

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.11.008

杨景文, 朱菽芸, 周星, 等. 弱光胁迫下钾肥运筹对水稻干物质积累转运特性的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(11): 99-110.

弱光胁迫下钾肥运筹对水稻干物质 积累转运特性的影响

杨景文¹, 朱菽芸¹, 周星¹, 李秋萍¹, 艾小凤¹,
袁玉洁¹, 刘睿¹, 刘钰婷¹, 刘婷婷¹, 周伟¹,
陶有凤¹, 雷小龙¹, 白云伟², 彭兴刚², 任万军¹, 邓飞¹

1. 四川农业大学 农学院/农业农村部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川 温江 611130;
2. 汉源县农业农村局, 四川 汉源 625300

摘要: 为明确弱光胁迫下钾肥运筹对水稻干物质积累转运特性的影响, 以杂交水稻 F 优 498 为材料, 研究了不同光照条件下不同钾肥运筹处理(不施钾对照、基钾单施、穗钾单施、基穗全施)对水稻干物质积累、分配和转运特性的影响及其与水稻产量的关系。研究结果表明: 不同光照条件下水稻产量与各时期生长速率、单茎和群体干物质质量、叶片转运特性及茎鞘转运量呈显著或极显著正相关; 弱光胁迫显著降低了水稻植株抽穗后的生长速率、单茎干物质质量、穗部干物质分配比例, 以及叶片干物质转运量, 最终导致成熟期水稻群体干物质质量显著降低 8.8%~15.3%; 钾肥运筹可有效提高不同光照条件下水稻的生长速率和单茎干物质质量, 进而使抽穗前、抽穗后 20 d 和成熟期群体干物质质量分别增加了 14.6%~24.1%、14.4%~31.2% 和 11.2%~22.4%; 钾肥运筹一般可促进茎鞘和叶片的干物质转运, 进而使成熟期穗部干物质质量显著增加 8.4%~28.0%; 不同施钾策略间, 穗钾单施处理可有效提高弱光胁迫下叶片和茎鞘干物质转运量、转运率和转运贡献率。综上所述, 弱光胁迫显著降低了水稻的干物质积累, 抑制了叶片干物质转运, 导致穗部干物质质量显著降低, 而钾肥运筹, 特别是穗钾单施可促进叶片和茎鞘干物质的转运再利用, 进而降低弱光胁迫对产量的不利影响。

关键词: 水稻; 弱光胁迫; 钾肥运筹; 干物质积累转运特性

中图分类号: S511 文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2025)11-0099-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Potassium Fertilizer Management on the Dry Matter Accumulation and Transport Characteristics of Rice Under Low Light Stress

收稿日期: 2025-01-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2300701, 2024YFD2300401); 国家自然科学基金项目(32372217, 32472224)。

作者简介: 杨景文, 硕士研究生, 主要从事水稻栽培研究。

通信作者: 任万军, 教授, 博士研究生导师。

YANG Jingwen¹, ZHU Youyun¹, ZHOU Xing¹, LI Qiuping¹,
AI Xiaofeng¹, YUAN Yujie¹, LIU Rui¹, LIU Yuting¹,
LIU Tingting¹, ZHOU Wei¹, TAO Youfeng¹, LEI Xiaolong¹,
BAI Yunwei², PENG Xinggang², REN Wanjun¹, DENG Fei¹

1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Southwest Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wenjiang Sichuan 611130, China;

2. Hanyuan Agricultural and Rural Bureau, Hanyuan Sichuan 625300, China

Abstract: In order to clarify the effect of potassium (K) fertilizer management on the dry matter accumulation and transport characteristics of rice under low light stress, field experiment was conducted by using F You 498 as material. The effects of different potassium fertilizer management treatments (no potassium control, basal potassium application alone, panicle potassium alone, combined basal and panicle potassium application) on the dry matter accumulation, distribution, and transport characteristics of rice under different light conditions, as well as their relationships with rice yield were studied. The results showed that, rice yield was significantly and positively correlated with the growth rate, dry matter weights of single culm and population at different growth stages, dry matter transport characteristics of leaves, and amount of dry matter transport in culm sheath. Low light stress significantly reduced the growth rate of rice, the dry matter weight of single culm, the distribution ratio of dry matter in panicle, and the amount of dry matter transport in leaves after heading, which led to an 8.8%–15.3% of significant reduction in dry matter weight of rice population at maturity stage. Potassium fertilizer application can effectively improve the growth rate and dry matter weight of single culm under different light conditions, and then increase the dry matter weight of population by 14.6%–24.1% at heading stage, 14.4%–31.2% at 20 d after heading, and 11.2%–22.4% at maturity stage. In general, potassium fertilizer application can promote the transport of dry matter in culm sheaths and leaves. Therefore, the dry matter weight of panicle at maturity stage was significantly increased by 8.4%–28.0%. Among different potassium application strategies, basal potassium application as panicle fertilizer can effectively improve the transport amount, transport rate, and contribution rate of dry matter transport in leaves and culm sheath under low light stress. Overall, low light stress significantly reduced the dry matter accumulation of rice, inhibited the transport of dry matter in leaves, which results in a significant decrease in the dry matter weight of panicle. Potassium fertilizer application, especially basal potassium application as panicle fertilizer, can improve the transport of dry matter in leaves and culm sheath, thus reducing the adverse effect of low light stress on yield.

Key words: rice; low light stress; potassium fertilizer management; dry matter accumulation and transport characteristics

四川是我国西部地区粮食主产省份,其水稻种植面积和总产量分别约占粮食作物的 29%和 43%^[1-2]。然而,四川盆地是典型的弱光稻区,具有多阴雨、寡光照的环境特点^[3-4]。弱光是制约区域水稻产量进一步提高的重要环境因素之一^[5-6]。因此,在明确弱光胁迫对水稻的影响机制的基础上,进一步构建弱光稻区的高产栽培技术具有重要意义。水稻产量的形成过程实际上就是干物质的积累转运过程,提高水稻干物质积

累速率, 协调营养器官储藏物质的转运再利用, 是提高水稻产量的有效途径^[7]。弱光胁迫下, 水稻比叶质量、净光合速率和 CO₂ 同化速率均呈降低趋势, 导致叶片光合生产能力下降, 干物质积累量减少, 同化物分配紊乱, 最终使水稻因结实率、千粒质量等的降低而大幅减产^[8-11]。施肥是水稻高产栽培的重要一环, 合理的肥料运筹可提高水稻的光合作用, 增强抗逆性, 从而提高水稻产量^[12-14]。钾是植物所必需的三大营养元素之一, 与植物对逆境胁迫的耐受性和生存能力密切相关^[15-16], 显著影响水稻的干物质积累与产量^[17-18]。合理的钾肥运筹可显著增加水稻的叶片生物量、叶面积指数和叶绿素含量, 增强对光能的截获和利用, 促进干物质的合成积累以及向生殖器官的转运, 最终显著提高籽粒产量^[19-21]。目前, 尚无关于弱光胁迫下钾肥运筹对水稻的干物质积累、分配和转运特性影响的系统研究, 本研究拟通过大田遮阴试验, 探究不同光照条件下钾肥运筹对水稻干物质积累、分配和转运特性的影响及其与水稻产量的关系, 以为弱光稻区钾肥运筹技术的改良提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于 2021 年和 2022 年在四川省成都市温江区公平街道四川农业大学惠和农场(30°43'N, 103°52'E)进行。两年试验田土壤基础肥力和水稻季气象条件见表 1。供试品种为三系杂交籼稻 F 优 498, 该品种由四川农业大学水稻研究所、江油市川江水稻研究所和湖南川农高科种业有限公司用 F32B 和蜀恢 498 组配而成。钾肥(氯化钾)由中化化肥有限公司生产, K₂O 含量 60%。

表 1 试验田土壤基础肥力和水稻季气象条件

指标	2021 年	2022 年	指标	2021 年	2022 年
有机质/(g · kg ⁻¹)	28.30	19.96	速效磷/(mg · kg ⁻¹)	95.00	60.22
全氮/(g · kg ⁻¹)	1.98	1.47	速效钾/(mg · kg ⁻¹)	205.09	163.36
全磷/(g · kg ⁻¹)	1.33	1.02	日平均温度/°C	23.80	24.50
全钾/(g · kg ⁻¹)	28.62	20.10	年降雨量/mm	638.60	780.10
碱解氮/(mg · kg ⁻¹)	114.67	96.74	年总辐射/(MJ · m ⁻²)	1 856.90	1 975.30

1.2 试验设计

两年均采用两因素裂区试验设计。主区因素为不同光照处理, 分为自然光照(CK)和遮 50% 光强(SH) 2 个处理组; 副区因素为不同钾肥运筹处理, 分为不施钾对照(K₀₋₀)、基钾单施(K₉₀₋₀, 90 kg/hm² K₂O 作基肥一次施用)、穗钾单施(K₀₋₉₀, 90 kg/hm² K₂O 作穗肥一次施用)、基穗全施(K₉₀₋₉₀, 基肥和穗肥分别施用 90 kg/hm² K₂O) 4 个处理组。共 8 个处理, 每处理 3 次重复。参照文献[22]的方法, 于抽穗前在高约 2.0 m 的钢架上挂孔径为 0.50 mm 的白色棉纱布 1 层遮阴(约 50% 遮光率), 持续至成熟期。小区面积为 30 m², 各小区四周起宽 25 cm、高 30 cm 的田埂, 后用薄膜包埂, 防止串水串肥。两年均于 4 月底育秧, 秧龄 30 d 时人工移栽, 双本植, 行穴距 33.3 cm × 20.0 cm。各处理均按 180 kg/hm² N 和 90 kg/hm² P₂O₅ 施用氮磷肥。氮肥按基蘖肥和穗肥 6 : 4 的比例施用, 基蘖肥按基肥和分蘖肥 7 : 3 的比例施用, 穗肥按促花肥和保花肥 6 : 4 的比例施用; 磷肥作基肥一次性施用。病虫害防治和水分管理同当地高产栽培技术。

1.3 测定项目与方法

分别在抽穗前、抽穗后 20 d 和成熟期于各小区按平均茎蘖法取样 3 穴, 样品按叶片、茎鞘及穗进行分装, 105 °C 下杀青 1 h, 75 °C 烘至恒质量后称重, 计算干物质积累、分配及转运的相关指标^[23-25]:

$$DMA = T_1 - T_2 \quad (1)$$

$$GR = \frac{DMA}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

$$DRDM = \frac{T_o}{T_s} \times 100\% \quad (3)$$

$$DMRA = T_h - T_m \quad (4)$$

$$DMRR = \frac{DMRA}{T_h} \times 100\% \quad (5)$$

$$CRRDM = \frac{DMRA}{T_g} \times 100\% \quad (6)$$

式中: DMA 表示干物质积累量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), T_1 和 T_2 表示相邻两个生育时期的干物质质量; GR 表示生长速率($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); $DRDM$ 表示各器官干物质分配比例(%), T_o 和 T_s 分别表示器官干物质和植株干物质质量; $DMRA$ 表示干物质转运量, T_h 和 T_m 分别表示抽穗前茎鞘(叶)干物质质量和成熟期茎鞘(叶)干物质质量; $DMRR$ 表示干物质转运率; $CRRDM$ 表示转运贡献率, T_g 表示成熟期籽粒干物质质量。

1.4 数据处理与分析

运用 Microsoft Excel 2021 录入处理数据, 用 SPSS 25.0 软件进行方差分析, 用 OriginPro 2023 作图。

2 结果与分析

2.1 弱光胁迫下钾肥运筹对水稻干物质积累特性的影响

2.1.1 弱光胁迫下钾肥运筹对水稻生长速率和单茎干物质质量的影响

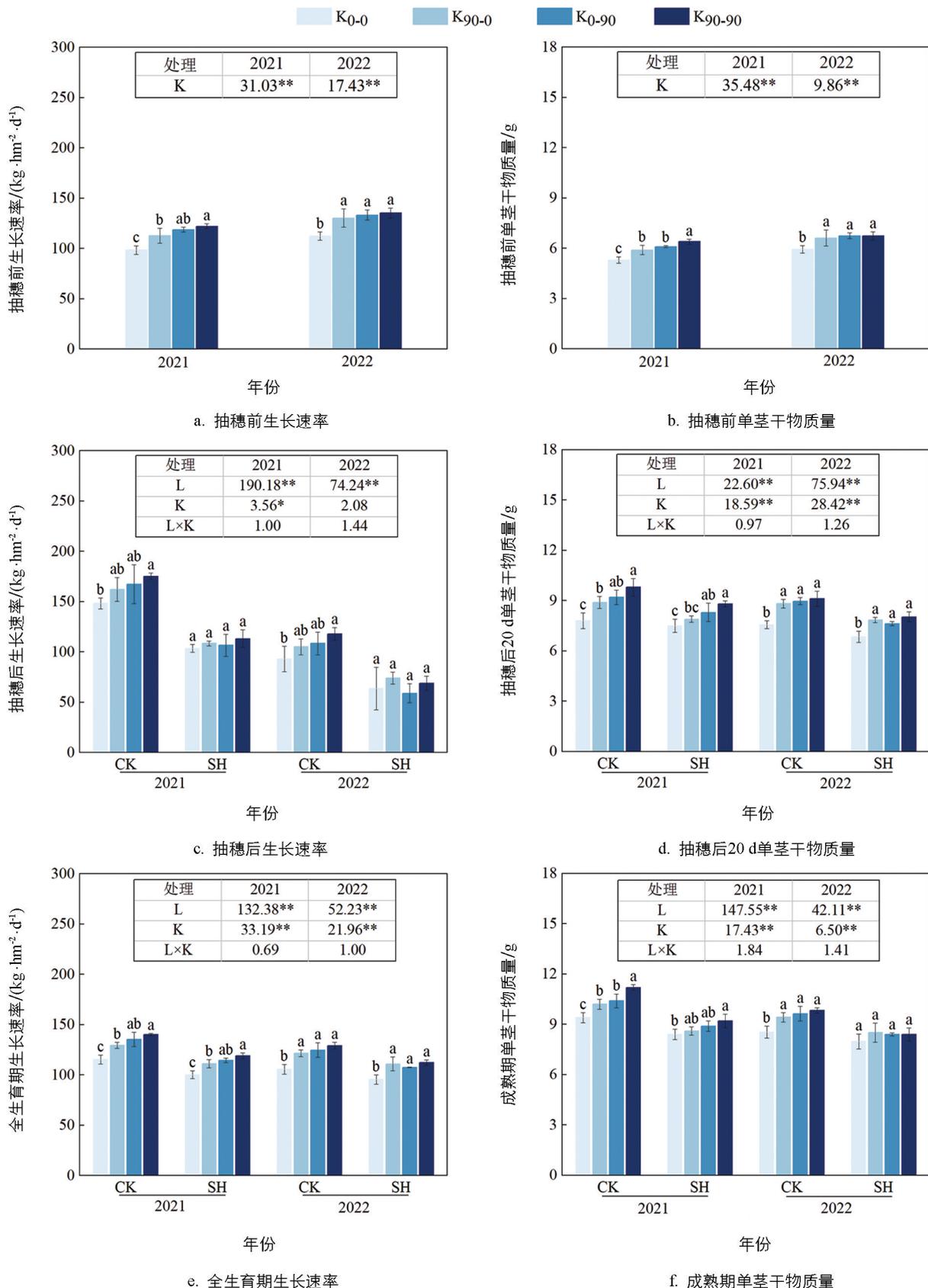
图 1 表明, 光照处理和钾肥运筹(除 2022 年抽穗后水稻生长速率外)显著或极显著影响各时期水稻的生长速率和单茎干物质质量。较 CK 处理, SH 处理显著降低了水稻抽穗后和全生育期的生长速率, 导致抽穗后 20 d 和成熟期单茎干物质质量分别显著降低了 9.6%~14.9% 和 6.5%~17.4%。较 K_{0-0} 处理, 除 2022 年 SH 处理下 K_{0-90} 外, 钾肥运筹有效提高了两年水稻各生育阶段的生长速率, 进而使抽穗前、抽穗后 20 d 和成熟期单茎干物质质量分别增加了 10.8%~21.1%、6.1%~26.3% 和 5.3%~18.6%。较 K_{90-0} 和 K_{0-90} 处理, 除 2022 年 SH 处理外, K_{90-90} 处理提高了抽穗前和抽穗后水稻的生长速率, 进而使全生育期生长速率提高了 1.3%~8.3%。这最终使抽穗前、抽穗后 20 d 和成熟期(除 2022 年 SH 处理外)单茎干物质质量较 K_{90-0} 和 K_{0-90} 处理分别提高了 2.0%~9.3%、1.7%~11.5% 和 2.0%~9.2%。整体来看, SH 处理降低了水稻的生长速率和单茎干物质质量, 而钾肥可促进各生育阶段水稻干物质的积累。

2.1.2 弱光胁迫下钾肥运筹对水稻各器官和植株干物质质量的影响

由图 2 可知, 光照处理(除两年抽穗后 20 d 叶片和 2022 年成熟期茎鞘外)和钾肥运筹(除 2022 年抽穗前穗部外)显著或极显著影响水稻各器官和植株干物质质量, 二者交互仅显著影响 2021 年成熟期叶片干物质质量。较 CK 处理, 除 2022 年成熟期茎鞘干物质质量外, SH 处理显著降低了抽穗后 20 d 和成熟期水稻叶片、茎鞘和穗部的干物质质量, 进而导致 2021 年和 2022 年成熟期水稻植株干物质质量分别显著降低了 13.2%~15.3% 和 8.8%~13.7%。与 K_{0-0} 处理相比, 钾肥运筹有效提高了各时期水稻各器官干物质质量, 使抽穗前、抽穗后 20 d 和成熟期穗部干物质质量分别显著增加 7.7%~19.5%、16.2%~39.9% 和 8.4%~28.0%, 植株干物质质量显著增加了 14.6%~24.1%、14.4%~31.2% 和 11.2%~22.4%。较 K_{90-0} 和 K_{0-90} 处理, K_{90-90} 处理可有效提高各时期水稻叶片、茎鞘和穗部的干物质质量, 进而使 2021 年和 2022 年成熟期植株群体干物质质量分别增加了 3.0%~8.3% 和 1.3%~6.2%。较 K_{90-0} 处理, 除 2022 年抽穗后 20 d 和成熟期外, K_{0-90} 处理下各时期干物质质量均呈增加趋势。综上可知, SH 处理阻碍了植株和各器官的干物质积累, 而钾肥运筹, 特别是 K_{0-90} 处理可有效提高不同光照条件下水稻的干物质质量。

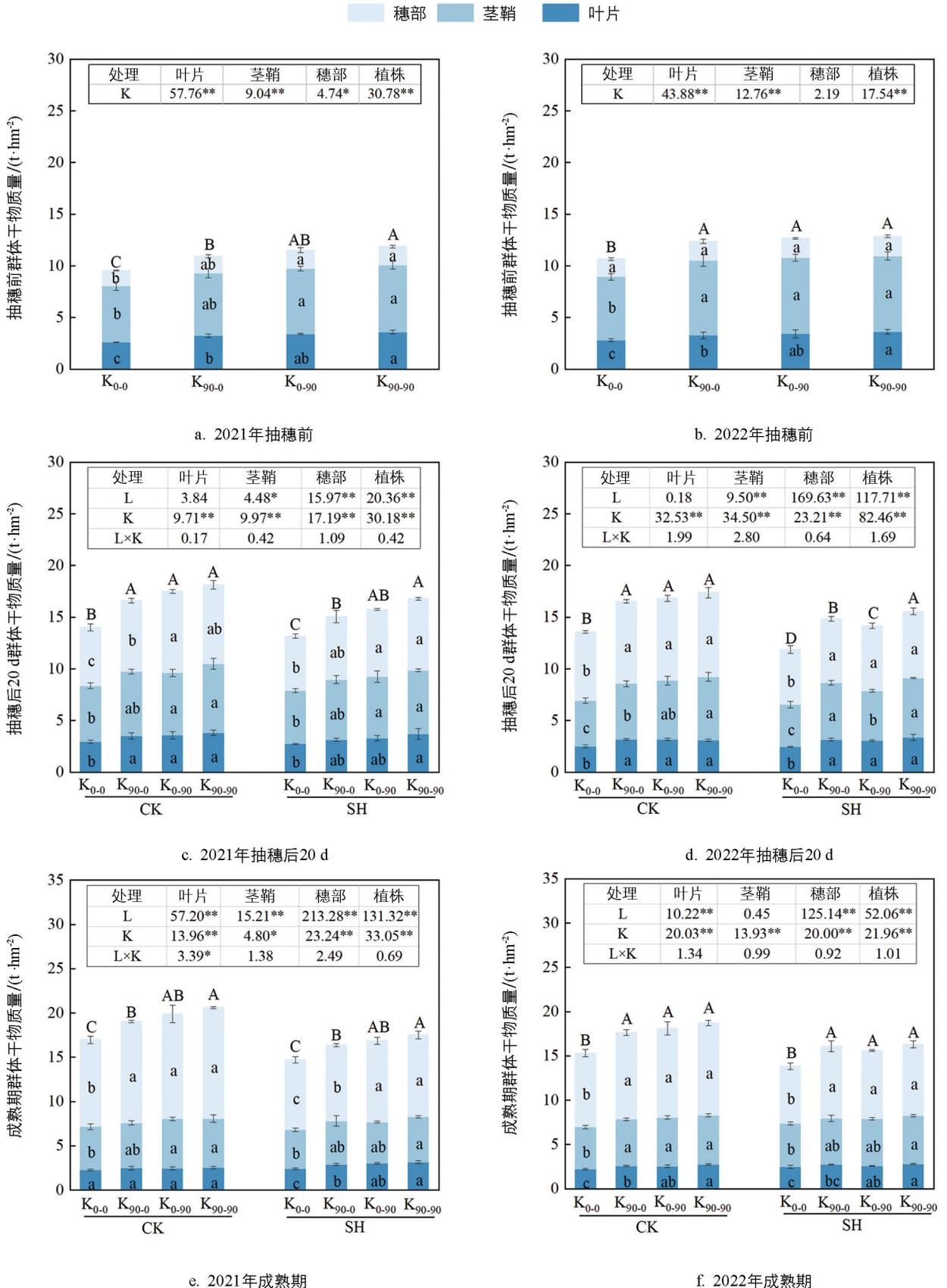
2.2 弱光胁迫下钾肥运筹对水稻各器官干物质分配特性的影响

随生育进程的推进, 水稻叶片和茎鞘的干物质分配比例逐渐降低, 穗部的干物质分配比例则呈上升趋势, 且抽穗前到抽穗后 20 d 的上升幅度明显大于抽穗后 20 d 到成熟期(图 3)。相较于 CK 处理,



不同颜色不同小写字母表示各处理组间在 $p=0.05$ 水平差异有统计学意义。* * 表示 $p=0.01$ 显著水平, * 表示 $p=0.05$ 显著水平。L 为光照处理, K 为钾肥运筹, L×K 为光钾互作。下同。

图 1 弱光胁迫下钾肥运筹对水稻生长速率和单茎干物质质量的影响



不同大写字母表示各处理组间植株干物质质量在 $p=0.05$ 水平差异有统计学意义。

图 2 弱光胁迫下钾肥运筹对单位面积水稻各器官和植株干物质质量(群体干物质质量)的影响

SH 处理提高了抽穗后 20 d 两年茎鞘和 2022 年叶片, 以及成熟期两年叶片和 2022 年茎鞘的干物质分配比例, 使抽穗后 20 d 和成熟期穗部干物质分配比例分别降低了 0.3%~6.4% 和 4.2%~8.1%。钾肥运筹导致各器官干物质分配比例明显变化, 但时期间存在差异。抽穗前, 钾肥运筹提高了叶片干物质分配比例, 但降低了穗部干物质分配比例。抽穗后 20 d, 钾肥运筹则降低了 2021 年不同光照条件下茎鞘的干物质分配比例, 使穗部干物质分配比例提高了 0.7%~4.8%; 2022 年则呈相反趋势, 钾肥运筹提高了叶片(除 CK 处理下 K_{90-90} 外)和茎鞘(除 SH 处理下 K_{0-90} 外)的干物质分配比例, 使穗部干物质分配比例降低了 0.5%~3.5%。成熟期, 除 2021 年 SH 处理下 K_{90-0} 和 K_{90-90} 外, 钾肥运筹可降低茎鞘干物质分配比例, 有效提高穗部干物质分配比例。整体来看, SH 处理导致各时期叶片和茎鞘干物质分配比例增多, 而穗部干物质分配比例减少, 钾肥运筹则可提高成熟期穗部干物质分配比例。

2.3 弱光胁迫下钾肥运筹对水稻干物质转运特性的影响

如图 4 所示, 水稻叶片和茎鞘干物质转运量、转运率以及转运贡献率受光照处理(除 2022 年叶片干物质转运贡献率外)、钾肥运筹及二者互作的显著或极显著影响。2021 年, 较 CK 处理, SH 处理显著降低了叶片的干物质转运量、转运率和转运贡献率, 但茎鞘干物质转运量、转运率和转运贡献率则分别显著增加了 25.3%~139.8%、3.4%~15.0% 和 4.8%~12.0%。2022 年, 除 K_{0-90} 处理外, SH 处理导致叶片和茎鞘干物质转运量和转运率均不同程度降低; 就转运贡献率而言, SH 处理导致 K_{0-0} 和 K_{90-0} 叶片干物质转运贡献率分别降低了 3.1% 和 1.4%, K_{0-90} 和 K_{90-90} 分别增加了 3.1% 和 1.8%, SH 处理同时使茎鞘干物质转运贡献率(除 K_{0-0} 外)增加了 2.3%~8.3%。与 K_{0-0} 相比, 钾肥运筹可有效促进叶片和茎鞘储藏物质的转运再利用, 使叶片干物质转运量、转运率、转运贡献率分别增加了 16.4%~257.2%、0.3%~18.2% 和 0.6%~8.0%, 茎鞘干物质转运量增加 6.9%~115.6%; 此外, 钾肥运筹还显著增加了 2022 年 SH 处理下茎鞘的干物质转运率和转运贡献率。较 K_{90-0} , K_{0-90} 和 K_{90-90} 大幅提高了两年 CK 处理和 2022 年 SH 处理下叶片的干物质转运量、转运率及转运贡献率。此外, 较 K_{90-0} (除 2022 年外)和 K_{90-90} 处理, K_{0-90} 处理显著提高了 SH 处理下茎鞘的干物质转运量、转运率及转运贡献率。综上可知, SH 处理抑制了叶片干物质的转运, 但增强了茎鞘干物质的转运再利用, 而钾肥运筹, 特别是 K_{0-90} 处理可有效提升叶片和茎鞘干物质的转运再利用。

2.4 产量与干物质积累转运特性的相关性分析

由上文各数据做相关性分析得出各项指标值(表 2), 可知不同光照条件下水稻产量与干物质积累转运特性密切相关。不同光照条件下, 水稻产量与各阶段水稻生长速率(除 SH 处理抽穗后 20 d 外)、各时期单茎和群体干物质质量、叶片干物质转运量、转运率和转运贡献率, 以及茎鞘干物质转运量均呈显著或极显著正相关。

表 2 产量与干物质积累转运特性的相关性分析

指标	CK	SH	指标	CK	SH
抽穗前生长速率	0.914**	0.847**	成熟期群体干物质质量	0.915**	0.861**
抽穗后 20 d 生长速率	0.777**	0.348	叶片干物质转运量	0.793**	0.787**
全生育期生长速率	0.915**	0.867**	叶片干物质转运率	0.724**	0.715**
抽穗前单茎干物质质量	0.903**	0.848**	叶片干物质转运贡献率	0.690**	0.731**
抽穗前群体干物质质量	0.910**	0.852**	茎鞘干物质转运量	0.556*	0.537*
抽穗后 20 d 单茎干物质质量	0.890**	0.939**	茎鞘干物质转运率	0.147	0.429
抽穗后 20 d 群体干物质质量	0.913**	0.979**	茎鞘干物质转运贡献率	0.026	0.410
成熟期单茎干物质质量	0.882**	0.555*			

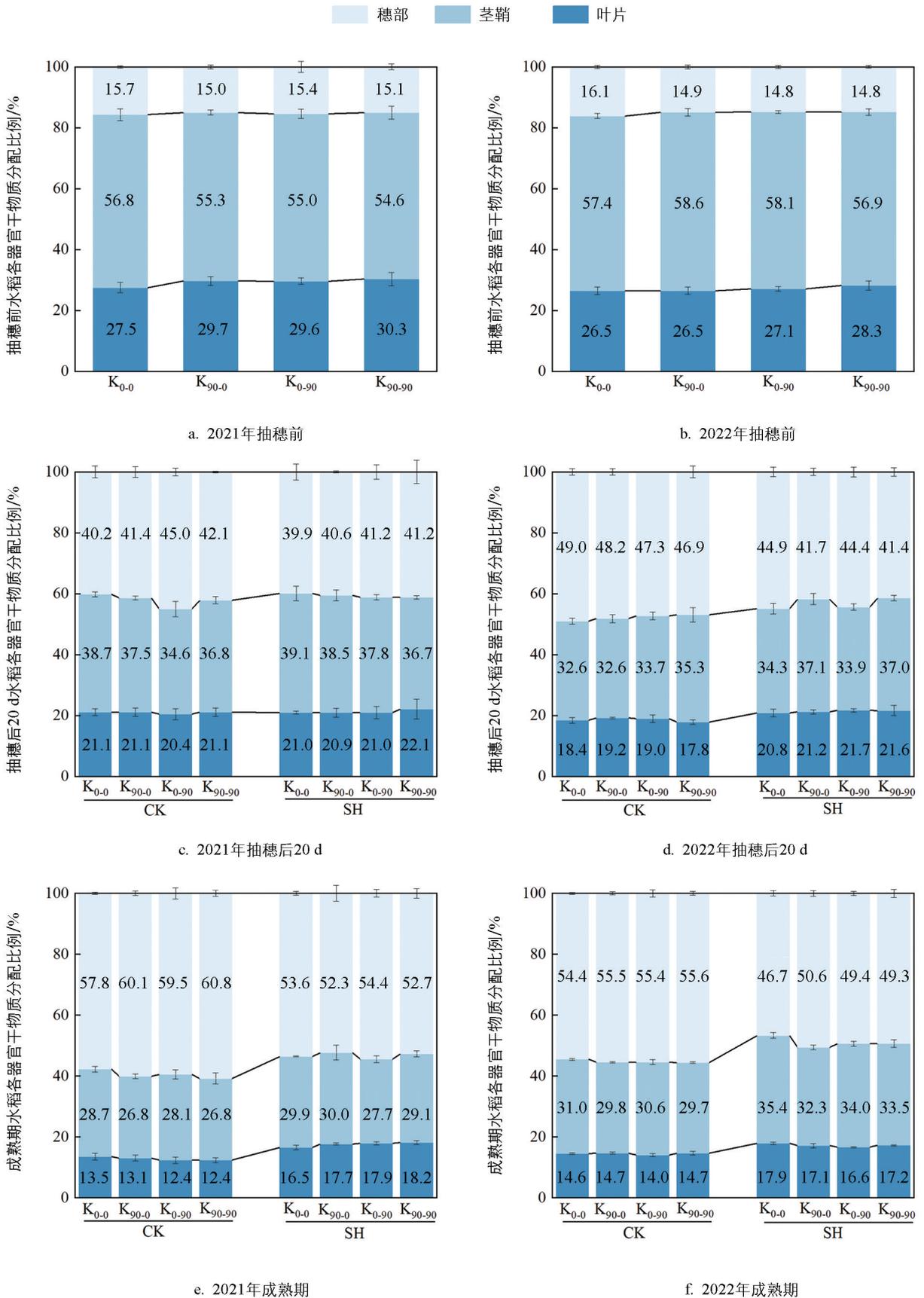


图 3 弱光胁迫下钾肥运筹对水稻各器官干物质分配比例的影响

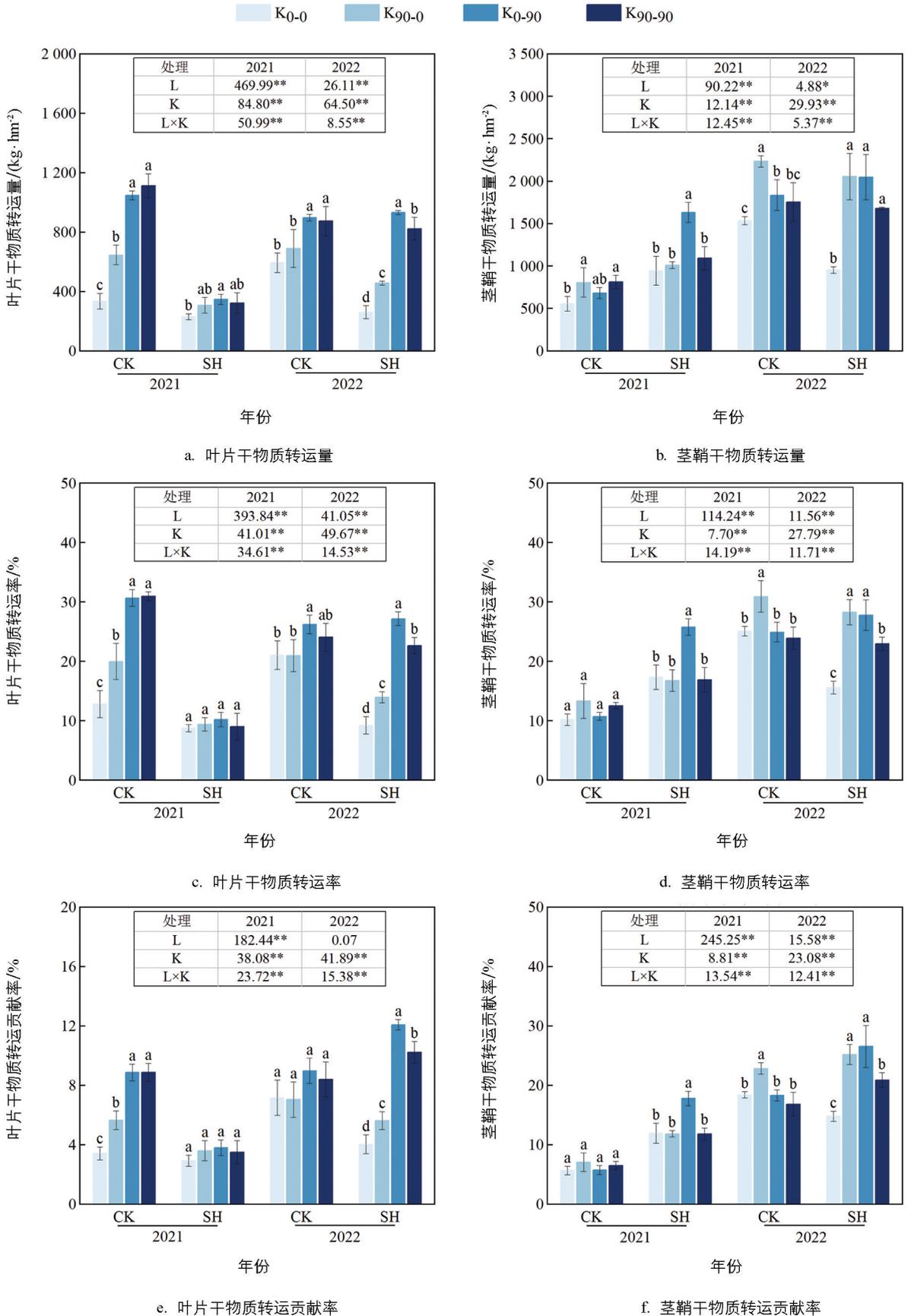


图 4 弱光胁迫下钾肥运筹对水稻干物质转运特性的影响

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 弱光胁迫对水稻干物质积累与转运特性的影响

水稻产量的形成实际上是干物质积累、分配与转运的综合结果^[26-27],受环境条件的显著影响。近年来由于温室气体排放增加、城市化及工业化快速发展,环境污染不断加剧,导致阴雨寡照天气频发^[28],弱光环境已成为制约我国西南地区水稻生产的关键环境因素之一^[29]。弱光胁迫下水稻光合作用受阻,同化物合成减少,导致植株干物质积累不足、分配紊乱,最终影响水稻产量^[30]。相关分析结果表明,不同光照条件下水稻产量均与各时期干物质及叶片和茎鞘干物质转运量呈显著正相关。弱光胁迫显著降低了水稻抽穗后的生长速率,使抽穗后 20 d 和成熟期水稻各器官和单茎干物质质量均显著下降,进而使成熟期水稻群体干物质质量显著降低了 8.8%~15.3%,最终导致水稻因结实率和千粒质量降低而大幅减产^[31]。本研究同时发现,弱光胁迫增加了各时期叶片的干物质分配比例,但降低了穗部干物质分配比例。弱光胁迫下,水稻合成的干物质主要供给茎鞘和叶片的生长,而转运至籽粒的干物质质量大幅降低以维持水稻的正常生长发育^[31]。水稻产量的形成由花前营养器官储存物质的活化再利用与花后叶片光合产物向籽粒的供给共同决定^[29]。弱光胁迫下,水稻干物质生产能力显著下降,籽粒灌浆更加依赖于花前茎叶储藏物质的转运再利用^[32]。进一步分析发现,弱光胁迫显著降低了叶片干物质转运量、转运率和转运贡献率(除 2022 年 K_{0-90} 和 K_{90-90} 处理外),弱光胁迫下水稻可通过降低叶片的衰老速度从而最大化利用有限的光能^[33-34]。弱光胁迫同时显著提高了茎鞘干物质转运量、转运率和转运贡献率,这与文献^[35-36]的研究结果一致。可见,弱光胁迫下由于叶片“源”功能的减弱,水稻主要通过增强茎鞘储藏物质的活化再利用,以降低弱光胁迫对水稻产量的不利影响^[37]。

3.1.2 钾肥运筹对水稻干物质积累转运特性的调控作用

钾是维持水稻正常生长发育所需的重要元素之一,参与许多作物基本生理过程,在提高作物的抗逆性和产量过程中发挥着重要作用^[38-39]。合理的钾肥运筹可有效提高植株的叶面积和叶绿素含量,促进光合电子的吸收与传递,从而提高植株对光能的捕获、吸收和利用,增强叶片的强光合生产能力,促进干物质的积累和产量的形成^[40-41]。本研究结果表明,不同光照条件下钾肥运筹能显著提升水稻各生育阶段的生长速率,促进各器官干物质的积累,从而使成熟期群体干物质质量显著增加 11.2%~22.4%。钾肥运筹同时可提高水稻的抗性,调节植株体内同化物运输与利用间的平衡状态^[42]。较不施钾肥处理,钾肥运筹可有效促进叶片和茎鞘储藏物质的转运再利用,从而提高成熟期穗部干物质质量。钾肥运筹通过增强 K^+ 在植物体内的介导作用以调节光合产物向籽粒的运转,从而影响作物产量^[43-44]。前人研究指出,钾肥施用量和施用时期对作物干物质积累以及产量影响不尽相同^[45-47]。本研究中,随施钾量的增加,不同光照条件下水稻各时期群体干物质质量呈增加趋势,但成熟期 K_{0-90} 和 K_{90-90} 处理对群体干物质质量的影响的差异无统计学意义。文献^[48]研究发现,植物干物质最大积累速率和干物质积累随施钾量的增加呈先增后降的趋势,当施钾量高于 90 kg/hm² 时,产量随施钾量的增加而下降。可见,过高的钾肥用量不利于水稻干物质的积累和产量的形成。进一步分析发现,弱光胁迫下钾肥运筹特别是 K_{0-90} 处理可有效提高水稻叶片和茎鞘的干物质转运量、转运率和转运贡献率。这与文献^[49]中钾肥基施效应差、重施分蘖肥和穗肥效应高的结果相似。综上所述,弱光胁迫下 K_{0-90} 处理可有效提高水稻的干物质积累,并促进叶片和茎鞘干物质的转运利用,从而缓解弱光对水稻的不利影响。

3.2 结论

弱光胁迫显著降低了水稻的生长速率和干物质积累,抑制了叶片干物质的转运,导致穗部干物质显著降低。钾肥运筹则可提高水稻的生长速率和干物质积累量,促进叶片以及茎鞘的干物质转运再利用,进而增加成熟期穗部干物质分配比例,使成熟期穗部干物质质量显著增加。不同施钾处理间, K_{0-90} 处理可有效提高弱光胁迫下叶片和茎鞘干物质转运量、转运率和转运贡献率,降低弱光胁迫对水稻产量的不利影响。

参考文献:

- [1] 赵海永. 四川省水稻生产特征及影响因素分析与对策建议 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2021.
- [2] 金焱, 王锐婷, 邹雨伽, 等. 基于水分亏缺指数的四川省水稻干旱灾害综合风险评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(11): 51-61.
- [3] DENG F, ZENG Y L, LI Q P, et al. Decreased Anther Dehiscence Contributes to a Lower Fertilization Rate of Rice Subjected to Shading Stress [J]. *Field Crops Research*, 2021, 273: 108291.
- [4] WEI H H, GE J L, ZHANG X B, et al. Decreased Panicle N Application Alleviates the Negative Effects of Shading on Rice Grain Yield and Grain Quality [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(7): 2041-2053.
- [5] LI Q P, DENG F, CHEN H, et al. Shading Decreases Rice Yield by Impeding Grain-Filling Progress After Heading [J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(5): 4018-4030.
- [6] DENG F, LI Q P, CHEN H, et al. Relationship Between Chalkiness and the Structural and Thermal Properties of Rice Starch After Shading During Grain-Filling Stage [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 252: 117212.
- [7] 杨惠杰, 李义珍, 杨仁崔, 等. 超高产水稻的干物质生产特性研究 [J]. *中国水稻科学*, 2001, 15(4): 265-270.
- [8] 孙园园, 孙永健, 陈林, 等. 不同播期和抽穗期弱光胁迫对杂交稻生理性状及产量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2737-2744.
- [9] GOMMERS C M M, VISSER E J W, ST ONGE K R, et al. Shade Tolerance: When Growing Tall is Not an Option [J]. *Trends in Plant Science*, 2013, 18(2): 65-71.
- [10] 李金文. 基于水稻叶片生理生态学特征的氮营养诊断 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [11] 任万军, 杨文钰, 徐精文, 等. 始穗后弱光对不同基因型水稻叶片特性的影响 [J]. *四川农业大学学报*, 2002, 20(3): 205-208, 278.
- [12] 梁成刚, 汪燕, 何加林, 等. 栽培技术对水稻单位面积产量的权重研究 [J]. *中国农学通报*, 2013, 29(6): 142-147.
- [13] JIANG Y, MENG J J, ZHANG L L, et al. Non-Target Effects of Bt Transgenes on Grain Yield and Related Traits of an Elite Restorer Rice Line in Response to Nitrogen and Potassium Applications [J]. *Field Crops Research*, 2014, 169: 39-48.
- [14] HE P, YANG L P, XU X P, et al. Temporal and Spatial Variation of Soil Available Potassium in China (1990—2012) [J]. *Field Crops Research*, 2015, 173: 49-56.
- [15] ALKHADER A M F A, AL-KHATIB A, KAABNEH A, et al. Response of Wheat Crop to Potassium Fertilization Under Rain-Fed Conditions in Semi-Arid Regions [J]. *Sustainable Agriculture Research*, 2023, 12(1): 51.
- [16] 陈竞天, 余瑞, 黎博, 等. 干旱胁迫下不同施肥处理对水稻产量和养分吸收量的影响 [J]. *四川农业科技*, 2023(9): 55-58.
- [17] 赵玺, 王致和, 张亚萍, 等. 钾肥施用量对贫瘠地藜麦产量、蛋白质及倒伏率的影响 [J]. *中国农学通报*, 2023, 39(24): 31-37.
- [18] EL-MAGEED T A A, SEMIDA W M, ABDOU N M, et al. Coupling Effects of Potassium Fertilization Rate and Application Time on Growth and Grain Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Plants Grown Under Cd-Contaminated Saline Soil [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(1): 1070-1084.
- [19] ASHRAF M, SHAHZAD S M, ARIF M S, et al. Effects of Potassium Sulfate on Adaptability of Sugarcane Cultivars to Salt Stress Under Hydroponic Conditions [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2015, 38(13): 2126-2138.
- [20] 胡文诗, 孟凡金, 李静, 等. 不同钾肥用量对冬油菜主要光合器官演替的影响 [J]. *中国油料作物学报*, 2021, 43(5): 843-850.
- [21] YANG C, ZHANG J L, ZHANG G, et al. Potassium Deficiency Limits Water Deficit Tolerance of Rice by Reducing Leaf Water Potential and Stomatal Area [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 271: 107744.
- [22] CHEN H, LI Q P, ZENG Y L, et al. Effect of Different Shading Materials on Grain Yield and Quality of Rice [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 9992.
- [23] YANG X L, WANG B F, CHEN L, et al. The Different Influences of Drought Stress at the Flowering Stage on Rice Physiological Traits, Grain Yield, and Quality [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 3742.
- [24] 朱莉, 李贵勇, 周伟, 等. 不同生态条件下氮高效水稻品种干物质积累和产量特性 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2022,

28(6): 1015-1028.

- [25] 李杰, 张洪程, 常勇, 等. 不同种植方式水稻高产栽培条件下的光合物质生产特征研究 [J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1235-1248.
- [26] 潘胜才, 陈余波, 简叙, 等. 光照、氮素对杂交水稻干物质积累、分配和产量形成的影响 [J]. 作物研究, 2024, 38(1): 1-9, 15.
- [27] 刘晓淑, 侯翠红, 陈新平, 等. 无机包裹缓释肥对水稻生长与氮肥利用的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(1): 83-92.
- [28] 高玉麒, 陈培毅. 我国南方持续阴雨天的影响及其成因分析 [J]. 科学技术创新, 2019(16): 12-13.
- [29] 邓飞, 王丽, 姚雄, 等. 不同生育阶段遮阴对水稻籽粒充实和产量的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2009, 27(3): 265-269.
- [30] 张银, 张运波. 水稻对弱光胁迫的响应及适应机制研究进展 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(1): 40-55.
- [31] 任万军, 杨文钰, 樊高琼, 等. 始穗后弱光对水稻干物质积累与产量的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2003, 21(4): 292-296.
- [32] 尚程. 齐穗后遮光对籼粳杂交稻产量、物质转运和品质的影响 [D]. 荆州: 长江大学, 2022.
- [33] 杨慧杰, 原向阳, 祁祥, 等. 谷子对拔节期弱光胁迫的光合生理响应 [J]. 核农学报, 2017, 31(2): 386-393.
- [34] VERONICA N, RAOP V R. Impact of Low Light Stress on Physiological Characters, Yield and Yield Attributes of Rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Agricultural Science Digest, 2023, 10: 1-7.
- [35] 周星, 李博, 朱筱芸, 等. 齐穗后弱光胁迫对杂交籼稻节间非结构性碳水化合物积累转运的影响 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(10): 1610-1619.
- [36] ZENG Y L, LI Q P, CHEN H, et al. Shading Stress After Heading Enhances the Remobilization of Nonstructural Carbohydrates in Rice Under Different Ecological Conditions [J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2021, 81(3): 300-309.
- [37] 张国, 崔克辉. 水稻茎鞘非结构性碳水化合物积累与转运研究进展 [J]. 植物生理学报, 2020, 56(6): 1127-1136.
- [38] 叶廷红. 钾肥施用量对水稻产量、钾素吸收利用及稻米品质的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- [39] WANG Y, CHEN Y F, WU W H. Potassium and Phosphorus Transport and Signaling in Plants [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2021, 63(1): 34-52.
- [40] 洪自强, 张正珍, 周甜, 等. 水肥一体化下钾肥用量对春玉米光合荧光参数的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(8): 1461-1476.
- [41] 张正珍, 慕瑞瑞, 王佳, 等. 施钾量对玉米钾素吸收、转运及产量的影响 [J]. 中国农学通报, 2024, 40(8): 47-56.
- [42] ZHANG J L, HOU W F, REN T, et al. Applying Potassium Fertilizer Improves Sheath Rot Disease Tolerance and Decreases Grain Yield Loss in Rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Crop Protection, 2021, 139: 105392.
- [43] 陆志峰, 鲁剑巍, 潘勇辉, 等. 钾素调控植物光合作用的生理机制 [J]. 植物生理学报, 2016, 52(12): 1773-1784.
- [44] 谢海弘, 李双江, 陈默, 等. 施用钾肥对木薯养分积累及产量品质的影响 [J]. 湖南农业科学, 2025(1): 28-33.
- [45] 王欣. 钾肥运筹对黄淮海麦区冬小麦氮钾积累、产量和品质的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- [46] 赵云, 冯国郡, 古丽扎提·巴孜尔别克, 等. 钾肥用量对滴灌谷子生长发育及产量的影响 [J]. 新疆农业科学, 2024, 61(6): 1378-1385.
- [47] 张巫军, 段秀建, 梁子蒙, 等. 重庆地区再生稻产量形成特点及关键栽培技术研究进展 [J]. 南方农业学报, 2025, 56(5): 1520-1534.
- [48] 侯云鹏, 杨建, 孔丽丽, 等. 施钾对春玉米产量、养分吸收及分配的影响 [J]. 玉米科学, 2015, 23(4): 124-131.
- [49] 李泽远, 葛滢, 葛旦之. 水稻钾肥施用技术的探讨 II. 淹水稻田土壤钾动力学性质及其对水稻钾素吸收的影响 [J]. 湖南农业科学, 1999(1): 42-43.

责任编辑 廖坤

崔玉洁

