



秸秆促腐还田耦合氮肥类型对黄淮海地区鲜食玉米生长和氮素利用的影响

刘健, 胡智慧, 宋博雅, 方恒, 胡宏祥, 谷晓博

引用本文:

刘健, 胡智慧, 宋博雅, 等. 秸秆促腐还田耦合氮肥类型对黄淮海地区鲜食玉米生长和氮素利用的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 246–253.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0848>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江, 叶鑫, 牛世伟

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 96–103 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0072>

农艺深施及配施缓控释氮肥对水稻产量及氮素损失的影响

张富林, 刘冬碧, 范先鹏, 夏颖, 张志毅, 程子珍, 吴茂前, 高红兵, 毛波, 孔祥琼

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 858–866 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0171>

不同形态氮素对玉米秸秆腐解与养分释放的影响

石琳, 金梦灿, 单旭东, 高敏, 陈曦, 郜红建

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 277–285 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0086>

控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响

姬景红, 李玉影, 刘双全, 佟玉欣, 任桂林, 李杰, 刘颖, 张明怡

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 153–160 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0231>

包膜尿素和普通尿素混施对夏玉米产量、氮肥利用率和土壤硝态氮残留的影响

曹兵, 倪小会, 陈延华, 邹国元, 王甲辰, 杨友庆, 陈立娟, 刘杰, 王学霞

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 695–701 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0428>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘健, 胡智慧, 宋博雅, 等. 秸秆促腐还田耦合氮肥类型对黄淮海地区鲜食玉米生长和氮素利用的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 246–253.

LIU J, HU Z H, SONG B Y, et al. Effects of straw promoting decomposition returning coupled with nitrogen fertilizer types on growth and nitrogen utilization of fresh maize in Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2026, 43(1): 246–253.



开放科学 OSID

秸秆促腐还田耦合氮肥类型对黄淮海地区鲜食玉米生长和氮素利用的影响

刘健¹, 胡智慧¹, 宋博雅¹, 方恒^{1,2*}, 胡宏祥¹, 谷晓博²

(1. 安徽农业大学农田生态保育与养分资源高效利用安徽省重点实验室, 合肥 230036; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探究不同秸秆促腐还田与氮肥类型互作对鲜食玉米生长和氮素利用的影响,为黄淮海地区鲜食玉米的氮肥减量增效提供理论依据,本研究以鲜食玉米为研究对象,设计主裂区试验,主区为秸秆直接还田(DS)、秸秆氨化还田(AS)、添加腐秆菌还田(FS),副区为尿素(UF)、缓释肥(RF)、掺混肥(MF),探究秸秆促腐还田耦合氮肥类型对鲜食玉米干物质、叶绿素、产量、植株氮素积累和土壤硝态氮的影响。结果表明,在相同氮肥类型条件下,与DS处理相比,秸秆促腐还田(AS、FS)处理提高了叶绿素含量和干物质积累量,分别提高了7.4%、9.8%(AS)和7.4%、12.1%(FS);降低了0–60 cm的土壤硝态氮含量,分别降低了22.6%和18.6%;提高了植株吸氮量和籽粒氮素占比,产量分别提高了4.7%和3.0%。在相同秸秆还田条件下,与UF处理相比,MF和RF处理提高了叶绿素含量和干物质积累量,分别提高了9.7%、14.0%(MF)和2.2%、9.2%(RF);降低了40–60 cm的土壤硝态氮含量,分别降低了26.2%和30.1%;提高了植株吸氮量和籽粒氮素占比,产量和氮素利用率分别提高了14.6%、8.4%(MF)和9.3%、6.1%(RF)。在本试验条件下,综合考虑玉米的生长、植株氮素吸收和土壤氮素残留,推荐秸秆氨化还田耦合掺混肥为黄淮海地区鲜食玉米氮肥减量增效的施肥模式。

关键词:缓释氮肥; 秸秆氨化; 腐秆菌; 氮素利用效率; 土壤硝态氮

doi: 10.13254/j.jare.2024.0848

Effects of straw promoting decomposition returning coupled with nitrogen fertilizer types on growth and nitrogen utilization of fresh maize in Huang-Huai-Hai Plain

LIU Jian¹, HU Zhihui¹, SONG Boya¹, FANG Heng^{1,2*}, HU Hongxiang¹, GU Xiaobo²

(1. Anhui Province Key Lab of Farmland Ecological Conservation and Nutrient Utilization, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To explore the interactive effects of straw decomposition-promoting returning and nitrogen fertilizer types on the growth and nitrogen utilization of fresh maize, providing theoretical support for reduced nitrogen fertilization and increasing its efficiency in the Huang-Huai-Hai Plain, we focused on fresh maize and conducted a split-plot design. The main plots included straw returning without treatment (DS), straw ammoniation returning (AS), and straw add decomposing bacteria returning (FS); the subplots included urea (UF), slow-released fertilizer (RF), and mixed fertilizer (blending conventional and coated urea in 3:7, MF). The effects of different nitrogen fertilizer types on dry matter accumulation, chlorophyll content, yield, plant nitrogen uptake, and soil nitrate nitrogen content of fresh corn were studied. The results showed that under the same type of nitrogen fertilizer, the AS and FS treatments increased chlorophyll content and dry matter accumulation by 7.4%, 9.8% (AS), and 7.4%, 12.1% (FS), respectively, but decreased the nitrate-nitrogen content in 0–60 cm soil by 22.6% and 18.6%, respectively, compared with DS treatment. The plant nitrogen uptake, nitrogen proportion of grain, and yield (4.7%

收稿日期: 2024-10-27 录用日期: 2025-02-14

作者简介: 刘健(1998—), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 研究方向为养分资源高效利用。E-mail: 15195283805@163.com

*通信作者: 方恒 E-mail: fangheng8571@163.com

基金项目: 安徽省高校自然科学基金重点项目(2023AH051012)

and 3.0% higher) of the AS and FS treatments were all higher than DS treatment. Under the same straw-returning conditions, MF and RF treatments increased chlorophyll content and dry matter accumulation by 9.7%, 14.0% (MF), and 2.2%, 9.2% (RF), respectively, but also decreased the soil nitrate-nitrogen content in 40–60 cm soil by 26.2% and 30.1%, respectively, compared with UF treatment. In addition, the yield and nitrogen use efficiency was increased by 14.6%, 8.4% (MF), 9.3%, and 6.1% (RF), respectively, compared with UF treatment. Under the conditions of this study, considering the growth of maize, nitrogen utilization of maize, and nitrogen residue of soil, it is recommended that straw ammoniation and return coupling mixed fertilizer is the fresh maize planting pattern in the Huang-Huai-Hai Plain, which can reduce nitrogen fertilization and increasing its efficiency.

Keywords: slow-released nitrogen fertilizer; straw ammonification; decomposing bacteria; nitrogen use efficiency; soil nitrate nitrogen

鲜食玉米又称水果玉米,其风味独特,富含膳食纤维和维生素、氨基酸、亚油酸等营养成分,兼具营养价值和保健功能^[1],又因生长周期短,产出收益是普通玉米的2~3倍^[2],深受消费者和生产者青睐。黄淮海地区是我国玉米主产区之一,玉米播种面积占全国的29.76%,总产量约占全国的28.84%^[3]。近些年来,为了优化种植结构、促进农业经济的发展,该地区不断扩大鲜食玉米的种植面积。氮素作为影响鲜食玉米产量和品质的重要元素,对鲜食玉米的生长至关重要^[4],但在种植过程中,当地农户为了追求高产而过度施用氮肥,导致氮素利用效率低、土壤酸化和温室气体排放等一系列问题^[5]。随着农业农村部“化肥零增长”和“化肥减量化”政策的实施^[6-7],在保证产量的前提下,如何减少化学氮肥投入、提高氮肥利用率是目前亟需研究的问题。

新型氮肥的施用和推广是解决氮肥低效问题的重要途径。目前,尿素作为黄淮海地区玉米生产中使用最广泛的氮肥,只有33%~50%的氮能被作物利用,大部分氮素因为淋溶或氨挥发作用流失,导致氮素损失和环境污染^[8]。近年来,随着高效、环保肥料的发展,缓释肥被广泛应用于玉米、小麦等大田作物。但缓释肥价格昂贵,此外,缓释肥从包膜材料中释放氮素的速度相对较慢,不利于作物苗期的生长^[9]。为了降低肥料成本,解决生长初期氮素释放缓慢的问题,研究人员将缓释肥和尿素掺混施用来降低肥料成本,确保作物生长前期的氮供应,进而促进氮的吸收并提高产量^[10]。因此,将尿素与缓释肥掺混施用可能是协调肥效和成本矛盾的最佳选择,但由于不同地区的气候特点、作物品种以及养分需求不同,目前在黄淮海地区,关于不同类型的氮肥对鲜食玉米生长和氮素利用的影响尚不清楚。

作物秸秆含有有机质、氮、磷、钾等营养元素,还田利用可以减少化肥投入量,其化肥替代量可在我国化肥施用量的25%以上^[11]。黄淮海地区主要以夏玉米-冬小麦种植为主,秸秆产生量占全国的27.18%,

秸秆直接还田率高达70.1%^[12]。但有研究表明,玉米、小麦秸秆C/N较高,纤维素和半纤维素分解缓慢,可能无法及时释放营养物质供当季作物吸收^[13],此外,秸秆的高C/N还会导致土壤微生物与作物争夺氮素^[14]。近年来,一些研究者通过添加腐秆菌和氨化的措施来解决秸秆还田难以腐解的问题。添加腐秆菌还田,即通过喷施腐秆菌剂来增加微生物的数量,从而加快还田秸秆的分解速率^[15],但是大田环境存在较大变异性,容易影响腐秆菌的促腐效果。秸秆氨化还田,即通过氨化剂(一种碱性尿素混合溶液)促使秸秆表层的酯类化合物分解,从而加速还田秸秆腐解^[16]。两种促腐还田方式均能减少秸秆滞留,减少秸秆还田对农业生产带来的不利影响,然而,秸秆促腐还田结合不同氮肥类型对大田作物的生长和氮素利用影响的研究较少,需要进一步研究。

近年来,秸秆还田配施氮肥研究多集中于秸秆的还田量和还田深度与单一氮肥施用量互作对作物产量、土壤肥力和氮素吸收利用等方面,而对于不同秸秆促腐还田方式耦合氮肥类型的研究较少。因此,本研究开展不同秸秆促腐还田与不同氮肥类型组合的田间试验,探究两者交互作用对黄淮海地区鲜食玉米生长和氮素利用的影响机制,以期为该地区秸秆资源化利用和氮肥减量增效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究依托安徽省宿州市安徽农业大学皖北试验站(117°5'34" E, 33°41'14" N),于2022年开始长期定位试验。该试验站地处暖温带半湿润季风气候区,多年平均气温14.5℃,无霜期为202~209 d,年平均蒸发量为1 279~1 568 mm,年平均降水量为728~900 mm,降水主要集中在6—8月。供试土壤为砂姜黑土,播前0~20 cm土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为17.92 g·kg⁻¹、98.74 mg·kg⁻¹、20.71 mg·kg⁻¹、164.62 mg·kg⁻¹。2023年6—9月玉米生育季

气象资料由试验站内自动气象观测站提供(图1)。

1.2 试验设计

试验为主裂区设计,主区为秸秆还田方式,设置秸秆直接还田(DS)、秸秆氨化还田(AS)、添加腐解菌还田(FS);副区为氮肥类型,设置尿素(UF)、缓释肥(RF)、掺混肥(MF)(表1)。每个处理3次重复,每个小区面积为18 m²(4 m×4.5 m)。

试验中所用秸秆为前茬小麦秸秆,将秸秆均匀铺在小区内,用旋耕机将预处理秸秆一次性翻入土壤耕层内,秸秆还田量(4 000 kg·hm⁻²)是根据郭静等^[17]研究和当地生产实际确定。秸秆氨化处理:在播种前一周,将氨化剂[4%Ca(OH)₂和1.3%氮素混合溶液]均匀喷洒在秸秆表面并拌匀,氨化剂用量为秸秆干质量的30%,然后常温(25℃)下密封6~7 d备用^[18]。秸秆添加腐解菌处理:在播种当天,将腐解菌剂溶于蒸馏水中,然后均匀喷洒在秸秆表面并拌匀,腐解菌剂用量为秸秆干质量的1%^[19]。

施肥量根据相关研究^[20]和当地测土配方结果推荐施肥量,并综合考虑了政府、农业部门的施肥政策确定。试验所用氮肥分别为尿素(N≥46%)、缓释氮肥(硫包衣尿素,N≥43%)和掺混氮肥(尿素:缓释尿素=3:7)。氮肥、磷肥(P₂O₅≥16%)、钾肥(K₂O≥51%)均作为基肥,施用量分别为170、120、60 kg·hm⁻²,人工撒施并耙入土壤。鲜食玉米品种为粤甜31号,按株距30 cm、行距50 cm人工点播,播种时间分别为2022年6月13日和2023年6月16日,收获时间分别

为2022年9月7日和2023年9月10日。试验地周围设置2.0 m保护行,田间管理按当地农作习惯进行。经两年定位试验后,以2023年田间数据为例,探究不同秸秆促腐还田和氮肥类型互作对鲜食玉米生长和氮素利用的影响。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 叶绿素的测定

鲜食玉米拔节期、开花期和成熟期,每个小区随机选择3株长势一致的植株,剪取最上部展开叶(开花期和成熟期为穗位叶),使用96%乙醇浸提后,采用比色法^[21]测定叶绿素含量。

1.3.2 地上部干物质质量

于拔节期、开花期和成熟期在每个小区选取3株长势一致的玉米,按器官分离后放入干燥箱105℃杀青30 min,再在75℃下干燥至恒质量并测定质量,鲜食玉米地上部干物质总量为各器官干物质之和。

1.3.3 植株全氮含量

烘干的样品粉碎后,采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,通过连续流动分析仪(SKALAR San++型,荷兰Skalar公司)测定植株体各组织器官全氮含量,植株的全氮含量为各部分器官的全氮含量之和。氮素吸收和利用按下式计算:

$$PNU=N_c \times D_M \tag{1}$$

$$NUE=Y/PNU \tag{2}$$

$$PNP=Y/AU \tag{3}$$

$$NHI=NG/PNU \tag{4}$$

式中:PNU表示各器官氮素累积吸收量,kg·hm⁻²;N_c表示植株各器官含氮率,%;D_M表示植株各器官地上部干物质质量,kg·hm⁻²;NUE表示氮素利用效率,kg·kg⁻¹;Y表示实测产量,kg·hm⁻²;PNP表示氮肥偏生产力,kg·kg⁻¹;AN表示施氮量,kg·hm⁻²;NHI表示氮收获指数,%;N_c表示籽粒氮吸收量,kg·hm⁻²。

表1 田间试验设计

Table 1 Field experiment design

| 处理 Treatment | 尿素 UF | 缓释肥 RF | 掺混肥 MF |
|--------------|-------|--------|--------|
| 直接还田(DS) | DSUF | DSRF | DSMF |
| 氨化还田(AS) | ASUF | ASRF | ASMF |
| 添加腐解菌还田(FS) | FSUF | FSRF | FSMF |

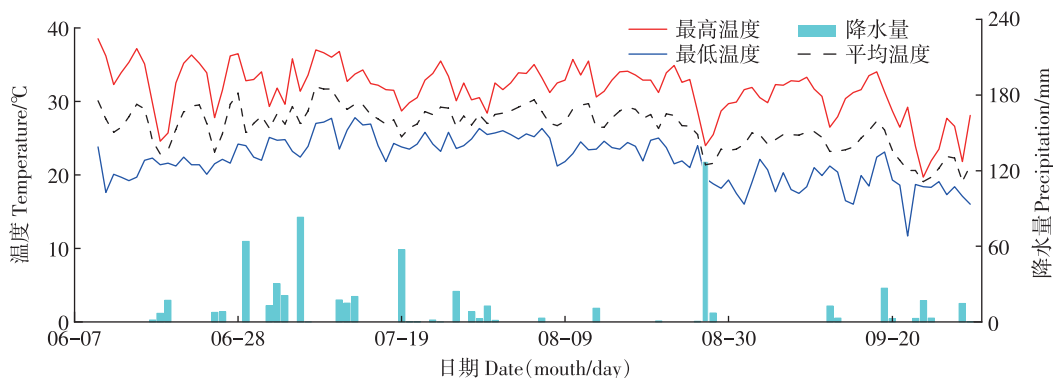


图1 2023年试验地鲜食玉米生育期气象条件

Figure 1 Meteorological conditions during the maize growing season of the experimental field in 2023

1.3.4 土壤硝态氮含量测定

于鲜食玉米成熟期,在各小区中间位置,采用土钻获取0~60 cm土层的土样(间隔10 cm),每个处理重复3次。土样风干后研磨过筛,采用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl溶液浸提土壤,再用连续流动分析仪(SKALAR San++型,荷兰Skalar公司)测定土壤硝态氮含量^[22]。0~60 cm土壤硝态氮累积量($M, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)计算公式如下:

$$M=c \times h \times \frac{\gamma}{10} \quad (5)$$

式中: c 为土壤 NO_3^- -N含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; h 为土层厚度,cm; γ 为土壤容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.4 数据处理与统计方法

数据采用Excel进行整理,SPSS 22.0进行统计分析,方差分析采用Duncan法($P < 0.05$),采用Origin 2019进行制图。表格中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 对玉米生长的影响

秸秆还田方式对鲜食玉米开花期的叶绿素含量具有极显著影响($P < 0.01$,图2),对成熟期的叶绿素含量有显著影响($P < 0.05$);而氮肥类型对鲜食玉米各生育期的叶绿素含量均有极显著影响($P < 0.01$);二者交互效应对开花期和成熟期的叶绿素含量有显著影响($P < 0.05$)。在相同秸秆还田条件下,与UF处理相比, MF、RF处理的叶绿素含量整体上提高了9.7%、2.2%,其中MF处理在开花期和成熟期平均分别提高了11.7%、14.2%,而RF处理仅在成熟期显著提高了叶绿素含量,增幅为18.7%,而在拔节期的叶绿素含量降低了14.4%。在相同氮肥型条件下,与DS处理相比,秸秆促腐还田处理(AS、FS)的叶绿素含量整体上提高了7.4%、7.4%,其中在开花期和成熟期的叶绿素含

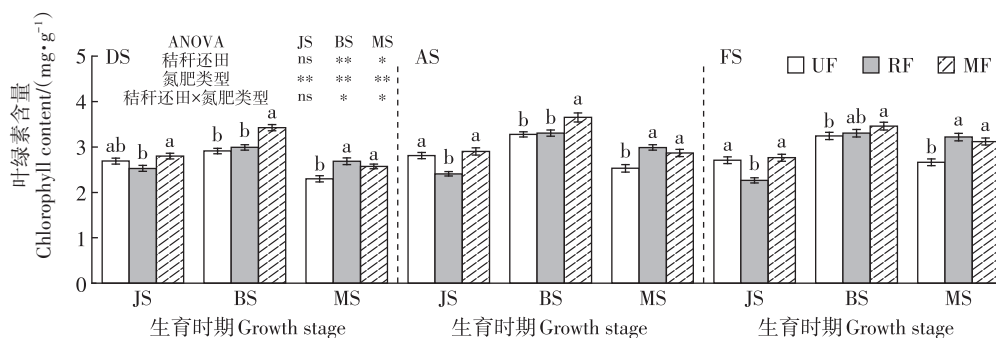
量分别提高了9.7%、7.3%(AS)和11.0%、19.1%(FS)。

秸秆还田方式对鲜食玉米开花期的干物质积累量具有极显著影响($P < 0.01$,图3),对成熟期的干物质积累量有显著影响($P < 0.05$);氮肥类型对鲜食玉米各生育时期的干物质积累量均有极显著影响($P < 0.01$);二者交互效应对开花期和成熟期的干物质积累量均有显著影响($P < 0.05$)。在相同秸秆还田条件下,与UF处理相比, MF、RF处理的干物质积累量整体上提高了14.0%、9.2%,其中MF处理在拔节期、开花期和成熟期分别提高了13.2%、5.8%和12.7%,而RF处理仅在开花期、成熟期提高了10.7%、11.1%。相同氮肥类型条件下,与DS处理相比,秸秆促腐还田处理(AS、FS)的干物质积累量整体上提高了9.8%、12.1%,其中在开花期和成熟期分别提高了12.7%、9.6%(AS)和15.9%、11.2%(FS)。

2.2 对鲜食玉米氮素吸收利用的影响

在相同秸秆还田条件下,与UF处理相比, RF和MF处理的植株氮素吸收量、籽粒氮素占比、产量分别增加了3.4%、13.2%、9.3%(RF)和5.8%、19.7%、14.6%(MF)(图4)。在相同氮肥类型条件下,与DS处理相比,秸秆促腐还田处理(AS、FS)的氮素吸收量、籽粒氮素占比、产量分别增加了3.6%、2.5%、4.7%(AS)和2.4%、3.9%、3.0%(FS)。

氮肥类型对鲜食玉米成熟期的NUE具有极显著影响($P < 0.01$,表2),对成熟期的PNP和NHI有显著影响($P < 0.05$);而秸秆还田方式对成熟期的NUE、PNP和NHI均无显著影响;两者交互效应对鲜食玉米成熟期的NUE、PNP和NHI均有显著影响($P < 0.05$)。相同秸秆还田条件下,与UF处理相比, RF处理的NUE、PNP和NHI分别提高了6.1%、9.2%和13.6%, MF处理的NUE、PNP和NHI分别提高了8.4%、14.6%



DS、AS、FS分别代表秸秆直接还田、秸秆氨化还田、添加腐秆菌还田;UF、RF、MF分别代表尿素、缓释氮肥、尿素掺混缓释氮肥;JS、BS、MS分别代表拔节期、开花期、成熟期;误差棒上不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),*、**和ns分别表示0.05、0.01显著水平和不显著。下同。

图2 秸秆促腐还田耦合氮肥类型条件下鲜食玉米的叶绿素含量

Figure 2 Chlorophyll content of fresh maize under the condition of straw decomposition returning coupling nitrogen fertilizer

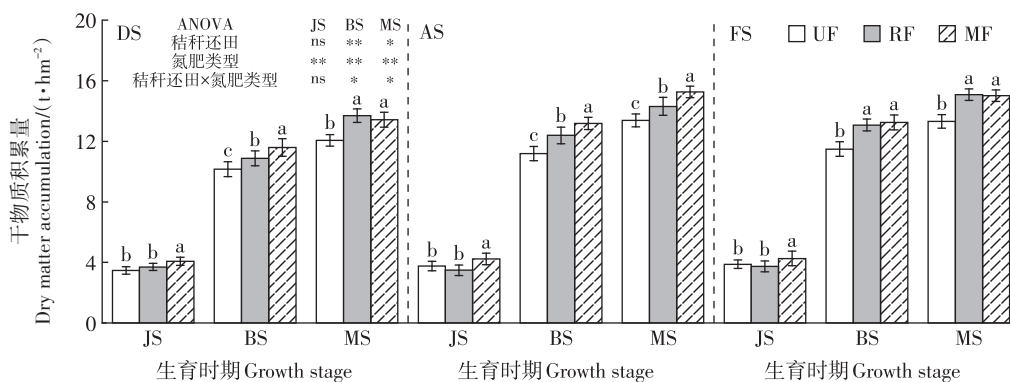


图3 秸秆促腐还田耦合氮肥类型条件下鲜食玉米的干物质积累量

Figure 3 Dry matter accumulation of fresh maize under the condition of straw-promoting decomposition returning coupling nitrogen fertilizer

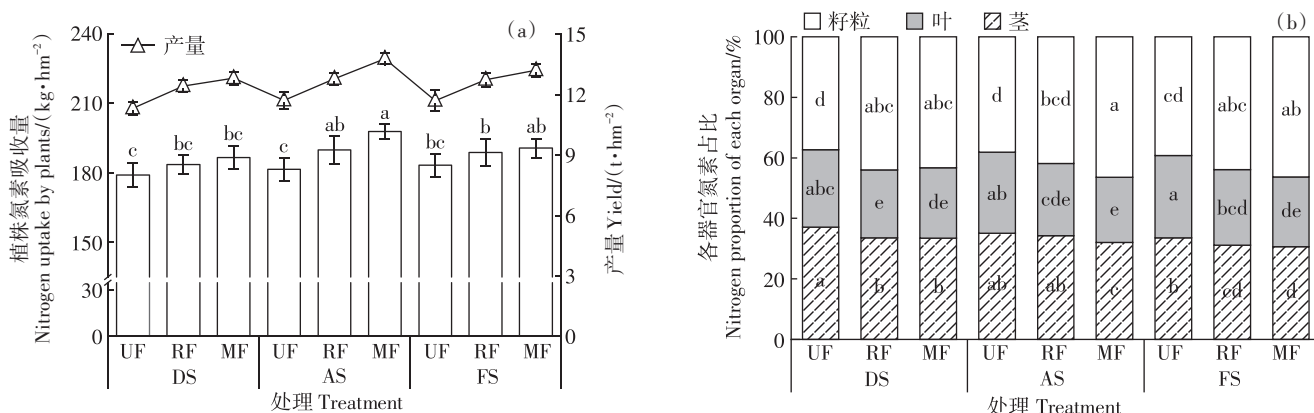


图4 秸秆促腐还田耦合氮肥类型条件下鲜食玉米成熟期的植株氮素吸收量和籽粒氮素占比

Figure 4 Plant nitrogen uptake and grain nitrogen proportion of fresh maize at maturity stage under the condition of straw decomposition returning coupling nitrogen fertilizer

和18.4%。

2.3 对鲜食玉米土壤硝态氮含量的影响

秸秆还田耦合氮肥类型对成熟期0~60 cm 土层的硝态氮含量具有显著影响($P<0.05$),各处理土层硝态氮含量均随着深度的增加呈现先减少后增加的趋势(图5)。相同秸秆还田条件下,与UF处理相比,RF、MF处理0~30 cm 土层的硝态氮含量分别增加了37.4%、21.1%,40~60 cm 的土壤硝态氮含量分别降低了26.2%、30.1%。相同氮肥类型条件下,与DS处理相比,秸秆促腐还田处理(AS、FS)均降低了0~60 cm 土层的硝态氮含量,分别降低了22.6%、18.6%。

3 讨论

3.1 秸秆促腐还田耦合氮肥类型对鲜食玉米生长的影响

干物质积累量是作物产量形成的基础,而叶绿素含量能直接影响光合效率,从而提高光合产物向籽粒中转运的速率,最终决定产量^[23]。合理的秸秆还田配

施氮肥措施可以优化叶绿素和干物质的积累,是调控作物生长和产量的重要措施。有研究表明,缓释肥和掺混肥均能提高叶绿素含量和地上部分干物质积累量,最终提高玉米产量,其中在玉米上施用70%缓释氮的掺混肥效果更佳^[24]。本研究中,与缓释肥处理相比,掺混肥处理显著提高了鲜食玉米生长前期的叶绿素含量和干物质积累量,说明掺混肥的氮素供应更吻合鲜食玉米各生育时期的生长需求。有研究表明,秸秆氮化还田和添加腐秆菌还田均能缩短秸秆腐解时间,从而增加其养分释放,较传统秸秆还田能有效促进夏玉米生长^[25]。本研究中,两种秸秆促腐还田方式都能促进鲜食玉米的生长,且秸秆促腐还田和两种新型氮肥互动可显著提高鲜食玉米生长中后期的叶绿素含量和干物质积累量。这可能是因为两种新型氮肥都具有缓释效应,生长前期能缓解微生物腐解与作物争氮的负效应^[26],中后期能与秸秆腐解后产生的有机物质共同改善土壤肥力状况,从而满足作物整个生育期的养分需求,促进鲜食玉米的生长。

表2 秸秆促腐还田耦合氮肥类型下鲜食玉米成熟期的氮素利用率

Table 2 Nitrogen utilization rate of fresh maize at maturity stage under straw decomposition returning coupling nitrogen fertilizer

| 处理 Treatment | 氮素利用效率 NUE/(kg·kg ⁻¹) | 氮肥偏生产力 PNP/(kg·kg ⁻¹) | 氮收获指数 NHI/% | |
|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------|-----------|
| DS | UF | 63.2±2.7c | 66.6±6.2c | 37.3±2.1c |
| | RF | 67.7±4.3b | 73.1±6.8b | 43.9±3.0b |
| | MF | 69.4±3.2a | 75.4±4.2ab | 43.7±4.4b |
| AS | UF | 64.9±3.5c | 68.9±4.2c | 38.3±3.2c |
| | RF | 68.8±4.2a | 75.2±4.0ab | 42.8±5.2b |
| | MF | 69.7±5.3a | 81.1±6.4a | 46.8±2.3a |
| FS | UF | 64.2±2.0c | 68.9±5.1c | 39.4±2.3c |
| | RF | 67.5±5.7b | 75.0±4.8ab | 43.9±2.9b |
| | MF | 69.3±4.6a | 77.7±6.2ab | 46.3±3.8a |

| 方差分析 ANOVA | | | |
|------------|----|----|----|
| 秸秆还田 | ns | ns | ns |
| 氮肥类型 | ** | * | * |
| 秸秆还田×氮肥类型 | * | * | * |

注:不同字母表示处理间差异显著(P<0.05),*、**和ns分别表示0.05、0.01显著水平和不显著。

3.2 秸秆促腐还田耦合氮肥类型对鲜食玉米养分吸收的影响

在作物生长过程中,氮素的供应直接影响作物的生长和产量,合理的秸秆还田配施氮肥措施是减少氮素流失的重要保障^[27]。有研究表明,缓释肥与掺混肥都能够提高作物的氮素吸收量和籽粒氮素占比,从而提高了氮肥利用率、氮肥偏生产力和氮收获指数,最终达到增产的目的^[28]。本研究中,与尿素和缓释肥相比,掺混肥维持了更高的植株吸氮量和氮素利用率,这可能是因为掺混肥中的部分尿素保证了作物生长前期的氮素供应,还通过部分缓释肥的氮素缓慢释放来保持作物生长后期不脱肥,进而提高氮素利用效率。Zou等^[29]研究发现,秸秆促腐还田能显著提高玉米/小麦轮作体系中的籽粒氮素吸收量,从而有效提高氮肥利用效率。本研究结果表明,相同氮肥类型条件下,秸秆还田方式对鲜食玉米的NUE、PNP和NHI无显著影响,这可能是因为供试土壤本身具有一定的肥力,可能会掩盖秸秆促腐还田的养分释放效果,从而导致各秸秆还田处理的腐解效果虽然有所差异,但差异不显著。而秸秆还田与氮肥类型交互对各指标影响显著,这可能是秸秆腐解过程中,得益于外源氮肥的添加,为微生物提供充足的养分,且在一定程度上提高了土壤微生物的活性与丰度^[30],促进秸秆的快速腐解,从而提高了土壤养分含量,增强作物对土壤

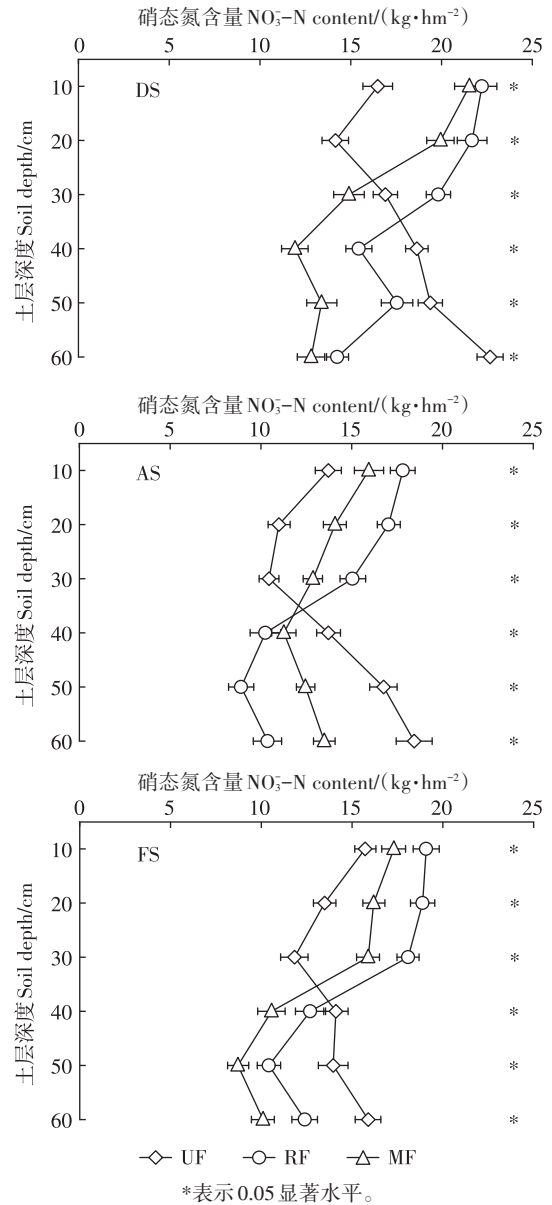


图5 秸秆促腐还田耦合氮肥类型条件下鲜食玉米成熟期0~60 cm土壤硝态氮的含量

Figure 5 Content of nitrate nitrogen in 0~60 cm soil at the maturity stage of fresh maize under the condition of straw-promoting decomposition coupling nitrogen fertilizer

氮素的吸收。

3.3 秸秆促腐还田耦合氮肥类型对土壤硝态氮的影响

土壤硝态氮易随水分移动的性质会导致硝态氮淋溶损失,施肥影响其在土壤剖面中的分布和迁移^[31]。有研究表明,缓释肥和掺混肥增加了土壤耕作层中的硝态氮含量并减少了深层土壤的硝态氮残留量^[32]。本研究中,缓释肥和掺混肥处理在0~30 cm土层的硝态氮含量明显高于尿素处理,而在40~60 cm土层的硝态氮残留量较尿素处理有所降低(图5),这

表明缓释肥和掺混肥均会形成土壤硝态氮上层富集、下层降低的分布格局,有利于提高耕作层氮素供应能力,也能在一定程度上减少硝态氮淋溶损失。有研究表明,秸秆促腐还田较直接还田会降低土壤硝态氮含量^[33],而胡诚等^[34]研究发现,与秸秆直接还田相比,秸秆促腐还田显著增加了土壤中的硝态氮含量。本研究中,在相同氮肥类型条件下,秸秆促腐还田较直接还田均显著降低了0~60 cm土层中的硝态氮含量,这可能因为秸秆促腐还田一方面提高了土壤微生物生物量和活性,增强了微生物对氮素的固定和转化^[35],另一方面促进了玉米生长,提高了玉米植株氮素吸收量。

4 结论

(1)秸秆促腐还田配施缓释肥与掺混肥均能显著提高鲜食玉米生长中后期的叶绿素含量和干物质积累量,维持较高的植株吸氮量和籽粒氮素占比,最终提高鲜食玉米氮素利用率和产量。

(2)秸秆促腐还田配施缓释肥与掺混肥均能将更多的硝态氮保存在耕层土壤中供作物吸收利用,且降低了氮素向深层土壤淋溶的环境风险。总体以秸秆氮化还田配施掺混肥的效果更优。

(3)综合分析结果表明,秸秆氮化还田配施掺混肥既可以实现秸秆资源化利用和氮肥减量增效的目标,同时又能降低氮肥成本、减少环境污染。

参考文献:

- [1] 刘夫国,牛丽影,李大婧,等.鲜食玉米加工利用研究进展[J].食品科学,2012,33(23):375-379. LIU F G, NIU L Y, LI D J, et al. Research progress in processing and utilization of fresh corn[J]. *Food Science*, 2012, 33(23):375-379.
- [2] 胡庆欣.种养结合模式下鲜食玉米经济效益分析及可视化平台研究[D].长春:吉林农业大学,2022. HU Q X. Economic benefits analysis and visualization platform research of fresh corn under the combination of planting and breeding[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022.
- [3] 刘绍熹,刘帅.中国三大平原玉米生产时空变迁及动因分析[J].世界农业,2023(1):89-98. LIU S X, LIU S. Analysis of space-time changes and motivations of corn production in China's three plains[J]. *World Agriculture*, 2023(1):89-98.
- [4] AMADUCCI S, COLAUZZI M, BATTINI F, et al. Effect of irrigation and nitrogen fertilization on the production of biogas from maize and Sorghum in a water limited environment[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 76:54-65.
- [5] 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. ZHOU B Y, WANG X B, WANG Z M, et al. Effect of slow-release fertilizer and tillage practice on grain yield and nitrogen

- efficiency of summer maize (*Z. mays* L.)[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(3):821-829.
- [6] 农业部.农业部关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》的通知[EB/OL].(2015-02-17)[2024-10-27].http://www.moa.gov.cn/ztzl/mywrfz/gzgh/201509/t20150914_4827907.htm. Ministry of Agriculture. Notice of the Ministry of Agriculture on issuing the *Zero Growth Action Plan for Fertilizer Use by 2020*[EB/OL].(2015-02-17)[2024-10-27].http://www.moa.gov.cn/ztzl/mywrfz/gzgh/201509/t20150914_4827907.htm.
- [7] 农业部.农业农村部关于印发《到2025年化肥减量化行动方案》的通知[EB/OL].(2015-04-20)[2024-10-27].http://www.moa.gov.cn/ovpublic/ZZYGLS/201505/t20150525_4614695.htm. Ministry of Agriculture. Notice of the Ministry of Agriculture on the issuance of the *Action Plan for Fertilizer Reduction by 2025*[J].(2015-04-20)[2024-10-27].http://www.moa.gov.cn/ovpublic/ZZYGLS/201505/t20150525_4614695.htm.
- [8] 陈明明,刘伟伟,梅春歌,等.钙镁型秸秆生物炭肥缓释性能及其对玉米生长的影响[J].农业工程学报,2023,39(16):62-70. CHEN M M, LIU W W, MEI C G, et al. Effects of Ca/Mg-enriched biochar fertilizer on slow-release performance and maize growth[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(16):62-70.
- [9] 孙旭东,孙沛,董树亭,等.包膜尿素施用时期对夏玉米产量和氮素积累特性的影响[J].中国农业科学,2017,50(11):2179-2188. SUN X D, SUN H, DONG S T, et al. Effect of coated-urea application times on yield and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11):2179-2188.
- [10] ZOU H T, BA C, HOU Z H, et al. How optimizing application of coated controlled-release urea affects crop yield in China[J]. *Agronomy Journal*, 2022, 114(2):991-999.
- [11] 朱兴娟,李桂花,涂书新,等.秸秆和秸秆炭对黑土肥力及氮素矿化过程的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(12):2785-2792. ZHU X J, LI G H, TU S X, et al. Effects of maize straw and straw biochar on soil fertility and the nitrogen mineralization process[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12):2785-2792.
- [12] 刘淑军,李冬初,黄晶,等.近30年来我国小麦和玉米秸秆资源时空变化特征及还田减肥潜力[J].中国农业科学,2023,56(16):3140-3155. LIU S J, LI D C, HUANG J, et al. Spatial-temporal variation characteristics of wheat and maize stalk resources and chemical fertilizer reduction potential of returning to farmland in recent 30 years in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(16):3140-3155.
- [13] GRZYB A, WOLNA-MARUWKA A, NIEWIADOMSKA A. The significance of microbial transformation of nitrogen compounds in the light of integrated crop management[J]. *Agronomy*, 2021, 11(7):1415.
- [14] 麦逸辰,卜容燕,韩上,等.添加不同外源氮对水稻秸秆腐解和养分释放的影响[J].农业工程学报,2021,37(22):210-219. MAI Y C, BU R Y, HAN S, et al. Effects of adding different exogenous nitrogen on rice straw decomposition and nutrient release[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22):210-219.
- [15] 马超,周静,刘满强,等.秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳

- 的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5):915-921. MA C, ZHOU J, LIU M Q, et al. Effects of incorporation of pre-treated straws into field on soil nutrients and labile organic carbon in Shajiang black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5):915-921.
- [16] LI J C, LI Y, LIN N P, et al. Ammoniated straw returning: a win-win strategy for increasing crop production and soil carbon sequestration [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 363:108879.
- [17] 郭静, 周可金, 刘芳, 等. 小麦秸秆还田量和还田方式对砂姜黑土地玉米生长发育的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(4):521-527. GUO J, ZHOU K J, LIU F, et al. Effects of returning amount and manner of wheat straw on maize growth in lime concretion black soil field[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(4):521-527.
- [18] 余坤, 冯浩, 王增丽, 等. 氮化秸秆还田改善土壤结构增加冬小麦产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15):165-173. YU K, FENG H, WANG Z L, et al. Ammoniated straw improving soil structure and winter wheat yield[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering*, 2014, 30(15):165-173.
- [19] 马超, 周静, 郑学博, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分和小麦产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1):30-41. MA C, ZHOU J, ZHENG X B, et al. Effects of returning rice straw into field on soil nutrients and wheat yields under promoting decay condition[J]. *Soils*, 2012, 44(1):30-41.
- [20] 张悦, 岳善超, 李婷, 等. 栽培模式、施氮量对旱作春玉米农田矿质氮和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1):99-107. ZHANG Y, YUE S C, LI T, et al. Effects of cultivation patterns and nitrogen fertilization on mineral nitrogen and yield of dryland spring maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(1):99-107.
- [21] 王爱玉, 张春庆, 吴承来, 等. 玉米叶绿素含量快速测定方法研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(2):97-100. WANG A Y, ZHANG C Q, WU C L, et al. Study on a fast method of testing chlorophyll content in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(2):97-100.
- [22] 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. LU R K. Methods of soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [23] 王金强, 李思平, 刘庆, 等. 喷施生长调节剂缓解甘薯干旱胁迫的机理[J]. 中国农业科学, 2020, 53(3):500-512. WANG J Q, LI S P, LIU Q, et al. Mechanism of spraying growth regulators to alleviate drought stress of sweet potato[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 53(3):500-512.
- [24] GUO J J, FAN J L, ZHANG F C, et al. Blending urea and slow-release nitrogen fertilizer increases dryland maize yield and nitrogen use efficiency while mitigating ammonia volatilization[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 790:148058.
- [25] 肖金宝, 白延倩, 杨宝平, 等. 秸秆腐解与养分释放特征对腐熟剂用量的响应[J]. 中国土壤与肥料, 2023(9):181-191. XIAO J B, BAI Y Q, YANG B P, et al. Response of straw decomposition and nutrient release characteristics to the amount of decomposition agent [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(9):181-191.
- [26] 侯贤清, 李荣, 吴鹏年, 等. 秸秆还田配施氮肥对土壤碳氮含量与玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9):238-246. HOU X Q, LI R, WU P N, et al. Effects of straw returning with nitrogen application on soil carbon, nitrogen content and maize growth[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9):238-246.
- [27] 段然, 汤月丰, 王亚男, 等. 不同施肥方法对双季稻区水稻产量及氮素流失的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12):1815-1822. DUAN R, TANG Y F, WANG Y N, et al. Effects of different fertilization modes on rice yield and nitrogen loss in paddy soils under double cropping rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(12):1815-1822.
- [28] 胡迎春, 韩云良, 施成晓, 等. 氮肥减量下缓释肥和尿素配施对黄土高原春玉米氮素利用和产量效益的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(7):1068-1078. HU Y C, HAN Y L, SHI C X, et al. Improving nitrogen use efficiencies, yields and profits for spring maize by using mixtures of slow-release fertilizer and normal urea in Loess Plateau[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(7):1068-1078.
- [29] ZOU Y F, FENG H, WU S F, et al. An ammoniated straw incorporation increased biomass production and water use efficiency in an annual wheat-maize rotation system in semi-arid China[J]. *Agronomy*, 2020, 10(2):243.
- [30] 邵文奇, 董青君, 李传哲, 等. 秸秆还田配施不同外源物对黄河故道地区土壤养分及作物产量的影响[J]. 西南农业学报, 2024, 37(8):1715-1721. SHAO W Q, DONG Q J, LI C Z, et al. Effect of straw returning combined with different exogenous substances on soil nutrients and crop yield in the old Yellow River course region[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 37(8):1715-1721.
- [31] 王大鹏, 郑亮, 吴小平, 等. 旱地土壤硝态氮的产生、淋洗迁移及调控措施[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12):1731-1741. WANG D P, ZHENG L, WU X P, et al. Review of soil nitrate formation, leaching transport and their control measures in upland farming systems[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(12):1731-1741.
- [32] GARCIA P L, GONZÁLEZ-VILLALBA H A, SERMARINI R A, et al. Nitrogen use efficiency and nutrient partitioning in maize as affected by blends of controlled-release and conventional urea[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018, 64:1944-1962.
- [33] 宋建宇, 张书红, 周群生, 等. 秸秆还田配施腐熟剂对小麦生长发育及土壤理化性状的影响[J]. 肥料与健康, 2024, 51(1):18-22. SONG J Y, ZHANG S H, ZHOU Q S, et al. The effect of straw returning to field and applying decomposing agents on wheat growth and soil physicochemical properties[J]. *Fertilizer & Health*, 2024, 51(1):18-22.
- [34] 胡诚, 陈云峰, 乔艳, 等. 秸秆还田配施腐熟剂对低产黄泥田的改良作用[J]. 植物营养与肥科学报, 2016, 22(1):59-66. HU C, CHEN Y F, QIAO Y, et al. Effect of returning straw added with straw-decomposing inoculants on soil melioration in low-yielding yellow clayey soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(1):59-66.
- [35] 李文红, 曹丹, 张朝显, 等. 作物秸秆配施腐熟剂还田对小麦产量及其物质生产的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(22):63-66. LI W H, CAO D, ZHANG C X, et al. Influences of crop straw combined with decomposing agent on yield and material production of wheat[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(22):63-66.