

缓/控释肥料研究进展及其对农田氮素流失的防控效果

何阳¹, 王秀荣^{1*}, 陈新平² (1. 根系生物学研究中心, 华南农业大学亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广东广州 510642; 2. 西南大学资源环境学院, 西南大学长江经济带农业绿色发展研究中心, 重庆 400000)

摘要 缓/控释肥料的养分可以按照设定的释放规律和释放期缓慢或控制释放, 延长植物对养分吸收利用的有效期, 对于减少化肥施用和提高利用率至关重要。目前, 缓/控释肥料应用的效果, 以及对农田氮素流失的防控效果的综合性分析还较少。综合分析了国内 15 年缓/控释肥料的田间应用数据, 从缓控释肥料的种类及作用机理, 缓/控释肥料的应用效果, 缓/控释肥料对农田氮素流失的防控, 以及缓/控释肥料推广瓶颈与建议等几个方面, 综述了缓/控释肥料的研究进展及其对农田氮素流失的防控效果, 为缓/控释肥料在农田更好地推广应用提供支撑。

关键词 缓/控释肥料; 农田氮素流失; 氮肥利用率; 防控效果

中图分类号 S158 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)21-0007-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.21.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Review of Slow/Controlled Release Fertilizer and Its Prevention and Control Effects of Farmland Nitrogen Loss

HE Yang¹, WANG Xiu-rong¹, CHEN Xin-ping² (1. Root Biology Center / State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Sub-tropical Agro-bioresources, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642; 2. College of Resources and Environment, Agricultural Green Development Research Center of Yangtze River Economic Belt, Southwest University, Chongqing 400000)

Abstract The nutrients of slow/controlled release fertilizers can be released slowly or controlled according to the given release pattern and period. Slow/controlled release fertilizers can prolong the effective period of nutrient absorption and utilization by plants, which is very important to reduce the application of chemical fertilizers and improve fertilizer use efficiency. At present, the comprehensive analysis of the slow/controlled release fertilizers on the application effects and prevention and control effects of nitrogen loss is seldom reported in farmland. This paper comprehensively analyzed the field application data of slow/controlled-release fertilizers in China for 15 years, and summarized the research progress of slow/controlled-release fertilizers and their prevention and control effects on nitrogen loss in farmland from the following several aspects, classification and nutrient release mechanisms, application effects, prevention and control of nitrogen loss in farmland, and bottlenecks and suggestions for promotion of slow/controlled-release fertilizers. The aim of the current review was to provide the support for the better application of slow/controlled release fertilizers in farmland.

Key words Slow/controlled release fertilizer; Nitrogen loss in farmland; Nitrogen use efficiency; Prevention and control effect

根据联合国粮食与农业组织 (FAO) 统计数据, 2002—2018 年我国化肥平均年产量中, 氮肥和磷酸盐类肥料产量均为世界第一, 钾肥产量位居第四位。同时, 我国平均年农业用肥量为世界第一。然而, 由于在农业生产中肥料选择不当、养分配比不平衡、施肥技术落后等原因造成氮肥和磷肥利用率低^[1-3]。每年农业施用的氮肥通过淋洗和径流等途径损失超过 1 000 万 t, 相当于超过 2 000 万 t 尿素, 直接经济损失 400 多亿元, 不仅对环境造成极大威胁, 而且造成能源与资源的巨大浪费^[4]。如何提高氮肥利用效率, 减少氮素淋洗和径流等损失是我国农业可持续发展的必然要求^[5]。而缓/控释肥料的应用可以提高肥料利用率, 减少肥料施用量, 同时降低环境污染的风险。因此, 缓/控释肥料成为肥料研究和应用的趋势。

1 缓/控释肥料的种类及作用机理

广义上, 缓/控释肥料是指营养释放速度相对迟缓, 释放时间可控, 释放期较普通化肥更长, 且在作物生长的全部时期都能满足生长所需营养的肥料^[6]。目前不同学者以及国家行业标准对缓/控释的定义有所差异。我国化工行业标准 (HG/T 3931—2007) 把缓/控释肥料定义: 以各种调控机制使

其养分释放缓慢, 延长植物对其养分吸收利用的有效期, 使其养分按照设定的释放规律和释放期缓慢或控制释放的肥料。

控释肥料通过采用各种高分子化合物进行包膜处理, 在常规肥料颗粒表面形成一种薄膜, 对化肥的水溶性进行严格阻隔, 有效地抑制了肥料养分的释放, 使肥料养分释放时间和强度与作物养分吸收规律相吻合 (或基本吻合)^[5]。控释肥料的养分供应速度由包膜的厚度和环境温度控制, 其中, 温度是主要因素^[7]。

缓释肥料通过包膜、物理吸附、化学反应等方式使养分在土壤中缓慢释放, 延长肥料在土壤中的有效期。不同于控释肥料, 缓释肥的包裹膜通常由一种或多种枸溶性或微溶性无机肥料、无机化合物或矿物构成。由于水溶性肥料被非水溶性肥料或微溶性化合物所包裹, 在土壤中能在一段时间内缓慢释放供植物持续吸收利用^[8]。将肥料经一定的工艺处理, 吸附到载体上, 当缓释肥料施入土壤后, 其在土壤中缓慢地从载体上解析, 达到缓释作用^[9]。尿素与醛类在一定条件下反应可制得有机微溶性缓释肥料, 主要包括脲甲醛 (MU)、异丁叉二脲 (IBDU)、丁烯叉二脲 (CDU)^[10-11]。该类缓释肥料施入土壤后, 在土壤微生物、土壤温度和湿度等因素作用下, 缓慢释放氮素^[12-14]。稳定性肥料是指经过一定工艺加入脲酶抑制剂和 (或) 硝化抑制剂, 施入土壤后能通过脲酶抑制剂抑制尿素的水解, 和 (或) 通过硝化抑制剂减缓铵态氮的硝化, 使肥效期得到延长的一类含氮肥料, 从功能上可视为缓

基金项目 国家自然科学基金项目 (32072668)。
作者简介 何阳 (1982—), 男, 陕西汉中人, 硕士, 从事作物养分管理研究。* 通信作者, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事植物营养生理、植物营养遗传和根系生物学研究。
收稿日期 2021-03-16

释肥料^[7,15]。土壤脲酶抑制剂是对土壤脲酶活性有抑制作用的化合物或元素^[16]。脲酶抑制剂有氢醌、N-丁基硫代磷酸三胺、邻苯基磷酸二胺、硫代磷酸三胺等^[17]。

2 缓/控释肥料的应用效果

以“缓释肥”“控释肥”“产量”为关键词,在知网数据库检索 2009 年 8 月—2020 年 8 月发表的文章,最终收集到包含缓/控释肥料施肥和常规肥料处理,且同时具有产量等指标的有效文献共计 337 篇。由图 1、2 可知,关于缓/控释肥料的应用研究主要集中在粮食作物,共计 225 篇,占所有研究文献的 67%,其次为蔬菜作物。在粮食作物中,研究主要集中在水稻上,共计 102 篇,占缓/控释肥料应用在粮食作物研究文献的 45%。

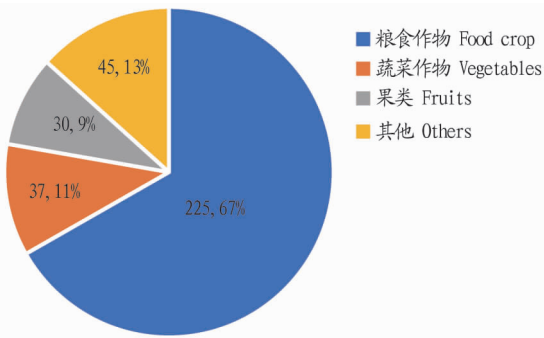


图 1 不同作物施用缓/控释肥料的文献数量及占比

Fig. 1 The number and ratio of the references related to application of slow / controlled release fertilizers to different crop species

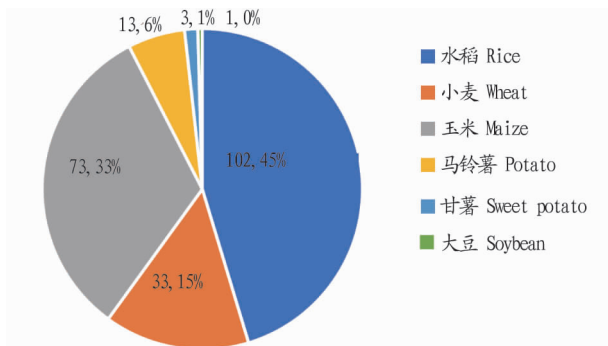
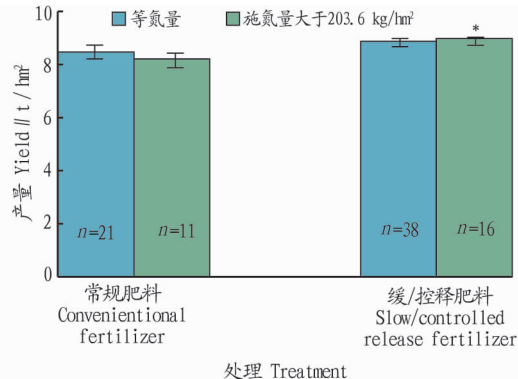


图 2 不同种类粮食作物施用缓/控释肥料的文献数量及占比

Fig. 2 The number and ratio of the references related to application of slow / controlled release fertilizer to different food crop species

2.1 缓/控释肥料提高作物产量 以“缓释肥”“控释肥”“水稻”为关键词,在知网数据库检索 2006—2020 年的发表文章,收集到包含种植户习惯施肥(常规肥料)和缓/控释肥料处理,且含有施氮量、产量、氮肥利用率等测定指标的有效文章共计 50 篇。随后,整理出 69 组种植户习惯施肥(常规肥料)处理与施用缓/控释肥料处理的试验数据集,并细分为等氮量数据集(27 组)和减氮量数据集(48 组)。由图 3 可知,在等氮量条件下,施用缓/控释肥料的水稻产量为 8.77 t/hm²,而施用常规肥料的水稻产量为 8.42 t/hm²。总体上,缓/控释肥料与常规肥料相比,水稻产量无显著差异。

但进一步分析发现,当施氮量大于平均值 203.6 kg/hm² 时,缓/控释肥料与常规肥料对产量的影响差异显著,施用缓/控释肥料的水稻产量从 8.21 t/hm² 提高到 8.96 t/hm²,增产幅度达 9.14%。



注：“*”代表 2 个处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: “*” represents significant difference between the two treatments ($P < 0.05$)

图 3 等氮量施用缓/控释肥料对水稻产量的影响

Fig. 3 Effects of application of slow / controlled release fertilizers with equal nitrogen rates on rice yield

研究表明,苹果、葡萄、蜜柚和柑橘等果树上施用缓/控释肥后,产量均有不同程度的提高,增产幅度分别为 4.55%~25.13%^[18-20]、7.2%~14.5%^[21]、4.76%^[22]、12%~26%^[23]。缓/控释肥料能够提高作物产量,减少施肥次数,提高农产品品质。在同等氮素施肥量的前提下,大白菜底肥一次性施用包膜控释肥料与施用传统复合肥 2 次(底肥、莲座期)相比,单株结球质量增加了 0.42 kg,产量提高了 41.9%^[24]。

2.2 缓/控释肥料提高氮肥利用率 缓/控释肥在增产的同时,也提高了水稻的氮肥利用效率^[25]。在等氮量条件下,与常规肥料的氮肥利用率 30.1% 相比,缓/控释肥料处理提高到 44.4%。这与符建荣^[25]在日本水稻上的研究结果基本一致。与传统氮肥相比,等氮量施用树脂包膜类控释氮肥后,水稻产量显著增加 4.0%~9.2%,氮肥利用率由 20.9%~31.1% 提高到 34.0%~37.4%。

相较于水稻种植而言,蔬菜种植具有高施肥量、高复种指数、高经济效益、高频度农事操作等特点^[26]。在华南地区蔬菜种植体系中,氮肥利用率仅为 18.4%~20.6%^[27]。在五月蔓油菜盆栽试验中,每盆基施等量氮素(1.80 g),施用包膜尿素与尿素相比,地上部鲜重增加 35.99%,氮肥利用率由 41.05% 提高到 58.59%^[28]。

2.3 缓/控释肥料减少肥料施用量 施用缓/控释氮肥是减少化肥施用量的重要举措^[29]。一定程度上减少缓/控释肥料用量,不会降低水稻产量,同时,可以提高肥料利用率,减少氮素流失。在减施氮肥 17.9% 的条件下,与传统肥料相比,施用缓/控释肥料后水稻产量基本持平(图 4)。

在其他粮食作物上减量施用缓/控释肥料,同样可以在不降低作物产量的同时,提高肥料利用率,减少氮素流失。在华北地区小麦常规肥料施氮量为 315 kg/hm²,而通过控释

肥减量 20% 方式,小麦地上部吸氮量显著增加,周年产量提高 4.8%^[30]。在果树上,与常规肥料相比,减量 20% 施用控释肥后,苹果产量增加 7.17%^[18],杏产量基本持平^[31]。

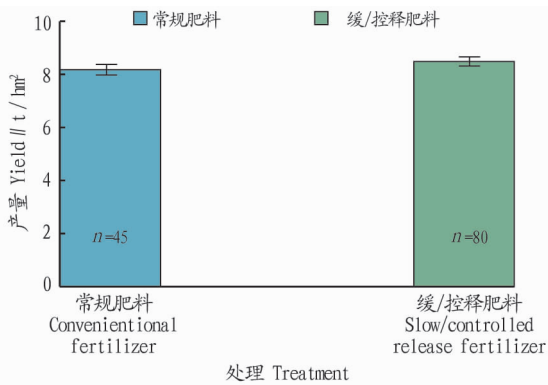


图 4 缓/控释肥料氮肥减施对水稻产量的影响

Fig. 4 Effects of reduced N application of slow / controlled release fertilizers on rice yield

综上所述,通过缓/控释肥料的应用,等施氮量的条件下,与施用常规肥料相比氮肥利用率极显著增加;在一定程度上减少施氮量的情况下,与施用常规肥料相比产量增加或持平。因此,缓/控释肥料的应用,可以提高氮肥利用率,减少氮肥施用量,从而减少了氮素流失,降低了因化肥过量施用对环境造成的污染^[32-33]。

3 缓/控释肥料农田氮素流失的防控

3.1 农田氮素流失及其危害 我国化肥年施用量高达 5 984.1 万 t,单位耕地面积的化肥施用量达 446.12 kg/hm²,远高于国际认定的 225 kg/hm² 的安全上限^[29]。目前主要粮食作物的氮肥利用率平均为 27.5%^[34-35],较低的利用率造成资源浪费。《第一次全国污染源普查公报》显示,我国农业总氮(TN)的排放量为 270.46 万 t,占总排放量的 57.2%。其中全国种植业总氮流失量为 159.78 万 t,占农业总排放量的 59.1%。农田氮素流失是农业面源污染的重要来源^[36-37]。部分未被植株吸收利用的氮素通过淋洗和径流进入江河湖泊,导致水质严重恶化,造成环境污染^[38]。由此可见,过量施肥和肥料利用率低,加剧农田氮素的流失,不但增加了环境污染的风险,同时也增加了农业生产的成本^[39]。

3.2 农田氮素流失主要途径 农田氮素流失的 2 种基本途径是淋溶损失和地表径流^[40]。影响氮素淋溶和径流输出的关键因素主要包括降雨强度、灌溉量、坡度、覆盖度、肥料种类以及肥料用量等。降雨会影响氮素流失中总氮、铵态氮和有机氮组分,如果在氮肥施用后 20 d 内发生降雨将会显著增加稻田氮素损失^[41]。旱地降雨地表径流含有大量的泥沙负荷,而泥沙颗粒物会富集大量的氮素养分^[42]。不同形态氮和泥沙的平均流失率随着降雨强度的增强而增加^[43]。除降雨外,灌溉量也是影响氮素流失的关键因素。研究表明不同稻田水分管理能显著影响稻田的氮素损失。干湿交替灌溉与常规淹水相比,大幅降低 41.9% 的田间灌溉量和 57.9% 的径流量,进而总氮(TN)和铵态氮(NH₄-N)径流流失量分别降低 52.6% 和 51.8%,同时降低了 14.2% 的渗漏水量和

9.4% 的总氮(TN)淋失量^[44-45]。坡度和植被覆盖度主要影响径流强度和次数。在一定坡度范围内,坡耕地的次降雨地表径流量和径流侵蚀模数,随着坡度的增大而增加^[46]。董月群等^[47]研究表明,植被覆盖可以减小坡面 25%~70% 径流的产生,降低 40%~90% 泥沙的产生。刘彬彬^[48]研究表明,3 种不同牧草与玉米覆盖比较,平均径流中总氮流失量、平均泥沙中总氮流失量、平均氮素总流失量分别降低 30.63%、20.19%、22.66%。

3.3 缓/控释肥料防控农田氮素流失 肥料的选择和施用同样是影响氮素流失的重要因素。施用缓/控释肥料显著降低了氮素流失量^[37]。侯朋福等^[49]通过 3 年的定位监测试验发现,等氮量施用不同肥料,在稻田径流易发期,缓/控释肥料氮素流失量低于常规肥料。叶玉适等^[44-45]研究表明,在等氮量处理下,控释 BB 肥(Bulk Blending Fertilizer)和树脂包膜尿素较常规尿素田面水总氮(TN)平均浓度分别降低 24.6% 和 78.3%,总氮(TN)径流流失量分别降低 29.4% 和 32.8%;同时,水稻全生育期渗漏水总氮(TN)平均浓度分别降低 10.2% 和 43.3%,总氮(TN)淋失量分别降低 26.1% 和 39.5%。在旱地作物玉米试验中,相对于常规复合肥处理,等量控释复合肥处理氮素的总流失量降低了 26.3%^[50]。施肥量越大流失量越大^[51]。司友斌等^[52]研究表明,地表氮素流失量与施氮量密切相关,在一定施氮量的基础上每增施 1 kg/hm²,通过径流损失的氮素就会增加 0.56~0.72 kg/hm²。施用缓/控释肥料是减少化肥施用量的重要举措^[29]。研究表明,与常规氮肥相比,缓/控释肥料氮肥利用率高,在施氮量减少 30%~40%,可以实现水稻稳产和高产^[32,53],同时,能够有效降低氮素流失的风险性。

4 缓/控释肥料推广瓶颈与建议

4.1 缓/控释肥料推广瓶颈

4.1.1 缓/控释肥料使用成本高。缓/控释肥料价格高是限制其在农业生产中,尤其是在大田作物上推广应用的主要因素^[1]。缓/控释肥料价格通常是普通肥料的 2~8 倍^[54-55],如在国外包膜控释肥料尿素的价格为普通尿素的 5~6 倍^[56]。缓/控释肥料价格高主要是由于生产成本低、流通成本高^[57]。一方面,包膜材料成本价格高,生产工艺要求高。另一方面,产品宣传推广和消费者赊销行为也是导致缓/控释肥料价格过高的因素^[57]。

4.1.2 种植户对缓/控释肥料认知不足。种植户对控释缓释肥料的认知不足也是一个原因。缓/控释肥料的应用,不但可以增加种植户的经济效益,同时也会创造环境效益。从种植户利益出发,缓/控释肥料可以提高作物产量,减少人工成本^[20,24],提升作物品质^[19,58]。从降低环境风险出发,缓/控释肥料能够减缓或控制养分的释放,提高肥料利用率,减少肥料的淋洗等损失,缓解对生态环境的影响^[59]。但种植户往往通过增加施肥量来保证自身利益的最大化,并不会考虑环境效益。据统计,83.3% 的农户认为大量施肥对环境没有影响^[60]。种植户对于缓/控释肥料等新型肥料,接受认可程度较低^[57]。

4.2 缓/控释肥料推广建议

4.2.1 降低缓/控释肥料的使用成本。如何降低肥料成本是缓/控释肥料推广和应用遇到的首要问题。在缓/控释肥料的生产、流通、施用过程中,各环节承载的主体不同,面临的问题不同,但都有追求效益的目标。首先从生产环节,肥料生产商应从包膜材料选择入手,选择更廉价、环境友好的包膜材料,改进生产工艺流程和设备,降低生产成本,减少与传统肥料的价格差距。其次,在整个链条中,政府部门需要发挥政策引导和财政补贴的作用。对缓/控释肥料的生产企业、流通企业给予一定的优惠政策或补贴。政府部门可以引导和鼓励各个环节的主体都参与,采取“企业让一点,政府补一点,种植户出一点”的模式,降低缓/控释肥料的使用成本。与此同时,当缓/控释肥料应用达到一定面积,肥料的需求量达到一定量级,企业的生产规模达到一定程度,也能够相应地降低种植户的使用成本。

4.2.2 推广和宣传缓/控释肥料。企业和政府相关部门可以通过组织培训,让农业技术人员和种植户学习缓/控释肥料的相关知识和施肥技术,了解缓/控释肥料带来的经济效益和环境效益。让种植户明白,他们本身既是过量施肥的受害者,又是积极行动的受益者,从而携手共同防治和管控农业面源污染^[61]。在提高缓/控释肥料认知的同时,需要充分考虑当地土壤状况、作物需肥规律、种植户用肥习惯等因素,设计、布局和示范,摸索最佳的缓/控释肥施用方法和用量,让种植户实实在在体验和感受到缓/控释肥料带来的经济效益与生态效益。

参考文献

- [1] 吴欢欢,李若楠,张彦才,等.我国缓/控释肥料发展现状、趋势及对策[J].华北农学报,2009,24(S2):263-267.
- [2] 闫湘.我国化肥利用现状与养分资源高效利用研究[D].北京:中国农业科学院,2008:102.
- [3] 杨青林,桑利民,孙吉茹,等.我国肥料利用现状及提高化肥利用率的方法[J].山西农业科学,2011,39(7):690-692.
- [4] 赵秉强,张福锁,廖宗文,等.我国新型肥料发展战略研究[J].植物营养与肥料学报,2004,10(5):536-545.
- [5] 杨俊刚,曹兵,徐秋明,等.包膜控释肥料在旱地农田的应用研究进展与展望[J].土壤通报,2010,41(2):494-500.
- [6] 赵芸,丁晓丽,范东升,等.缓/控释化学肥料研究进展[J].化肥设计,2020,58(2):1-4.
- [7] 樊小林,刘芳,廖照源,等.我国控释肥料研究的现状和展望[J].植物营养与肥料学报,2009,15(2):463-473.
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部.无机包裹型复混肥料(复合肥料):HG/T 4217—2011[S].北京:化学工业出版社,2012.
- [9] 陈强,崔斌,张逢星,等.缓释肥料的研究与进展[J].宝鸡文理学院学报(自然科学版),2000,20(3):189-192,200.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.脲醛缓释肥料:GB/T 34763—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [11] 曲均峰.脲醛肥料研究现状[J].化肥工业,2013,40(5):24-27.
- [12] 张智,张迎,王文民,等.异丁叉二脲的合成研究[J].山东化工,2005,34(3):7-8.
- [13] 李博凝.不同生产工艺的缓/控释肥料氮素释放特征研究[D].长春:吉林农业大学,2018.
- [14] NARDI P,NERI U,DI MATTEO G,et al.Nitrogen release from slow-release fertilizers in soils with different microbial activities[J].Pedosphere,2018,28(2):332-340.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.稳定性肥料:GB/T 35113—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [16] 武志杰,石元亮,李东坡,等.稳定性肥料发展与展望[J].植物营养与

肥料学报,2017,23(6):1614-1621.

- [17] 杨相东,张民.缓/控释和稳定性肥料技术创新驱动化肥行业科技发展——“新型肥料的研制与高效利用”专刊序言[J].植物营养与肥料学报,2019,25(12):2029-2031.
- [18] 陈宏坤,陈剑秋,范玲超,等.苹果树施用控释肥试验研究[J].中国果树,2012(5):12-15.
- [19] 徐素珍,苏步军.控释肥对苹果产量和品质的影响[J].河北林业科技,2017(1):25-27.
- [20] 褚亚峰,安贵阳,房燕,等.套餐肥、控释肥在苹果上的施用效果研究[J].北方园艺,2014(17):175-177.
- [21] 王佳武,赵贺新.金正大控释肥在葡萄上的应用效果研究[J].现代农业科技,2014(20):204-205.
- [22] 吴凌云,李志忠,丁文.缓控释肥在蜜柚上的施用效果研究[J].福建农业科技,2011(4):77-78,82.
- [23] 俞巧钢,朱本岳,叶雪珠.控释肥在柑桔上的应用研究[J].浙江农业学报,2001,13(4):210-213.
- [24] 邱现奎,董元杰,胡国庆,等.新型包膜缓释肥对大白菜生理特性、产量及品质的影响[J].土壤学报,2011,48(2):375-382.
- [25] 符建荣.控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究[J].植物营养与肥料学报,2001,7(2):145-152.
- [26] 张继宁,周胜,孙会峰,等.生物质炭在我国蔬菜地应用的研究现状与展望[J].农业现代化研究,2018,39(4):543-550.
- [27] 王荣萍,余炜敏,李淑仪,等.华南地区主要蔬菜氮肥肥料利用率研究[J].中国农学通报,2016,32(25):34-39.
- [28] 王激清,贾淑芬.包膜尿素对油菜产量、品质及氮肥利用率的影响[J].北方园艺,2016(6):159-162.
- [29] 熊丽萍,李芸君,彭华,等.南方流域农业面源污染现状及治理对策[J].湖南农业科学,2019(3):44-48.
- [30] 张英鹏,李洪杰,刘兆辉,等.农田减氮调控施肥对华北潮土区小麦-玉米轮作体系氮素损失的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1179-1187.
- [31] 朱翠英,时连辉,刘登民,等.控释肥对土壤养分和杏树生长及产量品质的影响[J].西北农业学报,2010,19(5):117-121.
- [32] 施俭,沈寅寅,包土忠,等.高效缓释肥在直播水稻上的使用技术研究[J].上海农业学报,2012,28(1):142-145.
- [33] 董晖,张中华,沈翠英,等.缓释肥在水稻上应用效果初探[J].上海农业科技,2012(5):112,126.
- [34] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策[J].土壤与环境,2000,9(1):1-6.
- [35] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [36] 张红举,陈方.太湖流域面源污染现状及控制途径[J].水资源保护,2010,26(3):87-90.
- [37] 金树权,陈若霞,汪峰,等.不同氮肥运筹模式对稻田田面水氮浓度和水稻产量的影响[J].水土保持学报,2020,34(1):242-248.
- [38] 李秀军,田春杰,徐尚起,等.我国农田生态环境质量现状及发展对策[J].土壤与作物,2018,7(3):267-275.
- [39] 邱泽东.土壤氮素流失规律研究进展[J].绿色科技,2016(20):11-13.
- [40] 宁建凤,邹献中,杨少海,等.农田氮素流失对水环境污染及防治研究进展[J].广州环境科学,2007,22(1):5-10.
- [41] 罗付香,刘海涛,林超文,等.不同形态氮肥在坡耕地雨季土壤氮素流失动态特征[J].中国土壤与肥料,2015(3):12-20.
- [42] 石艳平,段增强.水肥综合管理对减少滇池北岸非菜地氮磷流失的研究[J].农业环境科学学报,2009,28(10):2138-2144.
- [43] 井光花,于兴修,刘前进,等.沂蒙山区不同强降雨下土壤的氮素流失特征分析[J].农业工程学报,2012,28(6):120-125.
- [44] 叶玉适,梁新强,金熠,等.节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J].水土保持学报,2014,28(5):105-112,118.
- [45] 叶玉适,梁新强,周锦锦,等.节水灌溉与控释肥施用对太湖地区稻田土壤氮素渗漏流失的影响[J].环境科学学报,2015,35(1):270-279.
- [46] 张金池,庄家尧,林杰.不同土地利用类型土壤侵蚀量的坡度效应[J].中国水土保持科学,2004,2(3):6-9.
- [47] 董月群,李淑芹,原翠萍,等.黑麦草对黄土坡面降雨产流产沙过程的影响[J].中国农业大学学报,2011,16(4):67-73.
- [48] 刘彬彬.施肥及植被覆盖对三峡库区旱坡地养分流失的影响研究[D].重庆:西南大学,2016:34-39.
- [49] 侯朋福,薛利祥,俞映琼,等.稻田径流易发期不同类型肥料的氮素流失风险[J].农业环境科学学报,2017,36(7):1353-1361.
- [50] 李莹,司马小峰,丁仕奇,等.控释肥对农田氮磷流失的影响研究[J].安徽农业科学,2012,40(25):12466-12470.

- 控[J]. 中国农学通报, 2017, 33(11): 64-68.
- [5] 王源菲. 硒元素形态分析方法的研究进展[J]. 化工管理, 2018(21): 23-24.
- [6] 何巧. 水稻中硒的转运和积累特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [7] 邴逸根, 董翔, 郑洁, 等. 地质因素影响下的硒在土壤-水稻系统中的迁移转化[J]. 物探与化探, 2007, 31(1): 77-80.
- [8] 张庆华, 李霞. 贵州发展富硒农产品的潜力分析及展望[J]. 天津农业科学, 2019, 25(6): 61-67.
- [9] 马雄. 4-6月龄绒山羊羔羊日粮中硒的适宜水平研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [10] 杨海滨, 邓敏, 盛中雷, 等. 土壤中硒元素研究进展[J]. 南方农业, 2014, 8(22): 36-39, 44.
- [11] BARRON E, MIGEOT V, RABOUAN S, et al. The case for re-evaluating the upper limit value for selenium in drinking water in Europe[J]. J Water Heal, 2009, 7(4): 630-641.
- [12] 廖彪, 金华峰. 紫阳县富硒区土壤和岩石中的硒含量[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(1): 49-51.
- [13] 宋晓珂. 富硒土壤中硒形态和价态分布及生物硒富集能力研究[D]. 西宁: 青海大学, 2019.
- [14] 李榕, 黄栋良, 何梓华, 等. 湖南省石门县土壤及柑橘富硒程度调查及评价[J]. 国土资源导刊, 2018, 15(4): 31-36.
- [15] 刘永贤, 陈锦平, 潘丽萍, 等. 浔郁平原富硒土壤成因及其影响因素研究[J]. 土壤, 2018, 50(6): 1139-1144.
- [16] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 环境中硒的生物地球化学循环和营养调控及分异成因[J]. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1197-1203.
- [17] 黄建国, 袁玲. 四川盆地主要紫色土硒的状况及其有效性研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(2): 152-159.
- [18] 赵成义. 土壤硒的生物有效性研究[J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 184-187.
- [19] 王五一, 王大成, 王卫中, 等. 我国土壤中硒的淋溶[J]. 地理研究, 1992, 11(2): 34-40.
- [20] 顾涛, 赵信文, 雷晓庆, 等. 珠江三角洲崖门镇地区水稻田土壤-植物系统中硒元素分布特征及迁移规律研究[J]. 岩矿测试, 2019, 38(5): 545-555.
- [21] 谢薇, 杨耀栋, 侯佳渝, 等. 天津市蓟州区土壤硒的有效性及其影响因素[J]. 环境化学, 2019, 38(10): 2306-2316.
- [22] 姬丙艳, 沈骁, 姚振, 等. 青海柴达木盆地绿洲农业区硒地球化学特征: 以诺木洪绿洲为例[J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 199-206.
- [23] 马迅, 宗良纲, 诸旭东, 等. 江西丰城生态硒谷土壤硒有效性及其影响因素[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1588-1593.
- [24] 龚河阳, 李月芬, 汤洁, 等. 吉林省西部土壤硒含量、形态分布及影响因素[J]. 吉林农业大学学报, 2015, 37(2): 177-184, 190.
- [25] 王松山, 吴雄平, 梁东丽, 等. 不同价态外源硒在石灰性土壤中的形态转化及其生物有效性[J]. 环境科学学报, 2010, 30(12): 2499-2505.
- [26] GISSEL-NIELSEN G. Influence of pH and texture of the soil on plcm uptake of added selenium[J]. J Agric Food Chem, 1971, 19(6): 1165-1167.
- [27] HAYGARTH P M, HARRISON A F, JONES K C. Plant selenium from soil and the atmosphere[J]. J Environ Qual, 1995, 24(4): 768-771.
- [28] 张艳玲, 潘根兴, 李正文, 等. 土壤-植物系统中硒的迁移转化及低硒地区食物链中硒的调节[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 388-391.
- [29] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 土壤-植物系统中硒的浸提形态研究进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 2395-2397.
- [30] 陈雪龙, 王晓龙, 齐艳萍. 大庆龙凤湿地土壤理化性质与硒元素分布关系研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 159-162.
- [31] 朱建明, 梁小兵, 凌宏文, 等. 环境中硒存在形式的研究现状[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(1): 75-81.
- [32] 殷金岩, 耿增超, 李致颖, 等. 硒肥对马铃薯硒吸收、转化及产量、品质的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 823-829.
- [33] 刘鹏, 杨志辉, 葛旦之, 等. 淹水条件下土壤硒迁移行为的研究I. 还原淋溶作用下土壤硒的溶液迁移[J]. 湖南农业大学学报, 2000, 26(1): 1-4.
- [34] 李娟, 龙健, 汪境仁. 黔中地区水稻土的含硒量及其对糙米硒含量的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 571-574.
- [35] 徐强, 迟凤琴, 匡恩俊, 等. 方正县土壤全硒空间变异研究[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1): 18-25.
- [36] 吴丽霞, 林立弘, 方楚凝. 影响富硒土壤产出富硒农产品的因素[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(12): 3546-3549.
- [37] 黄青青, 杜威, 王琪, 等. 水稻对不同土壤中硒酸盐/亚硒酸盐的吸收和富集[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1423-1429.
- [38] HAMDY A A, GISSEL-NIELSEN G. Fixation of selenium by clay minerals and iron oxide[J]. J Plant Nutr Soil Sci, 1977, 140(1): 63-70.
- [39] 谢珊妮, 宗良纲, 张琪惠, 等. 3种改良剂对强酸性高硒茶园土壤硒有效性调控效果与机理[J]. 茶叶科学, 2017, 37(3): 299-307.
- [40] 姚欢, 宗良纲, 孟蝶, 等. 增施磷肥对提高强酸性高硒茶园土壤硒有效性的效果[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(4): 288-293.
- [41] 张木, 唐控危, 钟松臻, 等. 施硒对水稻土壤硒有效性的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9): 2979-2987.
- [42] 徐聪, 刘媛媛, 孟凡乔, 等. 农产品硒含量及与土壤硒的关系[J]. 中国农学通报, 2018, 34(7): 96-103.
- [43] 诸旭东, 宗良纲, 马迅, 等. 内源调控与外源补硒对红壤中硒有效性及水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 398-404.
- [44] 赵妍, 马爱军, 宗良纲, 等. 不同调控措施对强酸性高硒茶园土壤硒有效性的影响[C]//中国农业生态环境保护协会. 十一五农业环境研究回顾与展望——第四届全国农业环境科学学术研讨会论文集. 北京: 中国农业生态环境保护协会, 2011: 8.
- [45] 杨璇, 宗良纲, 严佳, 等. 改良剂与生物有机肥配施方式对强酸性高硒茶园土壤硒有效性的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1069-1075.

(上接第10页)

- [51] 杨虎德, 马彦, 冯丹妮. 甘肃省农田氮磷流失特征及影响因素研究[J]. 甘肃农业科技, 2020(21): 21-27.
- [52] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000, 32(4): 188-193.
- [53] 张爱平, 刘汝亮, 杨世琦, 等. 基于缓释肥的侧条施肥技术对水稻产量和氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3): 555-562.
- [54] 尹洪斌, 石元亮. 控释肥料的研究现状与进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 422-425.
- [55] 李咏玲. 镁渣基缓释性硅钾肥的制备及性能研究[D]. 太原: 山西大学, 2016: 12.
- [56] 许秀成. 缓释、控释肥料生产、使用前景展望[J]. 磷肥与复肥, 2006, 21(6): 9-11.
- [57] 连煜阳, 刘静, 金书秦. 农业面源污染治理探析——从新型肥料生产环节视角[J]. 中国环境管理, 2019, 11(2): 18-22.
- [58] 高文胜, 陈宏坤, 王玉霞, 等. 控释肥对苹果生长发育和果实品质的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(1): 88-92.
- [59] 王恩飞, 崔智多, 何璐, 等. 我国缓/控释肥研究现状和发展趋势[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(21): 12762-12764, 12767.
- [60] 陈小奔. 基于农户施肥行为的肇州县农业面源污染防控研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019: 28.
- [61] 靳前龙, 郭智勇, 韩文君, 等. 基于化肥视角下的全球农业面源污染现状及防治措施探究[J]. 农业科技通讯, 2018(11): 180-183.