

DOI: 10.11766/trxb202408060321

CSTR: 32215.14.trxb202408060321

谢发萍, 任涛, 丛日环, 陆志峰, 张洋洋, 鲁剑巍, 廖世鹏. 基于冬油菜产量和环境友好的氮肥用量研究[J]. 土壤学报, 2025, 62(6): 1780–1791.

XIE Faping, REN Tao, CONG Rihuan, LU Zhifeng, ZHANG Yangyang, LU Jianwei, LIAO Shipeng. Research on Yield and Environmentally Friendly Nitrogen Fertilizer Rate for Winter Oilseed Rape[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(6): 1780–1791.

基于冬油菜产量和环境友好的氮肥用量研究*

谢发萍, 任涛, 丛日环, 陆志峰, 张洋洋, 鲁剑巍[†], 廖世鹏

(华中农业大学资源与环境学院, 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 在冬油菜生产中普遍存在为追求高产而过量施用氮肥的情况, 导致经济收获偏低和氮素大量损失, 进而增加了环境风险, 确定适宜的氮肥用量对于实现冬油菜高产和环境友好具有重要意义。于 2019—2020 年在长江中下游冬油菜主产区湖北荆门、安徽池州和江苏镇江三个试验点开展田间试验, 设置五个氮肥用量 (0、90、180、270 和 360 kg·hm⁻²), 探究氮肥用量对冬油菜产量、氮素积累量、无机氮残留量及氮素表观平衡的影响, 并综合评估产量与氮输入-输出平衡的关系以确定基于产量和环境友好的冬油菜适宜氮肥用量。结果表明, 施氮显著提高油菜籽产量, 并有随着氮肥用量的增加产量不断提升的趋势, 当氮肥用量达到 270 kg·hm⁻² 时产量趋于稳定, 三试验点各两个品种的平均产量为 3 146 kg·hm⁻²。地上部氮素积累量的变化趋势与产量一致, 当高量或过量施氮时非籽粒器官的氮素积累量明显提高, 以施氮 270 kg·hm⁻² 为参照, 当氮肥用量提高至 360 kg·hm⁻² 时, 植株氮素积累量平均增加 6.85%, 非籽粒器官中的氮素比例平均提高 0.49 个百分点。油菜收获期土壤无机氮残留量及土壤-作物系统的氮素表观平衡量与施氮量呈正相关, 随着氮肥用量的增加, 二者呈现出先缓慢增长后急剧上升的变化趋势。当氮肥施用量为 270 kg·hm⁻² 时, 无机氮残留量和氮素表观盈余平均分别为 40 kg·hm⁻² 和 95 kg·hm⁻²。基于维持作物产量和土壤肥力所允许的氮素表观盈余量 (80 kg·hm⁻²), 湖北、安徽和江苏三个试验点推荐氮肥用量平均分别为 207、219 和 250 kg·hm⁻², 相应的产量平均分别为 3 083、3 054 和 3 149 kg·hm⁻², 耕层土壤无机氮残留量分别为 22、45 和 51 kg·hm⁻², 该推荐量既可保证冬油菜稳产又可控制氮素损失风险, 有助于实现冬油菜高产和环境友好的双重目标。

关键词: 冬油菜; 产量; 氮肥用量; 氮素表观盈余; 无机氮残留

中图分类号: S565.4 文献标志码: A

Research on Yield and Environmentally Friendly Nitrogen Fertilizer Rate for Winter Oilseed Rape

XIE Faping, REN Tao, CONG Rihuan, LU Zhifeng, ZHANG Yangyang, LU Jianwei[†], LIAO Shipeng

(Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, 430070, China)

Abstract: [Objective] In winter oilseed rape production, there is a widespread practice of overapplying nitrogen fertilizer in

* 国家重点研发计划项目 (2018YFD0200900) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFD0200900)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lunm@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 谢发萍 (1996—), 女, 河南信阳人, 博士研究生, 主要研究方向为作物养分管理。E-mail: xiefaping@webmail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2024-08-06; 收到修改稿日期: 2025-03-27; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-06-06

pursuit of high yields, which leads to low economic returns and significant nitrogen losses, thereby increasing environmental risks. Determining the appropriate nitrogen fertilizer application rate is crucial for achieving high yields and environmental sustainability in winter oilseed rape. 【 Method 】 Field experiments were conducted in three major winter rapeseed production areas in the middle and lower reaches of the Yangtze River-Jingmen in Hubei Province, Chizhou in Anhui Province, and Zhenjiang in Jiangsu Province-from 2019 to 2020. Five nitrogen fertilizer application rates (0, 90, 180, 270, and 360 kg·hm⁻²) were set to investigate the effects of nitrogen fertilizer rates on winter oilseed rape yield, nitrogen accumulation, residual inorganic nitrogen in soil, and apparent nitrogen balance. The relationship between yield and nitrogen input-output balance was comprehensively evaluated to determine the appropriate nitrogen fertilizer application rate for winter rapeseed that is both high-yielding and environmentally friendly. 【 Result 】 The results showed that nitrogen application significantly increased oilseed rape yield, with a trend of increasing yield as the nitrogen application rate increased. When the nitrogen application rate reached 270 kg·hm⁻², the yield tended to stabilize, with an average yield of 3 146 kg·hm⁻² for the two varieties at each of the three experimental sites. The trend of nitrogen accumulation in the aboveground parts was consistent with that of yield. When high or excessive nitrogen was applied, the nitrogen accumulation in non-seed organs significantly increased. Compared with 270 kg·hm⁻², when the nitrogen application rate increased to 360 kg·hm⁻², the average nitrogen accumulation in plants increased by 6.85%, and the proportion of nitrogen in non-seed organs increased by an average of 0.49 percentage points. The residual inorganic nitrogen in the soil at the oilseed rape harvest stage and the nitrogen balance of the soil-plant system were positively correlated with the nitrogen application rate, showing a trend of slow growth followed by a sharp increase as the nitrogen application rate increased. When the nitrogen application rate was 270 kg·hm⁻², the average residual inorganic nitrogen and apparent nitrogen surplus were 40 kg·hm⁻² and 95 kg·hm⁻², respectively. 【 Conclusion 】 Based on the allowable apparent nitrogen surplus for maintaining crop yield and soil fertility (80 kg·hm⁻²), the recommended nitrogen fertilizer application rates for the three experimental sites in Hubei, Anhui, and Jiangsu were 207, 219, and 250 kg·hm⁻², respectively, with corresponding average yields of 3 083, 3 054, and 3 149 kg·hm⁻², and residual inorganic nitrogen in the topsoil of 22, 45, and 51 kg·hm⁻², respectively. These recommended rates can ensure stable winter oilseed rape yields while controlling the risk of nitrogen loss, contributing to achieving the dual goals of high yield and environmental friendliness in winter oilseed rape production.

Key words: Winter oilseed rape; Yield; Nitrogen fertilizer rate; Apparent nitrogen surplus; Inorganic nitrogen residue

油菜是食用植物油生产的主要来源，但近十年来全国产量停滞在 1 380 万 t 左右，难以满足人口增长带来的需求增加^[1]。氮肥是提高全球农业生产力的重要因素，我国 99% 的油菜种植区施用氮肥有效，平均增产率可达 87.4%^[2]。然而，由于农民对高产的过度追求，导致氮肥的过量使用。值得注意的是，增加氮肥投入并不能无限提升产量，甚至可能导致产量下降^[3]。此外，我国作物氮肥利用率较低，氮肥施入土壤后，至少有超过 50% 的比例通过一系列过程损失，造成环境风险，甚至威胁人类生存^[4-5]。因此，通过氮肥管理保持油菜高产和降低环境风险，实现油菜生产的可持续发展至关重要。

确定适宜的氮肥用量是氮肥管理的关键技术之一。研究表明，合理施用氮肥可减少 30%~70% 的氮损失，并提高 10%~30% 的产量^[6]。通常，最佳施氮量是通过分析产量、经济效益和氮素吸收量等

特定指标之间的关系曲线最大值来确定的。由于农民对作物产量尤为关注，因此产量是最常用的参考指标^[7]。随着环保意识的增强，科研工作者逐渐在满足产量目标的基础上考虑肥料的环境效应。例如，基于产量和农学效率构建的小麦养分专家系统为智能化施肥提供了指导^[8]。此外，氮肥用量也可根据土壤氮素平衡进行推荐。研究显示，水稻适宜氮肥用量为 217 kg·hm⁻² 时，土壤氮素处于平衡状态^[9]。欧盟氮素专家小组提出构建氮肥输入-输出模型，将最大氮盈余设置为 80 kg·hm⁻²，最低生产力水平为 80 kg·hm⁻²·a⁻¹，氮素利用率范围为 50%~90%，以评价氮肥用量是否合理。该模型能够反映当前氮素管理水平，并为改进氮肥用量提供重要参考^[10]。

前人通过施氮量与产量的肥料效应方程确定了江浙地区不同田块冬油菜适宜施氮量范围为 90~

318.5 kg·hm⁻², 区域平均适宜氮肥用量为 199 kg·hm⁻²[7]。另有研究通过对长江流域 1 800 多个田间试验的整理, 基于经济效益目标确定了长江流域不同区域冬油菜的适宜平均氮肥用量[2]。目前, 在冬油菜主产区同时考虑产量和环境友好双目标以确定适宜氮肥用量的相关研究较少。因此, 本研究于 2019—2020 年在长江流域冬油菜主产区湖北荆门、安徽池州和江苏镇江三个地点进行了冬油菜不同品种及氮肥用量的田间试验, 旨在测试冬油菜产量和无机氮残留对氮肥施用的响应。研究的主要目标是探明不同地点及油菜品种在不同氮肥投入量下的产量和无机氮残留情况, 确定产量、无机氮和氮素表观平衡与氮肥用量之间的函数关系, 并探索和评价在产量和环

境友好双目标下的推荐氮肥用量。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2019 年 10 月至 2020 年 5 月分别在湖北省荆门市(以下简称湖北)、安徽省池州市(以下简称安徽)和江苏省镇江市(以下简称江苏)进行。各试验田的前茬作物均为水稻, 0~20 cm 耕层土壤的基础理化性质如表 1 所示, 江苏试验点的有机质和全氮含量最高, 而安徽试验点最低; 相反, 土壤无机氮(铵态氮和硝态氮之和)含量则在安徽试验点最高, 江苏试验点最低。

表 1 试验点基础土壤理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soils at the study sites

地点 Site	pH	有机质 Organic matter / (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen / (g·kg ⁻¹)	无机氮 Inorganic nitrogen / (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus / (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium / (mg·kg ⁻¹)
湖北 Hubei	5.14	21.4	0.99	6.06	22.77	147
安徽 Anhui	6.48	16.18	0.87	7.03	18.01	106
江苏 Jiangsu	7.34	30.3	1.64	5.28	23.39	285

1.2 试验设计

本试验采用氮肥用量和油菜品种双因素试验设计, 设置了 5 个氮肥用量水平, 分别为 0、90、180、270 和 360 kg·hm⁻² (以 N 计), 分别记为 N₀、N₉₀、N₁₈₀、N₂₇₀ 和 N₃₆₀; 选用 2 个冬油菜品种, 分别为大地 199 品种和当地品种(湖北点为华油杂 62、安徽点为沔油 737、江苏点为宁杂 1838)。每个处理设置 3 次重复, 小区面积为 20 m² (10 m×2 m), 采用完全随机区组排列。大地 199 具有高产、高油及优质等一系列优异性状, 适宜在长江流域油菜主产区种植[11]。

供试肥料包括尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)、氯化钾(含 K₂O 60%)和硼砂(含 B 11%)。氮肥施用方式为: 60%作为基肥, 苗期和越冬期各追施 20%; 磷肥、钾肥和硼肥的用量分别为 90 kg·hm⁻² (以 P₂O₅ 计)、120 kg·hm⁻² (以 K₂O 计)和 9 kg·hm⁻² (以硼砂计), 全部作为基肥一次性施用。播种采用直播方式进行, 湖北、安徽和江苏播

种时间分别为 2019 年 10 月 10 日、2019 年 10 月 18 日和 2019 年 10 月 16 日, 收获时间分别为 2020 年 5 月 10 日、2020 年 5 月 12 日和 2020 年 5 月 14 日, 播种量均为 4.50 kg·hm⁻²。其他田间管理措施均按照当地农技推广中心的推荐方案执行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品的采集与分析 在冬油菜基肥施用前和收获后分别进行土壤样品的采集。基肥施用前以整个试验田块为采样单元, 收获后则以每个小区为采样单元。在各采样单元内均采用“S”形布点法均匀设置 15 个采样点, 采集 0~20 cm 耕层土壤样本, 并采用环刀法测定土壤容重。基肥施用前采集的土壤样品按照实验室常规方法测定 pH、有机质、全氮、无机氮(铵态氮与硝态氮之和)、有效磷和速效钾等基础理化性质[12]。收获后采集的土壤样品仅用于测定土壤无机氮含量, 样品在采集后立即放置于 4 °C 冰箱保存。称取鲜土 10 g 放入浸提瓶, 加入 50 mL 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液进行振荡浸提。通过

连续流动分析仪 (AA3, SEAL, 德国) 将浸提液与试剂均匀混合并发生反应, 生成有色化合物经过检测器比色, 软件对比色信号进行自动分析和计算, 最终得到土壤铵态氮和硝态氮含量。

1.3.2 产量构成因子调查 在冬油菜收获前 3 d 对各小区的产量构成因子进行调查^[13], 内容包括收获密度、单株角果数和每角粒数。收获后, 随机选取 1 000 粒风干冬油菜籽, 使用千粒板测定其质量以确定千粒重。

1.3.3 植株氮素含量测定 在冬油菜成熟期收获前, 对各试验点的所有小区进行取样, 每小区随机取样 6 株。将样品风干脱粒后, 分别统计地上部的茎秆、角壳和籽粒的质量。各部位样品经 60 °C 烘干、磨细并过筛后用于养分测定。植株样品采用 H₂SO₄-H₂O₂ 联合消煮处理, 使用流动注射分析仪 (AA3, SEAL, 德国) 测定全氮含量^[12]。

1.3.4 测产及地上部生物量测定 收获时对各试验点的所有小区进行单打单收, 统一记录籽粒实际产量, 并根据取样所得茎秆、角壳和籽粒的质量比例, 推算地上部总干物质量。

1.4 参数计算与统计分析

冬油菜各器官氮积累量 / (kg·hm⁻²) = 各器官全氮含量 / (g·kg⁻¹) × 各器官干物质量 / (kg·hm⁻²)

冬油菜地上部氮积累量 / (kg·hm⁻²) = ∑各器官氮积累量 / (kg·hm⁻²)

各部位分配比例 / % = 各器官氮素积累量 (kg·hm⁻²) ÷ 地上部氮积累量 (kg·hm⁻²) × 100

耕层 (0~20 cm) 土壤无机氮残留量 / (kg·m⁻³) = 无机氮含量 / (mg·kg⁻¹) × 土层深度 / m × 土壤容重 / (kg·m⁻³)

氮素利用率^[10] / % = 地上部氮积累量 (输出) / (kg·hm⁻²) ÷ 氮肥用量 (输入) / (kg·hm⁻²) × 100

氮素表观平衡^[10] / (kg·hm⁻²) = 氮肥用量 (输入) / (kg·hm⁻²) - 地上部氮积累量 (输出) / (kg·hm⁻²)

利用 SAS 9.4 软件采用线性加平台模型模拟氮肥用量与产量的关系, 方程为:

$$y=a+bx \quad (x < J) \quad (1)$$

$$y=P \quad (x \geq J) \quad (2)$$

式中, y 为油菜产量, kg·hm⁻²; x 为氮肥用量, kg·hm⁻²; a 为截距; b 为回归系数; J 为直线与平台的交点; P 为平台产量, kg·hm⁻²。

采用 Origin 2021 软件进行氮肥用量与氮素积累量、氮素表观平衡和无机氮残留的一元二次方程拟合。

通过线性加平台方程确定产量平台临界值下的氮肥用量; 通过一元二次方程拟合氮肥用量与氮素表观平衡的关系, 确定氮素表观平衡为 80 kg·hm⁻² 时的氮肥用量。对这两个氮肥用量进行比较, 选择较小值作为推荐氮肥用量。

数据采用 SPSS 22.0 软件进行描述性统计分析, 以评估每个参数的平均值和标准差, 使用邓肯 (Duncan) 新复极差检验法进行多重比较。使用 Origin 2021 软件绘图。

2 结 果

2.1 冬油菜籽粒产量及构成因子

通过分析三个地点四个品种的冬油菜产量, 发现氮肥用量显著影响产量 (表 2)。与 N₀ 处理相比, N₉₀、N₁₈₀、N₂₇₀ 和 N₃₆₀ 处理分别平均增产 89%、148%、191% 和 203%。随着氮肥用量的增加, 冬油菜产量显著增加, 当氮肥用量为 270 kg·hm⁻² 时, 产量趋于稳定, 平均为 3 146 kg·hm⁻²; 超过 270 kg·hm⁻² 后继续增施氮肥, 增产效果不显著。同一地点的不同品种间未观察到显著差异, 说明大地 199 品种适应性较强, 适宜在这三个地点种植, 其生长状况可代表该地块的氮素吸收利用情况。三个地点的基础地力存在显著差异, 在 N₀ 处理下, 同一品种 (大地 199) 在安徽点的菜籽产量最高, 较江苏和湖北分别高出 36% 和 100%。在 N₉₀ 处理下, 三点产量均迅速增加, 江苏和湖北增幅分别为 80% 和 143%, 显著高于安徽 (51%)。继续增加氮肥投入, 江苏点产量最高, 但三个地点的大地 199 品种间产量无显著差异。

产量构成因子在某种程度上可表征产量的内在变化因素。由表 3 可知, 施氮显著增加了单株角果

表 2 不同氮肥用量对冬油菜产量的影响

Table 2 Effects of different nitrogen fertilizer application rates on winter oilseed rape yield/ (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	湖北 Hubei			安徽 Anhui			江苏 Jiangsu		
	大地 199 Dadi199	华油杂 62 Huayouza62	平均 Average	大地 199 Dadi199	沔油 737 Fengyou737	平均 Average	大地 199 Dadi199	宁杂 1838 Ningza1838	平均 Average
N ₀	768dC	801d ^{ns}	785	1 533dA	1 660d ^{ns}	1 597	1 128dB	1 157d ^{ns}	1 143
N ₉₀	1 863cB	1 932c ^{ns}	1 898	2 308cA	2 490c ^{ns}	2 399	2 033cA	1 990c ^{ns}	2 012
N ₁₈₀	2 619bA	2 870b [*]	2 745	2 677bA	2 774b [*]	2 726	2 513bA	2 578b ^{ns}	2 546
N ₂₇₀	3 019aA	3 225a ^{ns}	3 122	3 006aA	3 113a ^{ns}	3 060	3 204aA	3 313a ^{ns}	3 259
N ₃₆₀	3 204aA	3 326a ^{ns}	3 265	3 023aA	3 182a ^{ns}	3 103	3 373aA	3 443a ^{ns}	3 408
平均 Average	2 295	2 431	2 363	2 509	2 644	2 577	2 450	2 496	2 473
方差分析 ANOVA	F 值 F-value								
氮肥 Nitrogen (N)	309.1 ^{***}			84.8 ^{***}			288.8 ^{***}		
品种 Cultivar (C)	6.8 [*]			5.0 [*]			0.9 ^{ns}		
氮肥×品种 N×C	0.6 ^{ns}			0.1 ^{ns}			0.3 ^{ns}		

注: N₀、N₉₀、N₁₈₀、N₂₇₀和 N₃₆₀分别表示氮肥用量为 0、90、180、270 和 360 kg·hm⁻²。表中不同小写字母表示在相同地点同一品种下不同氮处理间在 0.05 概率水平差异显著;不同大写字母表示同一品种(大地 199)在相同氮处理下不同地点间在 0.05 概率水平差异显著;上标表示同一地点同一氮处理下不同品种间在 0.05 概率水平差异显著。*表示 P<0.05, **表示 P<0.01, ***表示 P<0.001, ns 表示无显著差异。下同。Note: N₀, N₉₀, N₁₈₀, N₂₇₀, and N₃₆₀ represent nitrogen fertilizer rates of 0, 90, 180, 270, and 360 kg·hm⁻², respectively. Different lowercase letters in the table mean a significant difference at P<0.05 between different nitrogen treatments in the same site and cultivar; Different capital letters mean that the same Dadi 199 cultivar had a significant difference at P<0.05 among different sites under the same nitrogen treatment. The superscript means that there is a significant difference at P<0.05 between different cultivars under the same nitrogen treatment at the same site. *: P<0.05, **: P<0.01, ***: P<0.001, ns: no significant difference. The same below.

数和每角粒数,对收获密度和千粒重无显著影响。不同地点间大地 199 品种的产量构成因子存在差异。在 N₀处理下,安徽点的单株角果数显著高于湖北和江苏,与安徽点相比,湖北和江苏点平均分别下降 25.8%和 16.7%;增加氮肥用量至 90 kg·hm⁻²时,单株角果数各点间无显著差异。每角粒数和千粒重在不施氮时,与湖北点相比,安徽点和江苏点平均分别高 17.1%和 6.1%,安徽和江苏两点间无显著差异。当氮肥用量为 270 kg·hm⁻²时,湖北点的千粒重仍为三点中最低,而收获密度则显著高于安徽和江苏,每角粒数三点间无显著差异。这可以解释施氮后同一品种(大地 199)在不同地点间产量无显著差异的结果。

2.2 冬油菜地上部氮素积累量及分配比例

施氮显著增加了冬油菜地上部氮素积累量(图 1a~图 1c)。与 N₀相比, N₉₀、N₁₈₀、N₂₇₀和 N₃₆₀处理平均分别增加 122%、228%、338%和 371%。当氮肥用量为 270 kg·hm⁻²时,湖北、安徽和江苏氮素

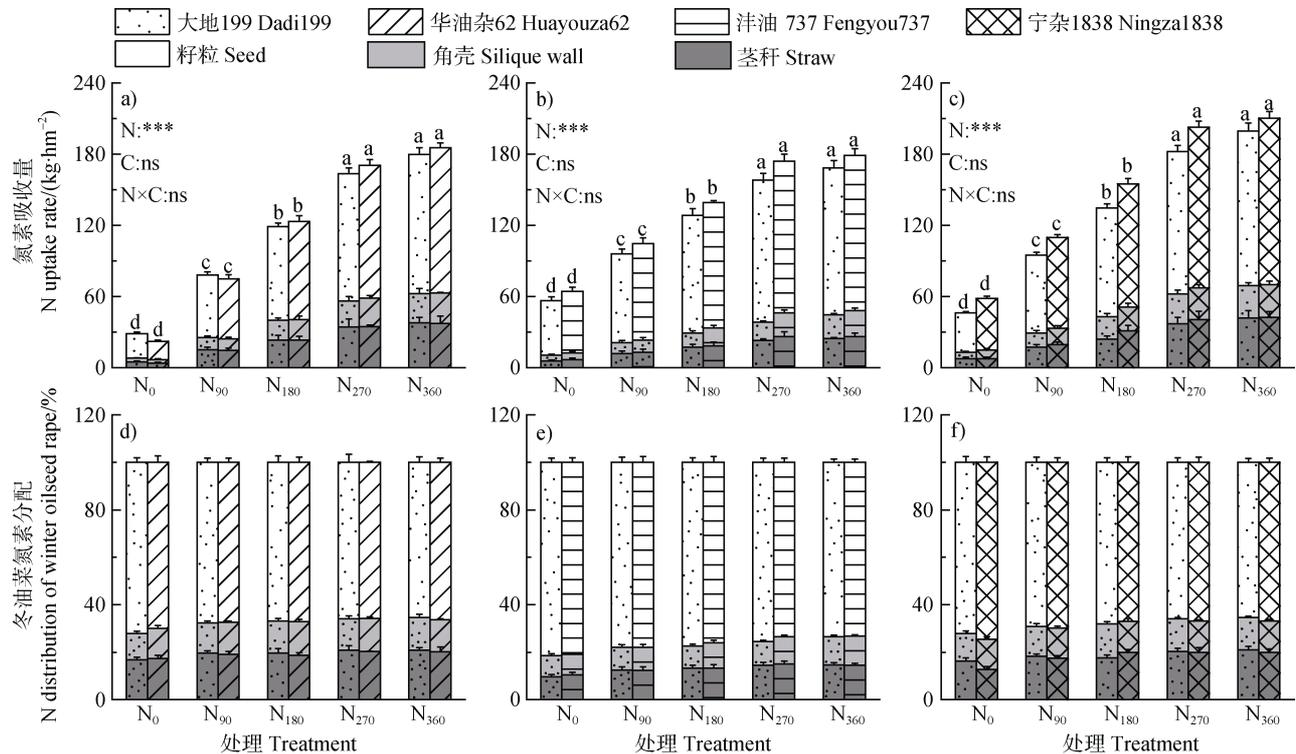
积累量平均分别为 167、166 和 192 kg·hm⁻²,继续增加氮肥无显著提升。品种间差异不显著,但大地 199 品种存在区域分异。低氮(N₀和 N₉₀)时湖北积累量低于江苏和安徽;高氮(≥180 kg·hm⁻²)时江苏点显著高于其他两地, N₂₇₀和 N₃₆₀处理下其积累量较安徽分别提高 15.4%和 18.5%。

氮素主要在籽粒中积累,其次是茎秆和角壳(图 1d~图 1f)。当氮肥用量为 270 kg·hm⁻²时,茎秆、角壳和籽粒中氮素占比平均分别为 18.5%、12.6%和 68.9%。降低氮肥投入量至 180 kg·hm⁻²时,籽粒中氮素占比平均增加 1.5 个百分点,而茎秆和角壳的氮素占比平均分别下降 1.4 和 0.1 个百分点。增加氮肥用量至 360 kg·hm⁻²时,籽粒中氮素占比平均减少 0.5 个百分点,茎秆和角壳则平均分别增加 0.1 和 0.4 个百分点。品种间氮素分配比例无显著差异,但同一品种在不同地点存在差异。安徽点籽粒氮素占比显著高于湖北和江苏两点,氮肥用量为 270 kg·hm⁻²时,安徽、湖北和江苏籽粒氮素占比分别为 75.5%、65.9%和 66.0%。

表 3 不同氮肥用量对冬油菜产量构成因子的影响

Table 3 Effects of different nitrogen fertilizer application rates on yield components of winter oilseed rape

地点 Site	品种 Cultivar	处理 Treatment	收获密度 Plant density / (Plant·m ⁻²)	单株角果数 Number of pods /No.	每角粒数 Seed number / (No.pod ⁻¹)	千粒重 1000-seed weight /g
湖北 Hubei	大地 199 Dadi199	N ₀	24.0bB	49.0eB	16.3cB	4.45aB
		N ₉₀	25.2abA	109.7dA	19.0bB	4.43aB
	华油杂 62 Huayouza62	N ₁₈₀	26.7aA	127.3cA	19.8bB	4.42aB
		N ₂₇₀	26.4aA	144.0bA	22.3aA	4.48aB
		N ₃₆₀	25.0abA	160.7aAB	23.0aA	4.41aC
		平均 Average	25.5	118.1	20.1	4.44
		N ₀	20.4b*	65.0e*	17.9c ^{ns}	3.71ab ^{***}
	华油杂 62 Huayouza62	N ₉₀	23.3a ^{ns}	131.3d**	21.1b ^{ns}	3.80a ^{***}
		N ₁₈₀	24.0a ^{ns}	164.7c**	21.5ab ^{ns}	3.64b ^{***}
		N ₂₇₀	25.0a ^{ns}	187.3b**	23.3a ^{ns}	3.67b ^{***}
N ₃₆₀		23.3a**	202.7a**	23.3a ^{ns}	3.73ab ^{***}	
平均 Average		23.2	150.2	21.4	3.71	
安徽 Anhui	大地 199 Dadi199	N ₀	27.3aA	66.0cA	18.9bA	4.76abA
		N ₉₀	26.0abA	104.7bAB	22.0aA	4.62cA
	华油杂 62 Huayouza62	N ₁₈₀	24.3bcAB	113.0bB	23.3aA	4.65bcA
		N ₂₇₀	25.0bcAB	137.0aA	23.5aA	4.71abcA
		N ₃₆₀	23.0cB	146.7aB	23.9aA	4.79aA
		平均 Average	25.1	113.5	22.3	4.71
		N ₀	28.0a ^{ns}	78.7d ^{ns}	20.3c ^{ns}	3.81a ^{***}
	华油杂 62 Huayouza62	N ₉₀	26.0ab ^{ns}	136.7c**	22.3b ^{ns}	3.61b ^{***}
		N ₁₈₀	24.3bc ^{ns}	154.7b**	23.7ab ^{ns}	3.54b ^{***}
		N ₂₇₀	24.7bc ^{ns}	162.3b**	25.3a ^{ns}	3.87a ^{***}
N ₃₆₀		22.7c ^{ns}	181.0a**	25.3a ^{ns}	3.81a ^{***}	
平均 Average		25.1	142.7	23.4	3.73	
江苏 Jiangsu	大地 199 Dadi199	N ₀	26.0aAB	55.0eB	19.3cA	4.68aA
		N ₉₀	24.7bA	95.7dB	21.3bA	4.89aA
	华油杂 62 Huayouza62	N ₁₈₀	23.3cB	119.3cAB	22.3bA	4.68aA
		N ₂₇₀	24.7bB	136.3bA	24.0aA	4.76aA
		N ₃₆₀	21.3dC	169.0aA	25.0aA	4.64aB
		平均 Average	24	115.1	22.4	4.73
		N ₀	25.3a ^{ns}	60.3d ^{ns}	20.3c ^{ns}	4.27ab**
	宁杂 1838 Ningza1838	N ₉₀	24.3ab ^{ns}	93.3c ^{ns}	22.0b ^{ns}	4.37a ^{ns}
		N ₁₈₀	24.0b ^{ns}	122.3b ^{ns}	25.0a*	4.17b**
		N ₂₇₀	23.3b*	166.7a**	25.3a ^{ns}	4.22ab**
N ₃₆₀		21.7c ^{ns}	178.3a ^{ns}	26.3a ^{ns}	4.18b**	
平均 Average		23.7	124.2	23.8	4.24	



注：不同小写字母表示同一地点同一品种不同氮肥用量间在 0.05 概率水平差异显著。N 为氮肥用量，C 为品种，N×C 表示氮肥用量和品种间的交互作用。下同。Note: Different lowercase letters in the figure mean significant difference at $P < 0.05$ between different nitrogen treatments in the same site and cultivar. N refers to the rate of nitrogen fertilizer, C stands for the cultivar, and N×C represents the interaction between the rate of nitrogen fertilizer and the cultivar. The same below.

图 1 氮肥对收获期地上部氮素积累量及分配的影响 (a 和 d 为湖北、b 和 e 为安徽、c 和 f 为江苏)

Fig. 1 Effect of nitrogen fertilizer on above-ground nitrogen accumulation and distribution ratio during harvest (a. and d. are Hubei, and e. are Anhui, and c. and f. are Jiangsu)

2.3 耕层土壤无机氮残留

施氮显著增加了冬油菜收获后耕层土壤的无机氮残留量 (图 2), 且随着氮肥用量增加, 无机氮残留量显著上升。与 N₀ 处理相比, N₉₀、N₁₈₀、N₂₇₀ 和 N₃₆₀ 处理的无机氮残留量平均分别增加 14.1%、46.7%、67.3% 和 93.6%。在相同氮处理下, 不同试验点的无机氮残留存在显著差异, 尤其在 N₃₆₀ 处理下, 湖北、安徽和江苏的无机氮残留差异最大, 平均分别为 28.2、49.9 和 61.2 kg·hm⁻²。品种间无机氮残留无显著差异, 但大地 199 品种在不同地点的无机氮残留量存在差异, 湖北显著低于安徽和江苏, 其中江苏最高。以 N₂₇₀ 为例, 大地 199 品种在湖北、安徽和江苏的无机氮残留分别为 24.6、46.3 和 50.7 kg·hm⁻², 安徽和江苏平均分别较湖北高出 88.2% 和 106.1%。

2.4 氮输入-输出关系及适宜氮肥用量的确定

根据氮输入-输出模型, 以氮素利用率、最高氮盈余量及最低氮输出量为限制条件, 定义氮输入-

输出关系。结果表明, 当氮肥用量为 180 kg·hm⁻² 时, 可达成高产与环境友好双目标 (图 3)。增加氮肥用量至 270 kg·hm⁻² 时, 虽然可达到平台产量, 但存在氮盈余较高, 氮素利用率低的风险; 而减少氮肥用量至 90 kg·hm⁻² 时, 则可能导致氮素输出量降低, 直接威胁产量, 并可能造成土壤养分过度消耗风险。N₀ 处理时, 氮素表现平衡处于负平衡状态, 即输出大于输入, 导致土壤肥力下降, 影响冬油菜生长。因此, 当氮肥用量为 180~270 kg·hm⁻² 时, 对环境保护及可持续冬油菜生产具有积极作用。

通过拟合氮肥用量效应方程 (表 4), 产量与施氮量呈线性加平台关系, 而无机氮残留和氮素表现平衡则呈一元二次函数关系。平台产量下的氮肥用量在品种间无显著差异, 但在地点间差异显著: 江苏 (平均为 273.5 kg·hm⁻²) 显著高于湖北和安徽 (平均为 220.0 kg·hm⁻²), 且江苏的平台产量最高, 平均为 3 332.5 kg·hm⁻²。氮素表现平衡随施氮量增加由

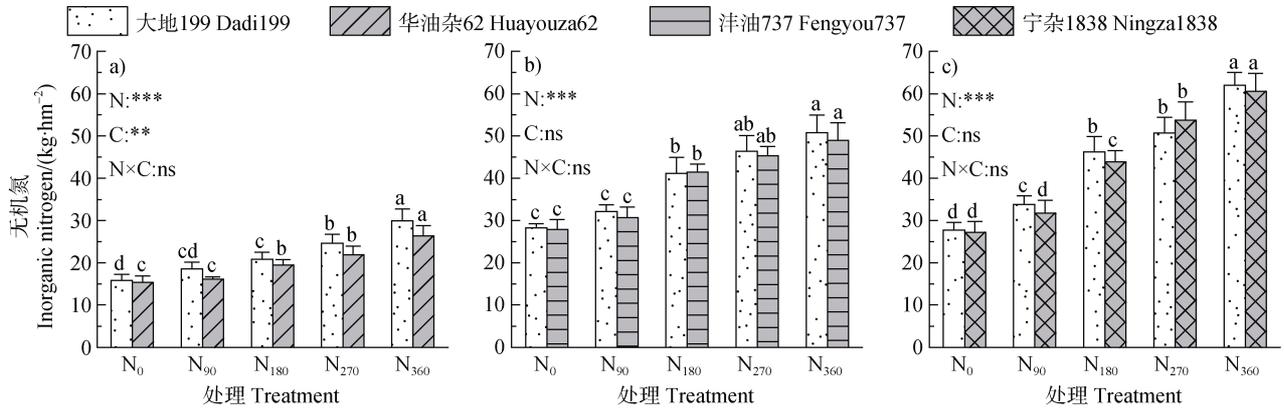


图 2 氮肥对收获后土壤无机氮残留的影响 (a. 湖北, b. 安徽, c. 江苏)

Fig. 2 Effect of nitrogen fertilizer on soil inorganic nitrogen residue after harvest (a. Hubei, b. Anhui, and c. Jiangsu)

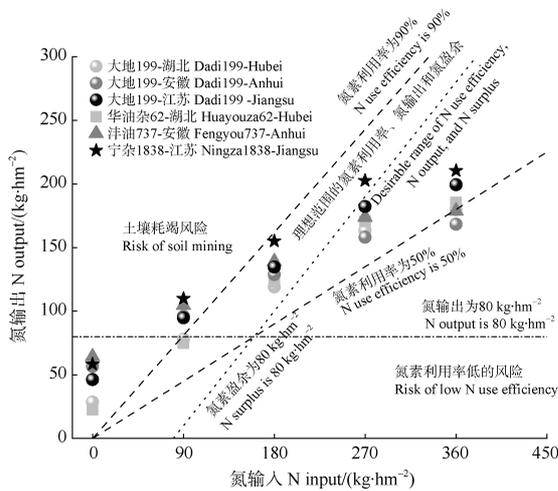


图 3 不同氮肥用量下氮输入与氮输出间的关系

Fig. 3 The relationship between nitrogen input and nitrogen output under different nitrogen fertilizer application rates

负转正并持续增长 (表 5)。当氮素表观平衡为 $0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 相比于平台产量, 冬油菜减产严重; 而当氮素表观平衡为 $80 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 氮肥用量低于达到平台产量下的氮肥用量 (安徽沔油 737 除外), 冬油菜产量较平台产量减少 $0.9\% \sim 8.0\%$ 。综上所述, 依据产量平台下氮肥用量和氮素表观平衡为 $80 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的氮肥用量, 确定湖北、安徽和江苏三个试验点推荐氮肥用量平均分别为 207 、 219 和 $250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 对应的产量平均分别为 $3\ 083$ 、 $3\ 054$ 和 $3\ 149 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 无机氮残留量平均分别为 22 、 45 和 $51 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

3 讨论

3.1 冬油菜对氮肥用量的响应

氮肥是冬油菜产量的关键限制因子。本研究表

明, 施用氮肥显著促进冬油菜对氮素的吸收, 从而提高其产量: 湖北、安徽和江苏三个试验点施氮处理平均增产 $89\% \sim 203\%$, 其中 N_{360} 处理增产率达到最高 (表 2)。前人研究表明, 产量并非无限地随氮肥用量增加而增加, 当施氮量达到 $270 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 产量趋于稳定^[14]。本研究也证实了这一点: 继续增施氮肥对产量无显著提升 (表 2)。通过线性加平台模型拟合, 湖北、安徽和江苏的施氮量平均分别为 217 、 223 和 $274 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 冬油菜产量平台值平均分别为 $3\ 192$ 、 $3\ 081$ 和 $3\ 333 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表 4)。油菜增产的关键在于单株角果数、每角粒数和千粒重的协同提高。普通尿素和控释尿素梯度试验均发现, 缺氮导致冬油菜单株角果数和每角粒数显著下降, 直接造成减产^[13], 这与本试验结果 (表 3) 一致: 施氮显著提高单株角果数 (增加 133%) 和每角粒数 (增加 23%), 而对收获密度和千粒重的影响趋势不明显。油菜对氮素需求量大, 适当增加氮肥投入可增加植株地上部氮素吸收量, 促进营养器官中的氮素向籽粒转移, 增加籽粒中氮素积累。然而, 过量施氮则不利于该转移过程, 导致籽粒氮占比下降, 而非籽粒部位的氮素积累量占比升高 (图 2~图 3), 上述发现与大多数肥料试验结果^[3, 7]一致, 说明过量施氮不仅无益于产量, 还会增加农民的经济成本。此外, 过量施用氮肥还可能给环境带来威胁。本试验中, 油菜收获期土壤无机氮残留量和氮素表观平衡与施氮量呈正相关, 随氮肥用量的增加, 二者呈现出先缓慢增长后急剧上升的变化趋势 (表 4), 这表明过度施用氮肥会显著增加当季氮素损失。因此, 确定适宜的氮肥用量对于提高冬油菜产量和降低环境风险具有重要意义。

表 4 氮肥用量与产量、无机氮残留及氮素表观平衡的拟合方程

Table 4 Yield, inorganic nitrogen residue, and nitrogen apparent balance were fitted with nitrogen fertilizer application rates

地点	品种	产量拟合方程	无机氮残留拟合方程	氮素表观平衡拟合方程
Site	Cultivar	Yield fitting equation	Inorganic nitrogen residue fitting equation	N apparent balance fitting equation
湖北 Hubei	大地 199	$y=10.3x+824.4, 0 \leq x \leq 222;$	$y=0.000\ 06x^2+0.02x+16.1$	$y=0.000\ 6x^2+0.37x-27.2$
	Dadi199	$y=3\ 111, 222 < x \leq 360, R^2=0.975$	$R^2=0.993$	$R^2=0.995$
	华油杂 62	$y=11.5x+833.3, 0 \leq x \leq 212;$	$y=0.000\ 06x^2+0.01x+15.2$	$y=0.000\ 7x^2+0.29x-20.0$
安徽 Anhui	大地 199	$y=6.4x+1\ 600.8, 0 \leq x \leq 221;$	$y=-0.000\ 02x^2+0.07x+27.6$	$y=0.000\ 5x^2+0.49x-55.6$
	Dadi199	$y=3\ 015, 221 < x \leq 360, R^2=0.922$	$R^2=0.969$	$R^2=0.999$
	沔油 737	$y=6.2x+1\ 751.2, 0 \leq x \leq 225;$	$y=-0.000\ 04x^2+0.08x+26.8$	$y=0.000\ 6x^2+0.44x-62.3$
江苏 Jiangsu	大地 199	$y=7.7x+1\ 199.1, 0 \leq x \leq 271;$	$y=0.000\ 02x^2+0.09x+27.3$	$y=0.000\ 5x^2+0.39x-44.7$
	Dadi199	$y=3\ 286, 271 < x \leq 360, R^2=0.973$	$R^2=0.968$	$R^2=0.993$
	宁杂 1838	$y=7.9x+1\ 198.1, 0 \leq x \leq 276;$	$y=0.000\ 02x^2+0.09x+26.0$	$y=0.000\ 7x^2+0.29x-55.7$
	Ningza1838	$y=3\ 379, 276 < x \leq 360, R^2=0.975$	$R^2=0.970$	$R^2=0.989$

表 5 氮肥用量的比较

Table 5 Comparative analysis of nitrogen fertilizer application rates/ (kg·hm⁻²)

地点 Site	品种 Cultivar	氮肥表观平衡为 0		氮素表观平衡为 80 kg·hm ⁻² 时氮肥		产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	无机氮残留量 Inorganic nitrogen residue/ (kg·hm ⁻²)
		平台产量下氮肥用量 The nitrogen fertilizer application rate under the platform yield	量 The nitrogen fertilizer application rate under the apparent balance of nitrogen is 0 kg·hm ⁻²	推荐氮肥用量 The nitrogen fertilizer application rate under the apparent balance of nitrogen is 80 kg·hm ⁻²	推荐氮肥用量 Recommended nitrogen fertilizer application rate		
湖北 Hubei	大地 199 Dadi199	222	64	204	204	2 925	23
	华油杂 62 Huayouza62	212	59	209	209	3 241	20
安徽 Anhui	大地 199 Dadi199	221	95	212	212	2 960	43
	沔油 737 Fengyou737	225	113	232	225	3 147	47
江苏 Jiangsu	大地 199 Dadi199	271	94	237	237	3 022	50
	宁杂 1838 Ningza1838	276	121	263	263	3 276	51

3.2 基于产量和环境友好的氮肥用量

传统氮肥管理以产量最大化为目标，当冬油菜目标产量为 2 000~3 000 kg·hm⁻² 时，推荐氮肥用量范围为 208.3~214.7 kg·hm⁻²[15]，该结果与本试验条件下的结果相近。以平台产量为目标，当氮肥投入

量为 212~276 kg·hm⁻² 时，冬油菜可达到最高产量 3 015~3 379 kg·hm⁻² (表 4)。然而，考虑到氮肥施用带来的环境效应，应保证氮素输入与输出之间的平衡，避免过多的氮肥残留。氮素表观平衡常作为评价氮肥适宜性的关键环境指标[16]，当湖北、安徽

和江苏三点施氮量平均分别为 62、104 和 108 kg·hm⁻² 时, 土壤氮库达到平衡状态, 即氮素表观盈余为 0 kg·hm⁻² (表 5), 这与刘艳妮等^[17]的研究结果类似。但 Brentrup 和 Palliere^[18]分析英国洛桑小麦试验数据表明, 当施氮量为 96 kg·hm⁻² 时, 地上部氮素带走量基本等于氮肥投入量, 存在因氮素损失导致土壤供氮能力降低和减产的风险, 因此适量的氮素盈余是必要的。欧盟氮素专家建议以 80 kg·hm⁻² 为氮素盈余阈值, 既能满足作物氮素养分需求, 又能补充土壤氮库, 并建议利用氮输入-输出模型评估氮肥施用量的生产力和环境风险^[10]。本研究通过模型确定了冬油菜适宜氮肥用量范围为 180~270 kg·hm⁻² (图 3), 并进一步以 80 kg·hm⁻² 为氮素表观盈余参考值, 计算得到湖北、安徽和江苏的冬油菜适宜氮肥用量平均分别为 207、222 和 250 kg·hm⁻²。综合考虑高产和环境友好, 最终确定湖北、安徽和江苏三个试验点氮肥用量平均分别为 207、219 和 250 kg·hm⁻² (表 5)。

3.3 影响适宜氮肥用量的因素

适宜氮肥用量需根据具体位置的气候-土壤-作物体系综合考虑氮素输入、输出、盈余及损失等指标^[19]。本试验中三个试验点的适宜氮肥用量存在差异, 主要受品种特性、土壤养分和气候条件影响。品种的遗传特性决定了产量潜力, 研究表明各地主栽小麦品种产量差异显著, 各麦区高产原因不同^[20]。在本试验条件下, 当地高产品种产量和氮素积累量略高于大地 199 品种 (表 2, 图 1), 但在相同氮肥投入下, 两者之间的产量和氮素积累量并无显著差异, 且达到平台产量所需的氮肥用量相近 (表 5), 表明大地 199 品种适应性广, 可在不同区域稳定生长。土壤养分及理化性状对作物产量有显著影响。有机质含量可作为土壤潜在供氮能力的参考指标, 全球荟萃分析表明, 有机质含量越高, 玉米和小麦的可达产量水平越高^[21]。土壤 pH 也影响作物对氮素的吸收, pH 从 4.8 提高至 6.7 时, 硝化速率可提高 30 倍^[22]。李秀秀等^[23]发现, 产量与耕作层土壤 pH、有机质、全氮以及有效氮磷钾含量呈显著正相关。此外, 耕作层厚度和微生物生物量也是调控产量的关键要素。由此可见, 影响产量的土壤环境指标具有多样性和复杂性。江苏试验点有机质、全氮、有效磷和速效钾含量最高, 湖北和安徽试验点基础土壤理化性质相近, 但湖北点有机质和速效钾含量

略高于安徽点, 且江苏点为中性土壤, 湖北和安徽点土壤偏酸性 (表 1), 这与江苏点冬油菜可达产量最高相吻合。气候条件同样对氮素命运及冬油菜生长有重要作用。年平均温度是土壤氮周转率的主要驱动因素, 温度升高会加速微生物代谢及尿素酶和蛋白水解酶的活动^[24]。对于小麦, 年平均降水量显著影响产量和氮素去向, 高降水可能增加氮素流失, 因此优化施氮量和控制土壤湿度至关重要^[25]。本研究中, 湖北、安徽和江苏的生育期总降水量分别为 496、761 和 435 mm, 日均温度均为 14 °C 左右^[26]。安徽多雨导致光合作用受限并可能造成渍害, 影响了籽粒产量, 这与先前研究结果^[27]一致。

尽管本研究估算了三个试验田两个品种的参数, 但施氮后冬油菜对产量和环境的响应仍然存在不确定性。推荐氮肥用量的估算需要多年多点的田间测量, 而本研究仅进行了一年试验, 这通常导致拟合方程普适性较低。长江中下游冬油菜主产区主要采用油-稻轮作模式, 土壤中残留的硝态氮在水稻季淹水条件下易随水流失。因此, 保证冬油菜收获后适宜的无机氮残留对油-稻轮作系统的周年氮素管理至关重要。未来应开展大规模、多时间空间尺度的田间测量, 以确定产量和无机氮残留阈值, 为不同环境和管理措施下的氮肥施用提供参考。

4 结 论

施氮显著提高冬油菜产量, 但当氮肥用量达到 270 kg·hm⁻² 时, 产量稳定在 3 146 kg·hm⁻² 左右, 此时氮素积累量最大, 籽粒中氮素比例降低, 土壤无机氮迅速积累。综合考虑维持产量和保证合适氮素盈余, 湖北、安徽和江苏三个试验点的施氮量平均分别为 207、219 和 250 kg·hm⁻², 此时产量平均分别为 3 083、3 054 和 3 149 kg·hm⁻², 收获后无机氮残留量平均分别为 22、45 和 51 kg·hm⁻²。

参考文献 (References)

- [1] National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020. [国家统计局. 中国统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.]
- [2] Li H. Fertilization effect and fertilizer recommendation of nitrogen, phosphorus and potassium on the winter oilseed rape of China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural

- University, 2015. [李慧. 中国冬油菜氮磷钾肥施用效果与推荐用量研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.]
- [3] Hui X L, Ma Q X, Wang Z H, et al. Optimization of nitrogen rate based on grain yield and nutrient contents in dryland wheat production[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 (2): 233—244. [惠晓丽, 马清霞, 王朝辉, 等. 基于旱地小麦高产优质的氮肥用量优化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (2): 233—244.]
- [4] Yu F, Shi W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6): 1311—1324. [于飞, 施卫明. 近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (6): 1311—1324.]
- [5] Wang M, Bodirsky B L, Rijnveld R, et al. A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution[J]. *Nature Communications*, 2024, 15 (1): 880.
- [6] Gu B J, Zhang X M, Lam S K, et al. Cost-effective mitigation of nitrogen pollution from global croplands[J]. *Nature*, 2023, 613 (7942): 77—84.
- [7] Wang Y, Lu J W, Li X K, et al. Appropriate nitrogen fertilizer application rate for winter oilseed rape in main production areas of Jiangsu and Zhejiang provinces[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (6): 1117—1128. [王寅, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 江浙油菜主产区冬油菜的区域适宜施氮量研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50 (6): 1117—1128.]
- [8] Xu X P, Chuan L M, He P, et al. The study of intelligent fertilizer recommendation method for wheat based on yield response and agronomic efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29 (7): 1190—1201. [徐新朋, 串丽敏, 何萍, 等. 基于产量反应和农学效率的小麦智能化推荐施肥方法研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29 (7): 1190—1201.]
- [9] Ning Y W, Zhang Y C. Soil nitrogen balance based recommendation of nitrogen fertilization: A case study of rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (2): 281—292. [宁运旺, 张永春. 基于土壤氮素平衡的氮肥推荐方法——以水稻为例[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (2): 281—292.]
- [10] Oenema O, Frank B, Lammel J, et al. Nitrogen use efficiency (NUE) -an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems[R]. *European Nitrogen Expert Panel*, 2015.
- [11] Yu X Y, Wang C Y, Li D S, et al. Formation mechanism of yield stability in high-yielding rapeseed varieties[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49 (6): 1601—1615. [余新颖, 王春云, 李大双, 等. 高产油菜品种稳产性形成机制[J]. *作物学报*, 2023, 49 (6): 1601—1615.]
- [12] Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. *土壤农化分析*[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [13] Liu Q X. Study on the mechanism of yield components of direct-sown oilseed rape (*Brassica napus* L.) under regulation of nitrogen fertilizer[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. [刘秋霞. 氮肥施用调控直播冬油菜产量构成因子的机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.]
- [14] Song Y, Li J, Gu H H, et al. Effects of application of nitrogen on seed yield and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49 (7): 2002—2011. [宋毅, 李静, 谷贺贺, 等. 氮肥用量对冬油菜籽粒产量和品质的影响[J]. *作物学报*, 2023, 49 (7): 2002—2011.]
- [15] Liu B. The technology and mechanism of nitrogen nutrient regulation in winter oilseed rape[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. [刘波. 冬油菜氮素营养调控技术及相关机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.]
- [16] Ding W C, Xu X P, Zhang J J, et al. Nitrogen balance acts an indicator for estimating thresholds of nitrogen input in rice paddies of China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 290: 118091.
- [17] Liu Y N, Ma C, Yu X Y, et al. Nitrogen application rate for keeping nitrogen balance in wheat-soil system in Weibei rainfed areas under different rainfall years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24 (3): 569—578. [刘艳妮, 马臣, 于昕阳, 等. 基于不同降水年型渭北旱塬小麦-土壤系统氮素表现平衡的氮肥用量研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (3): 569—578.]
- [18] Brentrup F, Palliere C. Nitrogen use efficiency as an agro-environmental indicator[C]. *OECD Workshop on Agri-environmental Indicators*, 2010.
- [19] Ju X T, Zhang C. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (1): 1—13. [巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (1): 1—13.]
- [20] Huang N, Wang Z H, Wang L, et al. Yield variation of winter wheat and its relationship to yield components, NPK uptake and utilization of leading and high yielding wheat cultivars in main wheat production regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53 (1): 81—93. [黄宁, 王朝辉, 王丽, 等. 我国主要麦区主栽高产品种产量差异及其与产量构成和氮磷钾吸收利用的关系[J]. *中国农业科学*, 2020, 53 (1): 81—93.]
- [21] Oldfield E E, Bradford M A, Wood S A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields[J]. *Soil*, 2019, 5 (1): 15—32.
- [22] DeForest J L, Otuya R K. Soil nitrification increases with elevated phosphorus or soil pH in an acidic mixed mesophytic deciduous forest[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2020, 142: 107716.
- [23] Li X X, Tu T H, Liu K L, et al. The profile fertility characteristics of paddy fields and their relationship with

- yields in red soil hilly region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(8): 1390—1399. [李秀秀, 涂田华, 柳开楼, 等. 红壤丘陵区稻田土壤剖面肥力特征及其与产量的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(8): 1390—1399.]
- [24] Li Z L, Zeng Z Q, Tian D S, et al. Global variations and controlling factors of soil nitrogen turnover rate[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 207: 103250.
- [25] Lei S, Zhao M Z, Zhu H, et al. Fates and controlling factors of nitrogen fertilizers in relation to grain yield after the application season in wheat cropping systems: A meta-analysis of ^{15}N field trials[J]. *Field Crops Research*, 2024, 310: 109364.
- [26] China Meteorological Administration Meteorological Data Center. China Meteorological Data Service Center [DB/OL]. [2023-03-01]. <http://data.cma.cn/>. [中国气象局气象数据中心. 中国气象数据网[DB/OL]. [2023-03-01]. <http://data.cma.cn/>.]
- [27] Li L L, Zhang L, Tang J W, et al. Waterlogging increases greenhouse gas release and decreases yield in winter rapeseed (*Brassica napus* L.) seedlings[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 18673.

(责任编辑：陈荣府)