

控释氮肥在小麦上的应用研究进展

朱三明¹, 陈俊婕¹, 郝森¹, 韩同宇¹, 李玉¹, 王高阳¹, 陈剑秋^{1,2}, 杨修一^{1*}, 耿计彪^{1*} (1. 养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室, 临沂大学农林科学学院/资源与环境学院, 山东临沂 276000; 2. 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东临沭 276700)

摘要 氮素是小麦生长发育所需的营养元素之一, 合理施用氮肥可以增加小麦产量, 改善籽粒品质, 提高氮肥利用率。控释氮肥可以持续供应小麦生长所需的氮素营养, 减少后期追肥次数和劳动强度, 简化栽培技术, 减少对环境的污染。综述了控释氮肥的定义和释放类型以及施用控释氮肥对小麦产量、品质、生理特性和土壤无机氮变化等的影响, 提出控释氮肥在小麦上应用存在的问题和进一步的研究方向和展望。

关键词 控释氮肥; 小麦; 产量; 生理特性; 展望

中图分类号 S146; S512.1 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)05-0018-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.05.005



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Advances in the Application of Controlled Release Nitrogen Fertilizer in Wheat Production

ZHU San-ming, CHEN Jun-jie, HAO Miao et al (State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization, College of Agriculture and Forestry Science/ College of Resources and Environment Linyi University, Linyi, Shandong 276000)

Abstract Nitrogen is one of the nutrient elements needed for wheat growth and development. Rational application of nitrogen fertilizer could increase wheat yield, improve grain quality and nitrogen use efficiency. Controlled-release nitrogen fertilizers could continuously supply nitrogen nutrition for wheat growth, which reduced the number of fertilizer topdressing and labor intensity, simplified cultivation techniques and prevent environmental pollution. In this research, the concept and types of controlled-release nitrogen fertilizer were reviewed, and the effects of controlled-release nitrogen fertilizer application on wheat yield, quality, physiological characteristics and soil inorganic nitrogen changes were summarized. The existing problems and further research directions of controlled-release nitrogen fertilizer application in wheat were put forward.

Key words Controlled-release nitrogen; Wheat; yield; Physiological characteristics; Outlook

小麦是我国北方地区最重要的经济作物之一, 在农业生产中占重要地位。目前, 我国小麦主产区有西南麦区、长江中下游麦区、黄淮海麦区和西北麦区, 为我国粮食作物生产做出突出贡献。然而, 近年来由于种粮不仅费时费力且经济效益低下, 农村劳动力开始流失, 城市劳动力比例逐年上升^[1]。合理施肥不仅可以节省资源、减少生产成本, 还能提高单位面积小麦产量, 增大经济效益, 从而带动农民的生产积极性。

氮肥在农作物生长发育中有深远影响, 我国是化肥生产和消费大国, 氮肥用量约占世界消费总量的 28%^[2], 但是当季氮肥利用率仅为 30%~35%^[3]。氮肥利用率低而施肥量越来越高, 不仅容易造成烧苗现象, 还会造成大量氮素流失, 引起环境恶化^[4-5]。合理追施氮肥能提高氮肥利用率和达到增产效果, 但同时也增加施肥次数和劳动强度。控释氮肥是通过聚合物包膜等形式实现养分按设定的模式释放, 使其与作物需求同步的一类新型肥料^[6]。与普通氮肥相比, 控释氮肥更能满足作物对氮素的需求, 有效促进作物生长发育^[7-9], 简化栽培技术。

目前, 控释氮肥已经应用在小麦、玉米和水稻等粮食作

物上, 证明其具有提高肥料利用率、增加作物产量、减少环境污染等^[10-11] 优点, 有关控释肥在主要粮食作物, 特别是小麦上的报道较多^[12]。鉴于此, 笔者总结了前人在小麦上施用控释氮肥的研究成果, 探讨了控释氮肥的定义和释放类型, 研究了施用控释氮肥对小麦产量、品质、生理特性和土壤无机氮变化等的影响, 以期对控释氮肥在小麦上的合理施用提供参考。

1 控释氮肥的定义和释放类型

控释氮肥是通过聚合物包膜等形式, 可根据作物的需肥规律按设定的释放率和释放时间释放, 一次施用即可满足小麦整个生长期对氮素需求的新型肥料^[6]。控释氮肥既可减少氮素的损失, 提高肥料利用率^[13], 又能显著降低氮素的淋溶和挥发^[14-15], 减少环境和地下水的污染^[16]。

控释氮肥根据其释放控制方式有不同的分类, 其中张民等^[17]按照控释氮肥的溶解性释放方式, 将控释氮肥分为 3 种类型: ①水溶性氮肥, 即由物理障碍性控制的氮肥, 如包膜颗粒氮肥, 该氮肥可分为包膜颗粒肥料和基质复合肥料; ②微溶性的有机氮化合物, 可分为生物可降解的微溶有机氮化合物(如脲甲醛的缩合物)和主要以化学降解的化合物(如异丁烯环二脲, 简称 IBDU); ③微溶无机化合物, 如金属磷铵盐、部分酸化磷酸盐等。目前, 市面上以包膜材料的控释氮肥最为常见。

2 控释氮肥对小麦生长的影响

2.1 控释氮肥对小麦产量的影响 氮是小麦正常生长发育所需的元素之一, 适量的氮有助于小麦干物质的积累, 可显著增加小麦产量及其构成因素。杨焕焕等^[18]在驻马店市砂

基金项目 山东省自然科学基金项目(ZR2020QC163); 中国博士后科学基金项目(2019M652428); 临沂大学大学生创新创业训练计划项目(X201910452056)。

作者简介 朱三明(1996—), 男, 山东临沂人, 从事新型肥料研制与养分高效利用研究。*通信作者: 杨修一, 讲师, 博士, 从事新型肥料研制与养分高效利用研究; 耿计彪, 讲师, 博士, 从事植物营养和土壤养分循环研究。杨修一与耿计彪为共同通信作者。

收稿日期 2020-06-16

姜黑土上进行冬小麦田间试验,结果显示施用控释氮肥可显著提高小麦产量,与只施用磷酸钾相比增产 19.4%~41.7%,与控释氮肥施用量 100%处理相比,80%处理小麦在低肥力点减产了 4.8%;与常规普通尿素处理相比,控释氮肥施用量 80%处理小麦产量提高 6.9%,其养分投入量减少了 20%,但小麦产量几乎相同甚至略增。梁靖越等^[19]研究表明,不同比例控释掺混尿素处理的小麦产量比普通尿素处理提高 6.31%~14.23%,其中 40%控释尿素配比分别较普通尿素处理和全量控释尿素处理提高 14.23%和 7.37%,增产效果最显著。另有一些研究表明,施氮处理可显著提高小麦产量,以普通尿素与控释氮肥 40%配比处理最优,较单施尿素处理增产 697.06 kg/hm² (2014 年) 和 521.02 kg/hm² (2015 年)^[20]。也有研究表明,在相同地力条件和栽培管理下,控释氮肥与普通氮肥比例为 80:20 时,小麦产量最高,达到 6 286.9 kg/hm²,可有效降低肥料成本^[21]。以上结果均证明,控释氮肥既能节约成本又能增加小麦产量。与普通尿素单施相比,控释尿素与普通尿素掺混处理无论是控释尿素减少 20%的施氮量还是相同施氮量的条件下,小麦的产量都有极显著增加。

2.2 控释氮肥对小麦产量构成因素的影响 有效穗数、穗粒数和千粒重是小麦产量构成因素。王谋山^[22]研究表明,小麦施用等氮量控释尿素,产量增加的原因是提高产量构成因素中的穗粒数。郑文魁等^[20]在小麦-玉米轮作条件下研究发现,不同控释氮肥及施氮水平对冬小麦产量构成因素存在不同程度的影响,树脂包膜尿素处理、硫包膜尿素处理以及硫加树脂包膜尿素处理与普通尿素处理相比,均显著增加冬小麦的千粒重和穗粒数,千粒重分别增加 3.6%、3.6%和 4.7%,穗粒数分别增加 7.8%、1.5%和 9.5%,但是对小麦的穗数没有显著影响;与普通尿素处理相比,减氮 30%的树脂包膜尿素处理有效穗数、籽粒产量差异不明显,但冬小麦的千粒重显著增加。也有研究表明,等氮量条件下,与尿素处理相比,控释尿素处理分别提高小麦的穗粒数和单株有效穗数 6.8%和 5.2%,但对小麦的千粒重无显著影响^[23]。综上所述,控释氮肥能通过延缓氮素的释放时间来满足小麦生长各个关键时期的养分需求,有效提升小麦的有效穗数、穗粒数和千粒重,进而增加小麦产量。

2.3 控释氮肥对小麦籽粒品质的影响 控释氮肥根据其释放特性可在小麦生长发育的后期提供充足的氮素,适量的氮素对小麦籽粒的蛋白质含量、淀粉、可溶性糖含量起重要作用^[24]。其中,小麦籽粒蛋白质含量是评价小麦品质优劣的重要指标^[25]。刘春梅等^[26]盆栽试验表明,3 种自行研制的控释尿素处理与普通尿素处理相比,小麦籽粒的蛋白质含量分别显著提升 19.74%、17.10%、23.45%,保证了小麦植株后期不脱氮进而增加产量。马富亮等^[27]田间试验表明,与普通尿素相比,硫膜和树脂膜控释尿素处理显著提高小麦籽粒和品质,小麦籽粒蛋白质和淀粉含量分别提高 5.8%~18.9%和 0.3%~1.4%,表现出很好增产效应;2 种控释肥氮素后移的功效满足小麦后期氮素需求,氮肥偏生产力提升达显著水

平,提高氮素的利用率。另有研究表明,与相同施氮量的普通尿素处理相比,树脂膜控释尿素处理能显著提高小麦籽粒蛋白质含量,在改善沉降值、硬度和湿面筋含量上具有重要作用,以控释尿素 70%+普通尿素 30%处理效果最佳^[28]。控释氮肥能改善小麦各生育期的根系活力,提高植株各生育期的全氮含量以及籽粒蛋白质含量等,从而改变小麦的籽粒品质。

2.4 控释氮肥对小麦干物质积累和长势的影响 施氮能提高作物干物质积累,是促进增产的前提和保证^[29]。随着小麦生育时期的延长,干物质积累不断增加,在小麦返青期以前,由于植物营养体较小,干物质积累量较低,但自拔节期开始,随着施氮的处理差异渐渐显现,至开花期差异达到最大值^[30]。何杰等^[31]研究表明,小麦从拔节期到成熟期,40%控释氮肥+60%尿素处理较 100%尿素处理显著提高小麦干物质质量及生长速率,较 100%尿素和 100%控释氮肥处理的成熟期小麦单株干物质质量分别增加 44.54%和 17.42%。李敏等^[32]在安徽省太和县及苏州市 2 地进行连续 2 年田间大区试验,结果表明在降雨量丰沛的太和,拔节期施用控释尿素较普通尿素能显著提高小麦花后干物质和氮素积累,提高产量和经济效益。也有研究表明,小麦干物质积累量随小麦生育期延长而增加;小麦分蘖期间,随着控释氮肥施用量的增加,小麦干物质积累量呈先增加后减少的趋势,常规尿素处理显著高于其余各处理;小麦拔节、抽穗及成熟期,40%控释氮肥掺混 60%尿素处理干物质积累量均较常规尿素处理高,分别增长 15.09%、13.48%、12.09%^[33]。控释氮肥的氮素释放特点能够与小麦植株氮吸收规律相吻合,通过提高干物质积累来显著提高产量水平^[34]。

小麦株高、叶面积、叶绿素含量等是反映小麦长势的重要指标,研究表明增大旗叶面积能有效提高小麦产量^[35],适量的叶片生长可以通过促进作物中后期光合作用与能量转换来为后期作物产量提供条件^[33]。夏光利等^[30]小麦大田试验表明,各施氮处理较不施氮处理小麦株高增加 2.22~3.22 cm,各处理间小麦株高差异不明显,适当增加小麦株高可为籽粒产量的提高奠定较好基础。另有研究表明,40%控释氮肥+60%普通尿素处理小麦旗叶、倒二叶及顶二叶面积均比其他处理高,小麦生长较优,与小麦籽粒产量具有显著相关作用^[36]。

3 控释氮肥对小麦氮素养分利用率的影响

肥料的养分利用率是衡量肥料效果的重要指标。提高氮素利用率的本质是使肥料的释放特性与小麦需求相同步,因此肥料的释放时间和释放率与小麦各个时期生长发育所需养分不均衡是造成氮素利用率低的主要原因。与单施普通尿素相比,控释尿素和普通尿素以不同比例掺混的氮素利用率有不同程度的增加,控释尿素与普通尿素以 4:6 比例掺混的小麦氮素利用率为 27.26%,较等施氮量下的普通尿素处理增产 14.23%^[19];也有研究表明,控释尿素施用量 100%较普通尿素施用量 100%处理小麦产量显著增加,氮素利用率最高^[36]。韩科峰等^[37]小麦大田试验表明,在等量氮磷钾

养分条件下,控释尿素处理的氮肥利用率最高,为 20.9%,比普通尿素处理提高 6.2%。谭德水等^[38]的 2 年小麦田间定位试验表明,控释氮肥施用处理较普通氮肥处理氮素积累量增加 24.5 kg/hm²,且可提高氮素向籽粒的转运比例,氮肥利用率提高 11.7%。以上研究都表明控释氮肥能显著提高小麦的氮素养分利用率,可通过满足小麦植株的氮素需求来协调小麦的营养生长与生殖生长,保证小麦增产。

4 控释氮肥对土壤无机氮变化的影响

控释肥料缓慢释放养分的特性能调控土壤养分的动态变化,进而改善土壤肥力。叶青等^[39]研究表明,施入土壤中的氮肥因硝化、氨化过程对土壤硝态氮、铵态氮含量有显著影响,等氮量条件下,控释氮肥与普通氮肥相比,普通氮肥在小麦成熟期土壤 0~20 cm 土层到 20~40 cm 土层土壤硝态氮急剧减少,在 20~40 cm 土层到 180~200 cm 土层土壤硝态氮又逐渐增多,施用控释氮肥有利于减少硝态氮的淋溶,提高氮肥利用率。也有研究表明,冬小麦的须根系主要分布在土壤上层中,0~20 cm 土层有利于作物对硝态氮的吸收,土壤深处 60 cm 以下土层普通尿素处理硝态氮含量显著高于控释氮肥处理,因此施用控释氮肥可有效减缓土壤速效氮淋失^[40]。控释氮肥不仅可以减少氮素向深层土壤移动,具有保氮能力,进而提高小麦的产量,也减少因为氮素淋溶,铵态氮和硝态氮流入地下水所造成的污染。

5 问题与展望

5.1 控释氮肥在小麦上应用存在的问题 小麦各生长发育时期有不同氮素需求,一次性大量基施速效氮肥不仅肥料养分利用率低、浪费资源,还会造成严重的环境问题,合理追施氮肥可以提高氮素利用率满足小麦对养分的需求,但势必会增加劳动强度和追肥次数。控释氮肥可以延缓氮素释放时间且损失较少,能满足小麦从拔节到抽穗、灌浆时期对氮素的需求,保证小麦的高质稳产,简化栽培技术,减少对环境的污染。然而,控释氮肥在小麦上的应用还有很多问题亟待解决:①控释氮肥在小麦上的注意事项和施用方法尚不完善,缺乏统一行业标准;②控释氮肥的养分释放规律与小麦植株生长养分吸收规律的同步营养机理研究应进一步加强;③不同类型控释氮肥在小麦上的作用效果还需进一步试验。

5.2 控释氮肥在小麦上应用研究与展望 针对控释氮肥在小麦上应用存在的问题,建议从以下几个方面深入研究:①建立完整、统一的评价体系,研制与小麦生长需氮规律相吻合的同步营养控释专用氮肥;②继续研究控释氮肥的控释特性以及对小麦产量和品质等的影响机理;③根据小麦的需肥特性及栽种地环境,制定小麦专用控释氮肥的使用方法 & 行业标准。因此,充分发挥控释氮肥对小麦增产的潜力是小麦安全生产和保护环境的必然趋势。

参考文献

- [1] 杨帆,孟远夺,姜义,等. 2013 年我国种植业化肥施用状况分析[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):217-225.
- [2] FIXEN P E, WEST F B. Nitrogen fertilizers: Meeting contemporary challenges[J]. Ambio, 2002, 31(2): 169-176.
- [3] 苏胜齐,王正银,张敏,等. 缓释复合肥与覆膜旱作对水稻氮素营养的效应研究[J]. 水土保持学报,2006,20(1):45-49.

- [4] DHADLI H S, BRAR B S, BLACK T A. N₂O emissions in a long-term soil fertility experiment under maize-wheat cropping system in Northern India [J]. Geoderma regional, 2016, 7(2): 102-109.
- [5] ZAMAN M, BLENNERHASSETT J D. Effects of the different rates of urease and nitrification inhibitors on gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, nitrate leaching and pasture production from urine patches in an intensive grazed pasture system[J]. Agriculture ecosystems & environment, 2010, 136(3/4): 236-246.
- [6] 陈剑秋, 张民, 杨越超. 包膜控释肥养分释放特性的研究[J]. 化肥设计, 2006, 44(2): 56-58, 61.
- [7] TRENKEL M E. Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture [M]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 1997.
- [8] MEISTER S S. Controlled release fertilizers: Properties and utilization [M]. Sendai: Konno Printing Co Ltd, 1999: 59-104.
- [9] NI X Y, WU Y J, WU Z Y, et al. A novel slow-release urea fertiliser: Physical and chemical analysis of its structure and study of its release mechanism[J]. Biosystems engineering, 2013, 115(3): 274-282.
- [10] ROCHESTER I J. Using seed nitrogen concentration to estimate crop N use-efficiency in high-yielding irrigated cotton[J]. Field crops research, 2012, 127: 140-145.
- [11] LUBKOWSKI K, GRZMIL B. Controlled release fertilizers [J]. Polish journal of chemical technology, 2007, 9(4): 81-84.
- [12] 于立芝, 史桂萍, 孙治军. 控释氮肥在小麦上的示范应用效果[J]. 山东农业科学, 2014, 46(6): 104-105.
- [13] 陈剑秋, 张民, 杨越超. 应用电导率评价包膜控释钾肥的养分释放特性[J]. 磷肥与复肥, 2005, 20(5): 17-20.
- [14] SOARES J R, CANTARELLA H, MENEGALE M L D C. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors[J]. Soil biology & biochemistry, 2012, 52: 82-89.
- [15] NI K, PACHOLSKI A, KAGE H. Ammonia volatilization after application of urea to winter wheat over 3 years affected by novel urease and nitrification inhibitors[J]. Agriculture ecosystems & environment, 2014, 197: 184-194.
- [16] 邵蕾, 王丽霞, 张民, 等. 控释肥类型及氮素水平对氮磷钾利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 170-175.
- [17] 张民, 史衍奎, 杨守祥, 等. 控释和缓释肥的研究现状与进展[J]. 化肥工业, 2001, 28(5): 27-30.
- [18] 杨焕焕, 孙克刚, 张琨, 等. 控释尿素在冬小麦上的一次性施肥节肥增效研究[J]. 河南科学, 2017, 35(11): 1797-1800.
- [19] 梁靖越, 张敬昇, 王昌全, 等. 控释尿素对小麦籽粒产量和氮素利用率的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(1): 157-164.
- [20] 郑文魁, 李成亮, 窦兴霞, 等. 不同包膜类型控释氮肥对小麦产量及土壤生化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 162-167, 174.
- [21] 王金宁, 刘世伟, 苏保平, 等. 不同比例控释氮肥与普通氮肥对小麦产量影响研究[J]. 宁夏农林科技, 2018, 59(9): 16-17.
- [22] 王谋山. 控释尿素对小麦产量及氮肥利用率的影响[J]. 现代农业科技, 2018(18): 1, 3.
- [23] 李泽丽, 刘之广, 张民, 等. 控释尿素配施黄腐酸对小麦产量及土壤养分供应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 959-968.
- [24] 李淑文, 文宏达, 薛宝民, 等. 小麦高效吸收利用氮素的生理生化特性研究进展[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(4): 131-135.
- [25] 王月福, 姜东, 于振文, 等. 氮素水平对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响及其生理基础[J]. 中国农业科学, 2003, 36(5): 513-520.
- [26] 刘春梅, 罗胜国, 刘元英. 控释尿素对春小麦根系活力和籽粒蛋白质含量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2012, 24(4): 4-7.
- [27] 马富亮, 宋付朋, 高杨, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对小麦产量、品质及氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 67-72.
- [28] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 等. 树脂膜控释尿素及普通尿素配施对强筋小麦产量、品质和氮肥利用率的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(2): 339-343.
- [29] 宋桂云, 徐寿军, 范富, 等. 氮肥对不同穗型水稻产量及干物质积累与分配的影响[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(6): 1590-1595.
- [30] 夏光利, 朱国梁, 史桂芳, 等. 控释氮肥对小麦生长发育及产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(36): 48-50.
- [31] 何杰, 李冰, 王昌全, 等. 不同控释氮肥比率对土壤无机氮、微生物及小麦生长的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(3): 349-356.
- [32] 李敏, 武际, 韩上, 等. 控释氮肥拔节期施用对冬小麦产量及干物质、氮素积累与分配的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(7): 955-962.
- [33] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 等. 控释掺混氮肥对稻麦作物生长和产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(8): 1287-1296.

- [29] CHAU T N, KING J, YOO K S, et al. Effect of prestorage UV-A, -B, and -C radiation on fruit quality and anthocyanin of 'Duke' blueberries during cold storage[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2014, 62(50): 12144–12151.
- [30] 杨乐, 杨俊枫, 侯智霞, 等. UV-B 对不同发育时期离体蓝莓主要果实品质及相关酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2015, 35(12): 2477–2482.
- [31] 杨俊枫, 史文君, 杨乐, 等. 紫外光对‘北陆’越橘转色果花青苷积累、关键酶活性及其基因表达的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(4): 663–673.
- [32] 吴思政, 梁文斌, 聂东伶, 等. 高温胁迫对不同蓝莓品种光合作用的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(11): 1–8.
- [33] 何丽娜, 王德炉, 郝家孝, 等. 4 个兔眼蓝莓品种光合特性对季节变化的响应[J]. 经济林研究, 2019, 37(2): 95–103.
- [34] 沈素贞. 四个蓝莓品种的生理生态及扦插繁殖研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014: 22–28.
- [35] 孙山, 李鹏民, 刘庆忠, 等. 高灌蓝莓光合作用对若干环境因子的响应[J]. 园艺学报, 2007, 34(1): 67–70.
- [36] 姚平, 周文杰, 黄国辉, 等. 温度对 5 个蓝莓品种花粉发芽率及着果率的影响[J]. 中国南方果树, 2017, 46(1): 114–117.
- [37] POLASHOCK J J, EHLENFELDT M K, STRETCH A W, et al. Anthracnose fruit rot resistance in blueberry cultivars[J]. Plant disease, 2005, 89(1): 33–38.
- [38] 张悦, 周琳, 张会慧, 等. 低温胁迫对蓝莓枝条呼吸作用及生理生化指标的影响[J]. 经济林研究, 2016, 34(2): 12–18.
- [39] SPINARDI A, COLA G, GARDANA C S, et al. Variation of anthocyanin content and profile throughout fruit development and ripening of highbush blueberry cultivars grown at two different altitudes[J/OL]. Front in plant science, 2019, 10 [2019–10–25]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01045>.
- [40] 颜丽菊, 蒋芯, 赵晨彬, 等. 大棚栽培对“密斯蒂”蓝莓成熟期和果实品质的影响[J]. 中国南方果树, 2018, 47(6): 69–73.
- [41] CHITNIS V R, GAO F, YAO Z, et al. After-ripening induced transcriptional changes of hormonal genes in wheat seeds: The cases of brassinosteroids, ethylene, cytokinin and salicylic acid[J]. PLoS One, 2014, 9(1): 1–14.
- [42] VAISTIJ F E, GAN Y B, PENFIELD S, et al. Differential control of seed primary dormancy in *Arabidopsis* ecotypes by the transcription factor SPATULA[J]. PNAS, 2013, 110(26): 10866–10871.
- [43] WANG D L, GAO Z Z, DU P Y, et al. Expression of ABA metabolism-related genes suggests similarities and differences between seed dormancy and bud dormancy of peach (*Prunus persica*) [J/OL]. Frontiers in plant science, 2016, 6 [2019–10–25]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01248>.
- [44] LIANG Y C, REID M S, JIANG C Z. Controlling plant architecture by manipulation of gibberellic acid signalling in petunia[J]. Horticulture research, 2014, 1: 1–6.
- [45] 刘思. 赤霉素解除蓝莓芽休眠的作用及机制[D]. 大连: 大连理工大学, 2017: 16–35.
- [46] 孙波, 张继丹, 黄宏, 等. 外源植物生长调节剂在野生蓝莓抚育中的应用研究[J]. 国土与自然资源研究, 2019(1): 83–87.
- [47] 安迪. 赤霉素对兔眼蓝莓生长发育的影响研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018: 26–37.
- [48] 曲文颖, 刘真真, 谢琳森, 等. 外源脱落酸和乙烯利对蓝莓重要品质的调控[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(17): 126–129.
- [49] 孙莹, 侯智霞, 苏淑钗, 等. ABA, GA₃ 和 NAA 对蓝莓生长发育和花青苷积累的影响[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(1): 6–11.
- [50] YAMANE T, TAE JEONG S, GOTO-YAMAMOTO N, et al. Effects of temperature on anthocyanin biosynthesis in grape berry skins[J]. American journal of enology and viticulture, 2006, 57(1): 54–59.
- [51] 段宇. 不同采收期与外源物质对蓝莓抗氧化物质的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013: 17–33.
- [52] 刘淑慧. 蓝莓果实关键品质形成机理以及蔗糖、钾对其影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012: 17–37.
- [53] 车玉红, 杨波, 高俊萍. 外源钙对红地球葡萄贮藏过程中果梗及品质影响的研究[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(4): 744–749.
- [54] 谢国芳, 杨飞艳, 陈欢欢, 等. 采前喷施糖醋螯合钙对蓝莓外观及品质的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(2): 167–170.
- [55] 王瑞, 胡旭林, 谢国芳, 等. 生长期喷施有机钙对蓝莓鲜果的保鲜作用研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(6): 211–218.
- [56] 刘庆, 田侠, 史衍玺. 蓝莓对外源硒的吸收、转化及其对品质效应的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(8): 1151–1158.
- [57] HART J, STRIK B, WHITE L, et al. Nutrient management for blueberries in Oregon[R]. Corvallis: Oregon State University Extension Service, 2006.
- [58] 庞薇, 侯智霞, 李国雷, 等. 氮肥对蓝莓树体生长及果实品质的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(13): 225–229.
- [59] 朱玉, 娄鑫, 郑云普, 等. 不同氮素形态对蓝莓幼苗生长及光合参数的影响[J]. 中国南方果树, 2016, 45(1): 98–101.
- [60] 唐颖. 高铵胁迫对土壤性质、蓝莓苗生长及生理的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 19–33.
- [61] 蒋明三, 杨涛, 魏永祥, 等. 施用强根素对蓝莓生长及品质的影响[J]. 北方果树, 2018(3): 14–16.
- [62] LORENC-GRABOWSKA E, GRYGLEWICZ G. Adsorption of lignite-derived humic acids on coal-based mesoporous activated carbons[J]. Journal of colloid and interface science, 2005, 284(2): 416–423.
- [63] 唐茜. 腐殖酸对蓝莓产量及果实品质的影响[J]. 中国南方果树, 2019, 48(3): 128–130, 133.
- [64] 陈小民. 外源亚精胺对干旱胁迫下蓝莓生理生化的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017: 19–33.

(上接第 20 页)

- [34] 周宝元, 王新兵, 王志敏, 等. 不同耕作方式下缓释肥对夏玉米产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 821–829.
- [35] 傅兆麟, 马宝珍, 王光杰, 等. 小麦旗叶与穗粒重关系的研究[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(1): 92–94.
- [36] 何杰, 张敬昇, 王昌全, 等. 包膜控释氮肥配施尿素对冬小麦产量与氮素积累及利用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 34–42.
- [37] 韩科峰, 陈余平, 胡铁军, 等. 不同种类尿素对小麦产量和氮肥利用率的影响[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(3): 375–376.
- [38] 谭德水, 江丽华, 房灵涛, 等. 控释氮肥一次施用对小麦群体调控及养分利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(11): 1523–1531.
- [39] 叶青, 曹国军, 耿玉辉. 控释氮肥在小麦玉米轮作体系中的养分高效利用研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(8): 124–129.
- [40] 孙云保, 张民, 郑文魁, 等. 控释氮肥对小麦-玉米轮作产量和土壤养分状况的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 115–121.