

基于群体生长及微气象因子对苏打盐碱稻区不同水稻产量层次差异解析

刘丽新, 姚天旭, 张文韬, 周一名, 刘庆天, 王鑫, 翁文安, 张博文, 金峰*, 邵玺文*

(吉林农业大学农学院, 长春 130118)

摘要: 探究松嫩平原苏打盐碱稻区不同水稻产量层次差异限制性因子, 以提高该区水稻产量。以‘吉粳88’为试验材料, 设置基础水平、当地农户水平、高产高效水平和超高产水平4种产量层次, 基于群体生长和群体微气象因子解析产量层次差异的限制性因子。结果表明, 群体生长率、群体净同化率、光合势、群体净光合速率低下, 叶面积指数不足以及群体冠层内光照截获是苏打盐碱稻区农户水平产量不高的限制性因子。通过合理优化管理技术, 构建合理群体结构, 提高群体叶面积、改善光合物质生产能力、提升群体光能截获量是缩小松嫩平原苏打盐碱地稻区不同产量层次差异的关键技术措施之一。

关键词: 水稻; 苏打盐碱胁迫; 群体结构; 微气象因子

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2023)02-0006-07

Analysis of Different Rice Yield Levels in Saline-Sodic Area Based on Population Growth and Micrometeorological Factors

LIU Lixin, YAO Tianxu, ZHANG Wentao, ZHOU Yiming, LIU Qingtian, WANG Xin, WENG Wen'an, ZHANG Bowen, JIN Feng*, SHAO Xiwen*

(College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: To explore the limiting factor among different rice yields level in saline-sodic area of the western Songnen Plain, and increase the yield of rice in the area. To increase the yield of rice in the area, four yield level were settled, including basal level, local farmer level, high yield and high efficiency level and super high yield level. Based on population growth and population micrometeorological factors, the limiting factors of yield hierarchy differences were analyzed. The results showed that low population growth rate, net assimilation rate, photosynthetic potential, low net photosynthetic rate, insufficient leaf area index and light interception in canopy were the limiting factors for low level yield of local farmer level in saline-sodic areas. It is one of the key technical measures to reduce the difference of different yield levels of saline-sodic paddy fields in Songnen Plain to optimize the management technology, construct a reasonable population structure, improve the leaf area of the population, improve the photosynthetic material production capacity and enhance the light interception of the population.

Key words: Rice; Saline-sodic stress; Population structure; Micrometeorological factors

东北地区是我国粳稻主产区和商品粮基地, 粳稻播种面积和产量占全国粳稻的50%以上, 东

北水稻在我国粮食生产安全保障体系和农业生产中占有重要地位^[1]。位于东北中部的松嫩平原西部为苏打盐碱地区, 面积占该平原面积的21%, 是世界上苏打盐碱土集中分布的三大地区之一, 也是我国苏打盐碱地主要集中区域^[2-3], 合理开发和利用松嫩平原西部苏打盐碱地, 提升苏打盐碱稻区水稻总体产量, 对保证国家粮食生产安全具有重要意义^[4-5]。种植水稻是改良和利用苏打盐碱地的重要途径^[6-8]。苏打盐碱稻区具有较大的气候生产潜力, 但目前, 由于盐碱胁迫以及栽培管

收稿日期: 2020-03-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300104、2017YFD0300609); 吉林省教育厅“十三五”科学技术重点项目(JJKH20200340KJ)

作者简介: 刘丽新(1994-), 女, 硕士, 研究方向: 水稻抗逆栽培与生理基础。

通讯作者: 金峰, 男, 副教授, E-mail: jinfeng911@126.com
邵玺文, 男, 教授, E-mail: shaoxiwen@126.com

理水平粗放等问题,该区生产潜力尚未发挥其应有水平,农户实际生产力水平与超高产生产水平和潜力水平相比仍有不小的差距^[9-10],水稻单产水平还有相当大的提升空间。因此,缩小产量差对于提高苏打盐碱稻区水稻产量,满足日益增加的生活所需具有重要意义。

产量差是衡量区域粮食生产现状和增产潜力、探索区域作物产量限制因素和解决方法的有效途径^[11]。研究不同产量层次下的生物学限制因子是提高群体生产潜力和改进农作管理的重要一步,而水稻群体结构的好坏直接影响到群体生产潜力的发挥^[12],所以优化水稻群体结构、提升群体物质生产能力是提高作物光温资源利用效率、增加水稻产量的重要途径。目前,基于群体物质生产及群体微气象环境解析松嫩平原苏打盐碱地稻区不同水稻产量层次差异形成因子研究鲜有报道。本试验设置4个不同产量层次水平,研究苏打盐碱稻区不同产量层次水平水稻群体物质生产、群体内微气象因子等差异,比较不同产量层

次水平水稻群体物质生产和群体微气象因子特征,为确定苏打盐碱稻区水稻生产限制因子,研发关键调控技术措施缩小产量与资源效率差异,提高水稻群体生产潜力和高产栽培策略提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与试验地概况

本试验于2017~2018年在吉林省白城市农科院水稻试验基地(东经122°53'1.98",北纬45°30'14.57")进行,气候类型属于温带大陆性季风气候,年平均气温为5.0℃,平均降水量394mm,平均蒸发量1894.7mm,全年平均日照时数为2896.5h,平均无霜期144d。土壤类型为盐碱土,耕层(0~20cm)土壤理化性质见表1。供试品种为本稻区的主栽超高产品种吉粳88,生育期143d。2017年4月17日播种,5月20日移栽,9月30日收获;2018年4月15日播种,5月17日移栽,9月28日收获。

表1 供试土壤基本理化性质

pH	电导率($\mu\text{s}/\text{cm}$)	有机质(%)	全氮(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
8.13	212.3	3.12	1.99	208.27	75.33	148.17

1.2 试验设计

设置基础水平(CK)、农户水平(FY)、高产高效水平(HYHE)、超高产水平(SHY)4个处理,采取随机区组设计,小区面积200m²,重复3次,小区间修筑水泥埂,每个小区单排单灌,各小区生产管理方式如下:

基础水平(CK):不施氮肥,施纯磷(P₂O₅)60kg/hm²,全磷一次性施用,施纯钾(K₂O)50kg/hm²,钾肥按基肥:分蘖肥=7:3施入。采用机插秧盘育秧方式(规格:30cm×60cm),每盘播种150g芽种。栽插密度为30cm×20cm,每穴4~5株苗。生育中期进行排水搁田,其余时期保持水层至收获前一周断水。

农户水平(FY):纯氮总施入量为175kg/hm²,纯磷(P₂O₅)60kg/hm²,纯钾(K₂O)50kg/hm²,全磷一次性施用,氮肥和钾肥均按基肥:穗肥=7:3施入。育秧方式、栽插密度和水分管理方式同CK。

高产高效水平(HYHE):纯氮总施入量为175kg/hm²,施纯磷(P₂O₅)60kg/hm²和纯钾(K₂O)50kg/hm²,全磷一次性施用,氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥:粒肥=4:2:3:1施入,钾肥按基肥:穗肥=6:4施入。稀播育壮秧,营养钵育苗,播种量较农户

水平减少15%,移栽时以秧苗带2~3个分蘖为最佳,栽插密度与CK处理相同。返青后施用硫酸锌15kg/hm²。精确灌溉,于插秧后3~5d保持寸水,提高水温,提早返青,早分蘖;分蘖末期适当撒水晾田,晾田5~7d,控制无效分蘖;拔节期孕穗期为水分临界期,保持水层3~5cm;开花期保持3~5cm水层;灌浆期采取间歇灌溉,提高根部的透气性,同时保证灌浆所需水分,以湿为主。

超高产水平(SHY):纯氮总施入量为225kg/hm²,施纯磷(P₂O₅)90kg/hm²和纯钾(K₂O)85kg/hm²,全磷一次性施用,氮肥按基肥:返青肥:分蘖肥:穗肥:粒肥=4:1:2:2:1施入,钾肥按基肥:穗肥=6:4施入,并于水稻返青期和齐穗期分别喷施磷酸二氢钾3kg/hm²。底肥配施生物有机肥150kg/hm²。底肥施用水溶硅肥75kg/hm²,水稻分蘖末期至拔节初期施用水溶硅肥75kg/hm²。返青后施用硫酸锌15kg/hm²。稀播育壮秧,方法同高产高效水平管理。栽插密度为30cm×13cm,每穴4~5株苗。精确灌溉,同高产高效水平管理。

1.3 调查指标与方法

1.3.1 干物质积累量

于分蘖期、拔节期、齐穗期、灌浆期、成熟期,

每个小区选择群体长势一致的3个取样点,每个点普查连续20穴植株的每穴茎蘖数,根据平均茎蘖数每点选取代表性植株样品5穴,所有样品经剪根后,按茎、叶、鞘、穗(抽穗后)分样,分别装袋后于105℃杀青0.5h,之后80℃烘干至恒重,称重。根据样品重量和单位面积穴数换算为植物干物质积累量。

1.3.2 叶面积指数

分别在齐穗期、灌浆期测定水稻叶面积,每个小区选择3个取样点,每点普查连续20穴植株的每穴茎蘖数,根据平均茎蘖数每点选取代表性植株样品5穴,分解所取样品的绿叶、枯叶,测量绿叶面积(cm^2);采用比重法测定叶面积(比较已测叶面积和未测叶面积的干重计算总叶面积),选取每穴大小一致的5个茎蘖,取下5个茎的所有叶片,测量叶长、叶宽,以长 \times 宽 \times 0.75计算叶面积,并计算叶面积指数。

1.3.3 叶片净光合速率

采用美国LI2-COR公司的LI-6400光合仪在水稻齐穗期、灌浆期测定水稻剑叶的净光合速率,测定时需晴朗无云和光照稳定的天气进行,测定时间为9:00~11:00,在每个小区选择群体长势一致的3个调查点,每点选择5株主茎剑叶测定剑叶光合速率,取平均值。

1.3.4 冠层内气象因子

各小区固定3点,于齐穗期及齐穗后20d测定行与行之间的冠层上方10cm、倒3叶叶耳高度处及地表5cm处的光照强度、温度和 CO_2 浓度。温度和 CO_2 浓度的测定所用仪器为LI-6400型光合系统,用冠层分析仪(PAR/LAI Ceptometer LP280)测定光照强度。

1.3.5 产量的测定

成熟期各田块割方测实产,每小区选择3个 5m^2 作为测产区。取样脱粒自然晒干风选后称量干重,测定含水率,按14%水分折算实收产量。

1.3.6 计算

光合势(m^2/d)= $1/2(\text{LAI}_1+\text{LAI}_2)(t_2-t_1)$,式中 LAI_1 和 LAI_2 为前后两次测定的叶面积指数(m^2/hm^2), t_1 和 t_2 为前后两次测定的时间(d)。

群体生长率 $[\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})]=(\text{W}_2-\text{W}_1)/(t_2-t_1)$,式中 W_1 和 W_2 为前后两次测定的干物质重, t_1 和 t_2 为前后两次测定的时间(d)。

叶面积衰减率 $(\text{LAI}/\text{d})=(\text{LAI}_2-\text{LAI}_1)/(t_2-t_1)$,式中 LAI_1 和 LAI_2 为前后两次测定的叶面积指数(m^2/hm^2), t_1 和 t_2 为前后测定的时间(d)。

净同化率 $[\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})]=[\ln(\text{LAI}_2)-\ln(\text{LAI}_1)]/(\text{LAI}_2-$

$\text{LAI}_1)\times(\text{W}_2-\text{W}_1)/(t_2-t_1)$,式中 LAI_1 和 LAI_2 为前后两次测定的叶面积指数(m^2/hm^2), t_1 和 t_2 为前后测定的时间(d)。

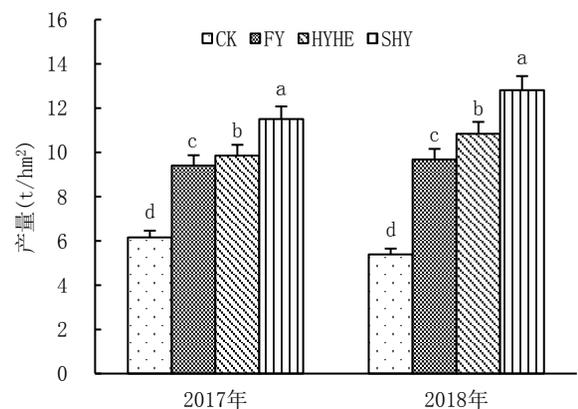
1.4 数据统计分析

运用Microsoft Excel 2010软件录入数据、计算,SPSS 22.0软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同产量层次群体产量与干物质积累量差异比较

由图1可知,基础水平、农户水平、高产高效水平和超高产水平的产量在2017年与2018年间差异均达到了显著水平。基础水平、农户水平、高产高效水平和超高产水平的两年平均产量分别为5.77、9.54、10.34、12.12 t/hm^2 ,超高产产量水平较高产高效水平、农户水平和基础水平两年平均分别高出16.75%~18.28%、22.34%~32.47%、86.99%~138.10%,高产高效水平较农户水平和基础水平两年平均分别高出0.45~1.16 t/hm^2 和3.7~5.45 t/hm^2 。



注:误差线上标以不同小写字母表示在5%水平差异显著,下同

图1 不同产量层次群体产量差异比较

两年间不同产量层次水稻群体总干物质积累量均表现为超高产水平>高产高效水平>农户水平>基础水平,且处理间差异显著(图2)。基础水平、农户水平、高产高效水平和超高产水平的两年平均总干物质积累量分别为9.65、16.64、17.00、24.87 t/hm^2 。超高产产量水平较高产高效产量水平、农户产量水平和基础产量水平两年平均分别高出36.33%~43.14%、44.39%~54.82%、133.81%~186.61%,高产高效产量水平较农户产量水平和基础产量水平两年平均分别高出1.01~1.32 t/hm^2 和7.55~8.76 t/hm^2 。

2.2 不同产量层次群体齐穗期至灌浆期群体生长的差异

由表2可知,超高产水平和高产高效水平的

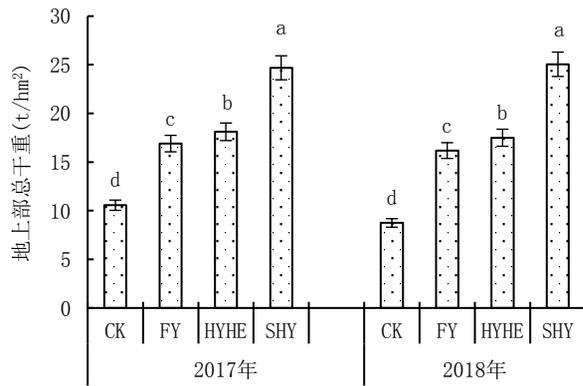


图2 不同产量层次群体总干物质差异比较

表2 不同产量层次齐穗期至灌浆期群体干物质生产的差异

年份	处理	群体增长率 $[g/(m^2 \cdot d)]$	净同化率 $[g/(m^2 \cdot d)]$	光合势 (m^2/d)	叶面积衰减率(LAI/d)
2017	农户(FY)	23.82±1.13b	4.04±0.46b	61.32±2.61c	0.22±0.02b
	高产高效(HYHE)	25.48±1.48a	4.95±0.14a	67.81±2.83b	0.23±0.02b
	超高产(SHY)	26.33±1.41a	4.94±0.42a	91.16±4.58a	0.27±0.05a
2018	农户(FY)	22.80±0.2b	3.11±0.03b	52.50±2.44c	0.21±0.03b
	高产高效(HYHE)	26.22±0.6a	3.31±0.09a	56.24±3.22b	0.22±0.05b
	超高产(SHY)	27.78±1.08a	3.23±0.50a	89.23±3.1a	0.34±0.07a

注:表中数据为“平均值±标准差”,相同年份同列数据后不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

2.3 不同产量层次群体净光合速率和叶面积指数差异分析

由图3可知,齐穗期和齐穗后20天叶片净光合速率均表现为超高产水平(SHY)>高产高效水平(HYHE)>农户水平(FY)>基础水平(CK);齐穗期超高产水平(SHY)、高产高效水平(HYHE)与农户水平(FY)差异显著,超高产水平(SHY)和高产高效水平(HYHE)较农户水平(FY)分别高出30.11%~39.55%和4.44%~28.60%;齐穗后20天超高产水平(SHY)和高产高效水平(HYHE)较农户水平(FY)分别高出7.51%~39.00%和3.39%~11.76%。两年试验结果一致。

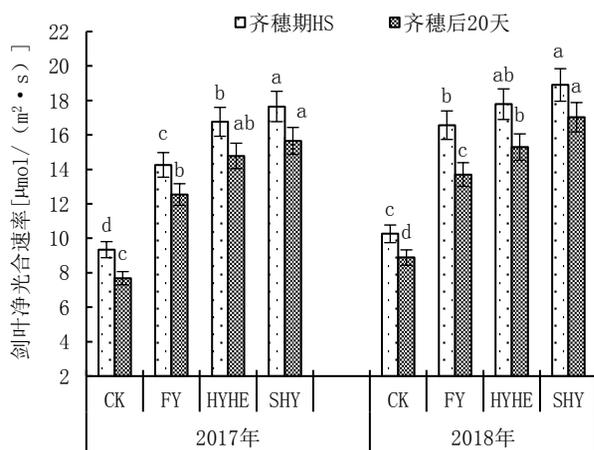


图3 不同产量层次群体净光合速率差异分析

群体生长率均高于农户水平,其两年平均分别为27.05 $g/(m^2 \cdot d)$ 和25.85 $g/(m^2 \cdot d)$,分别较农户水平23.31 $g/(m^2 \cdot d)$ 提高16.07%和10.90%;净同化率则表现为高产高效水平>超高产水平>农户水平,高产高效水平、超高产水平与农户水平间差异达显著水平;超高产水平在齐穗期至灌浆期的光合势显著高于高产高效水平和农户水平,分别提高45.42%和58.48%;超高产水平群体叶面积衰减率显著大于高产高效与农户水平,而高产高效水平与农户水平差异不显著,可能是因为超高产产量水平在齐穗期的叶面积指数较大,后期转化率相对较高。

由图4可知,不同产量水平的LAI均表现为超高产水平(SHY)>高产高效水平(HYHE)>农户水平(FY),且超高产水平(SHY)的LAI显著高于其余三个处理。在齐穗期,超高产产量水平(SHY)和高产高效水平(HYHE)的LAI分别较当地农户水平(FY)提高45.63%~58.45%和2.81%~9.51%;齐穗后20天,超高产水平(SHY)和高产高效水平(HYHE)的LAI分别较当地农户水平(FY)提高63.39%~140.96%和13.39%~25.64%。

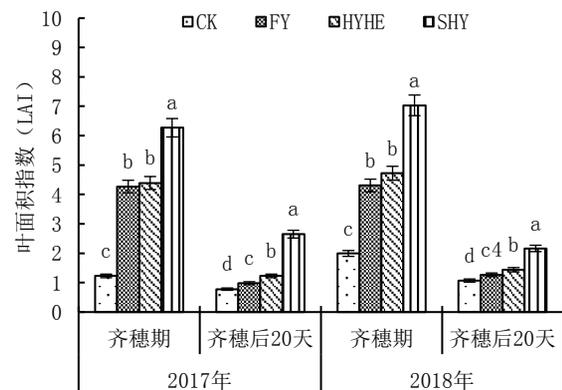


图4 不同产量层次群体叶面积指数差异分析

2.4 不同产量层次群体内微气象因子差异分析

图5表明,在产量层次群体中,齐穗期和齐穗后20天水稻群体冠层顶部的光照强度、 CO_2 浓度、温度均明显高于冠层中部和下部;而在不同

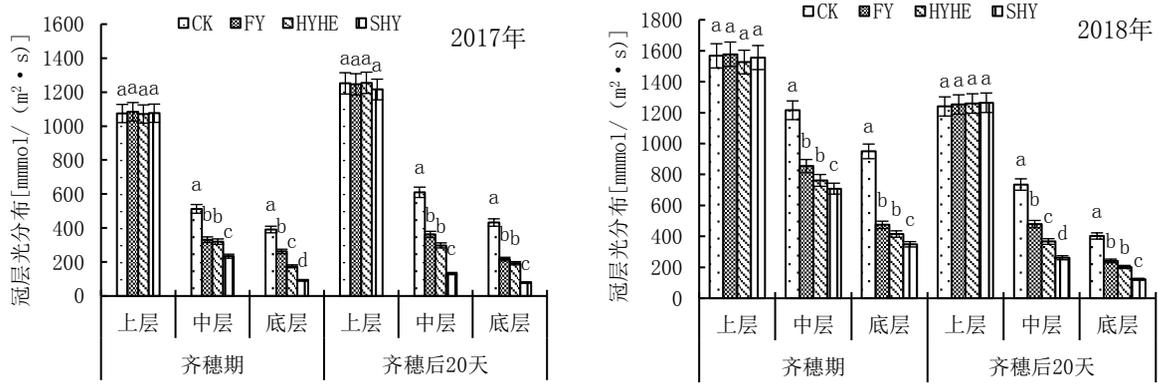


图5A 不同产量层次群体冠层光分布差异分析

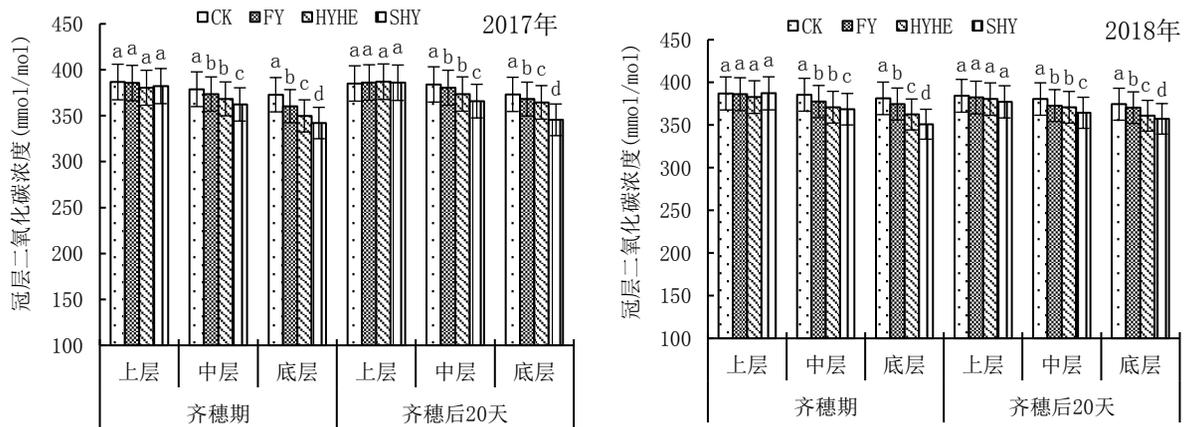


图5B 不同产量层次群体二氧化碳浓度差异分析

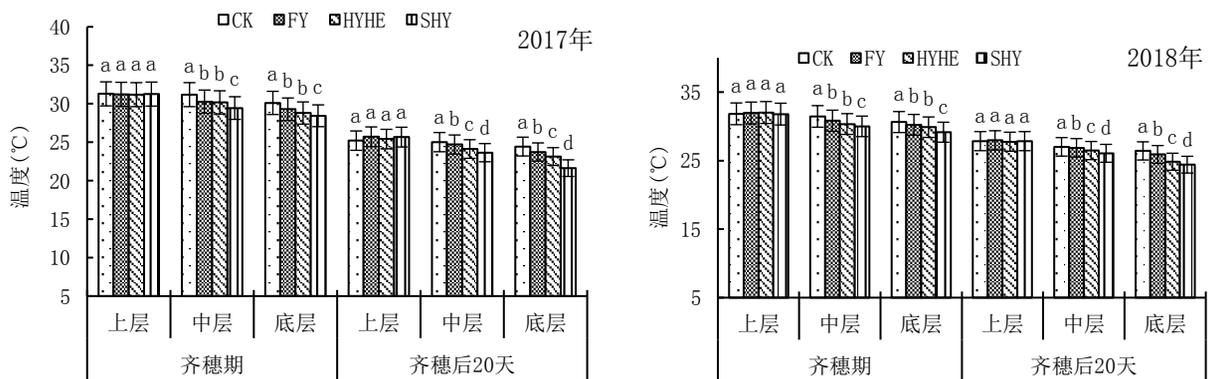


图5C 不同产量层次群体温度差异分析

产量层次群体中光照强度、内部 CO_2 浓度和温度等微气象因子有一定差异。不同产量层次群体内部(中部和下部)光照强度均表现为超高产水平(SHY) $<$ 高产高效水平(HYHE) $<$ 农户水平(FY)和基础水平(CK),超高产水平(SHY)与其他产量层次水平差异均达到了显著水平(图5A)。在水稻齐穗期和齐穗后20天超高产水平(SHY)群体的中、下部 CO_2 浓度均显著低于高产高效水平(HYHE)和农户水平(FY);同时,高产高效水平(HYHE)低于农户水平(FY),且在齐穗后20天达到了显著水平(图5B)。不同产量水平水稻群体的中、下部温度在齐穗期和齐穗后20日均表现为

超高产水平(SHY) $<$ 高产高效水平(HYHE) $<$ 农户水平(FY)和基础水平(CK),超高产水平(SHY)水稻群体的中、下部温度显著低于其他各处理,而高产高效水平(HYHE)与农户水平(FY)在水稻齐穗期差异达显著水平(图5C)。

3 讨论

气象灾害、水肥管理、耕作栽培技术、病虫害、土壤肥力、品种特性等是影响作物物质生产和产量形成的重要因素^[13-16]。松嫩平原苏打盐碱地稻区由于土壤离子胁迫、渗透胁迫、高pH以及土壤瘠薄、冷凉等影响,水稻移栽后秧苗生长缓

慢,有效分蘖数少,生长中期群体较小、叶面积不足,穗分化受抑制,生长后期根系和叶片早衰严重,物质生产不足,严重影响水稻产量形成^[17]。研究表明,在水稻产量层次差异中,光温潜在产量与高产高效产量之间的产量差,限制因子是高产高效栽培管理模式密度和水氮管理因素,高产高效产量与农户产量之间的产量差,限制因子是农户实际生产中水肥和密度^[1]。杨建昌等^[18]研究表明,通过水肥调控等抗逆栽培技术可提高水稻物质生产能力和产量形成。本研究发现,苏打盐碱地稻区超高产水平、高产高效水平与农户水平在生物产量和稻谷产量存在显著差异,2017年和2018年两年间均表现为超高产水平>高产高效水平>农户水平,而产量差异形成的关键因素为栽培技术的集成与优化。结合课题组前期研究发现^[19],高产高效栽培通过增施穗粒肥和调控基蘖肥与穗粒肥比例,减少无效分蘖,同时促进水稻群体籽粒灌浆,提高粒重;超高产水平在适当增加肥料施用量的基础上,进一步采取肥料分期调控和适量增施有机肥、微肥等的优化技术,提高群体生物学产量和物质转运能力,最终协同提高水稻产量。

水稻籽粒产量是群体条件下的产量,群体产量是水稻群体在一定的生育期内和一定的土地面积上所积累的生物学量,是群体内个体产量的总和。合理的群体结构能保证群体中水稻植株个体和群体合理发展,群体通风透光良好,光能利用充分,是水稻高产、超高产形成的基础^[12]。通过优化移栽密度、调控肥料施用量及其运筹方式,高效水分管理等栽培技术可提高水稻群体茎蘖动态、物质生产与转运能力,优化群体结构,进而提高稻谷产量^[20-21]。张洪程等^[22]通过超高产栽培构建了13.5 t/hm²超高产水稻群体结构,明确了超高产群体结构应为穗数适宜,群体叶面积指数、光合势和干物质积累特征为前小、中高、后强。叶面积、光合势、群体生长率、净同化率等都是表征群体光合生产能力的重要指标。吴文革等^[23]研究表明,提高水稻生物学产量的重要途径是通过提高群体的生长率,而超级杂交籼稻群体中后期表现的较强光合势是群体生长率提高的关键性原因。凌启鸿等^[24]也认为,产量的高低,最终决定于抽穗至成熟阶段的光合生产能力。从本试验结果来看,与苏打盐碱稻区当地农户水平相比,超高产水平和高产高效水平的群体生长率、净同化率、光合势、群体净光合速率和叶面积指数均显著提高。分析其原因,一是高产高效水平在施肥

总量不变的条件下,通过优化肥料运筹,栽培管理以及精准灌溉等技术,保证水稻具有适宜有效穗数^[19],改善群体质量,提高群体光合物质生产能力;二是超高产水平通过增加移栽密度提高群体生长量和单位面积主茎数,同时通过增大肥料用量,优化运筹方式并增施有机肥、硅肥以及磷酸二氢钾等管理措施,保证规模扩大的群体质量带来的对养分需求及由群体过大而带来的倒伏等风险。综上,群体生长率、净同化率、光合势、群体净光合速率以及叶面积指数不足是苏打盐碱稻区农户水平产量不高的限制因素。因此,构建合理群体结构、提高群体光合物质生产能力和持续性是提高松嫩平原苏打盐碱地稻区水稻总体产量的主要措施之一。

水稻群体是由冠层植被、光、温、水等小气候环境和其他生物相互作用所构成的有机整体。水稻高产高效与环境条件密切相关,合理密植、品种以及高效栽培管理措施可以构建良好的田间小气候效应,优良的群体小气候环境能促进水稻的生长发育和产量形成,提高群体资源利用效率^[25]。水稻群体内的光分布情况对水稻群体光合作用有着很大的影响^[26],而群体的温湿度差异也会对水稻的光合效率等有影响^[27-28]。本研究表明,超高产和高产高效水平通过优化栽培管理技术,显著提升群体冠层对光照强度的截获量,减少漏光损失,增加了水稻群体光能利用效率,这有利于水稻群体光合物质生产;尽管超高产水平群体内二氧化碳浓度低于高产高效和农户水平,但其浓度显著高于二氧化碳临界点。群体内温度对水稻光合效率具有显著影响,水稻齐穗期和灌浆期(齐穗后20天)适宜的温度分别为22~25℃和20~22℃,这有利于延长积累营养物质的时间,细胞老化慢,呼吸消耗少,提高稻谷产量并改善品质。本研究也表明,水稻齐穗期和齐穗后20天冠层温度呈超高产水平<高产高效水平<农户水平趋势,但超高产水平和高产高效水平在齐穗期和齐穗后20天的冠层中、下部的温度均在适宜温度范围。综上所述,群体冠层内光照强度分布也是苏打盐碱稻区农户产量提升的限制性因子之一,而如何优化群体结构,提高冠层对光能的截获量是提升苏打盐碱地稻区水稻总体产量的关键技术之一。

4 结 论

群体生长率、净同化率、光合势、群体净光合速率低下,叶面积指数以及群体冠层内光照截获

量不足是苏打盐碱稻区农户水平产量不高的限制性因子。因此,通过合理肥料运筹、增施有机肥和微肥,精确灌溉等优化管理技术,构建合理群体结构,提高群体叶面积、改善光合物质生产能力、提升群体光能截获量是缩小松嫩平原苏打盐碱地稻区不同产量层次差异的关键技术措施之一。

参考文献:

- [1] 王晓煜,杨晓光,孙爽,等.气候变化背景下东北三省主要粮食作物产量潜力及资源利用效率比较[J].应用生态学报,2015,26(10):3091-3102.
- [2] 李秀军,李取生,王志春,等.松嫩平原西部盐碱地特点及合理利用研究[J].农业现代化研究,2002(5):361-364.
- [3] 张巍,冯玉杰.松嫩平原盐碱土理化性质与生态恢复[J].土壤学报,2009,46(1):169-172.
- [4] 邓伟,裴善文,梁正伟.中国大安碱地生态试验站区域生态环境背景[M].北京:科学出版社,2006:46.
- [5] Chi C M, Zhao C W, Sun X J, et al. Reclamation of saline sodic soil properties and improvement of rice (*Oriza sativa* L.) growth and yield using desulfurized gypsum in the west of Songnen Plain[J]. Northeast China Geoderma, 2012, 187-188: 24-30.
- [6] Junbao Yu, Zhichun Wang, Franz X Meixner, et al. Biogeochemical Characterizations and Reclamation Strategies of Saline Sodic Soil in Northeastern China[J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2010, 38(11): 1010-1016.
- [7] 李彬,王志春,迟春明.吉林省大安市苏打盐碱土碱化参数与特征分析[J].生态与农村环境学报,2006(1):20-23.
- [8] 赵国臣,齐春艳,侯立刚,等.吉林省苏打盐碱地水稻生产历史进程与展望[J].沈阳农业大学学报,2012,43(6):673-680.
- [9] 刘兴土,佟连军.东北地区粮食生产潜力的分析与预测[J].地理科学,1998,18(6):501-509.
- [10] 刘兴土.松嫩平原退化土壤整治与农业发展[M].北京:科学出版社,2002:23-31.
- [11] 王纯枝,李良涛,陈健,等.作物产量差研究与展望[J].中国生态农业学报,2009,17(6):1283-1287.
- [12] 叶永印,张时龙,罗洪发,等.水稻生长中期群体结构对产量及构成因素的影响[J].安徽农业科学,2003,31(1):87-89.
- [13] Wang D L, Zhong X L, Li M S, et al. Impacts of main agro-meteorological disasters on China agriculture since the 1990s and the disaster mitigation strategies[J]. Journal of Catastrophology, 2006, 21(1): 18-22.
- [14] 秦基伟.小麦田间杂草发生原因及综合防除技术[J].农村实用技术,2007(2):28-29.
- [15] Bentsen N S, Felby C. Technical potentials of biomass for energy services from current agriculture and forestry in selected countries in Europe, the Americas and Asia[R]. University of Copenhagen: Forest & Landscape Working Papers, 2010.
- [16] Rockström J, Falkenmark M. Semiarid crop production from a hydrological perspective: Gap between potential and actual yields[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2000, 19(4): 319-346.
- [17] 张唤,黄立华,李洋洋,等.东北苏打盐碱地种稻研究与实践[J].土壤与作物,2016,5(3):191-197.
- [18] 杨建昌,朱庆森,曹显祖.水稻群体冠层结构与光合特性对产量形成作用的研究[J].中国农业科学,1992,25(4):7-14.
- [19] 王晓炜,冉成,张巴奇,等.苏打盐碱稻区不同栽培模式水稻产量构成及物质生产比较[J].华南农业大学学报,2019,40(6):45-50.
- [20] 陈温福,徐正进.水稻超高产育种理论与方法[M].北京:科学出版社,2008:9-10.
- [21] 金峰,王帅,邵玺文,等.株行距配置对吉林稻区水稻产量及群体微气象因子的影响[J].东北农业科学,2017,42(5):6-14.
- [22] 张洪程,吴桂成,李德剑,等.杂交粳稻13.5t hm⁻²超高产群体动态特征及形成机制的探讨[J].作物学报,2010,36(9):1547-1558.
- [23] 吴文革,张洪程,钱银飞,等.超级杂交中籼水稻物质生产特性分析[J].中国水稻科学,2007(3):287-293.
- [24] 凌启鸿,张洪程,丁艳锋.水稻丰产高效技术及理论[M].北京:中国农业出版社,2005:118-134.
- [25] 张邦琨,张璐,陈官文.水稻田间小气候特征与生产潜力关系研究[J].贵州气象,1998,22(5):13-25.
- [26] 葛中英,杨国涛,张杰,等.水稻直立穗突变体R499对群体小气候的影响[J].应用与环境生物学报,2015,21(6):1106-1111.
- [27] 徐正进,陈温福.中国北方粳型超级稻研究进展[J].中国农业科学,2016,49(2):239-250.
- [28] 王成瑗,张文香,杨银阁,等.水稻稀植、超稀植栽培高产生产模式及促控技术的研究 I.水稻早熟品种公顷 9000 公斤产量的营养生长模式[J].吉林农业科学,1996(1):24-30.

(责任编辑:刘洪霞)