

设施土壤硝酸盐积累及其对作物影响的研究进展

谷端银¹ 焦娟¹ 高俊杰¹ 王秀峰^{2, 3*}

(¹ 泰安市农业科学研究院, 山东泰安 271000; ² 山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东泰安 271018; ³ 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要: 设施栽培中, 因过量施肥使得土壤硝酸盐含量过高, 导致次生盐渍化, 引起连作障碍, 制约设施农业可持续发展。本文综述了设施土壤中硝酸盐积累现状、原因、潜在风险及危害等研究进展, 阐述了硝酸盐与作物间的关系, 并对相关防治措施进行了分析。

关键词: 设施; 土壤; 硝酸盐积累; 作物伤害; 综述

我国是设施农业大国, 2013年设施园艺栽培面积达187.4万 hm^2 , 比1978年(不足0.7万 hm^2)提高了266.7倍, 成为世界设施园艺第一生产大国(蒋卫杰等, 2015)。其中, 无土栽培面积逾1000 hm^2 , 只占设施栽培面积的0.1%(蒋卫杰等, 2015), 因此设施土壤栽培仍是主要的栽培形式。

在设施土壤栽培条件下, 作物产值比露地生产提高3~5倍(魏晓明等, 2010), 农户为追

谷端银, 女, 博士, 农艺师, 专业方向: 蔬菜育种与栽培, E-mail: guduanyin@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 王秀峰, 教授, 博士生导师, 专业方向: 设施蔬菜与无土栽培, E-mail: xfwang@sdau.edu.cn

收稿日期: 2016-09-26; 接受日期: 2017-01-21

基金项目: 山东省现代农业产业技术体系项目 (SDAIT-05-09), 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-25)

求较高的经济收益, 普遍依赖大肥大水提高作物产量。据调查, 北京市设施菜地每季施氮量平均为 $556 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (杨俊刚等, 2007), 山东寿光则达 $589 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 远远超出蔬菜的氮素需求(何飞飞, 2006), 导致设施土壤次生盐渍化及土壤酸化发生严重(童有为和陈淡飞, 1991; 李海云等, 2001; Shi et al., 2009; 黄绍文等, 2011)。设施土壤盐分阴离子以 NO_3^- 为主, 占土壤阴离子总量的67%~76%(薛继澄等, 1995), 并且在土壤剖面中大量积累(杨治平等, 2007), 这对土壤、作物、环境及人体健康等带来潜在风险, 制约了设施农业的可持续发展。

本文针对设施土壤中硝酸盐积累现状、产生原因、潜在风险及危害等研究进展进行了分析, 阐明

Abstract: During 'The Twelfth Five-year Plan' period, significant progress has been achieved on genetic breeding of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*) in China. A number of novel breeding materials have been obtained. DH and MAS breeding technology has been further perfected. High throughput molecular marker assistant technology has been primarily applied in breeding practice. Mechanized F_1 seed production has been realized in full cultivation process. Many new Chinese cabbage varieties have been extended and applied in production. This paper systematically summarized the important progress on applied, basic and breeding technology research, germplasm innovation and new variety selective breeding in Chinese cabbage during the past 5 years. It also analyzed and discussed the existing problems and prospected the future development orientation.

Key words: Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*); Genetic breeding; DH breeding; MAS breeding; New variety; Review

了 NO_3^- 与作物间的关系,并提出了具体的防治措施及未来研究展望,以期为设施土壤消除硝酸盐胁迫障碍提供理论参考。

1 设施土壤中 NO_3^- 积累现状、原因及潜在风险

1.1 设施土壤中 NO_3^- 的积累现状

在自然生态系统中,土壤溶液中 NO_3^- 浓度一般为 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 或更少(Russell, 1973)。而在农田生态系统中,由于氮肥投入,土壤溶液中 NO_3^- 浓度可达 $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Russell, 1973; Reed & Hageman, 1980)。据黄绍文等(2011)研究发现,全国温室和大棚菜田土壤次生盐渍化严重,北方主要菜区温室和大棚土壤硝态氮含量(分别为 $143.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $134.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)均显著高于露地土壤($46.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),南方主要菜区大棚土壤硝态氮含量($141.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)也显著高于露地土壤($60.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。硝酸盐的分布是全剖面性的,从 $0\sim 100\text{ cm}$ 土体硝态氮分布来看,整个大棚土体中都聚集着较高的硝态氮(杨治平等, 2007)。设施土壤中的 NO_3^- 浓度,因各地土壤质地及施肥量不同而存在一定的差异。山东省寿光市设施土壤($0\sim 20\text{ cm}$)硝态氮含量平均为 $200.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而露地为 $39.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (刘兆辉等, 2008);在陕西杨凌,部分种植8 a的大棚 $0\sim 10\text{ cm}$ 土壤硝态氮累积含量达到 $103.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (魏迎春等, 2008)。

1.2 设施土壤 NO_3^- 积累的主要原因

1.2.1 施肥量过大 设施栽培过程中,施入的各种肥料(如尿素、复混肥料、水溶肥料等)都直接或间接带入大量的 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N,而过量施肥使得大量养分不能及时被作物吸收,使土壤中大量累积 NO_3^- 。而土壤有机氮矿化过程释放的无机氮化合物除了被植物直接吸收外,在适宜的条件下会被硝化微生物转化为 NO_3^- 。

1.2.2 种植制度 由于设施种植过程中的蔬菜品种单一,施肥、灌溉、耕作技术措施长期一致,施用化学肥料单一,导致土壤养分不均衡,比例失调,也易引起 NO_3^- 大量累积(杨俊刚等, 2007),连作障碍问题严重。

1.2.3 种植年限 设施土壤中硝酸盐积累与种植年限密切相关(吴凤芝等, 1998; 刘兆辉等, 2008;

魏迎春等, 2008)。黑龙江哈尔滨市市郊蔬菜大棚土壤盐分总量高于露地 $2.1\sim 13.4$ 倍,随着种植年份的延长,土壤盐分累积,造成土壤溶液浓度增加,使土壤的渗透势加大,作物吸水吸肥能力减弱,导致植物的生育障碍(吴凤芝等, 1998)。

1.2.4 设施环境的特殊性 设施覆盖后,设施内土壤缺乏雨水淋溶,造成盐分逐年积累,土壤矿化作用明显加剧(李海云等, 2001; 余海英等, 2006)。温室和大棚内气温、地温较高也有利于 NO_3^- 积累,一方面作物生长对水分需求量很大,灌溉较多,土壤表面蒸发强烈,特殊水分运移方式(水分上行)是温室和大棚土壤盐分积聚的外在动力(李海云等, 2001);另一方面硝化作用适宜温度为 $30\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$,较高气温及地温间接为土壤硝化作用创造条件,使 NH_4^+ 转化为 NO_3^- 过程加速进行。温室和大棚土壤硝化指数和硝化强度均高于一般大田土壤(黄绍文等, 2011)。

1.3 设施土壤中 NO_3^- 的影响及潜在风险

1.3.1 对土壤的影响 土壤中较高含量的 NO_3^- 可使土壤酸化及次生盐渍化(Han et al., 2014, 2015)、土壤养分失衡及土壤退化(韩志平等, 2013)、土壤微生物区系及功能多样性遭到破坏(杨凤娟等, 2005)。对全国主要菜区土样研究表明,与露地土壤相比,温室和大棚土壤pH值明显降低(黄绍文等, 2011)。随着种植年限的延长,大棚土壤硝态氮含量逐渐增加,pH值总体呈现逐渐下降的趋势(魏迎春等, 2008),土壤呈酸化趋势(余海英等, 2006)。土壤盐分组成中阴离子主要有 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- ,一般以 NO_3^- 为主,高含量的 NO_3^- 加速了土壤次生盐渍化(黄绍文等, 2011)。大量 NO_3^- 累积以及某些离子的相对富集在一定程度上引起了作物养分的供需失衡(余海英等, 2006)。土壤中硝酸盐积累,降低了碳源利用率和微生物种群多样性,说明硝酸盐对土壤中微生物群落的单一碳源代谢起到了显著的负面影响(Huang et al., 2012)。

1.3.2 对作物的影响 上海菜区玻璃温室和塑料温室耕层积盐均较明显,一般 $3\sim 5\text{ a}$ 便出现盐害,造成蔬菜大幅度减产(童有为和陈淡飞, 1991)。 NO_3^- 胁迫主要表现为种子萌发受到抑制(韩志平等, 2013),过量 NO_3^- ($140\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)可使黄瓜

幼苗受到质膜及活性氧伤害、代谢失调(杨凤娟等, 2005)、渗透调节物质增加(焦娟等, 2009)、净光合速率下降、羧化效率降低、叶绿体结构遭到破坏(苏秀荣等, 2007), 植物生长受到抑制。当种植黄瓜的温室土壤含盐量为0.27%~0.62%时, 已达中高度盐渍化程度, 会对黄瓜生长产生不良影响(高丽红, 1998)。同时 NO_3^- 胁迫降低了植物体内糖分含量, 作物抗性差; 机械组织发育差, 易倒伏; 引起作物徒长、晚熟等。

1.3.3 对环境的影响 Britto 和 Kronzucker (2013) 研究表明, 氮肥施用过量时, NO_3^- 不能及时被植物或者微生物吸收利用而向根际下迁移, NO_3^- 移至根际以下的数量直接与氮肥施用量相关。余海英等 (2006) 研究表明, 相比其他阴离子, NO_3^- 的累积迁移量最大, 其在剖面的累积不仅导致土壤环境质量不断恶化, 加大了地下水水质的污染, 并最终引起湖泊、海洋的污染。同时, 过量施用氮肥, 还可能成为痕量温室气体的源, 从而对大气环境产生不利影响, 这是因为硝化过程和反硝化过程中可产生对地球温室效应有着直接关系和间接关系的 N_2O 和 NO 等气体 (Firestone & Davidson, 1989)。Guo 等 (2010) 研究表明, 我国主要农田土壤 pH 值下降 0.5 个单位, 其中 60%~90% 的贡献来自于氮肥。2010 年公布的全国污染源调查报告显示, 全国水体污染物中总氮的 57% 来自于农业 (中华人民共和国环境保护部等, 2010)。Liu 等 (2013) 研究表明, 全国大气氮沉降增长主要与氮肥有关。氮肥对环境的影响给我国氮肥使用、发展及管理提出了严峻的挑战 (张卫峰等, 2013)。

1.3.4 对人体健康的影响 土壤中硝酸盐积累会导致蔬菜中硝酸盐含量超标 (李海云等, 2001)。传统观点认为高量硝酸盐摄入会诱发癌症和高铁血红蛋白症, 还可能引起甲状腺增生、高血压、小儿多尿症等疾病 (McKnight et al., 1999)。但也有研究表明, NO_3^- 代谢物 NO 在人体内也有一定的有益性 (都韶婷等, 2007)。

2 NO_3^- 与作物的关系

2.1 NO_3^- 对作物的营养功能

氮作为氨基酸、蛋白质及膜脂的主要组成部分, 是植物生长发育主要的营养元素 (Lam et al.,

1996)。植物体内主要以 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 两种氮素形态为主。相比 NH_4^+ -N, 多数农作物更喜 NO_3^- -N (李合生, 2012; Britto & Kronzucker, 2013)。

对于 NO_3^- 为作物提供营养的机理研究方面, 目前取得了一定的进展。作物根系吸收的 NO_3^- 一部分在根系中原位转化成 NH_4^+ , 储存在液泡中, 一部分转运至茎叶中。根系吸收的 NO_3^- 进入木质部维管束而后转运至叶片和茎中, 该过程是主动吸收系统, 是一个跨质膜的 $2\text{H}^+/\text{NO}_3^-$ 同向转运过程, 需由跨质膜质子电化学梯度提供能量。 NO_3^- 还原为 NH_4^+ 需要 NR 及 NiR 的参与。 NO_3^- 通过根表皮细胞进入共质体, 在根细胞原生质体内主要有 4 种去向: 在根中 NR 和 NiR 的作用下, 还原为 NH_4^+ , 进而同化成氨基酸和蛋白质; 跨越原生质膜流入质外体; 储存于液泡中; 在根系共质体中运移, 通过木质部运往地上部进入叶肉细胞, 在叶肉细胞中既可被还原也可储存在液泡中 (Crawford, 1995; Mecharg & Blatt, 1995; Miller & Smith, 1996; Mistrik & Ullrich, 1996)。 NH_4^+ 的同化是在谷氨酸合成酶及谷氨酰胺合成酶的作用下, NH_4^+ 同化为谷氨酸或谷氨酰胺, 氨基酸间形成二肽, 二肽又可结合形成多肽, 最终合成蛋白质, 为植物提供营养。

2.2 NO_3^- 对作物的信号分子功能

除了作为营养元素外, NO_3^- 作为一种信号分子还调节着植物代谢和发育的过程, 包括基因转录和翻译 (Wang et al., 2004)、蛋白质累积 (Prinsi et al., 2009)、体内磷酸化 (Liu & Tsay, 2003; Ho et al., 2009)、种子萌发 (Alboresi et al., 2005)、气孔运动 (Guo et al., 2005)、根系以及叶的发育 (Forde, 2002; Walch-Liu et al., 2006; Vidal & Gutierrez, 2008) 等。研究表明, *NRT1.1*、*NRT2.1* 复合体在 NO_3^- 信号调控、侧根生长 (Little et al., 2005; Remans et al., 2006; 张林, 2007; Orsel et al., 2007) 以及病原防控等多方面发挥作用。

目前关于 NO_3^- 对植株侧根生长的研究较为深入, 它既影响侧根数也影响侧根的发生位点 (Malamy & Ryan, 2001)。 NO_3^- 对侧根的增殖刺激作用看起来与高 NO_3^- 下抑制根的发育相矛盾, Zhang 和 Forde (1998) 认为这是根系以信号分子形式利用 NO_3^- 所致。基于 NO_3^- 在土壤中相对可移动的特点, 也有研究人员认为氮素 (尤其是 NO_3^-)

可能作为植物生长调节物质发挥作用 (Trewavas, 1983) 或作为信号系统的一部分发挥作用 (Scheible et al., 1997)。

研究表明, NO_3^- 及其同化产物确实是作为信号分子发挥作用 (Drew & Saker, 1975)。NO 作为 NO_3^- 同化产物之一, 目前作为信号分子的研究较多。NO 作为自由基发挥作用, 分子小、不带电荷、寿命短、在生物膜间极易扩散等特性使其在植物生长、发育以及调控方面扮演了多功能角色 (Siddiqui et al., 2011)。

2.3 NO_3^- 对作物的抗逆功能

NO_3^- 及其同化产物在提高作物的抗逆性方面也发挥了重要作用。研究表明, 根系 NO_3^- 净吸收量是在 NO_3^- 流入量 (吸收量) 与外排量间的平衡。即使目前对 NO_3^- 外排的生理作用仍不可知 (Daniel-Vedele & Chaillou, 2005), 但 Macduff 和 Jackson (1992) 研究发现, NO_3^- 外排在外界环境变化或其他胁迫来临时增加, 这对作物应对逆境下的胁迫起到了一定的缓解作用。

研究表明, 低氧胁迫下 NO_3^- 代替 O_2 作为电子受体而减少氧自由基的产生, 提高了作物的抗逆性, 适当提高生长介质中的 NO_3^- 浓度可调控樱桃根系功能及氮代谢 (冯立国等, 2010)、调控根系的糖代谢 (郝云红等, 2009), 缓解低氧胁迫对樱桃根系的伤害。在 Na_2CO_3 胁迫下, 增加 NO_3^- 可改善桑树幼苗叶片光能利用效率, 增加桑树生物产量 (逢好胜等, 2014)。而在盐胁迫条件下, 5-氨基乙酰丙酸 (ALA) 对大麦的影响受到 NR 在转录水平及翻译水平的调控, 改善了大麦生长及抵抗自由基的作用 (Beyzaei et al., 2015)。S-亚硝基谷胱甘肽 (GSNO) 处理能够显著增强干旱胁迫下玉米幼苗的抗氧化酶活性, 降低膜脂的过氧化伤害, 明显改善玉米的抗旱性 (徐一馨等, 2014)。NO 提高作物抗逆性的研究已成为逆境胁迫的研究热点 (谷端银等, 2016)。

3 减少土壤中过量 NO_3^- 积累的农业措施

3.1 合理施肥

降低土壤中过量 NO_3^- 积累主要可通过选择适宜的肥料品种 (如平衡施肥、施用缓控释肥) (蒋

卫杰等, 2015)、调节氮肥用量、施用氮肥添加剂等农业措施, 同时控制肥料施用时期、施用位置等促进植物吸收 NO_3^- , 间接减少土壤中 NO_3^- 积累。微生物可以影响碳氮互作, 土壤中 NO_3^- 的积累可能是由于缺乏适当碳源来接纳这些无机氮源, 通过增加土壤中的碳源, 在微生物参与下, 无机氮可被同化转变成有机态氮, 因此通过增施有机肥等途径也可减少土壤中 NO_3^- 积累 (Huang et al., 2012)。

3.2 选用耐盐砧木

通过筛选耐盐砧木、采用嫁接栽培提高蔬菜栽培品种的耐盐性, 目前也得到了广泛研究和应用。在高浓度硝酸盐胁迫下, 不同品种番茄幼苗植株的砧木自交系盐胁迫指数均显著低于普通栽培品种, 有较强的耐盐性 (刘慧敏等, 2007)。张古文等 (2008) 研究表明, 在 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下, 以耐盐番茄品种影武者为砧木, 宝大 903 为接穗, 番茄嫁接苗比自根苗生长量大, 并且抗氧化酶系统活性及渗透协调物质含量高于自根苗, 氧化损伤降低, 抗盐性增强。研究表明, 嫁接茄子相比自根苗在 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下也表现了较强的抗盐性 (Wei et al., 2009)。

3.3 采用合理的农艺措施

研究表明, 玉米和空心菜间作可降低蔬菜地上部硝酸盐浓度和土壤剖面硝酸盐残留量 (王晓丽等, 2003), 小麦和大豆与黄瓜轮作可极显著降低黄瓜的硝酸盐含量 (刘静等, 2008)。番茄—茼蒿轮作降低了因滴灌导致的土壤中不同位置 NO_3^- 积累的现象 (Lecompte, 2012), 而通过建立完善的水肥灌溉管理技术也可减少土壤中过量 NO_3^- 积累 (Ibrikci et al., 2015)。

3.4 选用外源物质缓解 NO_3^- 危害

采用外源物质缓解过量 NO_3^- 积累对作物的伤害研究较多, 目前已有采用外源一氧化氮 (焦娟等, 2009)、蔗糖 (李小刚等, 2011)、脱落酸 (王敏等, 2012)、油菜素内酯 (岳冬等, 2013)、多胺 (含腐胺、精胺、亚精胺) (鲁莹等, 2015)、5-氨基乙酰丙酸 (Hu et al., 2015)、叶绿酸铁 (张蒙等, 2015) 等报道。这些物质的应用, 提高了作物在高 NO_3^- 下的生长及相关生理代谢, 进而提高了各种作物在 NO_3^- 胁迫下的耐受性, 起到了一定的缓解作用。

4 展望

研究植物对氮素的吸收利用规律和机制,对于有效提高作物的氮素利用率、减少环境污染等具有极其重要的意义(何飞飞,2006;刘兆辉等,2008;张卫峰等,2013)。目前关于硝态氮对土壤质量、作物生理方面的研究取得了一定进展(苏秀荣等,2007;杨治平等,2007;Guo et al.,2010;Han et al.,2015;Hu et al.,2015),但对于硝态氮调控作物生长的分子机制、高硝态氮利用率作物品种研发还需开展深入的研究。未来研究将着眼于应用植物分子生物学、遗传学、基因组学、生物信息学等学科的理论和技术,深入研究硝态氮信号转导途径上游的重要调控基因在硝态氮调控途径中的功能及其表达调控,解析调控硝态氮代谢的分子网络(Liu & Tsay,2003;Alboresi et al.,2005;Ho et al.,2009)。而通过研究农作物中的关键硝态氮调控基因及其在作物中的具体功能和作用机理,解析调控硝态氮吸收利用的分子网络(Daniel-Vedele & Chaillou,2005),筛选鉴定出能够高效利用氮素的新基因、新种质,也将受到越来越多的关注。

参考文献

都韶婷,章永松,林咸永,王月,李刚,张英鹏.2007.蔬菜积累的硝酸盐及其对人体健康的影响.中国农业科学,40(9):2007-2014.

冯立国,生利霞,束怀瑞.2010.低氧胁迫下外源硝态氮对樱桃根系功能及氮代谢相关酶活性的影响.应用生态学报,21(12):3282-3286.

高丽红.1998.保护地土壤次生盐渍化对主要蔬菜生长发育的影响.南京农业大学学报,12(3):69-71.

谷端银,王秀峰,杨凤娟,魏珉,史庆华.2016.施用外源物质对园艺作物抗逆性影响研究进展.北方园艺,(3):195-198.

韩志平,郭晓冬,张海霞,杜清洁.2013.硝酸钙胁迫对黄瓜种子萌发特性的影响.山西农业科学,41(11):1186-1189.

郝云红,胡艳丽,沈向,毛志泉,王元征,苏立涛,杨树泉.2009.外源硝态氮提高淹水甜樱桃根系糖含量及蔗糖相关酶活性.园艺学报,36(7):937-944.

何飞飞.2006.设施番茄生产体系的氮素优化管理及其环境效应研究[博士论文].北京:中国农业大学.

黄绍文,王玉军,金继运,唐继伟.2011.我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况.植物营养与肥料学报,17(4):906-918.

蒋卫杰,邓杰,余宏军.2015.设施园艺发展概况、存在问题与产业发展建议.中国农业科学,48(17):3515-3523.

焦娟,王秀峰,杨凤娟,孙家正,魏珉,史庆华,王秀红.2009.外源一氧化氮对硝酸盐胁迫下黄瓜幼苗生长及抗氧化酶活性的影响.应用生态学报,20(12):3009-3014.

李海云,王秀峰,邢禹贤.2001.设施土壤盐分积累及防治措施研究进展.山东农业大学学报:自然科学版,32(4):535-538.

李合生.2012.现代植物生理学·3版.北京:高等教育出版社.

李小刚,宋云鹏,王静,杨凤娟,王秀峰,魏珉,史庆华.2011.外源蔗糖对NO₃⁻胁迫下黄瓜幼苗生长及抗氧化酶活性的影响.山东农业科学,(7):30-34.

刘慧敏,朱月林,陈磊.2007.组培条件下不同番茄品种及砧木自交系幼苗期硝酸盐耐性的比较.植物研究,27(2):175-181.

刘静,吴凤芝,吕涛.2008.设施条件下不同轮套作对黄瓜产量及品质的影响.北方园艺,(12):44-46.

刘兆辉,江丽华,张文君,郑福丽,王梅,林海涛.2008.山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律.土壤学报,45(2):296-303.

鲁莹,束胜,朱为民,郭世荣,孙锦.2015.多胺缓解硝酸钙对小白菜幼苗生长抑制的作用.江苏农业学报,31(2):422-428.

逢好胜,张会慧,田野,敖红,孙广玉.2014.硝态氮对胁迫下Na₂CO₃桑树幼苗生长和光合特性的影响.草业科学,31(8):1515-1522.

苏秀荣,王秀峰,杨凤娟,魏珉.2007.硝酸根胁迫对黄瓜幼苗叶片光合速率、PS II光化学效率及光能分配的影响.应用生态学报,18(7):1441-1446.

童有为,陈淡飞.1991.温室土壤次生盐渍化的形成和治理途径研究.园艺学报,18(2):159-162.

王敏,王秀峰,夏燕飞,陈柔彤.2012.硝酸盐胁迫下外源脱落酸对黄瓜生长及抗氧化酶活力的影响.山东农业科学,44(3):21-24,28.

王晓丽,李隆,江荣凤,张福锁.2003.玉米/空心菜间作降低土壤及蔬菜中硝酸盐含量的研究.环境科学学报,23(4):463-467.

魏晓明,齐飞,丁小明,鲍顺淑,李中华,何芬.2010.我国设施园艺取得的主要成就.农机化研究,(12):227-231.

魏迎春,李新平,刘刚,朱辉娟.2008.杨凌地区大棚土壤硝态氮累积效应研究.水土保持学报,22(2):174-176,190.

吴凤芝,刘德,王东凯,栾非时,王伟,刘元英.1998.大棚蔬菜连作年限对土壤理化性状的影响.中国蔬菜,(4):5-8.

徐一馨,王飞,张成双,慕自新.2014.谷胱甘肽存在条件下NO₂⁻对玉米植株干旱胁迫的缓解作用.西北农林科技大学学报:自然科学版,42(6):41-47,54.

薛继澄,李家金,毕德义,马爱军,程平娥.1995.保护地栽培土壤硝酸盐积累对辣椒生长和锰含量的影响.南京农业大学学报,18(1):53-57.

杨凤娟,王秀峰,魏珉,闫童.2005.NO₃⁻胁迫下K⁺、Ca²⁺对黄瓜幼苗膜质过氧化及活性氧清除酶系统的影响.农业工程学

- 报, 21 (s): 155-158.
- 杨俊刚, 贺建德, 陈新平. 2007. 北京市作物施肥现状调查与测土配方施肥建议. 北京农业, (1): 15-19.
- 杨治平, 张建杰, 张强, 陈明昌. 2007. 山西省保护地蔬菜长期施肥对土壤环境质量的影响. 农业环境科学学报, 26 (2): 667-671.
- 余海英, 李廷轩, 周健民. 2006. 典型设施栽培土壤盐分变化规律及潜在的环境效应研究. 土壤学报, 43 (4): 571-576.
- 岳冬, 束胜, 孙锦, 朱为民, 郭世荣. 2013. 外源油菜素内酯对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下小白菜生长和品质的影响. 沈阳农业大学学报, 44 (5): 696-699.
- 张古文, 朱月林, 刘正鲁, 魏国平, 胡春梅. 2008. $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对嫁接番茄生长、抗氧化酶活性和活性氧代谢的影响. 植物营养与肥料学报, 14 (3): 527-532.
- 张林. 2007. 硝酸盐供应对拟南芥侧根发展的影响. 浙江农业科学, (1): 12-15.
- 张蒙, 王秀峰, 魏珉, 杨凤娟, 史庆华, 李岩. 2015. 叶绿酸铁对硝酸盐胁迫下黄瓜幼苗渗透调节物质及抗氧化酶活性的影响. 中国蔬菜, (3): 14-18.
- 张卫峰, 马林, 黄高强, 武良, 陈新平, 张福锁. 2013. 中国氮肥发展、贡献和挑战. 中国农业科学, 46 (15): 3161-3171.
- 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 2010. 第一次全国污染源普查公报.
- Alboresi A, Gestin C, Leydecker M T, Bedu M, Meyer C, Truong H N. 2005. Nitrate, a signal relieving seed dormancy in *Arabidopsis*. Plant Cell and Environment, 28: 500-512.
- Beyzaei Z, Averina N G, Sherbakov R A. 2015. Involvement of nitrate reductase in the ameliorating effect of 5-aminolevulinic acid on NaCl-stressed barley seedlings. Acta Physiol Plant, 37: 11. DOI 10. 1007/s11738-014-1752-0.
- Britto D T, Kronzucker H. 2013. Ecological significance and complexity of N-source preference in plants. Ann Bot, 112: 957-963.
- Crawford N M. 1995. Nitrate: nutrient and signal for plant growth. Plant Cell, 7: 859-868.
- Daniel-Vedele F, Chaillou S. 2005. Nitrogen In Plant Nutritional Genomics. Boca Raton: CRC Press: 1-25.
- Drew M C, Saker L R. 1975. Nutrient supply and the growth of the seminal root system of barley. Part II. Localized, compensatory increases in lateral root growth and rates of nitrate uptake when nitrate supply is restricted to only part of the root system. J Exp Bot, 26: 79-90.
- Firestone M K, Davidson E A. 1989. Microbiological basis of NO and N_2O production and consumption in soil//Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere. Berlin: John Wiley and Sons Ltd.: 7-21.
- Forde B G. 2002. Local and long-range signaling pathways regulating plant responses to nitrate. Annu Rev Plant Biol, 53: 203-224.
- Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. 2010. Significant acidification in major Chinese croplands. Science, 327 (5968): 1008-1010.
- Guo Y F, Chen F J, Zhang F S, Mi G H. 2005. Auxin transportiform shoot to root is involved in the response of lateral root growth to localized supply of nitrate in maize. Plant Sci, 169 (5): 894-900.
- Han J P, Luo Y H, Yang L P, Liu X M, Wu L S, Xu J M. 2014. Acidification and salinization of soils with different initial pH under greenhouse vegetable cultivation. J Soils Sediments, 14: 1683-1692.
- Han J P, Shi J C, Zeng L Z, Xu J M, Wu L S. 2015. Effects of nitrogen fertilization on the acidity and salinity of greenhouse soils. Environ Sci Pollut Res, 22: 2976-2986.
- Ho C H, Lin S H, Hu H C, Tsay Y F. 2009. CHL1 functions as a nitrate sensor in plants. Cell, 38: 1184-1194.
- Hu X H, Xu Z R, Xu W N, Li J M, Zhao N, Zhou Y. 2015. Application of aminobutyric acid demonstrates a protective role of polyamine and GABA metabolism in muskmelon seedlings under $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress. Plant Physiology and Biochemistry, 92: 1-10.
- Huang H Y, Zhou P, Shi W W, Liu Q L, Wang N, Feng H W, Zhi Y E. 2012. Microbial functional diversity in facilities cultivation soils of nitrate accumulation. Procedia Environmental Sciences, 13: 1037-1044.
- Ibriki H, Cetin M, Karnez E, Flügel W A, Tilkie B, Bulbul Y, Ryan J. 2015. Irrigation-induced nitrate losses assessed in a Mediterranean irrigation district. Agricultural Water Management, 148: 223-231.
- Lam H M, Coschigano K T, Oliveira I C, Melo-Oliveira R, Coruzzi G M. 1996. The molecular-genetics of nitrogen assimilation into amino acids in higher plants. Annu Rev Plant Physiol, 47: 569-593.
- Lecomte F. 2012. Management of soil nitrate heterogeneity resulting from crop rows in a lettuce-tomato rotation under a greenhouse. Agron Sustain, 32: 811-819.
- Little D Y, Rao H Y, Oliva S, Daniel-Vedele F, Krapp A, Malamy J E. 2005. The putative high-affinity nitrate transporter NRT2.1 represses lateral root initiation in response to nutritional cues. Proc Natl Acad Sci USA, 102: 13693-13698.
- Liu K H, Tsay Y F. 2003. Switching between the two action modes of the dual-affinity nitrate transporter CHL1 by phosphorylation. EMBO Journal, 22: 1005-1013.
- Liu X J, Zhang Y, Han W X, Tang A H, Shen J L, Cui Z L, Vitousek P, Erisman J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F S. 2013. Enhanced nitrogen deposition over China. Nature, 494: 459-462.
- Macduff J H, Jackson S B. 1992. Influx and efflux of nitrate and ammonium in Italian ryegrass and white clover roots: comparisons between effects of darkness and defoliation. J Exp Bot, 43: 525-535.
- Malamy J E, Ryan K S. 2001. Environmental regulation of lateral root

- initiation in *Arabidopsis*. *Plant Physiol*, 127: 899–909.
- McKnight G M, Duncan C W, Leifert L, Golden M H. 1999. Dietary nitrate in man: friend or foe? *British Journal of Nutrition*, 81: 349–358.
- Mecharg A A, Blatt M R. 1995. NO_3^- transport across the plasma memberane of *Arabidopsis thaliana* root hairs: kinetic control by pH and memberane voltage. *J Membrane Biol*, 145: 49–66.
- Miller A J, Smith S J. 1996. Nitrate transport and compartmentation in cereal root cells. *J Exp Bot*, 47: 843–854.
- Mistrik I, Ullrich C I. 1996. Mechanism of anion uptake in plant roots: quantitative evaluation of H^+/NO_3^- and $\text{H}^+/\text{H}_2\text{PO}_4^-$ stoichiometries. *Plant Physiol & Biochem*, 34: 629–636.
- Orsel M, Chopin F, Smith S J, Krapp A, Daniel-Vedele F, Miller T. 2007. Nitrate signaling and the two component high affinity uptake system in *Arabidopsis*. *Plant Signaling Behavior*, 2: 260–262.
- Prinsi B, Negri A S, Pesaresi P, Cocucci M, Espen L. 2009. Evaluation of protein pattern changes in roots and leaves of *Zea mays* plants in response to nitrate availability by two-dimensional gel electrophoresis analysis. *BMC Plant Biology*, 9: 113.
- Reed A J, Hageman R H. 1980. Relationship between nitrate uptake, flux and reduction and accumulation of reduced in nitrogen in maize. *Plant Physiol*, 66: 1184–1189.
- Remans T, Nacry P, Pervent M, Girin T, Tillard P, Lepetit M, Gojon A. 2006. A central role for the nitrate transporter NRT2.1 in the integrated morphological and physiological responses of the root system to nitrogen limitation in *Arabidopsis*. *Plant Physiol*, 140: 909–921.
- Russell E W. 1973. *Soil conditions and plant growth*. London: Longman: 849.
- Scheible W R, Lauerer M, Schulze E, Caboche M, Stitt M. 1997. Accumulation of nitrate in the shoot acts as a signal to regulate shoot-root allocation in tobacco. *Plant J*, 11: 671–691.
- Shi W M, Yao J, Yan F. 2009. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 83: 73–84.
- Siddiqui M H, Al-Whaibi M H, Basalah M O. 2011. Role of nitric oxide in tolerance of plants to abiotic stress. *Protoplasma*, 248: 447–455.
- Trewavas A J. 1983. Nitrate as a plant hormone//British plant growth regulator group monograph 9. Oxford: British Plant Growth Regulator Group: 97–110.
- Vidal E A, Gutierrez R A. 2008. A systems view of nitrogen nutrient and metabolite responses in *Arabidopsis*. *Current Opinion in Plant Biology*, 11: 521–529.
- Walch-Liu P, Ivanov I I, Filleur S, Gan Y, Remans T, Forde B G. 2006. Nitrogen regulation of root branching. *Ann Bot (Lond)*, 97: 875–881.
- Wang R, Tischner R, Gutierrez R A, Hofinan M, Xing X, Chen M, Coruzzi G, Crawford N M. 2004. Genomic analysis of the nitrate response using a nitrate reductase-null mutant of *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 136: 2512–2522.
- Wei G P, Yang L F, Zhu Y L, Chen G. 2009. Changes in oxidative damage, antioxidant enzyme activities and polyamine contents in leaves of grafted and non-grafted eggplant seedlings under stress by excess of calcium nitrate. *Scientia Horticulturae*, 120: 443–451.
- Zhang H, Forde B G. 1998. An *Arabidopsis* MADS box gene that controls nutrient-induced changes in root architecture. *Science*, 279: 407–409.

Research Progress on Soil Nitrate Accumulation under Facility Condition and Its Effects on Crops

GU Duan-yin¹, JIAO Juan¹, GAO Jun-jie¹, WANG Xiu-feng^{2, 3*}

(¹Taian City Academy of Agricultural Sciences, Tai'an 271000, Shandong, China; ²College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China; ³State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an 271018, Shandong, China)

Abstract: Excess fertilization in facility cultivation brought high nitrate content in soil, led to secondary salinization, and caused continuous cropping obstacle. Thus, the sustainable development of facility agriculture was restricted. This paper summarized the research progress on status of nitrate accumulation in facility soil, reasons, potential risks and hazards. It also expounded the relation between nitrate and crops, and analyzed the related control measures.

Key Words: Facility; Soil; Nitrate accumulation; Harm to crops; Review