 ±0.01	2.99 ±0.07	0.43 ±0.03	2.67 ±0.08	0.41 ±0.01
Zhongza 105	CK	1.65 ±0.16	2.06 ±0.08	2.21 ±0.06	0.53 ±0.06	2.75 ±0.11	0.65 ±0.03	2.73 ±0.02	0.75 ±0.05	2.41 ±0.12	0.63 ±0.01
	氮亏缺 N deficiency	0.072 ±0.002	0.077 ±0.004	0.154 ±0.002	0.108 ±0.006	0.172 ±0.005	0.125 ±0.002	0.115 ±0.002	0.13 ±0.009	0.109 ±0.003	0.166 ±0.004
	氮盈余 N excess	4.38 ±0.11	4.67 ±0.11	5.23 ±0.05	1.23 ±0.15	5.00 ±0.12	1.43 ±0.04	4.95 ±0.04	1.62 ±0.05	5.10 ±0.05	1.46 ±0.02
	磷亏缺 P deficiency	1.60 ±0.08	1.91 ±0.18	2.49 ±0.09	0.42 ±0.07	2.49 ±0.09	0.47 ±0.03	2.5 ±0.01	0.65 ±0.04	2.32 ±0.09	0.53 ±0.01
	磷盈余 P excess	1.33 ±0.06	1.66 ±0.12	1.68 ±0.08	0.79 ±0.01	2.05 ±0.03	0.83 ±0.01	2.17 ±0.04	0.85 ±0.01	1.91 ±0.02	0.88 ±0.00
	钾亏缺 K deficiency	1.54 ±0.08	1.91 ±0.05	2.08 ±0.13	0.50 ±0.03	2.18 ±0.03	0.63 ±0.02	2.55 ±0.04	0.75 ±0.05	2.38 ±0.04	0.61 ±0.01
	钾盈余 K excess	1.88 ±0.01	2.52 ±0.06	2.68 ±0.08	0.45 ±0.04	3.08 ±0.05	0.63 ±0.05	3.03 ±0.1	0.54 ±0.03	2.78 ±0.11	0.41 ±0.03

表3 环境因素对番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 含量的影响(g/L)

Table 3 Effects of environmental factors on contents of NO_3^--N in tissues of tomato plug seedlings

品种 Cultivar	处理 Treatment	下胚轴 Hypocotyl	茎 Stem	第1叶位叶柄 The 1st leaf petiole	第1叶位叶片 The 1st leaf	第2叶位叶柄 The 2nd leaf petiole	第2叶位叶片 The 2nd leaf	第3叶位叶柄 The 3rd leaf petiole	第3叶位叶片 The 3rd leaf	第4叶位叶柄 The 4th leaf petiole	第4叶位叶片 The 4th leaf
Jiahong 4	CK	2.18 ±0.04	2.57 ±0.08	2.74 ±0.01	1.06 ±0.06	3.06 ±0.11	1.13 ±0.04	3.51 ±0.09	1.14 ±0.08	3.14 ±0.1	1.15 ±0.03
	高温 High temperature	2.36 ±0.08	2.83 ±0.11	2.98 ±0.14	1.06 ±0.02	3.40 ±0.07	0.97 ±0.03	3.48 ±0.07	0.83 ±0.02	3.12 ±0.03	0.87 ±0.03
	低温 Low temperature	1.88 ±0.01	2.44 ±0.06	2.69 ±0.03	0.54 ±0.06	3.00 ±0.05	0.70 ±0.02	2.82 ±0.13	0.76 ±0.05	2.90 ±0.03	0.82 ±0.02
	50%遮荫 50% shaded	1.90 ±0.01	2.31 ±0.02	2.46 ±0.12	1.04 ±0.01	2.88 ±0.15	1.12 ±0.03	3.36 ±0.11	1.11 ±0.01	2.96 ±0.03	0.92 ±0.02
	灌水后10 h 10 h after irrigation	2.20 ±0.04	2.54 ±0.02	2.88 ±0.11	1.08 ±0.02	3.36 ±0.09	1.12 ±0.04	3.32 ±0.03	1.20 ±0.05	3.03 ±0.14	1.05 ±0.05
	灌水后24 h 24 h after irrigation	1.88 ±0.03	2.56 ±0.11	2.71 ±0.12	1.21 ±0.06	3.10 ±0.08	1.40 ±0.08	3.46 ±0.10	1.28 ±0.02	3.47 ±0.12	1.02 ±0.05
Zhongza 105	CK	2.26 ±0.09	2.85 ±0.11	3.02 ±0.07	1.08 ±0.04	3.44 ±0.1	1.14 ±0.01	3.71 ±0.02	1.17 ±0.03	3.16 ±0.09	1.01 ±0.02
	高温 High temperature	2.38 ±0.13	3.01 ±0.06	2.99 ±0.11	1.00 ±0.05	3.54 ±0.03	1.1 ±0.02	3.72 ±0.07	0.83 ±0.08	3.14 ±0.08	0.85 ±0.04
	低温 Low temperature	2.46 ±0.09	2.95 ±0.12	2.95 ±0.08	0.77 ±0.02	3.37 ±0.12	0.92 ±0.04	3.34 ±0.12	1.08 ±0.06	2.93 ±0.1	0.84 ±0.03
	50%遮荫率 50% shaded	1.90 ±0.01	2.30 ±0.02	2.49 ±0.12	0.99 ±0.01	2.86 ±0.06	1.02 ±0.04	3.08 ±0.05	1.04 ±0.02	2.57 ±0.06	0.95 ±0.03
	灌水后10 h 10 h after irrigation	2.24 ±0.09	2.57 ±0.04	2.55 ±0.04	1.11 ±0.01	3.46 ±0.04	1.22 ±0.06	3.41 ±0.12	1.34 ±0.02	2.75 ±0.09	1.01 ±0.05
	灌水后24 h 24 h after irrigation	1.81 ±0.10	2.68 ±0.1	2.97 ±0.15	1.20 ±0.03	3.29 ±0.08	1.37 ±0.06	3.36 ±0.02	1.37 ±0.04	3.12 ±0.10	1.01 ±0.05

量提高，如‘中杂 105 号’，第 1 叶位叶片 NO_3^--N 含量较对照提高了 47.7%。钾亏缺供应，番茄穴盘苗下胚轴、茎、叶柄、叶片 NO_3^--N 含量均下降，‘佳红 4 号’第 4 叶位叶片和‘中杂 105 号’第 2 叶位叶柄 NO_3^--N 含量降低幅度最大，与对照相比分别降低了 24.6% 和 20.8%；钾盈余供应，番茄穴盘苗下胚轴、茎、叶柄 NO_3^--N 含量提高，叶片 NO_3^--N 含量降低，如第 4 叶位叶片，‘佳红 4 号’和‘中杂 105 号’NO_3^--N含量比对照分别降低了 42.2% 和 33.9%。

2.3　环境条件对番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 含量的影响

环境条件通过调节氮素吸收同化能力影响番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 含量。总体而言，环境温度对番茄穴盘苗 NO_3^--N 含量作用效果要大于光照和灌水时间。如表 3 所示，低温条件下番茄穴盘苗下胚轴、茎、叶柄和叶片 NO_3^--N 含量均呈下降趋势，其中第 1 叶位叶片 NO_3^--N 含量降低幅度最大，与对照相比，‘佳红 4 号’和‘中杂 105 号’第 1 叶位叶片 NO_3^--N 含量分别降低了 49.6% 和 28.9%，第 1 叶位叶柄 NO_3^--N 含量降低幅度最小，与对照相比，‘佳红 4 号’和‘中杂 105 号’第 1 叶位叶柄 NO_3^--N 含量分别降低了 1.8% 和 2.2%。高温条件下，不同组织位点 NO_3^--N 含量表现出不同的变化趋势，如下胚轴、茎、叶柄 NO_3^--N 含量提高，叶片 NO_3^--N 含量降低，NO_3^--N 含量变化幅度最大组织为第 3 叶位叶片，‘佳红 4 号’和‘中杂 105 号’两个品种变化幅度分别达到 27.5% 和 28.9%，‘佳红 4 号’和‘中杂 105 号’NO_3^--N 含量变化幅度最小的组织分别为第 1 叶位叶片和第 3 叶位叶片，变化幅度分别为 0.2% 和 0.5%。

通过遮光处理降低光照强度，番茄穴盘苗下胚轴、茎、叶柄、叶片 NO_3^--N 含量显著下降，‘佳红 4 号’和‘中杂 105 号’穴盘苗 NO_3^--N 含量降低幅度最大的组织分别为第 4 叶位叶片和茎，与对照相比分别减小了 20.3% 和 19.3%，‘佳红 4 号’和‘中杂 105 号’穴盘苗 NO_3^--N 含量减小幅度最小组织分别为第 2 叶位叶片和第 4 叶位叶片，与对照相比分别降低了 0.2% 和 5.8%。

随着距离灌溉时间的增加，番茄穴盘苗下胚轴、茎、叶柄 NO_3^--N 含量降低，叶片 NO_3^--N 含量提高。‘佳红 4 号’和‘中杂 105 号’第 2 叶位叶片 NO_3^--N 含量变化幅度最大，变化幅度分别为 24.4% 和 20.0%；‘佳红 4 号’和‘中杂 105 号’NO_3^--N 含量变化幅度最小组织分别为茎和第 1 叶位叶柄，变化幅度分别为 0.4% 和 1.7%。

3　讨论

组织 NO_3^--N 含量为氮吸收、运转、同化代谢的瞬时稳态表现。栽培介质中的 NO_3^--N 通过扩散作用到达根系表面，依赖质膜上低/高亲和力的硝酸盐－质子反向转运体的作用进入胞质，再经过胞质 NR 和质体亚硝酸还原酶（Nitrite reductase，NiR，EC 1.7.7.1）催化的还原反应，进一步转化为铵，最终合成天冬酰胺和谷氨酰胺。由于植物形态结构、代谢活性受内在基因型和外在环境因素的双重影响，组织 NO_3^--N 含量也必然表现出物种差异性和时空差异性。本研究结果显示，番茄穴盘苗 NO_3^--N 含量因品种和组织位点而表现显著差异，组织 NO_3^--N 含量最高达 4.42 g/L，而最低仅 0.60 g/L。此前，菠菜、菜心、小白菜、莴苣等蔬菜品种或组织间 NO_3^--N 含量测定结果也表现出相似的差异性[18-19]。

NO_3^--N 是植物吸收的最主要氮素形态。提高根际微生态环境氮特别是 NO_3^--N 供给水平，增加根系表面 NO_3^- 吸附率，往往可以促进植物组织对 NO_3^--N 的吸收积累，甚至超过同化能力而表现毒害症状。另外，NO_3^--N 还可通过调节 NR 的合成/降解以及 NR 的活性而影响植物组织 NO_3^--N 含量[20]。本研究发现在氮盈余和亏缺供应条件下，番茄穴盘苗所有组织 NO_3^--N 含量也随之显著升高和降低，个别组织增加和减少至正常供应水平的 2 倍和 95%。Farneselli 等[21]发现氮供应水平由 0 增加至 300 kg/hm^2，番茄定植后 30 天最新展开叶叶柄 NO_3^--N 含量由 0.320 g/L 增加至 0.973 g/L；张延丽等[7]也发现黄瓜植株叶柄 NO_3^--N 含量随着施氮量的增加而增加；罗雪华等[22]研究也表明在 1～16 mM 水平内，随着供氮水平的提高橡胶花药苗茎秆、叶柄、叶片氮含量和氮积累量均相应升高。

植物对矿质元素的吸收普遍存在协同或拮抗作用，特别是大量元素之间。钾不仅能够促进碳水化合物运输，提高根系活力，增加根系对 NO_3^--N 的吸收，而且能够通过激活 NR 提高 NR 活性和提高光合作用产生更多还原力，促进 NO_3^--N 的还原同化，另外钾作为伴随离子还可以促进 NO_3^--N 在蔬菜体内的运输，提高茎叶 NO_3^--N 含量。然而，具体到特定组织的实时表现，钾对 NO_3^--N 含量的影响则可能不尽相同。柳永等[23]发现氮配施钾可使菠菜叶片

NO_3^--N 含量降低 9.2%；周根娣等[24]发现施钾与不施钾菠菜叶片 NO_3^--N 含量无显著差异；杨暹等[25]发现增施钾肥后花椰菜叶片 NO_3^--N 含量升高；本研究则发现钾亏缺供应可使番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 含量降低，钾盈余供应使番茄穴盘苗下胚轴、茎、叶柄 NO_3^--N 含量提高，叶片 NO_3^--N 含量降低。磷既是 NO_3^--N 同化代谢所需电子供体(NADPH)和还原力(ATP)的组成成分，又是 NR 合成酶的组成成分，所以，磷主要通过氮同化代谢影响 NO_3^--N 含量[26-27]。本研究发现磷亏缺供应使番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 含量降低，磷盈余供应使番茄穴盘苗下胚轴、茎、叶柄 NO_3^--N 含量下降，叶片NO_3^--N 含量提高。

温度、光照、灌水时间等环境因素与蔬菜对 NO_3^--N 的吸收、还原及氮代谢过程也密切相关。光照强度不仅可以影响蔬菜的光合能力，影响氮代谢必需的电子供体、还原力和碳骨架的生成，而且可以通过调节 NR 表达和活性，间接调控 NO_3^--N 的还原。Proietti 等[28]发现光照照度由 200 增大至 800 μmol/(m^2 · s)，菠菜叶片 NO_3^--N 含量降低；Liu 等[29]也发现遮阴使生菜叶片NO_3^--N含量增加。NR 和 NiR 作为 N 代谢的关键酶，都有适宜的温度反应常数，超出适宜温度范围，酶活性都将降低[30]，温度还可以影响蔬菜的根系活力，进而影响 NO_3^--N 的吸收，如 10℃低温可使玫瑰根系对 NO_3^--N 的吸收增加[31]；温度提高 2.1～2.6℃，针叶树苗针叶中的 NR 活性增大，NO_3^--N 含量降低[32]。水分作为矿质营养的溶剂，不仅影响蔬菜对 NO_3^--N 的选择性吸收，也影响 NO_3^--N 在蔬菜体内的转移和分配。番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 含量是内、外因素影响下NO_3^--N 吸收、同化、转运平衡的结果，本研究设计了 NPK 盈亏供应、高温、低温、遮光、灌水时间等多项环境处理，不同处理条件下番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 含量表现出不同程度的提高或降低，充分说明氮代谢多元调节下组织 NO_3^--N 含量的波动性。

4 结论

在氮磷钾供应水平、温度、光照强度、灌水时间等因素的影响下，番茄穴盘苗组织 NO_3^--N 含量表现一定程度的波动变化。本试验以 17 个番茄品种的穴盘苗不同组织 NO_3^--N 含量为基础阈值，比较分析各种环境条件下不同组织 NO_3^--N 含量变化幅度，筛选出环境条件作用最大增幅和最大减幅，然后，对 NO_3^--N 基础阈值进行扩展校正，最终获得番茄穴盘苗下胚轴、茎、叶柄和叶片组织 NO_3^--N 含量阈值(表4)。

表4 番茄穴盘苗不同组织 NO_3^--N 阈值

Table 4 The thresholds of NO_3^--N contents in tissues of tomato plug seedlings

取样组织 Tissues of sampling	基础阈值(g/L) Basic threshold	最大增幅(%) Max. increased	最大减幅(%) Max. decrease	阈值(g/L) Threshold
下胚轴 Hypocotyl	2.11～2.45	11.11	17.02	1.75～2.72
茎 Stem	2.49～3.48	16.13	16.85	2.07～4.04
第1叶位叶柄 The 1st leaf petiole	2.63～3.77	28.25	16.91	2.18～4.83
第1叶位叶片 The 1st leaf	1.02～1.08	40.31	39.23	0.62～1.52
第2叶位叶柄 The 2nd leaf petiole	2.84～4.42	15.50	18.36	2.31～5.10
第2叶位叶片 The 2nd leaf	1.08～1.14	31.77	32.42	0.73～1.50
第3叶位叶柄 The 3rd leaf petiole	3.50～3.69	10.80	20.39	2.79～4.09
第3叶位叶片 The 3rd leaf	0.60～1.16	31.12	33.24	0.40～1.53
第4叶位叶柄 The 4th leaf petiole	3.12～3.72	12.81	21.78	2.44～4.20
第4叶位叶片 The 4th leaf	0.64～1.57	35.75	38.06	0.40～2.13

参 考 文 献：

[1] Prado R D M, Caione G. Plant analysis[J]. Soil Fertility, 2012, 115-134.

[2] Hartz T K, Smith R F, LeStrange M *et al*. On-farm monitoring of soil and crop nitrogen status by nitrate-selective electrode[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1993, 24(19-20): 2607-2615.

[3] Peng S, García F V, Laza R C *et al*. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration[J]. Agronomy Journal, 1993, 85(5): 987-990.

[4] Gianquinto G, Sambo P, Borsato D. Determination of SPAD threshold values for the optimisation of nitrogen supply in processing tomato[J]. Acta Horticulturae, 2004, 700: 159-166.

[5] Sandoval-Villa M, Wood C W, Guertal E A. Tomato leaf chlorophyll meter readings as affected by variety, nitrogen form, and nighttime nutrient solution strength[J]. Journal of Plant Nutrition, 2002, 25(10): 2129-2142.

[6] Fontes P C R, Araujo C. Use of a chlorophyll meter and plant visual aspect for nitrogen management in tomato fertigation[J]. Journal of Applied Horticulture, 2006, 8(1): 8-11.

[7] 张延丽，田吉林，翟丙年，诸海涛. 不同施氮水平下黄瓜叶片 SPAD 值与硝态氮含量及硝酸还原酶活性的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 189-193.
Zhang Y L, Tian J L, Zhai B N, Zhu H T. Relationship between leaf SPAD values and the nitrate content and nitrate reductase activity in cucumber at different nitrogen rates[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2009, 37(1): 189-193.

[8] 范燕萍，余让才，陈建勋，杨瑞陶. 氮素营养胁迫对匙叶天南星生长及光合特性的影响[J]. 园艺学报, 2000, 27(4): 297-299.
Fan Y P, Yu R C, Chen J X, Yang R T. Effects of nitrogen nutrition stress on the growth and photosynthetic characteristics of spathiphyllum palls hort[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2000, 27(4): 297-299.

[9] 毛罕平，徐贵力，李萍萍. 番茄缺素叶片的图像特征提取和优化选择研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 133-136.
Mao H P, Xu G L, Li P P. Extracting and selecting features of leaf images for diagnosis nutrient deficiency diseases in tomatoes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(2):133-136.

[10] 柴阿丽，李宝聚，王倩，等. 基于计算机视觉技术的番茄叶片叶绿素含量的检测[J]. 园艺学报, 2009, 36(1): 45-52.
Chai A L, Li B J, Wang Q *et al*. Detecting chlorophyll content of tomato leaves with technology of computer vision[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2009, 36(1): 45-52.

[11] Leigh R A, Johnston A E. Nitrogen concentrations in field-grown spring barley: an examination of the usefulness of expressing concentrations on the basis of tissue water[J]. Journal of Agricultural Science, 1985, 105(2): 397-406.

[12] Huett D, Rose G. Diagnostic nitrogen concentrations for tomatoes grown in sand culture[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1988, 28(3): 401-409.

[13] Hochmuth G J. Efficiency ranges for nitrate-nitrogen and potassium for vegetable petiole sap quick tests[J]. Horttechnology, 1994, 4(3): 218-222.

[14] 张卫建，黄丕生，陆士龙. 单季中稻体内氮营养水平诊断研究[J]. 江苏农业学报, 1996, 12(3): 15-19.
Zhang W J, Huang P S, Lu S L. Studies on rapid determination of plant nitrogen status in single crop midseason rice[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Science, 1996, 12(3): 15-19.

[15] 李文才，林振武，汤玉玮. 硝酸还原酶的研究 - Ⅴ. 棉花硝酸还原酶活力与 NO_3-N 含量的关系[J]. 作物学报, 1983, 9(2): 93-97.
Li W C, Lin Z W, Tang Y W. Studies on nitrate reductase Ⅴ. Relation of nitrate reductase activity to nitrate content in cotton[J]. Acta Agronomica Sinica, 1983, 9(2): 93-97.

[16] Olsen J K, Lyons D J. Petiole sap nitrate is better than total nitrogen in dried leaf for indicating nitrogen status and yield responsiveness of capsicum in subtropical Australia[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1994, 34(6): 835-843.

[17] 周阮宝，谷丽萍，茆敦俊，周嘉槐. 介绍两种简易测定硝态氮的比色方法[J]. 植物生理学通讯, 1991, 27(4): 299-301.
Zhou R B, Gu L P, Mao D J, Zhou J H. Two simple colorimetric methods for NO_3 - N[J]. Plant Physiology Communications, 1991, 27(4): 299-301.

[18] 王西娜，王朝辉，陈宝明，李生秀. 不同品种菠菜叶柄和叶片的硝态氮含量及其与植株生长的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 675-681.
Wang X N, Wang C H, Chen B M, Li S X. Nitrate accumulation in petiole and blade of different spinach cultivars and its relation to plant growth[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(5): 675-681.

[19] 姚建武，艾绍英，柯玉诗，等. 几个菜心品种硝酸盐累积差异的研究[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 255-257.
Yao J W, Ai S Y, Ke Y S *et al*. Differences of nitrate accumulation among some Chinese flowering cabbage varieties[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(3): 255-257.

[20] 刘丽，甘志军，王宪泽. 植物氮代谢硝酸还原酶水平调控机制的研究进展[J]. 西北植物学报, 2004, 24(7): 1355-1361.
Liu L, Gan Z J, Wang X Z. Advances of studies on the regulation of nitrate metabolism of plants at nitrate reductase level[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, 24(7): 1355-1361.

[21] Farneselli M, Tei F, Simonne E. Reliability of petiole sap test for N nutritional status assessing in processing tomato[J]. Journal of Plant Nutrition, 2014, 37(2): 270-278.

[22] 罗雪华，邹碧霞，吴菊群，杨俐苹. 氮水平和形态配比对巴西橡胶树花药苗生长及氮代谢、光合作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 693-701.

Luo X H, Zou B X, Wu J Q, Yang L P. Effects of different nitrogen level and NH_4^+/NO_3^- ratios on the growth, nitrogen metabolism and photosynthesis of anther-derived somatic seedlings of Hevea brasiliensis[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(3): 693-701.

[23] 柳勇, 何江华, 杜应琼, 等. 施氮, 钾和钼对菠菜不同生长阶段硝态氮积累影响研究初报[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 363-368.
Liu Y, He J H, Du Y Q *et al*. Effects of N, K and Mo application on the nitrate accumulation at different growth stages of spinach[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(3): 363-368.

[24] 周根娣, 卢善玲. 磷钾肥、光照、贮藏加工对蔬菜硝酸盐含量的影响[J]. 上海农业学报, 1991, 7(2): 53-56.
Zhou G D, Lu S L. Effects of phosphorus and potassium fertilizers, shining, storage and processing on nitrate content in vegetable[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 1991, 7(2): 53-56.

[25] 杨暹, 关佩聪. 氮钾营养与花椰菜氮素代谢和产量的初步研究[J]. 华南农业大学学报, 1994, 15(1): 85-90.
Yang X, Guan P C. The preliminaru study on the relationship between N K nutrition and nitrogen metabolism, curd yied in cauliflower(*Brassica oleracea var. botrytis* L.)[J]. Journal of South China Agriculture University, 1994, 15(1): 85-90.

[26] 齐炳林, 曹翠玲, 王菲, 等. 磷胁迫对豇豆幼苗硝酸还原酶活性和硝态氮含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 147-151.
Qi B L, Cao C L, Wang F *et al*. Influence of low phosphorus on nitrate reductive activity and NO_3-N content in cowpa seedling [J]. Agriculture Research in the Arid Areas, 2010, 28(1): 147-151.

[27] 马光恕, 廉华, 王彦宏, 等. 磷素不同用量对莴苣硝酸盐积累的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2009,(4): 68-70.
Ma G S, Lian H, Wang Y H *et al*. Effects of different amount phosphorus elements on the nitrate accumulation of lettuce[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009,(4): 68-70.

[28] Proietti S, Moscatello S, Leccese A *et al*. The effect of growing spinach(*Spinacia oleracea* L.) at two light intensities on the amounts of oxalate, ascorbate and nitrate in their leaves[J]. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2004, 79(4): 606-609.

[29] Liu W K, Yang Q C. Effects of short-term treatment with various light intensities and hydroponic solutions on nitrate concentration of lettuce[J]. Acta Agriculturae Scandinavica(Section B - Soil and Plant Science), 2012, 62(2): 109-113.

[30] 许振柱, 周广胜. 植物氮代谢及其环境调节研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 511-516.
Xu Z Z, Zhou G S. Research advance in nitrogen metabolism of plant and its environmental regulation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 511-516.

[31] Calatayud á, Gorbe E, Roca D *et al*. Effect of two nutrient solution temperatures on nitrate uptake, nitrate reductase activity, NH_4^+ concentration and chlorophylla fluorescence in rose plants[J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 64(1): 65-74.

[32] Zhao C, Liang J, He J *et al*. Effects of elevated temperature and nitrogen fertilization on nitrogen metabolism and nutrient status of two coniferous species[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2012, 58(6): 772-782.