

# 叶菜硝酸盐污染控制方法特征解析与发展趋势

张 蕾<sup>1,2</sup>, 付 强<sup>1,2</sup>, 戚 飞 飞<sup>1,2</sup>, 于 海 业<sup>1,2</sup>, 王 琳 琳<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学 生物与农业工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 工程仿生教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘 要:**该研究着眼于叶菜硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ )污染现状及其给人体健康及国家经济带来的不利影响,对目前国内外普遍存在的叶菜  $\text{NO}_3^-$  控制方法进行搜集、整理和分析。按照合理施肥(养分调控)、环境调控、使用硝化细菌抑制剂、确定适宜的收获期及土壤间作栽培等五大类方法展开讨论,明确现有方法的共性特征,分析各类方法的特点及存在的弊端。最后从生态系统安全与食品安全角度,探讨未来叶菜  $\text{NO}_3^-$  控制方法的发展趋势。

**关键词:**叶菜;硝酸盐;污染控制;特征解析;发展趋势

**中图分类号:**Q 141;S 181 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)06-0185-04

叶菜是一类极易富集  $\text{NO}_3^-$  的喜氮作物,人体摄入的  $\text{NO}_3^-$  有 70%~80% 来自于叶菜。

联合国粮农组织/世界卫生组织(FAO/WHO)下的食品添加剂联合专家委员会(JECFA)及欧盟食品科学

委员会(SCF)给出的允许日摄入量(ADI)为 0~3.7 mg/kg BW。对于体重 60 kg 的人来讲,当仅考虑摄取蔬菜带来的  $\text{NO}_3^-$  时,即使每天仅摄取 100 g 新鲜蔬菜,且蔬菜的  $\text{NO}_3^-$  含量满足欧盟最严格限值 2 500 mg/kg FW,  $\text{NO}_3^-$  摄入量仍超出安全限值 13%;如果其中 5% 转化为亚硝酸盐( $\text{NO}_2^-$ ),则超出 ADI 限值(0~0.06 mg/kg BW)247%,目前我国尚未制定食品中  $\text{NO}_3^-$  含量的限量标准,普遍采用的是沈明珠等<sup>[1]</sup>在 1982 年提出的蔬菜  $\text{NO}_3^-$  污染的 4 级标准。我国是蔬菜消费大国,每年人均蔬菜占有量已达 250 kg。随着人们膳食结构的改善以及城镇化规模的日益扩大,人们对蔬菜的需求量日益增加。我国蔬菜  $\text{NO}_3^-$  污染严重的现状已经对人们的身体健康构成了严重威胁。

**第一作者简介:**张蕾(1979-),女,博士,副教授,现主要从事农业生物环境安全性评价及可持续利用等研究工作。E-mail:z\_lei@jlu.edu.cn.

**责任作者:**于海业(1963-),男,博士,教授,现主要从事农业生物环境与能源工程等研究工作。E-mail:haiye@jlu.edu.cn.

**基金项目:**“十二五”农村领域国家科技计划资助项目(2013AA103005-04)。

**收稿日期:**2015-12-14

[32] MOHAMED H I, GOMAA E Z. Effect of plant growth promoting *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas fluorescens* on growth and pigment composition of radish plants (*Raphanus sativus*) under NaCl stress[J]. Photosynthetica, 2012, 50(2):263-272.

[33] YILDRIM E, DONMER M F, TURAN M. Use of bioinoculants in ameliorative effects on radish plants under salinity stress[J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31(12):2059-2074.

## Applications Progress of Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Vegetable Production

TIAN Jing, LI Shao, LIAN Qinglong, LU Shaowei, MA Ning, BAO Shunshu

(Institute of Protected Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125)

**Abstract:** Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) has broad promoting effect on plant growth and great potential in biological regulation. The application of PGPR in sustainable vegetable production system construction, plays an important role in creating a good ecological environment in the rhizosphere, improving soil physical and chemical properties, enhancing soil fertility, relieving reliance on chemical fertilizer, inhibition of diseases and reducing pesticide pollution. The review introduced the main types and the basic function of PGPR, and also focused on the summary of experimental research and successful examples of PGPR application in production of seven kinds of vegetables at home and abroad.

**Keywords:** plant growth promoting rhizobacteria (PGPR); nitrogen fixation; phosphate solubilization; vegetable production

欧盟委员会 2002 年颁布《欧盟蔬菜硝酸盐限量新规范》(EC Regulation No. 563/2002), 总体来看, 欧盟成员国生菜  $\text{NO}_3^-$  含量有下降趋势, 但菠菜  $\text{NO}_3^-$  水平没有明显下降趋势<sup>[2]</sup>。但 2010 年欧盟 CONTAM 抽样检查结果表明, 仅有 1% 的莴苣和 5% 的菠菜的  $\text{NO}_3^-$  含量超过了目前欧盟所制定的最高残留限量。在我国, 根据封锦芳等<sup>[3-4]</sup> 2003 年及 2006 年对北京蔬菜  $\text{NO}_3^-$  含量调查结果, 北京市春季市售蔬菜受  $\text{NO}_3^-$  污染较严重, 2003 年检测样本中  $\text{NO}_3^-$  污染严重, 占 33.1%; 2006 年情况更为严重。据报道, 广州、上海的市售蔬菜  $\text{NO}_3^-$  含量普遍超标 2~8 倍。调查重庆市市售蔬菜 50 种, 其中有 29 种蔬菜  $\text{NO}_3^-$  含量超过或远远超过世界卫生组织制定的限量标准。南京环保所报道, 南京市的市售蔬菜几乎都受到一定程度的  $\text{NO}_3^-$  污染<sup>[5]</sup>。许富荣等<sup>[6]</sup> 对太原市市售蔬菜  $\text{NO}_3^-$  含量污染状况调查显示, 生菜  $\text{NO}_3^-$  重度污染以上达 26%, 花椰菜达 70%。

## 1 叶菜 $\text{NO}_3^-$ 超标的危害

### 1.1 危害人体健康

$\text{NO}_3^-$  本身对人体直接影响不大, 但蔬菜体内  $\text{NO}_3^-$  可随储藏和烹调转化为亚硝酸盐( $\text{NO}_2^-$ )进入人体, 也可直接进入人体再转化为  $\text{NO}_2^-$ 。 $\text{NO}_2^-$  可使人体血液的载氧能力下降, 导致高铁血红蛋白症<sup>[7-8]</sup>。2010 年 12 月 6 日, 欧盟食品安全局污染物专家小组(CONTAM)发布 1 份健康声明, 指出对于 1~3 岁的儿童, 如果大量的摄入含有较高  $\text{NO}_3^-$  含量的菠菜, 不能排除有较高的可能性会导致其患高铁血红蛋白血症。 $\text{NO}_2^-$  在人体内还可能发生次级胺反应形成亚硝胺类物质, 该类物质可在体内形成大量氮氧自由基。亚硝基化合物已被证实对包括人类在内的超过 40 个动物物种具有致癌性<sup>[9]</sup>。氮氧自由基的存在大大提高了人类患膀胱癌、食道癌、结肠癌等其它胃肠道癌症的几率。口腔癌、老年痴呆症、孕妇自然流产及某些心血管疾病也被证实与  $\text{NO}_3^-$  毒性有关<sup>[10]</sup>。2006 年, 国际癌症研究机构(IARC)专题工作组经过长期调查研究得出, 在一定条件下摄入  $\text{NO}_3^-$  或  $\text{NO}_2^-$  会导致机体内源性亚硝化作用, 对人类存在致癌风险<sup>[11]</sup>。

### 1.2 我国叶菜出口绿色贸易壁垒的深层原因之一

我国对蔬菜  $\text{NO}_3^-$  含量限值仅有已废止的《农产品安全质量-无公害蔬菜安全要求》(GB18406.1-2001)给出过宽泛的、针对叶菜的相关规定(表 1)。这直接导致了我国蔬菜在出口时屡屡因  $\text{NO}_3^-$  污染超标而遭受非关税壁垒的阻挠, 给我国的经济带来巨大的损失。2001 年, 长江三角洲的个别省份蔬菜出口就由于监测不合格而损失数亿美元。中华人民共和国商务部对菠菜出口技术指南中曾针对各国菠菜  $\text{NO}_3^-$  限量标准进行对比分

析, 指出菠菜  $\text{NO}_3^-$  限量可能成为我国对欧盟特别是对德国贸易中的壁垒。

蔬菜  $\text{NO}_3^-$  含量超标已与农药残留、重金属超标共同构成主要的蔬菜食品安全问题, 成为限制我国叶菜出口的绿色贸易壁垒。

表 1 中国与其他国家或地区菠菜中

硝酸盐限量对比

mg/kg

国别或地区名称	$\text{NO}_3^-$ 限量
中国	叶菜类: $\leq 3\ 000$
德国	菠菜: $\leq 250$ (婴儿)、 $\leq 900$ (儿童)、 $\leq 1\ 200$ (成人)
荷兰	菠菜、莴苣: $\leq 3\ 000$ (冬季)、 $\leq 4\ 500$
瑞士	菠菜: $\leq 3\ 500$
奥地利	菠菜: $\leq 2\ 000$ (春季)、 $\leq 3\ 000$ (夏秋)
欧盟	新鲜菠菜: $\leq 3\ 000$ (春季)、 $\leq 2\ 500$ (夏秋); 速冻菠菜: $\leq 2\ 000$

## 2 叶菜硝酸盐控制研究现状

受蔬菜  $\text{NO}_3^-$  累积机理研究现状限制, 目前, 该问题解决途径主要采用环境调控、营养调控及二者的简单复合调控等几类手段, 但进展仍较缓慢, 在环境保护、叶菜产量、叶菜品质兼顾方面仍显不足。

### 2.1 调控措施的基本理论依据

蔬菜  $\text{NO}_3^-$  累积机制是调控措施的理论依据。目前一般认为蔬菜  $\text{NO}_3^-$  累积受到遗传机制的影响和生理机制。遗传机制强调蔬菜自身的  $\text{NO}_3^-$  蓄积能力, 通常十字花科(如芝麻菜、芥菜等)、藜科(如甜菜根、叶甜菜、菠菜)、苋科、菊科(如生菜)、伞形科(如芹菜、西芹)叶菜都含有较高的  $\text{NO}_3^-$ <sup>[2,12]</sup>。并且, 同一种蔬菜的不同品种间, 同一品种的不同生长期甚至同一天的不同时段,  $\text{NO}_3^-$  含量都可能存在较大差异。生理机制认为植物对  $\text{NO}_3^-$  的吸收是一种需要消耗能量的主动吸收机制,  $\text{NO}_3^-$  的吸收和还原反应不平衡是造成蔬菜  $\text{NO}_3^-$  累积的根本原因。在这一系列过程中, 硝酸还原酶(NR)和亚硝酸还原酶(NiR)作用最为关键。环境因素正是通过影响生理过程决定着物种遗传特性的表现。

### 2.2 现有主要调控措施分类

2.2.1 合理施肥(养分调控) 按生长发育期不同需氮量变量施肥、增施微肥、增施有机肥等手段(可控性差、生长周期长、无法保障高产)<sup>[8]</sup>。养分调控针对土壤栽培的研究较早、成果较多, 但由于调整营养液配方和浓度实现对养分进行调控, 更易实现精确控制, 近年来营养液栽培相关研究逐渐受到关注<sup>[2,13]</sup>。

2.2.2 环境调控 根据光照、温度、水分、C 因子与蔬菜  $\text{NO}_3^-$  累积量之间的关系调节环境因子, 其中光照因子的影响研究较多<sup>[14]</sup>。目前环境因子与养分因子耦合作用罕有报道。

2.2.3 使用硝化细菌抑制剂 化学氮肥中添加生化抑制剂调控氮素在土壤中的转化进程以提高肥料氮的利

用率、降低其对环境的污染是一项很有发展潜力的氮肥管理技术。目前使用较多的如双氰胺(Dicyandiamide, DCD)。虽然其在降低  $\text{NO}_3^-$  淋溶、减少温室气体排放和提高蔬菜品质等方面均表现出显著效果,但其作用效果仍受土壤质地、有机质含量、土壤温度、土壤 pH 值和土壤水分等多种因素影响<sup>[15]</sup>。作为土壤环境外源化合物,双氰胺具有一定的毒性,必须控制其合理施用量,否则对维持土壤微生态环境稳定必然存在隐患。

**2.2.4 选择适宜的收获期** 根据蔬菜  $\text{NO}_3^-$  累积的特点,确定  $\text{NO}_3^-$  含量较低的时间采收<sup>[16]</sup>从控制蔬菜  $\text{NO}_3^-$  摄入量的角度,还提出采收、食用蔬菜嫩芽(微绿食品, micro greens)取代成熟蔬菜。EDGAR 等<sup>[17]</sup>研究表明,嫩芽的矿物质元素含量高于成熟蔬菜,且  $\text{NO}_3^-$  含量较低,适合对矿物质需求量较大又极易受  $\text{NO}_3^-$  毒害的人群食用,如儿童。但嫩芽蔬菜的 N、P、K 含量也较高,除矿物质元素的其它营养成分含量较低,不能完全取代其它成熟蔬菜。

**2.2.5 间作栽培方式降低蔬菜含量** 玉米与蔬菜、萝卜与芹菜、茄子与青葱  $\text{NO}_3^-$  间作模式均取得良好的控制,

$\text{NO}_3^-$  含量效果控制蔬菜  $\text{NO}_3^-$  效果较好<sup>[8,18-19]</sup>。间作是中国精耕细作农业的精华之一,历史悠久。间作主要是利用植物共生关系,实现资源利用的最大化,同时对降低病虫害的发生具有一定的作用,但一直以来存在重应用实践而轻机理研究的问题。

### 3 现有调控措施特征解析

#### 3.1 现有措施的局限性

总体来看,现有调控方式的中心思想仍然以工业化农业规格化、简单化的直线思维为主:人为引入外源化合物、进行养分因子与环境因子的人为干预。然而,基于环境因子与生物体间相互关系的复杂性(图 1),土壤含氮量增加对叶片硝酸盐含量、植株鲜重及叶片硝酸盐还原酶含量的影响规律存在明显差别。因此,在各要素耦合作用研究不深入的情况下,缺乏相关调控的有效阈值或范围,致使调控方式在实际生产中操作性差,很难同时保证蔬菜产量与  $\text{NO}_3^-$  的控制效果,且存在导致生态系统失衡的风险。

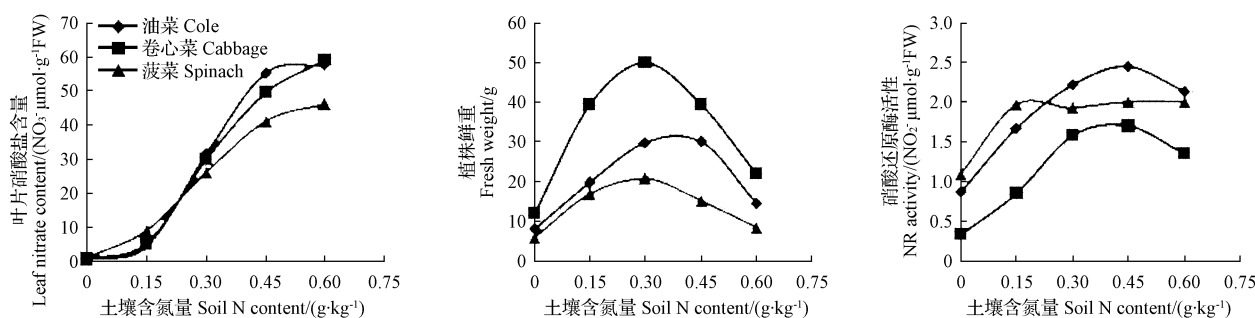


图1 土壤含氮量与植物生长、生理指标的关系

Fig. 1 Relationship between plant physiology and nitrogen content in soil

#### 3.2 叶菜硝酸盐控制方法的未来发展趋势

**3.2.1 基于生态学原理的调控方法是调控叶菜  $\text{NO}_3^-$  含量的最佳选择** 现有基于生态学原理的调控手段在控制叶菜硝酸盐方面取得良好效果,但仍存在不足。如增施有机肥可以控制叶菜  $\text{NO}_3^-$  含量,但同时会降低蔬菜生长速率,无法满足市场对蔬菜供应量的需求,并且增施有机肥可能带来土壤的重金属污染,因此产生的蔬菜重金属含量增加也是值得担忧的问题;目前已尝试采用土壤间作的模式控制叶菜  $\text{NO}_3^-$  含量,并取得一定效果,但关于间作机理的研究仍不深入,该方法尚未发挥出其应有的优势。尽管如此,采用基于生态学原理的调控手段,无论对于生态系统安全还是食品安全,在可持续发展的大前提下,无疑都是未来控制叶菜  $\text{NO}_3^-$  含量的最佳选择。

**3.2.2 雾培在叶菜  $\text{NO}_3^-$  含量控制方面具有特殊优势** 无土栽培(hydroponics)又称营养液栽培,就是不使用

天然土壤,利用含有植物生长发育所必需元素的营养液来提供营养,使植物能够正常生长发育得到预期生产效果的一种栽培种植方式。它是工厂化和现代化设施园艺的重要核心技术,是未来农业的一种理想模式,也是太空栽培的重要技术,将成为支持人类长期在太空生存的主要食物来源。目前,集约化蔬菜生产破坏土壤生态环境,且已成为重要的农业非点源污染途径污染地下水,无土栽培在解决蔬菜巨大的市场需求与生态环境安全之间的矛盾时,具有不可替代的优势。雾培(aeroponics)作为节水节肥效率最高、增产率最高的栽培技术,是无土栽培技术中解决根系水气矛盾的最佳方式,早在1953年已被应用于种植苹果树<sup>[20]</sup>,目前日本已采用雾培技术规模化生产叶用莴苣<sup>[21]</sup>。虽然受到能耗高,依赖供电等缺陷的限制,目前尚未用于商业化生产,但作为一种先进合理的栽培方式,科技进步与人类文明的发展,该技术将进一步完善。并且,雾培种植根系与周围环境相对独



立的特点,在研究污染物、水分胁迫等对根细结构、形态、功能的影响及机理时,雾培法因其管理方便、根系无损,备受青睐<sup>[22-24]</sup>。

因此,控制叶菜  $\text{NO}_3^-$ ,应转换思维方式,从生态系统结构、功能特征出发,依据生态系统工作原理,探索新型、有效的叶菜栽培模式,已达到保障生态安全和食品安全的目的。

#### 4 结论

当前叶菜硝酸盐含量超标问题仍然存在,特别是在我国,问题较为严重。目前国内外控制叶菜硝酸盐含量的方法共分为五大类,但仍以人工调控方式为主。土壤间作方式用于叶菜硝酸盐控制已初见成效,并可同时保障生态系统安全,具有更广阔的发展前景,但目前研究仍不深入,尚未发挥优势。

#### 参考文献

- [1] 沈明珠,翟宝杰,东惠茹,等.蔬菜硝酸盐累积的研究:I.不同蔬菜硝酸盐和亚硝酸盐含量评价[J].园艺学报,1982,9(4):41-48.
- [2] PIETRO S. Review nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006, 86: 10-17.
- [3] 封锦芳,李敬光,吴永宁,等.北京市蔬菜硝酸盐和亚硝酸盐污染状况评价[J].中国食品卫生杂志,2004,16(5):400-403.
- [4] 封锦芳,施致雄,吴永宁,等.北京市春季蔬菜硝酸盐含量测定及居民暴露量评估[J].中国食品卫生杂志,2006,18(6):514-517.
- [5] 尹凯丹.蔬菜硝酸盐污染现状分析及控制对策[J].广东农工商职业技术学院学报,2008,24(3):4-15.
- [6] 许富荣,杜慧平.太原市市售蔬菜硝酸盐含量及污染状况评价[J].山西农业科学,2014,42(12):1298-1300.
- [7] BARTSCH H, OHSHIMA H, PIGNATELLI B. Inhibitors of endogenous nitrosation: mechanisms and implications in human cancer prevention[J]. Mutation Research, 1988, 202: 307-324.
- [8] 张富林,杨利,范先鹏,等.蔬菜硝酸盐类及控制措施研究进展[J].湖北农业科学,2010,49(9):2247-2252.
- [9] MICHAUD D S, MYSLIWIEC P A, ALDOORI W, et al. Peptic ulcer disease and the risk of bladder cancer in a prospective study of male health professionals[J]. Cancer Epidem Biomar, 2004(13): 250-254.
- [10] FEWTRELL L. Drinking-water nitrate, methemoglobinemia, and global burden of disease: a discussion[J]. Environmental Health Perspectives, 2004, 112: 1371-1374.
- [11] COCKNURN A, HEPPNER C W, DORNE J L. Environmental contaminants: nitrate and nitrite[J]. Encyclopedia of Food Safety, 2014(2): 332-336.
- [12] 赵国苹.蔬菜硝酸盐积累机理、影响因素及研究重要性浅析[J].上海蔬菜,2012(4):8-10.
- [13] 杨成君,高严红.营养液培莴苣硝酸盐含量的控制方式与效果[J].江苏农业科学,2011(1):176-178.
- [14] 周晚来,刘文科,闻婧,等.短期连续光照下水培生菜品质指标变化及其关联性分析[J].中国生态农业学报,2011,19(6):1319-1323.
- [15] 刘瑜,串丽敏,安志装,等.硝化抑制剂双氰胺对褐土中尿素转化的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(12):2496-2502.
- [16] 张占伟,常建伟.蔬菜中硝酸盐含量的控制技术[J].河南农业,2011(7):15.
- [17] EDGAR P, AGOSTINHO A A, ANA A, et al. Comparison between the mineral profile and nitrate content of microgreens and mature lettuces[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2015, 37: 38-43.
- [18] 王晓丽,李隆,江荣凤,等.玉米/空心菜间作降低土壤及蔬菜中硝酸盐含量的研究[J].环境科学学报,2003,23(4):463-467.
- [19] WU Q, ZHAO T K, AN Z Z, et al. Effect of intercropping and nitrogen regulation on nitrate and apparent loss of nitrogen in soil[J]. Agricultural Science and Technology, 2012, 13(4): 833-837, 876.
- [20] WEATHERS P J, ZOBEL R W. Aeroponics for the culture of organisms, tissues and cells[J]. Biotechnology Advances, 1992, 10(1): 93-115.
- [21] 郭世荣.无土栽培教程[M].北京:中国农业出版社,2011.
- [22] DANIEL L, FELICIEN M, GERNOT B, et al. Impact of contrasted maize root traits at flowering on water stress tolerance-A simulation study[J]. Field Crops Research, 2014, 165(15): 125-137.
- [23] HEIDI A K, WILLIAM R G, RICHARD J G. Aeroponic system for control of root-zone atmosphere[J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 55(1-2): 70-76.
- [24] DORLODOT S. Scaling up quantitative phenotyping of root system architecture using a combination of aeroponics and image analysis[J]. Aspects of Applied Biology, 2005, 73: 41-54.

## Characteristic and Prospective Trend of Controlling Nitrate in Leaf Vegetables

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, FU Qiang<sup>1,2</sup>, QI Feifei<sup>1,2</sup>, YU Haiye<sup>1,2</sup>, WANG Linlin<sup>1,2</sup>

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022; 2 Key Laboratory of Bionic Engineer Ministry of Education, Jilin University, Changchun, Jilin 130022)

**Abstract:** Current methods of controlling nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) in leaf vegetables were collected, sorted out and analyzed considering negative effects of excessive  $\text{NO}_3^-$  on human health and nation economy in this paper. Adjusting fertilization (controlling nutrient), regulating environmental factors, using nitrifying bacteria inhibitor, confirming suitable harvest time and intercropping in soil were five kinds of main methods, which were discussed their own characteristic and shortcomings and found the common features. Finally, the prospective trends of controlling  $\text{NO}_3^-$  in the future were discussed to protect food and ecological security.

**Keywords:** leaf vegetables; nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ); controlling; characteristic; trend