

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.55042

## 秸秆还田耦合氮肥运筹对稻茬油菜茎秆质量和抗倒伏性能的影响

朱家宝<sup>1</sup> 王先领<sup>1</sup> 樊友众<sup>1</sup> 王宗铠<sup>1</sup> 蒯婕<sup>1</sup> 汪波<sup>1</sup> 王晶<sup>1</sup>  
徐正华<sup>1</sup> 赵杰<sup>1</sup> 周广生<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> 华中农业大学植物科学技术学院 / 农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室, 湖北武汉 430070; <sup>2</sup> 湖北洪山实验室, 湖北武汉 430070

**摘要:** 倒伏是限制长江流域直播油菜高产稳产的关键因素之一, 水稻秸秆还田后, 氮肥运筹通过碳氮代谢和茎秆结构影响油菜抗倒性能。本研究采用裂区设计, 以华油杂 62 为材料, 基于稻-油轮作定位试验, 研究秸秆管理耦合氮肥运筹对高密度直播油菜抗倒性的影响。以秸秆还田处理为主区(R0 为秸秆不还田, R1 为全量还田), 以氮肥运筹为副区, CK 为 240 kg hm<sup>-2</sup> 的常规施氮量及基肥: 苗肥: 薹肥: 花肥=6:4:0:0, N1、N2、N3、N4 均为减氮 20%, 但基肥: 苗肥: 薹肥: 花肥分别为 10:0:0:0、6:4:0:0、6:2:2:0 和 6:2:0:2, 研究不同处理对成熟期油菜茎秆细胞壁成分、茎秆硅钙含量及花期茎秆显微结构等指标的影响。结果表明, 相较于秸秆不还田, 秸秆还田后, 油菜成熟期地上部鲜重增加 29.1%, 茎秆抗折力增加 23.3%, 茎秆纤维素、总木质素、果胶、硅、钙含量分别显著( $P < 0.05$ )增加了 26.3%、3.4%、30.6%、45.0%和 9.5%, 茎秆强度和韧性显著增强, 但油菜株高、地上部鲜重的增幅大于茎秆抗折力增幅, 导致倒伏指数平均增加了 7.9%。合理的氮肥运筹可提高茎秆质量, 从而降低倒伏指数。秸秆还田下 N3 处理使田间实际倒伏角度较常规施氮处理降低 2.6%, 茎秆抗折力增加 15.2%, 倒伏指数降低 10.2%, 优于其他处理。其机理是该处理显著增加了茎秆纤维素、果胶和钙含量及花期茎秆皮层厚度、表皮厚度、维管束长、横截面积、维管束数目以及维管束面积, 显微结构排列更加合理, 抗倒性显著增强。因此, 在长江流域水稻秸秆还田和油菜高密直播条件下, 以全生育期施氮 192 kg hm<sup>-2</sup> (基肥: 苗肥: 薹肥=6:2:2)为推荐施肥方案, 可以减少氮肥投入, 增强茎秆的抗倒伏能力, 提高机械收获效率, 实现高产抗倒协同的目标。

**关键词:** 油菜; 秸秆还田; 氮肥运筹; 倒伏指数; 茎秆成分; 显微结构

## Effects of straw incorporation combined with nitrogen management on stem quality and lodging resistance of rapeseed following rice

Zhu Jia-Bao<sup>1</sup>, Wang Xian-Ling<sup>1</sup>, Fan You-Zhong<sup>1</sup>, Wang Zong-Kai<sup>1</sup>, Kuai Jie<sup>1</sup>, Wang Bo<sup>1</sup>, Wang Jing<sup>1</sup>, Xu Zheng-Hua<sup>1</sup>, Zhao Jie<sup>1</sup>, and Zhou Guang-Sheng<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, Hubei, China; <sup>2</sup> Hongshan Laboratory, Wuhan 430070, Hubei, China

**Abstract:** Lodging is a major constraint limiting the yield and stability of direct-seeded rapeseed in the Yangtze River Basin. Straw incorporation from the preceding rice crop can influence lodging resistance in rapeseed by affecting carbon-nitrogen metabolism and stem morphology, especially when combined with tailored nitrogen management strategies. In this study, a split-plot design was used with the rapeseed hybrid Huayouza 62, based on a long-term rice-rapeseed rotation field experiment. The main plots comprised straw incorporation treatments (R0: no straw incorporation; R1: full straw incorporation). Subplots consisted of nitrogen application regimes: CK (conventional nitrogen rate of 240 kg hm<sup>-2</sup> with basal: seedling fertilizer ratio

本研究由国家重点研发计划项目(2021YFD1901205)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1901205).

\* 通信作者(Corresponding author): 周广生, E-mail: zhougs@mail.hzau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: zhujiaobao@webmail.hzau.edu.cn

Received (收稿日期): 2025-06-30; Accepted (接受日期): 2025-09-10; Published online (网络出版日期): 2025-09-18.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20250918.1436.004>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

6:4:0:0) and four 20%-reduced nitrogen treatments (N1, N2, N3, N4), maintaining identical total nitrogen reduction but differing fertilizer ratios (basal:seedling:bolting:flower fertilizer stages): N1 (10:0:0:0), N2 (6:4:0:0), N3 (6:2:2:0), and N4 (6:2:0:2). The effects of these treatments on stem cell wall composition at maturity, stem silicon and calcium content, and stem anatomical structure at flowering were evaluated. Compared with no straw return, full straw incorporation significantly increased aboveground fresh biomass by 29.1% and stem breaking strength by 23.3%. Increases were also observed in stem contents of cellulose (26.3%), total lignin (3.4%), pectin (30.6%), silicon (45.0%), and calcium (9.5%) ( $P < 0.05$ ), contributing to improved stem strength and toughness. However, the gains in plant height and biomass outpaced the improvements in stem strength, leading to a 7.9% average increase in the lodging index. Appropriate nitrogen allocation strategies improved stem structural quality and reduced lodging risk. Notably, the N3 treatment ( $192 \text{ kg hm}^{-2}$ , applied as 6:2:2:0) under full straw return conditions reduced the actual lodging angle by 2.6%, increased stem breaking strength by 15.2%, and decreased the lodging index by 10.2% compared to the conventional treatment. These improvements were attributed to significant increases in stem cellulose, pectin, and calcium contents, as well as enhanced anatomical characteristics at flowering, including greater cortex and epidermis thickness, increased vascular bundle length and area, and a higher number of vascular bundles. A more uniform vascular bundle arrangement further contributed to improved stem mechanical strength and lodging resistance. Therefore, under high-density direct-seeded rapeseed cultivation with rice straw incorporation in the Yangtze River Basin, an optimized nitrogen regime of  $192 \text{ kg hm}^{-2}$  (basal:seedling:bolting = 6:2:2) is recommended. This strategy not only reduces nitrogen input but also enhances stem strength and lodging resistance, thereby improving mechanical harvest efficiency while maintaining high yield and structural resilience.

**Keywords:** rapeseed; straw incorporation; nitrogen management; lodging index; stem composition; microstructure

油菜(*Brassica napus* L.)是我国第一大油料作物<sup>[1]</sup>,对保障国家食用植物油安全供给意义重大<sup>[2]</sup>。长江流域是我国油菜主产区,面积与产量均约占全国的 90%<sup>[3]</sup>。2008 年后,该地区传统的育苗移栽模式逐渐被直播模式取代<sup>[4]</sup>。高密度直播油菜茎秆细弱,倒伏风险增加成为制约其高产稳产的关键因素<sup>[5]</sup>。调查表明,长江流域冬油菜区因倒伏导致的产量损失普遍达 25%~40%,严重田块甚至超过 60%,并显著降低籽粒品质,增加霉变率<sup>[6]</sup>。同时,影响机械化收获效率,增加油菜生产成本。该地区油菜种植制度以稻油轮作为主,前茬水稻收获后产生大量秸秆<sup>[7]</sup>,最主要的利用方式仍是直接还田<sup>[8]</sup>。秸秆含有丰富的有机质和氮、磷、钾等资源,将其还田可保持和提高土壤肥力<sup>[9]</sup>。然而,前茬水稻秸秆量大,机械收获留茬高,抛撒不匀,耕整地质量不高,形成的“海绵田”导致油菜出苗整齐度差,倒伏风险增加<sup>[10-12]</sup>。此外,秸秆还田后,土壤质地疏松,作物株高和地上部鲜重显著增加,进一步增加倒伏风险<sup>[13-14]</sup>。因此,在水稻秸秆还田条件下,提高稻茬油菜抗倒性是长江流域高密度直播油菜高产稳产的关键。

油菜有茎倒和根倒 2 种类型,高密度直播油菜以茎倒为主<sup>[15-17]</sup>。油菜株型和茎秆形态结构是决定高密度直播油菜是否抗倒的重要因素,油菜的冠层结构较为复杂,上部角果层重量大,茎秆强度决定了油菜是否直立生长<sup>[18]</sup>。研究表明,作物抗倒性与株高、重心高度和干物质量呈负相关,株高适中、植株重心较低、分支部位较低且均匀、株型紧凑的

油菜抗倒伏能力强,茎秆中空且较细、茎秆机械组织不发达的植株倒伏风险较大<sup>[19-20]</sup>。合理密植通过调控个体生长和群体结构实现高产抗倒协调,原因是适当增大密度,冠层结构更为合理,光截获和光能利用率提高,茎秆中上部倒伏指数降低,抗倒性增强<sup>[21-22]</sup>。此外,合理施肥也是密植油菜高产抗倒的关键因素。氮肥运筹作为株型调控的关键手段,通过改变基肥与蕾薹肥比例,可定向调节油菜节间长度、茎粗及厚壁细胞层数<sup>[23]</sup>。氮肥后移使茎秆抗折力提升 18%~24%,但过量追氮反而导致机械组织占比下降<sup>[24]</sup>。氮肥的过量施用易导致植株旺长,茎秆充实度降低,不仅加剧了高产与抗倒的矛盾,也造成了严重的环境污染和资源浪费<sup>[25]</sup>。因此,根据养分需求规律,进行合理的秸秆还田及氮肥运筹是提高油菜茎秆质量和抗倒伏性能的关键。

针对当前长江流域稻油轮作生产特点,探究秸秆还田和氮肥运筹对稻茬油菜茎秆发育和抗倒性能的影响规律对保障其高产稳产至关重要。然而,该农艺措施对油菜茎秆结构和力学性状的影响机制尚不明确,特别是高密度直播条件下氮肥减施与秸秆还田产生的互作效应对油菜产量及抗倒性的影响存在明显研究不足。本研究基于秸秆管理耦合氮肥运筹大田定位试验,旨在阐明水稻秸秆还田及减氮措施对高密度直播油菜抗倒伏性能的影响机制,明确水稻秸秆还田条件下油菜最佳的氮肥运筹策略,为长江流域稻油轮作系统的抗逆栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

2018—2019 年和 2019—2020 年连续 2 年在华中农业大学试验田(30.52°N, 114.31°E, 海拔 23.3 m)进行大田试验。试验材料为长江流域大面积推广的品种华油杂 62, 该品种为半冬性甘蓝型杂交种, 全生育期 230 d 左右。2018—2019 年油菜生长季(10 月至

次年 4 月)平均气温 10.8℃, 总降水量 537.8 mm, 累计太阳辐射量 862.1 MJ m<sup>-2</sup>; 2019—2020 年生长季平均气温 12.1℃, 总降水量 469.8 mm, 累计太阳辐射量 963.2 MJ m<sup>-2</sup> (图 1)。土壤基础理化性质见表 1。2 年播种期分别为 2018 年 9 月 27 日和 2019 年 9 月 26 日, 收获期分别为 2019 年 5 月 4 日和 2020 年 4 月 27 日。试验田块秸秆还田处理始于 2016 年。

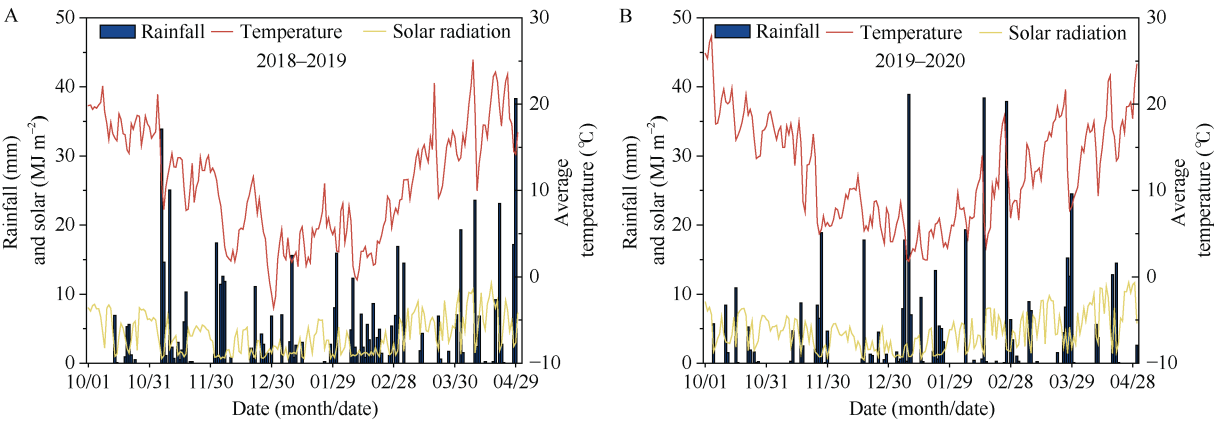


图 1 2018—2019 生长季(A)和 2019—2020 生长季(B)的主要气象因子  
Fig. 1 Main meteorological factors in 2018–2019 growing season (A) and in 2019–2020 growing season (B)

表 1 土壤基础理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the experimental soil

| 年份<br>Year | 全氮 TN<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮 AN<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | 速效磷 AP<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾 AK<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | 有机质 SOC<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | pH   |
|------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------|
| 2018–2019  | 1.58                           | 107.54                           | 19.17                            | 174.87                           | 11.62                            | 7.41 |
| 2019–2020  | 1.64                           | 102.24                           | 20.85                            | 190.24                           | 8.44                             | 7.13 |

TN: total nitrogen; AN: available nitrogen; AP: available phosphorus; AK: available potassium; SOC: soil organic carbon.

1.2 试验设计

采用裂区试验设计, 设秸秆处理(R)和氮肥运筹(N) 2 个因素, 主区因子为秸秆处理, 副区因子为氮肥运筹。秸秆处理设置 2 个水平: R0 (秸秆不还田)、R1 (秸秆全量还田); 氮肥运筹设置 5 个水平: 常规施氮量 CK (基肥: 苗肥: 薹肥: 花肥= 6 : 4 : 0 : 0)和减氮 20%下 N1 (基肥: 苗肥: 薹肥: 花肥= 10 : 0 : 0 : 0)、N2 (基肥: 苗肥: 薹肥: 花肥= 6 : 4 : 0 : 0)、N3 (基肥: 苗肥: 薹肥: 花肥= 6 : 2 : 2 : 0)、N4 (基肥: 苗肥: 薹肥: 花肥= 6 : 2 : 0 : 2)。其中, 基肥在播种前撒施, 随后做翻耕处理, 苗肥在定苗后 5 叶期撒施, 薹肥在薹高 15 cm 左右时撒施, 花肥在初花 20 d 后撒施。试验共计 10 个处理, 3 次重复, 总计 30 个小区, 小区面积为 20 m<sup>2</sup>。种植密度为 7.5×10<sup>5</sup>株 hm<sup>-2</sup>, 采用 25 cm 行距直播,

厢宽 2 m, 沟宽 30 cm, 油菜出苗后间去窝堆苗, 在 4~5 叶期进行定苗, 病虫草害防治等其他管理同常规大田管理措施。常规施氮量为纯氮 240 kg hm<sup>-2</sup>, 各处理磷肥及钾肥用量一致且一次性基施, 磷肥用量为 150 kg hm<sup>-2</sup>, 钾肥用量为 150 kg hm<sup>-2</sup>, 氮、磷、钾肥分别以尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%)换算施用。R1 处理下, 水稻收获后用收割机切碎至秸秆每段 10 cm 左右, 晒干后称重, 用手扶式翻耕机翻压全量还田, 翻压深度 15~20 cm; R0 处理下, 水稻秸秆全部移除, 同样做翻耕处理。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 产量及产量构成 在油菜成熟期于各小区连续取样 10 株, 考察单株有效角果数、每角果粒数及千粒重, 在各小区取 10 m<sup>2</sup> 未被取样破坏的部分

收获测产。

**1.3.2 田间实际倒伏角度** 于成熟期每小区随机选取连续 10 株油菜, 用倾角仪测定总倒伏角度, 倒伏角度以冠层最高点至子叶节连线与垂直方向夹角表示<sup>[26]</sup>。

**1.3.3 机械强度和抗倒伏指数测定** 记录终花时期, 于终花 25 d 后, 各小区连续取样 10 株, 将油菜主茎有效分枝部位以下平均分为 2 段, 由下往上分别标记为基部和上部, 采用 YYD-1 茎秆强度测定仪(浙江托普仪器有限公司生产)分别测定 2 段茎秆中间部位抗折力。倒伏指数<sup>[27]</sup>计算公式为  $I = (h \times m) / N$ , 式中  $I$  表示倒伏指数;  $h$  表示油菜植株株高, 单位为 cm;  $m$  表示油菜植株地上部鲜重, 单位为 g;  $N$  表示油菜植株茎秆抗折力, 单位为 N。此处高度与地上部鲜重为对应茎段至植株顶端的高度与鲜重, 抗折力为该段中部 10 cm 处抗折力。

**1.3.4 茎秆细胞壁组分测定** 将成熟期基部与上部茎秆分装入硫酸纸袋中, 105℃ 杀青 30 min 后 80℃ 烘干至恒重, 粉碎过筛。参照 McKenzie 和 Deyholos<sup>[28]</sup>的方法测定半纤维素、纤维素及木质素含量, 采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量<sup>[29]</sup>; 参照 Eticha 等<sup>[30]</sup>与 Taylor 和 Buchanan-Smith<sup>[31]</sup>的方法测定果胶含量。

**1.3.5 茎秆硅、钙含量测定** 将 1.3.3 获得的样品过 40 目筛, 称量 3 份样品, 每份 0.1000 g。采用碱溶法提取茎秆硅、钼蓝比色法测定茎秆硅含量<sup>[32]</sup>。称取成熟期油菜茎秆样品 0.2000 g 装入 50 mL 消化管底部, 经  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  混合酸消化后, 采用原子吸收分光光度计测定茎秆钙含量<sup>[33]</sup>。

**1.3.6 茎秆显微结构测定** 选取盛花期各处理油菜 3 株, 切取易倒伏部位, 即第一有效分枝以下 5 cm 处的主茎段, 置甲醛-乙酸-乙醇(FAA)固定液中, 采用番红-固绿染色后制作切片, 利用 Pannoramic 250、Pannoramic MIDI 切片扫描仪(3D Histech, Hungary)扫描成像, 观察维管束数目, 再采用 CaseViewer 图像软件分析茎秆表皮厚度、皮层厚度、维管束长、周长、横截面积以及维管束面积, 观察细胞形态、排列方式。

## 1.4 数据处理与分析

用 Microsoft Office Excel 2018 整理试验数据, 采用 SPSS 10.0 (SPSS Inc., 美国)统计软件进行数据统计和方差分析(ANOVA), 在  $P < 0.05$  水平下通过最小显著差异法(LSD)进行多重比较, 采用 Pearson

模型进行相关性分析, 并使用 Origin 9.0 (Origin Lab Corporation, 美国)软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 田间实际倒伏角度

水稻秸秆管理 × 氮肥运筹显著影响油菜成熟期田间实际倒伏角度, 秸秆管理及氮肥处理对油菜成熟期田间实际倒伏角度互作效应达显著水平(图 2)。2 年试验结果表明, 秸秆还田后田间实际倒伏角度显著高于秸秆不还田处理, 其中 N1 处理倒伏角度最小, CK 处理倒伏角度与减氮 20% 下 N2 处理无显著差异, 2019—2020 年各处理倒伏角度均显著高于 2018—2019 年。以上结果表明, 秸秆还田结合薹期追施氮肥降低成熟期油菜田间实际倒伏角度。

### 2.2 成熟期地上部鲜重

地上部鲜重是影响倒伏的关键指标, 水稻秸秆管理 × 氮肥运筹对高密度种植下油菜成熟期地上部鲜重影响显著, 2 年趋势基本一致(图 3)。与 R0 相比, R1 处理下基部和上部鲜重均高于不还田处理。就不同氮肥运筹而言, 无论秸秆还田与否, N3 处理地上部鲜重最大, N4 和 N1 处理基部鲜重无显著差异, 同一处理植株基部鲜重均显著高于上部鲜重, 基部茎秆鲜重变化规律与上部保持一致。以上结果表明, 水稻秸秆还田可以显著增加成熟期油菜地上部鲜重, 合理的氮肥运筹可以缓解减氮导致的地上部鲜重下降。

### 2.3 成熟期茎秆机械强度

茎秆抗折力是反映作物茎秆抗倒性强弱的重要指标, 水稻秸秆管理 × 氮肥运筹对成熟期油菜茎秆抗折力均有显著影响, 在 2018—2019 年二者互作效应未达显著水平, 但在 2019—2020 年达显著水平(图 4)。同一植株中, 基部茎秆抗折力显著高于上部茎秆抗折力。无论秸秆还田与否, CK 处理的基部和上部抗折力显著高于其他处理, 这表明氮肥总量的减少会削弱茎秆的机械强度。相比于 R0, R1 显著增加了茎秆抗折力, N3 处理的基部和上部抗折力显著高于 N1 和 N4 处理, 优于 N2 处理, 这表明合理分配氮肥(如增加苗肥和薹肥比例)可以部分弥补氮肥总量减少的负面影响, 2 年试验趋势基本一致。2018—2019 年的茎秆抗折力显著高于 2019—2020 年, 年份间的环境条件(如降雨量、温度)对茎秆强度有重要影响。

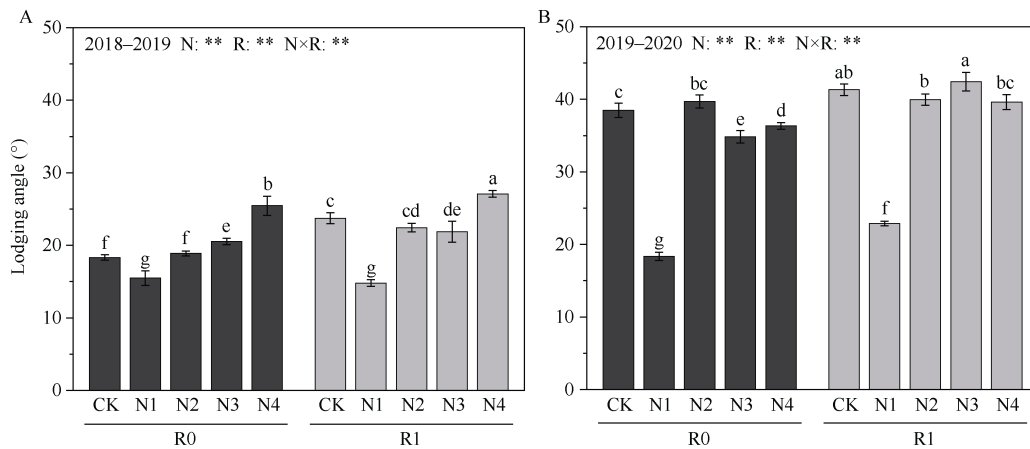


图 2 水稻秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜成熟期茎秆实际倒伏角度的影响

**Fig. 2 Effects of rice straw management and nitrogen management on the actual lodging angle of rapeseed stems at maturity**

N: 氮肥运筹; R: 秸秆管理; R0: 秸秆不还田; R1: 秸秆还田; CK: 施用 100% 氮肥 ( $N\ 240\ kg\ hm^{-2}$ ), 基肥: 苗肥: 薹肥: 花肥 = 6:4:0:0; N1: 施用 80% 氮肥, 基肥: 苗肥: 薹肥: 花肥 = 10:0:0:0; N2: 施用 80% 氮肥, 基肥: 苗肥: 薹肥: 花肥 = 6:4:0:0; N3: 施用 80% 氮肥, 基肥: 苗肥: 薹肥: 花肥 = 6:2:2:0; N4: 施用 80% 氮肥, 基肥: 苗肥: 薹肥: 花肥 = 6:2:0:2。不同字母表示同一年份不同处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。 \*\*表示在 0.01 概率水平显著差异。

N: nitrogen management; R: straw management; R0 represents no straw incorporation, while R1 represents straw incorporation. CK: application of 100% nitrogen fertilizer ( $N\ 240\ kg\ hm^{-2}$ ) with a basal:seedling:bolting:flowering fertilizer ratio of 6:4:0:0; N1: application of 80% nitrogen fertilizer with a basal:seedling:bolting:flowering fertilizer ratio of 10:0:0:0; N2: application of 80% nitrogen fertilizer with a basal:seedling:bolting:flowering fertilizer ratio of 6:4:0:0; N3: application of 80% nitrogen fertilizer with a basal:seedling:bolting:flowering fertilizer ratio of 6:2:2:0; N4: application of 80% nitrogen fertilizer with a basal:seedling:bolting:flowering fertilizer ratio of 6:2:0:2. Different letters indicate significant differences between treatments within the same year ( $P < 0.05$ ). \*\* indicates significant differences at the 0.01 probability level.

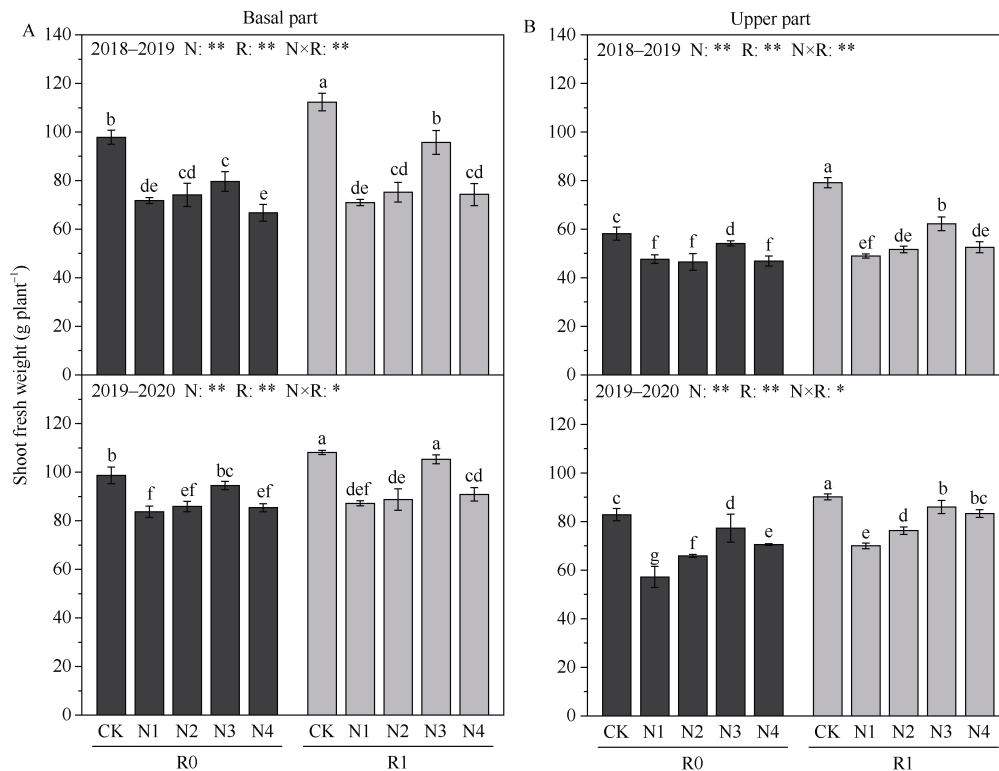


图 3 水稻秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜成熟期地上部鲜重的影响

**Fig. 3 Effects of rice straw management and nitrogen management on aboveground fresh weight of rapeseed at maturity**

缩写和处理同图 2。不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。\*、\*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。

Abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year ( $P < 0.05$ ). \* and \*\* indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

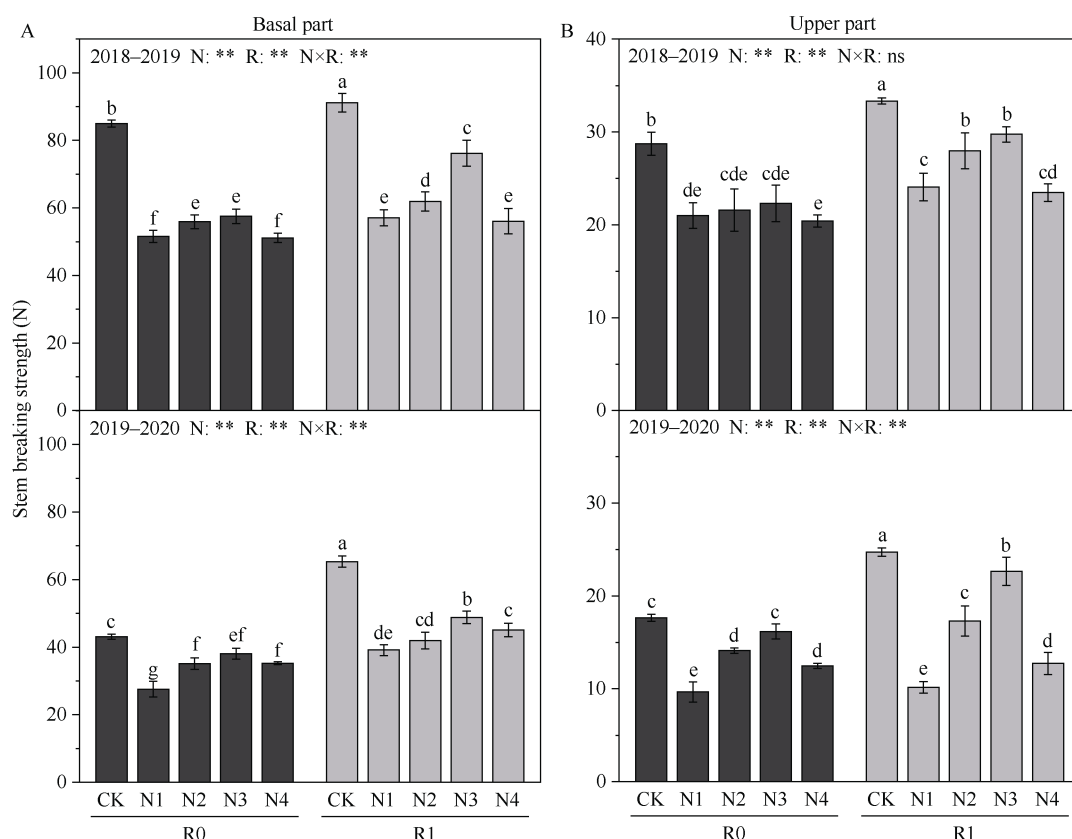


图 4 水稻秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜成熟期茎秆抗折力的影响

Fig. 4 Effects of rice straw management and nitrogen management on stem bending resistance of rapeseed at maturity

缩写和处理同图 2。不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。\*\*表示在 0.01 概率水平差异显著, ns 表示差异不显著。

Abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year ( $P < 0.05$ ). \*\* indicates significant differences at the 0.01 probability level, while ns indicates no significant difference.

## 2.4 成熟期倒伏指数及与产量的关系

水稻秸秆管理×氮肥运筹对油菜茎秆倒伏指数有显著影响, 在 2018—2019 年二者互作效应达显著水平, 2019—2020 年互作效应未达显著水平(图 5)。相比于 R0, R1 茎秆基部和上部倒伏指数均增加, CK 处理基部倒伏指数高于其他氮肥运筹。在 2018—2019 年度, 秸秆还田条件下 N2 处理植株基部及上部倒伏指数最小, N4 处理与 CK 无显著差异。在 2019—2020 年度, 秸秆还田后 N1 和 N4 处理基部倒伏指数无显著差异, N4 和 CK 处理上部倒伏指数无显著差异, 其中 N3 处理上部倒伏指数最小。同一植株中上部茎秆倒伏指数显著高于基部茎秆倒伏指数, 上部茎秆发生倒伏的风险较高, 且 2019—2020 年整体倒伏指数显著高于 2018—2019 年。

水稻秸秆管理×氮肥运筹条件下倒伏相关性状不同程度影响油菜产量及产量构成(表 2)。地上部鲜重和茎秆抗折力均与产量呈显著正相关( $P < 0.05$ ),

与单株角果数呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 与千粒重呈显著负相关。田间实际倒伏角度与产量无显著相关, 与单株角果数呈极显著正相关, 与每角果粒数呈极显著负相关。倒伏指数与产量呈极显著负相关, 倒伏指数每增加 0.5, 产量下降  $185.0 \text{ kg hm}^{-2}$ , 原因在于随着倒伏指数的增加, 单株角果数显著下降。

## 2.5 成熟期茎秆结构成分

水稻秸秆管理×氮肥运筹对高密度种植下油菜成熟期基部茎秆的酸不溶木质素、半纤维素、果胶、可溶性糖含量影响达显著水平, 对总木质素和纤维素含量影响未达显著水平(表 3)。与 R0 相比, R1 处理中酸不溶木质素、总木质素、纤维素和果胶含量显著增加, 可溶性糖含量显著降低, 2 年结果趋势一致。2018—2019 年度, 秸秆还田后酸不溶木质素和总木质素含量在 N4 处理中达最大值, 减氮处理中可溶性糖和半纤维素含量与 CK 无显著差异, 纤维素含量在 N3 处理达最大值并显著高于其他处理,

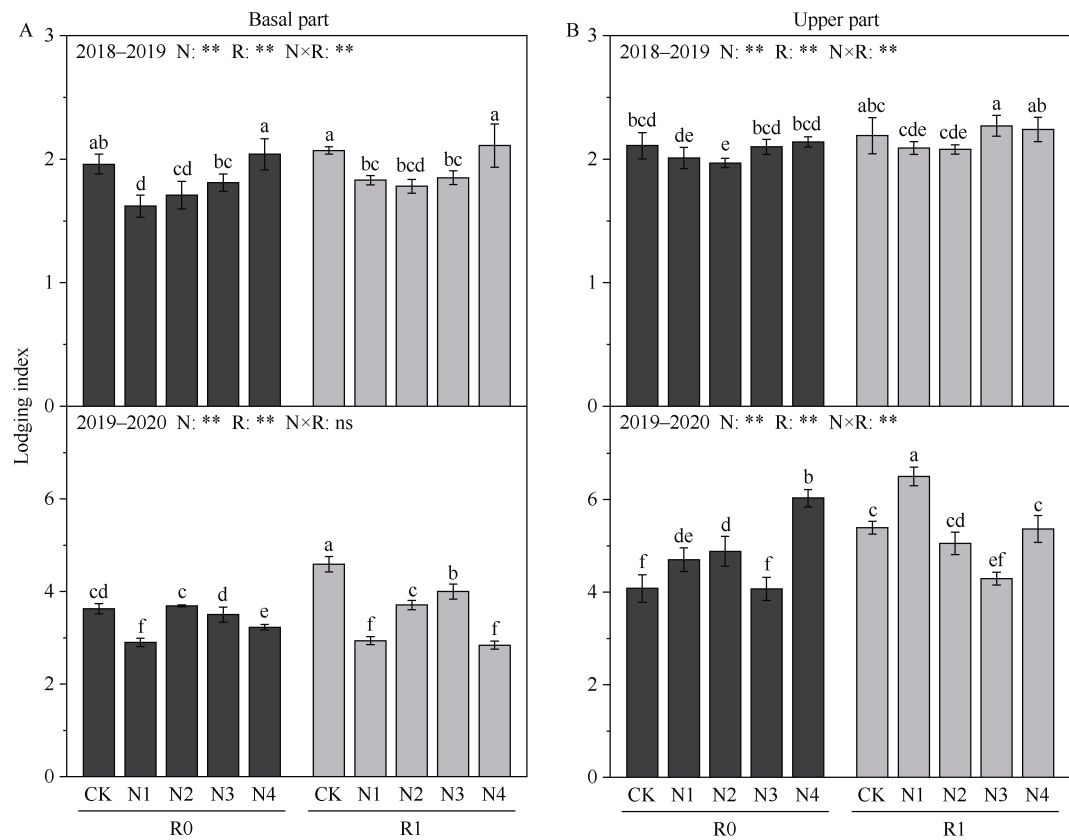


图 5 水稻秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜成熟期茎秆倒伏指数的影响

**Fig. 5 Effects of rice straw management and nitrogen management on the lodging index of rapeseed stems at maturity**

缩写和处理同图 2。不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。\*\*表示在 0.01 概率水平显著差异, ns 表示差异不显著。

Abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year ( $P < 0.05$ ). \*\* indicates significant differences at the 0.01 probability level, while ns indicates no significant difference.

表 2 产量及产量构成与倒伏的相关性

**Table 2 Correlation between yield, yield components and lodging-related traits**

| 倒伏相关性状<br>Lodging-related traits                  | 单株角果数<br>Effective pods per plant | 每角果粒数<br>Seeds per pod | 千粒重<br>1000-seed weight (g) | 实际产量<br>Yield (kg hm <sup>-2</sup> ) |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 地上部鲜重 Shoot fresh weight (g plant <sup>-1</sup> ) | 0.643**                           | -0.360                 | -0.464*                     | 0.483*                               |
| 倒伏角度 Lodging angle (°)                            | 0.594**                           | -0.790**               | -0.172                      | 0.332                                |
| 茎秆抗折力 Stem breaking strength (N)                  | 0.643**                           | -0.303                 | -0.619**                    | 0.540**                              |
| 倒伏指数 Lodging index                                | -0.583**                          | -0.092                 | 0.492*                      | -0.721**                             |

\*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。\* and \*\* indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表 3 水稻秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜成熟期基部茎秆结构成分的影响

**Table 3 Effects of rice straw management and nitrogen management on basal stem composition of rapeseed at maturity (%)**

| 年份<br>Year | 秸秆管理<br>Straw management | 氮肥运筹<br>Nitrogen management | 酸不溶木质素<br>Acid-insoluble lignin | 总木质素<br>Total lignin | 可溶性糖<br>Soluble sugars | 半纤维素<br>Hemicellulose | 纤维素<br>Cellulose | 果胶<br>Pectin |
|------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|------------------|--------------|
| 2018-2019  | R0                       | CK                          | 21.5 h                          | 24.8 d               | 3.2 b                  | 14.7 bc               | 19.2 e           | 16.6 cd      |
|            |                          | N1                          | 22.9 c                          | 26.3 bc              | 3.5 a                  | 16.3 a                | 21.6 bc          | 15.7 d       |
|            |                          | N2                          | 22.0 fg                         | 25.2 cd              | 3.3 ab                 | 16.0 ab               | 21.1 bcd         | 15.7 d       |
|            |                          | N3                          | 24.7 a                          | 27.9 a               | 2.6 e                  | 14.8 bc               | 22.0 b           | 13.2 d       |
|            |                          | N4                          | 21.6 gh                         | 25.2 cd              | 3.4 ab                 | 14.6 c                | 18.9 e           | 14.6 d       |

(续表 3)

| 年份<br>Year | 秸秆管理<br>Straw<br>management | 氮肥运筹<br>Nitrogen<br>management | 酸不溶木质素<br>Acid-insoluble<br>lignin | 总木质素<br>Total<br>lignin | 可溶性糖<br>Soluble<br>sugars | 半纤维素<br>Hemicellulose | 纤维素<br>Cellulose | 果胶<br>Pectin |
|------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|--------------|
| 2018–2019  | R1                          | CK                             | 22.4 de                            | 25.7 bcd                | 2.9 cd                    | 15.2 abc              | 22.6 b           | 19.8 bc      |
|            |                             | N1                             | 23.7 b                             | 26.9 ab                 | 2.9 cd                    | 15.3 abc              | 20.2 cde         | 21.5 ab      |
|            |                             | N2                             | 22.3 ef                            | 26.2 bc                 | 2.7 de                    | 15.1 bc               | 21.0 bcd         | 24.1 a       |
|            |                             | N3                             | 22.7 cd                            | 26.3 bc                 | 2.9 cd                    | 14.8 bc               | 24.5 a           | 23.7 a       |
|            |                             | N4                             | 24.0 b                             | 27.9 a                  | 2.7 cde                   | 15.1 abc              | 19.6 de          | 24.1 a       |
| 2019–2020  | R0                          | CK                             | 16.6 de                            | 21.1 ab                 | 2.4 b                     | 16.9 a                | 16.8 de          | 19.5 de      |
|            |                             | N1                             | 16.1 fg                            | 20.4 b                  | 3.1 a                     | 17.0 a                | 16.5 de          | 21.9 cd      |
|            |                             | N2                             | 16.0 gh                            | 20.5 b                  | 2.1 cd                    | 16.6 a                | 15.9 e           | 23.1 bc      |
|            |                             | N3                             | 16.4 ef                            | 20.8 ab                 | 1.9 de                    | 17.0 a                | 20.4 b           | 22.7 bc      |
|            |                             | N4                             | 15.7 h                             | 20.4 b                  | 1.9 de                    | 17.8 a                | 18.1 cd          | 18.7 e       |
|            | R1                          | CK                             | 18.0 a                             | 22.1 ab                 | 1.9 de                    | 14.1 b                | 17.3 cde         | 23.3 bc      |
|            |                             | N1                             | 17.7 b                             | 22.3 a                  | 2.5 b                     | 14.7 b                | 16.7 de          | 25.7 ab      |
|            |                             | N2                             | 17.2 c                             | 21.3 ab                 | 2.1 cd                    | 14.5 b                | 20.7 b           | 25.5 ab      |
|            |                             | N3                             | 17.0 cd                            | 21.2 ab                 | 2.2 c                     | 12.4 c                | 22.4 a           | 26.7 a       |
|            |                             | N4                             | 16.7 de                            | 21.6 ab                 | 1.8 e                     | 13.9 b                | 18.7 c           | 24.8 abc     |
|            |                             |                                |                                    |                         |                           |                       |                  |              |
|            |                             |                                |                                    |                         |                           |                       |                  |              |
|            |                             |                                |                                    |                         |                           |                       |                  |              |
|            |                             |                                |                                    |                         |                           |                       |                  |              |

方差分析 ANOVA

|                              |    |    |    |    |    |    |
|------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| 年份 Year (Y)                  | ** | ** | ** | ns | ** | ** |
| 秸秆管理 Straw management (R)    | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| 氮肥运筹 Nitrogen management (N) | ** | ns | ** | ** | ** | ** |
| R×N                          | ** | ns | *  | ** | ns | ** |
| R×Y                          | ** | ** | ** | ns | ** | *  |
| N×Y                          | ** | ** | ** | ns | ** | ** |
| R×N×Y                        | ** | ns | ** | ** | ** | ** |

缩写和处理同图 2。不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达显著水平( $P < 0.05$ )。\*、\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平显著差异, ns 表示差异不显著。  
Abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year ( $P < 0.05$ ). \* and \*\* indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively, while ns indicates no significant difference.

减氮处理中果胶含量均高于 CK。2019—2020 年度, 秸秆还田后酸不溶木质素含量在 N1 处理中达最大值, 总木质素含量各处理间无显著差异, 可溶性糖含量在 N1 处理中达最大值, 半纤维素含量在 N3 处理中达最小值, 其他处理间无显著差异, 纤维素含量在 N3 处理中达最大值并显著高于其他处理, 果胶含量变化与 2018—2019 年度一致。

水稻秸秆管理×氮肥运筹对高密度种植下油菜成熟期上部茎秆的酸不溶木质素、半纤维素、纤维素、果胶、可溶性糖含量影响达显著水平, 对总木质素含量影响未达显著水平(表 4)。与 R0 相比, R1

处理中酸不溶木质素、总木质素、纤维素和果胶含量显著增加, 可溶性糖含量显著降低, 2 年结果趋势一致。2018—2019 年度, 秸秆还田后酸不溶木质素、总木质素和可溶性糖含量在 N1 处理中达最大值, 减氮处理中半纤维素含量均高于 CK, 果胶含量在 N3 处理中达最大值, 与其他氮肥处理间差异显著。2019—2020 年度, 秸秆还田后酸不溶木质素和总木质素含量在 N4 处理中达最大值并与 N3 处理差异显著, 可溶性糖和果胶含量在 N1 处理中达最大值, 半纤维素含量各处理间无显著差异, 减氮处理中纤维素含量均显著高于 CK。

表 4 水稻秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜成熟期上部茎秆结构成分的影响  
Table 4 Effects of rice straw management and nitrogen management on upper stem composition of rapeseed at maturity (%)

| 年份<br>Year                   | 秸秆管理<br>Straw<br>management | 氮肥运筹<br>Nitrogen<br>management | 酸不溶木质素<br>Acid-insoluble lignin | 总木质素<br>Total lignin | 可溶性糖<br>Soluble sugars | 半纤维素<br>Hemicellulose | 纤维素<br>Cellulose | 果胶<br>Pectin |          |
|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|------------------|--------------|----------|
| 2018–<br>2019                | R0                          | CK                             | 20.2 e                          | 25.0 c               | 3.8 b                  | 23.2 bc               | 17.4 e           | 15.3 b       |          |
|                              |                             | N1                             | 18.5 f                          | 23.3 d               | 4.3 a                  | 24.8 a                | 21.0 d           | 6.4 f        |          |
|                              |                             | N2                             | 20.5 de                         | 25.9 bc              | 3.7 bc                 | 23.6 ab               | 18.1 e           | 7.6 ef       |          |
|                              |                             | N3                             | 21.8 a                          | 26.6 b               | 3.5 bcd                | 21.6 cd               | 24.8 c           | 8.7 def      |          |
|                              |                             | N4                             | 20.4 e                          | 24.9 c               | 3.4 cd                 | 22.7 bc               | 27.1 bc          | 10.9 cd      |          |
|                              | R1                          | CK                             | 20.8 cd                         | 26.2 b               | 2.7 e                  | 19.0 f                | 30.6 a           | 15.0 b       |          |
|                              |                             | N1                             | 21.9 a                          | 27.6 a               | 3.3 d                  | 20.8 de               | 28.6 ab          | 9.9 cde      |          |
|                              |                             | N2                             | 21.1 bc                         | 26.7 ab              | 2.5 e                  | 19.6 ef               | 30.5 a           | 12.5 c       |          |
|                              |                             | N3                             | 20.5 de                         | 26.1 b               | 2.4 e                  | 20.8 de               | 27.1 bc          | 18.6 a       |          |
|                              |                             | N4                             | 21.3 b                          | 26.2 b               | 2.7 e                  | 20.1 def              | 27.4 bc          | 15.7 b       |          |
|                              | 2019–<br>2020               | R0                             | CK                              | 23.3 a               | 27.1 a                 | 3.8 b                 | 18.0 ab          | 19.6 cd      | 15.2 bc  |
|                              |                             |                                | N1                              | 21.9 d               | 25.7 abc               | 4.7 a                 | 17.5 abc         | 20.7 c       | 14.6 bc  |
|                              |                             |                                | N2                              | 20.8 f               | 24.7 c                 | 2.9 def               | 17.7 abc         | 12.9 e       | 10.7 e   |
|                              |                             |                                | N3                              | 22.1 d               | 26.0 abc               | 3.4 bc                | 18.8 a           | 22.2 c       | 14.1 bcd |
|                              |                             |                                | N4                              | 22.4 c               | 26.4 ab                | 2.9 efg               | 18.6 ab          | 17.4 d       | 11.0 e   |
| R1                           |                             | CK                             | 23.0 b                          | 26.9 a               | 2.6 fg                 | 16.4 c                | 25.7 b           | 13.3 cd      |          |
|                              |                             | N1                             | 22.4 c                          | 26.1 abc             | 3.3 cd                 | 16.4 c                | 28.5 ab          | 17.9 a       |          |
|                              |                             | N2                             | 21.1 e                          | 24.8 bc              | 3.1 cde                | 17.4 abc              | 29.5 a           | 14.4 bc      |          |
|                              |                             | N3                             | 20.9 ef                         | 24.7 c               | 2.9 def                | 16.3 c                | 30.7 a           | 16.4 ab      |          |
|                              |                             | N4                             | 23.1 ab                         | 27.2 a               | 2.5 g                  | 17.3 bc               | 30.3 a           | 12.0 de      |          |
| 方差分析 ANOVA                   |                             |                                |                                 |                      |                        |                       |                  |              |          |
| 年份 Year (Y)                  |                             |                                | **                              | **                   | **                     | ns                    | ns               | **           |          |
| 秸秆管理 Straw management (R)    |                             |                                | **                              | **                   | **                     | *                     | **               | **           |          |
| 氮肥运筹 Nitrogen management (N) |                             |                                | **                              | ns                   | **                     | ns                    | **               | ns           |          |
| R×N                          |                             |                                | **                              | ns                   | **                     | *                     | **               | **           |          |
| R×Y                          |                             |                                | **                              | **                   | **                     | **                    | **               | *            |          |
| N×Y                          |                             |                                | **                              | **                   | **                     | *                     | **               | ns           |          |
| R×N×Y                        |                             |                                | **                              | ns                   | **                     | ns                    | **               | **           |          |

缩写和处理同图 2。不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达显著水平( $P < 0.05$ )。\*、\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平显著差异, ns 表示差异不显著。  
Abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year ( $P < 0.05$ ). \* and \*\* indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively, while ns indicates no significant difference.

2.6 成熟期茎秆硅、钙含量

秸秆管理、氮肥运筹处理对油菜茎秆硅含量影响均达显著水平, 在 2018—2019 年互作效应未达显著水平, 但在 2019—2020 年度达显著水平, 2 年趋势基本一致(图 6)。与 R0 相比, R1 基部茎秆硅含量显著高于不还田处理, 上部茎秆规律基本一致, 但上部茎秆变化幅度小于基部茎秆, CK 处理茎秆基部硅含量显著低于其他氮肥运筹处理。

秸秆管理、氮肥运筹对茎秆钙含量影响达显著

水平, 且互作效应均达显著水平(图 7)。相较于 R0, R1 茎秆基部钙含量高于不还田处理, 上部茎秆结果与基部基本一致, 但基部茎秆钙含量显著高于上部茎秆钙含量。在各氮肥处理中, N3 处理钙含量最高, N3 处理较 CK 处理钙含量有增加趋势, N4 和 N1 处理导致茎秆钙含量显著降低, 基部与上部茎秆钙含量变化规律基本一致。

2.7 花期茎秆显微结构

秸秆管理、氮肥运筹对茎秆显微结构各指标影

响显著,并且对皮层厚度、维管束长、横截面积和维管束数目的互作效应达显著水平(表 5)。与 R0 相比, R1 显著增加了茎秆的表皮厚度、皮层厚度、横截面积、维管束数目和面积,而维管束长和周长有增加趋势但不显著。在氮肥运筹处理中,秸秆还田处理下 N3 处理下皮层厚度、表皮厚度、维管束长、周长和数目均最大,横截面积和维管束面积与 CK 无显著差异,表现出最佳效果,显著高于其他氮肥处理。秸秆还田下, N3 处理中茎秆纤维束数目显著增多,并且大小和排列更加合理,这进一步证实了秸秆管理和氮肥运筹在改善油菜茎秆结构方面的协同作用(图 8)。

## 2.8 茎秆显微结构、茎秆成分及产量和产量构成与倒伏的相关性

茎秆显微结构特征与倒伏性状存在显著关联(表 6)。地上部鲜重与表皮厚度、维管束周长、横

截面积及维管束数目和面积呈显著正相关,表明植株生物量的积累依赖于表皮机械支撑和维管束系统的协同发育。抗折力与显微结构特征关联性最为广泛,其与表皮厚度、维管束周长、横截面积及维管束面积的相关系数均达极显著水平( $P < 0.01$ ),证实茎秆机械强度主要源于表皮层结构强化和维管束系统的空间拓展。值得注意的是,维管束面积对倒伏性状呈现双向调控作用,其与抗折力正相关( $r^2 = 0.561$ ,  $P < 0.01$ ),但同时也与倒伏指数显著正相关( $r^2 = 0.365$ ,  $P < 0.05$ ),暗示维管束过度发育可能通过增加茎秆重心高度而提升倒伏风险。此外,皮层厚度与所有倒伏性状均无显著相关性,表明其在抗倒伏机制中作用有限。总体而言,显微结构特征,尤其是维管束面积和横截面积与地上部鲜重和抗折力的相关性显著,而对倒伏角度和倒伏指数的影响较小。

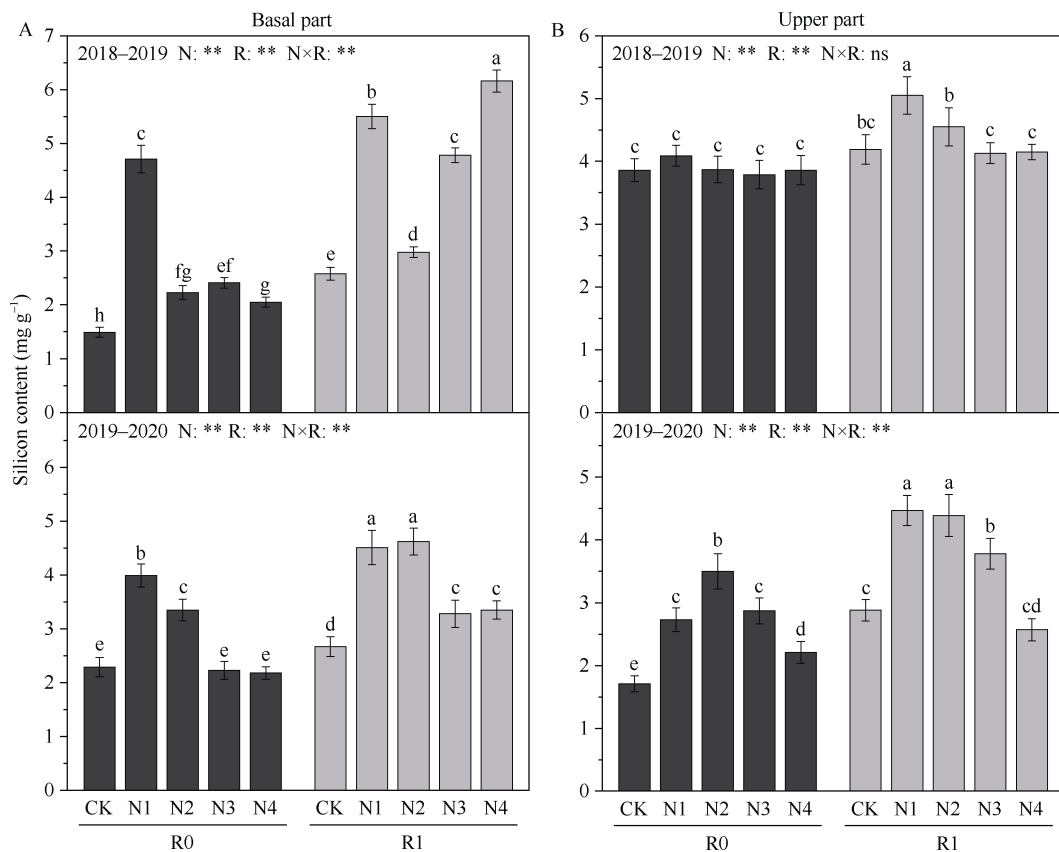


图 6 水稻秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜成熟期茎秆硅含量的影响

Fig. 6 Effects of rice straw management and nitrogen management on stem silicon content of rapeseed at maturity

缩写和处理同图 2。不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达显著水平( $P < 0.05$ )。\*\*表示在 0.01 概率水平显著差异, ns 表示差异不显著。

Abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year ( $P < 0.05$ ). \*\* indicates significant differences at the 0.01 probability level, respectively, while ns indicates no significant difference.

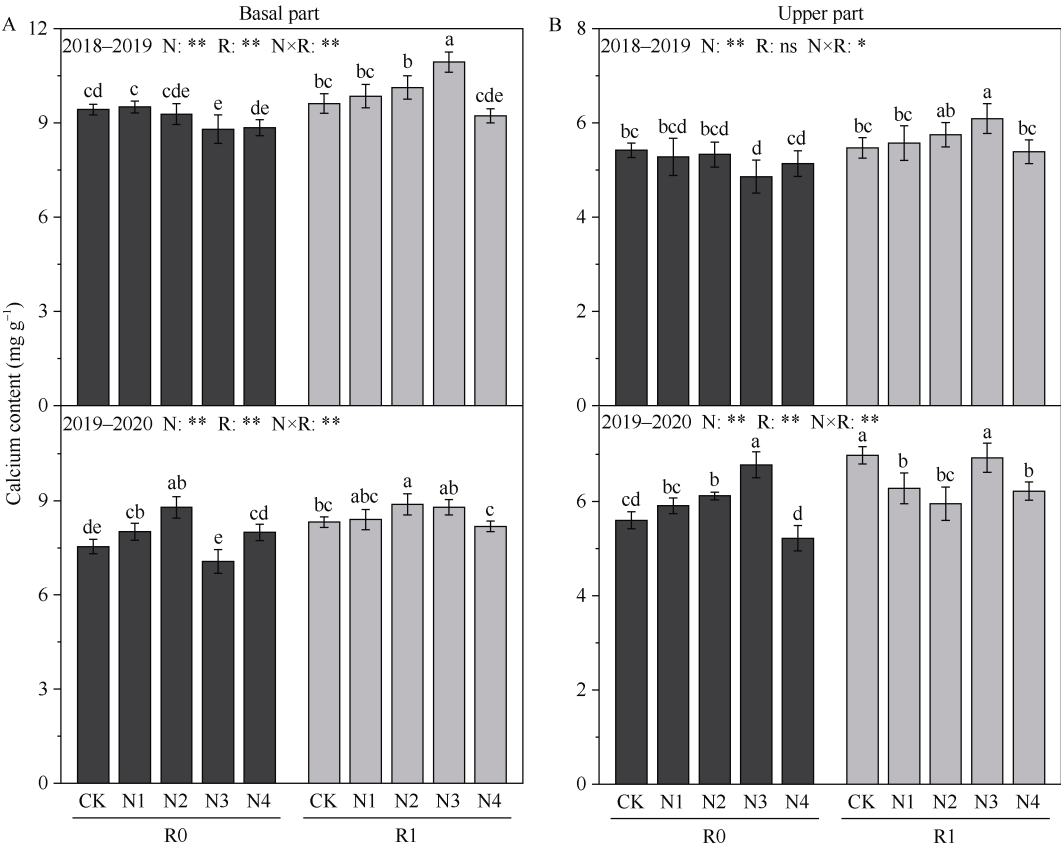


图 7 水稻秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜成熟期茎秆钙含量的影响

**Fig. 7 Effects of rice straw management and nitrogen management on stem calcium content of rapeseed at maturity**

缩写和处理同图 2。不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达显著水平( $P < 0.05$ )。\*、\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平显著差异, ns 表示差异不显著。

Abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year ( $P < 0.05$ ). \* and \*\* indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively, while ns indicates no significant difference.

表 5 水稻秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜花期茎秆显微结构的影响

**Table 5 Effects of rice straw management and nitrogen management on stem microstructure of rapeseed at flowering stage**

| 秸秆管理<br>Straw<br>management | 氮肥运筹<br>Nitrogen<br>management | 表皮厚度<br>Epidermal<br>thickness<br>( $\mu\text{m}$ ) | 皮层厚度<br>Cortical<br>thickness<br>( $\mu\text{m}$ ) | 维管束长<br>Vascular<br>length<br>( $\mu\text{m}$ ) | 维管束周长<br>Vascular<br>circumference<br>(mm) | 横截面积<br>Cross-section<br>al area<br>( $\text{mm}^2$ ) | 维管束数目<br>Number of<br>vascular<br>bundles | 维管束面积<br>Vascular<br>bundle area<br>( $\text{mm}^2$ ) |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| R0                          | CK                             | 20.3 abc                                            | 255.5 e                                            | 659.4 e                                         | 35.9 a                                     | 98.3 bcd                                              | 78.0 c                                    | 13.4 abc                                              |
|                             | N1                             | 17.2 e                                              | 328.9 bc                                           | 857.5 cd                                        | 25.9 c                                     | 52.8 h                                                | 65.0 e                                    | 8.2 d                                                 |
|                             | N2                             | 20.3 abc                                            | 337.7 b                                            | 983.7 a                                         | 34.6 ab                                    | 92.7 de                                               | 80.0 bc                                   | 12.4 c                                                |
|                             | N3                             | 19.4 bcd                                            | 296.4 d                                            | 807.6 d                                         | 35.7 a                                     | 95.2 cd                                               | 86.0 a                                    | 13.2 bc                                               |
|                             | N4                             | 17.0 e                                              | 322.2 bcd                                          | 939.9 ab                                        | 30.9 b                                     | 85.3 f                                                | 82.0 abc                                  | 12.8 bc                                               |
| R1                          | CK                             | 20.1 abc                                            | 323.0 bcd                                          | 843.2 cd                                        | 35.8 a                                     | 103.9 ab                                              | 86.0 a                                    | 14.5 a                                                |
|                             | N1                             | 18.3 cde                                            | 348.7 b                                            | 706.3 e                                         | 31.1 b                                     | 77.1 g                                                | 72.0 d                                    | 8.6 d                                                 |
|                             | N2                             | 21.4 ab                                             | 321.8 bcd                                          | 903.3 bc                                        | 35.8 a                                     | 106.9 a                                               | 84.0 ab                                   | 14.0 ab                                               |
|                             | N3                             | 22.2 a                                              | 397.3 a                                            | 996.5 a                                         | 36.4 a                                     | 101.7 abc                                             | 86.0 a                                    | 13.8 ab                                               |
|                             | N4                             | 17.7 de                                             | 306.3 cd                                           | 817.8 d                                         | 31.6 b                                     | 88.0 ef                                               | 78.0 c                                    | 12.5 c                                                |

方差分析 ANOVA

|                              |   |    |    |    |    |   |   |
|------------------------------|---|----|----|----|----|---|---|
| 秸秆管理<br>Straw management (R) | * | ** | ns | ns | ** | * | * |
|------------------------------|---|----|----|----|----|---|---|

(续表 5)

| 秸秆管理<br>Straw<br>management     | 氮肥运筹<br>Nitrogen<br>management | 表皮厚度<br>Epidermal<br>thickness<br>( $\mu\text{m}$ ) | 皮层厚度<br>Cortical<br>thickness<br>( $\mu\text{m}$ ) | 维管束长<br>Vascular<br>length<br>( $\mu\text{m}$ ) | 维管束周长<br>Vascular<br>circumference<br>(mm) | 横截面积<br>Cross-section<br>al area<br>( $\text{mm}^2$ ) | 维管束数目<br>Number of<br>vascular<br>bundles | 维管束面积<br>Vascular<br>bundle area<br>( $\text{mm}^2$ ) |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 氮肥运筹<br>Nitrogen management (N) |                                | **                                                  | **                                                 | **                                              | **                                         | **                                                    | **                                        | **                                                    |
| R×N                             |                                | ns                                                  | **                                                 | **                                              | ns                                         | **                                                    | **                                        | ns                                                    |

缩写和处理同图 2。不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达显著水平( $P < 0.05$ )。\*、\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著, ns 表示差异不显著。  
Abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year ( $P < 0.05$ ). \* and \*\* indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively, while ns indicates no significant difference.

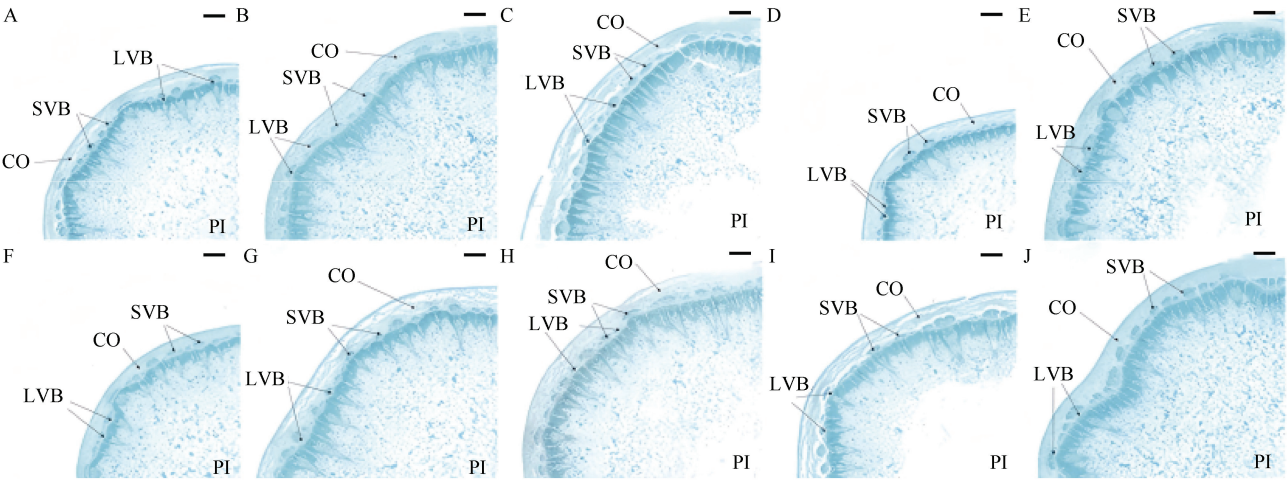


图 8 水稻秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜花期茎秆显微结构的影响  
**Fig. 8 Effects of straw management and nitrogen management on calcium content of stems at maturity stage of field rapeseed**  
A~E: 秸秆全量还田(R1)条件下 N1 (A)、N2 (B)、N3 (C)、N4 (D)、CK (E)处理的茎秆显微结构。F~J: 秸秆不还田(R0)条件下 N1 (F)、N2 (G)、N3 (H)、N4 (I)、CK (J)处理的茎秆显微结构。CO: 皮层; SVB: 小维管束; LVB: 大维管束; PI: 髓部。缩写和处理同图 2, 标尺为 500  $\mu\text{m}$ 。  
A~E: microstructure of stems managements with N1 (A), N2 (B), N3 (C), N4 (D) and CK (E) under full straw incorporation (R1). F~J: microstructure of stems managements with N1 (F), N2 (G), N3 (H), N4 (I) and CK (J) under no straw incorporation (R0). CO: cortex; SVB: small vascular bundle; LVB: great vascular bundle; PI: medulla. Abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 2. Scale bar = 500  $\mu\text{m}$ .

表 6 茎秆显微结构与倒伏的相关性  
**Table 6 Correlation between stem microstructure and lodging-related traits**

| 倒伏相关性状<br>Lodging-related traits                   | 表皮厚度<br>Epidermal thickness<br>( $\mu\text{m}$ ) | 皮层厚度<br>Cortical thickness<br>( $\mu\text{m}$ ) | 维管束长<br>Vascular length<br>( $\mu\text{m}$ ) | 维管束周长<br>Vascular circumference<br>(mm) |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                                    |                                                  |                                                 |                                              |                                         |
| 地上部鲜重 Shoot fresh weight ( $\text{g plant}^{-1}$ ) | 0.510**                                          | 0.301                                           | 0.346                                        | 0.435*                                  |
| 倒伏角度 Lodging angle ( $^{\circ}$ )                  | -0.066                                           | -0.111                                          | 0.164                                        | 0.019                                   |
| 茎秆抗折力 Stem breaking strength (N)                   | 0.538**                                          | 0.349                                           | 0.376*                                       | 0.538**                                 |
| 倒伏指数 Lodging index                                 | -0.087                                           | 0.096                                           | 0.146                                        | 0.303                                   |

| 倒伏相关性状<br>Lodging-related traits                   | 横截面积<br>Cross-sectional area ( $\text{mm}^2$ ) | 维管束数目<br>Number of vascular bundles | 维管束面积<br>Vascular bundle area ( $\text{mm}^2$ ) |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                                                    |                                                |                                     |                                                 |
| 地上部鲜重 Shoot fresh weight ( $\text{g plant}^{-1}$ ) | 0.458*                                         | 0.382*                              | 0.533**                                         |
| 倒伏角度 Lodging angle ( $^{\circ}$ )                  | 0.281                                          | 0.334                               | 0.415*                                          |
| 茎秆抗折力 Stem breaking strength (N)                   | 0.544**                                        | 0.387*                              | 0.561**                                         |
| 倒伏指数 Lodging index                                 | 0.372*                                         | 0.251                               | 0.365*                                          |

\*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。\*and \*\* indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

上部茎秆成分与倒伏性状存在显著关联(表 7)。总木质素、酸不溶木质素、可溶性糖、半纤维素与地上部鲜重、田间实际倒伏角度及倒伏指数呈极显著负相关( $P < 0.01$ ), 总木质素和酸不溶木质素与抗折力呈极显著正相关, 而可溶性糖、半纤维素与抗折力无显著相关性。纤维素只与抗折力呈显著正相

关( $r^2 = 0.442, P < 0.05$ )。果胶除与抗折力呈极显著负相关外, 与其他倒伏性状均呈极显著正相关。硅含量则与地上部鲜重和实际倒伏角度呈显著负相关, 与倒伏指数呈负相关但不显著, 与抗折力无显著相关性。钙含量与抗折力呈极显著正相关, 与其他性状无显著相关性。

表 7 茎秆成分与倒伏的相关性  
Table 7 Correlation between stem composition and lodging-related traits

| 倒伏相关性状<br>Lodging-related traits                  | 酸不溶木质素<br>Acid-insoluble lignin | 总木质素<br>Total lignin | 可溶性糖<br>Soluble sugars | 半纤维素<br>Hemicellulose |
|---------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| 地上部鲜重 Shoot fresh weight (g plant <sup>-1</sup> ) | -0.458**                        | -0.465**             | -0.575**               | -0.695**              |
| 倒伏角度 Lodging angle (°)                            | -0.630**                        | -0.627**             | -0.731**               | -0.661**              |
| 茎秆抗折力 Stem breaking strength (N)                  | 0.639**                         | 0.638**              | -0.009                 | 0.177                 |
| 倒伏指数 Lodging index                                | -0.782**                        | -0.789**             | -0.508**               | -0.703**              |
| 倒伏相关性状<br>Lodging-related traits                  | 纤维素<br>Cellulose                | 果胶<br>Pectin         | 硅<br>Si                | 钙<br>Ca               |
| 地上部鲜重 Shoot fresh weight (g plant <sup>-1</sup> ) | 0.095                           | 0.456**              | -0.394*                | 0.058                 |
| 倒伏角度 Lodging angle (°)                            | -0.093                          | 0.545**              | -0.390*                | -0.160                |
| 茎秆抗折力 Stem breaking strength (N)                  | 0.442*                          | -0.553**             | 0.127                  | 0.557**               |
| 倒伏指数 Lodging index                                | -0.279                          | 0.618**              | -0.299                 | -0.256                |

\*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。\*and \*\* indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 讨论

3.1 秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜抗倒性的影响

茎秆倒伏是限制长江流域高密度直播油菜高产稳产的关键瓶颈<sup>[17]</sup>, 受栽培措施调控, 常用倒伏指数对其进行量化评价。秸秆管理和氮肥运筹是调控油菜株型结构与茎秆力学性能的 2 大核心农艺措施, 深刻影响茎秆抗倒性。本研究发现, 水稻秸秆全量还田(R1)显著促进了油菜的生长发育, 相较于 R0, R1 处理下地上部鲜重平均增加 29.1%, 茎秆抗折力提升 23.3%(图 3, 图 4)。这主要归因于秸秆腐解释放的养分改善了土壤肥力, 促进了茎秆细胞壁纤维素、木质素、果胶等成分的合成积累(表 3, 表 4, 图 6 和图 7), 并优化了茎秆显微结构, 表皮厚度、皮层厚度、维管束数目及面积相较于秸秆不还田显著增加(表 5), 从而增强了茎秆的机械强度和韧性。然而, 秸秆还田也增加倒伏风险, 地上部鲜重和株高的增幅超过茎秆抗折力的提升幅度, 导致成熟期油菜田间实际倒伏角度显著增加, 整体倒伏指数平均增加了 7.9%(图 2 和图 5)。这与秸秆还田导致玉米和小麦株高和地上部鲜重增加的报道一致<sup>[34-35]</sup>, 表明在高密度直播条件下, 单一秸秆还田

虽能部分强化茎秆, 但不足以抵消其带来的生物量负荷增加的风险。

氮肥是调控油菜株型发育和碳氮代谢的核心因子<sup>[36]</sup>。氮肥过量施用或运筹不合理虽能维持或增加生物量(图 3), 但易导致植株旺长、茎秆充实度下降, 显著增加倒伏指数(图 5), 与前人关于高氮加剧倒伏风险的观点一致。相反, 氮肥减量与合理运筹表现出较好的抗倒调控潜力, N3 处理不仅维持了较高的地上部鲜重和茎秆抗折力(图 3 和图 4), 其田间实际倒伏角度较 CK 显著降低 2.6%, 倒伏指数显著降低 10.2%(图 2 和图 5)。这与小麦等作物上发现的“氮肥后移”可优化节间结构、增强茎秆强度的结论一致<sup>[26]</sup>, 而本研究在减氮背景下验证了其有效性。

本研究揭示了秸秆还田与特定氮肥运筹之间显著的正向作用效应, 实现了减氮、抗倒目标的协同。结果表明, 在秸秆还田处理下, N3 处理茎秆纤维素、果胶和钙含量均得到显著提升(表 3, 表 4 和图 7), 田间实际倒伏角度和倒伏指数显著降低(图 2 和图 5), 优于单项措施的效果。这可能是秸秆提供的硅、钙等元素与薹期追氮(N3)共同激活了茎秆中下部的细胞壁合成代谢途径<sup>[37]</sup>。因此, 合理的氮肥运筹不仅可以缓解秸秆还田增加的倒伏风险, 还可以减少氮

肥投入, 本研究发现, 无论是个体还是群体表现, 在长江流域秸秆还田高密度种植模式下采用减氮 20% 基肥: 苗肥: 薹肥=6:2:2 的处理, 植株抗倒性与常规施氮相当。

### 3.2 秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜茎秆结构成分的影响

茎秆结构成分是决定其抗倒伏能力的关键因素, 特别是细胞壁组分及硅、钙等矿质元素含量<sup>[38]</sup>。本研究系统分析了水稻秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜茎秆结构成分的影响, 揭示了二者协同调控茎秆抗倒性的生理生化机制。相较于 R0, R1 处理显著增加了成熟期油菜茎秆的纤维素、果胶以及硅、钙含量, 分别增加了 26.3%、30.6%、45.0%和 9.5% (表 3, 表 4, 图 6 和图 7)。其机制可能在于秸秆腐解释放的木质素降解产物或相关信号分子, 激活了油菜茎秆的苯丙烷代谢通路, 促进木质素等结构性物质的合成与积累<sup>[39]</sup>, 此外, 秸秆本身富含硅、钙等元素, 其矿质化释放增加了土壤有效硅、钙供应, 促进了油菜茎秆对这些元素的吸收<sup>[40-41]</sup>, 以上结构成分的优化共同奠定了秸秆还田增强茎秆强度的物质基础。

氮素作为细胞壁合成所需能量和碳骨架分配的关键调控因子, 其施用策略显著影响茎秆成分<sup>[42]</sup>。本研究发现, 在减氮 20% 处理下, 不同的氮肥运筹方式对茎秆成分影响各异。值得注意的是, N3 处理表现出较好的调控效果, 其茎秆纤维素、果胶及钙含量均维持在较高水平, 甚至显著高于 CK 处理 (表 3, 表 4 和图 7)。这可能是由于薹期是油菜茎秆快速生长和次生细胞壁加厚的关键时期, 此时追施氮肥能更精准地为茎秆结构物质的合成提供必要的氮素营养和碳代谢底物。相反, 花期(过晚)追肥(N4)或氮肥全部基施(N1)则导致纤维素、果胶含量显著降低 (表 3 和表 4), 这与 N4 处理倒伏指数增加、抗倒性降低的结果一致。前人研究也表明, 过量或不当时期的氮素供应如后期高氮易导致营养生长和可溶性糖积累, 可能削弱结构性物质(如纤维素)的合成比例, 或改变碳分配流向, 不利于茎秆充实<sup>[43]</sup>。

在本研究中, 水稻秸秆还田与薹期追氮存在显著协同增效作用。秸秆还田提供硅、钙等矿质元素促进茎秆物质合成, 减氮 20% 的 N3 处理在薹期精准供氮, 增强氮素营养和碳代谢动力。秸秆还田结合减氮 20% 薹期追肥, 驱动了茎秆纤维素、总木质素、果胶及钙的高效合成与转运, 其含量显著优于其他

减氮处理, 等同或优于全氮处理, 实现茎秆结构综合强化, 显著降低倒伏指数, 最终实现减氮且增强抗倒性的目标。

### 3.3 秸秆管理耦合氮肥运筹对油菜花期茎秆显微结构的影响

油菜的抗倒性与茎秆结构密切相关, 皮层厚度、表皮厚度、维管束数目及维管束面积等茎秆显微结构可直观反映其内部微观状况, 是评价抗倒伏能力的重要指标<sup>[44]</sup>。与 R0 相比, R1 显著优化油菜花期茎秆的显微结构 (表 5), 显著增加了茎秆的表皮厚度、皮层厚度、维管束长度、横截面积、维管束数目及面积。这种结构强化主要源于秸秆腐解提供的硅、钙等矿质元素促进了表皮硅质化和细胞壁果胶交联, 同时可能激活了与细胞壁合成相关的代谢通路, 促进了厚壁组织的发育, 从而整体提升了茎秆抗折力, 这与前人在小麦上的观察一致<sup>[45]</sup>。

氮肥运筹对花期油菜茎秆显微结构具有关键调控作用, 且与秸秆管理存在显著交互效应 (表 5)。在秸秆还田条件下, N3 处理表皮厚度、皮层厚度、维管束长度以及维管束面积均达到最大值, 分别为 22.16  $\mu\text{m}$ 、397.27  $\mu\text{m}$ 、996.47  $\mu\text{m}$  和 13.84  $\text{mm}^2$ , 显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ), 这表明合适的氮肥运筹能够在减少氮肥施用的同时促进茎秆外围组织的生长以及合理的细胞排列方式, 从而增强茎秆强度。鉴于不同基因型对秸秆管理耦合氮肥运筹的响应可能存在差异, 以及 2 年气候差异对部分结果产生影响, 如 2019—2020 年干旱导致茎秆抗折力普遍低于 2018—2019 年, 未来需在多点、多品种、多气候年型下验证该方案的适用性。

## 4 结论

水稻秸秆全量还田和氮肥运筹措施及其互作效应对油菜倒伏相关指标均具有显著影响。在抗倒性方面, 秸秆还田条件下减氮 20% 并薹期追肥可以降低田间实际倒伏角度, 增加茎秆抗折力, 降低倒伏指数, 使茎秆纤维素、果胶和钙含量增加, 茎秆皮层厚度、表皮厚度、维管束数目以及维管束面积显著提高, 维管束细胞排列结构更加合理。因此, 在长江流域稻油轮作秸秆全量还田条件下, 全生育期施氮 192  $\text{kg hm}^{-2}$  (基肥: 苗肥: 薹肥=6:2:2), 可促进抗倒伏性能提升与氮肥减施的协同, 节约生产成本和劳动力, 有效减轻过量施氮导致的环境污染。

## References

- [1] 王先领, 姜岳, 雷貽忠, 等. 外源物质浸种对迟播油菜越冬期抗寒性及产量的影响. 作物学报, 2024, 50: 1271–1286.  
Wang X L, Jiang Y, Lei Y Z, et al. Effects of seed soaking with exogenous substances on late-seeded rapeseed cold resistance of during overwintering period and yield. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 1271–1286 (in Chinese with English abstract).
- [2] Li Z, Gao G D, Xu L S, et al. Reducing nitrogen application at high planting density enhances secondary cell wall formation and decreases stem lodging in rapeseed. *Eur J Agron*, 2024, 156: 127162.
- [3] Li X Y, Zuo Q S, Chang H B, et al. Higher density planting benefits mechanical harvesting of rapeseed in the Yangtze River Basin of China. *Field Crops Res*, 2018, 218: 97–105.
- [4] 黄肖玉, 姜洪祥, 邵东李, 等. 高密度直播油菜不同类型叶片功能探究. 作物学报, 2024, 50: 2550–2561.  
Huang X Y, Lou H X, Shao D L, et al. Exploring the functions of different leaf types of directly-sown rapeseed under high density. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 2550–2561 (in Chinese with English abstract).
- [5] 蒯婕, 左青松, 陈爱武, 等. 不同栽培模式对油菜产量和倒伏相关性状的影响. 作物学报, 2017, 43: 875–884.  
Kuai J, Zuo Q S, Chen A W, et al. Effects of different cultivation modes on canola yield and lodging related indices. *Acta Agron Sin*, 2017, 43: 875–884 (in Chinese with English abstract).
- [6] 丛日环, 张智, 鲁剑巍. 长江流域不同种植区气候因子对冬油菜产量的影响. 中国油料作物学报, 2019, 41: 894–903.  
Cong R H, Zhang Z, Lu J W. Climate impacts on yield of winter oilseed rape in different growth regions of the Yangtze River Basin. *Chin J Oil Crop Sci*, 2019, 41: 894–903 (in Chinese with English abstract).
- [7] Hu Q, Hua W, Yin Y, et al. Rapeseed research and production in China. *Crop J*, 2017, 5: 127–135.
- [8] 张青松, 齐涛, 燕桓, 等. 稻茬田油菜直播秸秆覆盖还田装置设计与试验. 农业机械学报, 2025, 56(1): 186–196.  
Zhang Q S, Qi T, Yan H, et al. Design and experiment of rape direct seeding straw mulching returning device in rice stubble field. *Trans CSAE*, 2025, 56(1): 186–196 (in Chinese with English abstract).
- [9] 樊友众, 王先领, 王宗铠, 等. 秸秆还田耦合氮肥运筹对稻茬油菜光合性能及产量的影响. 作物学报, 2025, 51: 2139–2151.  
Fan Y Z, Wang X L, Wang Z K, et al. Effects of straw incorporation combined with nitrogen management on photosynthetic efficiency and yield of rapeseed following rice. *Acta Agron Sin*, 2025, 51: 2139–2151 (in Chinese with English abstract).
- [10] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272–276.  
Dai Z G, Lu J W, Li X K, et al. Nutrient release characteristic of different crop straws manure. *Trans CSAE*, 2010, 26(6): 272–276 (in Chinese with English abstract).
- [11] Zhang S T, Ren T, Fang Y T, et al. Enhancing soil labile organic matter through oilseed rape-rice rotation and straw returning in paddy-upland systems. *Plant Soil*, 2025: 1–18.
- [12] 王宣茗, 官玉, 姜雪, 等. 超细水稻秸秆还田对干湿交替稻田水分生产率、水稻产量及品质的影响. 农业工程学报, 2025, 41(8): 97–108.  
Wang X M, Guan Y, Jiang X, et al. Effects of ultra-fine rice straw return to the field on water productivity, rice yield and quality in paddy fields on alternating dry and wet conditions. *Trans CSAE*, 2025, 41(8): 97–108 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王晓华. 水稻秸秆全量还田对直播油菜出苗和产量的影响. 园艺与种苗, 2023, 43(3): 86–87.  
Wang X H. Effects of total rice straw returning on seedling emergence and yield of direct-seeded rapeseed. *Hort Seed*, 2023, 43(3): 86–87 (in Chinese with English abstract).
- [14] 刘慧屿, 刘慧颖, 姜春荣, 等. 不同秸秆还田模式对风沙土玉米生育特性及土壤活性碳、氮的影响. 土壤通报, 2018, 49: 133–139.  
Liu H Y, Liu H Y, Lou C R, et al. Effects of straw incorporation modes on characteristics of maize growth and labile organic carbon and nitrogen in sandy soil. *Chin J Soil Sci*, 2018, 49: 133–139 (in Chinese with English abstract).
- [15] 孙加威, 李娜, 王春雨, 等. 栽插方式和施钾量对杂交水稻抗倒伏能力的影响. 核农学报, 2017, 31: 2408–2417.  
Sun J W, Li N, Wang C Y, et al. Effects of transplanting methods and potassium rates on lodging resistance of hybrid rice. *J Nucl Agric Sci*, 2017, 31: 2408–2417 (in Chinese with English abstract).
- [16] Wu W, Ma B L, Fan J J, et al. Management of nitrogen fertilization to balance reducing lodging risk and increasing yield and protein content in spring wheat. *Field Crops Res*, 2019, 241: 107584.
- [17] 袁圆, 汪波, 周广生, 等. 播期和种植密度对油菜产量和茎秆抗倒性的影响. 中国农业科学, 2021, 54: 1613–1626.  
Yuan Y, Wang B, Zhou G S, et al. Effects of different sowing dates and planting densities on the yield and stem lodging resistance of rapeseed. *Sci Agric Sin*, 2021, 54: 1613–1626 (in Chinese with English abstract).
- [18] Wu W, Shah F, Duncan R W, et al. Grain yield, root growth habit and lodging of eight oilseed rape genotypes in response to a short period of heat stress during flowering. *Agric For Meteorol*, 2020, 287: 107954.
- [19] 陈慧, 高丽萍, 陈勇, 等. 机械直播同步深施肥对冬油菜茎秆抗倒性和产量的影响. 农业工程学报, 2022, 38(5): 20–27.  
Chen H, Gao L P, Chen Y, et al. Effects of mechanical direct seeding synchronous deep fertilization on winter rapeseed stem lodging resistance and yield. *Trans CSAE*, 2022, 38(5): 20–27 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李方一, 黄璜, 官梅, 等. 油菜理想株型研究进展. 中国油料作物学报, 2023, 45: 4–16.  
Li F Y, Huang H, Guan M, et al. Research progress toward the ideal type of rapeseed plant. *Chin J Oil Crop Sci*, 2023, 45: 4–16 (in Chinese with English abstract).
- [21] Lou H X, Peng Y, Wang C Y, et al. Utilizing auxin dwarf genes to optimize seed yield and lodging resistance in rapeseed. *Crop J*, 2024, 12: 1208–1221.
- [22] 孙盈盈. 不同栽培措施对油菜产量及抗倒性的影响. 华中农业大学硕士学位论文, 湖北武汉, 2016.  
Sun Y Y. Effects of Different Cultivation Measures on Rape Yield and Lodging Resistance. MS Thesis of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [23] 李小勇, 周敏, 王涛, 等. 种植密度对油菜机械收获关键性状的影响. 作物学报, 2018, 44: 278–287.

- Li X Y, Zhou M, Wang T, et al. Effects of planting density on the mechanical harvesting characteristics of semi-winter rapeseed. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 278–287 (in Chinese with English abstract).
- [24] Shi Z L, Mao T Y, Ma L, et al. Effects of delayed application of nitrogen fertilizer on yield, canopy structure, and microenvironment of winter wheat with different planting densities. *Agronomy*, 2025, 15: 502.
- [25] 胡雅杰, 朱大伟, 邢志鹏, 等. 改进施氮运筹对水稻产量和氮素吸收利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21: 12–22.
- Hu Y J, Zhu D W, Xing Z P, et al. Modifying nitrogen fertilization ratio to increase the yield and nitrogen uptake of super Japonica rice. *J Plant Nutr Fert*, 2015, 21: 12–22 (in Chinese with English abstract).
- [26] 周洁, 王旭, 朱玉磊, 等. 氮肥运筹模式对小麦茎秆抗倒性能与产量的影响. *麦类作物学报*, 2019, 39: 979–987.
- Zhou J, Wang X, Zhu Y L, et al. The effect of nitrogen fertilizer operation and research mode on the lodging resistance and yield of wheat stalk. *J Triticeae Crops*, 2019, 39: 979–987 (in Chinese with English abstract).
- [27] Tan X Q, Bai M Q, Wang Z K, et al. Simple-efficient cultivation for rapeseed under UAV-sowing: developing a high-density and high-light-efficiency population via tillage methods and seeding rates. *Field Crops Res*, 2025, 327: 109887.
- [28] McKenzie R R, Deyholos M K. Effects of plant growth regulator treatments on stem vascular tissue development in linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Ind Crops Prod*, 2011, 34: 1119–1127.
- [29] Tan X Q, Wang Z K, Zhang Y J, et al. Biochar-based pelletized seed enhances the yield of late-sown rapeseed by improving the relative growth rate and cold resistance of seedlings. *Ind Crops Prod*, 2025, 223: 119993.
- [30] Eticha D, Stass A, Horst W J. Cell-wall pectin and its degree of methylation in the maize root-apex: significance for genotypic differences in aluminium resistance. *Plant Cell Environ*, 2005, 28: 1410–1420.
- [31] Taylor K A, Buchanan-Smith J G. A colorimetric method for the quantitation of uronic acids and a specific assay for galacturonic acid. *Anal Biochem*, 1992, 201: 190–196.
- [32] 贾雨薇, 杨瑞林, 张洋, 等. 一种优化的测定水稻硅含量的方法. *植物学报*, 2016, 51: 679–683.
- Jia Y W, Yang R L, Zhang Y, et al. An optimized method to determine silicon content in rice. *Chin Bull Bot*, 2016, 51: 679–683 (in Chinese with English abstract).
- [33] 汤秀梅, 李崇宗, 尹家元, 等. 蔬菜中钙铝元素存在形态分析. *微量元素与健康研究*, 2001, 18(4): 49–50.
- Tang X M, Li C Z, Yin J Y, et al. Speciation analysis of calcium and aluminum in vegetables. *Stud Trace Elem Health*, 2001, 18(4): 49–50 (in Chinese with English abstract).
- [34] Liu C H, Yan H H, Wang W Y, et al. Layered application of phosphate fertilizer increased winter wheat yield by promoting root proliferation and phosphorus accumulation. *Soil Tillage Res*, 2023, 225: 105546.
- [35] 张万锋, 杨树青, 娄帅, 等. 耕作方式与秸秆覆盖对夏玉米根系分布及产量的影响. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 117–124.
- Zhang W F, Yang S Q, Lou S, et al. Effects of tillage methods and straw mulching on the root distribution and yield of summer maize. *Trans CSAE*, 2020, 36(7): 117–124 (in Chinese with English abstract).
- [36] 李喆豪, 姬米源, 吕梦, 等. 长期定位条件下不同氮肥运筹对春玉米根冠发育的影响. *作物杂志*, 2025(4): 135–141.
- Li Z H, Ji M Y, Lyu M, et al. Analysis of the effects of different nitrogen fertilizer management strategies on the root and shoot development of spring Maize under long-term positioning conditions. *Crops*, 2025(4): 135–141 (in Chinese with English abstract).
- [37] 郑杰, 于颖, 贺卓熙, 等. 白桦木质部原生质体初生细胞壁再生过程转录组分析. *北京林业大学学报*, 2022, 44(8): 12–22.
- Zheng J, Yu Y, He Z X, et al. Transcriptome analysis of regeneration process of primary cell wall in xylem protoplast of *Betula platyphylla*. *J Beijing For Univ*, 2022, 44(8): 12–22 (in Chinese with English abstract).
- [38] Robertson D J, Brenton Z W, Kresovich S, et al. Maize lodging resistance: stalk architecture is a stronger predictor of stalk bending strength than chemical composition. *Biosyst Eng*, 2022, 219: 124–134.
- [39] 徐红敏. *Sporosarcina* sp. N2 的筛选及木质素降解功能基因的转录组学研究. 黑龙江八一农垦大学硕士学位论文, 黑龙江大庆, 2023.
- Xu H M. Screening and the Transcriptomic Studies of Lignin Degrading Functional Genes of *Sporosarcina* sp. N2. MS Thesis of Heilongjiang August First Agricultural University, Daqing, Heilongjiang, China, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [40] 刘红芳, 宋阿琳, 范分良, 等. 高供氮水平下不同硅肥对水稻茎秆特征的影响. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24: 758–768.
- Liu H F, Song A L, Fan F L, et al. Characteristics of rice stem in response to different silicon fertilizers under high nitrogen supply level. *J Plant Nutr Fert*, 2018, 24: 758–768 (in Chinese with English abstract).
- [41] 温银元, 郭之瑶, 郑志强, 等. 不同施氮水平下硅肥对谷子抗倒伏能力、产量和品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30: 641–654.
- Wen Y Y, Guo Z Y, Zheng Z Q, et al. Effects of silicon fertilizers on lodging resistance, yield and quality of foxtail millet under different nitrogen application levels. *J Plant Nutr Fert*, 2024, 30: 641–654 (in Chinese with English abstract).
- [42] 高钰, 闫耀廷, 赵刚, 等. 氮肥运筹对黄土高原春玉米产量形成和氮代谢的调控效应. *中国土壤与肥料*, 2023(6): 186–195.
- Gao Y, Yan Y T, Zhao G, et al. Regulation effects of nitrogen fertilizer management on grain yield formation and nitrogen transportation of spring maize in the Loess Plateau China. *Soil Fert Sci China*, 2023(6): 186–195 (in Chinese with English abstract).
- [43] 张刚, 王德建, 俞元春, 等. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22: 877–885.
- Zhang G, Wang D J, Yu Y C, et al. Effects of straw incorporation plus nitrogen fertilizer on rice yield, nitrogen use efficiency and nitrogen loss. *J Plant Nutr Fert*, 2016, 22: 877–885 (in Chinese with English abstract).
- [44] Kong E Y, Liu D C, Guo X L, et al. Anatomical and chemical characteristics associated with lodging resistance in wheat. *Crop J*, 2013, 1: 43–49.
- [45] Dai J, Wiersma J J. Agronomic responses and lodging of three spring wheat cultivars to trinexapac-ethyl. *Crop Manag*, 2012, 11: 1–9.