

DOI: 10.11686/cyxb2025357

http://cyxb.magtech.com.cn

万里, 陈晓芬, 周国朋, 等. 鄱阳湖流域机收双季晚稻田紫云英适宜播期与播量研究. 草业学报, 2026, 35(8): 22—31.

WAN Li, CHEN Xiao-fen, ZHOU Guo-peng, *et al.* Study of suitable seeding time and seeding density of milk vetch in machine-harvested late rice in the Poyang Lake Basin. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(8): 22—31.

鄱阳湖流域机收双季晚稻田紫云英 适宜播期与播量研究

万里¹, 陈晓芬¹, 周国朋², 何小林³, 秦文婧¹, 罗文文¹, 刘佳^{1*}

(1. 国家红壤改良工程技术研究中心, 农业农村部酸化土壤改良与利用重点实验室, 农业农村部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室, 耕地改良与质量提升江西省重点实验室, 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 江西南昌 330200; 2. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽合肥 230036; 3. 江西省农业技术推广中心, 江西南昌 330046)

摘要:水稻机械化收割的大范围普及对紫云英生产利用带来了一定的负面影响, 尤其是对皮带碾压区紫云英生长损害较大。高产紫云英是种植绿肥作物的重要目标, 而播期、播量是影响紫云英产量形成的关键因素。为探究鄱阳湖流域晚稻机械收获背景下不同播期、播量对紫云英生物量及养分吸收的影响, 明确鄱阳湖流域稻田紫云英的最佳种植参数, 采用随机区组设计试验, 设置5个播期(晚稻收获前4、3、2、1周稻底套播和晚稻收获后当天播种; $T_1 \sim T_5$)和5个播量(1、2、3、4、5 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; $D_1 \sim D_5$)开展研究。2020—2021连续两年试验结果表明, 播期与播量对紫云英生物量和养分吸收量影响显著。从播期来看, 紫云英生物量和养分吸收量随着播期推迟呈先降低后增加的趋势。与晚稻收获前3周播种处理(T_2)相比, 其他各处理(T_1 、 T_3 、 T_4 、 T_5)鲜草生物量下降0.9%~18.0%, 鲜草生物量表现为 $T_2 > T_1 > T_5 > T_4 > T_3$ 。干草生物量以 T_5 处理最高。表明传统经验的稻底套播(晚稻收获前1~2周播种紫云英)受机收的影响很大, 已不再适用于生产实际, 应选择晚稻收获前3周或收获后即时播种以获得更高的紫云英生物量。在播量方面, 紫云英生物量和养分吸收量随着播量增加呈先增加后降低的趋势。与播量3 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 处理(D_3)相比, 其他播量处理(D_1 、 D_2 、 D_4 、 D_5)紫云英干草生物量下降5.2%~24.7%, 干草生物量整体表现为 $D_3 > D_5 > D_4 > D_2 > D_1$ 。表明适当加大播种量可以显著提高紫云英的鲜草生物量, 弥补因机械碾压导致的紫云英产量达不到适宜还田量的不足。综上, 在鄱阳湖流域机收晚稻田种植紫云英时, 宜选择在晚稻收获前3周进行稻底套播或晚稻收获后及时播种, 并采用3 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 的播量, 此方案有助于实现紫云英的高产与高效利用。本研究成果为鄱阳湖流域稻田紫云英的推广种植提供了理论依据, 对区域农业生态与可持续发展具有重要意义。

关键词: 紫云英; 机收; 播期; 播量; 生物量

Study of suitable seeding time and seeding density of milk vetch in machine-harvested late rice in the Poyang Lake Basin

WAN Li¹, CHEN Xiao-fen¹, ZHOU Guo-peng², HE Xiao-lin³, QIN Wen-jing¹, LUO Wen-wen¹, LIU Jia^{1*}

1. National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Key Laboratory of Acidified Soil Amelioration and Utilization of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jiangxi Province Key Laboratory of Arable Land Improvement and Quality Enhancement, Institute of Soil & Fertilizer and Resources & Environment, Jiangxi Academy of

收稿日期: 2025-09-02; 改回日期: 2025-10-20

基金项目: 江西省赣鄱俊才支持计划——高层次和急需紧缺海外人才引进项目(20242BCE50073), 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-22), 江西省自然科学基金(20242BAB21032)和江西省农业科学院基础研究与人才培养专项(JXSNKYJCRC202425)资助。

作者简介: 万里(1993—), 男, 江西南昌人, 博士。E-mail: wanli@jxaas.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liujia@jxaas.cn

Agricultural Sciences, Nanchang 330200 China; 2. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3. Agricultural Technology Promotion Center of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China

Abstract: The widespread adoption of machine-harvesting in rice (*Oryza sativa*) crops has had a negative impact on the production of intercropped milk vetch (*Astragalus sinicus*), often resulting in damage to milk vetch in the belt rolling area. High milk vetch yield is an important objective when growing green manure crops, and sowing date and sowing rate are the key factors affecting milk vetch yield. Therefore this research investigated the effects of different sowing dates and seeding rates on the biomass and nutrient uptake of milk vetch interplanted into machine-harvested late rice, in order to clarify the optimal planting parameters of milk vetch in paddy fields in the Poyang Lake Basin. The experiment comprised a randomized block design, with five sowing dates (4, 3, 2, and 1 weeks before the harvest of late rice, and sowing milk vetch on the same day after the harvest of late rice; T_1 — T_5) and five seeding densities (1, 2, 3, 4, and $5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$; D_1 — D_5). The results of two consecutive years of experiments in 2020—2021 showed that seeding time and seeding density had significant effects on biomass and nutrient uptake of milk vetch. In terms of seeding time, the biomass and nutrient uptake of milk vetch showed a tendency to decreasing and then increasing with delayed seeding time. Compared with the treatment sown three weeks before the harvest of late rice (T_2), the fresh grass yield of the other treatments (T_1 , T_3 , T_4 , T_5) decreased by 0.9%—18.0%, and the grass fresh biomass yields ranked $T_2 > T_1 > T_5 > T_4 > T_3$. The T_5 treatment achieved the highest dry grass biomass. This indicated that the traditional practice of rice intercropping (sowing milk vetch at 1—2 weeks before the harvest of late rice) which was greatly affected by the machine-harvesting of late rice, it is no longer appropriate. Rather, milk vetch should be sown 3 weeks before or immediately after the harvest of late rice to obtain higher yields of milk vetch. In terms of seeding density, the biomass and nutrient uptake of milk vetch showed a trend of increasing initially and then decreasing with increased seeding density. Compared with the seeding density of $3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ treatment (D_3), the milk vetch dry grass biomass in other seeding density treatments (D_1 , D_2 , D_4 , D_5) was decreased by 5.2%—24.7%, and the milk vetch dry grass biomass ranked $D_3 > D_5 > D_4 > D_2 > D_1$. This indicates that in order to mitigate plant damage during machine-harvesting of late rice, the milk vetch biomass can be managed by manipulating the sowing density to ensure that the yield of milk vetch between rice crops is optimized. In conclusion, when planting milk vetch in machine-harvested rice fields in the Poyang Lake Basin, it is preferable to sow milk vetch 3 weeks before or immediately after the harvest of late rice and adopt a seeding density of $3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, in order to help achieve a high yield and efficient use of milk vetch. These research results provide tested recommendations for milk vetch planting in rice fields in the Poyang Lake Basin, and should enhance farmer adoption of milk vetch planting between rice crops and improve the agro-ecological status sustainability of rice cropping in the region.

Key words: milk vetch; mechanical harvest; seeding time; seeding density; biomass

绿肥是我国传统农业的精华,在农业生产体系中占据着独特且重要的地位,绿肥含有丰富的有机资源,是养分全面的清洁肥料^[1]。在现代农业可持续发展的进程中,绿肥凭借其独特的内源驱动机制^[2],能够有效实现节肥增效的目标^[3],在耕地养育、增产提质等方面发挥着重要作用^[4]。20 世纪,绿肥作为我国农业生产的主要肥源,全国播种面积曾达到 1400 万 hm^2 ^[5],对我国的粮食生产做出了巨大贡献。大量研究证实,绿肥可以实现土地的“用养结合”,在农田节肥、肥料增效、耕地养育、增产提质等方面效果显著^[6]。在我国南方地区,受冬季长期低温气候的影响,大量耕地在冬闲期处于撂荒状态^[7],造成了土地与水光热等资源的双重浪费。而利用冬闲田种植紫云英 (*Astragalus sinicus*)、毛叶苕子 (*Vicia villosa*) 等绿肥作物,不仅能够充分利用丰富的水光热资源,同时绿肥翻压后还可长期为土壤和后茬作物提供大量有机物质及养分^[8]。此外,冬闲季种植绿肥还可以抑制杂草生长、固持土壤、减少长期地表裸露造成的养分流失,对维护农田生态平衡意义重大^[9]。

紫云英作为鄱阳湖流域稻(*Oryza sativa*)田广泛种植利用的豆科绿肥作物,通过生物固氮,能够高效固持大气和土壤中的氮素,翻压腐解后释放出大量养分,为后续作物生长提供充足的养分支持^[10-11]。种植、利用绿肥可以减少化肥用量,缓解由于化肥施用导致的土壤板结、肥力下降、环境污染等一系列负面效应^[12]。然而,要充分发挥紫云英作为绿肥的生态与经济效益,保障紫云英产量和养分吸收是实现其绿肥效应的关键。研究表明,播期和播量对紫云英生长发育有着重要影响^[13-14],适宜的播期和播量可以使紫云英充分利用水光热资源,有利于缓解个体和群体的生长矛盾,培育健壮幼苗,充分发挥其生产潜力。在传统农业生产模式中,会在晚稻收获前一段时间内进行稻底套播紫云英,具有省工节本、提高劳动生产效率的优点,通常情况下播种越早紫云英生物量越高。然而,当前水稻机收日益普及^[15],机械碾压会对紫云英幼苗产生毁灭性打击,传统的稻底套播模式面临新的挑战。因此,对于机收晚稻田而言,需要明确紫云英的适宜播期,以尽量避开机械碾压带来的损害,又要充分利用农时季节,实现高效种植。此外,适当加大播量也被视为消减晚稻机收导致紫云英产量损失的潜在策略。尽管紫云英播期与播量对其产量的影响已受到广泛关注,但现有研究大多局限于小区试验^[16-17],缺乏田间条件下机收晚稻对紫云英生物量及其养分吸收量影响的研究。因此,本研究选择在江西鄱阳湖流域稻区,通过设置不同播期、播量的田间试验,系统研究机收晚稻条件下,不同播期、播量组合对紫云英产量及养分吸收的影响规律,以期明确该区域紫云英高产栽培的最佳播期与播量,为鄱阳湖流域稻区紫云英高产栽培提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于江西省农业科学院高安创新示范基地(28.25° N, 115.12° E, 海拔110 m)。该地区为典型的亚热带季风湿润气候,年均温度17.7℃,年均降水量1560 mm。试验田土壤来源于河流冲积物,土壤类型为红黏土,该地区的水稻种植制度为一年两季,早稻4月下旬插秧,7月上旬收获,晚稻在7月中旬插秧,10月上旬收获。试验开始前0~20 cm土壤pH为6.53,有机质和全氮含量分别为11.78和1.18 g·kg⁻¹,速效氮、速效磷、速效钾含量分别为111.39、5.04、78.57 mg·kg⁻¹。试验于2019年10月至2021年4月进行,试验期间月均最高和最低温度以及月累计降水量如图1所示。

1.2 试验设计

试验设置播期和播量2个因素,采用随机区组设计,每个处理重复4次。设5个播期,分别为晚稻收获前4周(4 weeks before the harvest of late rice, 10月12日,标记为T₁)、晚稻收获前3周(3 weeks before the harvest of late rice, 10月19日, T₂)、晚稻收获前2周(2 weeks before the harvest of late rice, 10月26日, T₃)、晚稻收获前1周(1 week before the harvest of late rice, 11月2日, T₄)、晚稻收获后当天(the same day after the harvest of late rice, 11月9日, T₅);设5个播量,分别为1(标记为D₁)、2(D₂)、3(D₃)、4(D₄)、5 g·m⁻²(D₅)。供试紫云英品种为余江大叶。T₁~T₄处理进行稻底套播时,人工均匀撒播紫云英种子于各小区, T₅处理晚稻收割后进行播种。晚稻使用联合收割机(履带宽50 cm)进行收割,收割后水稻秸秆(6000 kg·hm⁻²)就地还田。为便于统计紫云英种子的发芽率,在11月25日进行种子发芽率统计,各处理紫云英种子发芽率见表1。为充分验证田间条件下机械碾压对紫云英产量的影响,整个试验区面积为15000 m²,各处理面积150 m²,为避免边际效应以及便于样品测定工作,在各处理中央划分32 m²(8 m×4 m)采用人工收割紫云英,进行测产及样品采集。晚稻收获后及时开好畦沟、腰沟和围沟,沟宽、深均为25 cm,沟与排水口相通,其他田间管理均统一按照当地常规操作进行。

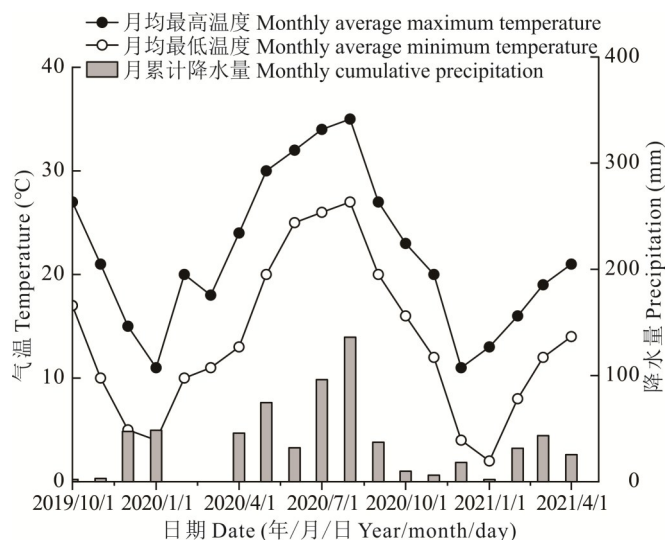


图1 试验周期月均最高和最低温度以及月累计降水量

Fig. 1 Monthly average maximum and minimum temperatures, and monthly cumulative precipitation during the experiment period

1.3 测定内容与方法

1.3.1 紫云英地上部产量 于次年4月收获各处理紫云英地上部分并测定其鲜重。每个处理取 1 kg 鲜草样品,置于 105 ℃烘箱杀青 30 min,而后 80 ℃下烘干并称重。

1.3.2 紫云英养分测定 紫云英植物样品烘干后经粉碎机粉碎后过 0.25 mm 筛。称取所需样品,采用凯氏定氮法^[18]测定全氮(total nitrogen, TN)含量,采用钼锑抗比色法^[18]测定全磷(total phosphorus, TP)含量,采用火焰光度计法^[18]测定全钾(total potassium, TK)含量;植株样品经浓硝酸—高氯酸消化后,采用原子吸收分光光度法^[18]测定钙(calcium, Ca)和镁(magnesium, Mg)含量。养分积累量=干物质量×养分含量。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2013 进行数据整理,采用 SAS 8.2 版本(SAS Institute Inc., Cary, 北卡罗来纳州,美国)进行数据统计分析。检验数据的正态分布性,并采用双因素方差分析,检验播期和播量处理间紫云英鲜草、干草生物量、养分吸收量(N、P、K、Ca、Mg)之间的差异显著性($P<0.05$)。绘图采用 OriginPro 2021 版本(OriginLab Corporation, Northampton, 美国)。

2 结果与分析

2.1 播期、播量对紫云英生物量的影响

随着播种时间的推迟,紫云英鲜草和干草生物量均呈先降低再增加的趋势(图 2)。不同播期鲜草平均生物量为 20612 kg·hm⁻²,与晚稻收获前 3 周播种处理(T₂)相比,其他各处理(T₁、T₃、T₄、T₅)鲜草生物量下降 0.9%~18.0%(图 2a),整体表现为 T₂>T₁>T₅>T₄>T₃。在 5 个播期(T₁~T₅)下,不同播量的(D₁~D₅)干草生物量分别为 2515~3625 kg·hm⁻²,2375~3690 kg·hm⁻²,2152~2987 kg·hm⁻²,2268~3034 kg·hm⁻²,2456~3722 kg·hm⁻²(图 2b),在播量为 3 g·m⁻²(D₃)时达到最大,干草平均生物量为 3288 kg·hm⁻²。与 D₃处理相比,其他处理(D₁、D₂、D₄、D₅)紫云英干草生物量下降 5.2%~24.7%,整体表现为 D₃>D₅>D₄>D₂>D₁。

紫云英干草生物量随播期推迟呈先降低后增加的趋势,而随播量的增加呈先增加后降低的趋势(图 3)。播期在 T₁、T₂、T₅时干草生物量较高。与 T₅处理相比,T₃和 T₄处理干草生物量分别下降 12.6%和 12.4%(图 3b)。

表 1 紫云英种子发芽率

Table 1 Germination rate of milk vetch (%)

播期 Seeding time	播量 Seeding density				
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
T ₁	89.6	92.4	93.7	94.5	93.5
T ₂	90.2	92.6	94.7	95.1	94.3
T ₃	91.4	94.2	93.4	94.8	94.2
T ₄	89.3	91.6	92.5	93.4	92.2
T ₅	88.9	90.4	91.3	92.8	90.5

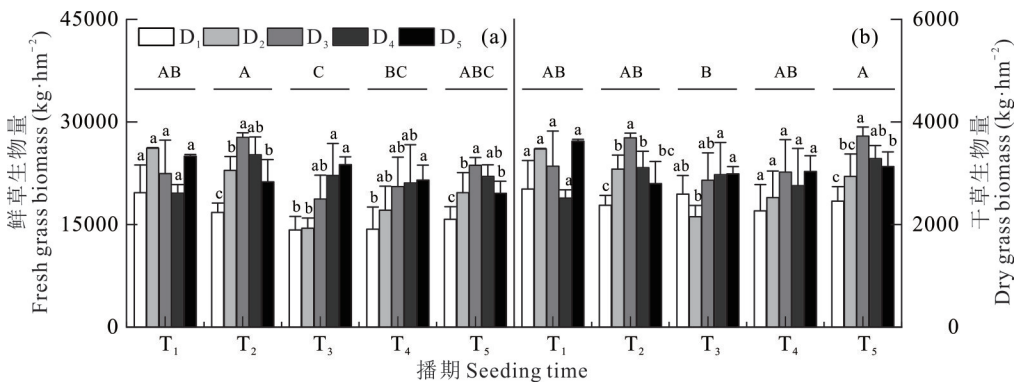


图 2 不同播期、播量对紫云英鲜草和干草生物量的影响

Fig. 2 Effect of different seeding times and seeding densities on fresh grass yield and dry grass biomass of milk vetch

不同大写字母表示不同播期间差异显著;不同小写字母表示同一播期下不同播量间差异显著($P<0.05$)。误差条表示标准偏差。下同。Different capital letters indicate significant differences among seeding times; different lowercase letters indicate significant differences among seeding densities under the same seeding time ($P<0.05$). Error bars represent the standard deviation. The same below.

播量在D₃时紫云英干草生物量达到最高。与D₃处理相比,D₂和D₄处理干草生物量分别下降13.8%和10.9%(图3c)。

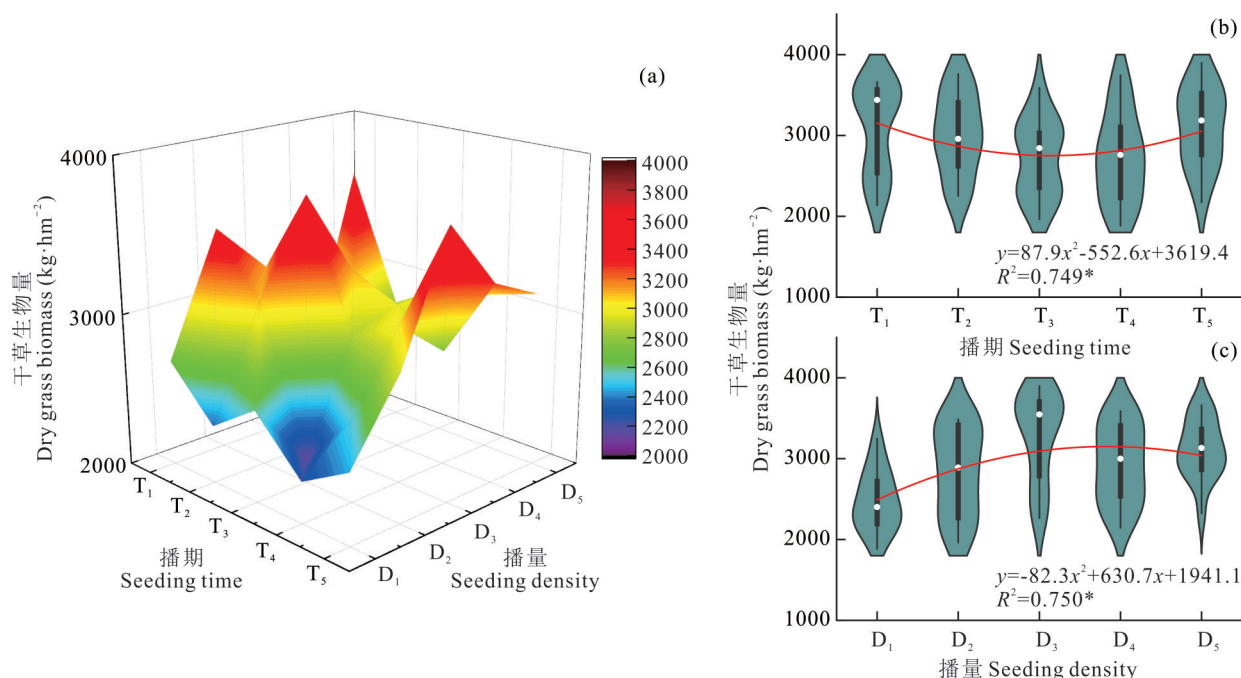


图3 不同播期、播量下紫云英干草生物量的非线性拟合

Fig. 3 Nonlinear fitting of milk vetch dry grass biomass under different seeding times and seeding densities

*: $P < 0.05$, 下同 The same below.

2.2 播期、播量对紫云英氮、磷、钾吸收量的影响

不同播期和播量下紫云英各养分吸收量差异显著(图4)。从播期看,紫云英N、P、K吸收量分别在T₂、T₂、T₁时较高(图4g~i);从播量看,紫云英N、P、K吸收量分别在D₅、D₅、D₃时较高(图4j~l)。在5个播期(T₁~T₅)下,不同播量(D₁~D₅)紫云英N吸收量分别为59.7~88.0 kg·hm⁻², 58.3~88.0 kg·hm⁻², 54.3~76.8 kg·hm⁻², 49.9~79.3 kg·hm⁻², 57.1~83.5 kg·hm⁻²(图4a, d)。与T₅处理相比,T₃、T₄处理紫云英N吸收量分别下降10.2%、10.5%。与D₃处理相比,D₂、D₄处理紫云英N吸收量平均值分别下降7.8%、3.7%。紫云英P吸收量在T₂播期最高,为9.5 kg·hm⁻²;在T₂处理下,与D₃处理相比,D₂、D₄处理紫云英P吸收量分别下降10.5%、0.5%(图4b, e)。在5个播期(T₁~T₅)下,不同播量(D₁~D₅)紫云英K吸收量分别为62.3~89.9 kg·hm⁻², 47.5~65.8 kg·hm⁻², 42.6~76.9 kg·hm⁻², 44.2~83.4 kg·hm⁻², 57.1~97.4 kg·hm⁻²(图4c, f)。与D₃处理相比,其他各处理(D₁、D₂、D₄、D₅)紫云英K吸收量平均值分别下降32.3%、15.9%、6.1%、5.0%。

2.3 播期、播量对紫云英钙和镁吸收量的影响

不同播期下紫云英Ca和Mg吸收量无显著差异,而不同播种量显著影响紫云英Ca和Mg吸收量(图5a~d)。紫云英Ca吸收量在T₅播期最高,平均值为20.2 kg·hm⁻²;与T₅处理相比,T₁~T₄处理紫云英Ca吸收量平均值分别下降0.4%、3.8%、12.0%、12.6%(图5e)。与D₃处理相比,D₂、D₄处理紫云英Ca吸收量平均值分别下降15.9%、13.8%(图5g)。在5个播期(T₁~T₅)下,不同播量(D₁~D₅)紫云英Mg吸收量分别为3.7~8.4 kg·hm⁻², 4.2~7.8 kg·hm⁻², 4.6~6.4 kg·hm⁻², 4.1~6.1 kg·hm⁻², 4.6~6.5 kg·hm⁻²(图5b, d)。在D₃处理下紫云英Mg吸收量最高,平均值为6.8 kg·hm⁻²(图5h)。与D₃处理相比,其他各处理(D₁、D₂、D₄、D₅)紫云英Mg吸收量平均值分别下降33.9%、24.6%、16.2%、12.1%。

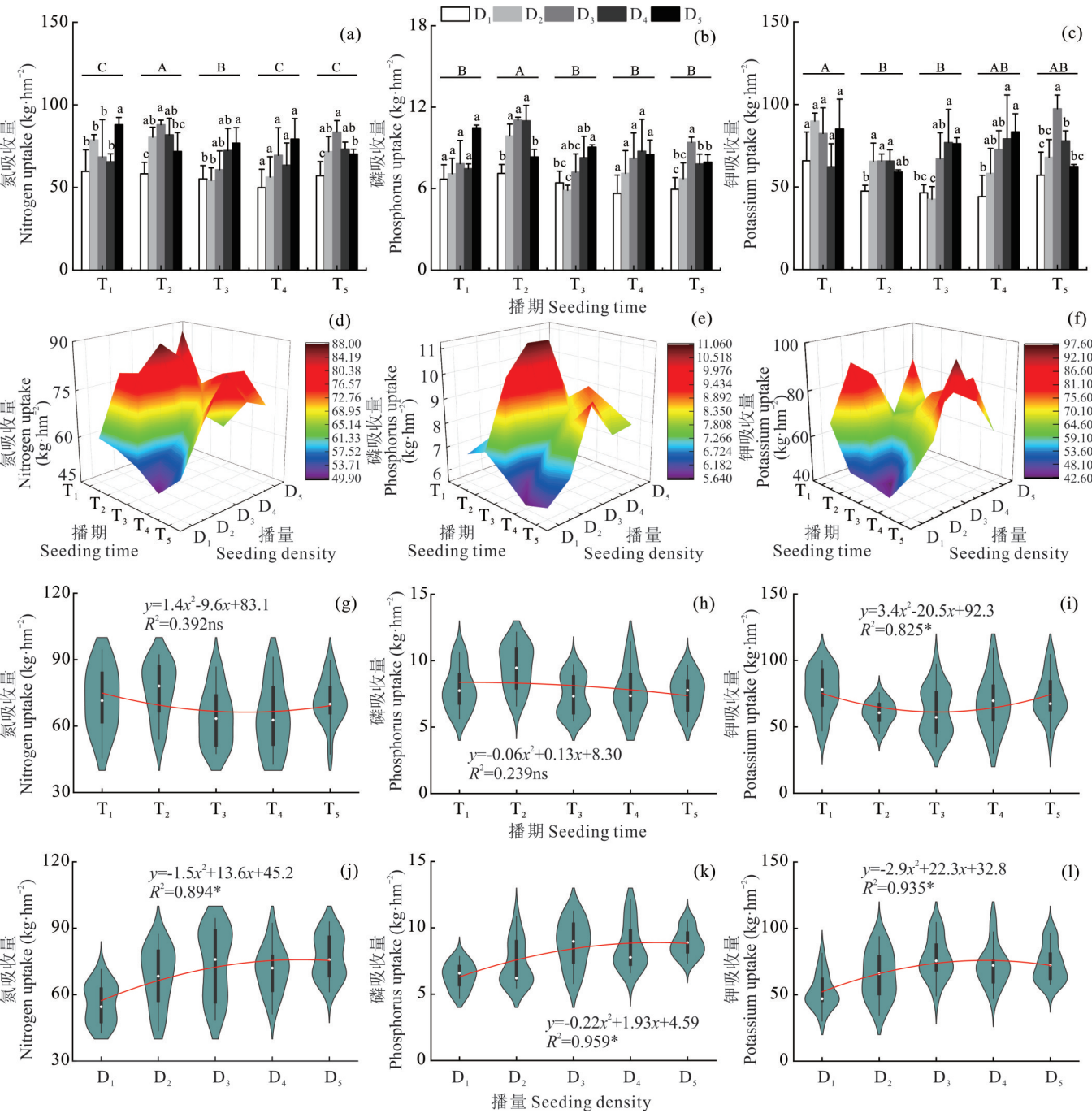


图4 不同播期、播量对紫云英氮、磷、钾吸收量的影响及其非线性拟合

Fig. 4 Effects of different seeding times and seeding densities on nitrogen, phosphorus, potassium uptake of milk vetch and its nonlinear fitting

ns: 无显著差异 No significant difference; 下同 The same below.

播期、播量对紫云英鲜草、干草生物量和养分吸收量(N、P、K、Ca、Mg)均产生极显著影响(表2),除紫云英干草生物量和P吸收量外,播期与播量间均存在显著交互作用。

3 讨论

在我国农业生产体系中,光温热资源的高效利用始终是提升土地产出率与农业经济效益的关键。紫云英作为兼具绿肥和饲草功能的重要作物,在稻田生态系统的物质循环中扮演着不可或缺的角色。在传统农业生产实践中,基于长期积累的种植经验,普遍选择在晚稻收获前10~20 d进行稻底套播紫云英。在适宜的气候条件下,

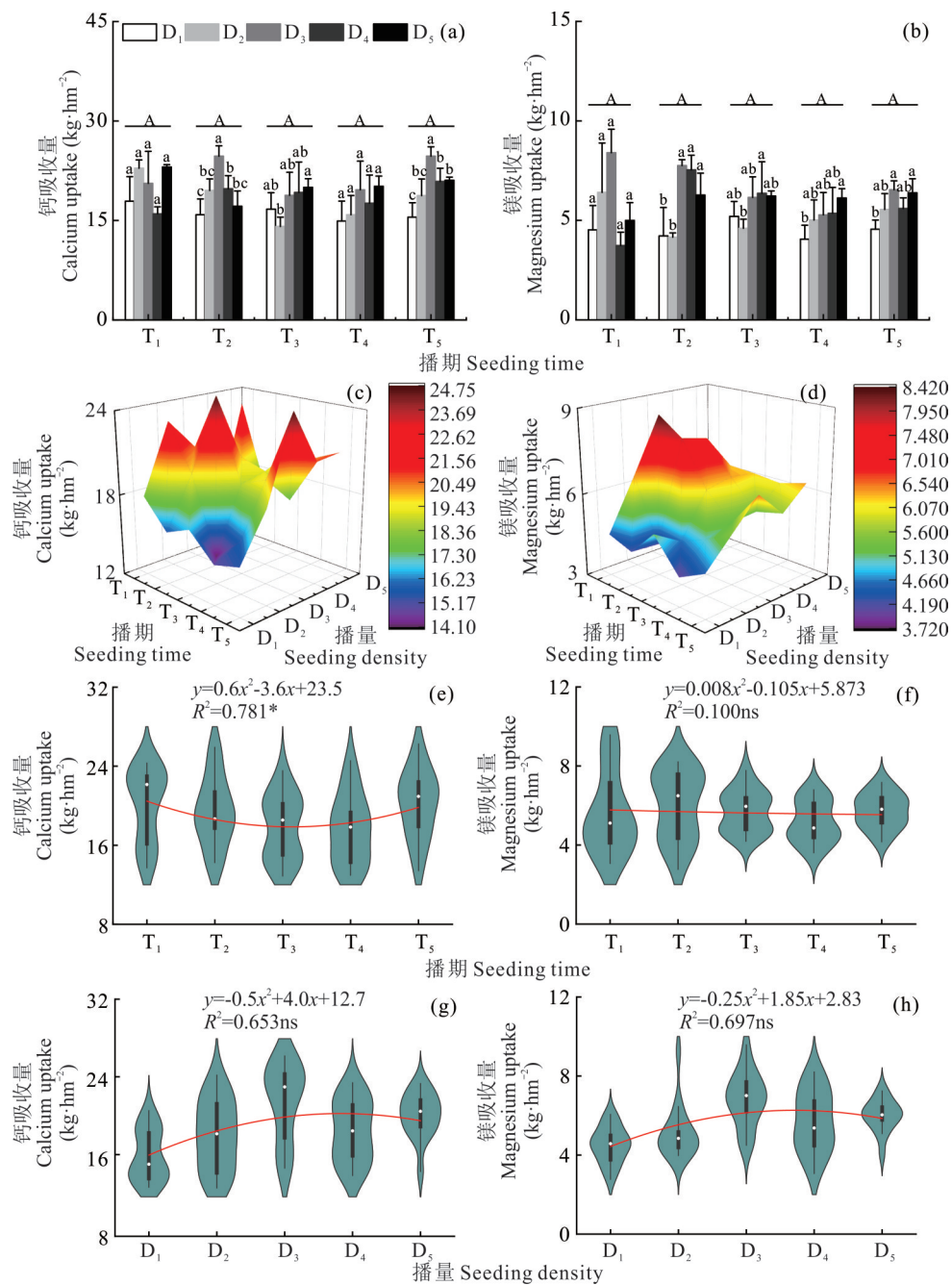


图5 不同播期、播量对紫云英钙和镁吸收量的影响及其非线性拟合

Fig. 5 Effects of different seeding times and seeding densities on calcium and magnesium uptake of milk vetch and its nonlinear fitting

表2 播期、播量对紫云英生物量及养分吸收的双因素方差分析

Table 2 Two-factor analysis of variance for the effect of different seeding times and seeding densities on biomass and nutrient uptake of milk vetch

项目 Item	鲜草生物量 Fresh grass yield	干草生物量 Dry grass biomass	吸收量 Uptake				
			N	P	K	Ca	Mg
播期 Seeding time (T)	5.00**	2.43*	53.58***	7.41***	3.55*	2.23*	1.42ns
播量 Seeding density (D)	10.39***	6.58**	5.52**	10.78***	8.62***	7.14**	5.85**
播期×播量 T×D	2.17*	1.49ns	5.19***	1.61ns	2.46**	1.80*	1.92*

*, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$; ns: 无显著差异 No significant difference; 表中数字为 F 值 The number in the Table is F values.

紫云英播种后 7~14 d 内开始发芽出苗,通过套播能够使紫云英在晚稻收割后,及时利用秋季剩余的光温热资源,迅速生长,而紫云英生物量大小对其还田后增加土壤有机质、改善土壤结构具有重要作用^[19]。然而,近年来农业生产格局发生了深刻变革,随着水稻机械化收割的普及,中国水稻机收率已超过 90%^[20],这极大改变了稻田作业模式,也对紫云英稻底套播技术提出了新的挑战。机械化收割晚稻时,一方面收割机在田间行驶不仅会直接碾压套播在稻底的紫云英种子或幼苗,导致其出苗率降低或幼苗受损^[21],另一方面,机械行驶产生的压实作用会造成土壤板结,破坏土壤孔隙结构,严重阻碍紫云英根系的生长发育,影响其对水分和养分的吸收。本研究结果表明,在晚稻收获前 1~2 周播种(T_3 、 T_4)紫云英,其生物量显著降低(图 2),这主要是由于此时紫云英正处于幼苗期,植株较为矮小、根系发育尚不完善,无论是地上部分的茎叶组织还是地下部分的根系结构,都处于相对脆弱的生长阶段。而水稻机械化收获过程中,机械的履带或轮子会对田间地面进行大面积的碾压,这种强大的外力作用对处于幼苗期的紫云英来说,是难以承受的。由于紫云英自身对机械碾压的耐受性较差,幼苗的茎叶可能会被直接压断、损伤,根系也可能因土壤被压实而受到破坏,影响其对水分、养分的吸收和传输^[22],进而严重阻碍紫云英的正常生长和生物量积累,最终导致其生物量显著降低。因此,在水稻机械化收割普及的当下,过去机械化程度不高时形成的晚稻收获前 10~20 d 稻底套播紫云英的传统经验做法,已不再适用于生产实际,科学合理地确定紫云英的播期对于保障其生长和产量具有至关重要的意义。

高产紫云英是种植绿肥作物的首要目标,而播期、播量是影响紫云英生物量形成的关键因素。本研究结果表明,紫云英干草生物量与播期、播量呈非线性关系:随着播期推迟,紫云英干草生物量呈先降低后增加的趋势;而播量增加时,干草生物量则表现为先增加后降低的趋势(图 2)。适宜的播期不仅可以充分利用光温热等资源,还可避免因机收晚稻时受到机械碾压。播量作为关键的栽培管理因子,通过调控田间群体密度,形成较好的群体内小气候与土壤微环境,对作物产量形成产生显著影响^[23]。随着播量增加,植株群体密度上升,群体内部光照强度减弱、通风透气性变差,同时土壤养分与水分竞争加剧,根系生长空间受限;而播量不足时,群体覆盖度低,光能利用率不高,土地资源未能充分利用^[24]。在本研究中,紫云英生物量与播量呈抛物线关系,其生物量随播量增加先增加后降低,在播量为 $3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时最大。这与前人的研究结果一致^[25-26],适宜的种植密度能够优化群体结构,实现植株间光分布的合理化、通风的流畅化,确保每株作物都能获得充足的光照与良好的气体交换条件;在土壤层面,合理密植可促进根系均匀分布,提高养分和水分的吸收效率,避免因竞争过度导致的生长抑制^[27-28]。综上,播期与播量并非独立影响紫云英生物量(表 2),而是通过交互作用,共同影响着紫云英对水、肥、光、热及空间资源的利用效率。因此,要综合考虑两者的协同效应,实现紫云英生物量的最大化提升,达成绿肥作物高产的种植目标。

绿肥的核心功能是养分还田^[29-30],其养分积累量直接决定了其还田效果。紫云英因 C/N 较低,还田后能快速腐解并释放养分,可以及时满足后茬作物的营养需求而在鄱阳湖流域稻田广泛种植^[31-32]。本研究表明,紫云英养分元素(N、P、K、Ca、Mg)吸收量与紫云英生物量呈相同趋势,不同播期和播量处理对元素养分浓度无显著影响(数据未显示),表明生物量是决定紫云英养分吸收量的关键因素(图 4 和图 5)。除了直接的养分贡献,紫云英的生态功能同样显著。紫云英根系发达,能深入土壤孔隙,其根瘤的固氮作用可将空气中的游离氮转化为植物可吸收的铵态氮,显著提升土壤氮含量,降低对化学氮肥的依赖^[33]。紫云英翻压还田后,其有机残体经微生物分解形成腐殖质,能够促进土壤团粒结构的形成,增强土壤保水保肥能力,减少水土流失,改善土壤通气性和透水性^[34-35]。此外,紫云英还田过程中产生的次生代谢产物和微生物活动,能够调节土壤微生物群落结构,抑制病原菌生长,增强土壤生物活性^[29,36]。这种生态效益与养分供给的协同作用,不仅能保障后茬作物的持续高产,还能实现农业生产的可持续发展。因此,通过科学调整紫云英播期、播量,实现其高产栽培,对推进绿色农业、减少面源污染具有重要意义。

4 结论

紫云英作为鄱阳湖流域稻区最主要的绿肥作物,其高产栽培与合理利用对农业可持续发展具有关键意义。播期与播量是影响紫云英生物量和养分积累的核心因素。本研究表明,紫云英生物量随播期推迟呈先降低后增

加的趋势,而随播量增加呈先增加后降低的趋势。在晚稻机收前3周或晚稻机收后以播量 $3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 进行紫云英播种,可以获得较高的产量。传统稻底套播紫云英(提前1~2周播种)会因当前稻田机械化收割时碾压造成紫云英生物量下降,降低其养分还田及生态效益,应选择适宜播期有效规避机械损伤风险,充分利用光热资源;调整合理播量则能优化群体结构,平衡资源竞争与利用效率,二者协同可显著提升紫云英生物量。通过精准调控播期与播量实现紫云英高产,不仅能为后茬作物提供优质养分,降低化学肥料依赖,更能有效减少面源污染,增强土壤生态服务功能,为推进绿色农业、实现农业生产与生态保护双赢提供重要技术路径。

参考文献 References:

- [1] Cao W D, Bao X G, Xu C X, *et al.* Reviews and prospects on science and technology of green manure in China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1450—1461.
曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 等. 中国绿肥科研60年回顾与未来展望. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1450—1461.
- [2] Cao W D, Zhou G P, Gao S J. Effects and mechanisms of green manure on endogenous improving soil health. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(7): 1274—1283.
曹卫东, 周国朋, 高嵩涓. 绿肥内源驱动土壤健康的作用与机制. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(7): 1274—1283.
- [3] Gao S J, Zhou G P, Chang D N, *et al.* Southern China can produce more high-quality rice with less N by green manuring. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 196: 107025.
- [4] Ma J Y, Anthoni P, Olins S, *et al.* Estimating the global influence of cover crops on ecosystem service indicators in croplands with the LPJ-GUESS model. *Earth's Future*, 2023, 11(5): e2022EF003142.
- [5] Cao W D, Gao S J. Chinese green manure development strategy by 2025. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(22): 1—9.
曹卫东, 高嵩涓. 到2025年中国绿肥发展策略. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(22): 1—9.
- [6] Gao S J, Wu C X, Zhou G P, *et al.* “Green manure plus” industry mechanism and its practices. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(10): 1982—1993.
高嵩涓, 吴翠霞, 周国朋, 等. “绿肥+”产业机制及其实践. *中国农业科学*, 2025, 58(10): 1982—1993.
- [7] Zhang X Z, Zhao C S, Dong J W, *et al.* Spatio-temporal pattern of cropland abandonment in China from 1992 to 2017: A Meta-analysis. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 411—420.
张学珍, 赵彩杉, 董金玮, 等. 1992—2017年基于荟萃分析的中国耕地撂荒时空特征. *地理学报*, 2019, 74(3): 411—420.
- [8] Chen X F, Zhang L P, Qin W J, *et al.* A study of the appropriate seeding rates for four winter green manure crops in an upland red soil of Southern China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(10): 137—146.
陈晓芬, 张路平, 秦文婧, 等. 红壤旱地上4种冬绿肥适宜播种量研究. *草业学报*, 2021, 30(10): 137—146.
- [9] Peng Y, Wang L X, Jacinthe P A, *et al.* Global synthesis of cover crop impacts on main crop yield. *Field Crops Research*, 2024, 310: 109343.
- [10] Yang L, Nie J, Xu C X, *et al.* Biological nitrogen fixation of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as affected by exogenous carbon and nitrogen input. *Symbiosis*, 2021, 85(1): 69—77.
- [11] Wang G C, Hu F L, Li H T, *et al.* Research advances on the effect and mechanism of green manure on improving soil carbon sequestration in cropland. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(6): 1185—1198.
王国瑾, 胡发龙, 李含婷, 等. 绿肥提高农田土壤有机碳固存机制的研究进展. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(6): 1185—1198.
- [12] Xia L L, Yan X Y. How to feed the world with less nitrogen pollution. *Nature*, 2023, 613: 34—35.
- [13] Zhou Y, Wei Q S, Guan Y X, *et al.* Effects of different seeding rates on growth and nutrient accumulation of later-sown Chinese milk vetch. *Soils*, 2020, 52(3): 482—486.
周影, 魏启舜, 管永祥, 等. 播种量对晚播紫云英生长及养分积累的效应. *土壤*, 2020, 52(3): 482—486.
- [14] Liu C Z, Lv Y H, Li B Y, *et al.* Effects of seeding date on Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) growth, yield and nutrients accumulation. *Soil and Fertilizers Sciences in China*, 2018(1): 127—133.
刘春增, 吕玉虎, 李本银, 等. 不同播期对紫云英“信紫1号”生长状况、产量及养分积累的影响. *中国土壤与肥料*, 2018(1): 127—133.
- [15] Zhang G Z, Ling G M, Ji C, *et al.* Path planning of mechanical harvesting considering the lodging and grain bin capacity for the ratoon rice in main season. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(12): 33—45.
张国忠, 凌高旻, 季超, 等. 考虑倒伏与粮仓容积的再生稻头季机收路径规划. *农业工程学报*, 2024, 40(12): 33—45.

- [16] Zhou G P, Cao W D, Bai J S, *et al.* Co-incorporation of rice straw and leguminous green manure can increase soil available nitrogen (N) and reduce carbon and N losses: An incubation study. *Pedosphere*, 2020, 30(5): 661–670.
- [17] Zhou G P, Gao S J, Chang D N, *et al.* Using milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) to promote rice straw decomposition by regulating enzyme activity and bacterial community. *Bioresource Technology*, 2021, 319: 124215.
- [18] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (Third version). Beijing: China Agricultural Press, 2000.
鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] Wang J H, Feng H X, Cao K, *et al.* Quantitative assessment of rice yield and profit efficiency of milk vetch returning to field in southern China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(4): 819–828.
王建红, 冯含笑, 曹凯, 等. 我国南方紫云英还田的水稻产量和效益的量化研究. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(4): 819–828.
- [20] Qu X, Kojima D, Nishihara Y, *et al.* Can harvest outsourcing services reduce field harvest losses of rice in China? *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(5): 1396–1406.
- [21] Wu J F, Zeng Y H, Zhou C H, *et al.* Study on growth recovery techniques of rolling belt area in milk vetch after rice machine-harvesting. *Crops*, 2016, 32(1): 82–85.
吴建富, 曾研华, 周春火, 等. 机收稻田皮带碾压区紫云英生长恢复技术研究. *作物杂志*, 2016, 32(1): 82–85.
- [22] Zou J N, Pang Z Q, Li Z, *et al.* The underlying mechanism of variety—water—nitrogen—stubble damage interactions on yield formation in ratoon rice with low stubble height under mechanized harvesting. *Journal of Integrative Agriculture*, 2024, 23(3): 806–823.
- [23] Dai J Q, Yuan Z Y, Chen J, *et al.* Effects of ridge box cultivation mode and planting density on methane emissions from double cropping rice. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025(43): 1–12.
戴锦清, 袁紫依, 陈俊, 等. 垄厢栽培模式下厢宽和种植密度对双季稻田甲烷排放的影响. *农业资源与环境学报*, 2025(43): 1–12.
- [24] Haque M A, Sakimin S Z. Planting arrangement and effects of planting density on tropical fruit crops—A review. *Horticulturae*, 2022, 8(6): 485.
- [25] Liang L P, Liu Z W, Cao C L, *et al.* Effect of seeding date and seeding rates on agronomic traits and yield of winter rapeseed. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(36): 37–42.
梁丽鹏, 刘哲文, 曹春莉, 等. 播期和播量对冬油菜农艺性状及产量的影响. *中国农学通报*, 2024, 40(36): 37–42.
- [26] Liu J H, He Q J, Guan Y, *et al.* Suitable sowing date for stable and high yield of summer maize in the northern region of Huang—Huai—Hai, China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(5): 131–138.
刘佳鸿, 何奇瑾, 管玥, 等. 黄淮海北部地区夏玉米稳产高产的播期优选. *农业工程学报*, 2022, 38(5): 131–138.
- [27] Yan Y Y, Duan F Y, Li X, *et al.* Photosynthetic capacity and assimilate transport of the lower canopy influence maize yield under high planting density. *Plant Physiology*, 2024, 195(4): 2652–2667.
- [28] Li R D, Xu C L, Wu Z S, *et al.* Optimizing canopy-spacing configuration increases soybean yield under high planting density. *The Crop Journal*, 2025, 13(1): 233–245.
- [29] Li T, Gao J S, Bai L Y, *et al.* Influence of green manure and rice straw management on soil organic carbon, enzyme activities, and rice yield in red paddy soil. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104428.
- [30] Yang L, Zhou X, Liao Y L, *et al.* Co-incorporation of rice straw and green manure benefits rice yield and nutrient uptake. *Crop Science*, 2019, 59(2): 749–759.
- [31] Zhou G P, Chang D N, Gao S J, *et al.* Co-incorporating leguminous green manure and rice straw drives the synergistic release of carbon and nitrogen, increases hydrolase activities, and changes the composition of main microbial groups. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(4): 547–561.
- [32] Zhou G P, Cao W D, Bai J S, *et al.* Non-additive responses of soil C and N to rice straw and hairy vetch (*Vicia villosa* Roth L.) mixtures in a paddy soil. *Plant and Soil*, 2019, 436(1/2): 229–244.
- [33] Liang H, Li S, Zhang L, *et al.* Long-term green manuring enhances crop N uptake and reduces N losses in rice production system. *Soil and Tillage Research*, 2022, 220: 105369.
- [34] Huang J Y, Hartemink A E. Soil and environmental issues in sandy soils. *Earth-Science Reviews*, 2020, 208: 103295.
- [35] Wan L, Chen X F, Yang S, *et al.* Co-incorporation of rice straw and milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) improves soil fertility and rice yield in two typical paddy soils. *Soil Use and Management*, 2025, 41(1): e70018.
- [36] Zhou G P, Gao S J, Lu Y H, *et al.* Co-incorporation of green manure and rice straw improves rice production, soil chemical, biochemical and microbiological properties in a typical paddy field in southern China. *Soil and Tillage Research*, 2020, 197: 104499.