

刘红杰,任德超,张素瑜,等. 不同施肥模式对冬小麦产量和土壤养分的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(8):225-233.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.08.029

# 不同施肥模式对冬小麦产量和土壤养分的影响

刘红杰<sup>1</sup>,任德超<sup>1</sup>,张素瑜<sup>1</sup>,朱培培<sup>1</sup>,葛君<sup>1</sup>,赵敬领<sup>1</sup>,何勋<sup>2</sup>

(1. 商丘市农林科学院,河南商丘 476000; 2. 河南农业大学机电工程学院,河南郑州 450002)

**摘要:**为优化黄淮冬麦区冬小麦施肥量和施肥方式,提高小麦产量和肥料利用效率,采用大田试验,设置不施肥(CK)、农民习惯施肥模式(T1)、普通化肥全量深施(T2)、缓释肥全量表施(T3)、缓释肥全量深施(T4)、缓释肥减量25%深施(T5)、缓释肥减量50%深施(T6)7个处理,测定冬小麦不同生育期0~20 cm土壤养分以及产量等指标,计算氮肥农学利用率(NAE)、氮肥偏生产力(PFPN)、氮肥贡献率(FCR)、产投比值等,研究不同肥料种类、施肥方式对土壤养分、小麦产量的影响。结果表明,与相同施用量普通化肥相比,缓释肥能降低冬小麦生长前期氮素释放,促进拔节期、开花期和成熟期氮素释放。同时提升了各生育期土壤有效磷含量,增幅均大于8.30%。但降低了各生育土壤速效钾含量,其中开花期土壤速效钾含量最低。与相同施肥量表处理相比,肥料深施处理提高了各生育期的土壤全氮、有效磷、速效钾含量。4个生育期的土壤全氮、有效磷、速效钾含量分别提高2.49%~21.59%、4.83%~14.95%、7.85%~23.52%。同时在缓释肥减量深施条件下,各时期土壤全氮、有效磷、速效钾含量均随着施用量的降低逐渐降低。但与T1相比,除三叶期土壤全氮和速效钾、开花期速效钾外,T6处理的各生育期土壤全氮、有效磷和速效钾含量相差较小,且差异不显著。在相同施用量条件下,缓释肥处理、深施处理的小麦产量及三要素的数值分别高于相同施用量普通化肥处理、表施处理。随着缓释肥施用量的降低,小麦产量及三要素呈逐渐减少趋势,但T5处理产量显著高于T1;缓释肥表施和深施都能显著提高氮肥农学利用率和氮肥偏生产力,均与T1处理存在显著性差异,而缓释肥深施效果显著优于表施。随着缓释肥深施用量的增加,氮肥偏生产力呈逐渐降低的趋势,且各处理间差异显著。缓释肥深施更宜于氮肥利用效率的提升;冬小麦产量以T4处理最高,但冬小麦纯收益和产投比值均低于T5处理。T5处理纯收益和产投比值都较高,分别为14 022.73元/hm<sup>2</sup>、2.71。综上,缓释肥减量25%深施处理能保障充足的土壤养分供给,促进冬小麦高产稳产,同时获得较高的经济效益和产投比。

**关键词:**缓释肥;深施;氮肥利用率;经济效益;冬小麦;产量;土壤养分

**中图分类号:**S512.1+10.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)08-0225-08

小麦是我国种植面积和总产量第二大的粮食作物,常年种植面积约2 296.0万hm<sup>2</sup>,是最为重要的商品粮和战略性储备粮。黄淮冬麦区是我国小麦主产区之一,其种植面积约占全国的55.0%,总产量约占全国的60.0%,该麦区小麦产量的波动将直接影响国家粮食安全。化肥是作物获得稳产高产的关键措施,在粮食生产过程中具有不可替代的作用。近年来,随着农村劳动力结构的变化,小麦种植全程机械化的需求越来越强烈,传统的施肥方式已经与现代化的小麦生产模式不匹配<sup>[1]</sup>。虽然

已有较大面积麦田采用机械化表层撒施的施肥方式,但肥料表层撒施导致氮肥挥发损失加重,氮肥利用率降低,可被当季作物利用的比例仅为30%~35%<sup>[2]</sup>,氮肥损失不但造成资源浪费,而且影响增产效果<sup>[3-4]</sup>。土壤养分形态转化、运移及土壤供肥能力受肥料施用方式的制约<sup>[5-6]</sup>。合适的施肥方式不仅提高氮肥的利用率,而且对促进作物吸收养分具有明显效果。已有研究表明,肥料施入土壤合适深度对肥料利用率以及作物的生长发育和产量有显著影响<sup>[4,7]</sup>。本研究在前述的基础上,探索了不同肥料类型和施肥方式对冬小麦产量和土壤养分的影响。

为促进冬小麦持续生产和避免资源浪费,减少肥料损失,提高利用效率,实现节肥增产已成为当前农业科研工作者的主要研究方向<sup>[8]</sup>。单位面积施肥量过大和施用方式不合理是造成肥料浪费严重和利用率低的主要原因,通过改变肥料种类和施

收稿日期:2024-04-01

基金项目:国家小麦产业技术体系建设专项(编号:CARS-03-73);

河南省科技攻关项目(编号:242102110223,222102110370)。

作者简介:刘红杰(1984—),男,河南商丘人,硕士,副研究员,主要研究方向为小麦绿色高产简化栽培。E-mail:liuhj84@163.com。

通信作者:任德超,硕士,副研究员,主要研究方向为小麦绿色高产简化栽培。E-mail:liuhj84@163.com。

用方式将有助于减少单位面积化肥施用量,提高化肥利用效率。相较于普通尿素肥效短、易挥发、易淋溶等缺点,控释尿素具有养分释放与作物吸收规律同步的优点,被认为是增加作物产量<sup>[9-10]</sup>、降低损耗<sup>[11-12]</sup>、提高利用率<sup>[13-14]</sup>的有效途径。姬景红等研究认为,普通尿素深施可以调节氮素的供应,促进有效穗的增加<sup>[15]</sup>。董庆玲等研究发现,普通和控释尿素深施至 10 cm 土层,显著提高了氮素利用效率以及穗数、穗粒数、千粒重<sup>[1]</sup>。刘威等研究发现,控释尿素深施后能提高 0~20 cm 土壤无机氮含量,利于根系向深层土壤生长,促进作物干物质积累量增加,并获得较高的氮素利用率和产量<sup>[16]</sup>。磷钾肥深施亦对提高肥料利用率和产量有明显促进作用<sup>[17-18]</sup>。前人已有一些关于化肥表层撒施的研究<sup>[19-20]</sup>,肥料深施的研究较多是在桶栽<sup>[21]</sup>或土柱栽培<sup>[22-23]</sup>条件下进行的,在大田条件下的研究相对较少,关于不同肥料种类表施与深施,以及深施条件下不同减量比例对冬小麦产量及土壤养分含量影响的研究鲜有报道。本研究设置普通化肥与缓释肥的表施和深施处理,并在缓释肥深施下设置了不同施肥量处理,通过比较各处理间土壤养分和籽粒产量的差异,以期筛选最优的施肥模式,为冬小麦节肥增效和高产栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2019—2021 年在河南省商丘市梁园区李庄乡商丘市志诚种植农民专业合作社种植基地(115°37′34″E,34°31′32″N)进行,土壤类型为冲积型潮土,属暖温带半湿润季风气候,年均气温 14.5℃,年均日照时数 2 350 h,年均降水量 650 mm,年均无霜期 210 d。土壤质地为两合土,土地流转 10 年以上,土壤肥力均匀一致,地势平整。

2019 年冬小麦播种前取耕层 0~20 cm 基础肥力土样测定得到土壤理化性质如下:有机质含量 18.1 g/kg,全氮含量 1.05 g/kg,速效磷含量 41.4 mg/kg,速效钾含量 192.3 mg/kg,pH 值 7.22。

1.2 试验设计

1.2.1 试验设置 试验地连年冬小麦、玉米轮作,秸秆全量还田。试验为 3 因素试验,其中肥料种类分为普通化肥(非缓释肥)和缓释肥。普通肥料购于当地农资市场,氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%),钾肥为氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%)。缓释肥是由河北中吉化肥有限公司提供。氮肥为具有腐殖酸涂层尿素(含 N 46%),磷肥为具有腐殖酸涂层一铵(含 N 11%、含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 43%),钾肥为具有腐殖酸涂层的硫酸钾(含 K<sub>2</sub>O 30%)。施肥方式分为表施和深施(施肥深度为地表下 8~12 cm);施肥量分为全量、减量 25%、减量 50%。农民习惯施肥模式为氮肥分 2 次施入(基追量比为 6:4),磷钾肥基施,氮肥追肥时间为起身拔节期。其他处理的氮磷钾肥均一次性施入,后期不再追肥(表 1)。小区面积为 7.0 m×50.0 m,行距 0.2 m,小区随机排列,处理间设有 1.8 m 宽隔离带,无重复。其他管理同大田。

1.2.2 土壤样品采集 分别于 2020 年 11 月 5 日三叶期、2021 年 3 月 18 日拔节期、2021 年 4 月 26 日开花期、2021 年 5 月 28 日成熟期进行取样,每个小区采用五点法,采集耕层 0~20 cm 混合土样,每个小区采集 3 个混合土样,标记后带回实验室进行风干、过筛处理,然后测定土壤养分。2021 年 5 月 28 日成熟期各小区取长势均匀一致有代表性的 3 个 1 m 双行用于调查小麦穗数、穗粒数和千粒重,取 5 个 2 m<sup>2</sup> 代表性区域用于测产。

1.2.3 土壤养分指标分析 土壤全氮、有效磷、速效钾含量分别采用半微量凯式定氮法、钼锑抗比色

表 1 试验设计

编号	处理	肥料种类	运筹方式	养分用量(kg/hm <sup>2</sup> )		
				N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
CK	空白	—	不施肥	0	0	0
T1	农民习惯施肥模式	普通化肥	基肥表施;氮肥(基追量比为 6:4,追肥为起身拔节期条施),磷钾肥基施	270	136	106
T2	全量深施	普通化肥	深施	270	136	106
T3	全量表施	缓释肥	表施	270	136	106
T4	全量深施	缓释肥	深施	270	136	106
T5	减量 25% 深施	缓释肥	深施	202.5	102	79.5
T6	减量 50% 深施	缓释肥	深施	135	68	53

法、火焰光度计比色法<sup>[24]</sup>测定。

1.2.4 相关参数计算<sup>[25]</sup> 产值(元/hm<sup>2</sup>) = 籽粒产量(kg/hm<sup>2</sup>) × 小麦单价(2.36 元/kg)。

投入成本:普通化肥(按 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 施用量分别为 270、136、106 kg/hm<sup>2</sup>) 2 700 元/hm<sup>2</sup>,缓释肥(按 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 施用量分别为 270、136、106 kg/hm<sup>2</sup>) 3 300 元/hm<sup>2</sup>。人工及机械费用包括秸秆粉碎 2 遍 900 元/hm<sup>2</sup>、旋耕 2 遍 900 元/hm<sup>2</sup>、播种 450 元/hm<sup>2</sup>、肥料表施 120 元/hm<sup>2</sup>、追肥 90 元/hm<sup>2</sup>、深施 450 元/hm<sup>2</sup>、收获 900 元/hm<sup>2</sup> 等。其他费用包括种子 1 125 元/hm<sup>2</sup>、包衣剂 300 元/hm<sup>2</sup>、农药 300 元/hm<sup>2</sup> 等。

收益(元/hm<sup>2</sup>) = 产值 - 投入;

氮肥农学利用率(NAE, kg/kg) = (施氮区产量 - 不施氮区产量)/施氮量;

氮肥偏生产力(NPFP, kg/kg) = 施氮处理产量/施氮量;

氮肥贡献率(FCR, %) = (施氮区产量 - 不施氮区产量)/施氮区产量 × 100。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥模式对土壤养分含量的影响

2.1.1 不同施肥模式对土壤全氮含量的影响 由图 1 可知,不同处理对小麦各生育时期土壤全氮含量均具有不同程度的影响,不施肥处理的土壤全氮含量随冬小麦生长发育而逐渐降低。各施肥处理的土壤全氮含量随冬小麦生长发育其变化基本一致,均呈现先降低后升高的趋势。冬小麦 4 个生育期,各施肥处理的土壤全氮含量均高于不施肥处理(CK),在三叶期、拔节期、开花期、成熟期的土壤全氮含量分别比 CK 处理提高 10.53% ~ 50.81%、11.16% ~ 40.84%、10.07% ~ 37.07%、29.45% ~ 55.82%,氮肥的施入不同程度地增加了冬小麦 4 个生育期的土壤全氮含量,其中三叶期 T2 处理的土壤全氮含量最高,拔节期和成熟期 T4 处理最高,开花期 T5 处理的土壤全氮含量最高。与 T1 处理相比, T2 和 T4 处理冬小麦三叶期土壤全氮含量分别高 20.55%、11.81%,且均与 T1 处理土壤全氮含量存在显著差异( $P < 0.05$ );其他处理土壤全氮含量均低于 T1, T6 处理土壤全氮含量最低,比 T1 显著低 11.65%。除成熟期 T6 处理外,拔节期、开花期、成熟期各施肥处理土壤全氮含量均高于 T1。其中拔节期、成熟期均以 T4 处理土壤全氮含量最大,土

壤全氮含量分别比 T1 高 26.70%、17.99%;开花期以 T5 处理土壤全氮含量最大,比 T1 高 24.53%,且均与 T1 处理存在显著性差异。相同肥料种类同一施用量条件下,与表施处理相比,肥料深施处理各生育时期的土壤全氮含量普遍较高。普通化肥深施处理(T2) 4 个生育期的土壤全氮含量比表施处理(T1)分别提高 20.55%、21.59%、2.49%、4.68%。缓释肥深施处理(T4)三叶期、拔节期、成熟期的土壤全氮含量比表施处理(T3)分别提高 20.80%、1.52%、9.15%。在同一施肥方式条件下,三叶期缓释肥处理与相同施用量普通化肥处理相比,土壤全氮含量均较低, T3 处理比 T1 处理低 7.44%, T4 处理比 T2 处理低 7.25%,而拔节期、开花期、成熟期缓释肥表施和深施处理土壤全氮含量均提高,缓释肥表施处理较普通化肥表施处理土壤全氮含量分别高了 24.81%、16.63%、8.09%,缓释肥深施处理较普通化肥深施处理土壤全氮含量分别高了 4.21%、11.16%、12.71%。在缓释肥深施情况下,三叶期、拔节期、成熟期土壤全氮含量均随着氮肥施用量的减少而逐渐降低,而开花期则随着氮肥施用量的减少而先增后降。

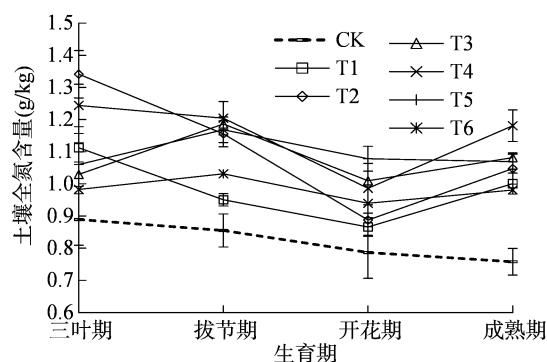


图1 不同施肥模式对土壤全氮含量的影响

### 2.1.2 不同施肥模式对土壤有效磷含量的影响

由图 2 可知,不同处理对冬小麦各时期土壤有效磷含量影响存在差异,不同处理土壤有效磷含量随冬小麦生长发育均呈现先升高后降低的趋势。冬小麦 4 个生育期,各施肥处理的土壤有效磷含量均高于不施肥处理(CK),在三叶期、拔节期、开花期、成熟期的土壤有效磷含量分别比不施肥处理高 39.41% ~ 76.47%、22.73% ~ 66.80%、31.51% ~ 68.14%、32.11% ~ 64.40%。磷肥的施入不同程度地增加了冬小麦 4 个生育时期的土壤有效磷含量,其中 T4 处理各生育期土壤有效磷含量均最高;与 T1 相比,各施肥处理土壤有效磷含量均较高,其中

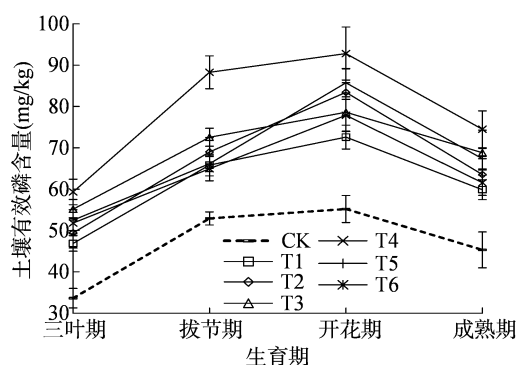


图2 不同施肥模式对土壤有效磷含量的影响

T4 显著高于 T1 24.44% ~ 34.09%。T6 处理各生育期土壤有效磷含量与 T1 差异不显著。在相同肥料种类同一施用量下,与表施处理相比,肥料深施处理各生育期的土壤有效磷含量都最高,T2 处理 4 个生育期的土壤有效磷含量分别比表施处理(T1)提高 5.46%、4.83%、14.95%、6.11%;T4 处理 4 个生育期的土壤有效磷含量分别比表施处理(T3)提高 7.56%、21.65%、18.05%、8.24%。在同一施肥方式条件下,缓释肥处理各生育期土壤有效磷含量均比相同施用量普通化肥处理高,其中缓释肥表施处理较普通化肥表施处理分别提高 17.69%、10.22%、8.30%、14.97%,缓释肥深施处理较普通化肥深施处理分别提高 20.03%、27.91%、11.23%、17.27%。在缓释肥深施情况下,各时期土壤有效磷含量均随着磷肥施用量的降低而逐渐降低。

### 2.1.3 不同施肥模式对土壤速效钾含量的影响

由图 3 可知,冬小麦 4 个生育期,各施肥处理的土壤速效钾含量均具有不同程度的影响。在冬小麦三叶期、拔节期、开花期、成熟期,各施肥处理的土壤速效钾含量分别高于不施肥处理(CK) 8.35% ~ 33.34%、14.41% ~ 44.94%、17.59% ~ 55.91%、16.72% ~ 50.16%,其中均以 T2 处理的土壤速效钾含量最高,T4 处理次之;与 T1 相比,T2、T4 处理各生育期分别高 7.85% ~ 23.52%、6.21% ~ 18.52%。T3 和 T5 处理各生育期土壤速效钾含量与 T1 处理相差不大,且不存在显著性差异。T6 处理各生育期土壤速效钾含量均低于 T1,其中三叶期、开花期分别低 12.36%、10.45%,且差异显著。在相同肥料种类同一施用量情况下,与肥料表施处理相比,肥料深施处理各生育期的土壤速效钾含量都较高,普通化肥深施处理 4 个生育期的土壤速效钾含量分别比表施处理提高了 7.85%、15.18%、

18.73%、23.52%;缓释肥深施处理 4 个生育期的土壤速效钾含量分别比表施处理提高 8.72%、7.52%、16.95%、17.14%。在同一施肥方式条件下,与普通化肥全量施用相比,缓释肥全量施用处理 4 个生育期的土壤速效钾含量均有所降低,其中开花期土壤速效钾含量降低幅度最大,2 种肥料种类处理的土壤速效钾含量平均降低了 6.69%。在缓释肥深施情况下,各生育期土壤速效钾含量均随着钾肥施用量的降低而逐渐降低。

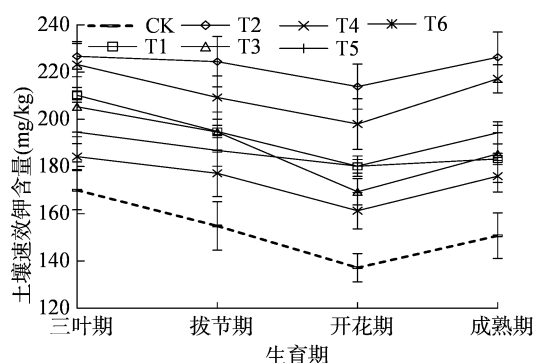


图3 不同施肥模式对土壤速效钾含量的影响

## 2.2 不同施肥模式对冬小麦产量及三要素的影响

由表 2 可知,与不施肥处理相(CK)比,不同施肥模式处理均能显著提高冬小麦成熟期群体数、穗粒数和产量。除 T3 和 T4 处理外,不施肥处理的千粒重均高于其他施肥处理,但仅与 T1 差异显著。在相同施用量条件下,缓释肥处理的产量及三要素均高于普通化肥处理,其中 T4 处理的成熟期群体、千粒重和产量均显著高于普通化肥处理(T1、T2)。T4 处理的穗粒数显著高于 T1 处理。2 种肥料深施处理的成熟期群体、穗粒数、千粒重和产量均高于表施处理,其中 T2 处理的穗粒数、千粒重均显著高于 T1 处理,T4 处理的产量显著高于 T3 处理。在施用缓释肥条件下,T4 处理的成熟期群体、穗粒数、千粒重和产量都最高,随着施用量的降低,成熟期群体、穗粒数、千粒重和产量基本上呈逐渐减少的趋势。与 T1 处理相比,T3、T4、T5 处理产量显著增加,而与 T6 处理产量相差较小,且差异不显著。T4 与 T5 处理产量差异较小,且差异不显著。

### 2.3 不同施肥模式氮肥利用率比较

由表 3 可见,缓释肥表施和深施都能显著提高氮肥农学利用率和氮肥偏生产力,均与普通化肥处理的氮肥农学利用率存在显著性差异,而缓释肥深施效果优于表施。T6 处理的氮肥农学利用率和氮肥偏生产力都较高,分别达到了 11.35、56.40 kg/kg。

表 2 不同施肥模式对冬小麦产量及三要素的影响

处理	成熟期群体 (万株/hm <sup>2</sup> )	穗粒数 (粒/穗)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )
CK	543.96 ± 29.20d	34.72 ± 1.04d	43.32 ± 1.30ab	6 757.36 ± 249.97e
T1	613.02 ± 14.41bc	40.25 ± 0.48c	41.43 ± 0.50c	8 253.63 ± 337.23d
T2	629.73 ± 19.84b	41.76 ± 0.92ab	42.31 ± 1.18b	8 727.98 ± 256.25c
T3	643.65 ± 10.66ab	42.64 ± 0.51ab	43.58 ± 0.52ab	9 225.43 ± 257.20b
T4	662.18 ± 5.24a	43.17 ± 0.78a	44.14 ± 0.79a	9 715.99 ± 235.48a
T5	629.14 ± 4.64b	41.63 ± 0.46b	42.76 ± 0.47b	9 412.17 ± 246.08ab
T6	595.47 ± 17.63c	41.90 ± 0.92ab	42.58 ± 1.07b	8 459.77 ± 190.30cd

注:同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。表 3 同。

表 3 不同施肥模式对冬小麦氮肥利用率的影响

处理	氮肥农学利用率 (kg/kg)	氮肥偏生产力 (kg/kg)	氮肥贡献率 (%)
T1	4.99e	27.51e	18.04c
T2	6.57de	29.09de	22.53b
T3	8.23cd	30.75cd	26.71a
T4	9.86bc	32.39c	30.42a
T5	11.80a	41.83b	28.17a
T6	11.35ab	56.40a	20.10bc

分别比 T1 处理提高了 127.45%、105.02%。随着缓释肥深施用量的增加,氮肥农学利用率先升高后降低。但氮肥偏生产力呈逐渐降低的趋势,且各处理间差异显著。T2 处理的氮肥农学利用率相对于 T1 处理较高,但两处理间的差异不显著。缓释肥不同施用量处理的氮肥农学利用率以减量 25% (T5) 处理最高,氮肥偏生产力以减量 50% (T6) 处理最高,且两者氮肥偏生产力均与全量深施(T4)和表施(T3)处理差异显著。

T4 处理的氮肥贡献率最高,达到 30.42%,且与普通化肥表施和深施处理差异显著。T1、T6 处理的氮肥贡献率都较低,除 T2 处理外,2 个处理的氮肥贡献率均显著低于其他处理。

2.4 不同施肥模式经济效益比较

冬小麦种植效益主要受小麦收购单价、产量和种植投入的影响。不同施肥模式下冬小麦生产经济效益存在差异(表 4)。各处理投入总成本之间的差异,主要是由肥料、人工和机械不同带来的。与 T1 相比,全量缓释肥处理肥料成本增加了 22.22%,而缓释肥减量 25%、减量 50% 处理肥料成本分别降低了 8.33%、38.89%。由于不施肥处理(CK),人工及机械成本也较少,因此总投入仅为 5 265 元/hm<sup>2</sup>。与 T3 处理相比,T1 处理的基肥施用方式也为表施,但增加了 1 次追肥费用,故人工及机械成本增加了 90 元/hm<sup>2</sup>。与基肥表施(T3)处理相比,基肥深施(T4)处理人工及机械成本较高,成本增加 330 元/hm<sup>2</sup>;不施肥处理(CK)产投比值最高,为 3.03,但纯收益最低,仅为 10 682.37 元/hm<sup>2</sup>。冬小麦纯收益和产投比值均以 T5 处理最高,分别达到 14 022.73 元/hm<sup>2</sup>、2.71。

3 讨论

3.1 不同施肥模式对土壤养分的影响

氮磷钾作为作物所需的三大元素对产量均有着显著的影响,不合理的施肥模式会影响作物对养

表 4 不同施肥模式下冬小麦生产经济效益

处理	产出(元/hm <sup>2</sup> )	投入(元/hm <sup>2</sup> )				纯收益 (元/hm <sup>2</sup> )	产投比值
		肥料	人工及机械	其他	总投入		
CK	15 947.37	0	3 150	2 115	5 265	10 682.37	3.03
T1	19 478.56	2 700	3 360	2 115	8 175	11 303.56	2.38
T2	20 598.04	2 700	3 600	2 115	8 415	12 183.04	2.45
T3	21 772.00	3 300	3 270	2 115	8 685	13 087.00	2.51
T4	22 929.73	3 300	3 600	2 115	9 015	13 914.73	2.54
T5	22 212.73	2 475	3 600	2 115	8 190	14 022.73	2.71
T6	19 965.05	1 650	3 600	2 115	7 365	12 600.05	2.71

分的吸收利用从而引起减产,残余积累的养分也容易造成环境污染。小麦生育期较长,因此充足的养分供应是小麦高产的保障。本研究发现,与不施肥处理相比,施肥处理不同生育期土壤全氮、有效磷和速效钾含量均高于不施肥处理,这与张务帅等研究认为合理施肥能提升土壤肥力的结论<sup>[26]</sup>一致。在实际生产中,基肥一次性表施难以满足小麦后期养分需求,一般通过小麦返青—拔节期追肥等来补充养分,以求产量稳定。缓释肥能调控养分释放速度,使养分缓慢释放,减少挥发流失,可供应于小麦生长发育的养分增多,更利于保证小麦产量的稳定。本研究中,与相同用量普通化肥处理相比,缓释肥处理冬小麦三叶期的土壤全氮含量均降低,而拔节期、开花期和成熟期土壤全氮含量则提高,这与张务帅等的研究结论<sup>[26]</sup>一致。这是由于缓释肥能根据小麦生长需求调控氮肥释放氮素。缓释肥处理比普通化肥相同施肥量处理的土壤有效磷含量明显增加,增幅均大于 8.30%。这可能是由于缓释肥能调控磷素释放,降低了磷素被土壤固定,缓释肥供磷状况更优。各处理土壤速效钾含量在各生育期变化不大,说明在现有的基础肥力条件下能满足冬小麦在该土层速效钾的需求量。三叶期、拔节期、开花期缓释肥处理的土壤速效钾含量与普通化肥相同施肥量处理低,其中开花期土壤速效钾含量最低。这可能与钾肥吸收高峰在穗期<sup>[27]</sup>有关,同时缓释肥处理的冬小麦产量较高,从而影响了植株对土壤速效钾的吸收量;有研究表明,肥料深施能有效减少肥料挥发和流失等<sup>[28]</sup>,对小麦生长发育和土壤养分吸收具有较大的影响。王应君等研究表明,与肥料表施相比,肥料深施处理能促进土壤养分含量的提升,有助于提高土壤肥力<sup>[29]</sup>。本研究表明,与相同施肥量表施处理相比,肥料深施处理各生育期的土壤全氮、有效磷、速效钾含量都最高。普通化肥深施处理 4 个生育期的土壤全氮、有效磷、速效钾含量分别比表施提高 2.49% ~ 21.59%、4.83% ~ 14.95%、7.85% ~ 23.52%。缓释肥深施处理 4 个生育期的土壤全氮、有效磷、速效钾含量分别比表施提高 -2.32% ~ 20.80%、7.56% ~ 21.65%、7.52% ~ 17.14%。同时在缓释肥减量深施条件下,各时期土壤全氮、有效磷、速效钾含量均随着施用量的降低总体呈现出下降趋势。但与 T1 相比,T6 处理的各生育期土壤全氮、有效磷和速效钾含量相差较小。

### 3.2 不同施肥模式对产量及三要素的影响

施用化肥是保障作物稳产高产的重要技术措施,但过量施用不但不利于作物可持续生产,而且会导致耕地质量的严重退化,优质产区小麦的产量和品质逐年下降<sup>[30]</sup>。巨晓棠等研究认为,施肥的关键是明确合理的施肥量,并且合理的施肥量要以产量为目标<sup>[31]</sup>。在保证冬小麦较高产量情况下,研究如何减少氮肥的施用量,实现氮素化肥精准高效利用,对保障粮食安全及可持续发展具有重要意义。周伟等研究认为,肥料深施更符合作物根系分布规律,肥料深施可进一步提高缓释肥利用效率,更利于小麦生产的节本增效<sup>[32]</sup>。董庆玲等研究认为,采用一次性基肥深施技术,普通和控释尿素处理都能不同程度提高小麦穗数、穗粒数和千粒重,且穗数和千粒重均能显著提高<sup>[1]</sup>。本研究发现,与不施肥处理相比,不同施肥模式处理均能显著提高冬小麦成熟期群体数、穗粒数和产量,这与王义凡等研究不同施肥处理与不施肥处理相比,且均达产量显著提高 31.53% ~ 49.45% 的结论<sup>[20]</sup>基本一致。孙克刚等研究发现,与普通尿素处理相比,相同用量控释尿素处理产量显著增加,且在控释尿素减量 30% 条件下产量未降低<sup>[33]</sup>。董林林等研究认为,基肥施入深度能显著影响水稻产量,深度为 10 cm 时,水稻产量最高,且显著高于不施肥和表施处理<sup>[34]</sup>。本研究表明,在相同施用量条件下,缓释肥处理的产量及三要素的数值均高于普通化肥处理,这与汪强等的结论<sup>[35]</sup>相似。同时本研究还发现,2 种肥料深施处理的成熟期群体、穗粒数、千粒重和产量均高于相同肥料表施处理,这与王应君等的研究结论<sup>[29]</sup>基本一致。其中普通化肥深施处理的穗粒数、千粒重均显著高于普通化肥表施处理。缓释肥深施处理的产量显著高于缓释肥表施处理。化肥深施条件下,连续 7 年减少 16% ~ 30% 氮肥用量,早晚稻增产 4.37% ~ 32.70%<sup>[36]</sup>。彭术等认为,在氮肥减量 30% 情况下,深施处理可以提高双季稻有效穗数和实粒数,使双季稻增产 5% 左右<sup>[37]</sup>。本研究发现,在缓释肥不同施用量条件下,全量深施处理的成熟期群体、穗粒数、千粒重和产量都最高,且除穗粒数外其他均与与减量 50% 处理存在显著性差异。同时随着施用量的降低,成熟期群体、穗粒数、千粒重和产量基本上呈逐渐减少的趋势,这与姜恒鑫等研究结论<sup>[38]</sup>一致。与 T1 处理相比,T5 处理产量显著增加,而与 T6 处理产量与之无显著性差异,但肥料

成本降低了 1 050 元/hm<sup>2</sup> (表 4)。可见, T5 是一种增产节本的施肥措施, 而 T6 是一种稳产但更节本的施肥措施。

### 3.3 不同施肥模式氮肥利用率比较

氮肥的利用率体现了作物对氮素的运用趋势, 表征了氮肥对产量的贡献程度<sup>[39]</sup>。谭德水等研究发现, 与普通化肥相比, 缓释肥在减量 20% 时仍能保证小麦高产稳产, 提高麦季氮肥吸收利用率和小麦生产效益<sup>[40]</sup>。董燕等研究发现, 与普通复合肥料相比, 缓释复合肥氮、磷、钾养分利用效率分别显著提高 23.6%、15.4%、63.7%<sup>[41]</sup>。王应君等认为, 与肥料浅施相比, 肥料深施小麦产量和氮素化肥、磷肥的利用率分别显著提高了 7.6% ~ 26.6%、20.86% ~ 41.1%、7.13% ~ 15.39%<sup>[29]</sup>。本研究表明, 缓释肥表施和深施都能显著提高氮肥农学利用率和氮肥偏生产力, 均与普通化肥处理的氮肥农学利用率存在显著性差异, 而缓释肥深施效果显著优于表施。这是由于缓释肥能很好地将肥料养分释放速度匹配作物养分需求, 而肥料深施符合植物根系的分布规律, 因此缓释肥深施更利于氮素利用效率的提升。T6 处理的氮肥农学利用率和氮肥偏生产力都较高, 分别达到了 11.35、56.40 kg/kg。随着缓释肥深施用量的增加, 氮肥农学利用率先升后降, 但减量 25% 和减量 50% 处理间差异不显著。但氮肥偏生产力呈逐渐降低的趋势, 且各处理间差异显著。缓释肥深施更宜于氮肥利用效率的提升。T6 处理的氮肥农学利用率、偏生产力分别比 T1 处理显著提高了 127.45%、105.02%。普通化肥深施处理的氮肥农学利用率相对于 T1 处理较高, 但两者并差异不显著。缓释氮肥不同施用量处理的氮肥农学利用率以减量 25% 处理最高, 氮肥偏生产力以减量 50% 处理最高, 且两者均与全量表施处理差异显著。T4 处理的氮肥贡献率最高, 达到 30.42%, 且与普通化肥处理存在显著性差异, T1、T6 处理的氮肥贡献率都较低, 2 个处理间差异不显著。除 T2 处理外, 2 个处理的氮肥贡献率均较其他处理存在显著性差异。

### 3.4 不同施肥模式经济效益比较

随着农村劳动力向城镇转移逐渐增多, 农业从业人员出现短缺, 多次施肥技术在实际生产中面临较多困难。而缓释肥在部分作物上能实现一次性施肥, 是解决氮肥利用率低、农村劳动力短缺的有效措施之一<sup>[42-43]</sup>。相对于普通化肥, 缓释肥售价偏高是影响其大面积推广应用的主要限制因素。通

过改变施肥措施提高肥料利用率, 在保证小麦产量不降低甚至增产的情况下降低肥料施用量<sup>[44]</sup>, 并减少春季追肥时的劳动力投入, 进而提升产投比<sup>[45]</sup>。本研究发现, 与 T1 相比, 全量缓释肥处理肥料成本增加了 22.22%, 而缓释肥减量 25%、减量 50% 处理肥料成本分别降低了 8.33%、38.89%。各处理投入人工、机械成本之间的差异主要是肥料表施、深施以及 T1 中返青拔节期追肥费用不同造成的。由于对照处理不施肥, 因此人工、机械成本最少, 仅为 3 150 元/hm<sup>2</sup>; 不施肥处理 (CK) 产投比值最高, 为 3.02, 但纯收益最低。此外, 长期不施肥会造成土壤基础肥力降低, 不利于冬小麦生产的可持续健康发展。本研究中, 冬小麦产量以 T4 处理最高, 但冬小麦纯收益和产投比均低于 T5 处理。可见, T4 处理并不是最优的施肥方案; T5 处理纯收益、产投比值都较高, 分别为 14 022.73 元/hm<sup>2</sup>、2.71。可见, T5 处理比较适宜推广应用。

## 4 结论

缓释肥能调控冬小麦生长前期氮素释放, 提高拔节期、开花期和成熟期土壤全氮含量。同时显著提高各生育期土壤有效磷含量, 增幅均大于 8.30%。但缓释肥处理不利于土壤速效钾含量的提高, 与对照相比, 开花期土壤速效钾含量最低。肥料深施能提升冬小麦各生育期的土壤全氮、有效磷、速效钾含量; 在缓释肥减量深施条件下, 各时期土壤全氮、有效磷、速效钾含量均随着施用量的降低而逐渐降低。但除三叶期土壤全氮和速效钾、开花期速效钾外, T6 处理与 T1 的各生育期土壤全氮、有效磷、速效钾含量相差较小, 且差异不显著。

在相同施用量条件下, 缓释肥、深施处理的产量及三要素的数值均高于普通化肥表施处理。但在缓释肥深施的情况下, 随着缓释肥施用量的降低, 成熟期群体、穗粒数、千粒重和产量呈逐渐减少的趋势。相较于农民习惯性施肥模式, T5 是一种增产节本的施肥措施, 而 T6 是一种稳产但更节本的施肥措施。

缓释肥表施和深施都能显著提高氮肥农学利用率和氮肥偏生产力, 均与 T1 处理存在显著性差异, 而缓释肥深施效果显著优于表施。随着缓释肥深施用量的增加, 氮肥农学利用率先升高后降低, 氮肥偏生产力呈逐渐降低, 氮肥贡献率逐渐升高, 各处理间 (T4、T5、T6) 仅氮肥偏生产力存在显著性



差异。缓释肥深施更宜于氮肥利用效率的提升。氮肥农学利用率以缓释肥减量 25% 深施处理最高, 氮肥偏生产力以缓释肥减量 50% 深施处理最高, 且两者均与全量深施和表施处理差异显著。T4 处理的氮肥贡献率最高, 达到 30.42%, 且与普通化肥表施和深施处理存在显著性差异。

不施肥处理(CK)产投比值最高, 为 3.02, 但纯收益最低。冬小麦产量以 T4 处理最高, 但冬小麦纯收益和产投比值均低于 T5 处理。T5 处理纯收益和产投比都较高, 其数值分别为 14 022.73 元/hm<sup>2</sup>、2.71。

#### 参考文献:

- [1] 董庆玲, 姜焕昌, 张 慧, 等. 普通和控释尿素配合深施提高冬小麦花期旗叶光合性能与氮素利用效率[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1134–1145.
- [2] 张文新, 张成军, 赵同科, 等. 缓释氮肥减少菜田土壤硝酸盐淋溶研究[J]. 华北农学报, 2010, 25(5): 166–170.
- [3] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: how deep to incorporate urea? [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(6): 1635–1642.
- [4] 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.
- [5] 孙浩燕, 李小坤, 任 涛, 等. 浅层施肥对水稻苗期根系生长及分布的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(12): 2477–2485.
- [6] 任 军, 边秀芝, 郭金瑞, 等. 黑土区高产土壤培肥与玉米高产田建设研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 147–151, 157.
- [7] 赵亚丽, 杨春收, 王 群, 等. 磷肥施用深度对夏玉米产量和养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(23): 4805–4813.
- [8] 赵亚南, 徐 霞, 黄玉芳, 等. 河南省小麦、玉米氮肥需求及节氮潜力[J]. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2747–2757.
- [9] 孙克刚, 和爱玲, 胡 颖, 等. 小麦—玉米轮作制下的控释肥肥效试验研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1125–1129.
- [10] 梁 钢, 梁林洲, 董晓英, 等. 控释肥料在华北潮土小麦—玉米轮作体系中的施肥效应[J]. 土壤, 2016, 48(1): 53–58.
- [11] 肖 强, 张夫道, 王玉军, 等. 纳米材料胶结包膜型缓/控释肥料特性及对作物氮素利用率与氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 779–785.
- [12] 于淑芳, 杨 力, 张 民, 等. 控释尿素对小麦、玉米产量及土壤氮素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1744–1749.
- [13] 隋常玲, 张 民. 15N 示踪控释氮肥的氮肥利用率及去向研究[J]. 西北农业学报, 2014, 23(9): 120–127.
- [14] 孙克刚, 和爱玲, 李丙奇, 等. 小麦—玉米周年轮作制下的控释肥及控释 BB 肥肥效试验研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 150–154.
- [15] 姬景红, 李玉影, 刘双全, 等. 控释掺混肥对春玉米产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 669–675.
- [16] 刘 威, 周剑雄, 谢媛圆, 等. 控释尿素不同条施深度下鲜食玉米产量和氮素利用效应[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 246–251, 258.
- [17] 张魏斌, 孙 敏, 高志强, 等. 旱地小麦深施磷肥对土壤水分及植株氮素吸收、利用的影响[J]. 激光生物学报, 2016, 25(4): 371–378, 385.
- [18] Kuhlmann H. Importance of the subsoil for the K nutrition of crops [J]. Plant and Soil, 1990, 127: 129–136.
- [19] 韩锐锋, 牛培锡, 王鑫悦, 等. 控释尿素和普通尿素混合基施对冬小麦氮素吸收利用和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(11): 2042–2058.
- [20] 王义凡, 任 宁, 董向阳, 等. 控释尿素与普通尿素配施对小麦产量、氮素吸收及经济效益的影响[J]. 作物杂志, 2023(5): 117–123.
- [21] 俞洪燕, 钱晓刚, 罗绪强, 等. 氮肥施用深度对玉米苗期植株生长及养分吸收的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(8): 44–48.
- [22] 马政华, 寇长林, 康利允. 分层供水施肥对冬小麦光合性能及产量的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1399–1406.
- [23] 靳奇峰, 牛俊义. 施肥深度对地膜春小麦干物质积累的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(5): 63–66.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [25] 张建军, 党 翼, 赵 刚, 等. 控释尿素掺混比例对旱地玉米产量、无机氮含量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(6): 1025–1036.
- [26] 张务帅, 陈宝成, 李成亮, 等. 控释氮肥控释钾肥不同配比对小麦生长及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 178–183, 189.
- [27] 虎 净, 危常州, 宋 凯, 等. 干旱区滴灌春小麦氮、磷、钾养分吸收规律[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(5): 808–814.
- [28] 贾永春. 化肥深施机械化技术[J]. 青海农技推广, 2011(3): 61–64.
- [29] 王应君, 王淑珍, 郑 义. 肥料深施对小麦生育性状、养分吸收及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(9): 276–280.
- [30] 王朝辉. 我国小麦施肥问题与化肥减施[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4813–4815.
- [31] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783–795.
- [32] 周 伟, 吕腾飞, 杨志平, 等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 3051–3058.
- [33] 孙克刚, 胡 颖, 和爱玲, 等. 控释尿素对小麦品种郑麦 366 产量及氮肥利用率的影响[J]. 河南农业科学, 2009(8): 67–69.
- [34] 董林林, 沈明星, 全坚宇, 等. 基肥正位深施对直播水稻产量和化肥利用的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(增刊 1): 222–230.
- [35] 汪 强, 李双凌, 韩燕来, 等. 缓/控释肥对小麦增产与提高氮肥利用率的效果研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 693–696.
- [36] 彭 术, 王 华, 张文钊, 等. 长期氮肥减量深施对双季稻产量和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(6): 999–1007.



梁一凡,严定伟,罗 菲,等. 腐殖酸钾对植烟土壤养分及烤烟油分相关品质的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(8):233-241.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.08.030

# 腐殖酸钾对植烟土壤养分及烤烟油分相关品质的影响

梁一凡<sup>1</sup>, 严定伟<sup>1</sup>, 罗 菲<sup>1</sup>, 韩振华<sup>1</sup>, 刘玲玲<sup>2</sup>, 杨建新<sup>2</sup>, 杨晓朋<sup>1</sup>, 常剑波<sup>2</sup>, 杨军杰<sup>2</sup>, 姬小明<sup>1</sup>

(1. 河南农业大学烟草学院, 河南郑州 450046; 2. 河南省烟草公司三门峡市公司, 河南三门峡 472000)

**摘要:**为探究腐殖酸钾对植烟土壤养分及烤烟油分相关品质的影响,以云烟 87 为试验材料,以常规施肥为对照,设置 T1 (常规施肥 + 腐殖酸钾 300 kg/hm<sup>2</sup>)、T2 (常规施肥 + 腐殖酸钾 600 kg/hm<sup>2</sup>)、T3 (常规施肥 + 腐殖酸钾 900 kg/hm<sup>2</sup>) 共 4 个处理,开展田间试验。对烤烟土壤养分、农艺性状、常规化学成分、腺毛形态和腺毛分泌物等进行测定分析。结果表明,施用腐殖酸钾能够促进烤烟生长发育,各项农艺性状指标较 CK 均有提高;施用腐殖酸钾后提高了土壤养分含量,其中 T3 处理效果最好,土壤有机质、速效磷、速效钾含量较 CK 分别提高 29.17%、2.78%、11.51%;施用腐殖酸钾还可以促进腺毛发育,提高烟叶油分,其中 T3 处理效果最好,腺毛密度和长度明显增加,腺头饱满,石油醚提取物含量较 CK 均有提高,各处理较 CK 分别提高 4.88%、9.76%、13.41%,且可以提高中性香味物质含量;施用腐殖酸钾可以改善烟叶的物理特性,使烤后烟叶的化学成分更加协调;T2、T3 处理的产量产值较 CK 分别增加 15.07%、16.53% 和 15.73%、19.43%,二者间没有显著性差异,但相较于 T3 处理,T2 处理的产投比增加了 38.24%。综上,施用腐殖酸钾可以提高土壤养分,促进烟叶腺毛发育,提高烤烟油分含量和烟叶品质,促进烟株生长发育,其中施用腐殖酸钾 900 kg/hm<sup>2</sup> 效果最好,施用腐殖酸钾 600 kg/hm<sup>2</sup> 的经济效益较好。

**关键词:**腐殖酸钾;土壤养分;油分;烤烟;农艺性状;化学成分;经济效益;产量

**中图分类号:**S572.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)08-0233-09

烟草是我国的重要经济作物之一。烟叶品质与生态环境息息相关,其中土壤是烟草生长发

育最重要的基础。三门峡烟区是河南省较大的烤烟种植区之一,烟草种植历史悠久。目前豫西烟区肥料施用单一,有机无机肥料配施不均匀,导致土壤严重退化,土壤有机质、全氮、全磷和速效氮含量供应不足<sup>[1]</sup>。腐殖酸钾是一种高分子非均一的芳香族羧基羧酸盐,外观为黑色颗粒或粉状固体,在农业生产中主要作为高效有机钾肥应用<sup>[2]</sup>。腐殖酸钾可以促进作物根系生长发育、活化土壤养分,也具有改良土壤、促进作物生长、提高作物抗逆能力、改善作物品质、保护农业生态环境等功能。其中,腐殖酸是一种生物活性制剂,它可以改变作物

收稿日期:2024-05-05

基金项目:河南省烟草公司三门峡市公司项目(编号:2022411200200004x);国家自然科学基金(编号:32300342)。

作者简介:梁一凡(2000—),男,河南郑州人,硕士研究生,主要从事烟草栽培研究。E-mail:1301939145@qq.com。

通信作者:姬小明,教授,博士生导师,主要从事烟草化学研究, E-mail:xiaomingji@henau.edu.cn;杨军杰,硕士,农艺师,主要从事烟草栽培技术研究及科研项目管理研究, E-mail: yangjunjie890511@126.com。

[37] 彭 术,张文钊,侯海军,等. 氮肥减量深施对双季稻产量和氧化亚氮排放的影响[J]. 生态学杂志,2019,38(1):153-160.

[38] 姜恒鑫,黄 恒,汪 源,等. 缓释尿素减量侧深施用对长江中下游水稻产量和品质的影响[J]. 河南农业科学,2022,51(3):20-29.

[39] 赵 斌,董树亭,张吉旺,等. 控释肥对夏玉米产量和氮素积累与分配的影响[J]. 作物学报,2010,36(10):1760-1768.

[40] 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.

[41] 董 燕,王正银,田秀英,等. 非包膜缓释复合肥养分释放特性及小麦对养分的吸收[J]. 农业工程学报,2007,23(2):36-41.

[42] 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.

[43] 王晓琪,朱家辉,陈宝成,等. 控释尿素不同比例配施对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(4):178-182.

[44] 侯慧芝,张绪成,尹嘉德,等. 旱地化肥分层和深施对春小麦水肥利用及产量的影响[J]. 中国农业科学,2022,55(17):3289-3302.

[45] 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.