蔬菜作物积累硝酸盐的基因型差异及环境意义*

胡学玉** 殷 俊 杨 斯
(中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

摘 要 城郊土壤富营养化已成为目前城郊农业生态系统可持续发展不可回避的环境问题之一,氮、磷养分富集是城郊土壤富营养化的重要表现形式,因土壤氮素积累而引起的蔬菜可食部位硝酸盐超标是一个亟待解决的技术难题。本文综述了不同蔬菜种及品种间吸收积累硝酸盐的基因型差异及其差异形成的生理生化机制,指出充分利用我国丰富的蔬菜种质资源,以植物吸收积累硝酸盐的基因型差异为理论基础,筛选弱吸收低积累蔬菜作物品种,是削减、控制蔬菜可食部位硝酸盐含量的关键性技术,有可能缓解城郊区脆弱生态环境条件下集约化生产对硝酸盐农艺阻控措施的依赖。

关键词 蔬菜; 低积累硝态氮基因型; 环境效应

中图分类号 X53 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)12-2923-04

Genotype difference and its environmental significance of nitrate accumulation in vegetable crops. HU Xue-yu**, YIN Jun, YANG Si (*School of Environmental Studies*, *China University of Geosciences* (*Wuhan*), *Wuhan* 430074, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(12): 2923-2926.

Abstract: Suburban soil eutrophication has become an environmental issue not evasive for the sustainable development of suburban agro-ecosystem. The enrichment of nitrogen and phosphorous is the main manifestation of suburban soil eutrophication, and the excessive accumulation of nitrate in edible parts of vegetables induced by soil nitrate accumulation is a technical puzzle to be solved urgently. This paper summarized the research progress on the genotype difference in the nitrate accumulation of different vegetable species and varieties and the physiological and biochemical mechanisms of the formation of the difference. It was considered that to fully use our rich vegetable germ plasma resources to screen the vegetable varieties with weak uptake and low accumulation of nitrate based on the genotype difference in absorbing and accumulating nitrate would be the key for decreasing and controlling the nitrate content in vegetable edible parts and for reducing the relying on nitrate agronomy of intensive production in suburban fragile eco-environment.

Key words: vegetable; low nitrate accumulation genotype; environmental effect.

城郊区农业生态系统具有维护城市生态环境安全和农产品质量安全的双重功能。蔬菜生产是城郊农业生态系统的重要职能之一。因其高度集约化的生产管理模式,使得我国城郊区土壤环境状况日趋恶化,城郊土壤的富营养化(刘伟等,2011)、化学退化以及重金属超标积累已成为威胁城郊农业生态系统可持续发展的三大环境问题。在土壤富营养化的过程中,因氮素积累而引起的蔬菜可食部位硝酸盐超标问题在全国各地时有发生,已成为当前困扰研究者及普通消费者的一道难题。

蔬菜是一类极易富集硝酸盐的作物,同时也是人们日常生活主要的食物来源。当硝酸盐在蔬菜可食部位超量积累时,经由食物链传递最终可能会导致人类健康受损。如何减少蔬菜产品中硝酸盐含量、控制硝酸盐向食物链迁移、保障农产品质量安全不仅是一个重要的科学命题,也是一个亟待解决的技术问题。

在控制、削减蔬菜产品硝酸盐含量的诸多措施中,挖掘作物自身潜力,利用不同蔬菜种及品种间吸

*国家十一五科技支撑计划项目(2008BADA7B03)和武汉市重点科技攻关项目(200720422150)资助。
**通讯作者 E-mail: huxueyu@cug.edu.cn
收稿日期: 2011-05-20 接受日期: 2011-09-02

收积累硝酸盐存在基因型差异的原理,筛选和培育弱吸收低积累硝酸盐的蔬菜作物种或品种,既可以从品种资源源头上减少污染物进入作物体内,也可以缓解城郊区脆弱生态环境条件下集约化生产对硝酸盐农艺削减与阻控措施的依赖,而且还是突破城郊区农产品硝酸盐控制技术瓶颈的关键性步骤,更是对全国城郊区的蔬菜产品质量控制与提升具有特殊意义。

1 不同种蔬菜作物间吸收积累硝酸盐的差异

不同作物体内硝酸盐含量与累积特征有显著不同。相对而言,硝酸盐在粮食作物体内的累积量较低。玉米、小麦、大麦、燕麦等禾谷类作物在接近成熟时,其收获物中硝酸盐的含量很少,一般每千克籽实硝态氮含量在几毫克到几十毫克之间,有时甚至低于检出限(王朝辉等,1998,2001)。若按世界卫生组织(WHO)规定人体硝酸盐允许日摄入量(ADI)3.7 mg·kg^{-1}体重的标准,以一个成年人体重按60 kg计算,其硝酸盐允许日摄入量为222 mg,那么粮食作物所含硝酸盐的量对人体健康基本不构成威胁。

与粮食作物籽实体内低硝酸盐积累显著不同的是,蔬菜作物因种类不同每千克收获物中硝酸盐含量可达几十到几百毫克、甚至几千毫克(徐永刚等,2011)。同样按照WHO的ADI值,60 kg体重的成人仅食用硝酸盐含量超过2000 mg·kg^{-1}的蔬菜0.12 kg,就超过日允许摄入量222 mg。因此,蔬菜作物硝酸盐的积累一直受到特别的关注。

对我国蔬菜硝酸盐含量水平及其健康影响的关注开始于20世纪70年代末80年代初,沈明珠等(1982)对34种不同种类蔬菜硝酸盐含量进行了较为系统的调查取样与测定分析,其结果显示,不同种类蔬菜其新鲜可食部位的硝酸盐含量具有很大差异,按蔬菜的农业生物学分类,几大类蔬菜作物体内硝态氮累积量由大到小的顺序为:根菜类>薯芋类>绿叶菜类>白菜类>葱蒜类>豆类>瓜类>茄果类>多年生类>食用菌类,其中生姜、菠菜的硝酸盐含量极高,达2300 mg·kg^{-1}以上,而西瓜、番茄则较低,每千克鲜食体硝酸盐含量仅十几毫克,蔬菜鲜食部位硝酸盐含量的种间差异最高可达221倍。一般而言,以青菜等为代表的叶菜类蔬菜可食部位的硝酸盐含量较高,是硝酸盐高积累型蔬菜种,而大部分以果实供食用的蔬菜则常为低硝酸盐富集型。本课题组在2010年3—5月,对湖北省武汉市城郊蔬菜种植区的大棚及露地蔬菜可食部位硝态氮含量进行了调查取样与测定分析,结果显示,不同种类蔬菜可食部位硝酸盐含量差异最高达30倍之多,并以叶菜类、茎菜类蔬菜为高,瓜果类、豆类蔬菜可食部位硝酸盐含量则较低(Msiska,2011)。

2 同种蔬菜不同品种硝酸盐的积累存在基因型差异

蔬菜作物吸收积累硝酸盐的特性不仅存在种间差异,而且在同种蔬菜不同品种间也有体现。Cantliffe(1972)首先关注到蔬菜硝酸盐积累的品种特异性,他对3种不同叶型菠菜硝酸盐累积特征进行了的研究,并以其叶片硝酸盐含量作为考察指标,结果显示,当培养液中硝态氮浓度为18 mmol·L^{-1}时,光滑叶型菠菜硝酸盐含量仅为全皱叶型菠菜的43.5%。蔬菜作物吸收积累硝酸盐差异的品种特异性在许多其他蔬菜作物的研究中也得到证实,如黄瓜、番茄、莴苣、芜菁、芹菜、菜豆、胡萝卜、食用甜菜、甘蓝、茄子、马铃薯和香瓜等均存在硝酸盐积累的基因型差异(Araeb,1992)。

在同一植株体内,叶部往往是硝酸盐积聚的主要器官之一,因此,叶菜类蔬菜积累硝酸盐的基因型差异研究十分活跃。文献调研结果表明,近10年有关蔬菜积累硝酸盐品种间差异的研究主要集中在小白菜、大白菜、菠菜、生菜、叶用莴苣等叶菜类蔬菜。例如,大白菜不同品种之间硝酸盐含量差异达到极显著水平,最高和最低者相差2倍以上(陶正平,2005;陶正平等,2008);多个菠菜、白菜、小白菜品种体内硝酸盐含量的变化情况显示,不同基因型间硝酸盐含量差异显著,其中小白菜品种间差异可达6倍(陈新平等,2000;汪李平等,2004;都韶婷等,2008)。

与叶用蔬菜类作物相比,茎用蔬菜可食部位硝酸盐积累的品种间差异研究相对较少。但是从硝酸盐在整个植株不同器官的累积与分布特征来看,茎是除植株叶片之外又一易于积累硝酸盐的器官,有时甚至高于叶部硝酸盐的积累量。沈明珠等(1982)分析测定了7个莴笋品种硝酸盐的累积量,结果表明,硝酸盐在品种间的变幅在123~2678 mg·kg^{-1},最高值和最低值相差20.8倍。随后,陈火英等(1995)对15个莴笋品种进行了成株期食用茎、功能叶、苗期功能叶等器官的硝酸盐累积量的测

定,结果表明,成株期食用茎中硝酸盐积累的品种间最大差异达 71%。此外,在适宜氮源条件下,菜薹品种间的生物生产量、氮素利用效率以及吸收积累硝酸盐的能力也有显著差异(杨少海等,2003)。

莴笋、菜薹、芹菜等蔬菜营养丰富,是广大市民"菜篮子"中骨干蔬菜种类之一。因此,揭示这些蔬菜作物积累硝酸盐差异的品种间特性,筛选低积累硝酸盐的蔬菜品种具有普遍意义。笔者于 2009—2010 年,在对莴笋、菜薹及芹菜 3 类蔬菜种及品种的特性分析与大田调查等初步筛选的基础上,采用田间小区试验与盆栽试验相结合的方法,对 14 个菜薹品种、5 个莴笋品种、5 个芹菜品种吸收积累硝态氮的特性进行了验证性筛选,结果表明,14 个菜薹品种的硝酸盐含量范围在 823.99 ~ 3043.54 mg · kg^{-1} FW,品种间硝酸盐含量差异显著($P \leqslant 0.05$),并筛选得到一个低硝酸盐累积性品种,其值符合 GB 19338–2003 茎菜类硝态氮≤1200 mg · kg^{-1}的标准。与菜薹品种间的差异表现一样,莴苣、芹菜品种间硝酸盐含量差异也达 0.05 显著水平,而且所有参试品种的硝酸盐含量符合 GB 19338–2003 标准(杨斯,2011)。

综上所述,利用蔬菜作物吸收积累硝酸盐的品种间差异,筛选出弱吸收低积累硝酸盐的蔬菜品种,并应用于城郊农业区集约化生产是完全可行的。那么,哪些因素导致了蔬菜作物吸收积累硝酸盐的种间及种内差异? 迄今为止,对此虽未形成一致结论,但通过对多数相关研究结果的分析,不难得出蔬菜类作物吸收积累硝酸盐的不同是因为遗传因素、农艺措施及环境因素共同作用的结果。

3 蔬菜作物对硝酸盐吸收、运输、代谢的遗传基础

蔬菜作物吸收积累硝酸盐的遗传控制主要表现在两个方面,一个是对硝酸盐吸收能力的不同;其二是对硝酸盐还原同化能力的差异。从生理角度来看,硝酸盐在蔬菜中的累积取决于其吸收量的多寡、转移速度快慢以及蔬菜对硝态氮同化作用的强弱等,但对于不同植物,这些生理因素的贡献率各有不同,例如,芜菁硝酸盐的积累是由于其对硝酸盐的吸收速度较快,而胡萝卜中硝酸盐的积累是由于其同化速度过低所致(高祖明等,1990)。

3.1 蔬菜作物对硝酸盐的吸收与转运

对蔬菜作物吸收硝态氮的机制研究多集中于同一作物的不同品种间,品种之间对硝酸盐有着不同的亲和力。通过测定植物硝态氮吸收的动力学参数发现,不同遗传类型植物间的 K_m 值(离子与载体的亲和程度)和 V_{max}(离子吸收的最大速率)有明显差异(董晓英等,2003),高硝酸盐积累品种对硝酸根的吸收能力强于低硝酸盐积累品种(赵首萍等,2009)。而且,在植物根系细胞膜上至少存在着 2 类硝酸盐的吸收系统,一类对硝酸盐具有高亲合力;另一类对硝酸盐则具有低亲合力。近 20 年,人们开始关注与硝酸盐低亲合力运输系统(LATS)和诱导性高亲合力运输系统(iHATS)有关的分子组成,并证实了与硝酸盐运输有关的 2 类蛋白的存在,分别为 *NRT*2 和 *NRT*1 基因,*NRT*2 基因与高亲合力硝酸盐运输系统有关(Okamoto *et al.*,2003),在 *NRT*1 基因家族中,其中一个基因与抑制硝酸盐的吸收有关(Okamoto *et al.*,2006)。从分子水平上研究蔬菜硝酸盐累积才刚刚起步,尚存很多未解之谜。由于高等植物中 *NRT*1 和 *NRT*2 均为多基因家族,这使得研究硝酸盐吸收积累的分子机理变得异常复杂,而与硝酸盐吸收有关的两类基因家族的鉴定被认为是解开复杂的硝酸盐吸收系统的关键一步。

值得关注的是,同一植株不同器官、不同部位硝酸盐含量也有差异,其差异的形成可能与细胞膜上酵母氢 ATP 酶(H^+-ATPase)有关。对硝酸盐在小白菜叶柄和叶片中分布差异及其与细胞膜 H^+-ATPase 的关系的研究表明,小白菜叶柄中硝酸盐含量高于叶片,是因为叶柄单位细胞膜上的 H^+-ATPase 酶分子数量大于叶片、致其 H^+-ATPase 的活性高于叶片,硝酸盐的积累量与细胞膜 H^+-ATPase 活性呈正相关关系。因此,叶柄细胞膜 H^+-ATPase 活性高很可能是增强硝酸盐吸收积累的一个重要原因(狄廷均等,2008),这种载体借助于质膜上 ATP 水解酶水解 ATP 所形成的质子驱动力把硝酸根离子运入膜内。

3.2 蔬菜作物对硝酸盐的代谢

硝酸还原酶(NR)是植株体内硝酸盐代谢中的关键酶,提高其活性有利于硝酸盐的还原。蔬菜植株地上部硝酸盐含量与硝酸还原酶活性呈显著的负相关,累积硝酸盐多的蔬菜,其硝酸还原酶活性(NRA)较低,而硝酸盐积累少的蔬菜,其 NRA 则较高(王海华等,2006;陶正平等,2008)。NRA 在植株体内所表现的这些差异不仅取决于植物的遗传特性,而且与植物自身代谢水平及对外界环境变化的适应性调节密切相关。一方面,NRA 高的植物品种具有高效率的硝态氮诱导系统,不同基因型蔬菜的

NR 受到硝酸盐诱导后其活性变化的速度及幅度存在差异,也就影响了硝态氮还原为铵态氮的程度;另一方面,由于硝态氮还原需要消耗能量,所以在不同环境条件下,植物根据自身的代谢需要、能量及中间产物的供应情况来调控 NRA,从而影响硝酸盐的还原和积累。

4 结 语

不同类型植物因遗传基础不同,其体内硝酸盐的累积量也不同,它们对硝酸盐的吸收、同化和积累的生理机制也各不相同,这些差异在蔬菜作物的种间与种内均表现十分显著。需要指出的是,遗传表现可能会受到环境条件的制约,光照强度、温度、水分状况以及营养条件尤其是氮肥供应水平和种类都会不同程度影响蔬菜硝酸盐的吸收与积累,各种环境因子对作物吸收、积累硝酸盐的影响作用大小也存在差异。值得一提的是,不同基因型的蔬菜作物对硝态氮吸收积累的差异,可能会因栽培基质中的硝态氮肥浓度的增高而逐渐消失(Chen *et al.*, 2004)。因此,筛选弱吸收低积累硝酸盐蔬菜作物基因型时,甄别恰当的环境条件、选择合适的氮肥供应水平和氮肥种类显得尤为重要。

在城郊农业区土壤富营养化及氮素普遍超量积累、而且城郊土地资源日趋紧张的条件下,充分利用我国丰富的蔬菜作物种质资源,以植物吸收积累硝酸盐存在基因型差异为理论基础,结合城郊土壤实际状况确定主要的环境影响因子,筛选适合我国城郊区种植的低积累硝酸盐蔬菜品种,可实现在土壤硝酸盐超量积累的态势下,低积累硝酸盐品种仍然可以保持其对硝酸盐的弱吸收、低积累特性,其可食部位硝酸盐含量满足食品卫生要求。

针对城郊区农产品健康质量安全面临着城郊区农业高度集约化发展和城郊生态环境问题日趋恶化的双重压力,与控制、削减蔬菜产品硝酸盐含量的诸多农艺措施相比,利用品种资源优势具有一定发展前景。

参考文献

陈火英, 张建华, 林家宝, 等. 1995. 关于低硝酸盐莴笋品种筛选技术的研究. 上海农学院学报, **13**(1): 7-10.

陈新平, 邹春琴, 刘亚萍, 等. 2000. 菠菜不同品种累积硝酸盐能力的差异及其原因. 植物营养与肥料学报, **6**(1): 30-34.

狄廷均, 朱毅勇, 许征宇, 等. 2008. 小白菜体内硝酸盐积累与其细胞膜上 H^+-ATPase 的关系. 中国农业科学, **40**(1): 162-168.

董晓英, 李式军, 沈仁芳. 2003. 白菜不同品种对硝酸盐吸收积累差异原因初探. 园艺学报, **30**(4): 470-472.

都韶婷, 李玲玲, 章永松, 等. 2008. 不同基因型小白菜硝酸盐积累差异及筛选研究. 植物营养与肥料学报, **14**(5): 969-975.

高祖明, 张耀栋, 严晓凤, 等. 1990. 几种叶菜的硝酸盐和亚硝酸盐积累及其与有关酶活性的关系. 植物生理学通讯, (3): 21-24.

刘 伟, 武美燕, 胡学玉, 等. 2011. 设施栽培地土壤富营养化及其潜在的环境影响. 环境科学与技术, **34**(5): 20-23.

沈明珠, 翟宝杰, 东惠茹, 等. 1982. 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. 园艺学报, **9**(4): 41-48.

陶正平. 2005. 大白菜不同品种对硝酸盐积累差异的研究. 园艺学报, **32**(4): 698-700.

陶正平, 尹凯丹, 周连霞. 2008. 大白菜不同硝酸盐富集水平基因型的筛选. 沈阳农业大学学报, **39**(3): 289-292.

王海华, 魏永胜, 王朝辉. 2006. 不同品种菠菜叶肉及叶柄中硝态氮累积与硝酸还原酶活性的关系. 植物生理学通讯, **42**(2): 217-220.

汪李平, 向长萍, 王运华. 2004. 白菜不同基因型硝酸盐含量差异的研究. 园艺学报, **31**(1): 43-46.

王朝辉, 田霄鸿, 李生秀, 等. 1998. 蔬菜与小麦硝态氮累积的差异. 干旱地区农业研究, **16**(3): 25-30.

王朝辉, 田霄鸿, 李生秀. 2001. 叶类蔬菜的硝态氮累积及成因研究. 生态学报, **21**(7): 1136-1141.

徐永刚, 宇万太, 马 强, 等. 2011. 不同轮作模式下土壤氮磷淋移和蔬菜硝酸盐、亚硝酸盐积累. 生态学杂志, **30**(6): 1107-1113.

杨少海, 艾绍英, 姚建武, 等. 2003. 氮素营养对菜薹生长和硝酸盐累积的影响. 中国蔬菜, (4): 19-21.

杨 斯. 2011. 典型城郊区农业生态系统中低积累硝态氮茎菜类品种筛选(硕士学位论文). 武汉: 中国地质大学(武汉).

赵首萍, 张瑞麟, 徐明飞, 等. 2009. 不同基因型小白菜硝酸盐积累量差异研究. 中国农学通报, **25**(21): 173-179.

Araeb BA(蔡元定译). 1992. 植物积累硝酸盐的农业生态因素. 土壤学进展, (2): 20-24.

Cantliffe DI. 1972. Nitrate accumulation in spinach grown at different temperatures. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **97**: 674-676.

Chen BM, Wang ZH, Li SX, *et al*. 2004. Effects of nitrate supply on plant growth, nitrate accumulation, metabolic nitrate concentration and nitrate reductase activity in three leafy vegetables. *Plant Science*, 167: 635-643.

Msiska BT. 2011. Nitrate content in soil, groundwater and vegetables and human health risk assessment through vegetable intake in suburban areas of Wuhan, China (MS Thesis). Wuhan: China University of Geoscience.

Okamoto M, Kumar A, Li WB, *et al*. 2006. High-affinity nitrate transport in roots of *Arabidopsis* depends on expression of the *NAR*2- like gene *AtNRT*3.1. *Plant Physiology*, 140: 1036-1046.

Okamoto M, Vidmar JJ, Anthony DMG. 2003. Regulation of *NRT*1 and *NRT*2 gene families of *Arabidopsis thaliana*: Responses to nitrate provision. *Plant Cell Physiology*, **44**: 304-317.

作者简介 胡学玉,女,1963 年生,博士,教授。主要从事土壤环境化学与污染修复方面的工作,发表论文近 30 篇。E-mail: huxueyu@cug.edu.cn

责任编辑 魏中青