

灌溉稻田水稻旱作技术要素及产量形成

王 熹, 陶龙兴, 黄效林, 闵绍楷, 程式华

(中国水稻研究所 / 水稻生物学国家重点实验室, 杭州 310006)

摘要: 研究灌溉稻田水稻旱作法旨在构建类似旱地作物高产的稻作技术体系, 以旱作求节水、以高产求效益。水稻旱作法是吸取我国稻作传统技术、新应用技术及强化栽培技术之精华整合而成, 其核心是限量用水、湿栽旱管与选用超级杂交稻、培育短龄壮秧带土移栽及稀植等 4 个要素。研究表明, 灌溉稻田水稻旱作法的技术框架基本可行, 收到了高产、节水与改善稻米品质的效果。超级杂交稻组合两优培九、协优 9308 的旱作产量达 9~10 t·ha⁻¹, 节约用水 45%, 灌溉水利用率高达 3.0~4.0 kg·t⁻¹, 并提高稻米的加工品质与营养品质。但与常规灌溉水稻相比, 旱作水稻的穗型变小, 结实率与千粒重下降。因此, 本旱作法的几个主要技术要素有待改进, 如超稀植的程度与提高结实率的方法。初步提出“湿栽护苗、旱管培根、沟水育穗、干润防衰”的湿栽旱管、限量用水技术的 16 字诀, 就灌溉田旱作稻产量形成的特点作了初步的描述。

关键词: 灌溉稻田; 水稻旱作法; 强化栽培; 产量形成; 水稻

Study on Non-flooding Farming Technique in Paddy Field: Technique Specification and Formation of Yield Components

WANG Xi, TAO Long-xing, HUANG Xiao-lin, MIN Shao-kai, CHENG Shi-hua

(State Key Laboratory of Rice Biology / China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006)

Abstract: Non-flooding farming technique in irrigated paddy field, which can be called Non-flooding rice farming (NFRF for short), is a new rice cultivating system. That is, to plant and cultivate rice in a wheat-cultivation way, and to achieve high economic benefits by both high yield potential and water use efficiency. The key points of the NFRF are: (1) limited water application, water-flooded-transplanting and non-flooding water management; (2) selection of super hybrid rice; (3) short seedling duration and transplanting the seedling wrapped with nursery soil on its root; (4) larger-space transplanting. It was demonstrated that the NFRF was practicable, and some good effects could be acquired such as high grain yield, water-saving and improved grain quality. A yield potential of 12-13 t·ha⁻¹ for Liangyoupeijiu or Xieyou9308 was produced by NFRF with 45% less water usage, and a 3.0-4.0 kg·m⁻³ high water efficiency. At the same time, panicle type, seed setting rate and 1000-grain weight were lower than that of the conventional irrigated rice farming (CIRF). Therefore, the NFRF component need improved, among which, the plant spacing and lower seed-setting rate are to be studied. Some special water management in main field and yield components were also discussed.

Key words: Irrigated paddy field; Non-flooding rice farming; System of rice intensification; Yield formation; Rice (*Oryza sativa* L.)

全球面临水资源短缺危机。我国每年农用水取水量占总取水量的 80%, 水稻是我国的主要粮食作物, 其生产用水占农业用水量的 70%^[1,2], 以淹水种植为主的灌溉稻田技术体系, 水分利用率为 30%~40%, 水资源浪费严重^[2], 还对周边水域有“非点

源污染”问题^[1,2]。改革稻田的旧灌溉技术体系, 以确保粮食安全, 力求环境友好, 是关系到我国国民经济持续发展的一项战略任务。为此, 以浅湿灌溉, 旱育稀植, 薄膜(或稿秆)覆盖为主要技术内容的水稻旱种技术应运而生^[3~5]。采用这些方法具

收稿日期: 2002-03-22

基金项目: 农业部跨越计划资助项目(99-01)和浙江省“九五”重点资助项目(96110215)

作者简介: 王 熹(1937-)男、江苏兴化人, 研究员, 主要从事作物生理学研究。Tel: 0571-63370363; Fax: 0571-63372740

明显的节水效果，但存在不同程度的易倒伏、费工多、覆盖物污染等问题^[4,5]。笔者在中国超级稻高产技术集成与示范研究中^[6,7]，对超级杂交稻营养生长与生殖生长优势，超级杂交稻根系生长与生理活性优势^[8]以及超高产潜力有进一步了解。借鉴近年亚非国家广为试验研究的水稻强化栽培体系(system of rice intensification)^[8]，提出了一种类似水浇地麦作高产技术的灌溉稻田单季水稻高产旱作法，以水耕作畦、湿栽旱管、限量用水，选种超级杂交稻，培育短龄壮秧、带土移栽和超稀植为核心技术的灌溉稻田稻作新技术，收到了高产高效，节水省本、环境友好之功效。本文系该项研究的部分结果。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试品种以亚种间或品种间、两系或三系超级杂交稻为主要试材，其中主试组合为两优培九、协优 9308，其它为副试组合有 II 优 162、汕优 63、协优 2600、II 优 281、加优 99，以及中早 1 号、三元 3 号等常规籼稻品种。

供试植物生长物质有 15% 可湿性粉剂多效唑(江苏张家港七洲农药化工有限公司产品)。

1.2 试验方法

试验于 2000 年进行预备试验，2001 年为正式试验，在中国水稻研究所农业试验场进行，土质为粘质壤土，pH 6.1，有机质 2%，全氮 0.12%。冬前翻耕晒垡，春季翻耕前施用以猪、鸡厩肥为主要材料的有机堆肥，每公顷 3.0 t，含 N、P₂O₅、K₂O 之配比 5:1:1。移栽后 5 d 每公顷施用尿素 90 kg。拔节期施用过磷酸钙每公顷 300 kg、氯化钾 300 kg 作穗肥，合计每公顷施用 N 180 kg、P₂O₅ 90 kg、K₂O 150 kg。

试验包括大区示范与小区试验。两优培九、协优 9308 大区示范，每区面积为 0.05 ha，II 优 162、汕优 63 等为 0.02 ha，未设重复。两优培九、协优 9308 的种植密度等项试验小区面积为 26.6 m²，重复 4 次，顺序排列。

5 月 20 日播种，半旱育秧，除秧龄试验外，移栽时秧龄均为 15 d，2~3 叶，小苗带土移栽，薄水浅插。移栽方法均为畦栽，畦宽 50 cm，畦沟深 8~10 cm，畦距(即沟宽)50 cm，穴距 33.3 cm，每穴中间隔 2~3 cm 栽 2 苗，种植密度为每公顷 6 万穴。以常规灌溉法为对照，半旱育秧，秧令 30 d，行株距 30 cm

× 18.5 cm，每公顷种植 18 万丛，每穴移栽 1 苗(带 2~3 个蘖)。

植保措施、测产、产量结构考种等均同常规农艺试验。

水浆管理见 2 节。旱作法与常规灌溉法用水量均用梯形量水堰测定(农田灌溉学常用法)。木制梯形量水堰安装于稻田进水口，令水通过量水堰进行灌溉，记录灌溉时间，按下公式计算每次灌溉用水量：每次灌溉用水量(M³)=流量(L·S⁻¹)×灌溉时间(S)/1000 流量(L·S⁻¹)。依据堰水深由《梯形量水堰(自由流)流量表》查得，因该流量表根据公式 Q=1.86 BH^{3/2}，并假设堰宽为 100 cm 而制成，故查得的流量，须乘实际堰宽才能得出实际流量分蘖及分蘖成穗：移栽时就其主茎和秧田分蘖分别挂牌标明，并于移栽后定点 10 丛，移栽后每周挂牌标明新生分蘖出生时期，并于成熟期分别考查各期分蘖的成穗^[7]。

优劣势粒灌浆势：优劣势粒分样方法及烘干称重方法及条件参照文献[6]、[7]。

2 结果与分析

2.1 灌溉稻田水稻旱作法的技术

灌溉田水稻旱作法是借鉴水稻强化栽培(SRI)技术思路，由我国传统的稻作农业技术和成熟的实用新技术构建而成(图 1)。

灌溉田水稻旱作法核心技术是：选用超级杂交稻、培育短令壮秧带土移栽、超稀植以及水耕作畦、润栽旱管、限量用水技术等 4 个要素。

限量用水技术含义是：干耕作畦、沟水进出，湿栽旱管。湿栽旱管灌溉技术为 16 字诀：湿栽护苗、旱管培根、沟水育穗、干湿防衰。

灌溉稻田水稻旱作法的辅助技术有两类：

第一类为传统农艺技术：盐水选种(盐水比重为 1.01)，用浸种灵浸种、催芽，肥泥苗床育秧。冬前翻耕晒垡，春耕重施有机肥，人工中耕除草，清沟排水。移栽后 5 d 施用尿素蘖肥，拔节期追施磷钾穗肥。

第二类为实用新技术：播种后 5 d(1 叶 1 心期)施用多效唑，培育壮秧，移栽后不败苗。

2.2 灌溉稻田水稻旱作法技术要素与水稻产量形成

2.2.1 旱作法选用的品种及其产量与产量结构 本项试验选用我国当前主要的亚(品)种间杂交组合如两优培九、协优 9308、II 优 162、汕优 63 等。

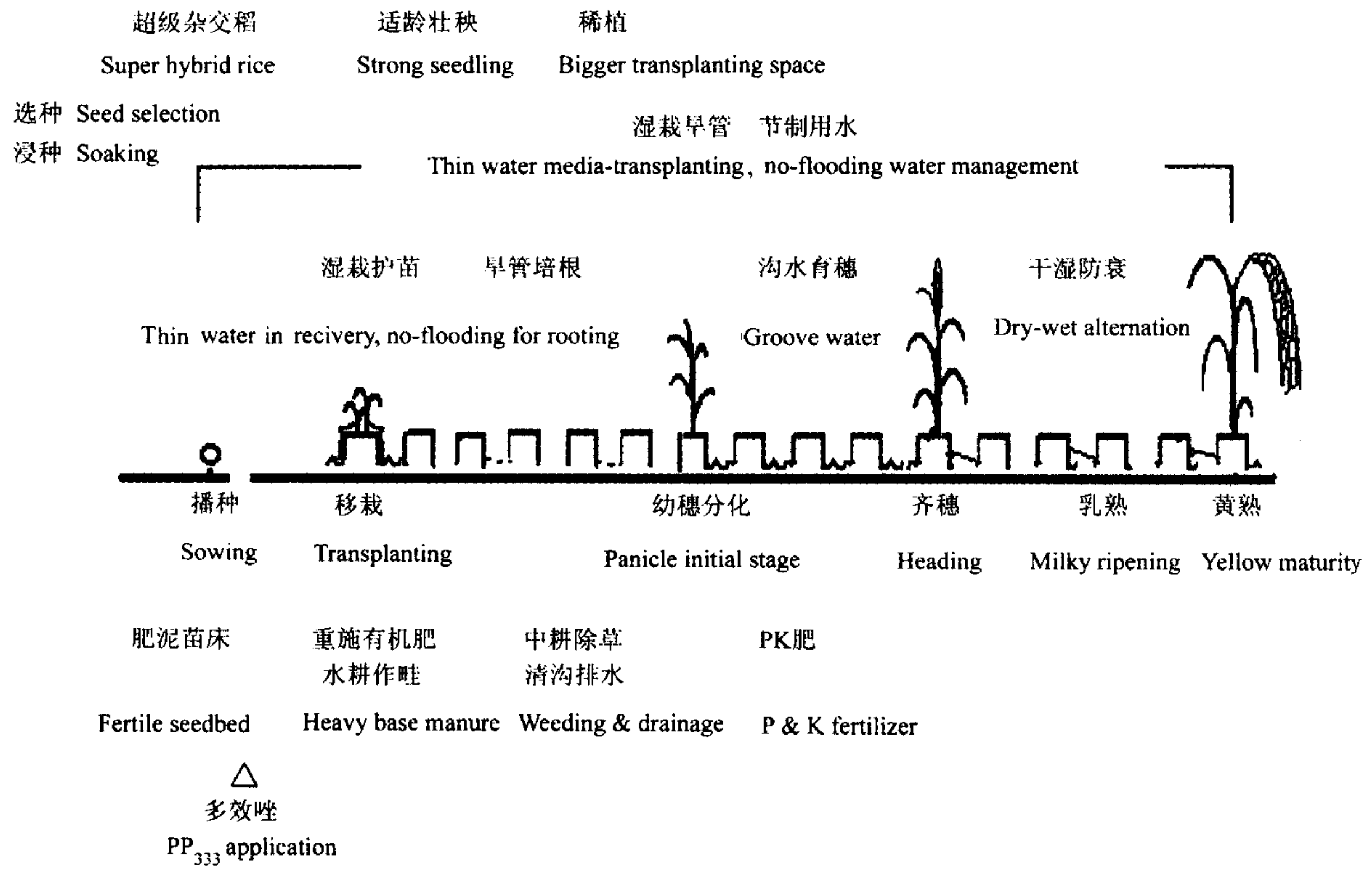


图 1 灌溉稻田水稻旱作法

Fig.1 Non-flooding rice farming on irrigated paddy field

从试验结果(表 1)看出:(1) 主要供试组合的产量水平约为 9~10 t·ha⁻¹;(2) 各主要供试组合的多数旱作法产量水平低于常规灌溉法;(3) 以产量结构选用组合的旱作法产量水平高于常规灌溉法的关键是组合的分蘖性, 分蘖性较强的两优培九、汕优 63旱作法, 穗数均高于常规灌溉法, 产量水平达到或超过常规灌溉法, 而少蘖大穗型组合如协优9308、II 优 162 则反之;(4) 在本试验条件下, 籼稻品种中旱 1 号, 尤其是大穗型的三元 3 号其产量均较低。

除供试组合加优 99 外, 几乎无例外地是各选用组合的旱作法水稻比常规灌溉法水稻穗型变小, 结实率与千粒重下降。究其原因是各组合穗型组成结构有了较大变化:(1) 每穗总粒数大于 250 粒的大穗比例减少, 两优培九减少了 10.9 个百分点, 协优 9308 变化不大;(2) 每穗总粒数小于 100 粒的小穗比例增加, 协优 9308 增加 10 个百分点, 两优培九增加 9.3 个百分点;(3) 协优 9308 每穗总粒数 150~250 粒的穗仅为穗组成的 70%, 比常规灌溉法水稻下降了 17 个百分点, 旱作两优培九占 54.8%, 比常规灌溉法水稻下降 20 个百分点。这些差异多数达到显著, 有些达到极显著。

2.2.2 旱作法水稻适宜的种植密度 马达加斯曾以每公顷种植 6 万丛(单本插)的超稀植, 可获得约 15

t·ha⁻¹ 的产量水平^[8]。灌溉稻田水稻旱作法, 种植超级杂交稻应采取怎样的适宜密度才能达到高产水平。试验之初, 笔者估计单本插每公顷 6 万丛极可能因穗数不足而难以达到高产目的, 尤其是少蘖大穗型的协优 9308、II 优 162 等组合似更难奏效。因而设计了“双龙出海”的种植方法, 保持行距 50 cm 不变, 调节株距为 33.3、26.6、22.2、19.0 和 16.6 cm, 构成每公顷 6、7.5、9、10.5 和 12.0 万丛的不同密度, 以 6 万丛为对照(表 2)。

从表 2 可以看出:(1) 供试两组合适度增加种植密度可以明显增加产量, 产量水平可达到 12~13 t·ha⁻¹, 协优 9308 以每公顷 9 万~10.5 万丛为最佳种植密度; 两优培九以每公顷 7.5 万~9 万丛为最佳种植密度 (2) 两优培九与协优 9308 每丛穗数变化幅度分别为 29.4% 与 34.7%, 每公顷穗数变化幅度分别为 35.6% 与 27.9%, 表明达到高产的穗数, 协优 9308 主靠落地苗数调节, 两优培九主靠发棵能力, 即相比较而言, 协优 9308“靠插”, 两优培九“靠发”(3) 两组合均随种植密度增加, 每穗总粒数下降, 协优 9308 变幅为 29.3%, 两优培九的变幅为 22.8%; (4) 协优 9308 的最佳产量结构为每平方米 250~300 个穗, 85% 结实率, 千粒重 28 g, 两优培九则需要每平方米 350~400 个穗, 结实率达到 80%, 千粒重 27 g。

表 1 灌溉田水稻旱作法选用组合的产量水平¹⁾

Table 1 Grain yield level of non-flooding rice on irrigating field

组合 Combination or variety	种植方法 Cultivation method	穗数		每穗总粒数 Spikiest per panicle	每穗实粒数 Filled grains per panicle	结实率 Seed setting rate(%)	千粒重 1000 grain weight (g)	理论产量		实际产量	
		No. of panicle** (Per hill) 1×10^4 (t·ha ⁻¹)						Theoretical grain yield (t·ha ⁻¹)	(%)	(t·ha ⁻¹)	(%)
协优 9308	NFRF	32.2	193.2	194.2	163.2	84.0	28.2	8.90	80.8	8.75	85.7**
Xieyou9308	CIRF	16.3	195.6	219.6	192.7	87.7	29.2	11.01	100	10.21	100.0
两优培九	NFRF	46.8	280.8	165.8	139.8	84.3	26.8	10.52	100.9	11.00	107.8*
Liangyoupei jiu	CIRF	21.5	258.0	171.2	148.0	86.4	27.3	10.42	100	10.20	100.0
II 优 162	NFRF	39.6	237.6	163.2	131.2	80.3	28.5	8.88	98.2	8.64	95.4
Ilyou162	CIRF	16.2	194.4	182.3	152.0	83.4	30.6	9.04	100	9.06	100.0
汕优 63	NFRF	45.2	271.2	150.0	127.0	84.6	27.5	9.47	101.5	9.49	104.2
Shanyou63	CIRF	19.6	235.2	167.5	142.7	85.2	27.8	9.33	100	9.11	100.0
协优 2600	NFRF	31.5	189.0	163.2	131.2	80.3	28.5	7.07	97.4	8.92	97.6
Xieyou2600	CIRF	18.1	217.2	182.3	152.3	83.4	30.6	10.12	100	9.14	100.0
II 优 281	NFRF	36.6	219.6	167.2	146.1	87.3	24.4	7.82	74.4	6.35	89.6
Ilyou281	CIRF	19.4	232.8	184.0	129.6	70.3	26.6	8.03	100	7.08	100.0
加优 99	NFRF	40.5	243.0	183.2	140.2	76.5	23.1	7.87	107.7	7.72	99.6
Jiayou99	CIRF	16.2	194.4	175.6	151.2	86.1	24.8	7.31	100	7.75	100.0
中早 1 号	NFRF	34.8	278.4	170.0	99.9	61.7	24.9	2.82		4.82 ^l	
Zhonghan1											
三元 3 号	NFRF	39.2	235.2	163.8	138.1	84.5	27.5	8.93		4.28 ^l	
Shanyuan3											

¹⁾ NFRF: 旱作法 Non-flooding rice farming; CIRF: 常规灌溉法 Conventional irrigating rice farming; ^l: 倒伏 Lodging; *, ** 在 5% 与 1% 水平下的显著性 Signification at 5% and 1% levels respectively. 下同 The same as below

表 2 种植密度与旱作法水稻产量

Table 2 Planting density and grain yield of non-flooding rice farming

组合 Hybrids	种植密度 Planting density (10^3 hill·ha ⁻¹)	产量 ¹⁾		穗数 No. of panicles panicle (Per hill)	每穗总粒数 Spikiest per per (10^4 ·ha ⁻¹)	每穗实粒数 Filled-grains panicle	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1 000-grain weight (g)
		Grain yield						
		(t·ha ⁻¹)	CK (%)					
协优 9308 Xieyou9308	60	8.37	100.0	32.1	192.6	189.1	86.2	27.0
	75	8.95	106.9**	31.8	238.5	194.2	84.0	28.2
	90	10.02	119.7**	33.4	300.6	186.6	83.6	28.7
	105	11.98	143.1**	25.4	266.7	164.3	87.8	27.6
	120	8.66	102.7	23.4	280.8	137.2	80.9	27.4
两优培九 Liangyoupei jiu	60	11.08	100.0	50.9	305.4	175.0	82.6	27.2
	75	12.62	113.8**	47.4	355.5	161.8	84.6	26.8
	90	13.60	122.7**	44.3	398.7	159.6	81.5	27.2
	105	13.60	109.9**	40.4	424.2	140.1	70.7	26.9
	120	11.28	101.8	33.2	398.5	135.0	74.9	27.0

2.2.3 旱作法水稻的适宜秧龄 水稻旱作法与常规灌溉法移栽时的水分状况有别, 是否秧龄越短越好? 笔者设计 3 种秧龄的秧苗均带土移栽, 试验结果(图 2)表明: 在本试验条件下以秧龄 25 d 4~5 叶期带 1 蘖移栽最佳, 每丛分蘖生长在分蘖初期可充分利用空间地热资源, 而以每丛最高分蘖数与成穗而言, 则 2~3 叶超短龄带土移栽最佳。从图 2 可以看出: (1) 在本试验条件下, 供试两杂交组合均以 4~5 叶令秧苗移栽后早发、比 2~3 叶令和 3~4 叶龄秧苗多蘖, 但每丛最高分蘖数以 2~3 龄秧苗最多; (2) 在旱作法条件下, 同为 2~3 叶超短龄小苗两优培九的每丛最高蘖数远高于协优 9308,

每丛最高苗数可达 70, 而协优 9308 仅达到 55; (3) 最终成穗数两优培九每丛可达 45 穗, 而协优 9308 则为 35 穗左右。由此可见, 水稻旱作法最适宜的秧苗龄为 4~5 叶期似为最佳的选择。

2.2.4 水稻旱作法的供水 适度供水是水稻旱作法的主要技术要素之一, 是获得水稻高产与节水双利的关键。通常认为水层灌溉是水稻高产栽培的最佳水分管理方式。而本项技术改革以不建立水层, 又要确保土壤湿润为原则(不低于土壤持水量 70%), 并以早晨稻株叶尖是否吐水判断稻株水分亏缺, 作为本旱作法“限量用水、湿栽旱管”的生理安全指标。水稻旱作法安全供水为 4 个技术环节是: 湿

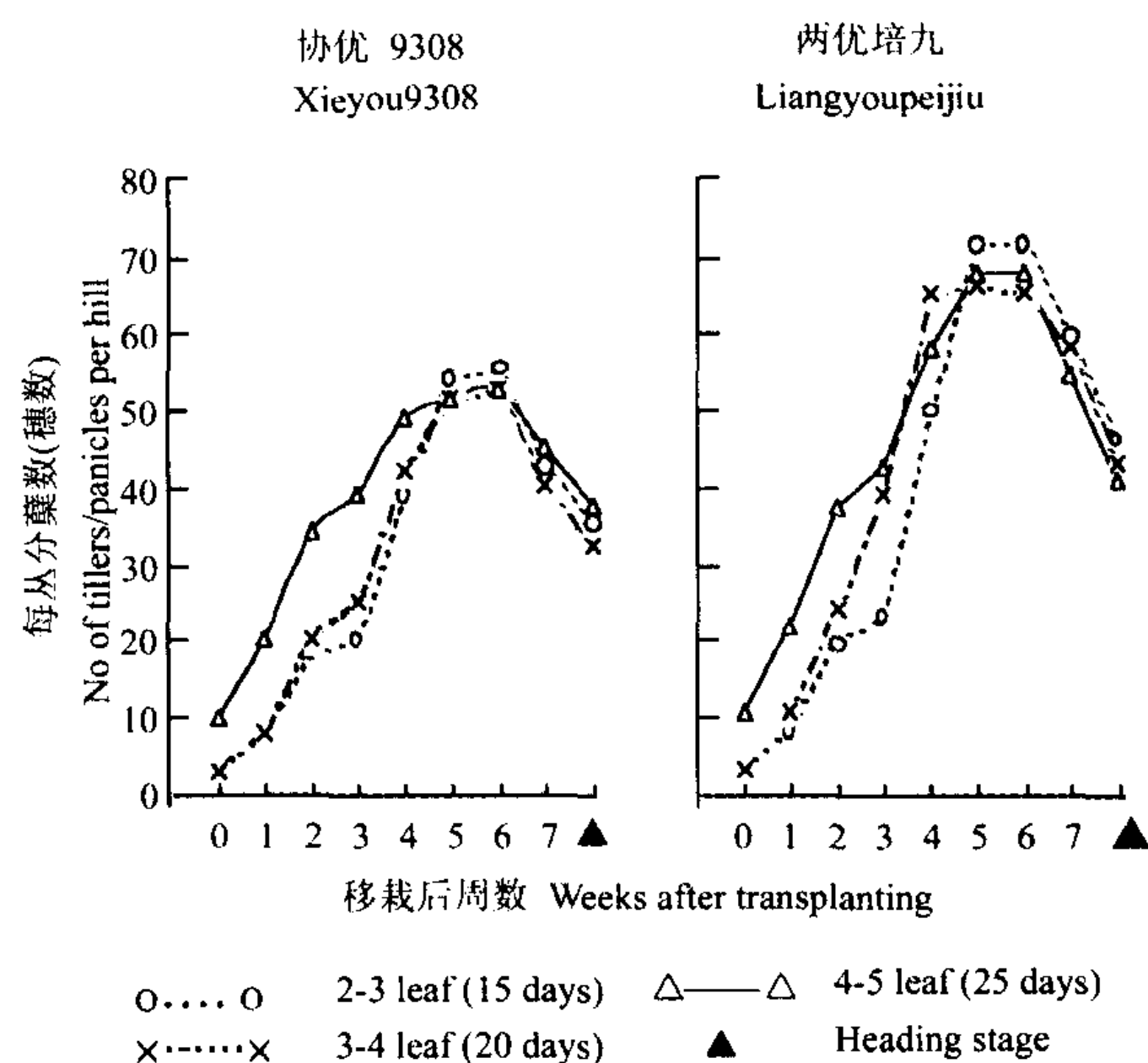


图2 不同秧龄秧苗旱作条件下分蘖消长动态

Fig.2 Tillering dynamic map of different seedling stage on non-flooding rice field

栽护苗、旱管培根、沟水育穗、干湿防衰(图1)。

湿栽护苗：水耕作畦，薄水浅插，以期护苗早发。

旱管培根：分蘖期土壤仍保湿润，土壤持水量 $>70\%$ ，稻株叶片早晨吐水正常。如遇高温高燥天气，早晨叶片“吐水”出现异常现象，应

即时补水进沟。以期营造根系生长的良好土壤环境。

沟水育穗：幼穗分化阶段沟水不断，但仍保持畦面无水层。以期保证水稻一生中的水分敏感期不因缺水而受胁迫。

干湿防衰：我国稻农常有“干花湿籽”之灌溉经验，水稻旱作法在始穗时放掉沟水，齐穗-成熟期及时沟灌，自然落干，反复进行，切忌断水过早，以保稻株青秆黄熟。

据试验记载，除自然降雨外，本试验单季水稻全生育期灌溉用水 $2459\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ，比相邻对照田块常规灌溉稻田用水 6.288 t ，节省用水 44.9% 。从表2可以看出水稻旱作产量愈高，灌溉水利用率愈高。旱作法协优9308产量 $8.75\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ，灌溉水利用率为 $3.55\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ，旱作法两优培九产量 $10.20\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ，其灌溉水利用率高达 $4.14\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。比相应常规灌溉稻田水利用率提高约 $2\sim 2.5\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ (表3)。

2.3 灌溉稻田旱作法水稻产量构成的特点

2.3.1 旱作法水稻的分蘖及成穗 图3为主茎与秧田分蘖及移栽后每一周出生的分蘖挂牌标记及其相应的成穗率的观察结果。从图3可以看出：(1)无论旱作法或常规灌溉法，两优培九的分蘖能力均比协优9308强；(2)在两种稻作方法条件下，两优培九比

表3 旱作水稻与常规灌溉法水稻灌溉用水量比较

Table 3 Comparison of amount of water consumed of NFRF or CIRF on irrigated rice field

组合 Combination	栽培方法 Cultivation method	全生育期灌溉水量 Water consumed ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	每日耗水量 Water consumed per day ($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)	灌溉水利用率 Water efficiency to grain yield ($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)
协优 9308 Xieyou9308	NFRF	3 459	3.71	3.55
	CIRF	6 288	7.22	1.62
两优培九 Liangyoupeijiu	NFRF	3 459	3.71	4.14
	CIRF	6 288	7.22	1.62

之协优9308的本田分蘖期均比相应条件下的协优9308长1周；(3)供试两杂交组合在旱作栽培条件下均比相应的常规灌溉栽培条件下本田分蘖期长2周；(4)供试两杂交组合在常规灌溉条件下移栽后秧田分蘖均部分死亡，成穗率约为 $40\%\sim 80\%$ ，在旱作条件下移栽后1~2周内出生的成穗率较高，约 $80\%\sim 100\%$ ；(5)比之常规灌溉条件，两组合在旱作条件下后期分蘖成穗率高于常规灌溉条件下后期成穗率；(6)但是，因两组合在旱作条件下单丛分蘖总数高于常规灌溉条件近1倍，全株成穗率旱作法低于常规灌溉法。两优培九分别 50.0% 与 62.5% ，协优9308分别为 49.5% 与 63.1% 。

2.3.2 旱作法水稻的籽粒灌浆 考查供试两杂交组合始穗后优劣势粒的灌浆充实进程，结果表明，旱作法水稻籽粒灌浆的粒间顶端优势^[6]更盛，即优势粒的灌浆势对劣势粒的灌浆势抑制更明显，亦即优劣籽粒间的阶段灌浆^[9]或称“两步灌浆^[10]”更明显，优劣势粒的干粒重差异更大。两优培九在常规灌溉条件下优劣势粒的粒重分别为 28.35 与 22.40 mg ，在旱作条件下则为 28.75 与 21.36 mg ；协优9308的优劣势粒的粒重差异因旱作变得更大。常规灌溉条件下其优劣势粒的粒重分别为 28.35 与 24.50 mg ，旱作条件下则为 29.7 与 19.80 mg 。分析这种变化的原因，主要是供试两杂交组合优势粒灌浆(干重积累)旱作

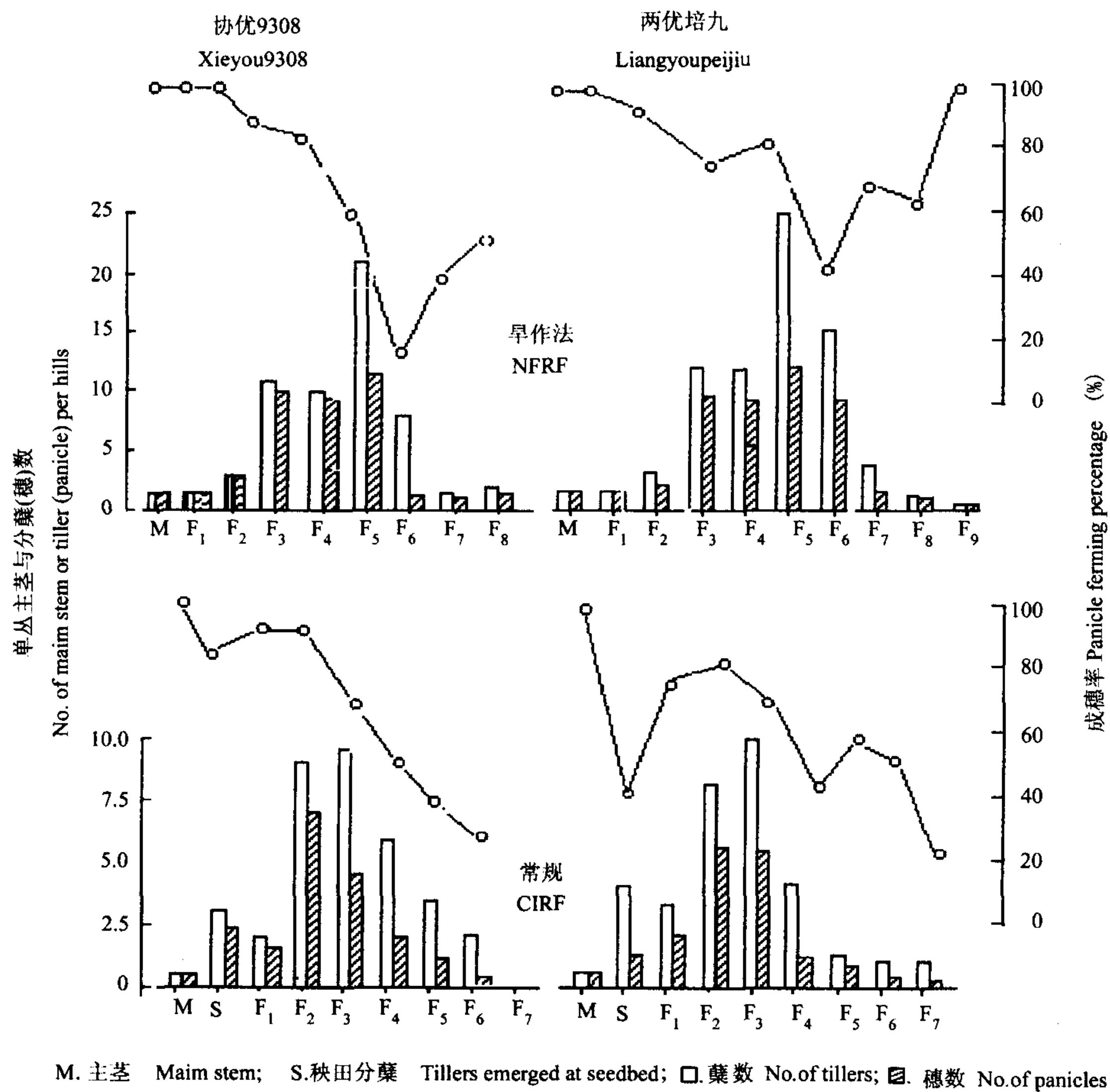


图3 主茎及秧田分蘖出生与成穗

Fig. 3 Panicle setting rate on main stem and tillers

法比常规灌溉法加快。劣势粒灌浆旱作法落后于常规灌溉法。此外由于: (1) 供试两杂交组合劣势粒灌浆峰值无论在旱作或常规灌溉条件下均出现在始穗后1~2周, 旱作法未改变这一趋势(图4); (2) 供试两杂交组合旱作法的劣势粒灌浆势峰值出现时间均比常规灌溉法滞后, 常规灌溉法劣势粒灌浆势峰值比优势粒滞后1周, 旱作法比优势粒滞后2周(图4)。

3 讨论

全球水资源短缺成为全社会的共识。稻米是人类主粮之一, 但稻作用水又是工农业生产用水大户, 我国人多地少水少, 改革以淹水为主的水稻栽培技术已成为我国农业持续发展的重大战略任务之一。

3.1 水稻旱作法的研究旨在服务粮食与水资源双安全

笔者学习国内各种新的旱作技术成果, 并运用

近年来对我国“超级稻技术集成”研究的体会^[6, 7], 学习云南水稻亩产吨粮的种植经验^[11], 立题研究灌溉稻田水稻旱作法。本旱作法主要技术要素是选用超级杂交稻为材料, 采用短龄壮秧带土移栽, 每公顷6万丛的超稀植栽培, 以及湿栽旱管、限量用水的旱作法, 以期达到单季水稻超高产。经2年实践初步构建了灌溉稻田水稻旱作法的技术框架(图1), 并获得较好的技术效果。可望对我国粮食与水资源“双安全”作出一点贡献。

3.2 水稻旱作法的成效

本文所述水稻旱作法获得每公顷9~10 t的产量水平(表1), 节约灌溉用水45%(在本试验条件下每公顷节水近3 000 t, 天然降雨除外), 灌溉水利用率提高到 $3.0\sim 4.0\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 水平(表3)。还有改善稻米加工品质的效果。例如经农业部稻米及制品质量监督检测中心测试, 两优培九与协优9308的旱作法稻谷糙米率提高1个百分点, 精米率提高1~2个百

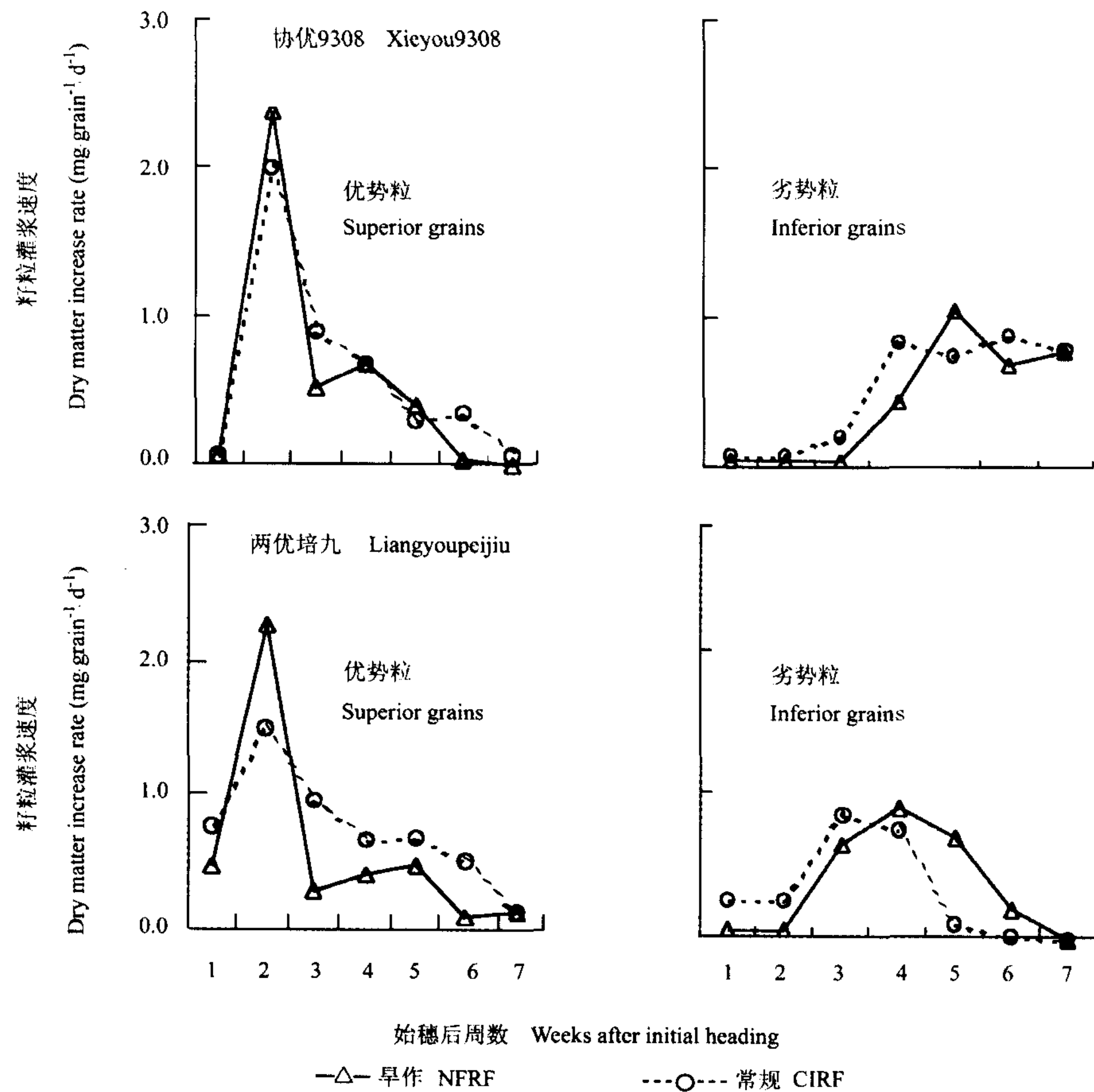


图4 水稻旱作法稻株优劣粒的灌浆

Fig. 4 Dry matter increment of superior or inferior grain on non-flooding farming rice

分点，整精米率提高2个百分点。此外，直链淀粉含量有所下降，蛋白质含量有所提高。如果不言旱作法改善稻米品质，也可消除了水稻旱作法可能降低稻米品质之疑虑。

3.3 水稻旱作法技术要素的初步评价

水稻产量达到每公顷15 t水平，一靠生态环境，二靠品种特性，三靠栽培技术^[11]。稻区生态环境复杂多样，不随稻农任意选择。但是选种高产品种与栽培技术得当就有可能获得水稻高产、超高产。本文所述水稻旱作法，其特定的对象是灌溉稻田，即有稳定灌溉水源。笔者认为，经过实践“浅水护苗、旱管培根、沟水育穗、干湿防衰”的16字诀用水技术是可行的。同时，也认为选用超级杂交稻、培育适龄壮秧带土移栽也都是必要的。但是，旱作条件下的超稀植，带来营养体过于繁茂而穗型变小，结实率与千粒重下降之弊端（表1、表2），似为水稻旱作法主要的技术缺点。因此，水稻旱作法似不宜采用每公顷6万穴超稀植，应采用每公顷9万~10万丛种植密度为好（表2）。此外，秧龄不宜过短，否

则不利于充分利用移栽后的光温等物候资源，促进早发（图2）。这些改进将在今后的实践中进一步得到验证。

3.4 水稻旱作法的水稻结实特性

供试两杂交组合旱作法比之常规灌溉法结实下降，粒重减轻可能与高节位分蘖成穗增加有关（图3），也与粒间顶端优势更强烈，劣势粒结实率与粒重低下有关。这些产量结构的不良表现似与灌溉后期断水过早有关。因此，进一步提高水稻旱作法产量，其技术改进的重点为：确保穗数与提高结实率。确保穗数的主要措施，正如前述是在保持原有技术要素的框架下适当增加种植密度，以减少无效分蘖与后期（高节位）分蘖成穗比例；提高结实率与千粒重，则应强调后期“干湿防衰”的重要性，切忌断水过早。

References

- [1] 曲格平. 有关我国水环境管理的几个问题. 中国环境科学, 1998, 8(3): 1-4.

Qu G P. Some problems of water environmental management

- in China. *China Environmental Science*, 1998, 8(3):1-4. (in Chinese)
- [2] 罗利军, 张启发. 栽培稻抗旱性研究的现状与策略. *中国水稻科学*, 2001, 15(3): 209-214.
Luo L J, Zhang Q F. The status and strategy on drought resistance of rice (*Oryza sativa* L.). *Chinese Journal of Rice Science*, 2001, 15(3):209-214. (in Chinese)
- [3] 黄义德, 张自立, 魏凤珍. 水稻覆膜旱作的生态生理效应. *应用生态学报*, 1999, 10(3): 305-308.
Huang Y D, Zhang Z L, Wei F Z. Ecophysiological effect of dry-cultivated and plastic film-mulched rice planting. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(3):305-308. (in Chinese)
- [4] 张让康, 刘本坤. 旱作水稻生产与栽培技术. *湖南农业科学*, 1988, 2: 30-36.
Zhang R K, Liu B K. Dry-cultivated rice production and cultivation techniques. *Hunan Journal of Agricultural Science*, 1988, 2:30-36. (in Chinese)
- [5] 杨建昌, 王志琴, 刘立军. 旱种水稻生育特性与产量形成的研究. *作物学报*, 2002, 28(1): 11-17.
Yang J C, Wang Z Q, Liu L J. Growth and development characteristics and yield formation of dry-cultivated rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1):11-17. (in Chinese)
- [6] 王 熹, 陶龙兴, 徐仁胜, 田淑兰. 初论杂交稻粒间顶端优势. *作物学报*, 2001, 27(6): 980-985.
Wang X, Tao L X, Xu R S, Tian S L. Apical-grain superiority in hybrid rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(6):980-985. (in Chinese)
- [7] 王 熹, 陶龙兴, 俞美玉, 黄效林. 超级杂交稻协优 9308 生理模型的研究. *中国水稻科学*, 2002, 16(1): 38-44.
Wang X, Tao L X, Yu M Y, Huang X L. Physiological model of super hybrid rice Xieyou 9308. *Chinese Journal of Rice Science*, 2002, 16(1):38-44. (in Chinese)
- [8] 袁隆平. 水稻强化栽培体系. *杂交水稻*, 2001, 16(4): 1-3.
Yuan L P. The system of rice intensification. *Hybrid Rice*, 2001, 16(4):1-3. (in Chinese)
- [9] 朱庆森, 张祖建, 杨建昌. 亚种间杂交稻产量库源特征. *中国农业科学*, 1997, 30(3): 52-59.
Zhu Q S, Zhang Z J, Yang J C. Source-sink characteristics related to the yield in intersubspecific hybrid rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 1997, 30(3):52-59. (in Chinese)
- [10] 马国辉. 籼型水稻两段灌浆理论的研究. *中国水稻科学*, 1996, 10(3): 153-158. (英文)
Mao G H. Studies on the theory of Two-step-filling of Indica rice cultivars (*Oryza sativa*). *Chinese Journal of Rice Science*, 1996, 10(3):153-158.
- [11] 袁平荣, 孙传清, 杨从党, 周 能, 应其峰, Peng S, 贺庆瑞, 王象坤. 云南籼稻每公顷 15 吨高产的产量及其结构分析. *作物学报*, 2000, 26(6): 756-762.
Yuan P R, Sun C Q, Yang C D, Zhou N, Ying Q F, Peng S, He Q R, Wang X K. Analysis on grain yield and yield components of the 15 t/hm² highyielding Indica rice (*Oryza sativa* L.) in Yunan. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(6): 756-762. (in Chinese)

(责任编辑 孙雷心)