

苏南麦田基施包膜尿素的农学和环境效应评价

孙婷, 王孟兰, 王柏淳, 李运东, 王慎强

引用本文:

孙婷, 王孟兰, 王柏淳, 等. 苏南麦田基施包膜尿素的农学和环境效应评价[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(5): 1115–1123.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0472>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354–2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

江苏设施菜地控释氮肥一次性基施增效减排效果研究

徐丽萍, 巨昇容, 王远, 刘之广, 闵炬, 施卫明

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1106–1114 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1211>

黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响

孔柏舒, 焦树英, 李永强, 沈玉文, 李焱, 张子胥, 付春雨

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2371–2379 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0838>

生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放及小青菜产量的影响

刘楚桐, 陈松岭, 邹洪涛, 叶旭红, 陈春羽, 雷洋, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 677–684 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0658>

减氮配施硝化抑制剂对大白菜农学和环境效应评价

郭广正, 张芬, 沈远鹏, 肖焱波, 朱盼, 王芳, 陈新平, 王孝忠

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2307–2315 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0884>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孙婷, 王孟兰, 王柏淳, 等. 苏南麦田基施包膜尿素的农学和环境效应评价[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 1115–1123.
SUN Ting, WANG Meng-lan, WANG Bo-chun, et al. Effects of a single basal application of polymer-coated urea to a wheat field on crop yield, nitrogen use efficiency and NH₃ and N₂O emissions in eastern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(5): 1115–1123.



开放科学 OSID

苏南麦田基施包膜尿素的农学和环境效应评价

孙婷¹, 王孟兰¹, 王柏淳², 李运东², 王慎强^{2*}

(1. 南京市江宁区农业农村局, 南京 211100; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:为验证包膜尿素一次性基施、速效矿质氮肥分次施用在南方冬小麦系统中的可替代性,在江苏江宁麦田建立田间试验,通过连续3 a的3个作物季观测,比较了0、160 kg N·hm⁻²(低量)和240 kg N·hm⁻²(习惯用量)施氮量下树脂包膜尿素一次基施(PU)和非包膜尿素分次施用(U)对小麦产量、氮肥利用率及NH₃挥发与N₂O排放的影响,并从经济效益和气态活性氮减排两方面评估了包膜尿素施用的农学和环境效应。结果表明:U和PU处理小麦产量均随施氮量增加而提高,但PU下增产更显著。习惯施氮量下,PU比U平均增加小麦产量16.6%,提高氮肥偏生产力 and 农学利用效率16.7%和26.6%。等氮量下PU虽不能提高氮肥生理效率,但却显著提高氮肥利用率35.7%~65.2%。同时,PU较U处理能有效削减NH₃和N₂O排放峰,习惯施氮量下可降低NH₃和N₂O季节累积排放量43.3%和37.6%。综合分析产量、肥料和其他管理成本的产投收益结果表明,施用160 kg N·hm⁻² PU即可近似达到U习惯施氮量下小麦产量水平和净收益;且当PU施氮量增至240 kg N·hm⁻²时,可在不显著增加NH₃和N₂O排放情况下,显著增加小麦产量,进而大幅提高农户净收益41.8%。研究表明,与农户习惯施氮相比,供试聚氨酯包膜尿素一次基施不仅能够获得高产,而且也有利于农户增收和环境保护。

关键词:产量;氮肥利用率;氮挥发;氧化亚氮;净收益

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)05-1115-09 doi:10.11654/jaes.2021-0472

Effects of a single basal application of polymer-coated urea to a wheat field on crop yield, nitrogen use efficiency and NH₃ and N₂O emissions in eastern China

SUN Ting¹, WANG Meng-lan¹, WANG Bo-chun², LI Yun-dong², WANG Shen-qiang^{2*}

(1. Agricultural and Rural Bureau of Jiangning District, Nanjing 211100, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences 210008, China)

Abstract: The purpose of this study was to verify the substitution of one-time base application of coated urea and multiple application of quick mineral nitrogen fertilizer in winter wheat system in southern China. A field experiment was established in Jiangning wheat field in Jiangsu Province. The effects of polyurethane resin coated urea (PU) with single application and non-coated urea (U) with three split application on wheat yield, nitrogen use efficiency, NH₃ volatilization and N₂O emission were compared at 0, 160 kg N·hm⁻² (the lower application rate) and 240 kg N·hm⁻² (the conventional application rate). The agronomic and environmental effects of coated urea application were evaluated from two aspects of economic benefit and reduction of gaseous active nitrogen. The wheat yield of U and PU treatments increased with the increase of nitrogen application rate, but the effect of increasing yield was more significant with PU

收稿日期:2021-04-02 录用日期:2021-04-27

作者简介:孙婷(1977—),女,江苏南京人,高级农艺师,主要从事土壤肥料和农业环境保护技术推广。E-mail:1123396719@qq.com

*通信作者:王慎强 E-mail:sqwang@issas.ac.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0200704);江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(19)1007);南京市江宁区农业农村局化肥减量示范项目

Project supported: National Key R&D Program of China (2017YFD0200704); Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund (CX(19)1007); Project of Fertilizer Reduction Demonstration in Agricultural and Rural Bureau of Jiangning District, Nanjing

treatments. At the conventional application rate, the amount of PU to U increased wheat yield by 16.6%, the N partial factor productivity and agronomic efficiency by 16.7% and 26.6%. Although PU treatments could not improve the physiological efficiency, it significantly increased nitrogen use efficiency by 35.7%~65.2% at the same application. The results showed that PU had better effect on wheat yield increase because of the promotion of above-ground nitrogen absorption and the improvement of apparent nitrogen use efficiency. Meanwhile, PU can effectively reduce the emission peaks of NH_3 and N_2O compared with U treatment, and the seasonal cumulative emission of NH_3 and N_2O can be reduced by 43.3% and 37.6% at the conventional application rate. The results of comprehensive analysis of yield, fertilizer and other management costs showed that $160 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ PU could approximately reach the yield level and net economic benefits of wheat at the conventional application rate. When the nitrogen application rate of PU increased to $240 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, the wheat yield was significantly increased and the net economic benefits of farmers was significantly increased by 41.8% with no significant increase in NH_3 and N_2O emissions. Compared with farmers' conventional practice with three split application, a single application of polyurethane coated urea in the test could not only obtain high yield, but also benefit farmers' incomes increase and environmental protection.

Keywords: yield; nitrogen use efficiency; ammonia volatilization; nitrous oxide; net economic benefits

小麦作为我国的主要粮食作物,其种植面积最大,截至2019年我国小麦收获面积约2.4亿 hm^2 ,年产量1.3亿t。小麦是耗氮较多的作物之一,为了追求高产导致每年农田施氮量远高于世界平均水平,而氮肥利用率却仅约为世界平均水平的一半^[1-2]。氮损失增加,作物氮需求与产量的平衡模式已经被改变,导致 NH_3 挥发、 N_2O 排放、淋失和径流等形式的活性氮损失也随之增加^[3]。随后,人们采用氮肥分施制度,匹配作物在生长的不同时期对氮需求的峰值,从而有效提高了作物产量和氮肥利用率,避免氮素的浪费^[4]。然而,目前我国农村劳动力向城市倾斜,且农村劳动力的缺失已经很难满足如深施和多次追肥的生产模式^[5]。因此,农业发展需要更合理的氮素管理模式来替代现有的经营模式,从而达到增产减排的目的。

肥料是人们用以调节植物营养的重要生产资料,随着化肥工业的发展,人们合成了如尿素、硫酸铵和硝酸铵等速效合成化学氮肥,其特性是极易溶于水,易被作物快速吸收,可为作物提供必要的营养氮,但正是由于易溶于水的特性,使相当一部分氮素损失在大气中和水中,而无法被植物吸收^[6-7]。为解决速效化学氮肥的缺点,人们开发出一类具有前景的氮肥品种——控释氮肥,通过扩散、溶解或者减慢氮素的释放,减少氮素流失并提高氮素的利用效率,且在实现农学和经济目标的同时减少田间产生的活性氮对环境的危害^[8]。一次性基施控释氮肥可以实现其氮释放与作物氮需求的同步,作为替代常规速效氮肥的分施的措施,节约劳动力成本,提高谷物产量,其农业的应用一直受到科学家、决策者和农业部门的关注^[9]。

目前,控释氮肥采用最广泛的技术是有机聚合物膜材料包裹尿素颗粒,并形成物理屏障来控制释放。其中树脂包膜尿素是具代表性的脂溶性聚合物包膜

氮肥,其具有膜材强度高、可有效控释养分释放速率和释放时间等优点,且生产制备技术成熟,近年来应用最为广泛,但由于其成本较高,农民替换现有施肥方式意愿偏低,农业推广应用不足^[7]。为此胡风仙^[10]提出树脂包膜尿素与尿素配比混合基施可以降低成本并提高夏玉米产投收益。然而,土壤背景值区域的差异,水旱农田的差异,年际间气候的差异也会对肥料的施用效果造成影响^[11]。在稻田系统,包膜尿素可以很好地利用膜内外环境浓度差实现氮素的有序排放,降低气态氮的排放强度,提高水稻产量^[12-13]。而在旱作系统中,土壤含水量低,包膜尿素难以实现释放。北方冬小麦可以通过灌溉为包膜肥料释放提供良好的土壤环境条件。郑沛等^[14]验证了树脂包膜尿素对华北冬小麦土壤氮素和产量的增效。而在南方小麦孕穗至结实期,存在气温上升较快、空气湿度大、日照少的特点,小麦所需水分通常通过降雨获得^[15]。同时小麦的生育周期较长,需要持续氮供应以满足分蘖期和孕穗期氮吸收的峰值^[16-17]。树脂包膜尿素的理论静水释放时间超过100 d,有较好的释放特征,但需要进一步验证树脂包膜尿素在南方冬小麦的施用情况,为目前面临的氮素施用过量 and 农村劳动力缺失问题提供解决途径。

为此,本研究建立了3 a冬小麦季田间试验,以树脂包膜尿素一次基施模式与农户传统尿素分施模式相比较,研究冬小麦的产量、氮肥偏生产力、氮肥利用率、农学利用率、表观氮肥利用率和生理利用率在两种氮肥不同施氮量下的效果,研究了小麦生长季 NH_3 挥发与 N_2O 排放的变化规律,并从产投收益和气态活性氮减排角度综合分析了经济效益和环境减排潜力,为日后树脂包膜尿素对苏南冬小麦轻简化施用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

田间试验在南京市江宁区阜庄街道太和水稻专业合作社进行。该地年均气温 15.7 °C,年平均降水量 1 177 mm,小麦生长季节的气温和降雨量详见图 1。试验观测周期为连续 3 a(2018—2020年)的小麦生长季。供试土壤 pH 5.62,全氮 1.01 g·kg⁻¹、全磷 0.41 g·kg⁻¹,全钾 12.63 g·kg⁻¹,土壤有机碳 9.49 g·kg⁻¹。供试小麦为扬麦 13 号。试验肥料为树脂聚合物包膜尿素(PU,金正生态工程集团股份有限公司)和未包膜常规尿素(U,灵谷化工有限公司)。PU 的氮含量为 42.40%,U 的氮含量为 46.40%,粒径为 1.0~2.0 mm。PU 为聚氨酯类材料,包膜过程需要经过 6~8 轮的热塑性聚氨酯混合和配制,涂层强度高、不易降解,包膜内的尿素依靠内外浓度差不断浸出,理论上在 25 °C 的静水中最大释放周期可超过 100 d^[7]。

1.2 试验设计

麦季田间试验设计 5 种施肥模式:不施氮肥处理(CK);在 160 kg N·hm⁻² 施氮量下,肥料处理为农户传统分施尿素(U160)和一次基施树脂包膜尿素(PU160);在 240 kg N·hm⁻² 施氮量下,肥料处理为农户传统分施尿素(U240)和一次基施树脂包膜尿素(PU240),每组 3 个重复。农户传统施肥方式为按照 4:3:3 的比例施基肥、蘖肥和穗肥。试验田 15 个处理单元随机排列,小区面积 5 m×6 m。磷肥(120 kg P₂O₅·hm⁻²)和钾肥(120 kg K₂O·hm⁻²)一次性基施,基

肥撒施后翻地耙田,追肥直接撒施。小麦每年 11 月中下旬播种,5 月上中旬收获。田间管理措施与当地田间管理措施大致相同,生育期除草除害虫。

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 收获和测产

每个小区单元选择 0.5 m² 正方形面积,随机采集 3 株植物样品。将植株分为谷粒和秸秆,脱粒后测定谷粒产量。在 105 °C 下杀青 0.5 h,之后调节到 70 °C 干燥至恒质量,计算干质量和含水量,用破碎机破碎籽粒,密封袋装袋以便测定。用 C/N 分析仪(PRI-MACS SNC90-IC-E,Skalar 中国有限公司)测定秸秆和籽粒的氮含量。

农学指标计算如下:

$$\text{偏生产力}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})=Y_i/\text{施氮量}$$

$$\text{农学利用率}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})=(Y_i-Y_0)/\text{施氮量}$$

$$\text{氮肥利用率}=(N_i-N_0)/\text{施氮量}\times 100\%$$

$$\text{生理利用率}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})=(Y_i-Y_0)/(N_i-N_0)$$

式中: Y_i 表示施氮处理作物产量,kg·hm⁻²; Y_0 表示不施氮处理作物产量,kg·hm⁻²; N_i 表示施氮处理作物地上部分吸氮量,kg N·hm⁻²; N_0 表示不施氮处理作物地上部分吸氮量,kg N·hm⁻²。

1.3.2 NH₃排放和 N₂O 排放测定

NH₃排放通量采用间歇式密闭通气法^[18]。PVC 圆柱体罩子(半径 20 cm×高 15 cm)插入土壤深 5 cm 处收集气体,顶部有两个通气孔,一个内径 8 mm 气孔连接盛有 60 mL 0.05 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 溶液的洗气瓶,另一个内径 25 mm 气孔连接一根固定在土壤中的 PVC 管(高 2.0 m),用于保持平衡装置内的气压恒定。真空

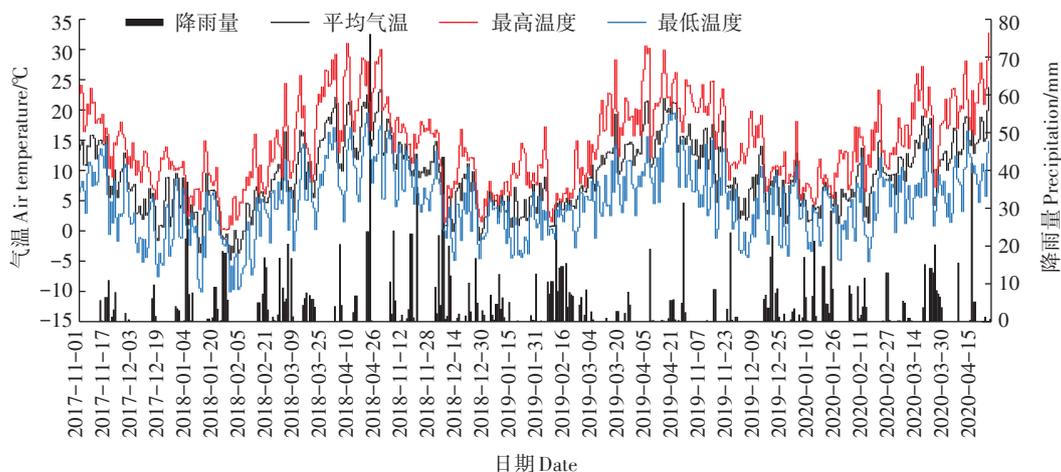


图 1 麦季气温和降雨量

Figure 1 Air temperature and precipitation at wheat season

泵将罩子内的NH₃抽吸至酸溶液中,被酸溶液吸收,抽气泵的换气频率为15~20 t·min⁻¹。施肥后,在每日8:00—10:00和14:00—16:00采集NH₃,持续观测一周以上。此后,每10 d监测一次NH₃挥发,直到检测不到NH₃挥发为止^[19]。定量滤纸过滤后,用AA3连续流分析仪测定硫酸吸收液中NH₄⁺-N的含量。

田间试验中NH₃排放计算如下:

$$F_{AV} = C \times V \times \frac{10^4}{\pi \times r^2} \times \frac{6}{t}$$

式中: F_{AV} 为田间试验NH₃挥发通量,kg N·hm⁻²·d⁻¹;C为吸收液NH₄⁺浓度,mol·L⁻¹;V为H₂SO₄的体积,L;10⁴为面积换算系数;r为罩子气室半径,m;6为24 h与4 h日NH₃挥发收集时间的比值;t为采样天数,d。

N₂O排放采用闭室法^[20]。采用静态密闭箱法采集气体,采样箱由5 mm厚的PVC板制成,箱体(50 cm×50 cm×100 cm)为暗箱,以防止采样过程中光照对箱内作物光合作用及温度的影响。箱体顶部留有温度计插孔以便记录采样时的箱内温度。采样时箱体密封固定在土壤中。在0、15、30、45 min时,用注射器通过暗箱的橡胶小孔抽取腔室的混合气体20 mL,并将混合气体注射进入预先抽真空的真空瓶中,抽取3个重复的大气混合气体作为空白样,同时记录腔内的温度变化。采用Agilent 7890A气相色谱仪测定4个时间段的N₂O气体浓度。考虑到腔室的温度,对采集的4个时间段的N₂O浓度随时间的变化进行线性回归分析^[21]。施肥后,8:00—12:00采集排放的N₂O气体,采样时间持续一周。此后,每10 d采集一次N₂O,直到无N₂O排放为止。特殊事件时,如降雨等,在1周1次的采样频率上增加1次样品采集。

田间试验中N₂O排放计算如下:

$$F_{N_2O} = H \times \frac{M \times P}{R \times (273 + T)} \times \frac{dC}{dt}$$

式中: F_{N_2O} 为田间试验N₂O排放通量,g·hm⁻²·d⁻¹;H为箱体有效高度,m;M为N₂O的摩尔体积,g·mol⁻¹;P为当地大气压力,即1.103×10⁵ Pa;R为气体常数,8.314 Pa·m³·mol⁻¹·K⁻¹;T为采样时箱内的平均温度,℃; $\frac{dC}{dt}$ 为气体排放速率,nL·L⁻¹·h⁻¹。

NH₃和N₂O排放气体累积量为观测期间各间隔采样时间点的气体排放量累加,间隔采样时间点气体排放量为间隔时间乘以采样点的平均排放通量。

1.3.3 经济效益

农户收益为小麦产量收益减去生产资料成本,小麦市场价格为2 400元·t⁻¹,生产资料成本包括:肥料

成本(尿素2 200元·t⁻¹、树脂聚合物包膜尿素3 200元·t⁻¹、磷肥600元·t⁻¹、钾肥3 600元·t⁻¹)^[22],人力成本600元·hm⁻²^[23]和其他生产资料成本(杀虫剂2 400元·hm⁻²^[24]、小麦种子1 680元·hm⁻²^[25])。

1.4 数据统计与分析

采用SPSS统计软件(IBM, USA)对数据进行分析,对各处理的产量、偏生产力、农学利用率、氮肥利用率、生理利用率、NH₃和N₂O排放累积量以及农户收益利用最小显著差异法(LSD)进行方差分析(ANOVA), $P < 0.05$ 表示处理间差异显著。使用Microsoft Excel制图和整理数据,计算平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对产量和农学效益的影响

图2结果显示,与CK处理相比,各施氮处理均显著提高了小麦籽粒产量。在同一施氮水平下,PU处理的产量高于U处理;PU处理的年均小麦籽粒产量显著高于U处理($P < 0.05$)。在增加施氮量的情况下,U240相比于U160平均增产近14%,而PU240相比于PU160平均增产近19%,PU处理的增幅高于U处理,且PU160可以达到近似U240的效果。表1所示,从3 a结果平均值看,偏生产力和农学利用率低施氮量处理高于高施氮量处理,在第3 a相比于U处理,PU处理分别提高了13.66%~17.70%和24.16%~28.69%。PU处理年均氮肥利用率较U处理显著提高35.69%~65.20%($P < 0.05$),氮肥利用率最高约50%;PU处理的年均作物氮累积量显著高于U处理,U240和PU160的年均累积氮量为同一水平;生理利用率方面,U160氮素吸收利用供小麦生长的效率(57.26 kg·kg⁻¹)高于其他处理,其余3个处理间没有显著差异($P > 0.05$)。

2.2 气态活性氮的减排效果

NH₃在小麦生长季的动态排放通量过程详见图3。从3 a相似趋势看,施氮肥后NH₃排放量迅速上升,达到最高峰值后降低。在施基肥、蘖肥和穗肥后的1~2 d,U处理分别出现3个峰值,且U240处理的峰值要高于U160处理。PU处理出现较高峰值的时间在施基肥后的3~5 d,甚至一周以后,PU240处理的峰值高于PU160处理,PU处理NH₃排放峰值出现时间和大小都要晚于或低于U处理。由累积NH₃排放量(图4a)可知,在高施氮量的情况下PU240相比于U240显著降低约40%的NH₃排放量,PU160的NH₃累积损失量也低于U160。增加施氮量后,U处理的NH₃排放累积增幅要高于PU处理,U240较U160增加了

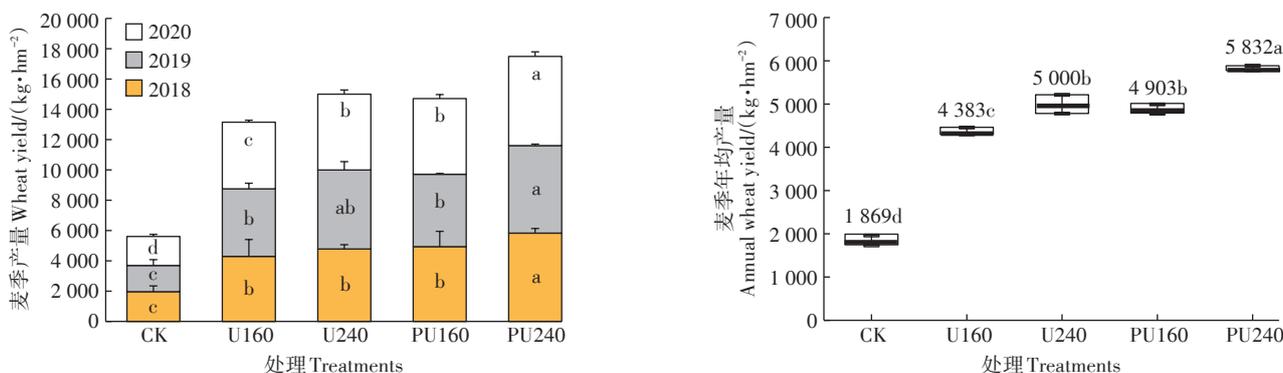
表1 树脂包膜尿素一次基施和非包膜尿素分次施用氮肥利用效率的比较

Table 1 Comparison of nitrogen fertilizer use efficiency of resin-coated urea with single application and non-coated urea with split applications

年份 Year	处理 Treatments	氮肥偏生产力 Partial factor productivity of applied nitrogen/(kg N·kg ⁻¹)	农学利用率 Agronomic efficiency/ (kg N·kg ⁻¹)	地上作物累积氮吸收 Accumulated N uptake/ (kg N·hm ⁻²)	氮肥利用率 Nitrogen use efficiency/%	生理利用率 Physiological efficiency/ (kg N·kg ⁻¹)
2018	CK	—	—	30.74±6.71c	—	—
	U160	26.86±6.95a	14.60±5.99a	76.67±25.56b	28.71±14.56b	53.59±8.13a
	U240	19.92±1.19b	11.75±2.78a	101.68±9.25b	29.56±5.93b	39.78±6.07b
	PU160	30.86±6.33a	18.60±4.00a	101.33±9.25b	44.12±9.70a	42.20±1.09b
	PU240	24.28±1.27a	16.11±1.01a	127.12±14.51a	40.16±4.02a	40.33±3.69b
2019	CK	—	—	25.49±5.37c	—	—
	U160	27.86±2.32a	17.04±2.72a	77.72±6.09b	32.64±6.97b	53.21±9.29a
	U240	21.72±2.31b	14.52±3.54a	104.82±13.81ab	33.05±7.16b	43.74±1.52b
	PU160	29.86±0.30a	19.05±2.70a	99.18±4.56b	46.05±2.65a	41.31±4.79b
	PU240	24.08±0.41b	16.87±2.02a	121.54±4.04a	40.02±3.91a	42.11±1.45b
2020	CK	—	—	31.98±1.04d	—	—
	U160	27.46±0.83b	15.48±0.60b	70.10±1.08c	23.82±0.16b	64.98±2.84a
	U240	20.85±0.01d	12.86±1.27c	100.62±7.02b	28.60±3.24b	45.09±3.27b
	PU160	31.21±1.67a	19.22±2.11a	112.81±13.31b	50.52±8.04a	38.28±2.10b
	PU240	24.54±1.25c	16.55±0.95b	136.60±18.72a	43.59±7.94a	38.54±5.01b
3年平均 值	CK	—	—	29.41±3.44d	—	—
	U160	27.39±0.50b	15.71±1.24c	74.83±4.13c	28.39±4.42b	57.26±6.69a
	U240	20.83±0.90d	13.04±1.39c	102.37±2.19b	30.40±2.35b	42.87±2.76b
	PU160	30.64±0.70a	18.96±0.32a	104.44±7.33b	46.90±3.28a	40.60±2.06b
	PU240	24.30±0.23c	16.51±0.38b	128.42±7.61a	41.25±2.02a	40.32±1.78b

注:表中数值为平均值±标准差(n=3)。不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Note: The values is mean ± standard variance (n=3). Different lowercase letters indicated significant differences among treatments (P<0.05).



数值为平均值±标准差(n=3)。不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同

The values is mean±standard variance (n=3). Different lowercase letters indicated significant differences among treatments (P<0.05). The same below

图2 树脂包膜尿素一次基施和非包膜尿素分次施用的产量

Figure 2 Yield of resin-coated urea with single application and non-coated urea with split applications

40.32%,而PU240较PU160仅增加了7.49%。

N₂O在小麦生长季的动态排放通量过程详见图5。U处理在施肥后的1~2 d达到N₂O排放的峰值,随后降低,最高可达137.71 μg N·hm⁻²·d⁻¹,高施氮量

的峰值高于低施氮量。PU160和PU240的N₂O排放量在基施后达到峰值,随后受气候变化和干湿交替影响,其排放量在1.62~28.20 μg N hm⁻²·d⁻¹和1.97~49.58 μg N·hm⁻²·d⁻¹之间波动。相比于U处理,PU

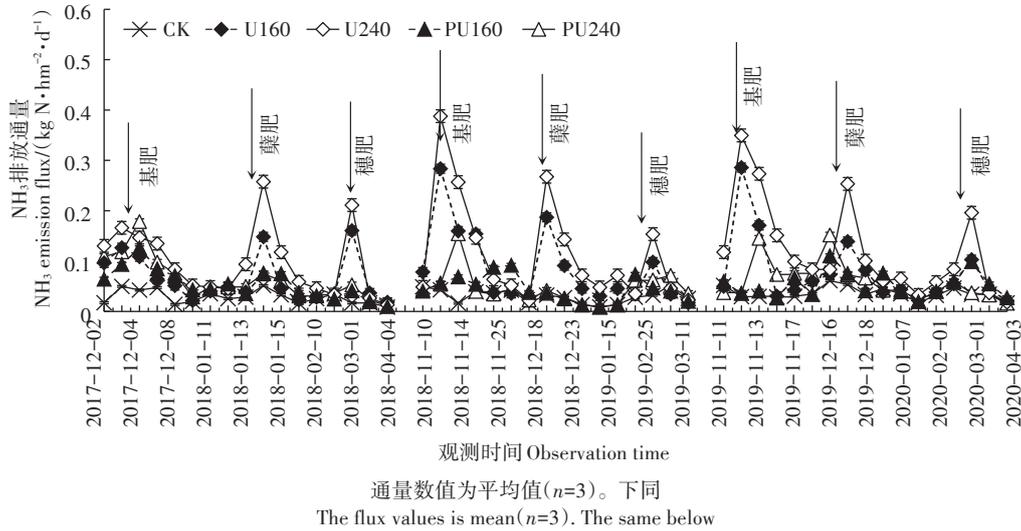


图3 树脂包膜尿素一次基施和非包膜尿素分次施用的 NH_3 排放通量

Figure 3 NH_3 emission flux of resin-coated urea with single application and non-coated urea with split applications

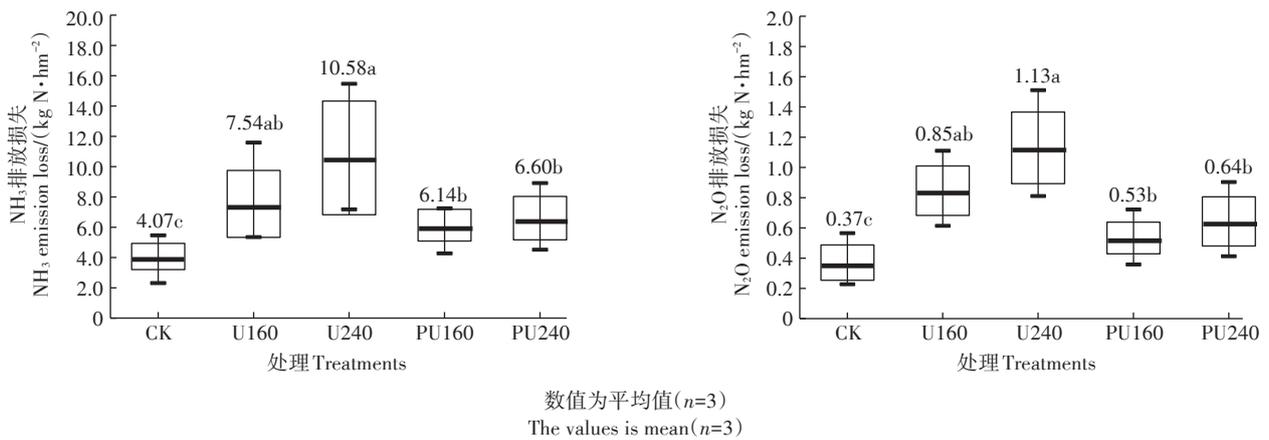


图4 树脂包膜尿素一次基施和非包膜尿素分次施用的累积气态氮损失

Figure 4 Cumulative gaseous nitrogen loss of resin-coated urea with single application and non-coated urea with split applications

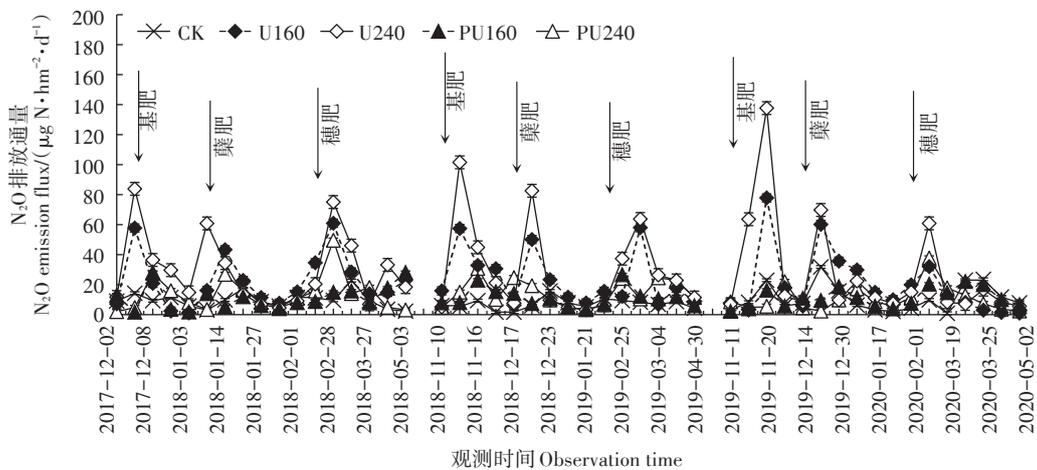


图5 树脂包膜尿素一次基施和非包膜尿素分次施用的 N_2O 排放通量

Figure 5 N_2O emission flux of resin-coated urea with single application and non-coated urea with split applications

处理的排放通量峰值较低。由累积 N_2O 排放量(图4b)可知,一次性施用树脂包膜后明显降低了37.65%~43.36%的 N_2O 的排放。施氮量提高后,相比于U160和PU160,U240和PU240的累积 N_2O 排放量虽都增加,但U240($0.28\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$)增幅高于PU240($0.11\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

2.3 不同施肥模式对经济效益的影响

从图6可以看出,不同施肥模式的农户收益大小排序依次是PU240>PU160>U240>U160>CK,PU处理后,农户麦季年均最高可得到 $8.59\times 10^3\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的收益。在相同的施氮量下,PU处理的经济收益要显著高于U处理,显著提高了40.52%~41.75%($P<0.05$)。值得注意的是,PU160超过了U240的增收效果,同时增施氮肥后,PU240的增收效果约是U240的1.5倍。树脂包膜肥料的市场价格高于常规未包膜的尿素,但传统施肥方式产生的人力成本反而提升了总的生产资料成本。

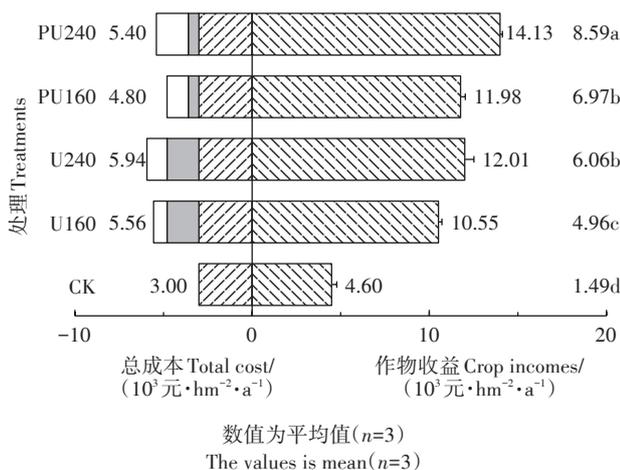


图6 树脂包膜尿素一次基施和非包膜尿素分次施用的
年均农户收益

Figure 6 Annual farmer benefits of resin-coated urea with single application and non-coated urea with split applications

3 讨论

为了使作物在最大吸氮周期,即分蘖期和穗期,能有效地利用氮肥、提高产量,避免一次基施尿素造成的氮素流失,当地农户采用传统的分施方式:1次基施,分蘖期和穗期追肥2次^[26-27]。研究表明,农民传统分施尿素处理,低施氮量下,U160的年均产量可达 $4\ 383\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氮肥偏生产力、农学利用率、氮肥利用率、生理利用率分别可达 $27.39\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、15.71%、

$28.39\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $57.26\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,年均经济收益为 $4.96\times 10^3\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$,其在小麦生长季的累积 NH_3 和 N_2O 排放量为 $7.54\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.85\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。同水平施氮量下,华北地区冬小麦产量结果要优于U160,说明增加氮投入产量仍有增幅的空间^[3,17]。一些研究表明,选择较高的施氮量($200\sim 250\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$)可以获得更高的作物产量和经济收益,具有一定的正效应^[26,28]。在农户习惯施氮量下,U240的年均产量相比于U160可提高14.07%,农户收益提升22.18%,3年农学利用率和氮肥利用率的均值无显著差异($P>0.05$),然而会造成每年较高的 NH_3 和 N_2O 累积排放($10.58\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $1.13\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$)。随着我国农村劳动力的逐步锐减,农民多次追肥难以实现高产和高收益,且难以满足可持续的绿色高效农业的愿景,既不经济也不环保^[8]。

一次性基施控释氮肥在满足作物持续氮素需求的同时省工省时,使氮素释放模式与作物氮需求的模式相匹配,提高氮利用并减少活性氮的损失^[29]。从本研究结果看,在相同的施氮量下,相比于U处理,PU处理实现了约15%的增产;每千克树脂包膜尿素施入后可以显著提高地上部分籽粒产量以及单位面积的地上累积氮吸收,同时表观氮肥利用率显著提高,而作物吸收每千克氮转化为产量的能力没有变化,这表明PU对小麦增产效果较好是由于促进地上氮吸收量和提高表观氮肥利用率所致。由于良好的控释性能,可以促进小麦对养分的有效吸收,这与马泉等^[30]和胡风仙^[10]施用一次性树脂包膜的结果相一致。树脂包膜材料的物理阻隔作用,使得氮素的释放既可以覆盖整个作物生长周期又可以有效阻控过量的氮素通过活性氮的途径损失^[15,31]。PU处理累积 NH_3 排放量和 N_2O 排放量明显降低了18.57%~37.62%和37.65%~43.36%,但由于气温变化、降雨以及干湿交替等因素,在穗肥后期气态氮动态排放通量存在一定程度的起伏^[12]。在气态活性氮排放的观测中(图3和图5)可以看出,PU处理施肥后的峰值大小减弱并延缓其出现时间,施用树脂包膜肥料有效控制了一次基施后不必要的氮素流失,PU作物 NH_3 排放强度,即单位面积每千克产量的气态氮排放累积量,仅约为U的一半,且PU降低了约40%的 N_2O 排放量,说明一次性施用树脂包膜尿素具有一定减排潜力。

另外,本研究结果表明,U240和PU160的年均产量以及年均经济收益近似为相同水平,而PU160累积气态活性氮排放显著低于U240,低施氮量树脂包膜

尿素处理可以达到高施氮量分施尿素处理的增产效果,一次性基施节省的劳动成本抵消了两种氮肥的市场价格差,且有显著的减排效果。在确定了包膜肥料的增效前提下,需要推荐优化施氮量。蒋丽萍等^[8]研究表明,在推荐施氮量树脂包膜肥料可以达到对小麦高效节肥的目的,较高占比的树脂包膜肥料的配比施用对作物生长也有正向的作用^[10,30]。提高施氮量后,小麦的产量和收益提升,U240的收益相当于当地农户可获利约6 000元·hm⁻²,而PU240的收益增幅约是U240的1.5倍,使农户可获利约9 000元·hm⁻²,并且相比于PU160累积气态氮的损失并不显著。由此表明施用树脂包膜尿素可以增产并提升农户产投收益,控制不必要的氮素流失。

此外,一次性基施较高施氮量的树脂包膜肥料增产增收涨幅可观,NH₃和N₂O排放增加也不显著,氮用量的考量仍有优化的空间,今后需要探究作物生长过程中养分需求与该包膜肥料养分释放控释机理的关系,结合如深施和侧施的配套技术方案,进一步优化控释氮肥用量,开展长期定位试验,综合评价农田氮平衡和环境经济效益,为该地区的农业轻量化生产实践提供必要的参考和技术支撑。

4 结论

(1)在本试验区域范围内,一次性基施树脂包膜肥料可以在节约人力劳动的基础上抵消肥料成本,同时满足苏南小麦生育期对氮素的有效需求,提高氮肥偏生产力、农学利用率、氮肥利用率、地上作物累积氮吸收,高产低污染,增加地方农民的经济收入来源。

(2)在减肥增效趋势下,低施氮量的树脂包膜肥料可以达到目前习惯分施施用氮量尿素的产量水平,且显著降低气态活性氮的流失。

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. YANG Fan, MENG Yuan-duo, JIANG Yi, et al. Chemical fertilizer application and supply in crop farming in China in 2013[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(1): 217-225.
- [2] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). FAO date, 2021[DB/OL]. [2021-04-01]. <http://ifadata.Fertilizer.Org/uc-Search.aspx>.
- [3] 崔振岭, 陈新平, 张福锁, 等. 华北平原施肥现状及影响小麦产量的因素分析[J]. 华北农学报, 2008, 23(增刊): 224-229. CUI Zhen-ling, CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-shuo, et al. Analysis on fertilizer applied and the central factors influencing grain yield of wheat in the Northern China Plain[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(Suppl): 224-229.
- [4] Jiang J Y, Hu Z H, Sun W J, et al. Nitrous oxide emissions from Chinese cropland fertilized with a range of slow-release nitrogen compounds[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 135(3): 216-225.
- [5] Miao X K, Xing X M, Ke J, et al. Yield and nitrogen uptake of bowl-seedling machine-transplanted rice with slow-release nitrogen fertilizer[J]. *Agron J*, 2016, 108: 313-320.
- [6] Good A G, Beatty P H. Fertilizing nature: A tragedy of excess in the commons[J]. *PLoS Biology*, 2011, 9(8): e1001124.
- [7] 谢威. 不同缓/控释尿素在苏南稻田的施用效果评价[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019. XIE Wei. Evaluation of agricultural and environmental performance of different types of slow- and controlled-release urea in rice fields in southern Jiangsu[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [8] 蒋丽萍, 李国芳, 苗中琴, 等. 不同包膜类型控释氮肥减施对冬小麦产量及氮素利用效率的影响[J]. 山东农业科学, 2020, 52(2): 64-69. JIANG Li-ping, LI Guo-fang, MIAO Zhong-qin, et al. Effects of decreasing amounts of different types of controlled-release N fertilizers on yield and N use efficiency of winter wheat[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(2): 64-69.
- [9] Ye Y S, Liang X Q, Chen Y X, et al. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation yield, water and nitrogen use[J]. *Field Crops Res*, 2013, 144: 212-224.
- [10] 胡风仙. 树脂包膜尿素不同施用比例对夏玉米产量及经济效益的影响[J]. 现代农业科技, 2017(4): 3-4. HU Feng-xian. Effects of different application ratios of resin-coated urea on yield and economic benefit of summer maize[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(4): 3-4.
- [11] 张枝盛, 汪本福, 李阳, 等. 氮肥模式对稻田温室气体排放和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1400-1408. ZHANG Zhi-sheng, WANG Ben-fu, LI Yang, et al. Effects of different nitrogen regimes on greenhouse gas emissions and grain yields in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1400-1408.
- [12] 辛志远, 王昌全, 申亚珍, 等. 水基包衣控释掺混肥料一次性施用对单季稻氮素利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 109-114. XIN Zhi-yuan, WANG Chang-quan, SHEN Ya-zhen, et al. Effect of single application of water-borne polymer coated controlled-release blend fertilizer on nitrogen utilization in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 109-114.
- [13] 李健陵, 李玉娥, 周守华, 等. 节水灌溉、树脂包膜尿素和脲酶/硝化抑制剂对双季稻温室气体减排的协同作用[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3958-3967. LI Jian-ling, LI Yu-e, ZHOU Shou-hua, et al. Synergistic effects of water-saving irrigation, polymer-coated nitrogen fertilizer and urease/nitrification inhibitor on mitigation of greenhouse gas emissions from the double rice cropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3958-3967.
- [14] 郑沛, 宋付朋, 马富亮. 硫膜与树脂膜控释尿素对小麦不同生育时

- 期土壤氮素的调控及其产量效应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 122-127. ZHENG Pei, SONG Fu-peng, MA Fu-liang. Influence of controlled release urea coated by sulfur and polymer on soil nitrogen in different growth stages of wheat[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 122-127.
- [15] 何中虎, 夏先春, 陈新民, 等. 中国小麦育种进展与展望[J]. 作物学报, 2011, 37(2): 202-215. HE Zhong-hu, XIA Xian-chun, CHEN Xin-min, et al. Progress of wheat breeding in China and the future perspective[J]. *ACTA Agricultura Sinica*, 2011, 37(2): 202-215.
- [16] 谭德水, 林海涛, 朱国梁, 等. 黄淮海东部冬小麦一次性施肥的产量效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3887-3896. TAN De-shui, LIN Hai-tao, ZHU Guo-liang, et al. Effect of one-off fertilization on winter wheat yield in Huang-Huai-Hai east region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3887-3896.
- [17] 朱兆良, 张福锁. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 264-294. ZHU Zhao-liang, ZHANG Fu-suo. Basic studies on nitrogen behavior and efficient use of nitrogen fertilizer in major farmland ecosystems[M]. Beijing: Science Press, 2009: 264-294.
- [18] Kissel D E, Brewer H L, Arkin G F. Design and test of a field sampler for ammonia volatilization[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 41(6): 1133-1138.
- [19] 贾树云, 高志岭, 李睿琦, 等. 养殖场粪污堆存中3种氨挥发测定技术比较研究[J]. 河北农业大学学报, 2020, 43(3): 29-36. JIA Shu-yun, GAO Zhi-ling, LI Rui-qi, et al. Comparison of three methods for measuring ammonia volatilization from manure storage[J]. *Journal of Hebei Agriculture University*, 2020, 43(3): 29-36.
- [20] Terry R E, Tate R L, Duxbury J M. The effect of flooding on nitrous oxide emissions from an organic soil[J]. *Soil Science*, 1981, 132(3): 228-232.
- [21] Xiao Y S, Peng F T, Zhang Y F, et al. Effect of bag-controlled release fertilizer on nitrogen loss, greenhouse gas emissions, and nitrogen applied amount in peach production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234: 258-274.
- [22] 中国肥料信息网. 控释肥, 2021[DB/OL]. [2021-04-01]. <https://www.sinofi.com/>. China-fertinfo. Controlled-release fertilizer, 2021 [DB/OL]. [2021-04-01]. <https://www.sinofi.com/>.
- [23] 无锡市人力资源和社会保障局. 人力成本, 2021[DB/OL]. [2021-04-01]. <http://hrss.wuxi.gov.cn/>. Wuxi Human Resources and Social Security Bureau. Human Resources, 2021[DB/OL]. [2021-04-01]. <http://hrss.wuxi.gov.cn/>.
- [24] 中国农药网. 杀虫剂, 2021[DB/OL]. [2021-04-01]. <http://www.agrichem.cn/>. China-agrichem. Pesticide, 2021[DB/OL]. [2021-04-01]. <http://www.agrichem.cn/>.
- [25] 中国种子网. 扬麦种子, 2021[DB/OL]. [2021-04-01]. <http://www.seedinfo.cn/1002/>. China-seedinfo. Wheat Seeds, 2021[DB/OL]. [2021-04-01]. <http://www.seedinfo.cn/1002/>.
- [26] 李文军, 杨晓云, 颜晓元. 施氮和肥料添加剂对太湖地区小麦产量和氮素吸收利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(4): 702-707. LI Wen-jun, YANG Xiao-yun, YAN Xiao-yuan. Effects of nitrogen and fertilizer additive application on wheat yield and nitrogen accumulation and utilization in Taihu Lake region[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(4): 702-707.
- [27] Natanos D A, Koutroubas S D. Dry matter and N accumulation and translocation for indica and japonica rice under mediterranean conditions[J]. *Field Crops Res*, 2002, 74: 93-101.
- [28] 陆晓松, 于东升, 徐志超, 等. 土壤肥力质量与施氮量对小麦氮肥利用效率的综合定量关系研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(2): 487-494. LU Xiao-song, YU Dong-sheng, XU Zhi-chao, et al. Study on comprehensive quantitative relationship of soil fertility quality and nitrogen application rate with wheat nitrogen use efficiency[J]. *ACTA Pedologica Sinica*, 2019, 56(2): 487-494.
- [29] 王兴刚, 吕少瑜, 冯晨, 等. 包膜型多功能缓/控释肥料的研究现状及进展[J]. 高分子通报, 2016(7): 9-22. WANG Xing-gang, LÜ Shao-yu, FENG Chen, et al. Research status and progress of coated multifunctional slow/controlled release fertilizer[J]. *Polymer Bulletin*, 2016(7): 9-22.
- [30] 马泉, 唐紫妍, 王梦尧, 等. 树脂包膜缓释肥与尿素配施对稻茬冬小麦产量、氮肥利用率与效益的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(10): 1202-1210. MA Quan, TANG Zi-yan, WANG Meng-yao, et al. Effect of resin coated slow release fertilizer combined with urea on yield, nitrogen use efficiency and economic benefits of winter wheat following rice[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(10): 1202-1210.
- [31] 林海涛, 李彦, 刘兆辉, 等. 水性树脂包膜尿素氮素释放与冬小麦氮素吸收匹配特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3852-3862. LIN Hai-tao, LI Yan, LIU Zhao-hui, et al. The match of the nitrogen uptake in winter wheat and nitrogen release of water borne resin coated urea[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3852-3862.