

每个重复区取3点(每点1 m²)，对照取样设置在非缺穴处，而缺穴处取样要确保缺穴处所有邻近穴在取样范围内，对照与处理均以穴为单位进行取样，去掉根部多余泥土，做好标记后倒挂于网室中，同时集中每点模具取样中遇到的非整穴样品做好标记麻绳捆绑倒挂于网室中。待样品阴干后，敲掉每穴根部泥土，测定整穴株高(茎基部到集中穗顶部)后，并顺势掰开根部，根据每个主茎及其分蘖呈扇形分布特点，取中间茎基部最宽、株高最高的即为主茎，将每穴分出3个主茎，测定、记录其穗长和节间长。

图2 水稻产量性状分析取样工具

Fig.2 Sampling tools for analyzing yield traits of rice

1.2.3 产量及其构成

根据农艺性状中的各取样穴，调查相应每穴有效穗数后进行人工脱粒，用CFY II种子风选净度仪将实粒与空秕粒分开，SLY-C 微电脑自动数粒仪进行实粒数考查，称质量后计算千粒质量，空秕粒数则由人工考查，记录并计算结实率。缺穴处理每平方米有效穗数用取样穴穗数之和再加上非整穴的有效穗数来计算；籽粒产量为根据模具取样的每平方米内所有实粒数的粒重之和。人工去杂后利用LDS-1G型粮食谷物水分测定仪进行含水率测定，根据所测水分折成14.5%标准(GB1350—2009)水分产量后进行数据分析。

1.3 数据分析

使用Microsoft Excel 2019进行数据处理和绘图，以平均值为代表进行数据分析，用DPS7.05软件进行方差分析和回归分析。

2 结果与分析

2.1 缺穴类型对水稻产量及其构成因素的影响

株行间缺穴对水稻每平方米粒数、结实率、籽粒产量存在显著或极显著影响，对千粒质量影响不显著；二者互作对2个品种的结实率、有效穗数和籽粒产量存在极显著影响。品种间和缺穴处理间的千粒质量差异较大，其中PS处理对LJ31千粒质量具有显著影响，而其余株间各副处理均未达显著；行间各副处理千粒质量对品种的敏感性较大，表现为KY131中RR处理和RM处理千粒质量差异达显著，而LJ31中RP处理和RM处理千粒质量差异达显著(表2)。

表2 水稻产量及其构成因素的显著性分析

品种	处理	有效穗数/ (穗 m ⁻²)	粒数/ (粒 m ⁻²)	千粒质量/ g	结实率/ %	籽粒产量/ (g m ⁻²)
KY131 F 值	PI	124.48**	11.84**	2.33 ^{ns}	135.53**	53.27**
	PS	190.67**	281.67**	0.77 ^{ns}	27.71**	102.38**
	PM	215.80**	184.11**	3.94 ^{ns}	51.30**	188.51**
	P	197.93***	137.25***	0.67 ^{ns}	15.00*	50.54**
	RR	639.65**	1 116.30**	9.71*	56.34**	158.59**
	RP	227.10**	168.53**	4.17 ^{ns}	407.85**	478.31**
	RM	150.49**	141.62**	5.89*	894.39***	125.56**
	R	6.90*	55.41**	1.48 ^{ns}	253.40***	167.42***
	P×R	113.64**	0.01 ^{ns}	30.83*	142.89**	130.97**
LJ31 F 值	PI	10.19**	1 266.70***	0.13 ^{ns}	12.66**	144.25**
	PS	24.09**	1 736.80***	6.37*	20.96**	959.92***
	PM	16.55**	100.00**	1.91 ^{ns}	11.21**	807.76***
	P	56.38**	69.89***	3.26 ^{ns}	622.85***	537.50***
	RR	52.93**	137.42**	2.29 ^{ns}	4.90*	479.50**
	RP	9.91**	438.83**	5.01*	37.93**	830.53**
	RM	23.51**	58.05**	5.19*	16.59**	914.11**
	R	3.47 ^{ns}	89.45***	4.32 ^{ns}	45.15**	346.05***
	P×R	4.09 ^{ns}	0.07 ^{ns}	4.65 ^{ns}	628.61**	28.16*
品种 F 值	1 415.68***	61.89***	7.13**	5 082.87***	1 364.13***	

注 *、**、***分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平上差异显著；ns 为不显著。下同。

从整体作用效果上看，与CK相比，株行间缺穴降低了每平方米有效穗数、粒数和籽粒产量，其中有效穗数平均降幅分别为13.45%和15.44%，籽粒产量平均降幅分别为10.50%和12.82%；在有效穗数、千粒质量、结实率和籽粒产量上，株间缺穴优于行间。品种间比较，KY131结实率变幅大于LJ31，且除PSF处理和PMF处理外产量降幅均表现为KY131>LJ31(表3)。上述说明，株行间缺穴对KY131有效穗数、千粒质量及KY131行间结实率的负向作用大于LJ31，且KY131结实率及其稳定性均低于LJ31，导致产量降幅大于LJ31。

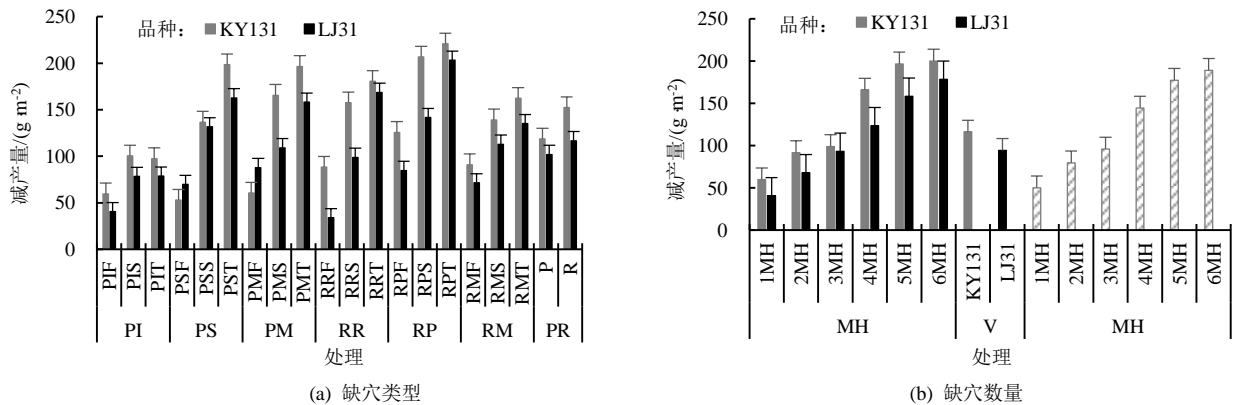
进一步分析表明，主处理行间缺穴平均减产134.58 g/m²，产量降幅高于株间。在所有缺穴中，RPT处理降幅最大，KY131和LJ31降幅分别为21.22%和19.15%(图3(a))。不同缺穴数条件下，籽粒产量随缺穴数增加而减少，减产幅度随缺穴数增加而增加(图3(b))。通过每平方米减产损失可在一定程度上反映出任意减产幅度下各类缺穴处理的对应面积值，该面积值随缺穴数增加而增加，且相同缺穴数条件下该面积值KY131>LJ31。因此，在生产过程中可以通过该面积值反推相应实际面积稻田减产条件下各缺穴处理的出现频次，掌握田间产量损失及补苗必要性。

表 3 缺穴类型对 KY131 和 LJ31 的产量及其构成的影响

Table 3 Effects of missed hole-seedling types on yield and its composition of KY131 and LJ31

处理	有效穗数/(穗 m ²)		粒数/(粒 m ²)		千粒质量/g		结实率/%		籽粒产量/(g m ²)		
	KY131	LJ31	KY131	LJ31	KY131	LJ31	KY131	LJ31	KY131	LJ31	
PI	PIF	595.80bB	459.00aA	42 534.00bB	42 696.00bB	26.42aAB	25.79a	87.30bB	92.71aA	981.00bB	1 020.60bB
	PIS	559.00cC	459.33aA	42 358.33bB	41 991.02cC	26.31abAB	25.90a	87.37bB	91.64cB	940.33cC	982.80cC
	PIT	528.33dD	430.00bB	41 166.67cC	41 108.33dD	25.92bB	25.89a	85.94cC	92.30bA	943.25cC	982.50cC
	CK	639.33aA	466.67aA	44 128.00aA	44 912.06aA	26.70aA	25.80a	88.34aA	91.58cB	1 040.67aA	1 061.20aA
	PSF	567.67bB	440.27bB	43 012.67bB	41 028.00bB	26.23a	26.02aA	87.58cC	92.86aA	987.83bB	991.47bB
PS	PSS	488.00cC	412.00cC	38 968.00cC	39 288.00cC	26.50a	25.61bAB	87.56cC	92.39bA	904.00cC	929.60cC
	PST	410.67dD	415.07cC	35 046.00dD	38 573.33dD	26.61a	25.52bB	90.31aA	91.26cB	842.23dD	898.33dD
	CK	639.33aA	466.67aA	44 128.00aA	44 912.06aA	26.70a	25.80abAB	88.34bB	91.58cB	1 040.67aA	1 061.20aA
PM	PMF	508.33bB	445.83bB	40 850.00bB	41 925.00bB	26.50ab	25.53a	90.57aA	90.96bB	980.17bB	973.33bB
	PMS	484.00cC	416.00cC	38 584.02cC	41 104.00cC	26.22ab	25.62a	86.50cC	90.41cB	875.12cC	952.00cC
	PMT	456.17dD	437.00bB	37 720.00cC	39 092.33dD	25.91b	25.53a	86.36cC	90.52cB	844.10dD	903.06dD
	CK	639.33aA	466.67aA	44 128.00aA	44 912.06aA	26.70a	25.80a	88.34bB	91.58aA	1 040.67aA	1 061.20aA
PI	561.04aA	449.44aA	42 019.67aA	41 931.45aA	26.22a	25.86a	86.87bB	92.22aA	954.86aA	995.30aA	
PS	488.78bB	422.44cB	39 051.33bB	39 629.78cC	26.45a	25.72a	88.48aA	92.17aA	911.35bB	939.80bB	
PM	482.83bB	432.94bB	39 008.09bB	40 707.11bB	26.21a	25.56a	87.81aAB	90.63bB	899.80bB	942.80bB	
RR	RRF	554.67bB	461.93aA	42 865.33bB	43 775.33bB	25.88bBC	25.65ab	85.83cB	91.49aA	952.29bB	1 027.17bB
	RRS	512.00cC	440.00bB	41 136.00cC	41 672.00cC	25.40cC	25.49bc	84.54dC	90.58bB	883.20cC	962.40cC
	RRT	425.33dD	385.00cC	37 172.67dD	38 654.00dD	26.30aAB	25.24c	87.99bA	91.51aA	860.20dD	892.54dD
	CK	639.33aA	466.67aA	44 128.00aA	44 912.06aA	26.70aA	25.80a	88.34aA	91.58aA	1 040.67aA	1 061.20aA
RP	RPF	533.00bB	433.33bB	40 326.00bB	42 102.67bB	26.01bB	25.40b	87.26bB	91.32aAB	915.03bB	976.47bB
	RPS	476.30cC	432.00bB	38 992.00cC	39 904.05cC	25.52cB	25.37b	83.82cC	90.84bB	833.92cC	919.60cC
	RPT	418.22dD	410.67cC	35 845.33dD	37 165.32dD	26.13bAB	25.79a	87.52bB	89.53cC	819.79cC	858.00dD
R	CK	639.33aA	466.67aA	44 128.00aA	44 912.06aA	26.70aA	25.80a	88.34aA	91.58aA	1 040.67aA	1 061.20aA
	RMF	541.67bB	442.01bB	43 264.00bB	41 747.30bB	26.34abAB	26.24a	83.36dC	90.40bB	949.78bB	989.65bB
	RMS	508.33cC	430.12bcB	40 633.33cC	40 725.00cC	26.07bcAB	25.77b	85.12bB	90.35bB	901.58cC	948.33cC
	RMT	472.00dD	426.40cB	40 296.00cC	40 616.00cC	25.76cB	25.50b	84.62cB	89.45cC	878.40dD	926.00dD
CK	639.33aA	466.67aA	44 128.00aA	44 912.06aA	26.70aA	25.80b	88.34aA	91.58aA	1 040.67aA	1 061.20aA	
RR	497.33ab	428.98a	40 391.33bA	41 367.11aA	25.86a	25.46a	86.12aA	91.07aA	898.56bA	960.70aA	
RP	475.67b	425.33a	38 387.78cB	39 724.00bB	25.89a	25.52a	86.20aA	90.59bB	856.26cB	918.02bB	
RM	507.33a	432.80a	41 397.78aA	41 029.45aA	26.06a	25.84a	84.37bB	90.16bB	909.92aA	954.66aA	
P	510.89aA	434.94a	40 026.63a	40 756.11a	26.29a	25.71a	87.72aA	91.67aA	922.00aA	959.30a	
R	493.44bB	429.04a	40 058.96a	40 706.85a	25.93b	25.61a	85.56bB	90.60bB	888.24bB	944.46b	

注 不同大小写字母表示不同处理之间在 5% 和 1% 水平上差异显著，下同。



注 MH: 缺穴; 1MH: 缺 1 穴(PIF); 2MH: 缺 2 穴 (PIS、PSF、RRF、RPF 和 RMF 平均); 3MH: 缺 3 穴 (PIT、PMF 和 RMS 平均); 4MH: 缺 4 穴 (PSS、PMS、RRS、RPS 和 RMT 平均); 5MH: 缺 5 穴(PMT); 6MH: 缺 6 穴 (PST、RRT 和 RPT 平均)。

图 3 缺穴类型和数量对籽粒产量损失的影响

Fig.3 Effects of missed hole-seedling types and numbers on grain yield reduction

2.2 缺穴数量对水稻产量及其构成因素的影响

品种和缺穴数对每平方米有效穗数、结实率、收获指数和籽粒产量具有显著影响。品种方面，KY131 每平方米穗数、千粒质量和收获指数高于 LJ31 ($P<0.05$)，而每平方米粒数、结实率和籽粒产量却

低于 LJ31 ($P<0.05$)。主处理缺穴类型每平方米籽粒产量、有效穗数、粒数和千粒质量随缺穴数增加而降低，收获指数和结实率因缺穴数不同表现出较大差异。其中 KY131 有效穗数降幅高于粒数，收获指数随缺穴数增加而呈现先降低后增加变化趋势；LJ31 有效

穗数降幅低于粒数，而每平方米有效穗数、粒数和籽粒产量随缺穴数增加而降低（表4）。进一步分析表明，与KY131相比，LJ31凭借高的每平方米粒数和结实率弥补了其有效穗数和千粒质量的不足，实现了

同等缺穴数条件下产量高于KY131，说明缺穴对KY131籽粒产量和有效穗数的负向作用效果大于LJ31，而对LJ31粒数的负向作用效果大于KY131。

表4 缺穴数对KY131和LJ31每平方米内产量及构成的影响

Table 4 Effect of missed hole-seedling number on yield and composition per square meter of KY131 and LJ31

处理	有效穗数/(穗 m ⁻²)	粒数/(×10 ³ 粒 m ⁻²)	千粒质量/g	结实率/%	收获指数/%	籽粒产量/(g m ⁻²)	
KY131	1MH	595.80bB	42.53bB	26.42abAB	87.30bBC	63.17abAB	981.00bB
	2MH	551.21cC	42.13cB	26.25bcBC	86.28cCD	62.74bcB	949.05cC
	3MH	515.03dD	41.28dC	26.12cBCD	87.21bBC	62.67bcB	941.67cC
	4MH	486.40eE	39.60eD	25.99cdCD	85.41dD	62.58cB	874.93dD
	5MH	456.17fF	37.72fE	25.97cdCD	87.93abAB	62.74bcB	844.10eE
	6MH	418.67gG	36.02gF	25.77dD	87.93abAB	62.80bcB	840.74eE
	0MH	639.33aA	44.13aA	26.70aA	88.34aA	63.48aA	1 040.67aA
LJ31	1MH	458.67aAB	42.70bB	25.79a	92.06aA	61.90aA	1 020.60bB
	2MH	447.37bB	42.13cC	25.77a	91.54abcABC	61.60aAB	993.51cC
	3MH	435.28cC	41.25dD	25.73a	91.20bcdABC	61.40abAB	968.06dD
	4MH	425.28dC	40.52eE	25.52a	90.73dBC	61.01bB	937.92eE
	5MH	425.00dC	39.09fF	25.53a	90.52dC	59.89cC	903.06fF
	6MH	403.58eD	38.13gG	25.52a	90.77cdBC	59.74cC	882.96gG
	0MH	466.67aA	44.91aA	25.80a	91.84abAB	61.07bB	1 061.20aA
KY131	523.22aA	40.49b	26.17a	86.98bB	62.88aA	924.59bB	
LJ31	437.41bB	42.25a	25.67b	91.24aA	60.94bB	966.76aA	
1MH	527.23bB	42.62aA	26.10abAB	89.68abAB	62.54aA	1 000.80bB	
2MH	499.29cC	42.13cC	26.01abcABC	88.91cdBCD	62.17abAB	971.28cC	
3MH	475.14dD	41.27dD	25.93bcdABC	89.21bcABC	62.04abAB	954.86dD	
4MH	455.84eE	40.06eE	25.76cdBC	88.07eD	61.80bBC	906.42eE	
5MH	440.58fF	38.41fF	25.75cdBC	88.44deCD	61.31cC	873.58fF	
6MH	411.12gG	37.08gG	25.64dC	89.35bcABC	61.27cC	861.85gG	
0MH	553.00aA	44.52aA	26.25aA	90.09aA	62.27abAB	1 050.93aA	
V	3 521.75**	16.70*	36.37*	2 048.28**	115.56**	1 780.69**	
F 值	T	365.66**	442.14**	5.86**	9.52**	9.89**	725.62**
	V×T	117.91**	10.63**	1.30 ^{ns}	4.10**	7.12**	9.17**

注 V: 品种; T: 处理; V×T: 品种×处理; 1MH: 缺1穴(P1F); 2MH: 缺2穴(P1S、P2F、RRF、RPF和RMF平均); 3MH: 缺3穴(P1T、PMF和RMS平均); 4MH: 缺4穴(P2S、PMS、RRS、RPS和RMT平均); 5MH: 缺5穴(PMT); 6MH: 缺6穴(PST、RRT和RPT平均); 0MH: 不缺穴。

2.3 缺穴对水稻主茎与穗性状的影响

株行间缺穴及其互作对水稻株高和倒3节间长具有显著影响（表5）。与株间缺穴相比，行间缺穴能够增加水稻株高（ $P<0.05$ ）和倒3、倒4节间长度（ $P>0.05$ ），提高KY131穗长和倒1节间长度（ $P>0.05$ ）（表6）。在所有缺穴处理中，KY131和LJ31株高最高的处理分别是RPS处理（88.53 cm）和RMF处理（94.40 cm），均为行间缺穴处理，且较CK分别增幅2.79%和2.42%；倒3节间长最短的处理是PSS-KY131处理和RRS-LJ31处理，较CK分别降幅32.26%和26.98%（表6）。上述结果说明，缺穴对每平方米水稻主茎形态性状的影响因品种和缺穴类型而异，适宜面积范围内主茎节间的长短有可能是导致株高增加或降低的主要原因。

表5 缺穴处理下KY131和LJ31主茎与穗性状间显著性分析

Table 5 Significant analysis between morphological characters of main stem of KY131 and LJ31 under missed hole-seedling treatments

品种	处理	株高/cm	穗长/cm	节间长/cm				
				倒1	倒2	倒3	倒4	
KY131	PI	18.05**	3.97 ^{ns}	3.29 ^{ns}	0.49 ^{ns}	5.96*	12.17**	
	PS	14.30**	2.41 ^{ns}	4.51 ^{ns}	23.98**	4.10 ^{ns}	4.78*	
	PM	3.21 ^{ns}	1.65 ^{ns}	1.27 ^{ns}	0.47 ^{ns}	1.49 ^{ns}	2.39 ^{ns}	
	P	11.07*	3.11 ^{ns}	1.73 ^{ns}	0.90 ^{ns}	1.74 ^{ns}	3.27 ^{ns}	
	RR	3.01 ^{ns}	1.60 ^{ns}	0.59 ^{ns}	0.15 ^{ns}	2.32 ^{ns}	0.73 ^{ns}	
	F 值	RP	14.4**	3.14 ^{ns}	0.77 ^{ns}	0.17 ^{ns}	4.42 ^{ns}	2.57 ^{ns}
		RM	7.64*	0.58 ^{ns}	1.80 ^{ns}	2.89 ^{ns}	42.59**	4.70 ^{ns}
		R	59.62**	1.13 ^{ns}	0.30 ^{ns}	22.59**	7.05**	0.13 ^{ns}
		P×R	205.03**	0.09 ^{ns}	1.95 ^{ns}	0.13 ^{ns}	22.49*	14.14*
LJ31	PI	1.54 ^{ns}	55.41*	24.90**	1.67 ^{ns}	13.22**	3.49 ^{ns}	
	PS	19.43**	0.41 ^{ns}	4.39 ^{ns}	0.78 ^{ns}	4.85*	3.57 ^{ns}	
	PM	5.63*	2.03 ^{ns}	11.98**	1.28 ^{ns}	41.53**	3.18 ^{ns}	
	P	6.06 ^{ns}	0.06 ^{ns}	1.01 ^{ns}	0.27 ^{ns}	1.73 ^{ns}	0.48 ^{ns}	
	F 值	RR	4.32 ^{ns}	10.38**	8.85**	1.96 ^{ns}	7.29**	16.54**
		RP	21.07**	3.35 ^{ns}	6.17*	3.67 ^{ns}	23.57**	4.95*
		RM	15.00**	1.72 ^{ns}	4.39 ^{ns}	2.34 ^{ns}	5.19*	1.90 ^{ns}
		R	4.43 ^{ns}	0.67 ^{ns}	2.18 ^{ns}	0.11 ^{ns}	15.13*	27.73**
		P×R	111.37**	0.01 ^{ns}	0.82 ^{ns}	0.12 ^{ns}	188.48**	5.40 ^{ns}
品种		6 257.53***	958.90***	29.32***	816.87***	106.51***	137.49***	

表 6 缺穴处理对水稻农艺性状的影响

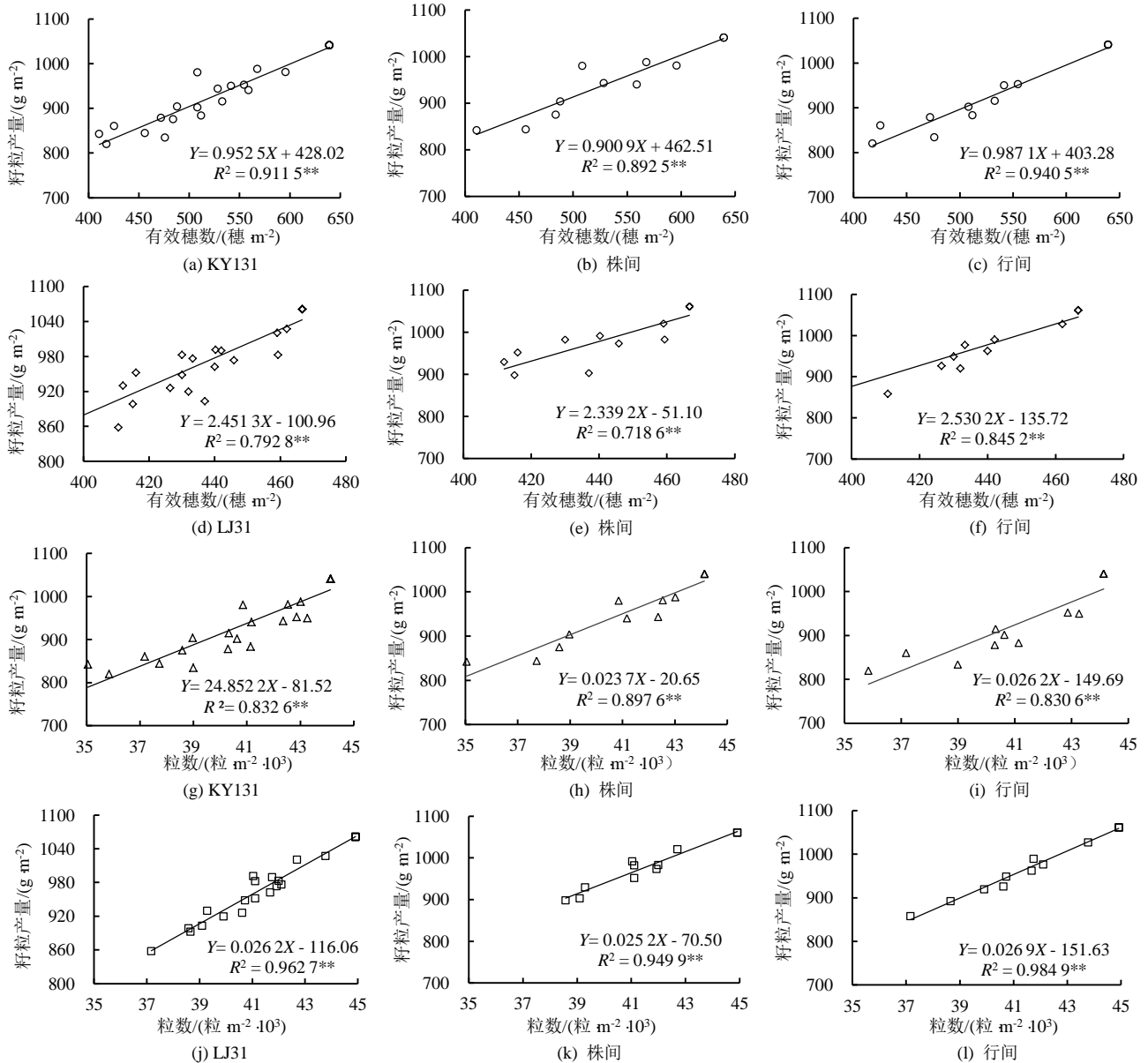
Table 6 Effects of missed hole-seedling treatments on agronomic traits of rice

处理	株高/cm		穗长/cm		节间长/cm								
					倒 1		倒 2		倒 3		倒 4		
	KY131	L31	KY131	L31	KY131	L31	KY131	L31	KY131	L31	KY131	L31	
P	PI	83.33b	92.11b	14.81a	16.63a	32.75a	33.13a	20.69a	23.61a	14.09a	15.04a	3.43a	4.91a
P	PS	84.89a	93.06a	14.48a	16.67a	32.50a	33.39a	21.22a	23.82a	14.18a	15.20a	3.81a	4.92a
	PM	85.67a	92.67ab	14.78a	16.61a	32.74a	33.29a	20.61a	23.73a	14.47a	15.27a	3.94a	4.74a
R	RR	86.00b	93.08a	14.79a	16.67a	32.74a	33.43a	20.63a	23.69a	14.82b	15.41b	4.12a	4.68bB
	RP	86.23b	93.62a	14.82a	16.72a	32.89a	32.92a	20.63a	23.79a	15.10ab	16.86a	4.08a	5.67aA
	RM	87.64a	93.69a	14.57a	16.54a	32.92a	33.06a	20.96a	23.79a	15.44a	16.28a	4.27a	5.42aA
P		84.63b	92.61b	14.69a	16.64a	32.66a	33.27a	20.84a	23.72a	14.25b	15.17bB	3.73a	4.86a
R		86.63a	93.46a	14.73a	16.64a	32.85a	33.14a	20.74a	23.76a	15.12a	16.18aA	4.16a	5.26a

2.4 缺穴处理下水稻产量与产量性状之间的关系

回归分析表明, KY131 每平方米有效穗数模拟效果优于 LJ31 (图 4 (a)、图 4 (d)), 且行间模拟效果优于株间 (图 4 (b) —图 4 (f)), 说明行间缺穴因降低每平方米有效穗数而导致对水稻籽粒产量的负向间接作用要大于株间, 尤其是 KY131 (图 4

(b)、图 4 (c)); 在粒数方面, LJ31 模拟效果优于 KY131 (图 4 (g)、图 4 (j)), 其中 KY131 行间模拟效果低于株间 (图 4 (h)、图 4 (i)), 而 LJ31 行间模拟效果则优于株间 (图 4(k)、图 4(l)), 这很可能是导致两品种株间与行间籽粒减产途径不同的主要原因。



注 *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上差异显著, ns 为不显著, 下同。

图 4 水稻产量与有效穗数和粒数之间关系

Fig.4 Relationship between rice yield and effective panicle and grain number

千粒质量对 KY131 和 LJ31 籽粒产量均有显著作用效果 (图 5 (a)、5 (d))，但对应起主要作用的分别为行间 ($R^2=0.5598^{**}$) 和株间 ($R^2=0.3816^*$) 缺穴处理 (图 5 (c)、5 (e))。结实率与籽粒产量呈正相关 (图 5 (g)、5 (j))，其中 LJ31 结实率对籽粒产量有显著作用效果的主要是行间缺穴所致

(图 5 (h)、5 (i))。研究还表明，KY131 和 LJ31 籽粒产量与缺穴数均呈极显著负相关，分别可用方程 $Y_{KY131} = -33.85X_{缺穴数} + 1026.13$ ($R^2=0.9569^{**}$, $F=110.97$) 和 $Y_{LJ31} = -29.48X_{缺穴数} + 1055.19$ ($R^2=0.9953^{**}$, $F=1050.89$) 进行拟合 (图 6)，从曲线陡峭程度 (斜率值) 得知，缺穴数增加对 KY131 产量的负作用大于 LJ31。

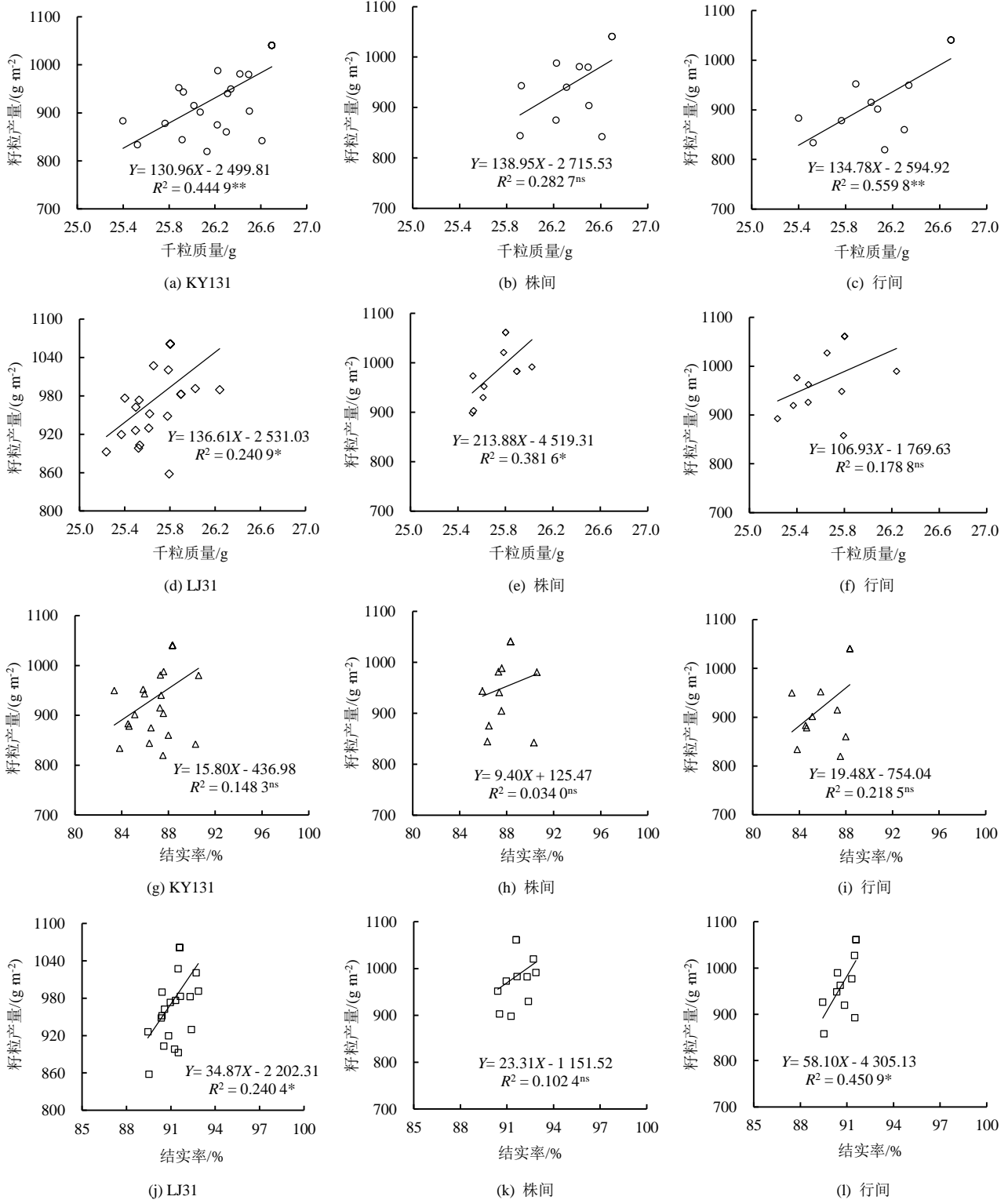


图 5 水稻产量与千粒质量和结实率之间关系

Fig.5 Relationship between rice yield and 1000-grain weight and seed setting rate

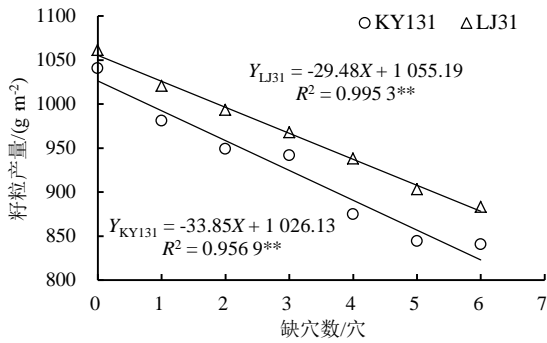


图 6 籽粒产量与缺穴数之间关系

Fig.6 Relationship between grain yield and missing hole number

3 讨论

水稻产量形成取决于单位面积有效穗数、粒数、结实率和千粒质量，如何协调产量构成因素来提高水稻产量，前人已经做了大量的研究。刘伟明等^[8]认为水稻产量构成要素对产量的贡献大小顺序依次为每穗实粒数、有效穗数、千粒质量和结实率。有学者^[9-10]认为单位面积上有效穗数、每穗实粒数和结实率对产量影响较大，产量与穗数和结实率显著相关。王洁等^[11]认为水稻获得高产的前提是在一定数量有效穗数基础上协调好穗粒数、结实率和千粒质量的关系。本研究表明，品种、缺穴及互作处理对每平方米面积下的有效穗数、结实率、收获指数及籽粒产量产生显著影响，缺穴能够打破产量构成因子间平衡，降低有效穗数、粒数和籽粒产量，且行间缺穴的负向作用强于株间（图 4，图 5），产量降幅大（表 3）。水稻产量受控于群体数量和个体生产力 2 个方面，单位面积穗数和粒数是影响产量的主要因素^[12-14]，且二者之间存在很强的补偿关系，但很难同时实现二者增加^[15-17]。本研究中，在所有缺穴中，RPT 处理因其缺穴数较多，产量降幅最大，其中 KY131 和 LJ31 降幅分别为 21.22% 和 19.15%。在品种方面，缺穴条件下，KY131 和 LJ31 的有效穗数和粒数降幅最大，其中 LJ31 凭借较高的粒数和结实率优势弥补了其有效穗数和千粒质量低于 KY131 的劣势，减缓了同等缺穴条件下的产量下降幅度，产量损失小于 KY131，说明缺穴条件下 LJ31 产量构成因素之间的补偿作用强于 KY131，这在回归分析中也已得到印证。此外，本研究还观察到，主处理缺穴类型的每平方米籽粒产量、有效穗数、粒数和千粒质量随缺穴数增加而降低，收获指数和结实率因缺穴数不同表现出较大差异。其中在千粒质量研究上，PS 处理对 LJ31 千粒质量具有显著影响，而其余株间各副处理均未达显著；而在结实率研究上，受遗传特性影响，KY131 结实率低于 LJ31（表 4），结实率与籽粒产量均呈正相关关系（图 5），其中 KY131 结实率在不同缺穴数影响下稳定性较低，

结合其籽粒产量表现，说明结实率较低且不稳定影响产量潜力的发挥，这与前人的研究^[18-19]相一致。

株高是影响水稻产量的重要农艺性状^[20]，合理的农艺性状配置有助于提高群体光能利用率和发挥产量潜力^[21]。相关研究表明，在一定范围内水稻产量随着株高增加而增加^[22]，不同生态区应该有与其相适应的植株高度^[23]，且适当增加植株高度可以提高产量^[24]。主茎作为插秧时本田基本苗，是由种子萌发生成的，代表其品种特性，研究主茎农艺性状更具品种针对性及其对缺穴的敏感性，且主茎节间伸长时间、节数是与品种叶龄及穗的生长存在同伸关系的，而分蘖因其产生叶位不同，其叶片数和节间数不同，不易呈现其品种特性。通过对主茎农艺性状的研究表明，缺穴可以改变农艺性状间的原有搭配，但重新配置的主茎农艺性状并不利于产量的增加。此外，在水稻生长发育过程中，环境、栽培技术及其机械化程度均会导致其农艺性状的改变和重新配置^[24-25]，其中增加植株高度与穗长是提高生物产量和籽粒产量的重要措施^[26-28]。在本研究中，受限于缺穴类型、缺穴数和取样面积限制，缺穴导致株高和穗长变化差异较大，产量均降低，说明水稻的农艺性状受多因素控制。

综上所述，在每平方米范围内，受遗传特性影响，KY131 分蘖高于 LJ31，对 KY131 而言，其缺穴处的邻近穴分蘖会大量增加，横向生长态势强于纵向生长；而对分蘖相对较少的 LJ31 而言，其缺穴处的邻近穴分蘖有限，加之其自身株高、穗长和节间长又高于 KY131，势必会导致纵向态势生长强于横向生长，最终导致各缺穴类型在不同品种之间表现出较大的农艺性状差异。从品种自我适应和调控能力上看，KY131 会通过调节有效穗数、粒数和千粒质量之间平衡尽可能降低缺穴造成的产量损失，而 LJ31 则是在粒数、有效穗数、千粒质量和结实率相互调节和适应下弥补其有效穗数和千粒质量的不足。结合产量表现，LJ31 产量性状间的相互调节和自我适应能力优于 KY131，同样是当地主栽培品种，这与目前北方单季机插粳稻研究得出的穗数是影响产量主要因素的结论不完全相同，说明调控籽粒产量高低的因素不仅受基因型影响，而且是由多个性状协同互补控制的。

目前本地区水稻生产中为实现增产多采用增加基本苗数来提高单位面积成穗数，但相应的会导致用种量、种植成本和人工投入的增加。为了更好地促进农机农艺默契融合，本研究中在最少缺穴数情况下，即可打破性状间平衡，即便性状间有所调节，也会导致减产，间接说明一定面积下田间基本苗数量不足很难实现高产。试验对缺穴类型进行了对比分析，每种缺穴类型控制在每平方米范围内出现 1 次，优点是便

于比较分析和避免处理间混杂重叠, 缺点是在分析缺穴类型间差异时可能会受到缺穴数量上的干扰, 基于此对试验中所有缺穴类型按照缺穴数量多少进行了比较分析, 同时也可以根据每种类型缺穴的实际减产值折算出种植户所能承受的目标减产面积值, 通过该值和田间缺穴点次可用来预知、预防因机械化插秧而带来的缺穴风险, 但考虑到品种基因型、机械移栽种类、缺穴类型、缺穴数量及其参照面积的局限性, 研究还有待于进一步完善和深入。

4 结论

缺穴能够改变每平方米范围内农艺性状的原有合理配置, 打破产量构成因素之间的平衡, 有效穗数和粒数显著降低, 导致产量下降。KY131 因缺穴而导致减产的主要原因是每平方米有效穗数、粒数和千粒质量的降低, LJ31 则是每平方米粒数、有效穗数、千粒质量和结实率的降低所致。行间缺穴导致的减产大于株间缺穴。缺穴对 KY131 产量性状与农艺性状的负向作用大于 LJ31, 且 KY131 结实率及其稳定性均低于 LJ31, 导致 KY131 产量降幅大于 LJ31。因此, 缺穴不利于产量性状间的协同互补, 而由此产生的互补差异又导致了减产途径的不同。

参考文献:

[1] 刘星辰, 杨振山. 从传统农业到低碳农业——国外相关政策分析及启示[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 674-680.
LIU Xingchen, YANG Zhenshan. From traditional agriculture to low-carbon agriculture: Policies and implications in developed countries[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(6): 674-680

[2] RASHID M H, ALAM M M, KHAN M A H, et al. Productivity and resource use of direct(drum)-seeded and transplanted rice in puddled soils in rice-rice and rice-wheat ecosystems[J]. Field Crops Research, 2009, 113(3): 274-281.

[3] LI Y. The status and prospects of rice production mechanization in China[C]//Toriyama K, Heong K, Hardy B. Rice is life: scientific perspectives for the 21st century. Los Banos: International Rice Research Institute, 2005: 238-239.

[4] 朱聪聪, 张洪程, 郭保卫, 等. 钵苗插播密度对不同类型水稻产量及光合物质生产特性的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(1): 122-133.
ZHU Congcong, ZHANG Hongcheng, GUO Baowei, et al. Effect of planting density on yield and photosynthate production characteristics in different types of rice with bowl mechanical-transplanting method[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(1): 122-133.

[5] LI X C, ZHONG Q Y, LI Y X, et al. Triacanol reduces transplanting shock in machine-transplanted rice by improving the growth and antioxidant systems[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 872.

[6] LAMPAYAN R M, FARONILLO J E, TUONG T P, et al. Effects of seedbed management and delayed transplanting of rice seedlings on crop performance, grain yield, and water productivity[J]. Field Crops Research, 2015, 183: 303-314.

[7] MISHRA A, SALOKHE V M. Seedling characteristics and the early growth of transplanted rice under different water regimes[J].

Experimental Agriculture, 2008, 44(3): 365-383.

[8] 刘伟明. 籼粳亚种间杂交水稻产量性状与产量的相关、回归及通径分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(1): 70-72.
LIU Weiming. Correlation, multiple regression and path analysis between yield traits and yield on intersubspecific hybrid rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(1): 70-72.

[9] 王远征, 王晓菁, 李源, 等. 北方粳稻产量与品质性状及其相互关系分析[J]. 作物学报, 2015, 41(6): 910-918.
WANG Yuanzheng, WANG Xiaojing, LI Yuan, et al. Analysis of yield and quality traits and their relationship in japonica rice in Northern China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(6): 910-918.

[10] WANG Huaixin, WANG Wei, LIU Jie, et al. Analysis on yield and agronomic traits of hybrid regional trial varieties of Upper Yangtze in Zunyi, Guizhou Province[J]. Seed, 2015, 34(5): 92-95.

[11] 王洁, 曾波, 雷财林, 等. 北方国家水稻区域试验近 15 年参试品种分析[J]. 作物杂志, 2018(1): 71-76.
WANG Jie, ZENG Bo, LEI Cailin, et al. Variety analysis of northern rice regional trials in recent 15 years[J]. Crops, 2018(1): 71-76.

[12] ZHU Y G, CHU J P, DAI X L, et al. Delayed sowing increases grain number by enhancing spike competition capacity for assimilates in winter wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2019, 104: 49-62.

[13] MELASH A A, MENGISTU D K, ABERRA D A, et al. The influence of seeding rate and micronutrients foliar application on grain yield and quality traits and micronutrients of durum wheat[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 85: 221-227.

[14] TAO Z Q, MA S K, CHANG X H, et al. Effects of tridimensional uniform sowing on water consumption, nitrogen use, and yield in winter wheat[J]. The Crop Journal, 2019, 7(4): 480-493.

[15] LYNCH J P, DOYLE D, MCAULEY S, et al. The impact of variation in grain number and individual grain weight on winter wheat yield in the high yield potential environment of Ireland[J]. European Journal of Agronomy, 2017, 87: 40-49.

[16] LI G H, ZHANG J, YANG C D, et al. Optimal yield-related attributes of irrigated rice for high yield potential based on path analysis and stability analysis[J]. The Crop Journal, 2014, 2(4): 235-243.

[17] OTTIS B V, TALBERT R E. Rice yield components as affected by cultivar and seeding rate[J]. Agronomy Journal, 2005, 97(6): 1 622-1 625.

[18] 敖和军, 王淑红, 邹应斌, 等. 超级杂交稻干物质生产特点与产量稳定性研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 1 927-1 936.
AO Hejun, WANG Shuhong, ZOU Yingbin, et al. Study on yield stability and dry matter characteristics of super hybrid rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(7): 1 927-1 936.

[19] 闫平, 张书利, 于艳敏, 等. 不同水稻品种干物质积累与产量性状的相关研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(18): 1-6.
YAN Ping, ZHANG Shuli, YU Yanmin, et al. Correlation research on dry matter accumulation and yield characters of different rice varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(18): 1-6.

[20] BADSHAH M A, TU N M, ZOU Y B, et al. Yield and tillering response of super hybrid rice Liangyoupeijiu to tillage and establishment methods[J]. The Crop Journal, 2014, 2(1): 79-86.

[21] 姜元华, 张洪程, 韦还和, 等. 亚种间杂交稻不同冠层叶形组合产量差异及其形成机理[J]. 中国农业科学, 2014, 47(12): 2 313-2 325.
JIANG Yuanhua, ZHANG Hongcheng, WEI Huanhe, et al. Difference of yield and its formation mechanism of indica-japanica inter-subspecific hybrid rice with different canopy leaf types[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(12): 2 313-2 325.

[22] 潘玉才, 钱非凡, 黄卫红, 等. 麦秸还田对水稻生长的影响[J]. 上海农业学报, 2001, 17(1): 59-65.
PAN Yucui, QIAN Feifan, HUANG Weihong, et al. Effect of returning of wheat stalk to field on growth of rice[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2001, 17(1): 59-65.

- [23] CHEN W F, XU Z J, ZHANG W Z, et al. Creation of new plant type and breeding rice for super high yield[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(5): 665-672.
- [24] FERNÁNDEZ C, VEGA J A, FONTÚRBEL T. Vegetative growth response of *Cytisus oromediterraneus* to fuel reduction treatments[J]. *Plant Ecology*, 2018, 219(3): 251-259.
- [25] FORESTAN C, FARINATI S, ROUSTER J, et al. Control of maize vegetative and reproductive development, fertility, and rRNAs silencing by HISTONE DEACETYLASE 108[J]. *Genetics*, 2018, 208(4): 1 443-1 466.
- [26] 杨建昌, 王朋, 刘立军, 等. 中籼水稻品种产量与株型演进特征研究[J]. *作物学报*, 2006, 32(7): 949-955.
- [27] YANG Jianchang, WANG Peng, LIU Lijun, et al. Evolution characteristics of grain yield and plant type for mid-season indica rice cultivars[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(7): 949-955.
- [27] PENG S, CASSMAN K G, VIRMANI S S, et al. Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential[J]. *Crop Science*, 1999, 39(6): 1 552-1 559.
- [28] CHEN J B, LIANG Y, HU X Y, et al. Physiological characterization of 'stay green' wheat cultivars during the grain filling stage under field growing conditions[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2010, 32(5): 875-882.

Effects of Missing Hole-seedling Between Plants and Rows in Mechanical Transplanting of Rice Seedlings on Agronomic Traits

ZHAO Liming^{1,2}, ZHENG Dianfeng^{1,2*}, SHEN Xuefeng^{1,2}, FENG Naijie^{1,2}, HU Hanqiao^{1,2}, ZHOU Hang¹

(1. College of Coastal Agronomy, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. Shenzhen Institute of Guangdong Ocean University, Shenzhen 518116, China)

Abstract: **【Objective】** Mechanical transplanting of rice seedlings often results in some holes being missed for the transplantation. Understanding their ultimate consequence for yield and yield components is important to help improve design and implementation of mechanical transplanting. The purpose of this paper is to experimentally study the effect of the types and number of such missing holes on yield and yield components of rice of different varieties. **【Method】** Rice varieties of Kongyu 131 (KY131) and Longjing 31 (LJ31) were used as the model plants in the experiment. For each variety, there were two missing hole-seedling treatments: inter-plant (P) and inter-row (R). For the inter-plant missing, there were further three types of missing: independent type (PI), spaced type (PS) and mixed type (PM), while for the inter-row missing, there were relative type (RR), reciprocal type (RP), and mixed type (RM). For each treatment, we measured yield and yield traits of rice. **【Result】** There were significant differences in effective panicle numbers, seed setting rate, harvest index and grain yield between the two varieties and treatments. Compared with CK (without missing), the treatments reduced the effective panicles, grain numbers and yield, with the average effective panicles reduced by 13.45% and 15.44% and the average grain yield by 10.50% and 12.82%, respectively, for the inter-plant and inter-row missing holes treatments. The missing holes also changed the allocation of morphological characters of the main stem and the grain yield, though the change varies with varieties. When the number of missing holes was the same, the variation in seed setting rate of KY131 was greater than that of LJ31, and the effective panicles, grain numbers, harvest index and grain yield all decrease with the increase in the missing holes. The yield falling range of inter-row was higher than that of inter-plant, and the yield of KY131 decreases more than that of LJ31, with the average yield reduction in the former and latter being 13.01% and 10.38%, respectively, compared to CK. The main determinant of yield reduction was effective panicles and grain numbers. Correlation analysis showed a significant negative correlation between the missing holes and grain yield, with the effective panicles and 1 000-grain weight reduced being greater for KY131 than for LJ31. The number of effective panicles and grains per square meter was positively correlated with the grain yield at significant level, with the correlation coefficient for the effective panicles number being 0.954 7** and 0.890 4**, respectively, for KY131 and LJ31, the correlation coefficient for the grains number being 0.981 2** and 0.912 5**, respectively, for LJ31 and KY131. **【Conclusion】** The missing holes between plants and rows had a negative effect on many characters of rice, reduced the yield, and was not conducive to the effective combination of agricultural machinery and agronomy.

Key words: rice; missed hole-seedling; mechanized-transplanting; yield

责任编辑：赵宇龙