

网络出版时间:2026-05-09

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260508.1307.002

不同新型尿素对冬小麦产量、品质、 光温生理及氮素吸收利用特性的影响

王明花,李梦,曾冲,王鸣腾,蔡迦铭,张顺涛,李岚涛,王宜伦

(河南农业大学资源与环境学院/小麦玉米两熟高效生产全国重点实验室,河南郑州 450046)

摘要:为新型尿素推广应用提供理论依据和技术支持,2024—2025年于河南省许昌市通过田间试验,在施氮量相同($210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)条件下设置普通尿素(T1)、腐植酸尿素(T2)、控失尿素(T3)、稳定性尿素(T4)和包膜尿素(T5)5种尿素处理,以不施氮为对照(CK),分析了不同新型尿素对冬小麦籽粒产量、品质及植株冠层温度、叶绿素、酶活性、氮素吸收利用和土壤有效氮空间分布的影响。结果表明,施用新型尿素可显著提升冬小麦产量和品质,其中以T3处理效果最优,其籽粒产量、淀粉含量、可溶性糖含量和蛋白质含量较T1处理分别提高2.90%、29.64%、34.38%和18.45%。与CK和T1处理相比,T2~T5处理均可增加小麦叶绿素含量、谷氨酸合成酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸脱氢酶和硝酸还原酶活性,并降低冠层温度,以T3处理效果最佳。T3处理的氮肥表观利用率、氮肥农学效率、氮肥偏生产力较T1处理分别提高27.01%、2.88%和14.42%。此外,T3处理可有效提高0~100 cm土壤无机氮含量,增强冬小麦氮土壤养分供应能力和吸收积累效率。本试验条件下,控失尿素的施用效果最佳。

关键词:冬小麦;新型尿素;产量;光温生理特征;氮素吸收利用

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)06-0785-12

Effects of Different New Types of Urea on Winter Wheat Yield, Quality, Photothermal Physiology, and Nitrogen Absorption and Utilization Characteristics

WANG Minghua, LI Meng, ZENG Chong, WANG Mingteng, CAI Jiaming,

ZHANG Shuntao, LI Lantao, WANG Yilun

(College of Resources and Environment, Henan Agricultural University/State Key Laboratory of High-Efficiency Production of Wheat-Maize Double Cropping, Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: To provide theoretical basis and technical support for the promotion and application of new types of urea fertilizer, field experiments were conducted in Xuchang City, Henan Province from 2024 to 2025. Under the same nitrogen application rate ($210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), five urea treatments were set up: ordinary urea (T1), humic acid urea (T2), controlled release urea (T3), stable urea (T4), and coated urea (T5). The effects of different new urea applications on winter wheat grain yield, quality, plant canopy temperature, chlorophyll, enzyme activity, nitrogen absorption and utilization, and soil available nitrogen spatial distribution were analyzed with no nitrogen application as the control (CK). The results showed that the application of the new urea types significantly improved the yield and quality of winter wheat, with T3 treatment showing the best effect. The grain yield, starch content, soluble sugar content, and protein content under T3 treatment significant increased by 2.90%, 29.64%,

收稿日期:2025-12-08

修回日期:2026-01-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1901001-08);河南省高校科技创新人才支持计划项目(26HASTIT019);河南省本科高校青年骨干教师培养计划项目(2024GGJS027)

第一作者 E-mail:wangminghua1029@163.com(王明花)

通讯作者 E-mail:lilantao@henau.edu.cn(李岚涛); wangyilunrl@163.com(王宜伦)

34.38% and 18.45%, respectively, compared to T1 treatment. The chlorophyll content and activities of glutamate synthase, glutamine synthase, glutamate dehydrogenase, and nitrate reductase in wheat increased under T2—T5 treatment, but the average canopy temperature decreased, and T3 treatment showed better results. Compared with the T1 treatment, the apparent recovery efficiency of nitrogen, agronomic efficiency of nitrogen, and partial factor productivity of applied nitrogen under the T3 treatment increased by 27.01%, 2.88%, and 14.42%, respectively. In addition, T3 treatment effectively increased the available nitrogen content in the 0—100 cm soil, enhancing the soil inorganic nitrogen and absorption accumulation efficiency of winter wheat soil. The application effect of controlled release urea was the best in this experiment.

Keywords: Winter wheat; New types of urea; Yield; Photothermal physiological characteristics; Nitrogen absorption and utilization

小麦是中国三大主粮作物之一,也是全球农业生产的关键作物。2023年,中国小麦播种面积达 $2.36 \times 10^7 \text{ hm}^2$,总产量13 659万t,在中国粮食作物种植面积和产量中的占比均约为20%,居世界首位^[1]。除保障国家粮食安全外,小麦还为食品加工、饲料和相关工业提供重要原料^[2],支撑农业经济发展。氮素作为“生命元素”,对小麦光合作用、干物质积累、器官发育等至关重要^[3-5]。然而,中国作物氮肥利用效率仅约30%,远低于发达国家(50%~60%)^[6],且单位面积施氮量为全球平均值的4倍^[7]。过量施氮易导致硝态氮淋溶,引发地下水污染等生态问题^[8]。因此,提高氮肥利用效率、减少氮素污染已成为现代农业亟待解决的核心任务。

新型尿素是在传统尿素基础上通过添加特定功能性成分提升氮肥利用效率和延长养分释放周期,以满足绿色农业对高效施肥需求的改良型氮肥^[9]。新型尿素主要包括控失尿素、包膜尿素、稳定性尿素、腐植酸尿素等类型。控失尿素通过在造粒过程中采用高分子网捕技术,达到减少氮素损失、延缓养分释放的效果^[10]。研究表明,施用控失尿素不仅能显著提高冬小麦产量和氮素利用率,还能有效降低土壤硝态氮含量^[11]。包膜尿素通过树脂包膜材料调控缓慢释放氮素,持续供给作物养分,从而提高作物光合生产能力和干物质积累^[12]。Ma等^[13]试验表明,包膜尿素有利于控制小麦拔节初期氮素释放量,并使更多氮素在生育后期释放,更有利于籽粒增重和产量提升。稳定性尿素通过加入硝化抑制剂或脲酶抑制剂来延缓氮肥转化过程,提高氮肥利用效率,降低氮肥施用的环境风险^[14]。郭松等^[15]研究指出,施用稳定性尿素能促进冬小麦生长发育,显著提高产量

和土壤养分含量。腐植酸尿素则通过在尿素中添加少量腐植酸,改善土壤结构,缓释氮素,促进作物生长,并减少氮素淋溶损失^[16]。胡家钰等^[17]研究认为,腐植酸尿素能有效促进冬小麦叶片氮素向籽粒转运,提高产量。

目前,已有大量关于单一新型尿素对作物产量及生长发育影响的研究,但针对不同新型尿素对特定区域冬小麦植株生长发育及氮素迁移转化、吸收利用影响等方面的分析较为稀缺,有关不同新型尿素对小麦产量、品质、光温生理特性、氮素吸收利用等方面综合效应的探讨也相对不足。基于此,本研究以黏壤质潮土区冬小麦为对象,系统评估腐植酸尿素、包膜尿素、稳定性尿素和控失尿素等不同新型尿素对冬小麦产量、品质、氮素吸收利用以及光合光温生理特征的综合效应,以期新型尿素推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2024年10月至2025年5月于河南省许昌市(34°08'N, 113°48'E)开展小麦玉米轮作多年种植田间试验。该地区属暖温带大陆性季风气候,年平均气温16.4℃,年均降水量649.8mm,年均日照时数2 065.6h。试验期该地气温及降水量变化见图1。供试土壤为黏壤质潮土,0~20cm土壤pH值为7.56,全氮含量 $0.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量 $21.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量 $15.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $110.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,铵态氮含量 $10.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,硝态氮含量 $15.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验共设6个处理,分别为不施氮肥(CK)、普通尿素(N含量46.4%,T1)、腐植酸尿素(尿素

中添加 0.22% 的腐植酸, N 含量 46%, T2)、控失尿素(尿素生产采用高分子网捕技术, 施入土壤吸水后可吸附氮素减少损失, N 含量 45%, T3)、稳定性尿素(尿素中添加脲酶抑制剂, 氨挥发抑制率 $\geq 50\%$, N 含量 46%, T4)和包膜尿素(尿素生产采用生物基聚氨酯膜材缓控释材料, N 含量 45%, T5)。除 CK 外, 其余处理均施氮 $210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 各处理中磷(P_2O_5)、钾(K_2O)施用量一致,

分别为 210 、 90 和 $75.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。磷、钾肥分别为过磷酸钙(P_2O_5 含量 12%)和氯化钾(K_2O 含量 60%), 所有肥料均于小麦播种时一次性施入。供试小麦品种为豫农 916。播量为 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 小区面积 30 m^2 ($5\text{ m}\times 6\text{ m}$), 3 次重复, 随机区组排列。小麦于 2024 年 10 月 20 日播种, 2025 年 5 月 28 日收获, 田间管理与当地常规生产一致。

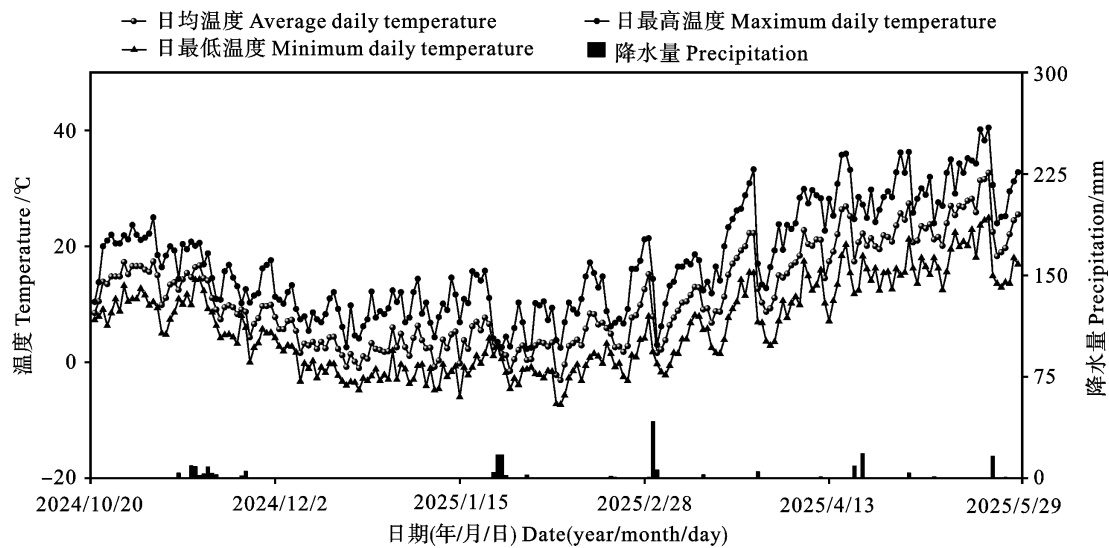


图 1 2024—2025 年生育期试验地气温与降水量

Fig. 1 Temperature and precipitation at the test site during the growing season of 2024—2025

1.3 指标测定及方法

1.3.1 产量与品质测定

成熟期于各小区测产区选取连续 5 m^2 样方测定产量。小麦收获后, 将籽粒置于烘箱中 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 1 h , $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干后称重, 采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 消煮, 凯氏定氮法测定全氮含量, 籽粒蛋白质含量 = 全氮含量 $\times 5.7$ 。采用蒽酮比色法测定籽粒可溶性糖和淀粉含量^[18]。

1.3.2 土壤养分含量测定

冬小麦播种前采集 $0\sim 20\text{ cm}$ 基础土壤样品。采用土水比 $1:2.5$ 电极法测定土壤 pH 值; 采用重铬酸钾容量-外加热法测定有机质含量, 采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量; 采用 NaHCO_3 浸提-钼蓝比色法测定土壤有效磷含量; 采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度计法测定速效钾含量。分别于苗期、拔节期、灌浆期和成熟期, 采集 $0\sim 100\text{ cm}$ 土层样品, 每 20 cm 分为 1 个土层, 用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法测定铵态氮含量; 用 KCl 浸提-双波长比色法测定硝态氮含量; 用凯氏定氮法测定土壤全氮含量。

1.3.3 植株样品采集与测定

分别于冬小麦苗期、拔节期、灌浆期和成熟期, 各小区采集 1 m 双行地上部植株样品, 经杀青、烘干后称重。采用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 消煮, 凯氏定氮法测定植株全氮含量。于上述各生育期 $11:00\text{--}13:00$ 间采用红外热成像仪 (TiX650, Fluke, USA) 测量冬小麦冠层温度。测量时, 相机镜头距离冠层高度约 1.0 m 、俯角 60° 拍摄。每小区拍摄 2 张照片, 采用仪器自带 SmartView 软件对冬小麦冠层温度进行分析。

分别于苗期、拔节期和灌浆期, 在各小区选取 3 株有代表性植株。苗期取最新完全展开叶, 拔节期和灌浆期取旗叶去除叶尖、叶基和主脉后, 剪碎, 称取 0.1 g 叶片放入装有 50 mL 95% 乙醇棕色容量瓶中, 避光静置 48 h 后用紫外分光光度计测定 665 nm 、 649 nm 和 479 nm 波长下吸光度值, 计算叶绿素含量。于上述时期各小区选取 3 株长势均匀、具有代表性冬小麦植株, 采集功能性叶片, 去除叶脉, 锡箔纸包好放进液氮速冻, 采用试剂盒测定谷氨酸合成酶 (GOGAT)、谷氨酰胺

合成酶(GS)、谷氨酸脱氢酶(GDH)、硝酸还原酶(NR)活性。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 冬小麦养分吸收利用指标计算

地上部氮素积累量=籽粒干重×籽粒氮含量+秸秆干重×秸秆氮含量；

氮肥表现利用率(NUE)=(施氮区地上部氮素积累量-CK 区地上部氮素积累量)/施氮量×100%；

氮肥农学效率(NAE)=(施氮区产量-CK 区产量)/施氮量；

氮肥偏生产力(NPFP)=施氮区产量/施氮量。

1.4.2 Logistic 模型拟合及参数计算

冬小麦养分积累过程呈“S”型曲线变化,符合 Logistic 模型。本研究采用 Logistic 方程对不同处理冬小麦氮素积累和干物质积累过程进行拟合,计算相应参数进行积累动态分析: $y = K/[1 + e^{(a-bx)}]$ 。式中, K 、 a 、 b 为常数, y 为 x 天后冬小麦氮素积累量, x 为播种后天数。

对 Logistic 方程进行求导,获得表示氮素和干物质快速积累开始日期(t_1 ,单位为 d)、快速积累结束日期(t_2 ,单位为 d)、快速积累的持续时间(Δt ,单位为 d)、最大积累速率的日期($T_{\max}$,单位为 d)、最大积累速率($V_{\max}$,单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、平均积累速率(V_{mean} ,单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$): $t_1 = (\ln a - 1.317)/b$; $t_2 = (\ln a + 1.317)/b$; $\Delta t = t_2 - t_1$; $T_{\max} = \ln a/b$; $V_{\max} = Kb/4$; $V_{\text{mean}} = Kb/6$ 。

1.4.3 数据处理

数据处理采用 Microsoft Excel 2021 软件进

行,冠层温度图提取分析采用 Fluke SmartView 软件进行,用 SPSS Statistics 22.0 进行方差分析和显著性检验(LSD 法),用 DPS 7.05 拟合 Logistic 方程,用 Origin 2024 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 施用新型尿素对冬小麦产量和产量构成因素的影响

不同新型尿素处理对冬小麦产量及其构成因素均有显著影响(表 1)。T2~T5 处理的冬小麦产量较 CK 均显著增加,增幅 25.93%~28.53%;较 T1 处理增加 0.82%~2.90%,T3~T5 处理与 T1 处理间差异均显著,其中 T3 处理的产量最高,较 T1 处理提高 2.90%。与 CK 相比,T2~T5 处理的冬小麦穗粒数、穗数、千粒重分别增加 3.65%~10.64%、4.15%~13.54%和 5.88%~12.17%,其中 T3 处理效果最佳。T3 处理的穗粒数、穗数、千粒重较 T1 处理分别提高 7.69%、9.47%和 6.79%,且差异均显著。由此可见,新型尿素施用能够有效增加冬小麦穗粒数、穗数和千粒重,从而实现冬小麦增产,其中控失尿素的增产效果最好。

2.2 施用新型尿素对冬小麦籽粒品质的影响

不同新型尿素处理的冬小麦籽粒淀粉、可溶性糖和蛋白质含量相对于不施肥和普通尿素处理均不同程度提高,且均以 T3 处理最高,其中淀粉含量较 CK 和 T1 处理分别显著提高 34.96%和 29.64%,可溶性糖含量分别显著提高 40.79%和 34.38%,蛋白质含量分别显著提高 28.70%和 18.45%(图 2)。这说明,施用新型尿素对冬小麦籽粒品质有一定的改善作用,且以控失尿素效果最佳。

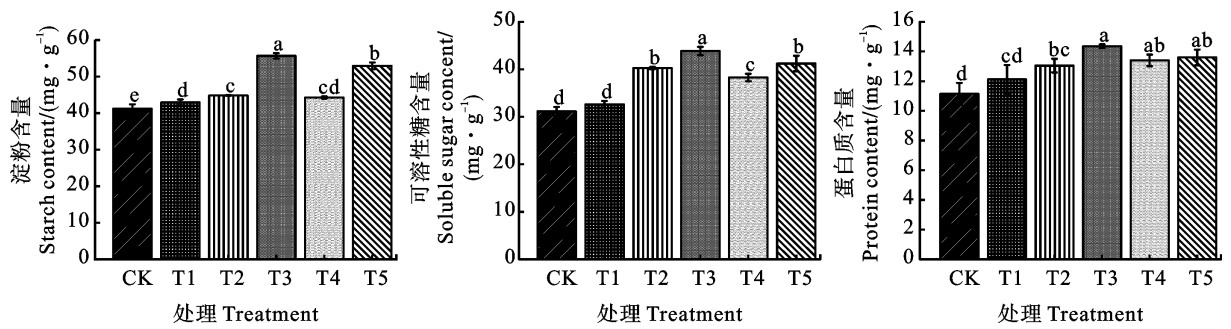
表 1 不同处理下冬小麦产量及其构成因素

Table 1 Winter wheat yield and its components under different treatments

处理 Treatment	产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	穗数 Spike number/($\times 10^6 \cdot \text{hm}^{-2}$)	千粒重 1 000-grain weight/g
CK	6 428.2±8.12d	32.9±0.61d	4.58±0.08b	41.65±0.53d
T1	8 029.8±7.32c	33.8±0.92cd	4.75±0.10b	43.75±0.23c
T2	8 095.3±3.33bc	34.1±0.64c	4.77±0.17b	44.10±0.20c
T3	8 262.2±5.66a	36.4±0.40a	5.20±0.15a	46.72±0.94a
T4	8 130.9±3.31b	34.4±0.69bc	5.00±0.03a	44.37±0.39c
T5	8 160.9±4.90b	35.3±0.31ab	5.13±0.10a	45.38±0.40b

同列数值后不同小写字母表示处理间差异达到 0.05 显著水平。下表同

Different lowercase letters after the values in the same columns indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in tables 2-5.



图柱上不同小写字母表示处理间差异达到 0.05 显著水平。图 4 同
Different lowercase letters above the columns indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in figure 4.

图 2 不同处理对冬小麦籽粒品质的影响
Fig.2 Effects of different treatments on grain quality of winter wheat

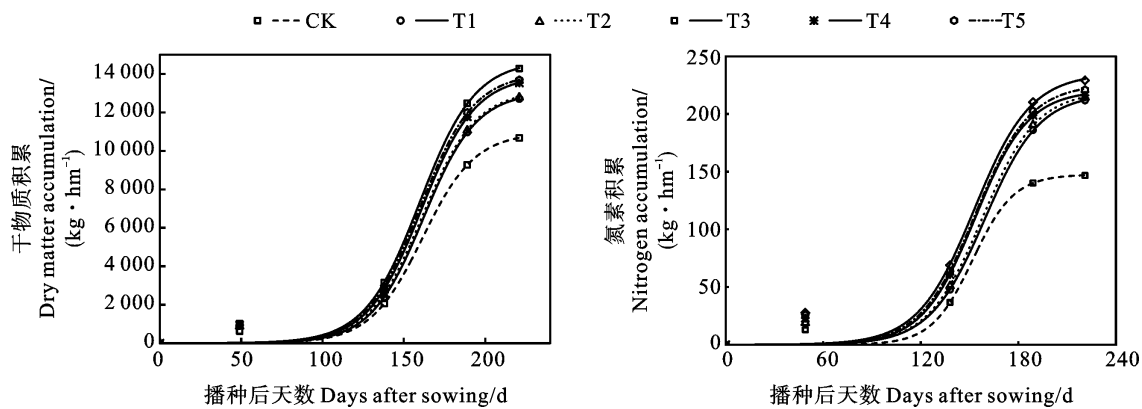


图 3 不同处理对冬小麦干物质及氮素积累动态的影响
Fig.3 Dynamic effects of different treatments on dry matter and nitrogen accumulation in winter wheat

2.3 施用新型尿素对冬小麦干物质及氮素积累动态的影响

不同新型尿素处理冬小麦干物质及氮素积累量均随生育期推进呈“S”型曲线变化,即表现为缓慢升高—快速积累—趋于平缓(图 3)。通过 Logistic 模型进行拟合,方程的决定系数(R^2)均在 0.98 以上(表 2)。相较于 T1 处理, T2~T5 处理均提高了冬小麦干物质及氮素积累量的最大值(K),增加量分别为 79.86~1 640.55 和 2.1~18.48 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中 T3 处理的效果均最佳,其 K 值分别为 14 698.03 和 235.96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较 T1 处理分别提高 12.56%和 8.50%。与 T1 处理相比, T2~T5 处理下冬小麦干物质及氮素的 Δt 分别延长了 0.6~2.0 d 和 0.5~2.3 d,其中 T3 处理的 Δt 最大,分别达到了 44.8 和 45.9 d; T2~T5 处理冬小麦干物质及氮素积累量 $T_{\max}$ 分别提

前了 0.61~2.26 d 和 1.43~6.36 d, T3 处理出现最早; T2~T5 处理的冬小麦干物质及氮素积累的 $V_{\max}$ 分别增加 0.9%~7.57%、2.18%~5.61%,其中 T3 下最大。综合分析, T3 处理下冬小麦干物质及氮素积累的动态指标均最佳。

2.4 施用新型尿素对冬小麦冠层温度的影响

不同新型尿素处理对冬小麦冠层温度影响显著(表 3)。与 CK 相比, T1~T5 处理下冬小麦冠层最高温、最低温和平均温度均有所下降,其中 T1 处理的苗期、拔节期和灌浆期冠层平均温度分别下降 0.76、0.27 和 0.07 $^{\circ}\text{C}$ 。 T2~T5 处理各生育时期的冠层温度均低于 T1 处理,其中 T3 处理最低。 T3 处理的苗期、拔节期和灌浆期冠层最高温度较 T1 处理分别下降 9.81%、1.73%和 7.08%,最低温度分别下降 20.03%、3.27%和 8.01%,平均温度分别下降 13.95%、2.47%和 7.52%。

表 2 不同处理对冬小麦干物质及氮素积累动态的影响

Table 2 Dynamic effects of different treatments on dry matter and nitrogen accumulation in winter wheat										
指标 Indicator	处理 Treatment	回归方程 Regression equation	$K/$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$V_{\max}/$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	$V_{\text{mean}}/$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	t_1/d	t_2/d	$\Delta t/\text{d}$	$T_{\max}/\text{d}$	R^2
干物质积累 Dry matter accumulation	CK	$Y=10\,944.684\,8/(1+e^{10.013\,5-0.062\,012x})$	10 944.68	169.68	113.12	140.2	182.7	42.5	161.48	0.996
	T1	$Y=13\,057.483\,5/(1+e^{9.974\,4-0.061\,512x})$	13 057.48	200.80	133.87	140.7	183.6	42.8	162.15	0.994
	T2	$Y=13\,137.336\,0/(1+e^{9.803\,9-0.060\,686x})$	13 137.34	202.60	132.88	139.8	183.2	43.4	161.54	0.995
	T3	$Y=14\,698.034\,8/(1+e^{9.398\,9-0.058\,785x})$	14 698.03	216.01	144.00	137.5	182.3	44.8	159.89	0.994
	T4	$Y=13\,912.228\,5/(1+e^{9.641\,8-0.059\,957x})$	13 912.23	208.53	139.02	138.8	182.8	43.9	160.81	0.995
	T5	$Y=14\,048.418\,8/(1+e^{9.624\,2-0.060\,189x})$	14 048.42	211.39	140.93	138.0	181.8	43.8	159.90	0.995
氮素积累 Nitrogen accumulation	CK	$Y=147.513\,8/(1+e^{12.020\,9-0.079\,108x})$	147.51	2.92	1.94	135.3	168.6	33.3	151.96	0.992
	T1	$Y=217.478\,1/(1+e^{9.415\,6-0.059\,106x})$	217.48	3.21	2.14	137.0	180.6	43.6	159.30	0.991
	T2	$Y=219.583\,5/(1+e^{9.420\,9-0.059\,676x})$	219.58	3.28	2.18	135.8	179.9	44.1	157.87	0.991
	T3	$Y=235.959\,7/(1+e^{8.783\,6-0.057\,432x})$	235.96	3.39	2.26	130.0	175.9	45.9	152.94	0.983
	T4	$Y=220.457\,9/(1+e^{9.406\,5-0.061\,268x})$	220.46	3.38	2.25	132.0	176.0	44.0	153.53	0.987
	T5	$Y=225.880\,7/(1+e^{9.095\,5-0.059\,265x})$	225.88	3.35	2.23	131.2	175.7	44.4	153.47	0.985

表 3 不同处理对冬小麦冠层温度的影响

Table 3 Effects of different treatments on canopy temperature of winter wheat										℃
处理 Treatment	苗期 Seedling stage			拔节期 Jointing stage			灌浆期 Filling stage			
	最低温度 Minimum temperature	最高温度 Maximum temperature	平均温度 Average temperature	最低温度 Minimum temperature	最高温度 Maximum temperature	平均温度 Average temperature	最低温度 Minimum temperature	最高温度 Maximum temperature	平均温度 Average temperature	
CK	8.64±0.60a	12.24±0.71a	10.44±0.41a	21.50±0.36a	23.53±0.21a	22.52±0.08a	22.90±0.89a	25.90±0.89a	24.40±0.89a	
T1	7.74±0.33b	11.62±0.37ab	9.68±0.35b	21.40±0.26ab	23.10±0.26ab	22.25±0.26ab	22.83±0.50a	25.83±2.25a	24.33±1.29a	
T2	6.62±0.16c	10.88±0.07bc	8.75±0.05c	21.20±0.44ab	23.03±0.46ab	22.12±0.38ab	22.30±0.60ab	25.30±0.60a	23.80±0.60ab	
T3	6.19±0.17c	10.48±0.17c	8.33±0.13c	20.70±0.56b	22.70±0.56b	21.70±0.56b	21.00±0.70b	24.00±0.70a	22.50±0.70b	
T4	6.43±0.06c	10.96±0.74bc	8.69±0.34c	20.87±0.12ab	22.93±0.49ab	21.90±0.30ab	21.80±0.78ab	24.80±0.98a	23.35±0.69ab	
T5	6.36±0.24c	10.62±0.70c	8.49±0.28c	20.80±0.26ab	22.87±0.12ab	21.83±0.19b	21.90±0.98ab	24.90±0.78a	23.39±0.69ab	

2.5 施用新型尿素对冬小麦叶片叶绿素含量的影响

新型尿素施用显著影响冬小麦叶片叶绿素含量(表 4)。与 CK 相比,T1~T5 处理下叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量均有所增加,其中 T1 处理的苗期、拔节期和灌浆期叶绿素 a 含量分别增加 0.23、0.14 和 0.09 mg·g⁻¹,叶绿素 b 含量分别增加 0.09、0.06 和 0.01 mg·g⁻¹,类胡萝卜

素含量分别增加 0.01、0.01 和 0.01 mg·g⁻¹。T2~T5 处理的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量均高于 T1 处理,其中 T3 处理最高,T3 处理的苗期、拔节期和灌浆期叶绿素 a 含量较 T1 处理分别增加 35.19%、11.25%和 86.90%,叶绿素 b 含量分别增加 17.50%、21.57%和 73.68%,类胡萝卜素含量分别增加 22.22%、8.70%和 45.45%。

表 4 不同处理对冬小麦叶片叶绿素含量的影响

Table 4 Effects of different treatments on chlorophyll content in winter wheat leaves										mg·g ⁻¹
处理 Treatment	苗期 Seedling stage			拔节期 Jointing stage			灌浆期 Filling stage			
	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoid	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoid	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoid	
CK	0.85±0.05e	0.31±0.02c	0.17±0.02c	1.46±0.02d	0.45±0.04d	0.22±0.04e	0.75±0.03d	0.18±0.02c	0.10±0.01d	
T1	1.08±0.03d	0.40±0.01b	0.18±0.02c	1.60±0.02c	0.51±0.01c	0.23±0.02d	0.84±0.02c	0.19±0.01c	0.11±0.01cd	
T2	1.24±0.04c	0.45±0.05ab	0.21±0.01ab	1.62±0.02bc	0.57±0.01b	0.23±0.01d	0.88±0.03bc	0.25±0.02b	0.13±0.02bc	
T3	1.46±0.03a	0.47±0.04a	0.22±0.02ab	1.78±0.07a	0.62±0.03a	0.25±0.01a	1.57±0.08a	0.33±0.03a	0.16±0.01ab	
T4	1.36±0.04b	0.45±0.01ab	0.20±0.02ab	1.72±0.13abc	0.61±0.02ab	0.23±0.01c	0.93±0.03b	0.25±0.02b	0.14±0.01ab	
T5	1.44±0.02a	0.41±0.01b	0.19±0.01c	1.73±0.04ab	0.52±0.01c	0.24±0.01b	0.94±0.03b	0.27±0.04b	0.15±0.01ab	

2.6 施用新型尿素对冬小麦氮代谢酶活性的影响

不同生育时期冬小麦叶片 GS、GDH、GOGAT 和 NR 活性均受新型尿素影响显著(图 4)。随生育进程的推进,各酶活性均呈先升后降趋势,整体上以拔节期最高。在不同处理中,T3 处理的冬小麦叶片 GS、GDH、GOGAT 和 NR 活性最高,T5 处理次之,CK 最低。与 CK 相比,T3 处理的 4 种酶平均活性分别提高 134.28%、86.92%、84.28%和 112.28%,T5 处理则分别增加 117.00%、101.71%、66.06%和 82.74%。T3 处理的 4 种酶活性较 T1 处理分别提高 45.33%、52.72%、65.70%和 55.97%,差异均显著。

2.7 施用新型尿素对土壤全氮、铵态氮、硝态氮含量的影响

施用新型尿素对冬小麦各土层土壤氮含量影响显著(图 5)。在 0~20 cm 土层,T3 和 T5 处理的各生育时期全氮含量相对较高,苗期 T3 和 T5 处理的土壤全氮含量平均值分别为 1.36 和 1.30 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,比 T1 处理分别高 7.94%和 3.17%。此外,各生育时期不同处理的土壤全氮含量变化

存在差异,如在 0~20 cm 土层,T3 处理全氮含量在灌浆期($1.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)开始下降,成熟期降至 $1.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而 T2 处理从苗期($1.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)后开始下降,成熟期降至 $1.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

各处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在不同土层和生育期波动明显,且 T2~T5 处理的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量普遍高于 T1 处理。苗期 0~20 cm 土层 T3 和 T5 处理的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量平均值分别为 30.27 和 29.66 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,较 T1 处理分别高 25.60%和 23.07%。0~20 cm 土层的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在各生育时期普遍较高,随着土层加深含量逐渐降低,如在拔节期,T3 处理的 0~20 cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为 24.88 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,而 40~60 cm 土层仅为 15.63 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。从苗期到成熟期,各处理的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量整体呈下降趋势,如在 0~20 cm 土层,T1 处理的苗期土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为 24.10 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,成熟期降至 8.27 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,降幅 65.68%。T3 和 T5 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在各土层和生育时期相对较高且波动相对较小。施氮处理的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著高于 CK。

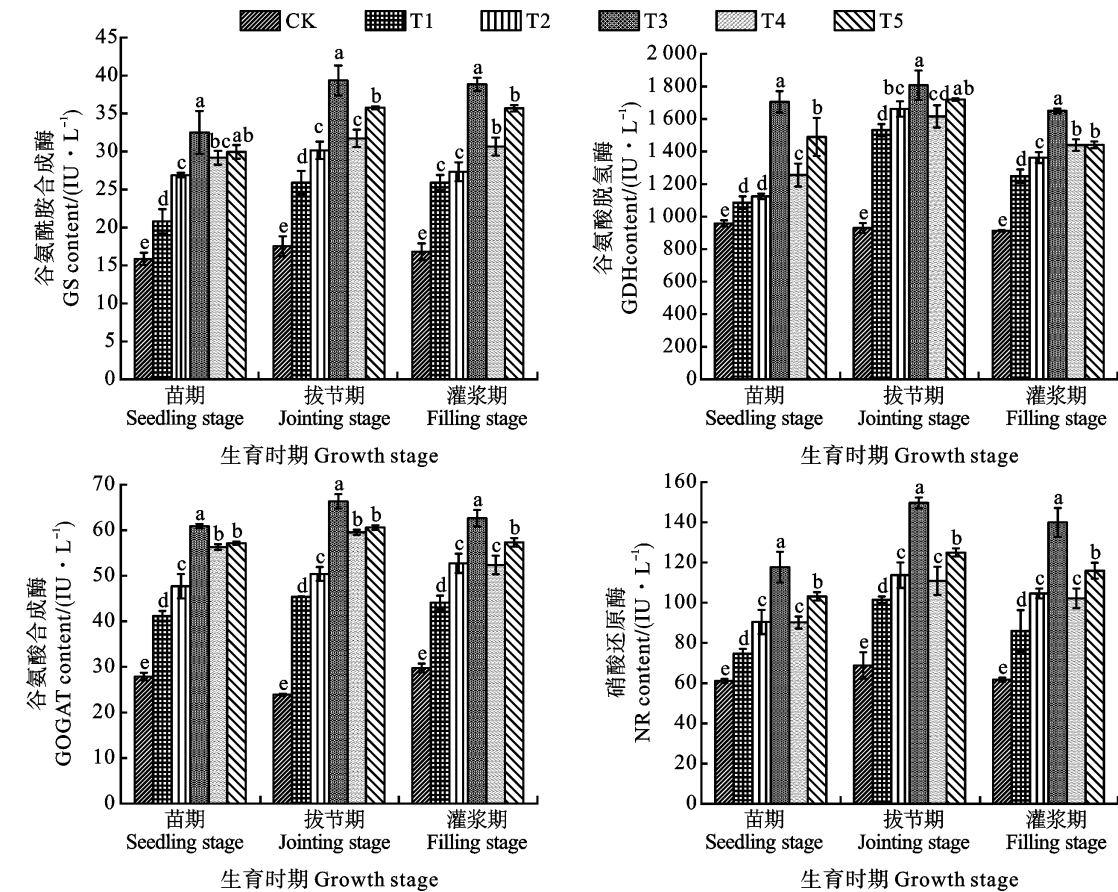


图 4 不同处理对冬小麦氮代谢酶活性的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on nitrogen metabolism enzyme activities in winter wheat

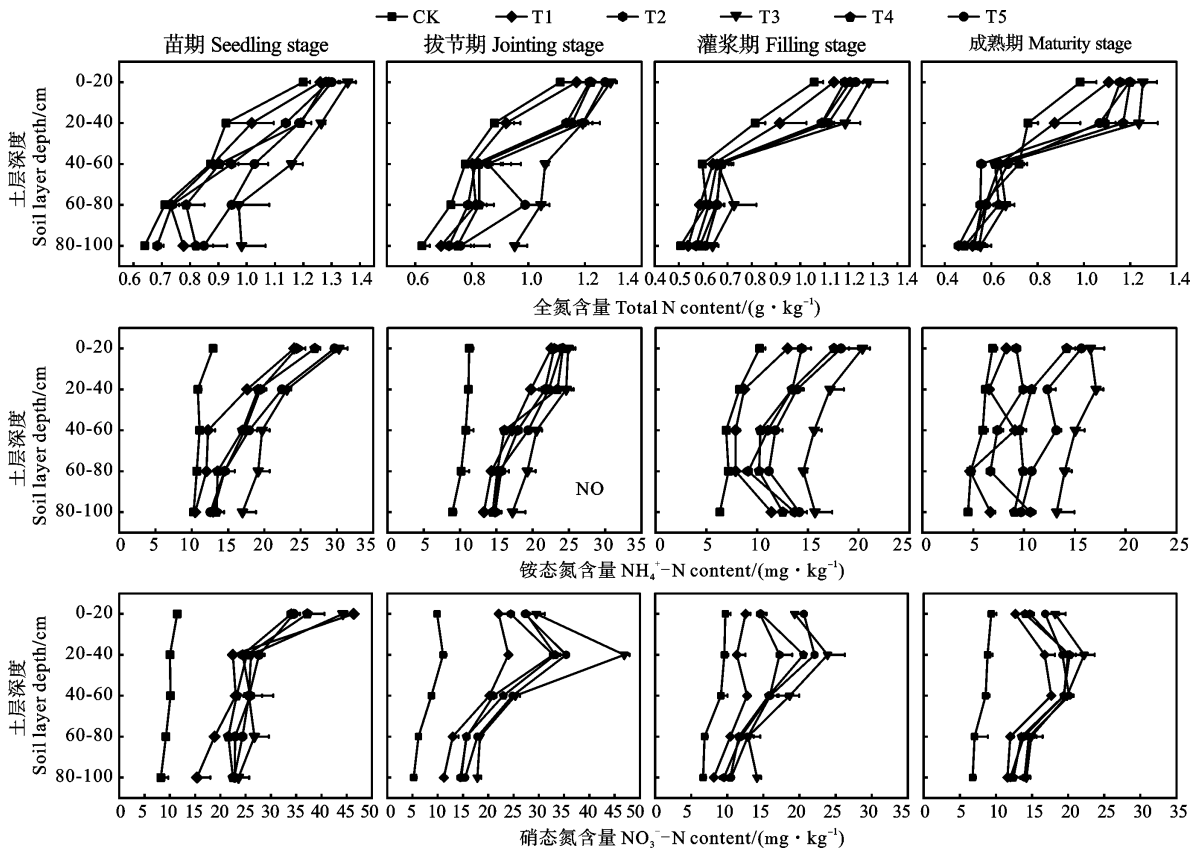


图 5 不同处理对土壤全氮、铵态氮、硝态氮含量的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on soil total nitrogen, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen

在 0~20 cm 土层,各处理苗期土壤 NO_3^- -N 含量相对较高,随后呈逐渐降低趋势;T1、T3 处理苗期土壤 NO_3^- -N 含量平均值分别为 46.38 和 44.24 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,而 CK 仅为 11.47 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在 20~40 cm 土层,T3 处理苗期土壤 NO_3^- -N 含量为 26.05 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,到成熟期降至 22.23 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,降幅 14.66%。虽然 0~20 cm 土层的 NO_3^- -N 含量在生育前期较高,但随着生育进程的推进,深层土壤 NO_3^- -N 含量逐渐显现出差异。灌浆期,40~60 cm 土层的不同处理间

NO_3^- -N 含量差异开始缩小。T1 处理的土壤 NO_3^- -N 含量在生育前期较高,而 T5 处理的土壤 NO_3^- -N 含量在生育期中相对稳定。

2.8 新型尿素对冬小麦氮肥利用效率的影响

冬小麦 NUE、NAE、NPFP 受尿素类型影响显著。不同处理下 NUE、NAE、NPFP 均以 T3 处理最高,分别为 39.22%、39.34 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 8.73 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,以 T1 处理最低,分别为 30.88%、38.24 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 7.63 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。T3 处理较 T1 处理分别提高 27.01%、2.88% 和 14.42%。

表 5 不同处理对冬小麦氮肥利用效率的影响

Table 5 Effects of different treatments fertilizer efficiency of winter wheat

处理 Treatment	NUE/%	NPFP/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	NAE/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	—	—	—
T1	30.88±0.14e	38.24±0.03d	7.63±0.03d
T2	32.13±0.18cd	38.55±0.02c	7.94±0.02c
T3	39.22±0.54a	39.34±0.24a	8.73±0.24a
T4	33.11±1.47c	38.72±0.02bc	8.11±0.02bc
T5	35.31±1.14b	38.86±0.02b	8.25±0.02b

NUE、NAE 和 NPFP 分别指氮肥表现利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力。
NUE, NAE, and NPFP refer to nitrogen apparent use efficiency, nitrogen agronomic efficiency, and nitrogen partial factor productivity, respectively.

3 讨论

前人研究表明,施用新型尿素不仅可确保作物稳产增产、提高肥料利用效率,还可有效实现改良土壤理化性状、减少养分淋溶、改善作物品质、减少环境污染等作用^[19]。新型尿素具备高效氮素释放调控能力、环境友好特性及对作物生长精准助力,是发展可持续农业和循环农业的关键。本研究中,与CK和T1相比,4种新型尿素均可提高冬小麦产量,与杜思婕等^[20]和王文赞等^[21]的研究结果一致。与普通尿素相比,施用新型尿素显著增产主要原因是精准调控养分释放节奏,匹配作物不同生育时期需肥规律,避免养分浪费或供应不足。此外,新型尿素可优化作物生理代谢过程,改良土壤理化性状,从而为作物生长提供更适宜环境^[22]。从养分高效利用层面来讲,新型尿素施用后冬小麦氮素吸收节奏的调整促进了光合产物向籽粒转运,提高灌浆效率,增加穗粒数和粒重,进而提高产量^[23]。本研究表明,新型尿素施用后小麦穗粒数和千粒重较普通尿素施用分别增加0.89%~7.69%和0.80%~6.79%。此外,不同新型尿素间控失尿素的施用效果最佳,主要原因是控失尿素通过高分子网捕技术控制养分释放,其缓释特性能有效延长氮素在土壤中的有效期,提高作物氮素吸收效率,最终增加冬小麦产量。已有试验结果显示,控失尿素相较于普通尿素能显著提高玉米、小麦等作物产量,还可提升氮肥利用率等相关指标^[24-26]。

作物生长发育有赖于土壤养分持续供应和植株的吸收积累,而后者是产量形成的基础^[27]。本研究的Logistic拟合结果显示,施用不同新型尿素均可提高冬小麦养分吸收效率,促进冬小麦氮素和干物质积累,其中以控失尿素效果最优。前人研究表明,控失尿素施入土壤后遇水膨胀,形成网状结构,有效控制氮素挥发流失,提高氮肥利用率,促进冬小麦产量提升^[28]。此外,控失尿素还可通过形成稳定团聚体结构,减缓养分溶出,减少氨挥发和氮淋溶,提高作物中后期耕层土壤速效氮含量,促进作物生长和增产^[29]。本研究结果与该结论一致,相较于施用普通尿素,施用控失尿素可控制养分释放速率,使氮素集中在根际周围,在作物生育中后期维持耕层土壤较高无机氮含量,优化土壤养分分布,提高肥料利用率和作物产量^[30]。

作物叶片叶绿素含量能反映其光合能力,冠层温度可体现植株水分及蒸腾情况,二者均可指示氮素营养状况以及作物生长发育与产量形成潜力^[31],因而叶片叶绿素含量和冠层温度是评价光合效率、水分状况、植株长势等生理特征的重要参数^[32-33]。研究发现,施用新型尿素可显著增加冬小麦叶片叶绿素含量,有效提高冬小麦光合速率与生物量,对冬小麦生长发育和产量提升均具有重要作用^[34]。冠层温度升高会影响植株生长,降低光合与蒸腾效率,诱导气孔关闭,并阻碍光合产物积累转化^[35]。本研究结果与前人结论一致。本研究中施用新型尿素后冬小麦叶片叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量较施用普通尿素均提高,干物质积累量增多,其中施用控失尿素效果更显著。这主要与控失尿素的氮素释放与冬小麦需氮规律同步,能持续稳定供氮,从而保障叶绿素合成原料充足,显著提高叶片叶绿素含量^[36]。本研究中,施用控失尿素后冬小麦苗期、拔节期和灌浆期的冠层平均温度较普通尿素分别降低了1.35、0.55和1.83℃。这与施用新型尿素后显著提高冬小麦光合蒸腾速率和气孔导度,降低冠层温度密切相关。氮代谢是作物同化氮源核心环节,GS/GOGAT循环是铵态氮同化主途径,硝酸还原酶是硝态氮还原关键限速酶,谷氨酸脱氢酶在碳氮代谢平衡中发挥作用^[37]。凤晓岗等^[38]的试验证实,施用新型尿素可提高旗叶与籽粒氮代谢酶活性、游离氨基酸和可溶性蛋白含量,显著提升产量和氮肥利用效率。本研究表明,施用控失尿素能显著提升小麦拔节期至灌浆期叶片GS、GOGAT、GDH和NR活性,其酶活性峰值高且持续时间长。这可能是由于控失尿素氮素释放特性与作物氮素需求更为匹配,能持续为根系提供充足氮素,促进植株对氮素吸收,增强氮素同化能力^[39]。

土壤有效氮含量变化可以作为衡量新型尿素施用效果的重要指标。本研究结果显示,新型尿素施用对各时期不同土层(0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)无机氮分布均有明显影响。NING等^[40]研究表明,与普通尿素处理相比,新型尿素处理下氮肥残留主要集中在0~40 cm土层,表层土壤氮素积累量较高,从而减少氮肥深层淋失及其对地下水和深层土壤污染的风险。此外,控失尿素施用后氮素分解速度延缓,有助于土壤氮素养分持续供应和促进作物吸收,从

而提高肥料利用效率。本研究与韩锐锋等^[41]研究结果一致,施用新型尿素能显著提高不同生育时期土壤有效氮含量,且在中后期仍维持相对稳定的铵态氮和硝态氮水平,从而有助于持续满足作物氮素需求,其中施用控失尿素显著提高0~20 cm土层硝态氮含量,降低20 cm以下土层硝态氮含量。有研究表明,添加腐植酸尿素对0~90 cm土层氮肥残留量影响不大,但硝化抑制剂施用则能有效抑制60 cm以下土层硝酸盐积累^[42]。

总体而言,施用不同新型尿素对冬小麦产量、品质、光温生理及氮素吸收利用均有显著影响。不同新型尿素中控失尿素的整体效果最佳,包膜尿素、稳定性尿素次之。控失尿素通过高分子网捕技术能够有效调控氮素释放速率,使其与冬小麦不同生长阶段需氮规律更为匹配。在冬小麦生长前期能保证充足氮素供应,促进植株分蘖、叶片生长和叶面积扩展,为后期光合作用和干物质积累奠定基础^[43]。在生长后期又可持续稳定提供氮素,防止植株早衰,保障光合产物持续积累与顺利转化^[44]。另一方面,控失尿素在土壤中缓慢释放养分避免了因短时间内大量氮素释放而造成的土壤溶液浓度过高,维持了土壤良好的理化性质,为土壤微生物的生长和繁殖创造了适宜条件^[45]。土壤微生物活动又进一步促进了土壤中养分转化和释放,提高了土壤肥力,利于冬小麦根系对养分的吸收,从而促进冬小麦的生长。

4 结论

施用新型尿素可显著提高氮肥利用率和土壤供氮能力,显著增强植株氮代谢酶活性,改善光温利用效能,促进植株整体养分积累和光合作用,最终提高冬小麦产量与籽粒品质。本试验条件下控失尿素效果最优。

参考文献:

- [1]中国国家统计局. 国家统计年鉴 2024[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
National Bureau of Statistics of China. China statistical year-book 2024 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2024.
- [2]LANGRIDGE P, ALAUX M, ALMEIDA N F, *et al.* Meeting the challenges facing wheat production: The strategic research agenda of the global wheat initiative [J]. *Agronomy*, 2022, 12 (11): 2767.
- [3]徐隽峰, 张学美, 杨珺, 等. 旱地高产小麦品种籽粒氮含量与产量形成及氮磷钾吸收分配的关系[J]. 中国农业科学, 2023,

56(24): 4880.

- XU J F, ZHANG X M, YANG J, *et al.* Relationship between grain nitrogen content and yield formation, uptake and partitioning of NPK of high-yielding wheat cultivars in drylands [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(24): 4880.
- [4]安露昌, 李豪杰, 郑梦瑶, 等. 缺氮胁迫对不同小麦品种幼苗根系和光合荧光特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(9): 106.
AN L C, LI H J, ZHENG M Y, *et al.* Effects of nitrogen deficiency stress on seedling root system and photosynthetic fluorescence characteristics of different wheat cultivars [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(9): 106.
- [5]LI C H, CHANG Y L, LUO Y L, *et al.* Nitrogen regulates stem lodging resistance by breaking the balance of photosynthetic carbon allocation in wheat [J]. *Field Crops Research*, 2023, 296: 108908.
- [6]巨晓棠, 谷保静, 蔡祖聪. 关于减少农业氨排放以缓解灰霾危害的建议[J]. 科技导报, 2017, 35(13): 11.
JU X T, GU B J, CAI Z C. Suggestions on reducing agricultural ammonia emission to alleviate the harm of haze [J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(13): 11.
- [7]袁旭, 张家安, 常飞杨, 等. 我国肥料施用现状及化肥减量研究进展[J]. 农业与技术, 2022, 42(18): 20.
YUAN X, ZHANG J A, CHANG F Y, *et al.* Present situation of fertilizer application and research progress of fertilizer reduction in China [J]. *Agriculture and Technology*, 2022, 42 (18): 20.
- [8]翁玲云, 杨晓卡, 吕敏娟, 等. 长期不同施氮量下冬小麦-夏玉米复种系统土壤硝态氮累积和淋洗特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2551.
WENG L Y, YANG X K, LÜ M J, *et al.* Characteristics of soil nitrate accumulation and leaching under different long-term nitrogen application rates in winter wheat and summer maize rotation system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2551.
- [9]丁文成, 何萍, 周卫. 我国新型肥料产业发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(2): 201.
DING W C, HE P, ZHOU W. Development strategies of the new-type fertilizer industry in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(2): 201.
- [10]张明伟, 马泉, 陈京都, 等. 缓控释肥在冬小麦上的应用研究进展及展望[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(2): 15.
ZHANG M W, MA Q, CHEN J D, *et al.* Research progress and prospect of slow and controlled release fertilizer application in winter wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(2): 15.
- [11]满建国, 周杰, 王东, 等. 硫加树脂包膜尿素控释肥对小麦干物质积累分配及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22 (5): 1175.
MAN J G, ZHOU J, WANG D, *et al.* Effects of sulfur plus resin-coated controlled release urea fertilizer on winter wheat dry matter accumulation and allocation and grain yield [J].

- Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(5):1175.
- [12]任孟伟,杨星波,杨自超.包膜尿素养分释放期的影响因素研究及工业化生产实践[J].生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(9):53.
- REN M W, YANG X B, YANG Z C. Study on influence factors of nutrient release rate of coated urea and industrial production practice [J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2025, 40(9):53.
- [13]MA Q, WANG M Y, ZHENG G L, *et al.* Twice-split application of controlled-release nitrogen fertilizer met the nitrogen demand of winter wheat [J]. *Field Crops Research*, 2021, 267:108163.
- [14]宋建宇,张书红,马延东,等.不同稳定性尿素用量对玉米产量和土壤养分的影响[J].肥料与健康, 2023, 50(5):29.
- SONG J Y, ZHANG S H, MA Y D, *et al.* Effects of different stable urea application amount on maize yield and soil nutrients [J]. *Fertilizer & Health*, 2023, 50(5):29.
- [15]郭松,喻华,陈琨,等.稳定性尿素对川中丘陵区小麦/玉米轮作制度下作物产量及氮肥利用率的影响[J].西南农业学报, 2018, 31(5):1006.
- GUO S, YU H, CHEN K, *et al.* Effects of stabilized urea on crop yield and nitrogen use efficiency in wheat/maize rotation system of central Sichuan Basin [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(5):1006.
- [16]AKHTAR K, MUHAMMA D SHAH S N, *et al.* Effects of humic acid and crop residues on soil and wheat nitrogen contents [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2014, 5(9):1277.
- [17]胡家钰,高兵阳,高怡帆,等.氮肥与腐植酸配施对砂质中低产田土壤质量和作物产量的影响[J].应用生态学报, 2025, 36(9):2639.
- HU J Y, GAO B Y, GAO Y F, *et al.* Effect of combined application of nitrogen fertilizer and humic acid on soil quality and crop yield in sandy low-to-medium productivity farmland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(9):2639.
- [18]田纪春.谷物品质测试理论与方法[M].北京:科学出版社, 2006:3-15.
- TIAN J C. Theory and method of grain quality testing [M]. Beijing: Science Press, 2006:3-15.
- [19]ZHU S H, LIU L Y, XU Y, *et al.* Application of controlled release urea improved grain yield and nitrogen use efficiency: A meta-analysis [J]. *PLoS One*, 2020, 15(10):e0241481.
- [20]杜思婕,张艺磊,张志勇,等.冬小麦-夏玉米轮作体系不同新型尿素的氮素利用率及去向[J].植物营养与肥料学报, 2021, 27(1):24.
- DU S J, ZHANG Y L, ZHANG Z Y, *et al.* Nitrogen use efficiency and fate of new urea types in a winter wheat-summer maize rotation system [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2021, 27(1):24.
- [21]王文赞,韩建,李鑫,等.不同新型尿素对冬小麦-夏玉米轮作产量和氮素吸收利用及生产效益的影响[J].中国农学通
- 报, 2024, 40(33):24.
- WANG W Z, HAN J, LI X, *et al.* Effects of new types of urea on yield, nitrogen absorption and utilization, and production efficiency of winter wheat-summer corn rotation [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(33):24.
- [22]李玉,贺明荣,代兴龙,等.氮素与抑制剂双控释尿素的制备及其对土壤供氮能力和小麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报, 2020, 26(9):1612.
- LI Y, HE M R, DAI X L, *et al.* Preparation of dual controlled release urea with nitrogen inhibitor and resin coating and the effects on soil nitrogen supply capacity and wheat yield [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2020, 26(9):1612.
- [23]陈钰蓉,范震,赵有欣,等.水分与控释尿素耦合对冬小麦干物质积累和氮素转运及产量的影响[J].中国土壤与肥料, 2023(12):173.
- CHEN Y R, FAN Z, ZHAO Y X, *et al.* Co-effects of irrigation and polymer coated urea on biomass and nitrogen accumulation, transport and yield of winter wheat [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(12):173.
- [24]张倩,韩本高,张博,等.控失尿素减施及不同配比对夏玉米产量及氮肥效率的影响[J].作物学报, 2022, 48(1):180.
- ZHANG Q, HAN B G, ZHANG B, *et al.* Reduced application and different combined applications of loss-control urea on summer maize yield and fertilizer efficiency improvement [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(1):180.
- [25]ZHANG G X, ZHAO D H, FAN H Z, *et al.* Combining controlled-release urea and normal urea with appropriate nitrogen application rate to reduce wheat stem lodging risk and increase grain yield and yield stability [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(10):3006.
- [26]ZHU S H, LIU L Y, XU Y, *et al.* Application of controlled release urea improved grain yield and nitrogen use efficiency: A meta-analysis [J]. *PLoS One*, 2020, 15(10):e0241481.
- [27]侯云鹏,孔丽丽,蔡红光,等.东北半干旱区滴灌施肥条件下高产玉米干物质与养分的积累分配特性[J].中国农业科学, 2019, 52(20):3559.
- HOU Y P, KONG L L, CAI H G, *et al.* The accumulation and distribution characteristics on dry matter and nutrients of high-yielding maize under drip irrigation and fertilization conditions in semi-arid region of northeastern China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(20):3559.
- [28]周丽平,杨俐苹,白由路,等.不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响[J].植物营养与肥料学报, 2016, 22(6):1449.
- ZHOU L P, YANG L P, BAI Y L, *et al.* Comparison of several slow-released nitrogen fertilizers in ammonia volatilization and nitrogen utilization in summer maize field [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6):1449.
- [29]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.
- JI J H, LI Y Y, LIU S Q, *et al.* Effects of different mixing

- rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of spring maize [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3): 669.
- [30] LIU W, XIONG Y S, XU X Y, *et al.* Deep placement of controlled-release urea effectively enhanced nitrogen use efficiency and fresh ear yield of sweet corn in fluvo-aquic soil [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 20307.
- [31] 周春菊, 张嵩午, 王林权, 等. 施肥对小麦冠层温度的影响及其与生物学性状的关联[J]. *生态学报*, 2005, 25(1): 18.
- ZHOU C J, ZHANG S W, WANG L Q, *et al.* Effect of fertilization on the canopy temperature of winter wheat and its relationship with biological characteristics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 18.
- [32] 张冠初, 戴良香, 徐 扬, 等. 减氮配施钙肥对花生光合特性、产量及肥料贡献率的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2020, 42(6): 1010.
- ZHANG G C, DAI L X, XU Y, *et al.* Effect of nitrogen reduction and calcium fertilizer application on photosynthetic characteristics, yield and fertilizer contribution rate in peanut [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2020, 42(6): 1010.
- [33] 董庆玲, 娄焕昌, 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.
- DONG Q L, LOU H C, ZHANG H, *et al.* Improving photosynthetic efficiency of flag leaves at anthesis stage and nitrogen utilization of winter wheat by deep placement of common and control-released urea mixture [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(7): 1134.
- [34] 常 凤. 冬小麦夏玉米新型尿素增产效应及机制研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019.
- CHANG F. Research on the effect and mechanism of yield increasing for applying new-type urea in winter wheat and summer maize [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019.
- [35] SUN X Z, ZHANG L N, DAI Y J, *et al.* Effect of increased canopy temperature on cotton plant dry matter accumulation and its physiological mechanism [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 683.
- [36] 李 伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(4): 699.
- LI W, LI X H, LI H Y, *et al.* Effects of different mixing rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 699.
- [37] LIU H, GAO X H, FAN W S, *et al.* Optimizing carbon and nitrogen metabolism in plants: From fundamental principles to practical applications [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2025, 67(6): 1447.
- [38] 凤晓岗, 马 飞, 王 浩, 等. 不同类型尿素配施对小麦花后氮代谢和产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2025, 45(5): 652.
- FENG X G, MA F, WANG H, *et al.* Effects of different types of urea combined application on nitrogen metabolism and yield in wheat after anthesis [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(5): 652.
- [39] 丁 坤, 王秀峰, 杨凤娟, 等. 硫包膜控释尿素和树脂包膜控释尿素混施对番茄生长及氮代谢酶活性的影响[J]. *山东农业科学*, 2012, 44(10): 70.
- DING K, WANG X F, YANG F J, *et al.* Effects of mixed application of sulfur-coated and resin-coated controlled release urea fertilizer on growth and nitrogen metabolism-related enzyme activities of tomato [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2012, 44(10): 70.
- [40] NING T Y, SHAO G Q, LI Z J, *et al.* Effects of urea types and irrigation on crop uptake, soil residual, and loss of nitrogen in maize field on the North China Plain [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2012, 58(1): 1.
- [41] 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.
- HAN R F, NIU Y X, WANG X Y, *et al.* Effect of mixed basal application of controlled release urea and common urea on the nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(11): 2042.
- [42] ZHANG S Q, YUAN L, LI W, *et al.* Effects of urea enhanced with different weathered coal-derived humic acid components on maize yield and fate of fertilizer nitrogen [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(3): 656.
- [43] 王茂莹, 漆增连, 代兴龙, 等. 不同缓/控释尿素对小麦生长及氮素利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(4): 643.
- WANG M Y, QI Z L, DAI X L, *et al.* Effects of different slow/controlled release urea on wheat growth and nitrogen utilization [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(4): 643.
- [44] 李 伟, 李絮花, 董 静, 等. 冬小麦控释尿素与普通尿素的最佳配比研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 629.
- LI W, LI X H, DONG J, *et al.* The appropriate mixing ratio of control-released urea and common urea in winter wheat production [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(3): 629.
- [45] 宗浩霖. 长期施用控释尿素对农田土壤酸化特征的影响及机制研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
- ZONG H L. A comprehensive investigation into the influence and mechanisms of prolonged implementation of controlled-release urea on the acidification properties of agricultural soils [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2024.