

华南双季稻主栽品种的光能利用效率及聚类分析

黄农荣, 傅友强, 钟旭华, 梁开明, 潘俊峰, 刘彦卓, 胡香玉, 彭碧琳, 陈荣彬, 胡锐

引用本文:

黄农荣, 傅友强, 钟旭华, 等. 华南双季稻主栽品种的光能利用效率及聚类分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(11): 1714–1724.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190396>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同基因型水稻苗期氮营养特性差异及综合评价

Evaluation of nitrogen nutrition characteristics of different rice cultivars at seedling stage

中国生态农业学报. 2016, 24(10): 1347–1355 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160130>

安徽省沿江地区双季稻光热资源利用效率 变化特征及对气象产量的影响

Variation in characteristics of light and heat resource utilization efficiency of double-season rice and its impact on meteorological yield along the Yangtze River in Anhui Province

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(6): 929–940 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180865>

春播半冬性甘蓝型油菜光温因子与产量及农艺性状的典型相关分析

Canonical correlations of light and temperature with yield and agronomic traits of semi-winter rapeseed (*Brassica napus*L.) sowed in spring

中国生态农业学报. 2015(8): 987–993 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150210>

河北省滨海盐渍土地区油葵综合性状分析

Comprehensive analysis of oil sunflower traits in salinized coastal soils in Hebei Province

中国生态农业学报. 2018, 26(5): 693–702 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170736>

小麦水旱地品种回交二代农艺性状改良效应分析

Improvement effect of agronomic traits in the second backcrossing generation of dryland and irrigated wheat varieties

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(4): 563–571 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180168>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190396

黄农荣, 傅友强, 钟旭华, 梁开明, 潘俊峰, 刘彦卓, 胡香玉, 彭碧琳, 陈荣彬, 胡锐. 华南双季稻主栽品种的光能利用效率及聚类分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1714–1724

HUANG N R, FU Y Q, ZHONG X H, LIANG K M, PAN J F, LIU Y Z, HU X Y, PENG B L, CHEN R B, HU R. Radiation use efficiency and its classification of main varieties in double-cropping rice region of South China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(11): 1714–1724

华南双季稻主栽品种的光能利用效率及聚类分析*

黄农荣, 傅友强, 钟旭华, 梁开明, 潘俊峰, 刘彦卓,
胡香玉, 彭碧琳, 陈荣彬, 胡锐

(广东省农业科学院水稻研究所/广东省水稻育种新技术重点实验室 广州 510640)

摘要: 水稻品种的光能利用效率(RUE)是影响华南双季稻产量的重要因素之一。目前, 关于品种的 RUE 特性及其与农艺性状间关系的研究鲜有报道。为此, 本研究以华南双季稻区 36 个水稻主栽品种为供试材料, 探讨了不同品种的 RUE 及其与产量等主要农艺性状的关系, 并进行品种 RUE 类群的划分。结果表明, 水稻的 RUE 在品种间和季节间的差异均达极显著水平; 早、晚季的 RUE 均与稻谷产量、收获指数及千粒重等呈极显著正相关; 早季的 RUE 与生物量呈极显著正相关, 与生育期呈极显著负相关, 晚季的则相关不显著。主成分分析结果表明, 早季水稻品种特征主要由产量光能效率因子、穗粒因子、生育期粒重因子和结实率因子等 4 个主成分构成; 晚季则主要由产量光能效率因子、穗粒因子、生物量因子、生育期粒重因子和结实率因子等 5 个主成分构成。通过系统聚类分析将华南双季稻品种划分为低光效型、中光效型和高光效型 3 个类群。早季低光效型、中光效型和高光效型的品种数分别占供试品种数的 50.0%、38.9%和 11.1%; 晚季的依次分别为 27.8%、47.2%和 25.0%。其中, ‘Y 两优 143’ ‘特优 524’ ‘天优 3301’ 和 ‘特优 3301’ 等 4 个品种被划分为早季高光效型品种, ‘五优 308’ ‘天优 3618’ ‘五优 163’ ‘五优 376’ ‘天优 998’ ‘天优华占’ ‘天优 3301’ ‘广 8 优 188’ 和 ‘Y 两优 305’ 9 个品种被划分为晚季高光效型品种。本研究结果将对水稻种植区域的品种布局、高 RUE 品种的选育及其高效利用具有重要指导意义。

关键词: 水稻; 光能利用效率; 主成分分析; 聚类分析; 高光效型品种

中图分类号: S511.4+2; P422.3+1

文章编号: 2096-6237(2019)11-1714-11

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Radiation use efficiency and its classification of main varieties in double-cropping rice region of South China*

HUANG Nongrong, FU Youqiang, ZHONG Xuhua, LIANG Kaiming, PAN Junfeng, LIU Yanzhuo,
HU Xiangyu, PENG Bilin, CHEN Rongbin, HU Rui

(Rice Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences / Guangdong Key Laboratory of New Technology for Rice Breeding, Guangzhou 510640, China)

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0300108-5)、公益性行业(农业)科研专项(201503106)、广东省应用型科技研发专项资金项目(2015B020231002)、广东省自然科学基金项目(2017A030313110)和广东省水稻育种新技术重点实验室开放运行项目(2017B030314173)资助

黄农荣, 主要从事水稻高产高效理论与技术研究。E-mail: 13533385913@163.com

收稿日期: 2019-05-25 接受日期: 2019-07-22

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300108-5), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503106), the Science and Technology Program of Guangdong Province, China (2015B020231002), the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (2017A030313110), and the Guangdong Key Laboratory Program of New Technology for Rice Breeding of China (2017B030314173).

Corresponding author, HUANG Nongrong, E-mail: 13533385913@163.com

Received May 25, 2019; accepted Jul. 22, 2019

Abstract: Radiation use efficiency (RUE) of rice varieties is an important factor influencing grain yields of double-cropping rice in South China. However, there have been few studies of rice RUE and its relationship to agronomic traits. We conducted two-season field experiments to evaluate the RUE of 36 major rice varieties in a double-cropping rice region of South China. The relationships between RUE and the main agronomic traits (for example, yield) were explored, and the clustering analysis of tested varieties were classified. The findings revealed highly significant difference of RUE existed in different rice varieties and cropping seasons, respectively. In early and late seasons, RUEs were significantly and positively correlated with the grain yield, the harvest index, and the 1000-grain weight. In the early season, RUE was significantly positively correlated with the biomass and significantly negatively correlated with the growth period; however, in the late season, these correlations were not significant. Principal component analysis revealed the 12 agronomic traits of the tested varieties to be compressed to four independent comprehensive indexes, including the yield and light energy efficiency factor, the panicle and grain number factor, the growth period and grain weight factor, and the seed setting rate factor, in the early season; and to five independent comprehensive indexes, including the yield and light energy efficiency factor, the panicle and grain number factor, the biomass factor, the growth period and grain weight factor, and the seed setting rate factor, in the late season. Clustering analysis revealed that the varieties tested in this study could be divided into three groups: low RUE, medium RUE, and high RUE. Rice varieties numbers with low RUE, medium RUE, and high RUE accounted for 50.0%, 38.9%, and 11.1%, respectively, of the total numbers of tested varieties in the early season and for 27.8%, 47.2%, and 25.0%, respectively of the total numbers in the late season. ‘Yliangyou 143’ ‘Teyou 524’ ‘Tianyou3301’ and ‘Teyou3301’ were identified as high-RUE varieties in the early season, and ‘Wuyou308’ ‘Tianyou3618’ ‘Wuyou163’ ‘Wuyou376’ ‘Tianyou998’ ‘Tianyouhuazhan’ ‘Tianyou3301’ ‘guang8you188’ and ‘Yliangyou 305’ were identified as high-RUE varieties in the late season in South China. In our study, the classification of RUE types for rice varieties has been reported for the first time. The findings will have important guiding significance for the variety layout in growing areas and both the breeding of high-RUE varieties and their efficient utilization.

Keywords: Rice; Radiation use efficiency (RUE); Principal component analysis; Clustering analysis; High RUE varieties

水稻的光能利用效率(radiation use efficiency, RUE)是指水稻通过光合作用将太阳能固定为碳水化合物效率。水稻RUE研究可追溯至20世纪60年代初,其表示方法主要有两种:一种是以作物光合产物储存的能量占太阳总辐射能的百分比(%)表示,当产物为经济产量(如籽粒)时,则计算结果为经济产量的RUE^[1-2];另一种是将太阳能转化为干物质的效率定义为RUE(g·MJ⁻¹)^[3]。这两种方法都比较直观地反映了水稻的RUE。RUE越高,表明水稻将太阳能转化为碳水化合物和有机物的能力越强。

利用RUE估算水稻最高理论产量是最常用的研究方法。早在1963年,汤佩松院士就以水稻RUE为5%测算出京津地区最高理论产量为18.75 t·hm⁻²,竺可桢以水稻RUE3%测算出长江下游单季稻和华南稻区最高产量为21.24 t·hm⁻²,薛德榕按RUE 4.4%测算出广州地区早、晚季稻谷最高产量分别为16.30 t·hm⁻²和17.13 t·hm⁻²^[1]。戚昌翰等^[4]按RUE为3.8%~5.5%,估算南昌地区早、晚季的水稻产量潜力分别为16.95~24.61 t·hm⁻²和19.31~30.35 t·hm⁻²;而早、晚季RUE的实测值仅为0.67%~0.84%和0.54%~0.68%。吕军等^[2]比较了1976—1986年间浙江低丘红壤地区早、晚季水稻的RUE值均在0.5%~1.0%间变动;张旭^[5]比较了早籼稻品种‘广陆矮4号’‘珍珠矮’‘叶青伦56号’

等的RUE,其中,高光效品种‘叶青伦56号’3年的平均RUE仅为0.75%,其他品种的RUE均低于‘叶青伦56号’。随后的研究亦表明水稻品种间的RUE有显著差异^[6-8]。这些结果表明筛选高RUE水稻品种是行之有效的,且对提高水稻产量具有重要意义。上述研究表明,水稻RUE实测值与理论估值间差距大,但由此测算的理论产量为水稻高光效(高RUE)育种及其应用奠定了理论基础,亦阐明了高RUE品种对提高水稻产量的重要性。

华南地区属热带亚热带气候,光温资源充沛,适合双季稻种植。广东作为华南地区乃至全国的主要水稻种植区域,水稻品种审定数量多,类型丰富^[9]。在广东潮汕和兴梅等传统高产地区,栽培管理措施到位情况时,高产品种产量一般可达9.0~12.0 t·hm⁻²^[10],单产记录为12.5 t·hm⁻²^[11]。但截至目前,广东的平均水稻单产仅为5.80 t·hm⁻²左右,与产量记录差距甚远,也比全国均值低15%左右^[10,12-13],表明广东地区水稻增产潜力很大。但由于品种使用不当、水稻RUE低等原因限制了华南双季稻区单产的提高。目前,在群体水平揭示水稻的光能吸收利用规律、分析其特征特性对光能利用的影响,建立高光效种植技术体系研究已引起高度重视,成为国家重点研发计划等项目的重要研究内容。为此,本研究以华南

双季稻区 36 个主要栽培品种(简称主栽品种)为供试材料, 在高产高效栽培技术^[14]条件下探讨华南双季稻区水稻品种的 RUE 特性及其与产量构成等性状间的关系, 利用主成分和聚类分析方法对水稻品种的 RUE 进行类群划分, 旨在为水稻品种布局及提高 RUE 提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为 36 个水稻品种, 如表 1 所示。V1-V20 为常规稻品种、V21-V36 为杂交稻品种, 均为华南双季稻区近年的主栽品种。

表 1 供试品种的名称编号
Table 1 Name and code of rice varieties involved in the experiment

编号 Code	品种 Variety	编号 Code	品种 Variety	编号 Code	品种 Variety
V1	黄广油占 Huangguangyouzhan (HGYZ)	V13	粤标 5 号 Yuebiao No. 5 (YB5H)	V25	深优 9516 Shenyou 9516 (SY9516)
V2	粤农丝苗 Yuenongsimiao (YNSM)	V14	粤禾丝苗 Yuehesimiao (YHSM)	V26	五优 376 Wuyou 376 (WY376)
V3	特青 Teqing (TQ)	V15	粤晶丝苗 2 号 Yuejingsimiao No. 2 (YJSM2H)	V27	聚两优 751 Juliangyou 751 (JLY751)
V4	丰美占 Fengmeizhan (FMZ)	V16	合丰油占 Hefengyouzhan (HFYZ)	V28	特优 524 Teyou 524 (TY524)
V5	银晶软占 Yinjingruanzhan (YJRZ)	V17	粤金银占 Yuejinyinzhàn (YJYZ-1)	V29	天优 998 Tianyou 998 (TY998)
V6	粤香占 Yuexiangzhan (YXZ)	V18	粤美占 Yumeizhan (YMZ)	V30	丰优丝苗 Fengyousimiao (FYSM)
V7	玉香油占 Yuxiangyouzhan (YXYZ)	V19	粤金油占 Yuejinyouzhan (YJYZ-2)	V31	天优华占 Tianyouhuazhan (TYHZ)
V8	丰华占 Fenghuazhan (FHZ)	V20	合莉丝占 Helisizhan (HLSZ)	V32	天优 3301 Tianyou 3301 (TY3301-1)
V9	粤油丝苗 Yueyousimiao (YYSM)	V21	Y 两优 143 Yliangyou 143 (YLY143)	V33	广 8 优 188 Guang8you 188 (G8Y188)
V10	黄莉占 Huanglizhan (HLZ)	V22	五优 308 Wuyou 308 (WY308)	V34	广 8 优 2168 Guang8you 2168 (G8Y2168)
V11	广晶软占 Guangjingruanzhan (GJRZ)	V23	天优 3618 Tianyou 3618 (TY3618)	V35	特优 3301 Teyou 3301 (TY3301-2)
V12	合美占 Hemeizhan (HMZ)	V24	五优 163 Wuyou 163 (WY163)	V36	Y 两优 305 Yliangyou 305 (YLY305)

1.2 试验设计

试验于 2017 年早、晚季在广东省农业科学院水稻研究所白云试验基地(113°23'E, 23°17'N, 海拔 41.0 m)进行。试验田土为轻壤土, pH 5.95, 有机质 22.5 g·kg⁻¹, 全氮 1.29 g·kg⁻¹, 全磷 0.42 g·kg⁻¹, 全钾 8.43 g·kg⁻¹, 碱解氮 58.0 g·kg⁻¹, 有效磷 6.49 g·kg⁻¹, 速效钾 47.0 g·kg⁻¹。试验基地安装标准小型气象站 Techno-solutions(型号: CF1000, 中国北京天诺基业科技有限公司), 试验期间的光温和降雨动态如图 1 所示。早季的气温随生育进程逐渐升高, 平均降雨量 11.60 mm·d⁻¹, 平均太阳辐射量 11.57 MJ·m⁻²·d⁻¹。晚季苗期温度较高, 抽穗后昼夜温差大, 比早季的昼夜温差高 34.7%。降雨量平均 3.17 mm·d⁻¹, 平均太阳辐射量 17.38 MJ·m⁻²·d⁻¹。总体而言, 早、晚季生长期间的光照、气温和降雨等气象因素均无异常, 水稻生长正常。

早季于 3 月 8 日播种, 4 月 9 日移栽; 晚季于 7 月 21 日播种, 8 月 10 日移栽。试验采用随机区组排列, 3

次重复, 共 108 个小区; 栽植行株距为 25.0 cm×13.3 cm, 每小区种植 100 穴。田间管理按水稻“三控”施肥技术规程^[14]进行, 肥料施用方法: 氮、磷、钾肥用量按纯 N 150 kg·hm⁻²、P₂O₅ 45 kg·hm⁻²、K₂O 120 kg·hm⁻² 的标准施用, 氮肥按基肥、分蘖肥和穗肥共 3 次施用, 施用比例为 5 : 2 : 3, 基肥在移栽前一天施用, 分蘖肥在移栽后 15 d 施用, 穗肥在水稻品种发育至幼穗分化 期时施用; 磷肥全部作基肥, 移栽前一天施用; 钾肥一半作基肥, 另一半作穗肥; 肥料以尿素、过磷酸钙和氯化钾的形式投入。水分管理: 移栽后灌浅水促分蘖, 苗数达有效穗数的 90%时排水晒田, 进入穗分化始期时停止晒田, 此后保持浅水层至抽穗, 抽穗后田间保持干湿交替, 养根保叶以促籽粒灌浆, 收割前 7 d 左右断水。病虫害防治等措施按照高产栽培管理。

1.3 调查和测定项目

1.3.1 生育期记录

记录播种期、移栽期、分化始期、抽穗期和成熟期等发育时期, 用于计算各品种的发育进程。

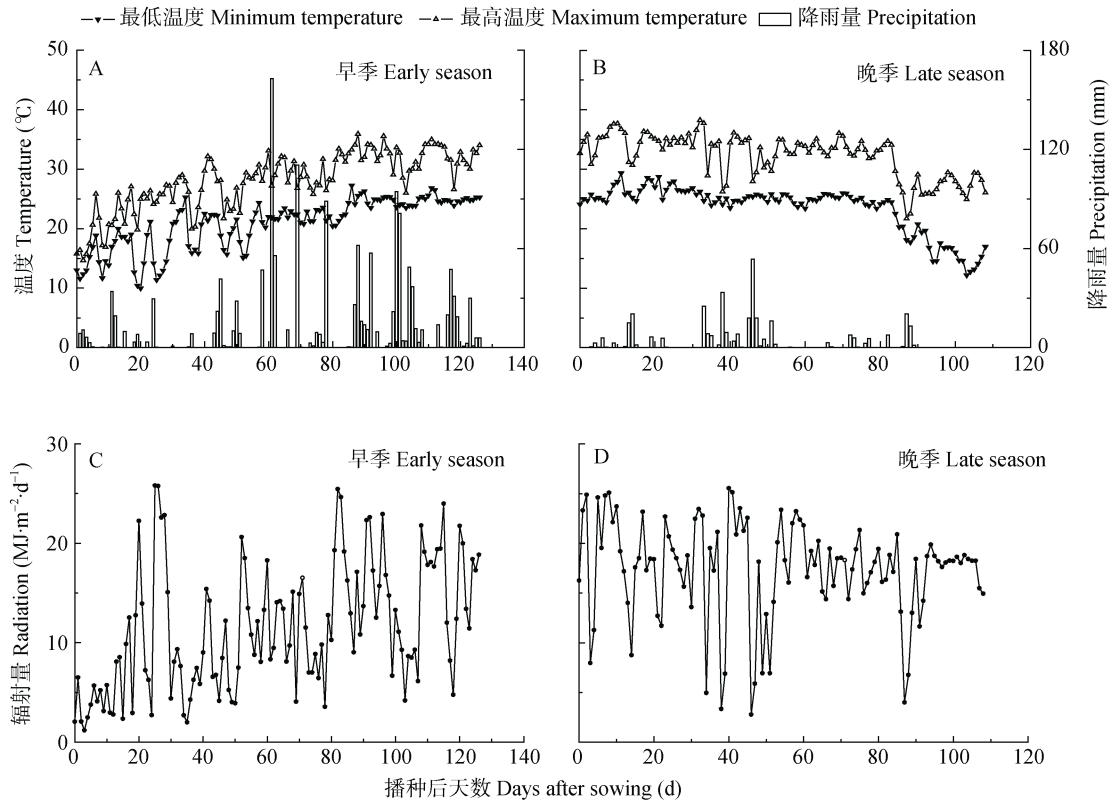


图 1 2017 年早、晚季水稻播种后的温度、降雨量和辐射量变化趋势

Fig. 1 Changing trends of temperature, rainfall and radiation after rice sowing in early and late seasons of 2017

1.3.2 产量及相关性状的测定

成熟期每个小区取 5 穴考种, 分穗和茎叶 2 部分, 分别测定有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒重、生物量和收获指数等指标, 所有材料于烘箱 75℃ 烘至恒重。稻谷产量的测定: 除了取样考种外, 其余单株全收测产, 收回的稻谷先后进行晾晒、风选、去杂质, 在 105℃ 烘至恒重, 以测量含水量, 以折算成含水量 14.0% 的籽粒重量计算稻谷产量。

1.3.3 光能利用效率(RUE)

指水稻在生长期对太阳总辐射量的利用效率, 公式为: $RUE(\%) = (\varepsilon \times Y / Q) \times 100$; 其中, ε 为物质能量转换系数, 指形成 1 kg 籽粒所需的能量 (即燃烧热), 其物质能量转换系数为 $15.5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$; Y 为单位面积的稻谷产量 (kg); Q 为单位面积的生育期内太阳总辐射量^[2,15], 即 $Q = \sum(R_i)$, R 为每天的太阳辐射量, 由田间小型气象站记录 (如图 1), i 表示播种到成熟的天数。

1.4 数据处理

试验数据经 Excel 2007 整理后, 利用 SPSS Statistics 21.0 软件进行方差分析、主成分分析和聚类分析。其中, 聚类分析是将数据标准化后, 按照欧氏距离 (Euclidean distance) 和离差平方和法 (Ward's method) 进行聚类。多重比较采用新复极差法 (LSR 法)。

2 结果与分析

2.1 供试品种的主要农艺性状

36 个供试水稻品种早、晚季的生育期、单位面积的稻谷产量、日产量、生物量、日生物量、有效穗数、每穗总粒数、每穗实粒数、千粒重、收获指数、结实率和 RUE 等 12 个性状如表 2 所示。从方差分析结果看出, 早季稻 12 个性状的 F 值为 2.11~85.06, 差异均达极显著水平。晚季稻生育期、生物量和日均生物量等 3 个性状的差异不显著, 其他 9 个性状的差异均达极显著水平。其中, 早季的生育期、生物量、稻谷产量、每穗粒数和 RUE 高于晚季, 分别高 12.50%、3.81%、8.25%、7.92% 和 40.97%; 而其日产量、日生物量、每穗实粒数、结实率和收获指数则比晚季的分别低 3.62%、7.69%、4.95%、11.62% 和 7.38%。

2.2 供试品种的 RUE 比较

如表 2 所示, 36 个供试品种的 RUE 在同一季节的差异均达极显著水平。早季的 RUE 为 0.552%~0.897%, 最大值比最小值高 62.5%; 晚季的 RUE 为 0.449%~0.610%, 最大值比最小值高 35.9% (图 2)。供试品种早、晚季间的平均 RUE 差异达极显著水平 ($t=19.744$, $t_{0.01}=2.724$), 早季比晚季高

表 2 36 个供试水稻品种早晚季 12 个农艺性状的表现
Table 2 Performance of 12 agronomic traits for 36 rice varieties in early and late seasons

性状 Trait	早季稻 Early season rice					晚季稻 Late season rice					早、晚季差值 <i>D</i> -value (%)
	平均 Mean	标准差 SD	最大值 Max	最小值 Min	<i>F</i> 值 <i>F</i> -value	平均 Mean	标准差 SD	最大值 Max	最小值 Min	<i>F</i> 值 <i>F</i> -value	
GD (d)	126.29	2.50	132.00	125.00	4.23**	112.33	3.14	116.00	108.00	0.78	12.42
GYH (t·hm ⁻²)	7.51	0.75	9.33	5.28	6.60**	6.94	0.63	8.69	5.03	2.05**	8.25
GYDH (t·hm ⁻² ·d ⁻¹)	59.49	5.94	72.93	42.25	6.10**	61.73	5.47	74.91	43.39	2.35**	-3.62
BH (t·hm ⁻²)	15.67	1.45	18.81	10.08	4.82**	15.10	1.08	18.15	12.42	1.13	3.81
BDH (t·hm ⁻² ·d ⁻¹)	124.04	11.25	147.35	80.64	4.01**	134.37	10.40	163.47	107.03	0.94	-7.69
EPSM (panicles·m ⁻²)	256.01	35.75	363.08	166.15	3.47**	257.98	32.33	363.08	184.62	3.47**	-0.76
SP	168.43	23.98	240.26	110.79	6.86**	156.07	15.94	200.32	114.70	4.84**	7.92
FSP	124.30	18.17	183.83	85.25	5.73**	130.78	16.23	179.08	94.90	4.94**	-4.95
TGW (g)	23.88	2.78	31.91	19.62	85.06**	23.59	2.94	31.29	18.47	158.10**	1.25
SSR (%)	74.03	5.91	88.75	57.93	2.11**	83.76	5.21	93.58	66.93	3.40**	-11.62
HI	0.48	0.04	0.59	0.39	8.14**	0.52	0.03	0.60	0.43	5.55**	-7.38
RUE (%)	0.774	0.079	0.897	0.552	5.65**	0.543	0.048	0.610	0.449	2.27**	42.55

**表示差异达极显著(1%)水平。GD: 生育期; GYH: 稻谷产量; GYDH: 日产量; BH: 生物量; BDH: 日均生物量; EPSM: 有效穗数; SP: 穗粒数; FSP: 每穗实粒数; TGW: 千粒重; SSR: 结实率; HI: 收获指数; RUE: 光能利用效率。 ** means significance at 1% level. GD: growth duration; GYH: grain yield per hectare; GYDH: grain yield per day per hectare; BH: biomass per hectare; BDH: biomass per day per hectare; EPSM: effective panicles per square meter; SP: spikelets per panicle; FSP: filled spikelets per panicle; TGW: 1 000-grain weight; SSR: seed setting rate; HI: harvest index; RUE: radiation utilization efficiency. *D*-value: difference value between the two seasons.

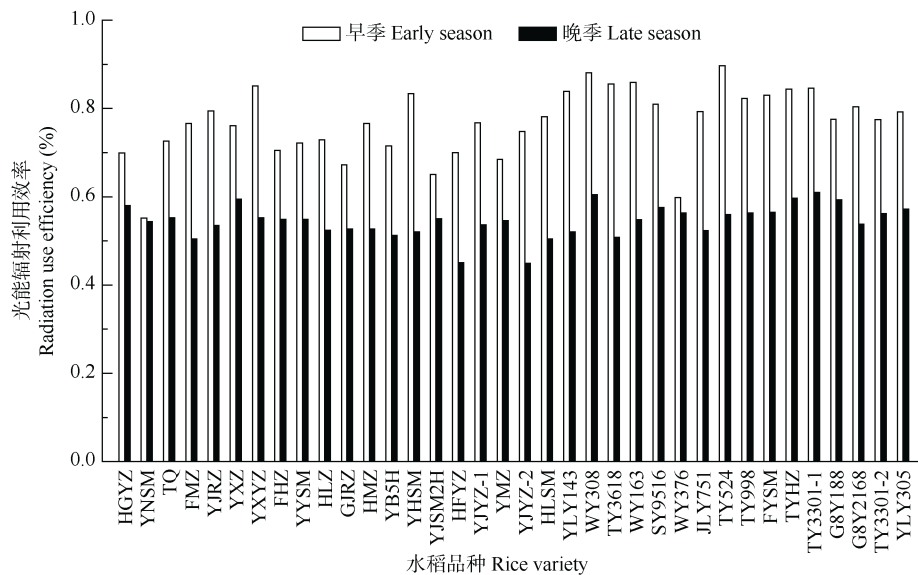


图 2 供试水稻品种早晚季的光能利用效率

Fig. 2 Radiation utilization efficiency of the tested 36 rice varieties in early and late seasons

40.97%; 早、晚两季品种间的 RUE 无显著相关 ($t=0.0864$, $r_{0.05}=0.1946$), 说明早季 RUE 高的品种, 晚季不一定高。

2.3 主成分分析

主成分分析是把多个指标简化为少数几个综合指标的一种统计方法, 根据各向量的绝对值将不同性状指标划分到不同主成分中, 同一指标在各因子中的最大绝对值即为其所属的主成分。本试验计算

了 36 个供试品种的 12 个农艺性状在早、晚季的特征向量和贡献率, 结果如表 3 所示。主成分分析方法设定: 当主成分的累计贡献率达 85%以上时, 即可认为它们具有总体代表性。由表 3 看出, 早季特征值的前 4 个主成分、晚季特征值的前 5 个主成分分别反映了总信息量的 86.51%和 86.97%。

2.3.1 早季稻的主成分

第 1 主成分的特征值 5.249, 贡献率 40.37%, 以

稻谷产量、日产量、生物量、日生物量、收获指数和 RUE 为主要指标, 特征向量值分别为 0.974、0.992、0.525、0.563、0.576 和 0.922, 主要与产量、RUE 有关, 可称作产量光能效率因子。第 2 主成分的特征值 3.316, 贡献率 25.51%, 以有效穗数、每穗的总粒数和实粒数为主要指标, 特征向量值分别为 -0.838、0.741 和 0.778, 可称作穗粒因子。第 3 主成分的特征值 1.472, 贡献率 11.32%, 以生育期和千粒重为主要指标, 特征向量值分别为 0.872 和 0.667。第 4 主成分的特征值 1.210, 贡献率 9.31%, 以结实率为主要指标, 特征向量值为 0.995。

2.3.2 晚季稻的主成分

第 1 主成分特征值 4.141, 贡献率 31.85%, 以稻谷产量、日产量和 RUE 为主要指标, 特征向量值分别为 0.931、0.943 和 0.933, 主要与产量和 RUE 有

关, 称作产量光能效率因子。第 2 主成分特征值 2.527, 贡献率 19.44%, 以收获指数、每穗的总粒数和实粒数为主要指标, 特征向量值分别为 0.964、0.863 和 0.701, 称为穗粒因子。第 3 主成分特征值 2.245, 贡献率 19.44%, 以生物量和日均生物量为主要指标, 特征向量值分别为 0.993 和 0.992。第 4 主成分特征值 1.472, 贡献率 11.32%, 以生育期、有效穗数和千粒重为主要指标, 特征向量值分别为 0.189、-0.883 和 0.861。第 5 主成分特征值 0.923, 贡献率 7.10%, 以结实率为主要指标, 特征向量值为 0.885。

上述结果表明, 早、晚季供试品种的主成分指标及其特征值存在差异。但第 1、第 2 主成分因子的指标相同, 均为产量光能效率因子和穗粒因子, 其累计贡献率分别占总信息量的 64.59%和 58.94%。因此, 在水稻育种中应重视这些指标的表现。

表 3 水稻主要农艺性状在早、晚季中的特征向量值及贡献率
Table 3 Eigenvectors and contribution rates of main agronomic traits of rice in early and late seasons

性状 Trait	早季稻 Early season rice				晚季稻 Late season rice				
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5
	Component 1	Component 2	Component 3	Component 4	Component 1	Component 2	Component 3	Component 4	Component 5
GD	-0.081	0.071	0.872	-0.048	-0.025	-0.038	-0.099	0.189	-0.129
GYH	0.974	0.073	0.155	0.016	0.931	-0.002	-0.053	0.122	-0.113
GYDH	0.992	0.059	-0.010	0.025	0.943	0.026	0.012	-0.012	-0.078
BH	0.525	-0.053	0.272	0.015	-0.030	0.003	0.993	-0.076	0.073
BDH	0.563	-0.072	0.077	0.029	-0.031	0.003	0.992	-0.076	0.076
EPSM	-0.064	-0.838	-0.292	-0.091	0.013	-0.223	0.103	-0.883	-0.252
SP	0.117	0.741	-0.190	-0.302	-0.015	0.964	-0.017	0.039	0.074
FSP	0.118	0.778	-0.230	0.167	-0.117	0.863	0.056	0.012	0.482
TGW	0.460	-0.097	0.667	-0.045	0.233	-0.144	-0.084	0.861	-0.379
SSR	-0.018	0.045	-0.074	0.995	-0.227	0.136	0.143	-0.027	0.885
HI	0.576	0.148	-0.106	-0.040	0.284	0.701	-0.028	0.062	-0.322
RUE	0.922	0.102	-0.099	-0.095	0.933	0.009	-0.040	0.115	-0.108
E	5.249	3.316	1.472	1.210	4.141	2.527	2.245	1.472	0.923
CR	40.37	25.51	11.32	9.31	31.85	19.44	17.27	11.32	7.10
TCR	40.37	65.88	77.20	86.51	31.85	51.29	68.55	79.87	86.97

GD: 生育期; GYH: 稻谷产量; GYDH: 日产量; BH: 生物量; BDH: 日均生物量; EPSM: 有效穗数; SP: 穗粒数; FSP: 每穗实粒数; TGW: 千粒重; SSR: 结实率; HI: 收获指数; RUE: 光能利用效率; E: 特征值; CR: 贡献率; TCR: 累计贡献率。GD: growth duration; GYH: grain yield per hectare; GYDH: grain yield per day per hectare; BH: biomass per hectare; BDH: biomass per day per hectare; EPSM: effective panicles per square meter; SP: grains per panicle; FSP: filled spikelets per panicle; TGW: 1 000-grain weight; SSR: seed setting rate; HI: harvest index; RUE: radiation utilization efficiency; E: eigen value; CR: contribution rate; TCR: total contribution rate.

2.4 聚类分析

聚类分析是在主成分分析结果基础上进行的一种分类方法, 同时兼顾了变量间的相关系数, 即当变量中存在相关系数很大的多个变量时, 选择 1 个变量参与聚类分析即可。因此, 本试验采用了生育

期、稻谷产量、日产量、收获指数、千粒重、结实率、总粒数、穗数、生物量等性状作为系统聚类分析的变量指标。首先将所有变量的数值进行标准化, 然后依据欧氏距离计算距离系数、使用 Ward 法进行聚类。结果表明(图 3), 早、晚季分别在欧氏距离

16.07 处和 17.86 处将供试水稻品种划分为 3 个类群, 分别为类群 I、类群 II 和类群 III。类群 I 的平均 RUE 和产量均最高, RUE 在早、晚季分别比类群 II 提高

14.30%和 11.48%(表 4)。因此, 根据产量光能利用率因子表现将这 3 个类群分别称为低光效型(类群 I)、中光效型(类群 II)和高光效型(类群 III)。

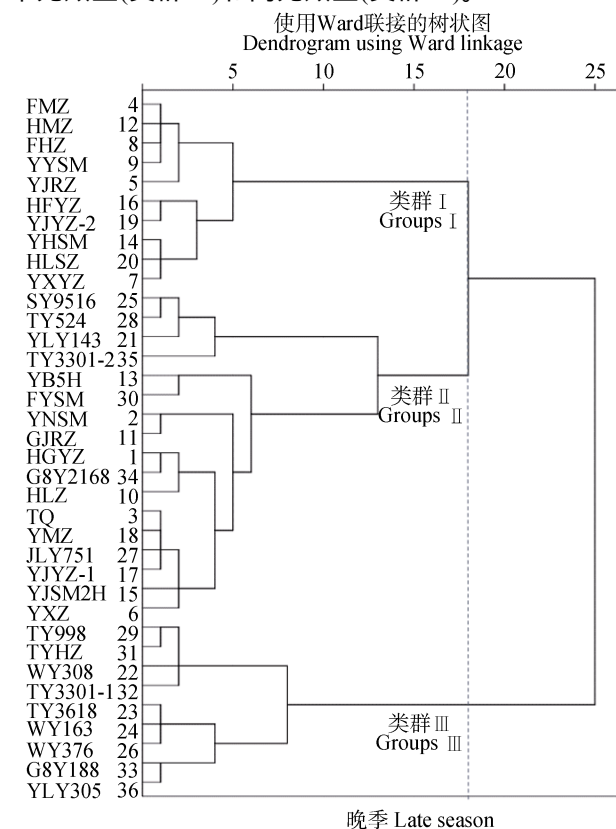
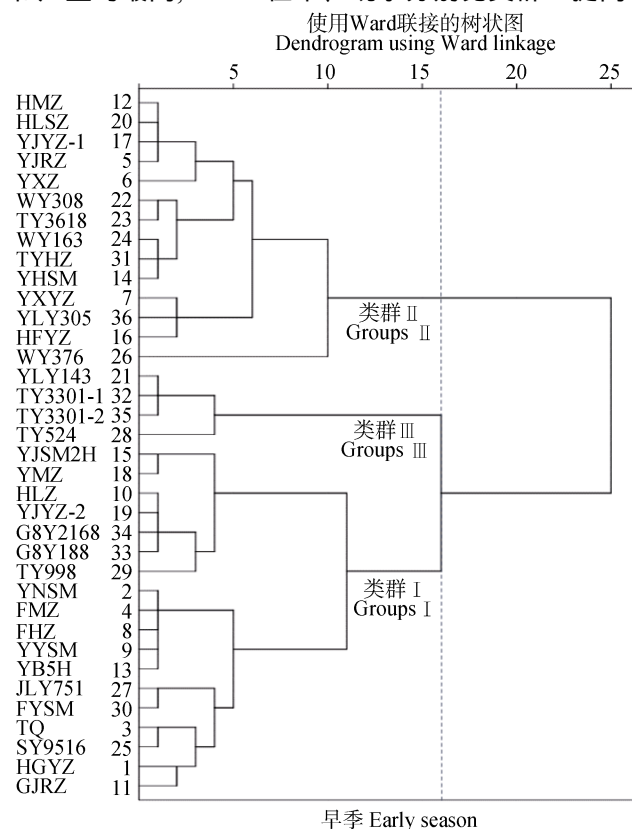


图 3 供试水稻品种在早、晚季的聚类分析图

Fig. 3 Cluster analysis dendrograms for the tested rice varieties in early and late seasons

2.5 不同 RUE 类群的主要农艺性状

早、晚季不同类群品种的主要农艺性状表现如表 4 所示。低光效型(类群 I)表现: 早、晚季的平均 RUE 和产量均最低。早季共 18 个品种, 其中, 常规稻 12 个、杂交稻 6 个(图 3), 平均结实率、每穗总粒数和收获指数等 3 个性状在 3 个类群中均最低, 而有效穗数则最多, 为 264.6 穗·m⁻²。晚季共 10 个品种, 均为常规稻(图 3)。表现为平均千粒重低、有效穗数最多(为 262.2 穗·m⁻²)、结实率最高(为 86.78%)。

中光效型(类群 II)表现: 早、晚季的平均产量和 RUE 在 3 个类群中均居中。早季共 14 个品种, 其中常规稻 8 个、杂交稻 6 个(图 3); 与其他 2 个类群比较, 这个类群的收获指数、每穗总粒数和结实率均最高, 分别为 0.507、186.4 粒·穗⁻¹和 75.10%, 而千粒重小、生物量低和生育期短。晚季共 17 个品种, 其中, 常规稻品种 10 个、杂交稻品种 7 个(图 3, 晚季), 其平均每穗总粒数在 3 个类群中最少, 千粒重最大, 其他性状居中(表 4)。

高光效型(类群 III)表现: 早、晚季均为杂交稻, 其平均 RUE、生物量和产量均最高。早季共 4 个品

种, 分别为: ‘Y 两优 143’ ‘特优 524’ ‘天优 3301’ 和 ‘特优 3301’(图 3), 千粒重均最高, 而有效穗数最少, 为 231.3 穗·m⁻²(表 3)。晚季共 9 个品种, 分别为: ‘五优 308’ ‘天优 3618’ ‘五优 163’ ‘五优 376’ ‘天优 998’ ‘天优华占’ ‘天优 3301’ ‘广 8 优 188’ 和 ‘Y 两优 305’(图 3); 收获指数最高, 为 0.558、每穗总粒数最多, 为 167.6 粒·穗⁻¹。

上述结果表明, 早季低光效型、中光效型和高光效型的品种数分别占供试品种数的 50.0%、38.9% 和 11.1%; 晚季这 3 种类型品种数的占比依次分别为 27.8%、47.2%和 25.0%。

结果亦表明, 早、晚季相同类群的品种数量不同、且相同品种只占少数(图 3)。其中, 早、晚季划分在类群 I 中的品种共有 28 个(次), 早、晚季均在此群中的相同品种仅有 4 个, 即‘丰美占’ ‘丰华占’ ‘粤油丝苗’ 和 ‘粤金油占’, 相同率 28.6%; 划分在类群 II 中的品种数共 31 个(次), 仅有‘粤香占’ 和 ‘粤金银占’ 2 个品种早、晚季均被归在此群, 相同率仅有 12.9%; 划分在类群 III 中的品种数共 13 个(次), 只有‘天优 3301’ 早、晚季均划在此类群, 相同率 15.4%。

表 4 不同水稻品种类群的主要农艺性状均值
Table 4 Average values of main agronomic traits of the tested rice varieties of different groups

季别 Season	类群 Group	生育期 Growth duration (d)	生物量 Biomass (t·hm ⁻²)	产量 Grain yield (t·hm ⁻²)	收获指数 Harvest index	千粒重 1000-grain weight (g)	结实率 Seed setting rate (%)	穗粒数 Grains per panicle	有效穗数 Effective panicles (panicles·m ⁻²)	光能利用效率 Radiation utilization efficiency (%)
早季 Early season	I	126.3	15.84	7.23	0.457	23.91	72.85	157.0	264.6	0.734
		125.6	15.05	7.61	0.507	22.33	75.10	186.4	253.0	0.792
		128.8	17.26	8.44	0.491	29.87	74.89	159.4	231.3	0.839
	全部 Total	126.3	15.67	7.50	0.480	23.88	74.03	168.4	256.0	0.772
晚季 Late season	I	111.9	14.96	6.56	0.505	20.79	86.78	161.2	262.2	0.514
		112.7	14.97	7.01	0.505	24.56	83.13	146.4	257.4	0.547
		111.9	15.44	7.32	0.558	24.41	82.41	167.6	257.0	0.573
	全部 Total	112.4	15.08	6.94	0.518	23.59	83.71	156.1	257.9	0.542

类群 I、II 和 III 分别为低光效、中光效和高光效类群。Group I, II and III are rice varieties groups with low, medium and high radiation utilization efficiency, respectively.

2.6 各类群品种 RUE 与主要农艺性状间的相关性分析

对早、晚季全部供试品种及 3 个类群品种的 RUE 与成熟期主要农艺性状进行了相关性分析(表 5), 结果表明, 全部供试品种的 RUE 值与产量、收获指数及千粒重在早、晚季均呈极显著正相关, 在早季与生物量呈极显著正相关、与全生育期呈极显著负相关。早、晚季 3 个类群的 RUE 均与稻谷产量呈极显著正

相关, 与结实率、总粒数和穗数均无相关; 而与其他性状的相关性则因类群的不同而异。早季类群的 RUE 与生物量、收获指数和结实率呈极显著正相关, 与全生育期呈极显著负相关; 类群 II 的 RUE 与收获指数呈正相关。晚季类群 I 的 RUE 与收获指数呈显著正相关, 与全生育期呈显著负相关; 类群 II 的 RUE 与全生育期呈显著正相关。

表 5 各类群水稻品种的 RUE 与主要农艺性状间的相关系数
Table 5 Correlation coefficients between radiation utilization efficiency (RUE) and main agronomic traits of rice varieties in different groups

季别 Season	类群 Group	生育期 Total duration	生物量 Biomass	稻谷产量 Grain yield	收获指数 Harvest index	千粒重 1 000-grain weight	结实率 Seed setting rate	总粒数 Spikelets per panicle	有效穗数 Effective panicles
早季 Early season	I	-0.543 5**	0.563 8**	0.931 2**	0.529 7**	0.447 1**	-0.161 6	0.068 2	0.049 1
		-0.209 0	0.757 0	0.972 5**	0.234 3	0.327 6	0.187 0	-0.127 0	0.071 6
		-0.512 4	0.520 7	0.871 2**	0.573 6*	-0.021 5	0.218 8	-0.195 0	-0.284 0
	全部 Total	-0.268 3**	0.584 2**	0.941 6**	0.464 9**	0.339 9**	0.097 6	0.088 8	-0.083 5
晚季 Late season	I	-0.357 1*	-0.118 3	0.985 3**	0.420 5*	-0.176 5	0.268 0	-0.034 3	0.107 6
		0.402 0**	0.159 6	0.980 6**	0.119 4	0.076 6	-0.032 6	0.118 8	0.021 4
		0.113 4	0.215 9	0.986 5**	-0.221 7	0.181 8	-0.138 9	0.018 7	0.032 7
	全部 Total	0.061 2	0.154 2	0.985 0**	0.281 1**	0.252 4**	-0.136 3	0.050 1	0.015 6

类群 I、II 和 III 分别为低光效、中光效和高光效类群。**和*分别表示在 0.01 和 0.05 水平下显著相关。Group I, II and III are rice varieties groups with low, medium and high radiation utilization efficiency, respectively. ** and * mean significant correlation at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

3 讨论

本研究结果表明, 华南双季稻不论是早季还是晚季种植, 品种间 RUE 的差异均达极显著水平; 平均 RUE 在早季显著高于晚季, 说明在华南双季稻区早季种植更有利于获得高 RUE。供试品种早、晚季间的 RUE 没有显著相关, 说明水稻品种 RUE 受种植季节的生态条件影响较大, 导致同一品种 RUE 在早、晚季表现不同。而利用水稻主要农艺性状与 RUE

进行的相关分析结果表明, 水稻品种在早、晚季的 RUE 与稻谷产量、收获指数和千粒重均呈极显著正相关; 与早季的生物量呈极显著正相关、与生育期呈极显著负相关; 在晚季则无相关性。说明 RUE 高的品种, 其收获指数高、千粒重大, 产量高。在早季, 生育期长短也影响水稻品种 RUE 的高低, 在相同产量情况下, 短生育期品种的 RUE 高于长生育期的品种。因此, 在同等产量目标下, 早季选用品种时应考虑生育期长短对 RUE 的影响, 建议选择生育期适

中、RUE高的水稻品种。李迪秦等^[7]比较了超级杂交稻、普通杂交稻和常规稻的RUE, 其中, 超级杂交稻的RUE最大, 且与播种期关系密切; 认为RUE是衡量超级稻超高产特征的一个生理指标, 但只在播插期适宜、群体大小适宜时方可反映产量特征。Zhang等^[8]的研究表明, 超级杂交稻品种的RUE与常规稻相当, 而高于普通杂交稻品种。这些研究与本试验结果相一致。Kiniry等^[16]报道4个美国水稻品种的产量差异与RUE无关, 但与消光系数(K)的关系密切, 最高RUE品种的 K 值最小。Yamamoto等^[17]报道日本高产水稻品种的RUE差异不大。上述研究结果存在差异, 可能与各个试验期间的光温生态条件、品种类型及栽培措施等不同有关。关于影响水稻RUE的农艺性状及环境因素研究主要在播种期^[18-19]、行向与栽植密度^[20-21]、肥水管理^[22-23]、株型、穗型和透光率^[23-24]、叶形与叶面积^[19,22]和分蘖角度^[25]等方面; 且株型、叶形和透光率是衡量水稻RUE的重要指标^[22,24-25]。上述研究主要探讨了在特定生育期某些农艺性状对RUE的影响。但从生理生态学角度、以全生育期为研究对象探讨农艺性状(如株型、叶形等)的动态变化对RUE影响的研究较少, 缺乏解析水稻光能利用效率特性的量化指标, 使品种RUE受种植季节等因素影响的机制不清楚。因此, 加强这方面研究可为水稻品种的光温资源高效利用提供理论依据, 为水稻高产高效生产提供技术支撑。

在农业等领域的多指标(变量)研究中, 由于变量个数太多、且彼此间存在一定相关性, 使所观测的指标数值有一定的重叠, 不利于对试验结果的解析。主成分分析通过降维的方法, 将多个主要农艺指标转化为较少的几个主成分, 并尽可能地反映原变量的信息量、且主成分因子之间是相对独立的指标体系, 其数值直观, 易于分析, 是农业科研常用的分析方法之一^[26-32]。本研究利用主成分分析法对华南双季稻 36 个主栽品种的 12 个农艺性状进行了降维评价, 结果表明, 水稻品种的 12 个农艺性状在早季可由 4 个主成分因子描述, 晚季由 5 个主成分因子描述。早季 4 个主成分分别为产量光能效率因子、穗粒因子、生育期粒重因子和结实率因子; 晚季 5 个主成分分别为产量光能效率因子、穗粒因子、生物量因子、生育期粒重因子和结实率因子。其中, 早、晚季第 1、2 主成分的指标相同, 均为产量光能效率因子和穗粒因子, 而第 3、4、5 主成分的指标差异较大。众所周知, 水稻品种的田间表现是由品种特性、种植地区的光温因素、栽培措施等综合作用的结果^[33]。本试验条件下, 早、晚季的光温条件

不同, 早季主要表现气温由低逐渐升高, 成熟期达最高, 日照由短至长, 而晚季则呈相反趋势, 气温由高逐渐降低, 日照由长至短。由此推测, 在栽培措施相同情况下, 水稻品种早、晚季主成分因子不同主要是它们对外部的光温反应不同, 导致植株体内碳氮代谢差异所致。本研究结果表明, 产量光能效率因子和穗粒因子是华南双季稻研究与生产重点关注的重要农艺指标。

本研究以主成分结果为基础, 利用系统聚类法首次将华南双季稻品种的 RUE 划分为低光效型、中光效型和高光效型等 3 个类群。在本试验条件下, 低光效型、中光效型和高光效型品种数在早季分别占供试品种数的 50.0%、38.9%和 11.1%, 在晚季的占比依次分别为 27.8%、47.2%和 25.0%。其中, 筛选出在早季表现 RUE 高的品种 4 个: ‘Y 两优 143’ ‘特优 524’ ‘天优 3301’和‘特优 3301’; 晚季表现 RUE 高的品种 9 个: ‘五优 308’ ‘天优 3618’ ‘五优 163’ ‘五优 376’ ‘天优 998’ ‘天优华占’ ‘天优 3301’ ‘广 8 优 188’和‘Y 两优 305’。本试验水稻品种 RUE 类型的划分结果与本稻区的品种种植习惯有很大关系, 杂交稻和常规稻品种在广东省水稻种植面积中各占半壁江山, 各县市主推的常规稻品种以优质为主, 其米优而产量较低; 主推的杂交稻品种以(超)高产为主。本研究结果表明, 稻谷产量与 RUE 关系极其密切, 因此, 筛选到的高 RUE 品种多为(超)高产的杂交稻品种, 而中、低 RUE 品种多为常规稻品种。在这 3 个类群中, 早、晚季同一类群的品种数量不同、且相同品种只占少数, 也即表明, 在早、晚季种植时 RUE 表现差异大的品种占多数。目前在华南双季稻区, 早、晚季品种的应用比较随意, 很多地方推广应用的品种以早、晚两季兼用型为主, 极少考虑 RUE 对产量的影响, 成为了华南双季稻区如广东等省区水稻产量不高不稳^[12-13]的重要限制因素之一。这与目前关于水稻 RUE 的分类未见研究报道有很大关系。本研究结果可为水稻种植区域(特别是华南双季稻区)的水稻生产进行品种的合理有效布局提供理论依据。

4 结论

本研究结果表明, 水稻 RUE 在品种间和季节间的差异均达极显著水平; 早、晚季的 RUE 均与稻谷产量、收获指数及千粒重等呈极显著正相关; 早季的 RUE 与生物量呈极显著正相关、与生育期呈极显著负相关; 在晚季则无显著相关。主成分分析结果表明, 早季水稻品种特征主要由产量光能效率因

子、穗粒因子、生育期粒重因子和结实率因子等 4 个主成分构成; 晚季则由产量光能效率因子、穗粒因子、生物量因子、生育期粒重因子和结实率因子等 5 个主成分构成。聚类分析结果将华南双季稻品种初步划分为低光效型、中光效型和高光效型 3 个类群; 早季这 3 种类型的品种数依次分别占供试品种数的 50.0%、38.9%和 11.1%; 晚季则分别占 27.8%、47.2%和 25.0%。其中, 早季高产高光效型品种为: ‘Y 两优 143’ ‘特优 524’ ‘天优 3301’和‘特优 3301’等 4 个; 晚季高产高光效型品种为: ‘五优 308’ ‘天优 3618’ ‘五优 163’ ‘五优 376’ ‘天优 998’ ‘天优华占’ ‘天优 3301’ ‘广 8 优 188’和‘Y 两优 305’等 9 个。本研究结果对水稻种植区域的品种布局、高 RUE 品种选育及其高产高效利用具有重要指导意义。

参考文献 References

- [1] 薛德榕. 水稻光能利用与高产潜力[J]. 广东农业科学, 1977, (3): 27-28
XUE D R. Radiation use efficiency and high yield potential of rice[J]. Journal of Guangdong Agricultural Sciences, 1977, (3): 27-28
- [2] 吕军, 俞劲炎, 张连佳. 低丘红壤地区粮食作物光能利用率和农田能流分析[J]. 生态学杂志, 1990, 9(8): 11-15
LYU J, YU J Y, ZHANG L J. Photo-utilization efficiency of grain crop and field energy-flow analysis in low-hilly red soil region[J]. Chinese Journal of Ecology, 1990, 9(8): 11-15
- [3] MONTEITH J L, MOSS C J. Climate and the efficiency of crop production in Britain[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 1977, 281(980): 277-294
- [4] 戚昌翰, 石庆华. 江西的太阳辐射资源与水稻生产潜力[J]. 江西农业大学学报, 1987, (S1): 15-17
QI C H, SHI Q H. Solar radiation resources and potential for rice production of Jiangxi Province[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 1987, (S1): 15-17
- [5] 张旭. 水稻生态育种[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991: 131-132
ZHANG X. Ecological breeding of rice[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1991: 131-132
- [6] 陈友订, 黄秋妹, 黄农荣. 几个两系法高产杂交组合的光能利用率初探[J]. 杂交水稻, 2000, 15(5): 37-40
CHEN Y D, HUANG Q M, HUANG N R. Preliminary studies on utilization ratio of solar energy for several high-yielding two-line hybrid rice combinations[J]. Hybrid Rice, 2000, 15(5): 37-40
- [7] 李迪秦, 唐启源, 秦建权, 等. 水稻光能辐射利用率与产量的关系[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2011, 37(1): 1-6
LI D Q, TANG Q Y, QIN J Q, et al. Relationship between solar radiation use efficiency and rice grain yield[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2011, 37(1): 1-6
- [8] ZHANG Y B, TANG Q Y, ZOU Y B, et al. Yield potential and radiation use efficiency of “super” hybrid rice grown under subtropical conditions[J]. Field Crops Research, 2009, 114(1): 91-98
- [9] 吕凤, 杨帆, 范滔, 等. 1977—2018 年水稻品种审定数据分析[J]. 中国种业, 2019, (2): 29-40
LYU F, YANG F, FAN T, et al. Data analysis for approved rice varieties during 1977-2018[J]. China Seed Industry, 2019, (2): 29-40
- [10] 黄湛. 广东水稻的增产潜力[J]. 华南农业大学学报, 1996, 17(4): 46-51
HUANG Z. Yield potential of rice in Guangdong[J]. Journal of South China Agricultural University, 1996, 17(4): 46-51
- [11] 周继勇, 林绿, 刘夏平, 等. ‘湘两优 900’在华南作双季超级稻高产攻关中的种植表现及高产栽培技术[J]. 杂交水稻, 2017, 32(6): 34-36
ZHOU J Y, LIN L, LIU X P, et al. Performance and high-yielding cultural techniques of ‘Xiangliangyou 900’ grown as double-cropping super rice in South China[J]. Hybrid Rice, 2017, 32(6): 34-36
- [12] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 1996[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 292-296
Editorial Committee of China Agricultural Yearbook. China Agricultural Yearbook 1996[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1996: 292-296
- [13] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2017[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017: 293-297
Editorial Committee of China Agricultural Yearbook. China Agricultural Yearbook 2017[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2017: 293-297
- [14] 钟旭华, 黄农荣, 郑海波, 等. 水稻“三控”施肥技术规程[J]. 广东农业科学, 2007, (5): 13-15
ZHONG X H, HUANG N R, ZHENG H B, et al. Specification for the “Three Controls” nutrient management technology for irrigated rice[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2007, (5): 13-15
- [15] 农业技术经济手册编委会. 农业技术经济手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 1983: 815-824
《Technical and Economic Agricultural Manual》editorial board. Technical and Economic Agricultural Manual[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1983: 815-824
- [16] KINIRY R J, MCCAULEY G, XIE Y, et al. Rice parameters describing crop performance of four U.S. cultivars[J]. Agronomy Journal, 2001, 93(6): 1354-1361
- [17] YAMAMOTO H, LWAYA K, TAKASU Y. Comparisons of efficiency of solar energy utilization and efficiency of solar energy conversion in high-yielding rice canopies[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2003, 59(1): 1-11
- [18] 谢光辉, 苏宝林, 石磊, 等. 湘西武陵山区单季稻生长发育及物质生产的研究: 不同海拔播期对杂交稻物质生产的影响[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(1): 89-94
XIE G H, SU B L, SHI L, et al. A Study on growth and dry matter production of rice in Wuling Mountain area: Effects of sowing date on dry matter production of hybrid

- rice[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1996, 1(1): 89–94
- [19] 王建林, 徐正进. 穗型和行距对水稻冠层受光态势的影响[J]. *中国水稻科学*, 2005, 19(5): 422–426
WANG J L, XU Z J. Effects of panicle type and row spacing on light distribution of rice canopy[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19(5): 422–426
- [20] 冯永祥, 徐正进, 姚占军. 行向对不同穗型水稻群体微气象特性影响的研究——行向对群体内太阳直接辐射影响的理论分析[J]. *中国农业气象*, 2002, 23(3): 18–21
FENG Y X, XU Z J, YAO Z J. Studies on effects of micro-meteorological characters of row directions in rice populations with different panicle types — I. theoretical analyses of effects of row directions on immediate radiation of sun in the rice populations[J]. *Agricultural Meteorology*, 2002, 23(3): 18–21
- [21] 邹应斌, 周上游, 唐启源. 中国超级杂交水稻超高产栽培研究的现状与展望[J]. *中国农业科技导报*, 2003, 5(1): 31–35
ZOU Y B, ZHOU S Y, TANG Q Y. Status and outlook of high yielding cultivation researches on China super hybrid rice[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2003, 5(J): 31–35
- [22] 杨建昌, 陈忠辉, 杜永. 水稻超高产群体特征及其栽培技术[J]. *中国农业科技导报*, 2004, 6(4): 37–41
YANG J C, CHEN Z H, DU Y. Characteristics of super high-yielding population of rice and cultivation techniques[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2004, 6(4): 37–41
- [23] CHEN W F, XU Z J, ZHANG L B, et al. Effects of different panicle type on canopy properties light distribution and dry matter production of rice population[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1995, 21(1): 83–89
- [24] 吕川根, 邹江石. 两个超级杂交稻与汕优 63 光合株型的比较分析[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(6): 633–639
LYU C G, ZOU J S. Comparative analysis on plant type of two super hybrid rice and Shanyou 63[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(6): 633–639
- [25] 康文启, 欧阳由男, 章善庆, 等. 分蘖角度动态型水稻的形态特征及生长特性分析[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(4): 372–378
KANG W Q, OUYANG Y N, ZHANG S Q, et al. Morphological and ontogenic characterization of rice with dynamic tiller angle[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(4): 372–378
- [26] 刘忠祥, 寇思荣, 何海军, 等. 155 份玉米自交系的类群鉴定和主成分分析[J]. *河南农业科学*, 2012, 41(6): 19–23
LIU Z X, KOU S R, HE H J, et al. Principal component analysis and group identification of 155 maize inbred lines[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2012, 41(6): 19–23
- [27] 游书梅, 曹应江, 郑家奎, 等. 73 份亚洲水稻恢复系农艺性状的主成分与聚类分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2015, 16(2): 250–256
YOU S M, CAO Y J, ZHENG J K, et al. Principal component and cluster analysis for agronomic traits of 73 rice restorers lines in Asia[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(2): 250–256
- [28] 李春花, 王艳青, 卢文洁, 等. 云南薏苡种质资源农艺性状的主成分和聚类分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2015, 16(2): 277–281
LI C H, WANG Y Q, LU W J, et al. The principal component and cluster analysis of agronomic traits of coix germplasm resources in Yunnan[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(2): 277–281
- [29] 吴海燕, 金荣德, 范作伟, 等. 基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 325–334
WU H Y, JIN R D, FAN Z W, et al. Assessment of fertility quality of black soil based on principal component and cluster analysis[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 325–334
- [30] 陈洪凡, 兰波, 梁玉勇, 等. 应用主成分分析法评价稻田生态系统稳定性[J]. *应用昆虫学报*, 2017, 54(5): 876–884
CHEN H F, LAN B, LIANG Y Y, et al. Application of principal component analysis to evaluation of the stability of rice paddy ecosystems[J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2017, 54(5): 876–884
- [31] 崔静宇, 关小康, 杨明达, 等. 基于主成分分析的玉米萌发期抗旱性综合评定[J/OL]. *玉米科学*, (2018-10-26). <https://www.cnki.net/KCMS/detail/22.1201.S.20181024.1344.004.html>
CUI J Y, GUAN X K, YANG M D, et al. Integrative evaluation of maize drought tolerance in germination period by PCA method[J/OL]. *Journal of Maize Sciences (Network Start)*, (2018-10-26). <https://www.cnki.net/KCMS/detail/22.1201.S.20181024.1344.004.html>
- [32] 袁东升, 王晓敏, 赵宇飞, 等. 100 份番茄种质资源表型性状的遗传多样性分析[J]. *西北农业学报*, 2019, 28(4): 594–601
YUAN D S, WANG X M, ZHAO Y F, et al. Genetic diversity analysis of 100 tomato germplasm resources based on phenotypic traits[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(4): 594–601
- [33] 浙江农业大学. 实用水稻栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981: 122–162
Zhejiang Agricultural University. *Practical Rice Cultivation*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1981: 122–162