

土壤修复剂与不同肥料运筹模式 对稻茬小麦产量及品质的影响

陈京都¹ 洪叶¹ 唐建鹏¹ 邓沁宇¹ 刘绍贵¹ 张彦² 冯烨²

(¹扬州市农业技术综合服务中心, 225001, 江苏扬州; ²扬州市江都区农业技术综合服务中心, 225200, 江苏扬州)

摘 要 科学肥料运筹是稻茬小麦增产提质的重要途径。于 2023–2024 年度在扬州沿江高沙土地地区设置 8 种施肥模式, 探究不同肥料运筹模式与土壤修复剂对扬麦 34 产量及品质的影响。结果表明, 精确定量施肥(基肥、苗肥、拔节肥和孕穗肥 4 次施肥)配施土壤修复剂处理表现最好, 其单位面积有效穗数($497.36 \times 10^4/\text{hm}^2$)、每穗粒数(46.26 粒)、千粒重(43.61 g)和产量($9711.22 \text{ kg}/\text{hm}^2$)均显著高于对照(缓释肥一次性基施), 籽粒出粉率(64.98%)、蛋白质含量(14.61%)、湿面筋含量(31.47%)及沉淀值(35.15 mL)也显著高于对照;返青期大量施用尿素(基肥:返青肥=6:4)导致麦苗徒长、成穗率降低, 产量显著下降, 较对照减产 22.54%;总施氮量减少 15%(基肥:返青肥或拔节肥=6:4)模式下, 产量显著低于对照, 但拔节期追肥(基肥:拔节肥=6:4)处理可提高籽粒品质。综上, 在小麦生产中应注重拔节孕穗肥的施用, 精确定量施肥能取得较高的产量和经济效益, 其肥料成本也较低;若侧重于减少施肥次数, 则推荐缓控释肥与常规肥结合施用, 采用 60% 氮素以缓释肥基施和 40% 氮素以尿素作为拔节肥追施的模式, 可以取得较好的经济效益。

关键词 稻茬小麦; 缓释肥; 肥料运筹; 土壤修复剂; 产量; 品质

肥料运筹是影响小麦产量和品质的关键因素, 其中氮素是小麦生长所必需的大量营养元素, 氮素营养对小麦产量和品质形成具有非常重要的作用^[1-2]。适时适量地施用氮肥可促进小麦生长、提高产量以及调节籽粒品质^[3]。研究^[4]表明, 氮肥主要通过影响小麦穗数和千粒重进而影响产量。过量施用氮肥可能造成无效分蘖增多、徒长倒伏和贪青晚熟等不良影响, 同时也可能导致土壤元素配比失衡和地下水污染等问题^[5-6]。在大面积生产实践中, 如何科学合理施用氮肥, 以提升肥料利用效率、促进小麦增产增效, 同时减轻化肥对环境的负面影响, 是亟待解决的难题。

相比于普通肥料, 缓释肥能够提高肥料利用效率、减轻农业生产中氮素污染, 同时减少施肥次数, 目前已在短生育期作物上取得了较好的减肥增效应用效果。研究^[7]表明, 水稻缓释肥机插一次施肥在减少 17.5%~23.7% 氮肥用量的情况下, 可增产 7.71%~11.42%。大田玉米施用缓释肥料后, 田间持续供肥能力强, 无脱肥现象, 氮素养分利用率高达 63.22%^[8]。冬小麦具有生育期长和越冬期生长停滞等特性, 合理配置缓释肥的施用

量与施用时间仍需深入探讨。

提升土壤肥力是提高作物产量的重要措施。土壤修复剂的施用可以改善土壤物理结构、优化化学性质、加强微生物活动、增加微量元素含量和调节肥力^[9]。近年来已有部分研究将土壤修复剂应用于烤烟^[10]、马铃薯^[11]和大蒜^[12]等作物的生产中, 结果表明施用土壤修复剂可以有效改善土壤理化性质, 使其更加适宜农作物生长, 从而提高作物产量。土壤修复剂在小麦生产上的应用及其对小麦产量与品质的影响有待进一步研究。

扬州市位于江苏中部, 是我国重要的商品粮基地, 属于淮南麦区, 以一年两熟制稻茬小麦为主, 种植的小麦多数为稻茬小麦。稻茬小麦秋播时存在水稻腾茬迟、土壤适耕性差、宜耕期短以及秸秆还田量大等不利因素的影响, 实际生产中, 部分农户受传统观念影响, 往往重返青肥而轻拔节孕穗肥, 其氮肥施用量虽大, 但肥料利用效率较低。本研究设置 8 种不同的稻茬小麦肥料运筹模式, 分析不同施肥模式对小麦产量结构及品质性状的影响, 探究土壤修复剂施用及缓释肥的合理运筹方式, 以期对稻茬小麦合理肥料运筹提供理论依据。

作者简介: 陈京都, 主要从事作物栽培技术推广研究, E-mail: yztgz@163.com

洪叶为通信作者, 主要从事作物栽培技术推广研究, E-mail: 1171864834@qq.com

基金项目: 江苏省农业科技自主创新项目[CX (24) 2007]; 扬州市稻麦科技综合展示基地项目 (2024042)

收稿日期: 2025-03-28; 修回日期: 2025-05-16; 网络出版日期: 2025-12-05

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试小麦品种为扬麦 34（苏审麦 20200027），株型较紧凑，抗倒性较好，高抗白粉病，中抗赤霉病，穗层整齐，熟相好，近年来在扬州地区种植面积迅速扩大。试验用土壤修复剂及肥料产品共 5 种，详见表 1。缓释掺混肥料（26-12-12）根据作物需肥规律，由微晶硫包尿素（SCU）、生

物炭能尿素、可降解树脂包膜尿素以及多种中微量元素科学配比混合而成，缓释氮养分量≥13%，缓释养分释放期为 3 个月，缓释养分 28 d 的累积养分释放率≤80%，缓释养分释放期的累积养分释放率≥80%。土壤修复剂以富营养矿石为原料，通过高能球磨技术，经定制设备高速分离而成，其中纳米材料占比达 85%以上，富含有益元素硅和钛，且拥有 11 种中微量元素和 17 种稀土元素，能补充和均衡土壤营养成分，修复土壤。

表 1 试验用土壤修复剂及肥料产品信息
Table 1 Information on experimental soil amendment and fertilizer products

编号 Code	产品 Product	生产厂家 Manufacturer	标称含量 Nutrient content
1	复合肥料 15-15-15	江苏华昌化工股份有限公司	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O: 15-15-15, 总养分≥45%
2	尿素	河南心连心化学工业集团股份有限公司	总氮≥46.0%
3	缓释掺混肥料 26-12-12	汉枫缓释肥料（江苏）有限公司	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O: 26-12-12 含氯（低氯），总养分≥50%
4	复合肥料 30-0-8	河南心连心化学工业集团股份有限公司	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O: 30-0-8, 总养分≥38%
5	土壤修复剂	江苏艾阳农业生态科技有限公司	SiO ₂ 硅≥26%, TiO ₂ 钛≥1.2%; 微量元素: 铁≥0.5%, 稀土元素: 镧、铈≥80 mg/kg

1.2 试验设计

于江苏省扬州市江都区宜陵镇大陈村进行试验，试验地前茬为常规粳稻，土壤地力中等，属于沿江高沙土。于 2023 年 11 月 8 日使用机械条播，每个处理种植面积为 750.0 m²，种子播量 187.5 kg/hm²，基本苗 300.0 万株/hm²。播后 3 d

进行封闭除草，2023 年 12 月 31 日和 2024 年 3 月 12 日进行化学除草，2024 年 4 月 18 日和 4 月 24 日进行一喷三防，按大田常规栽培措施进行管理。共设置 8 种不同施肥模式，以缓释肥一次性基施为对照（CK），全生育期总施氮量 273.0 kg/hm²，具体试验设计见表 2。

表 2 不同处理的肥料运筹
Table 2 Fertilizer management in different treatments

处理 Treatment	施肥方式 Fertilizer management	基肥 Basic fertilizer	苗肥 Seedling fertilizer	返青肥 Regreening fertilizer	拔节肥 Jointing fertilizer	孕穗肥 Earing fertilizer
CK	100%缓释肥基施	1050.0 kg/hm ² 缓释肥（26-12-12）				
T1	60%缓释肥基施 40%尿素返青期施	630.0 kg/hm ² 缓释肥（26-12-12）		237.0 kg/hm ² 尿素		
T2	60%尿素/复合肥基施 40%缓释肥返青期施	600.0 kg/hm ² 复合肥（15-15-15） 160.5 kg/hm ² 尿素		420.0 kg/hm ² 缓释肥（26-12-12）		
T3	T2 处理下减氮 15%	510.0 kg/hm ² 复合肥（15-15-15）+ 136.5 kg/hm ² 尿素		357.0 kg/hm ² 缓释肥（26-12-12）		
T4	60%缓释肥基施 40%尿素拔节期施	630.0 kg/hm ² 缓释肥（26-12-12）			237.0 kg/hm ² 尿素	
T5	T4 处理下减氮 15%	535.5 kg/hm ² 缓释肥（26-12-12）			199.5 kg/hm ² 尿素	
T6	精确定量施肥	600.0 kg/hm ² 复合肥（15-15-15）	112.5 kg/hm ² 尿素		265.5 kg/hm ² 复合肥（30-0-8）	112.5 kg/hm ² 尿素
T7	精确定量施肥 增施土壤修复剂	600.0 kg/hm ² 复合肥（15-15-15） 300.0 kg/hm ² 土壤修复剂	112.5 kg/hm ² 尿素		265.5 kg/hm ² 复合肥（30-0-8）	112.5 kg/hm ² 尿素

1.3 测定项目与方法

于越冬期、返青期和拔节期分别调查小麦茎蘖数。小麦成熟收获前，从各处理选取 1 m²样方调查有效穗数，另随机取 20 株完整植株进行室内测定与考种，每处理选择 1 m²测定产量，3 次重复，收获后自然晾干并称重，按 13%含水率计算千粒重和单产。采用 HGT-1000 型容重仪（上海东方衡器有限公司）测定籽粒容重；采用 JYDB100X40 硬度仪（浙江伯利恒仪器设备有限公司）测定籽粒硬度；采用 D-28033 粉质仪（Brabender，德国）磨粉并测定出粉率；采用 JMC-IIIB 型面筋测定仪（杭州天成光电有限公司）测定湿面筋含量；采用近红外法测定蛋白质和淀粉含量；采用 Zeleny 法测定沉淀值。

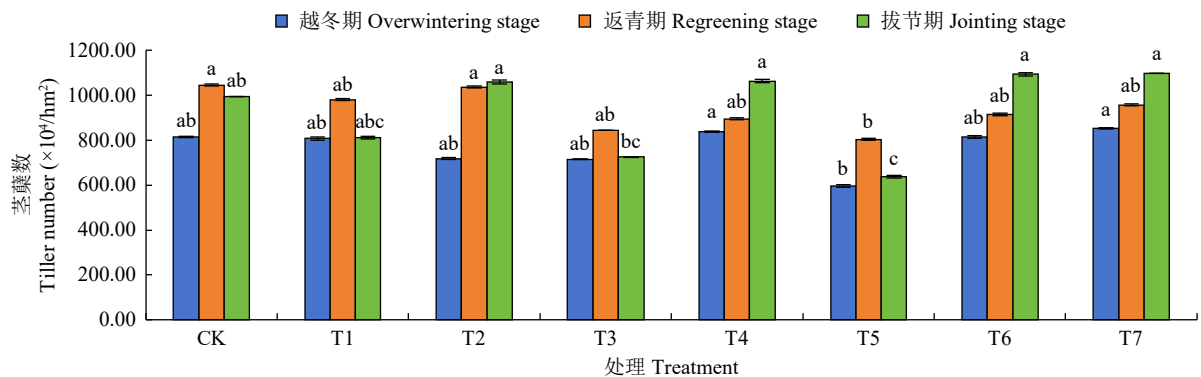
1.4 数据处理

采用 Excel 2024 进行数据整理及作图，采用 Origin 2024b 进行方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理下小麦茎蘖动态分析

由不同施肥处理下的茎蘖动态（图 1）可知，小麦越冬期单位面积茎蘖数在 596.39×10⁴~851.68×10⁴/hm²，T5 处理最低，T7 处理最高。与 CK 相比，T5 处理下的越冬期单位面积茎蘖数显著降低，其余施肥处理与 CK 处理相比无显著差异。小麦返青期单位面积茎蘖数在 803.26×10⁴~1045.34×10⁴/hm²，T5 处理显著低于 CK 处理，其余施肥处理与 CK 处理相比无显著差异。施用返青肥（T1、T2 和 T3）以及 T5 处理下小麦单位面积茎蘖数在返青期达到峰值。拔节期不同施肥处理下小麦单位面积茎蘖数在 638.21×10⁴~1098.16×10⁴/hm²，T5 处理显著低于 CK 处理，其余处理与 CK 相比无显著差异。CK、T4、T6 和 T7 处理下小麦单位面积茎蘖数在拔节期达到峰值。



不同小写字母表示同一生育期的不同处理间存在显著差异（ $P < 0.05$ ），下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at the same growth period ($P < 0.05$), the same below.

图 1 不同施肥处理对小麦茎蘖动态的影响

Fig.1 Effects of different fertilization treatments on the dynamics of wheat tillers

2.2 不同施肥处理下小麦株高及节间长分析

由表 3 可知，不同施肥处理下，小麦株高在 64.13~76.78 cm，T4 和 T7 处理显著高于 CK 处理，T3 处理则显著降低，其余处理无显著影响。小麦

表 3 不同施肥处理下小麦株高及节间长

Table 3 Wheat plant height and internode length under different fertilization treatments							cm
处理 Treatment	株高 Plant height	第 1 节间长 1st internode length	第 2 节间长 2nd internode length	第 3 节间长 3rd internode length	第 4 节间长 4th internode length	第 5 节间长 5th internode length	
CK	67.98cd	3.93b	5.93bc	11.00abcd	15.86bcde	23.92c	
T1	70.18c	3.93b	6.44b	12.22a	16.30abc	24.05bc	
T2	66.01de	2.84cd	5.46cd	10.36bcd	15.49de	24.18bc	
T3	64.13e	2.56d	4.90d	10.02d	15.29e	23.88c	
T4	73.42b	4.08b	6.58b	11.98a	16.55ab	26.41a	
T5	69.43c	3.83bc	6.58b	11.31abc	16.17bcd	24.28bc	
T6	70.32bc	3.18bcd	6.36b	10.24cd	15.67cde	25.63ab	
T7	76.78a	5.18a	8.03a	11.55ab	16.98a	26.78a	

植株第 1 节间长在 2.56~5.18 cm, T2 和 T3 处理下显著变短, T7 处理则显著变长, 其余处理与 CK 处理相比无显著差异。小麦植株第 2 节间长在 4.90~8.03 cm, 变化趋势与第 1 节间长变化趋势类似, T2 和 T3 处理下显著缩短, T7 处理下则显著增加。与 CK 处理相比, 小麦植株第 3 节间长在不同施肥处理下均无显著差异。T7 处理下的小麦植株第 4 节间长与 CK 处理相比显著增加, 其他施肥处理无显著影响, T3 处理长度最短。对于小麦第 5 节间长而言, 施用拔节肥 (T4、T6 和 T7) 处理较 CK 显著增加, 而未施用拔节肥 (T1、T2 和 T3) 和减氮 15%施用拔节肥 (T5) 处理与 CK 处理相比均无显著差异。

2.3 不同施肥处理下小麦产量及其相关性状分析

由表 4 可知, 不同施肥处理下, 小麦单位面

积有效穗数在 $366.79\times10^4\sim497.36\times10^4/\text{hm}^2$ 。与 CK 处理相比, T1 和 T3 处理下小麦单位面积有效穗数显著降低, 施用拔节孕穗肥 (T4、T6 和 T7) 处理则显著提升, T2 和 T4 处理下无显著差异。在成穗率方面, 不同施肥处理与 CK 处理相比无显著差异。施肥量正常且施用拔节孕穗肥处理下的小麦每穗粒数显著高于 CK 处理, 其余处理与 CK 处理相比无显著差异。施用拔节孕穗肥 (T4、T5、T6 和 T7) 处理与 CK 处理相比均有效提升了小麦千粒重, 未施用拔节孕穗肥 (T1、T2 和 T3) 处理则无显著差异。T1、T3 和 T5 处理下的小麦产量显著低于 CK 处理, 而 T2、T4、T6 和 T7 处理下的产量显著高于 CK 处理。不同处理小麦籽粒容重在 777.00~804.50 g/L, 与 CK 处理相比, T3 处理显著降低, 其余处理无显著差异。

表 4 不同施肥处理下小麦产量及相关性状

Table 4 Wheat yield and related traits under different fertilization treatments

处理 Treatment	有效穗数 Effective spike number ($\times10^4/\text{hm}^2$)	成穗率 Spike rate (%)	每穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg/hm^2)	籽粒容重 Grain bulk density (g/L)
CK	435.74cd	41.92ab	38.15cd	42.80b	6942.59e	793.00abcd
T1	366.79f	37.70b	36.90d	42.81b	5377.96g	800.00ab
T2	443.08bc	42.32ab	43.75abc	42.70b	7690.38d	789.00bcde
T3	403.46e	47.75ab	38.80bcd	42.34b	6215.07f	777.00e
T4	470.95ab	44.68ab	44.55ab	43.75a	8535.22c	783.00de
T5	407.87de	51.20a	38.38cd	43.42a	6307.11f	784.50cde
T6	484.16a	44.53ab	45.05a	43.59a	9292.67b	799.50abc
T7	497.36a	45.28ab	46.26a	43.61a	9711.22a	804.50a

2.4 不同施肥处理下小麦籽粒品质分析

不同施肥处理下, 小麦籽粒硬度指数在 52.65~59.95 (表 5), 相较于 CK 处理, T1 和 T3 处理显著下降, 其余处理无显著差异。不同处理下的小

麦籽粒出粉率在 58.60%~65.78%, 与 CK 处理相比, T6 和 T7 处理显著提高, 其余处理无显著差异。小麦籽粒蛋白质含量在 10.50%~14.61%, T2、T4、T5、T6 和 T7 处理均显著高于 CK 处理, T1

表 5 不同施肥处理下小麦籽粒品质指标

Table 5 Wheat grain quality indexes under different fertilization treatments

处理 Treatment	硬度指数 Hardness index	出粉率 Flour yield rate (%)	蛋白质含量 Protein content (%)	淀粉含量 Starch content (%)	湿面筋含量 Wet gluten content (%)	沉淀值 Sedimentation value (mL)
CK	58.50ab	59.81bc	11.50d	61.60a	25.44bcd	25.90c
T1	52.65d	60.63bc	10.63e	62.28a	23.52cd	22.15d
T2	56.45bc	58.60c	12.83c	59.13b	28.05abc	26.84c
T3	54.30cd	61.97abc	10.50e	61.89a	23.07d	21.40d
T4	58.90ab	59.03c	14.18b	58.24c	29.91ab	27.95bc
T5	59.25ab	63.15ab	13.88b	58.32bc	29.91ab	27.67bc
T6	59.95a	65.78a	13.77b	58.40bc	30.74a	30.07b
T7	59.85a	64.98a	14.61a	58.12c	31.47a	35.15a

和 T3 处理则显著低于 CK 处理。小麦籽粒淀粉含量在 58.12%~62.28%，T1 和 T3 处理与 CK 处理相比无显著差异，其余处理则显著低于 CK 处理。小麦粉湿面筋含量在 23.07%~31.47%，T6 和 T7 处理显著高于 CK 处理，其余处理与 CK 处理相比无显著差异。小麦粉沉淀值在 21.40~35.15 mL，T6 和 T7 处理显著高于 CK 处理，而 T1 和 T3 处理则显著降低。

2.5 不同施肥处理下小麦农艺及品质性状的相关性分析

不同施肥处理下株高与节间长的相关性分析结果如表 6 所示，小麦株高在不同施肥处理下与第 1、第 2、第 4 和第 5 节间长呈极显著正相关；

第 1 节间长与第 2、3、4 节间长呈显著正相关；第 2 节间长与第 4、5 节间长呈显著正相关；第 3 与第 4 节间长呈显著正相关。由不同施肥处理下产量结构相关性分析结果（表 7）可知，不同施肥处理下，小麦产量与单位面积有效穗数、每穗粒数呈显著正相关，与千粒重无显著相关性；单位面积有效穗数与每穗粒数呈显著正相关。由不同施肥处理下品质性状相关性分析结果（表 8）可知，小麦籽粒硬度指数与蛋白质含量、湿面筋含量、沉淀值呈显著正相关，与淀粉含量呈显著负相关；蛋白质含量与湿面筋含量、沉淀值呈显著正相关，与淀粉含量呈显著负相关；淀粉含量与湿面筋含量、沉淀值呈显著负相关；湿面筋含量

表 6 不同施肥处理下株高与节间长的相关性分析
Table 6 Correlation analysis between plant height and internode length under different fertilization treatments

性状 Trait	株高 Plant height	第 1 节间长 1st internode length	第 2 节间长 2nd internode length	第 3 节间长 3rd internode length	第 4 节间长 4th internode length	第 5 节间长 5th internode length
株高 Plant height	1.00					
第 1 节间长 1st internode length	0.94**	1.00				
第 2 节间长 2nd internode length	0.96**	0.96**	1.00			
第 3 节间长 3rd internode length	0.67	0.77*	0.64	1.00		
第 4 节间长 4th internode length	0.94**	0.99**	0.92**	0.84**	1.00	
第 5 节间长 5th internode length	0.87**	0.70	0.75*	0.33	0.70	1.00

“*”表示 $P < 0.05$ ，“**”表示 $P < 0.01$ ，下同。
“*” indicates $P < 0.05$ ，“**” indicates $P < 0.01$, the same below.

表 7 不同施肥处理下产量结构相关性分析
Table 7 Correlation analysis of yield structure under different fertilization treatments

性状 Trait	有效穗数 Effective spike number	每穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-grain weight	产量 Yield	籽粒容重 Grain bulk density
有效穗数 Effective spike number	1.00				
每穗粒数 Grain number per spike	0.98**	1.00			
千粒重 1000-grain weight	0.68	0.59	1.00		
产量 Yield	0.99**	0.98**	0.68	1.00	
籽粒容重 Grain bulk density	0.32	0.35	0.37	0.42	1.00

表 8 不同施肥处理下品质性状相关性分析
Table 8 Correlation analysis of quality traits under different fertilization treatments

性状 Trait	硬度指数 Hardness index	出粉率 Flour yield rate	蛋白质含量 Protein content	淀粉含量 Starch content	湿面筋含量 Wet gluten content	沉淀值 Sedimentation value
硬度指数 Hardness index	1.00					
出粉率 Flour yield rate	0.50	1.00				
蛋白质含量 Protein content	0.96**	0.32	1.00			
淀粉含量 Starch content	-0.96*	-0.28	-0.98**	1.00		
湿面筋含量 Wet gluten content	0.97**	0.40	0.99**	-0.98**	1.00	
沉淀值 Sedimentation value	0.87*	0.53	0.90**	-0.85*	0.92**	1.00

与沉淀值呈显著正相关。

2.6 不同施肥处理下经济效益分析

由不同施肥处理下经济效益分析结果（表 9）可知，不同施肥处理下单位面积产值及净效益变化较大，如肥料运筹方式不当，则经济效益下降。CK 处理虽然能够节省人工和时间，但是后期可能脱力缺肥，导致植株早衰，影响产量。经核算，

T7 虽较 T6 处理增产 4.5%，但由于肥料成本增加过多，总体经济效益不及 T6 处理，在大面积生产中需结合经济效益综合考量施肥方式。总体而言，在小麦生产中应当注重拔节孕穗肥的施用，T6 处理在试验模式中可以取得最好的经济效益，如果采用一基一追的施肥模式，则采用 T4 处理能够取得较好的经济效益。

表 9 不同施肥处理下经济效益分析
Table 9 The economic benefits analysis under different fertilization treatments

处理 Treatment	肥料成本 Fertilizer cost	追肥人工成本 Labor cost of topdressing	其他成本 Other cost	产值 Output value	净效益 Net benefit
CK	3969.00	0.00	7556.70	16 662.22	5136.52
T1	2926.50	150.00	7556.70	12 907.10	2273.90
T2	3336.75	150.00	7556.70	18 456.91	7413.46
T3	2836.41	150.00	7556.70	14 916.17	4373.06
T4	2926.50	150.00	7556.70	20 484.53	9851.33
T5	2483.04	150.00	7556.70	15 137.06	4947.32
T6	2486.91	450.00	7556.70	22 302.41	11808.80
T7	3686.91	450.00	7556.70	23 306.93	11613.32

缓释掺混肥料（26-12-12）3780 元/t，尿素、复合肥（15-15-15）2300 元/t，复合肥（30-0-8）2220 元/t，土壤修复剂 4000 元/t，人工补施肥 150 元/hm²，其他成本 7556.7 元/hm²（以当年扬州地区平均成本计算，包含机械作业、种子、农药、灌溉、用工和保险等）。Slow-release fertilizer (26-12-12) costs 3780 yuan/t, urea and compound fertilizer (15-15-15) costs 2300 yuan/t, compound fertilizer (30-0-8) costs 2220 yuan/t, soil amendment costs 4000 yuan/t, manual fertilization costs 150 yuan/hm², and other costs are 7556.7 yuan/hm² (calculated based on the average cost in Yangzhou that year, including mechanical operations, seeds, pesticides, irrigation, labor, insurance, etc.).

3 讨论

在传统小麦种植模式中，部分农户不分苗情状况抢在早春降水前后大量追施返青肥，往往导致麦苗低效无效生长、群体恶化，成穗率降低，传统重返青肥和轻拔节肥的施肥方式不利于小麦高产稳产，不当的施肥方式甚至会导致亏损。

土壤修复剂产品原理：（1）根源性提高肥料效率。该纳米材料比表面积大，可与自由基结合，帮助营养元素释放，同时可改变水分子排列方式和能态、增加水的溶解能力、提高水的细胞生物透性等，从而提高营养转化率。（2）系统性持续修复土壤。该纳米材料能改良土壤胶体结构和团粒结构，提高土壤透气性和透水性，改善土壤板结、沙化和盐碱化等现象。（3）结构性减少植物病虫害。该纳米微粒得益于其物理特性，可以进入真菌及害虫幼体，破坏真菌结构，抑制幼虫生长，从而提高植物的抗病虫害能力。目前对于土壤修复剂应用在小麦生产的研究较少，大多单一聚焦缓释肥或土壤修复，本研究结合土壤修复剂、缓释肥和常规肥料，基于 8 种不同施肥模式研究

肥料运筹对小麦农艺性状、籽粒品质 and 经济效益的影响，探索小麦节本增效的轻简化栽培思路。试验结果表明，肥料运筹模式与土壤修复剂的施用对稻茬小麦的产量构成及籽粒品质有显著影响。在缓释肥与尿素分阶段施用（T2、T4、T6 和 T7）处理下，小麦产量显著高于 CK 处理，说明合理进行速效氮和缓释肥的联合应用可以有效调节小麦穗粒结构，对于提升小麦单产有益，这与人前^[13]关于分阶段供氮可协调群体结构增加小麦产量的研究结果一致。T6 处理基肥施足、苗期施用适量尿素、拔节期追施氮钾复合肥，有助于分蘖成穗，提高单位面积有效穗数和每穗粒数；孕穗期再增施适量尿素作为穗肥，可有效促进小麦籽粒灌浆，同时避免早衰；在此基础上增施土壤修复剂可进一步提升小麦产量和籽粒蛋白质含量。T7 处理下的小麦产量最高（9711.22 kg/hm²），表明土壤修复剂可能通过改善土壤理化性质，如增加微量元素和优化微生物活性^[14-15]，与常规肥协同作用，显著提升了每穗粒数和千粒重等产量结构性状，同时也有利于提高籽粒蛋白质和湿面筋含量等品质性状。这一试验结果与土壤修复剂

在水稻^[16]和辣椒^[17]等作物上的应用效果类似,其机制可能与修复剂中硅和钛等微量元素促进植株根系养分吸收有关。

T1 处理导致麦苗返青期旺长,茎蘖群体间竞争加剧,成穗率降低,无效分蘖增多,最终有效穗数减少,同时大量速效氮肥在返青期施用也不利于小麦籽粒灌浆和籽粒品质的形成,从而导致减产。这印证了传统施肥模式中重返青肥和轻拔节肥的弊端,且小麦起身期前追施氮肥易导致小麦早衰,产量降低^[18-19]。研究^[20]表明,增加氮肥用量可显著提高籽粒产量和蛋白质含量,并且增加中后期氮肥施用比例也有相同的效应。在本试验中,拔节孕穗肥的施用(T4、T6 和 T7)显著提高了每穗粒数与千粒重,同时对于提高籽粒蛋白质含量有正向作用,表明生育中后期氮素供应对穗部发育和籽粒灌浆以及籽粒蛋白质的积累具有关键作用。类似地,虽然减氮 15%(T3 和 T5)处理的产量低于 CK,但 T5 相较于 T3 处理取得了更好的千粒重和籽粒蛋白质含量。T6 和 T7 处理有利于提升单位面积有效穗数、每穗粒数和千粒重等产量相关性状,从而取得较高的产量,同时拔节肥和孕穗肥的施用可以有效提高小麦出粉率和籽粒蛋白质含量,并取得更高的湿面筋含量和沉淀值。值得注意的是,T7 处理使得小麦植株的株高显著增加,第 1、2、4 和 5 节间长均显著增加,对于易倒伏品种可能增加倒伏风险,应当注意在小麦拔节前适当化控,抑制小麦植株基部节间的伸长生长,避免后期倒伏。

总体而言,小麦大面积生产中应该根据目标产量、环境条件以及品质特性等综合考量,精确定量施肥在试验模式中能够取得最高的产量和经济效益,其肥料成本也较低,是小麦大面积种植较为适宜的生产方式。若侧重于减少施肥次数,则推荐缓控释肥与常规肥结合施用,采用 T4 处理作为拔节肥追施的模式,较 T6 处理可以减少 2 次施肥,相对减少人工、节约作业时间,并取得较好的经济效益。

4 结论

合理施用拔节孕穗肥是小麦产量提升的关键,若采取一基一追的施肥模式,则拔节期追肥

的方式相比于返青期追肥更好,T4 处理能够取得更高的产量。在大面积生产中,推荐使用 T6 处理,能够以较低的成本取得较高的产量,经济效益较好。小麦产量与籽粒品质均受肥料运筹模式的影响,尤其以拔节孕穗肥施用对小麦产量和品质影响显著,生育中后期(拔节孕穗期)追施氮肥是调控小麦籽粒蛋白质含量、淀粉含量、湿面筋含量和沉淀值等品质性状的关键,在实际生产中应根据强筋小麦和弱筋小麦等不同品质目标调整肥料运筹模式,以满足相应的生产需求。

参考文献

- [1] 刘萍,郭文善,徐月明,等. 种植密度对中、弱筋小麦籽粒产量和品质的影响. 麦类作物学报, 2006, 26(5): 117-121.
- [2] 熊又升,袁家富,郝福新,等. 氮肥用量对不同小麦品种产量和品质的影响. 华中农业大学学报, 2009, 28(6): 697-700.
- [3] 柏军兵,王艳杰,王德梅,等. 强筋小麦产量和品质对不同土壤条件及施氮水平的响应. 作物杂志, 2022(1): 167-173.
- [4] 魏鹏,张培文,李文阳,等. 氮肥对不同类型小麦产量与品质的影响及调控差异. 江汉大学学报, 2023, 51(5): 24-31.
- [5] 彭龙腾. 氮肥对小麦生长的影响. 安徽农学通报, 2012, 18(22): 51, 63.
- [6] 袁新民,杨学云,同延安,等. 不同施氮量对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积的影响. 干旱地区农业研究, 2001, 19(1): 8-13, 39.
- [7] 邵慧霞,赵品恒,盛金元,等. 不同水稻缓释肥机插一次施肥对比试验. 现代农业科技, 2021(16): 23-24.
- [8] 王世锋,鲁学文,孙占勇,等. 玉米缓释肥氮素养分利用率试验初探. 农业科技与信息, 2022(4): 17-19.
- [9] 黄化刚,刘世碧,班国军,等. 多孔改良剂对毕节烟区植烟土壤重金属铬镉铅的影响. 土壤, 2019, 51(2): 346-351.
- [10] 姬鸿飞,王李芳,贺杰,等. 施用土壤修复剂对烤烟田间长势及产质量的影响. 四川农业科技, 2024(7): 42-45.
- [11] 徐成勇,肖克智,汪蓉,等. 生物克菌灵和土壤修复剂对马铃薯连作的影响. 现代农业科技, 2024(1): 77-80.
- [12] 金树杰,周晓广,徐怀志,等. 两种不同土壤改良物料对重茬大蒜的影响. 智慧农业导刊, 2021, 1(22): 30-32.
- [13] 杜小凤,顾大路,杨文飞,等. 不同播种方式和肥料运筹对稻茬小麦生长发育及产量的影响. 江苏农业科学, 2021, 49(23): 66-71.
- [14] 崔佳,崔莹,张晓红,等. 生物菌肥配施土壤调理剂对连作番茄产量及土壤微生态的影响. 北方园艺, 2025(10): 103-110.
- [15] 司知远,范分良,王赛,等. 稀土镧和铈元素对西红柿幼苗生长及其根系分泌物的影响. 中国土壤与肥料, 2023(2): 202-208.
- [16] 马广福,李莉,夏润,等. 晨奥润泽土壤修复剂在贺兰县盐碱地稻田不同用量效果研究. 宁夏农林科技, 2024, 65(4): 17-20.
- [17] 杨志刚,叶英杰,常海文,等. 微生物菌肥及土壤修复剂对干制辣椒生长、品质及产量的影响. 北方园艺, 2020(19): 1-7.
- [18] 岳寿松,于振文,余松烈,等. 不同生育时期施氮对冬小麦旗叶衰老和粒重的影响. 中国农业科学, 1997, 30(2): 42-46.
- [19] 孙昌兵,沈阳. 不同氮肥运筹对冬小麦宁麦 13 产量及效益的影响. 现代农业科技, 2018(11): 21-22.
- [20] 戴廷波,孙传范,荆奇,等. 不同施氮水平和基追比对小麦籽粒品质形成的调控. 作物学报, 2005, 31(2): 248-253.

Effects of Soil Amendment and Different Fertilizer Management Modes on the Yield and Quality of Wheat Following Rice

Chen Jingdu¹, Hong Ye¹, Tang Jianpeng¹, Deng Qinyu¹, Liu Shaogui¹, Zhang Yan², Feng Ye²

(¹Yangzhou Agricultural Technology Comprehensive Service Center, Yangzhou 225001, Jiangsu, China;

²Agricultural Technology Comprehensive Service Center of Jiangdu District, Yangzhou 225200, Jiangsu, China)

Abstract Scientific fertilizer management is an important way to increase yield and improve quality of wheat following rice. In the 2023-2024 season, eight fertilization modes were established in the sandy soil region along the Yangtze River in Yangzhou to explore the effects of different fertilizer management modes and soil amendments on the yield and quality of Yangmai 34. The results showed that the precise quantitative fertilization (four applications: base, seedling, jointing, and booting fertilizers) combined with soil amendment treatment performed the best. Its effective spikes per unit area ($497.36 \times 10^4/\text{ha}$), grains per spike (46.26), 1000-grain weight (43.61 g), and yield (9711.22 kg/ha) were significantly higher than those of the control (one-time base application of slow-release fertilizer). The grain flour yield rate (64.98%), protein content (14.61%), wet gluten content (31.47%), and sedimentation value (35.15 mL) were also significantly higher than those of the control. Large application of urea during the regreening stage (base fertilizer: regreening fertilizer=6:4) led to excessive growth of wheat seedlings and a reduced spike-formation rate, resulting in significant yield decrease of 22.54% compared to the control. Under the mode of reducing total nitrogen application by 15% (base fertilizer: regreening or jointing fertilizer=6:4), the yield was significantly lower than that of the control, but topdressing at the jointing stage (base fertilizer: jointing fertilizer=6:4) could improve grain quality. In summary, emphasis should be placed on the application of jointing and booting fertilizers in wheat production. Precise quantitative fertilization can achieve higher yield and economic benefits with lower fertilizer costs. If the focus is on reducing fertilization frequency, it is recommended to combine slow-controlled release fertilizer with conventional fertilizer, adopting a mode of 60% nitrogen as slow-release fertilizer for base application and 40% nitrogen as urea for topdressing at the jointing stage to achieve better economic benefits.

Key words Wheat following rice; Slow-release fertilizer; Fertilizer management; Soil amendment; Yield; Quality