

抛秧水稻生长发育与产量形成的生态生理机制

II. 秧苗田间垂直分布格局及其生态生理效应*

戴其根¹ 霍中洋¹ 张洪程¹ 苏宝林² 许轲¹ 邱枫¹

(¹扬州大学农学院, 江苏扬州 225009; ²中国农业大学, 北京 100094)

提 要 抛秧稻秧苗在田间垂直方向上浅栽而变异大的特点(- 0.5~ 2.5 cm)使分蘖节入土状况不同, 秧姿各异。同时, 浅栽后, 分蘖节及土中茎鞘周际环境发生深刻变化, 总体上温、肥、气、压(受土壤压力)等生态因素改善, 但因分蘖节处于土-水-气的交界层面上, 这些生态因素在这个层面上变化大, 使水稻生长受这些因素胁迫机率大。分蘖节入土状况在活棵立苗及叶、蘖、根等器官生长上产生了一系列显著的效应, 影响着群体的发展、整齐度、抗倒性及最终产量。分蘖入土最适宜深度 1.5 cm 左右, 过浅过深不利于个、群体生育。

关键词 抛秧稻; 分蘖节; 垂直分布; 生理生态

The Eco-physiological Mechanism of Growth, Development and Yield Formation of Broadcasted Rice Seedlings

II. The Characteristics of Spatial Distribution of Plant on Perpendicular and Its Eco-physiological Effect

DA IQ i-Gen¹ HUO Zhong-Yang¹ ZHANG Hong-Cheng¹ SU Bao-Lin² XU Ke¹
Q U Feng¹

(¹Agricultural College of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009; ²China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract Spatial distribution of plant positions in the perpendicular is one of primordial foundational characteristics in the broadcasting-seedling of rice. Planting depth is characterised with shallow and various(- 0.5~ 2.5cm). So crown(tiller nodes) inserted into the soil shallowly and variously in depth and the seedling postures are diversified after transplanting. The environment around crown or stem in soil are changed remarkably. In general, some ecological factors around crown included temperature, nutrient, air, bind force of soil and so on are improved. But these factors fluctuate notably because the crown lies on soil-water-air boundary layer. So stress chances of rice growth may be underwent increasingly from these factors. The depths of crown in soil strongly influence the growing of organ included leaf, tiller and root and the developing of population included uniformity, lodging and yield. The optimal depth of crown is about 1.5 cm.

Key words Broadcasting-seedling rice; Tiller nodes; Distribution in perpendicular; Eco-physiology

* 江苏省“九五”应用攻关项目(BE96318), 国家自然科学基金资助(30070436)

收稿日期: 1999-12-06, 接受日期: 2000-12-13

Received on: 1999-12-06, Accepted on: 2000-12-13

抛秧水稻与常规手插相比, 除前文报道活棵立苗特点外^[1], 另一个独特之处是秧苗在田间的垂直分布格局, 其中突出的是浅植, 大部分植株根系呈半裸露或裸露状, 刚栽植的秧苗千姿百态, 直立、倾斜、平躺应有尽有^[2]。关于浅植特别是苗姿虽有一定的研究, 并提出应作为抛秧稻密度的一个质量指标, 然而这方面仍无明确的概念与数量指标^[3], 特别是垂直分布格局及对生长发育和产量形成的生态生理效应至今无明确的报道。

1 材料与方 法

试验于 1997~ 1998 年在扬州大学农学院实验农场进行。前茬小麦, 土壤为砂壤土, 地力中等, 1996~ 1997 年平均水解氮 80.5 mg/kg 土, 速效磷 7.1 mg/kg 土, 速效钾 61.3 mg/kg 土, 有机质 1.2%。供试品种为武育粳 3 号。

1.1 试验设计

1.1.1 苗姿试验同前文^[1]

1.1.2 栽深试验 模拟抛后秧苗入土的深度, 以分蘖节在土中的位置来确定深度。设置 -0.5 (分蘖节在田土表之上, 即凌空于土表)、0、0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、5.0 cm 8 个深度处理, 并以同质秧苗洗根手插为对照 (2 cm 深度)。5 月 20 日播种, 6 月 5 日移栽。每公顷 30 万穴, 每穴 2 苗, 正方形排列。小区面积 20m², 重复 3 次。

1.2 有关测定与分析方法

1.2.1 常规测定与有关的生理生化测定同前文^[1]

1.2.2 稻田温度测定 移栽前, 在抛秧与对照洗根手插稻田内按土表下 -0.5 (悬挂)、1、2、3、4、5、10 cm 不同层次预埋好地温计, 在栽后 7 天, 分蘖盛期、拔节期、抽穗期测定气温及各层次土壤温度。测定时均预先连续保持 3 天 2~ 3 cm 水层基础上, 在晴天连续 2 天每隔 2 小时测定一次。

1.2.3 田间物理性机械限制测定 用富有弹性钢片 (30 cm 长, 0.4 cm 宽, 0.5 mm 厚), 制成“ ”型簧片, 两脚相距 8 cm。以两脚前部 0.4 cm 宽 × 1 cm 长作为测定受力区。据测试两脚压缩受力符合振动受力公式 $F = -kx$, 其中 F 为簧片扩张力 (g); x 为两脚被压缩的距离 (cm); k 为弹性系数, 其值为 22.6 g/cm。测定时两脚适当合拢插入被测土层, 量测簧片被压缩的距离, 并按受力公式计算簧片扩张力。为了避免土层因簧片扩张过大受到的扰动, 插入被测土层的簧片合拢程度依土况调节。

1.2.4 单茎抗折断力和稻穴固持力测定 在蜡熟期, 在典型地段按普查平均茎蘖数选取典型稻株 5 穴, 截取有效穗基部 10 cm 长茎秆 (含叶鞘), 迅速放在间距 6 cm 的两个支点上, 用弹簧秤测定两支中间折断时的承受力 (即单茎抗折断力, g/茎)。在成熟期, 选取典型稻株 30 穴, 用弹簧秤测定每稻穴连根带土拔起所需的力, 即为稻穴的固持力 (kg/穴)。

1.2.5 统计分析 整齐度参数。本试验按 Grawley 采用的方法^[4], 具体如下:

$$\text{平均数} \quad \bar{X} = \sum X_i / n \quad (i = 2, \dots, n)$$

$$\text{变异系数} \quad CV = s / \bar{x} \times 100$$

$$\text{大小不等性参数} \quad Gini = \frac{\sum |x_i - x_j|}{2n^2 \bar{x}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n, \quad Gini = 0 \sim 1)$$

其中, 当 $Gini = 0$ 时不等性最小, 所有性状值相等; $Gini = 1$ 时, 不等性最大, 理论上表

示除1个性状值外,其余性状值均为无穷小。

2 结果与分析

2.1 分蘖节垂直分布特点

典型田块与模拟试验测定表明(表1),抛秧稻分蘖节在土壤里分布状况株间差异大。小苗抛秧稻其秧苗分蘖节可分布在土表以上0.5 cm到土表以下2.5 cm,垂直分布范围达3.0 cm,且主要集中在-0.5~1.0 cm范围内,这与对照洗根手插稻截然不同,洗根手插秧苗分蘖节分布在土表下1.5~3.0 cm内,垂直分布范围仅为1.5 cm,且主要集中在2.0~3.0 cm土层中。中、大苗抛秧稻随抛栽时苗龄增大,大部分植株更趋集中于土表(-0.5~1 cm),而洗根手插苗则相反,分蘖节入土普遍加深。田间抛秧苗分蘖节的垂直分布与抛后苗姿直接相关联,分蘖节在土表(-0.5~0 cm)的植株,基本上全部是平躺苗(占95%以上),入土浅(0~1.5 cm)的植株大部分是倾斜苗(占80%以上),入土深(>1.5 cm)的植株以直立苗居多(占60%以上)。

表1 抛秧稻分蘖节入土状况在田间的分布比例

Table 1 Distribution of tiller nodes location of broadcasting seedling of rice in paddy field

移栽方式 Transplant way	分蘖节在土表分布范围 Range of tiller nodes location (cm)	分蘖节入土状况与田间的分布比例(%) Location and distribution of tiller nodes in soil							
		活棵期 Establishing stage				抽穗期 Heading stage			
		-0.5~0 (cm)	0~1 (cm)	1~2 (cm)	2~3 (cm)	-0.5~0 (cm)	0~1 (cm)	1~2 (cm)	2~3 (cm)
抛秧 Broadcasting	-0.5~2.5	32.5	40.6	25.7	1.2	26.1	43.1	28.3	2.5
洗根手插 Manual	1.5~3.0			29.8	70.2			28.2	71.8

* 塑盘湿润育,小苗(4.2叶);负值表示分蘖节在土表之上。

The experimental material was young seedling with plastic tray raising. Negative value indicated tiller nodes over ground.

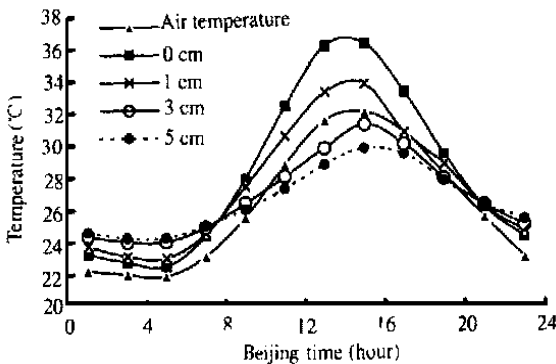


图1 稻田不同深度土壤温度日变化

Fig. 1 Daily fluctuation of temperature at different soil layers in paddy field

此外,抛秧稻分蘖节入土状况还与秧苗带土状况、田烂糊程度、田面水层及抛秧高度等有关,但总体上仍然主要集中在-0.5~1 cm范围内,与常规手插相比,明显浅植。

2.2 分蘖节际生态环境特征

2.2.1 温度 测定表明,抛秧田与手插田同一土层温度及变化基本一致,但不同土层间差异较大。移栽后7天稻田的温度日变化看出(图1,表2),越接近地表,受太阳辐射与气温的驱动,白天升温快,温度高,夜间降温快。在5 cm土层内,白天每接近土表1 cm,平均土温约上升1,夜间每接近1 cm,平均土温下降0.5,但由于水层作用,-0.5 cm处与0 cm处温度基本接近。抛秧稻分蘖节际(集中分布在-0.5~1 cm土层内)与洗根手插秧分蘖节际(2~3 cm)相比,白天温度明显高,晚上温度明显低,日平均温度高0.8左右,昼夜温差变化幅度提高65%。

此外,抛秧稻分蘖节入土状况还与秧苗带土状况、田烂糊程度、田面水层及抛秧高度等有关,但总体上仍然主要集中在-0.5~1 cm范围内,与常规手插相比,明显浅植。

上述耕层土壤温度变化特点是在晴天无云情况下测得的结果, 阴雨天则表现不明显。随着水稻生长, 植株的遮荫, 上述差异则逐渐变小, 如分蘖盛期(6月30日)、拔节期(7月14日)、抽穗期(8月28日)抛秧稻分蘖节昼夜温度日较差分别为 10.0、10.2、5.1, 而手插稻分蘖节昼夜日较差分别为 9.4、5.0、1.8。

表2 稻田耕层不同深度和分蘖节际温度(°C)(1997.6.13)

Table 2 Temperature change at different soil layers and tiller nodes sphere in paddy field

项目 Item	气温 Air temperature	土层深度 Depth of soil (cm)								分蘖节际 Tiller nodes sphere	
										抛秧 Broadcasting	手插 Manual
		0	5	10	15	20	25	30	35		
最高 Max	32.3	36.2	36.5	34	32.5	32.2	30.0	27.6		35.7	32.4
最低 Min	21.8	21.9	22.0	23.1	23.7	24.0	24.3	25.0		22.3	23.9
日较差 Daily range	10.5	14.2	14.5	10.9	8.8	7.2	5.7	2.6		13.2	8.0
平均 Average	27.2	27.9	28.0	27.6	27.0	26.8	26.5	25.8		27.8	26.9

2.2.2 养分 测定分析表明, 不论抛秧稻田还是常规手插稻田, 速效N、P、K均呈现上层土壤高, 下层土壤低, 但在未追施面肥下, 0~5 cm土层内虽然表层土速效N、P、K量稍有增高的趋势, 但基本一致。在追施面肥的当天及随后几天, 水层及土表(0~2 cm)速效N、P、K浓度极高, 而后逐渐趋于平缓(表3)。因此, 抛秧稻分蘖节际(0~1 cm)虽然养分浓度较手插稻(2~3 cm)稍高, 但一次大量追肥时, 也可能会受到过高养分浓度的胁迫。此外, 水稻因灌溉水层, 水中的氧通过扩散进入土层, 可形成表面很薄的氧化层, 其氧化层(Eh > 100 mV)约为 10 mm^[5]。氧化层中, 除O₂量和Eh较高以外, 许多物质以氧化态存在, 如NO₃⁻、Fe³⁺、Mn³⁺和SO₄²⁻等, 其下面的还原层则Eh较低, 还原性物质质量较多。抛秧稻分蘖节较多在氧化层内或稍下, 对水稻发根、出蘖、长叶十分有利。而洗根手插稻分蘖节往往在氧化层下面, 淹水下其氧化还原电位Eh一般小于100, 常常接近0或负值^[5]。

表3 速效N、P、K在各土层中及分蘖节际的含量*(mg·kg⁻¹soil)

Table 3 The rapidly available N, P, K in different soil layers and tiller nodes sphere

位置 Location	施肥前 Before dressing			施肥后 10 小时 10th hours after dressing			施肥后第 8 天 8th day after dressing		
	水解N Hydro- lysable N	速效 Rapidly available		水解N Hydro- lysable N	速效 Rapidly available		水解N Hydro- lysable N	速效 Rapidly available	
		P	K		P	K		P	K
水层 Water layer	72	5.8	120	270	12.2	200	153	8.7	160
土层 Soil layer									
0~1 cm	81	6.7	120	250	11.2	200	154	8.1	161
1~2 cm	78	6.4	123	171	7.1	180	148	7.9	157
2~3 cm	78	6.4	118	120	6.5	150	140	7.6	153
3~5 cm	75	6.3	120	100	6.3	130	135	7.0	152
5~10 cm	70	5.7	98	80	5.8	100	110	6.0	118
分蘖节际 Tiller nodes sphere									
抛秧 Broadcasting	77	6.3	120	260	11.7	200	154	8.4	161
手插 Manual	78	6.4	118	120	6.5	150	140	7.6	153

* 在分蘖期测定。施肥为尿素 10 kg, 复合肥 30 kg(N-P-K 含量为 8-8-8)。

The measure was carried out at tillering stage. The rate of urea and complex fertilizer (N-P-K, 8-8-8) was 10 kg/667 m², 30 kg/667 m² respectively.

2.2.3 分蘖节及土中茎鞘的物理性机械限制 在田土软烂、沉实及硬板时,用簧片扩张时受力情况测定不同土层深度的物理性机械限制,结果表明(表4),在同一土壤深度内,土壤软烂时簧片扩张受力较小,随着土壤沉实硬板,簧片扩张受力迅速增加;随着土壤深度的增加,簧片扩张受力也迅速增加,表明了分蘖节入土深度的不同,分蘖节及土中茎鞘扩长的周际受力上有较大差异。因此抛秧稻分蘖节在土表以上基本上无物理性机械限制,即使在土中,因浅栽受物理性机械限制也明显小于洗根手插稻。

表4 不同土壤深度和分蘖节际簧片(宽0.4 cm)扩张时受力情况*(g)

Table 4 The force of tensionmeter(0.4 cm width)at different soil layers or tiller nodes sphere

位置 Location		土壤软烂时	土壤沉实时	土壤硬板时
土层 Soil layer	分蘖节际 Tiller nodes sphere	Muddy	Settling	Hard
0~1	抛秧 Broadcasting	2.8	7.3	44.7
1~2		6.2	15.7	94.2
2~3	手插 Manual	10.7	24.8	155.9

* 砂壤土,统一有2 cm 水层测定

The measure was carried out under 2 cm water layer in sandy loam.

抛秧后的苗姿有更密切的关联,专门设置的三种典型秧姿模拟试验结果表明(表6),直立、倾斜苗出叶速度快,发根量多,分蘖发生多,而平躺苗无论在株高还是在绿叶数、出叶速度、地上部干重等方面均与手插苗相近。对于大苗,因抛秧苗全为平躺苗,抛后部分小分蘖和叶片死亡,地上部干重略有下降,下降的幅度比手插苗大,随后的生长,平躺苗始终都低于手插苗,这与小苗抛秧的情况不同。

表5 不同栽深秧苗抛后第8天地上、地下部生长状况*

Table 5 The growth status of seedling on 8th day after transplanting under various tiller nodes location

栽深 Depth of tiller nodes (cm)	苗高 Seedling height (cm)	绿叶数 Green leaves (No./plant)	总根 Total root		干重 Dry weight (mg/plant)		出叶速度 Leaf emergence (leaf/day)	成秧率 Plant survial (%)
			(No./ plant)	cm/ plant	根 Root	地上部 Aerial		
-0.5	13.0	2.8	19.2	41.9	10.1	28.4	0.163	77.8
0.0	13.5	3.0	20.7	42.1	10.5	30.1	0.175	96.6
0.5	14.6	3.6	21.5	49.7	10.7	35.1	0.156	99.2
1.0	14.5	3.8	22.6	56.9	10.9	37.8	0.186	99.8
1.5	14.7	3.5	21.4	46.8	11.9	36.3	0.193	100
2.0	14.9	4.0	18.1	40.5	8.9	35.3	0.176	100
3.0	13.2	3.0	17.4	30.9	6.3	32.2	0.113	99.1
5.0	12.8	2.8	15.0	26.9	4.8	20.7	0.101	97.9
CK	14.1	3.7	20.5	48.0	10.5	36.5	0.170	98.1

* 塑盘湿润育。小苗,抛秧叶龄4.0叶;CK为同质洗根手插,栽深2.0 cm。

The experimental material was young seedling with plastic tray raising, leaf age 4.0. CK was manual transplanting with the same seedling but root washed and its tiller nodes depth was 2 cm.

2.3.2 叶系 分蘖节入土深度对叶系生长有显著影响,对于主茎各叶来说,入土过浅(土表之上)和过深(>3 cm),各叶长、叶鞘相对较短,进一步分析群体叶鞘及叶片平均长度表明(表7),分蘖节凌空于土表最短,而对于分蘖节入土的,除5 cm外均表现出入土越深,群体

平均叶片、叶鞘越长, 且变异系数趋小, 这种特性与浅栽小分蘖易滋生有关。

表 6 不同苗姿立苗期植株生长状况*

Table 6 The growth status of various seedling postures during standing and establishing

苗类 Seedling age	苗姿 Seedling posture	苗高 Seedling height (cm)	叶龄 Leaf age	分蘖数 Tiller (No/plant)	出叶速度 Leaf emergence (leaf/d)	新 New (No/Plant)	根 Root (mg DW / plant)	地上部 Aerial (mg DW / plant)
小苗 Young	直立 Upright	16.9	6.0	0.3	0.204	10.1	4.9	73.6
	倾斜 Leaning	15.4	6.0	0.2	0.211	9.0	2.1	66.0
	平躺 Laying	14.0	5.9	0.1	0.190	8.2	2.0	45.3
大苗 Larger	洗根手插 Manual	15.5	5.9	0.1	0.194	8.3	1.4	53.3
	平躺 Laying	35.7	10.2	5.2	0.160	48.3	171.2	1401.0
	手插 Manual	39.0	10.5	6.3	0.163	68.0	180.5	1500.0

* 小苗抛栽叶龄为 4.3, 大苗抛栽叶龄为 8.1。生长状况测定: 小苗在抛后 7 天, 大苗在抛后 14 天。

The young seedling, leaf-age 4.3, was measured at 7th day after transplanting. The Larger seedling, leaf-age 8.1, was measured at 14th day after transplanting.

表 7 不同分蘖节入土深度的群体平均叶片、叶鞘长度*

Table 7 The average length of blade and sheath of leaf under various depth of tiller nodes

入土深度 Depth of tiller nodes (cm)	有效分蘖临界叶龄期 Critical stage of effective tillering				抽穗期 Heading stage			
	叶片 Leaf blade		叶鞘 Leaf sheath		叶片 Leaf blade		叶鞘 Leaf sheath	
	长度 Length (cm)	CV	长度 Length (cm)	CV	长度 Length (cm)	CV	长度 Length (cm)	CV
- 0.5	7.8	82	4.8	66	21.2	43	13.9	22
0	8.2	70	5.1	58	23.3	37	15.1	18
1	9.5	62	6.3	53	24.2	34	16.0	16
2	10.9	53	8.1	49	25.7	31	16.6	16
3	11.5	48	8.3	47	26.5	29	17.0	15
5	10.9	40	7.9	46	25.1	27	16.5	15
CK	11.6	45	8.2	45	26.5	30	17.1	16

* 测定展开叶; CK 为洗根手插。

The full expansive leaf was measured, CK was conventional manual transplanting with the same seedling but its root washed.

茎基展开角大小影响着叶片在空间横向分布与受光量。通过观察表明, 分蘖节入土深度对每穴的茎基展开角影响也很大(表 8)。移栽后, 随着分蘖的发生, 浅栽因土中的茎鞘受土壤物理性机制限制小, 茎基角逐渐增大, 分蘖盛期达到最大, 株型呈辐射状, 拔节之后, 分蘖不再发生, 纵向又迅速生长, 茎基展开角逐渐缩小, 各分蘖节入土深度的处理间趋于一致。

2.3.3 分蘖

2.3.3.1 分蘖发生特性 分蘖节入土深

表 8 不同分蘖节入土深度穴茎基展开角度及变化(度)*

Table 8 The expansive angle of stem at hill base under various depth of tiller nodes (degree)

入土深度 Depth of tiller nodes(cm)	分蘖盛期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage
- 0.5	93	38	20
0	95	38	20
1	80	31	17
2	73	24	16
3	54	22	15
5	45	20	14
ck	56	22	15

度对分蘖的发生有明显的影响(表9),分蘖节入土浅,植株在土中茎鞘受土壤物理机械限制少,叶鞘包裹较松(据田间测定,分蘖节入土0 cm的在主茎节的第8叶的叶枕处,用弹簧秤把该叶鞘拉离主茎苗需19.5 g,而入土3 cm则需67.8 g,相差达3.5倍),加上土表水、肥、气适宜,分蘖发生早,分蘖发生量也多,甚至部分植株小分蘖滋生。

表9 分蘖节入土深度对分蘖发生的影响*

Table 9 The effect of tiller nodes location to tiller emergence

入土深度 Location of tiller nodes (cm)	单株平均茎蘖数 Main stem and tiller per plant (No./plant)						
	6/15(M/D)	6/20	6/25	6/30	7/5	7/10	7/15
- 0.5	1.05	2.3	3.6	5.5	6.5	7.1	7.4
0	1.15	2.8	4.4	6.4	6.9	8.0	8.3
1	1.20	3.1	4.8	6.5	7.0	8.1	8.4
2	1.20	2.5	3.7	5.7	6.3	7.7	8.2
3	1.15	2.3	3.6	5.4	6.1	7.4	7.8
5	1.0	2.2	3.5	5.3	6.0	7.3	7.7
CK	1.10	2.2	3.6	5.3	6.2	7.0	7.2

* 塑盘湿润育,小苗(4.3叶);6月8日抛栽。

Transplanting date was on 8 June with young seedling with the plastic tray raising, leaf-age 4.3

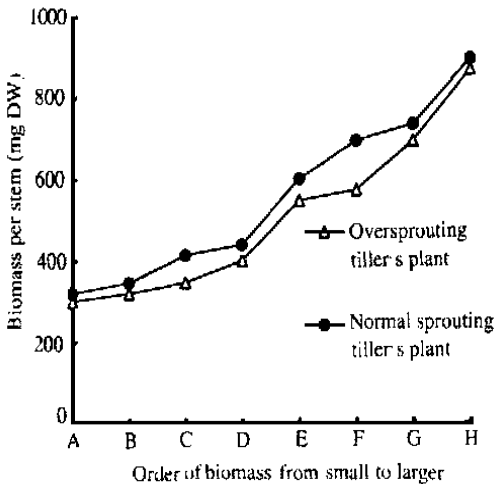


图2 分蘖滋生状况对有效分蘖生长的弱化作用
Fig. 2 The weakening effect of over-sprouting of tiller on growth of effective tiller

* 在拔节期测定,测定时在分蘖节入土0.5~1 cm处理按预期能成穗茎蘖数8个选取无滋生与有滋生小分蘖植株各30穴(60株),其中有滋生小分蘖植株平均滋生小分蘖数为3.6个。

* The 30 hills (60 plants) per treatment, according to over or normal sprouting tiller, were measured at jointing stage and the measuring hill selected, which tiller nodes location was 0.5~1 cm under ground, all was expected 8 ears finally. The over-sprouting tiller's plant occurred averagely about 3.6 very small tillers

地被观察到,进一步分析表明(图2),这些分蘖的滋生,对最终能成穗的蘖位上的分蘖生长有一定的弱化作用。

再从苗姿试验来看,也印证了上述结果。如单株分蘖发生总数上,直立>倾斜>手插>平躺;分蘖起始叶龄,抛秧的各苗姿早于手插,充分说明抛秧稻活棵发根快,分蘖发生早;其中平躺苗还因为主茎叶鞘开张角度大(植株均为扇形),伸长的分蘖易显露出母鞘。至于分蘖的终止叶龄,平躺终止早,直立最迟,平躺约早0.4~0.7个叶龄,而倾斜与手插相近。从有效分蘖终止叶龄看,平躺最早,直立、倾斜与手插相近。最终分蘖成穗率手插>直立>倾斜>平躺。

2.3.3.2 分蘖生长特性 抛秧稻分蘖发生数量大,发生的分蘖除了低位分蘖外,往往一些在手插稻中不易发生的高位次分蘖因母茎鞘短、口松而易抽出滋生,这些分蘖发生后往往仅长出1~2片小叶。测定表明,这些分蘖的滋生主要与浅栽有关。如在拔节期,调查小苗栽深试验发现,分蘖入土深度为-0.5 cm,小分蘖每穴滋生量为0~4个,平均1.9个;入土0 cm为0~6个,平均2.1个;入土1 cm为0~2个,平均0.4个,入土2 cm以上较少,这种情况在中大苗上更为突出,作者曾观察到中苗每穴滋生小分蘖达11个。这种现象在苗姿试验中的平躺、倾斜处理中同样较多

2.3.4 根系 观察测定表明(表 10), 栽深对抛后根系生长有显著的影响。从发根数量上看, 分蘖节凌空于土表不仅易飘摇, 有时不易扎根, 因受温、水、肥的影响大, 受胁迫机率高, 各生育期发根量小, 而分蘖节入土太深(> 3 cm), 发根量也小, 在分蘖节 0~ 3 cm 土层内发根量相对较大, 且亦相对大于洗根手插(分蘖节在 2 cm 左右)。再从根分布看, 整个生育过程中, 栽深越浅, 根系更趋于表土层。

进一步分析与栽深紧密关联的苗姿状况来看(表 10), 立苗期直立、倾斜苗发根快, 新根量多, 平躺苗与手插相近^[2]。此后各苗姿根系生长状况与立苗期变化趋势一致, 例如抛后 15 天、拔节期、抽穗期各苗姿间在 0~ 20 cm 土层内单株根干重表现出一致趋势, 即直立 > 倾斜 > 手插 > 平躺。同时, 根系在各土层的分布, 苗姿间存在明显差异, 0~ 5 cm 土层内的根占总根量的比例, 平躺 > 倾斜 > 直立 > 手插, 而 5~ 10 cm 土层内, 手插 > 直立 > 倾斜 > 平躺。

表 10 抛栽深度对水稻主要生育期根重及其分布的影响*

Table 10 The dry weight and distribution of root system at main growth stages under various location of tiller nodes and seedling postures

处理 Treatment	抛后 15 天 15 th day after transplanting				拔节期 Jointing stage				抽穗期 Heading stage						
	根干重 Weight (g/Plant)	根分布(%) Root distribution				根干重 Weight (g/Plant)	根分布(%) Root distribution				根干重 Weight (g/Plant)	根分布(%) Root distribution			
		A	B	C	D		A	B	C	D		A	B	C	D
分蘖节位置 Location of tiller nodes(cm)															
- 0.5	0.16	93.0	5.8	1.0	0.2	0.83	85.6	8.7	3.9	1.8	1.12	85.8	8.2	4.3	1.7
0	0.23	90.3	6.8	2.5	0.4	1.33	78.1	22.5	6.3	3.1	1.75	79.2	11.3	6.5	3.0
1	0.24	88.0	7.5	3.8	0.7	1.51	71.5	16.5	7.3	4.7	1.78	75.9	12.8	7.1	4.2
2	0.24	83.6	9.8	5.1	1.5	1.56	66.3	20.8	8.0	4.9	1.80	72.7	15.3	7.5	4.5
3	0.22	78.0	11.3	7.0	3.7	1.42	60.8	23.2	10.5	5.5	1.68	66.1	19.7	8.9	5.3
5	0.25	60.9	24.2	10.0	4.9	1.28	53.2	28.1	12.5	6.2	1.39	67.2	32.2	11.6	6.0
ck	0.18	84.1	9.8	5.0	1.1	1.46	65.3	20.2	9.3	5.2	1.71	70.4	17.2	7.0	5.4
苗姿 Seedling posture															
Upright	0.24	88	6.4	3.9	1.7	1.56	73	16.5	5.5	4.3	1.78	75	15.7	7.0	2.3
Leaning	0.22	88	7.5	3.8	0.5	1.42	72	17.4	7.1	4.9	1.62	80	13.0	5.5	1.5
Laying	0.18	92	6.3	1.3	0.4	0.80	82	12.4	3.4	0.2	1.26	85	10.7	3.5	0.8
CK	0.16	85	8.1	5.8	1.1	1.01	64	18.2	10	7.5	1.46	70	19.9	7.7	2.2

* A、B、C、D 分别代表 0~ 5、5~ 10、10~ 15、15~ 20 cm 土层。分蘖节入土深度试验叶龄 4.5 叶, 苗姿组叶龄 3.5 叶。CK 为洗根手插对照。

A, B, C and D represented 0~ 5, 5~ 10, 10~ 15, 15~ 20 cm soil layer respectively. The young seedlings with plastic tray raising were adopted and the leaf-age 4.5 was for the experiment about location, the leaf-age 3.5 for seedling posture. The CK was conventional manual transplanting and the seedling was the same as above but its root washed.

两年的试验一致表明(表 11), 抛秧与手插的根系活力具有各自的特点, 在生育前、中期(分蘖~ 拔节期)抛秧稻的直立、倾斜苗根系活力高于手插稻, 平躺苗的根活力始终小于直立、倾斜和手插苗。而在生育后期(抽穗~ 成熟期)手插稻根系活力下降较快, 抛秧中的直立、倾斜苗下降缓慢, 至成熟期又高于手插, 这可能与直立、倾斜苗发根量大, 且植株新生的上层根比例大有关。从总趋势上看, 各处理拔节到孕穗期均较强, 但抛秧各处理根系活力峰值出现在拔节期, 而手插稻根系活力的峰值出现在孕穗期。

2.3.5 不同栽深植株的整齐度分析 成熟期通过对不同抛栽深度穴间、单茎间六个性状的考察分析可以看出(表 12), 不同栽深植株各性状的整齐度不同。总体上看, - 0.5~ 2 cm 范围内随着栽深整齐度有所提高, 过浅整齐度变劣, 栽深 0.5~ 2 cm 整齐度明显提高, 且相互间差异较小, 栽深大于 3 cm 整齐度又变劣。但这些变化性状间有一定的差异。

表 11 不同秧苗姿态处理的水稻根系活力*

Table 11 The dioxide activity of root system under various seedling posture

 $(\alpha\text{-NA } \mu\text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1})$

处理 Treatment	抛后 15 天 15 th day after transplanting	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
手插 Manual	37.18	53.66	55.51	39.22	37.65
直立 Upright	38.57	59.59	51.73	48.71	45.31
倾斜 Leaning	38.34	59.31	52.17	49.23	47.82
平躺 Laying	35.63	48.90	47.96	32.95	30.80

表 12 成熟期不同抛栽深度植株的整齐度分析*

Table 12 The uniformity of traits of plant under various tiller nodes locations at maturity

栽深 Location of tiller nodes(cm)	穴穗数 Ears per hill				穴鲜重 Fresh weight per hill(g)			
	\bar{X}	Gini	CV	Range	\bar{X}	Gini	CV	Range
- 0.5	8.69	0.144	26.22	4~15	51.6	0.159	28.83	50~80
0.0	9.15	0.136	24.11	5~15	51.6	0.159	28.43	50~80
0.5	9.55	0.118	21.01	5~13	57.9	0.130	23.25	45~90
1.0	9.00	0.115	20.96	5~14	54.1	0.122	22.98	50~85
1.5	8.91	0.121	21.84	5~15	55.2	0.126	22.58	40~90
2.0	8.43	0.135	21.19	5~16	52.5	0.135	21.56	40~100
3.0	8.33	0.131	21.78	5~13	55.7	0.139	23.84	50~80
5.0	7.50	0.130	23.70	2~10	50.6	0.136	24.80	30~70
CK	9.20	0.142	25.65	4~16	56.6	0.134	22.79	50~95

栽深 Location of tiller nodes(cm)	茎高 Stem height(cm)				单茎生物重 Biomass per stem (g)			
	\bar{X}	Gini	CV	Range	\bar{X}	Gini	CV	Range
- 0.5	82.4	0.045	8.62	46~98	5.283	0.167	29.83	1.58~5.53
0.0	92.6	0.038	7.43	58~102	5.572	0.167	29.95	0.94~9.62
0.5	102.8	0.036	6.60	80~120	5.749	0.172	30.85	1.34~9.46
1.0	102.9	0.034	6.16	83~117	5.644	0.141	25.49	1.37~9.13
1.5	88.2	0.030	6.50	59~105	5.668	0.149	26.00	1.16~9.60
2.0	93.0	0.030	5.98	56~107	6.451	0.157	24.85	1.80~10.1
3.0	94.0	0.032	6.78	68~104	6.203	0.169	27.65	1.02~12.3
5.0	93.0	0.037	7.20	85~103	5.280	0.152	27.81	0.98~9.5
CK	86.9	0.030	9.10	54~101	6.003	0.143	26.11	1.43~9.49

栽深 Location of tiller nodes(cm)	单穗粒重 Grain weight per ear (g)				每穗粒数 Grains per ear			
	\bar{X}	Gini	CV	Range	\bar{X}	Gini	CV	Range
- 0.5	2.527	0.186	33.07	0.57~4.73	101.30	0.162	29.19	28~193
0.0	2.530	0.166	29.83	0.33~4.01	96.00	0.167	30.26	20~192
0.5	2.719	0.183	32.72	0.07~4.50	104.84	0.175	31.24	13~90
1.0	2.623	0.161	28.69	0.48~4.39	104.22	0.148	26.26	33~167
1.5	2.679	0.178	32.28	0.26~5.84	104.73	0.160	26.92	22~176
2.0	3.014	0.159	29.02	0.28~4.65	110.82	0.150	27.56	22~174
3.0	2.971	0.168	30.03	0.66~5.00	116.09	0.150	27.69	30~232
5.0	2.980	0.160	31.10	0.67~5.10	110.20	0.160	28.10	40~210
CK	2.871	0.165	29.78	0.92~4.78	112.93	0.145	25.93	31~168

* 每穴均为 2 本。 There were 2 plants in a hill

抛栽稻的三种苗姿整齐性也是不同的。通过对穴穗数、穴粒重、株高、穗粒数、穗粒重和单茎生物重等六个性状的分析表明, 无论是 Gini 值还是 CV 值, 都是平躺> 倾斜 直立 手插, 表明增加直立苗、倾斜苗的比率是提高抛秧水稻整齐度的主要途径, 平躺苗是增加抛秧稻不整齐性的主要原因, 因而在栽培上应减少平躺苗^[3]。

2.3.6 产量及其结构 分析不同栽深处理水稻产量及其结构结果表明(表 13), 栽深对产量有较大的影响, 过深、过浅都不利于获得高产。对产量的方差分析表明, 1.0、1.5 cm 抛栽深度的产量最高, 两者之间的差异不显著, 但与小于和大于此深度的产量差异显著, 同时也显著高于常规手插苗的产量。栽深与经济产量关系的方程为 $y = 521.97 + 103.17x - 33.740x^2$ ($r = 0.91^{**}$), $x_{opt} = 1.53$ cm, 表明栽深与产量呈极显著的相关, 最适栽深在 1.5 cm 左右。进一步分析产量的构成因素, 穗数与栽深的方程为 $y = 22.58 + 0.588x - 0.503x^2$ ($r = 0.798^{**}$), $x_{opt} = 0.6$ cm, 由方程中可知, 穗数与栽深呈极显著相关, 深度 0.6 cm 时亩穗数较高, 表明栽深稍浅有利于穗数的形成, 每穗粒数与栽深的方程为 $y = 93.30 + 19.269x - 5.086x^2$ ($r = 0.98^{**}$), $x_{opt} = 1.89$ cm, 表明栽深与穗粒数的相关性极显著, 在 1.89 cm 时穗粒数较高, 可见对于穗粒数, 栽深稍深些有利于大穗。栽深处理千粒重和结实率差异不大。

表 13 栽深与苗姿产量及其结构*

Table 13 The yield and its component under various tiller nodes locations and seedling postures

栽深或苗姿 Tiller nodes location or seedling posture (cm)	穗数 Ear ($10^4/667\text{ m}^2$)	穗粒数 Grains (No/ear)	结实率 Full ripened grain (%)	千粒重 10^3 grains weight (g)	实际产量 Actual yield (kg/667 m^2)	经济系数 Harvest index
- 0.5	23.8	79.8	96.7	26.9	478.8 C	0.40
0.0	25.1	86.2	94.3	26.8	491.4 C	0.39
0.5	25.3	95.7	94.8	26.5	553.5 B	0.40
1.0	26.2	103.6	94.6	26.8	606.3 A	0.47
1.5	24.9	107.6	94.6	26.8	606.3 A	0.49
2.0	23.7	104.1	94.8	26.4	571.9 B	0.43
3.0	22.3	100.2	95.5	27.6	531.7 B	0.42
5.0	20.2	103.1	94.2	27.1	521.2 BC	0.43
2(CK, 手插)Manual	22.3	102.2	95.0	26.7	556.1 B	0.42
直立 Upright	31.13	95.36	91.76	24.82	670.83 A	0.46
倾斜 Leaning	32.00	91.88	89.17	25.15	647.92 A	0.46
平躺 Laying	28.65	93.88	86.73	24.75	577.08 C	0.40
手插 Manual	25.85	101.82	93.30	25.36	610.42 B	0.43

* 栽深 Location of tiller nodes, $LSD_{0.05} = 39.2$; 苗姿 Seedling posture, $LSD_{0.05} = 27.1$ 。

在苗姿上, 抛秧的直立、倾斜、平躺苗的每亩穗数均高于常规手插稻, 但每穗粒数和千粒重均低于手插稻。对各处理产量进行方差分析可知, 直立、倾斜苗差异不显著, 但它们与手插苗和平躺苗差异达到极显著水平, 手插与平躺苗的产量差异也达到极显著水平, 亩产顺序为直立 倾斜> 手插> 平躺。由此可以看出, 减少平躺苗所占比例, 增加直立倾斜苗率, 是提高抛秧质量的重要指标。

2.3.7 抗倒性 抛秧由于入土较浅, 容易发生根倒伏, 因而如何提高抛秧的抗根倒力非常重要。分析不同抛深植株的抗倒力结果表明(表 14), 随着抛栽深度的增加, 植株在土壤中的固持力增强, 分蘖节及茎在土中的重量逐渐增大, 20 cm 土层中根干重则呈下降趋势, 但植株地下部总干重(土表下分蘖节及茎干重+ 根干重)仍呈上升趋势。植株土上与土下干重的比率趋小, 即土下所占比重增大, 抗根倒能力增强。模拟自然风, 用木棍顺一个方向按与地

面夹角 60°、50°、30°、0° 连推 3 次, 结果表明(表 14)栽深大于 1.5 cm 处理植株有较好的抗倒性且过夜后即能恢复; 而栽深小于 1.5 cm, 抗倒性差, 特别是凌空于地表(-0.5~0 cm)者过夜后不能恢复。可见加大抛栽深度对抛秧稻抗倒伏群体的形成具有重要意义。

表 14 不同抛栽深度植株抗倒性分析*

Table 14 The resisting power of the tiller nodes location to lodge

栽深 Location of tiller node(cm)	干物重 Dry matter(g/hill)				地上部干重 土下干重 (A/U)	固持力 Fixing force (kg/hill)	恢复度 Recovery after pushing three time			
	地上部 A		土表下分蘖 节及茎 T+U S 根 U				推压 60° Pushing			
	地上部 A	土表下分蘖 节及茎 T+U S	根 Root	土表下 U	50°	30°	0°			
-0.5	20.99	0.31	1.10	1.41	14.88	31.38	70	60	36	5
0.0	20.81	0.59	1.21	1.80	11.56	31.25	80	70	45	20
0.5	22.68	0.78	1.20	1.98	11.45	35.25	95	85	50	30
1.0	20.90	0.89	1.09	1.98	10.56	36.50	100	95	60	35
1.5	20.33	1.01	0.93	1.94	10.48	36.75	100	95	65	40
2.0	19.79	1.31	0.73	2.04	9.70	37.25	100	95	75	50
3.0	20.34	1.62	0.77	2.39	8.51	40.75	100	100	80	50
2(CK, 手插) Manual	20.78	1.20	0.89	2.09	9.94	38.63	100	98	75	50

* A = Aerial, T+U S = Tiller nodes+ Stem underground, U = Underground (included T+U S+ Root)

在苗姿间(表 15), 手插与抛秧直立苗处理几乎未发生倒伏现象。倾斜苗发生小面积局部倒伏, 平躺苗倒伏面积最大, 且倒伏程度重, 这可能与直立和手插苗的根系入土深, 单穴固持力大, 而平躺苗根大部分在 0~5 cm 土层中, 单穴固持力小, 易发生根倒有关。抛秧稻各苗姿的茎秆抗折断力均较强, 不易发生茎倒。

表 15 水稻抛植姿态抗倒性

Table 15 The resisting power of the seedling posture to lodge

苗姿 Seedling posture	单茎抗折断力 Break force (g/stem)	单穴固持力 Fixing force (kg/hill)	倒伏度* Degree of lodge	倒伏比例 Rate of lodge
直立 Upright	360.2	24.3	0	0
倒斜 Leaning	355.7	23.1	2	1/16
平躺 Laying	349.3	20.0	5	1/2
手插 Manual	350.9	24.3	0	0

* 倒伏度: 根据茎秆相对应垂直方向的倾斜角度分为 6 级: 0 级(0 度)、1 级(0~18 度)、2 级(18~36 度)、3 级(36~54 度)、4 级(54~72 度)、5 级(72~90 度), 0 级指未倒伏, 5 级指严重倒伏。

Degree of lodge was classified 6 grades according to the angle between stem with perpendicular per 18 degree. The 0 order is upright, 5 order is laying down.

3 讨论

3.1 关于倒伏问题

抛秧稻栽深较浅, 倒伏问题突出, 故倍受关注。研究与生产实践表明, 抛秧稻倒伏形式虽然多种多样, 但主要是根倒伏, 这与移栽稻明显有别。作物倒伏问题已有较多的研究^[6, 7], 但在水稻上, 以往较侧重于移栽稻常出现的茎倒伏, 通过对茎的研究, 基本明确了茎倒伏的生态生理机制, 并围绕茎的形、质改善, 提出了在一定产量水平下品种、栽培、化控的防倒对策。与茎倒伏相比, 水稻根倒伏研究甚少, 但从已有的研究与生产实践来看, 根倒伏直接与茎、根、土有关^[2, 3], 地上部茎秆粗壮, 根系发达以及土壤沉实可明显提高抗根倒伏能力。总

体上看, 抛秧稻抗根倒伏的生态生理机制知之甚少, 因而借鉴麦类、直播稻等在根倒伏方面的研究方法^[6, 8], 有必要从以下 5 个方面加以深入研究, 即: 抛秧稻植株地上部及根系的形、质、量与根倒伏的关系; 冠根比率、根土互作与根倒伏的关系; 群体结构与生理活性与根倒伏的关系; 土壤物理特性(塑性、紧实度)与根倒伏的关系; 根倒伏过程的茎—根—土整体运动规律及抗根倒伏能力的构成。通过以上的研究, 揭示抛秧稻根倒伏的生态生理机制, 提出预防抛秧根倒伏的途径, 为抛秧大面积高产稳产提供技术保障。

3.2 关于茎蘖生长弱化与整齐度问题

抛秧茎蘖生长弱化现象在本研究中已经叙述, 并从生态上明确了过于浅栽及土壤物理性机械限制小(或无)是造成小分蘖滋生的重要原因, 但其内在的生理机制还不清楚, Engels 证实了生长点(分蘖节)周际温度变化可以改变冠与根的物质分配比例^[9]。抛秧稻分蘖节裸露或半裸露, 加上株型呈辐射状, 分蘖节处可以直接受光, 即使分蘖节入土, 1%~2%的光(以红外光谱为主)可以入射至土层 2~5 mm^[10]。分蘖节在光的作用下, 叶片、叶鞘的纵向生长受抑^[11]。抛秧茎蘖生长弱化, 小分蘖滋生, 增加了群体结构的冗余^[4], 不仅影响了穗形, 而且加大了穴内茎蘖间的差异, 对产量形成有负面效应。

抛秧稻穴间、株间及单茎间有关性状的不整齐性是一个基本属性, 在定型株高(在齐穗期后)表现较为直观, 因而冠层错落。本研究已初步阐明, 这除了由于浅栽且深浅不一等原因引起茎蘖生长弱化外, 还有一个重要原因是秧苗在地面水平向上的分布格局, 有关这方面的研究将另方报道。研究分析表明, 水稻群体中有关性状不整齐性是绝对的, 整齐性是相对的。从整齐度与产量及其形成关系看, 抛秧稻产量提高要求具备相对的整齐度, 即一定条件下存在一个适宜程度的不整齐性, 只要这种不整齐性不负向影响群体生育质量, 甚至有利于高产。例如, 由于冠层结构的错落, 在基部有一定数量的光斑(即透光洞), 这有利于整个冠层的生长发育^[11], 使抛秧光合层厚且匀称配置, 提高空间利用率, 可实现单位面积穗数较多的情况下, 获得相对较大的穗形, 使二者在相对较高水平上得到协调统一, 达到高产。但不整齐性超过这个一定的适宜程度时, 对群体质量就会导致严重的负向效应, 形成低产。本研究的结果也证实了这一点。总体上来看, 抛秧稻虽比手插稻不整齐(品种间差异大), 一些明显比手插不整齐的群体, 也可获得与手插稻相似的产量。但随着产量水平的提高, 抛秧稻与手插稻的不整齐性差异缩小。由于缺乏对抛秧稻不整齐形成过程及与产量形成相互关系的认识, 尚不能提出抛秧稻一定适宜程度不整齐性的数量指标。

参 考 文 献

- 1 戴其根, 张洪程, 苏宝林等. 作物学报, 2001, 27(3): 278~285
- 2 张洪程, 戴其根, 钟明喜等. 中国农业科学, 1993, 26(3): 39~49
- 3 戴其根, 张洪程, 苏宝林. 耕作与栽培, 1998(5): 18~19, 63
- 4 Grawley M J. *Plant Ecology*. New York: Blackwell Scientific Publication, 1986: 96~100
- 5 李庆远. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992: 208~224
- 6 Crook M J, A R Ennos. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 144: 1219~1224
- 7 Pinthus M J. *Advance Agronomy*. 1973, 209~263
- 8 Terashina K. *JARQ*, 1997, 31: 155~162
- 9 Engels C. *Annals of Botany*, 1994, 73: 211~219
- 10 Tang Yanhong. *Plant Ecophysiology*. New York: John Wiley & Sons, 1996: 3~40
- 11 上地由朗, 林茂一, 堀江武. 日作纪, 1993, 62(2): 164~171