

水氮管理对不同氮效率水稻根系性状、氮素吸收利用及产量的影响

李娜 杨志远 代邹 孙永健 徐徽 何艳 蒋明金 严田蓉 郭长春 马均*

(四川农业大学 水稻研究所/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 成都 611130; *通讯联系人, E-mail: majunp2002@163.com)

Effects of Water-Nitrogen Management on Root Traits, Nitrogen Accumulation and Utilization and Grain Yield in Rice with Different Nitrogen Use Efficiency

LI Na, YANG Zhiyuan, DAI Zou, SUN Yongjian, XU Hui, HE Yan, JIANG Mingjin, YAN Tianrong, GUO Changchun, MA Jun*

(Rice Research Institute, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China; *Corresponding author, E-mail: majunp2002@163.com)

Abstract: 【Objective】 The objective of the experiment is to study the effects of water-nitrogen management on root traits, nitrogen accumulation and utilization and grain yield in rice with different N use efficiencies, and the relationship between root traits and nitrogen accumulation and utilization and yield. 【Method】 In this study, two different nitrogen use efficiency (NUE) rice varieties Dexiang 4103 (high NUE) and Yixiang 3724 (low NUE) were used as the trial material to determine the effects of water-nitrogen management on root traits and grain yield in rice with different NUEs, conventional irrigation and controlled alternative irrigation coupled with SPAD-diagnosis N management, optimal N management and farmer's usual N management were established as treatment factors. During this progress, the relationship between root traits, nitrogen accumulation and utilization and grain yield were analyzed by ridge regression analysis. 【Result】 There were significant genotypic differences in root traits at heading stage, grain yield, spikelet number per panicle, 1000-grain weight and total spikelet number. The high NUE variety (Dexiang 4103) had more spikelet number per panicle and larger population capacity, with the yield being 0.24%–11.31% higher than that of low NUE variety (Yixiang 3724). Compared with conventional irrigation, the 1000-grain weight under controlled alternative irrigation was significantly larger, while the former was more favorable for improving panicle number, spikelet number per panicle and population spikele number. SPAD-diagnosis-based N management and optimal N management could increase the panicle number and spikelet number per panicle, which increased the population spikelet number, ensuring the grain yield advantage over farmer's usual N management. Because of the water-nitrogen interaction effect, the gap in 1000-grain weight between N application and zero N treatments under controlled alternative irrigation narrowed considerably compared with that of conventional irrigation, leading to better effect of N application on grain yield under controlled alternative irrigation. The nitrogen use efficiency of Dexiang 4103 was 8.69% higher than that of Yixiang 3724, the nitrogen accumulation of rice under conventional irrigation was higher, as well as the nitrogen recovery efficiency, agronomic efficiency, physiological efficiency under controlled alternative irrigation. SPAD-diagnosis-based N management and optimal N management were more favorable for improving nitrogen accumulation and utilization efficiency of rice than farmer's usual N management. The determination coefficient of ridge regression equation between root traits and grain yield of rice at jointing stage, heading stage and maturity stage ranged from 0.4198 to 0.9028. The relationship between root traits at heading stage and grain yield was the most closely related, and the determination coefficients of high NUE and low NUE varieties all exceeded 0.9. At the jointing stage, the rice fine lateral root length had the greatest effect on grain yield. At the heading stage, there was difference between the high NUE and low NUE varieties, and the coarse lateral root length of the former and the fine lateral root surface area of the latter had the greatest effect on grain yield, respectively. In maturity stage, the relationship between adventitious root length and grain yield was the most important. Rice root morphology at heading stage had close relation with the change of nitrogen accumulation,

收稿日期: 2016-11-01; 修改稿收到日期: 2016-12-28。

基金项目: 国家粮食丰产科技工程资助项目(2013BAD07B13); 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0300506)。

and the determination coefficient of ridge regression equation was close to 0.7. In terms of water and nitrogen management practice, SPAD-diagnosis N management coupled with conventional irrigation or optimal N management combined with alternative irrigation should be applied to achieve grain yield improvement for both high NUE and low NUE varieties. 【Conclusion】 The root morphology characters of rice at heading stage was closely related to yield and nitrogen accumulation, and the yield and nitrogen accumulation and utilization efficiency of rice could be improved by reasonable water-nitrogen management.

Key words: water-nitrogen management; rice; N use efficiency; root morphology; grain yield

摘 要: 【目的】探究水氮管理措施对不同氮效率水稻根系构型、氮素吸收利用和产量形成的影响, 以及根系性状特征与氮素吸收利用和产量关系。【方法】试验采用三因素裂区设计, 主区为2个不同氮效率水稻品种德香4103(氮高效型)和宜香3724(氮低效型), 裂区设置“常规灌溉”和“控制性交替灌溉”2种水分管理方式, 裂区为SPAD指导施肥、优化施肥以及农民习惯施肥3种施氮模式, 运用岭回归分析方法探究根系构型与氮素吸收利用和产量的关系。【结果】水稻抽穗期根系性状、产量、每穗粒数、千粒重及总颖花量均存在显著的基因型差异。氮高效品种德香4103每穗粒数多, 群体库容量大, 产量较氮低效品种宜香3724高0.24%~11.31%; 控制性交替灌溉有利于水稻千粒重的增长, 常规灌溉则对水稻有效穗数、每穗粒数及群体颖花量提高更为有利; SPAD指导施肥和优化施肥处理能够提高水稻有效穗数和每穗粒数, 扩大群体颖花量以保证其对农民习惯施肥的产量优势; 由于水氮互作效应的存在, 控制性交替灌溉下施氮处理与空白处理水稻千粒重的差距比常规灌溉的大幅降低, 使得控制性交替灌溉下施用氮肥的增产效果更佳。德香4103的氮肥生理利用率较宜香3724平均高8.69%, 常规灌溉下水稻氮积累量较高, 控制性交替灌溉下氮肥回收率、农学利用率、生理利用率均较优; 与农民习惯施肥处理相比, SPAD指导施肥与优化施肥模式更有利于水稻氮素吸收利用效率的提高。拔节期、抽穗期和成熟期水稻根系构型与产量岭回归方程的决定系数范围为0.4198~0.9028, 其中, 抽穗期根系性状与产量关系最为密切, 氮高效和氮低效品种的决定系数均超过0.9。在拔节期, 水稻细分枝根长对产量影响最大; 在抽穗期, 氮高效和氮低效品种存在差异, 前者是粗分枝根长, 后者是细分枝根表面积对产量影响最大; 在成熟期, 不定根长与产量关系最为密切。水稻抽穗期根系构型对氮积累量变化的解释程度较高, 岭回归方程决定系数均接近0.7。就水氮管理措施而言, 氮高效和氮低效水稻均应采用常规灌溉配套SPAD指导施肥或控制性交替灌溉结合优化施肥来实现产量的提高。【结论】水稻抽穗期根系构型与产量、氮积累量关系密切, 采用合理的水氮管理措施能够实现水稻产量和氮素吸收利用效率的同步提高。

关键词: 水氮管理; 水稻; 氮效率; 根系构型; 产量

中图分类号: S143.1; S511.07

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2017)05-0500-13

我国超半数的人口以稻米为主食, 增加稻谷产量对保证国家粮食安全至关重要, 但淡水资源的短缺以及玉米种植面积的高速增长严重限制了水稻种植面积的扩大, 这意味着稻谷产量的增长必须以单产的提高为主要途径^[1]。氮肥施用是影响水稻产量最直接的农艺措施, 水分管理则是水稻区别于旱地作物的最具特色的农艺措施, 二者结合产物——水氮耦合已成为近些年水稻生产研究的热点, 一些将最新氮肥施用技术和灌溉技术结合的新模式已经取得了较好的丰产效果^[2, 3], 夯实了“以肥调水, 以水促肥”在水稻生产中应用的基础。

根系承载着固定植株、吸收和运输水分养分等众多生理生化功能, 其性状与地上部农艺特性、物质生产与转运等遗传表现息息相关^[4]。前人对水稻根系与水肥吸收利用的关系进行了较多的研究, 如不同氮效率类型水稻根系特征及其对氮素反应的差异^[5-9]; 水氮管理对水稻根系性状的影响^[10], 以及水稻根系与产量形成的关系^[11, 12]等。这为理解根

系与水肥耦合的关系提供了较有价值的资料, 但迫于技术手段的匮乏, 这些研究通常将根系看做一个整体进行研究, 而事实上水稻各类型根在其生长发育过程中发挥的作用差异较大。不定根主要行使着固定植株和水分养分的输导作用, 细分枝根是水分养分吸收的重要器官, 而粗分枝根主要是通过拓展空间来提高根系对水分养分的总吸收能力。因此, 将水稻不同类型根区分开进行细致、深入地量化研究, 探索影响水稻产量的根系形态结构指标在不同生育时期是否一致, 各生育时期对最终产量影响最大的根系性状指标是什么, 各生育时期根系性状指标对产量的影响为何不同, 各生育时期根系性状与氮素吸收利用的关系又如何, 对深入分析水稻生产上关于根系与产量的关系具有重要意义。本研究以课题组多年试验筛选出的两个不同氮效率类型水稻品种德香4103(氮高效基因型)和宜香3724(氮低效基因型)为试验材料, 在课题组前期研究的基础上^[13, 14], 结合不同水分及氮肥管理技术, 研究水

稻各类型根系形态特征的差异及其与氮素吸收利用、产量形成的关系,旨在探究水稻根系与地上部生长的平衡机制,以及对水氮调控的差异响应机理,为水稻高产高效育种及栽培提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2015 年在四川成都温江四川农业大学水稻研究所试验田进行。供试材料为中粳迟熟型杂交稻德香 4103(氮高效型)和宜香 3724(氮低效型),生育期均在 150 d 左右。试验田为冬闲田,耕层土壤质地为砂壤土,有机质含量为 22.19 g/kg,全氮 1.68g/kg,速效氮 127.6 mg/kg,速效磷 29.8 mg/kg,速效钾 102.4 mg/kg。3 月 29 日播种,早育秧。4 月 30 日移栽,叶龄为 4 叶 1 心,行株距为 33.3 cm×16.7 cm,单苗移栽,9 月 1 日收获。小区四周筑埂(宽 30 cm、高 30 cm),重复间扎双埂并包塑料薄膜,以防串水串肥。

试验采用三因素裂区设计,品种为主区,灌溉方式为裂区,施氮模式为裂区,重复 3 次。

2 种灌溉方式分别为常规灌溉(W_1 ,水稻移栽后田面一直保持 1~3 cm 水层,无效分蘖期“够苗”晒田,之后一直保持 1~3 cm 水层,直至收获前 1 周自然落干)、控制性交替灌溉(W_2 ,浅水(1 cm 左右)栽秧,移栽后 5~7 d 田间保持 2 cm 水层确保秧苗返青,返青至孕穗前田面不保持水层,土壤含水量约为饱和含水量的 70%~80%,无效分蘖期“够苗”晒田,孕穗期土表保持 1~3 cm 水层,抽穗至成熟期采用灌透水、自然落干至土壤水势为-25 kPa(用中国科学院南京土壤研究所生产的真空表式土壤负压计测定)时再灌水的交替灌溉]。

3 种施氮模式分别为 SPAD 指导施肥(N_1)、优化施肥模式(N_2)、农民习惯施肥(N_3),具体氮肥施用量及施肥时期见表 1。以全生育期不施氮作为对照(CK)。基施磷肥(折合 P_2O_5) 75 kg/hm²、钾肥(折合 K_2O) 150 kg/hm²。其他栽培管理措施均统一按常规栽培要求实施。

1.2 测定项目和方法

1.2.1 根系形态指标测定

分别于拔节期、抽穗期和成熟期,按每小区平均茎蘖数选择 5 株长势一致、具有代表性稻株,采用原土土柱法,用铁板取根器以稻株为中心掘取长等于行距(33.3 cm),宽等于株距(16.7 cm),深 20 cm

的土柱,装入 0.4 mm 孔径尼龙网袋中,浸泡 6h 后洗去泥土杂质,获得单株完整根系,用 Epson Expression 10000XL 根系扫描仪扫描后,采用 WinRHIZO Pro v.2009c 软件分析不定根、粗分枝根、细分枝根各形态参数,而后置于 80℃ 下烘干至恒重,测得根系总干质量。不定根($0.3\text{ mm}<D\leq 1.65\text{ mm}$)、粗分枝根($0.1\text{ mm}<D\leq 0.3\text{ mm}$)、细分枝根($D\leq 0.1\text{ mm}$)的界定参照顾东祥等^[15]的方法。

1.2.2 氮素积累测定

将根系形态指标测定剩余的地上部分茎、叶、穗各器官烘干,称质量,再粉碎、过筛,用凯氏定氮仪(FOSS-8400)测定各器官的全氮含量。

1.2.3 考种与计产

成熟期各小区单独收割,按实收株数计产。

1.3 数据处理

用 SPSS20 和 DPS 7.05 进行统计分析,并用 Microsoft Excel 2007 进行图表制作,多重比较采用 LSD 法。岭回归(Ridge Regression)分析是一种专用于共线性数据分析的有偏估计回归,通过在自变量信息矩阵的主对角线元素上人为地加入一个非负因子(岭回归参数 k),使回归系数的估计稍有偏差,但估计的稳定性却明显提高。各自变量的标准回归系数可直接用于比较其对因变量的相对重要性。在本研究中,当 $k=0.2$ 时,各自变量的岭迹都基本稳定,因此各自变量的岭参数都取 $k=0.2$,样本量 $n=90$ 。

2 结果与分析

2.1 水氮管理对不同氮效率水稻产量及其构成因素的影响

由表 2 可见,不同氮效率水稻产量间存在显著的基因型差异,氮高效型品种德香 4103 的产量较氮低效型品种宜香 3724 高 0.24%~11.31%。水氮管理模式对水稻产量亦产生显著影响,且品种与施氮模式及水分管理存在显著的交互效应。不施氮处理(CK)在常规灌溉(W_1)下产量优势较控制性交替灌溉(W_2)均超过 1000 kg/hm²,施氮后, W_1 与 W_2 产量差异迅速减小,二者差值最高仅为 366 kg/hm²。

氮高效与氮低效品种有效穗数无显著差异, W_1 下水稻有效穗数显著高于 W_2 ,就施氮模式而言,采用农民习惯施肥方式(N_3)的水稻有效穗数最多。氮高效品种每穗粒数显著高于氮低效品种, W_1 下二者每穗粒数均较 W_2 有优势,施氮可以显著提高每穗粒数,SPAD 指导施肥处理(N_1)在氮肥施用

表 1 氮肥施用量及施肥时期

Table 1. N application rate and fertilization stage.

施氮模式 N management mode	施氮量及施氮时期 N application rate and stages				总施氮量 Total N rate/(kg·hm ⁻²)
	基肥	蘖肥	促花肥	保花肥	
	Basal N/(kg·hm ⁻²)	N application for tillering /(kg·hm ⁻²)	N application for spikelet boosting/(kg·hm ⁻²)	N application for spikelet preserving/(kg·hm ⁻²)	
SPAD 指导施肥 SPAD-diagnosis N management	0	自移栽后 7 d 至齐穗期, 若叶绿素仪读数 SPAD < 37.5, 施氮 15 kg/hm ² , SPAD > 37.5, 不施氮。 其中, 拔节期(倒 4 叶龄期), 若 SPAD < 37.5, 施氮 30 kg/hm ² 。每周测 1 次。			120
优化施肥模式 Optimal N management	45(30%)	45(30%)	30 (20%)	30 (20%)	150
农民习惯施肥 Farmer's usual N management	105(70%)	45(30%)	0	0	150

表 2 水氮管理对不同氮效率水稻产量及其构成因素的影响

Table 2. Effects of water-nitrogen management on grain yield and its components in rice with different N use efficiencies.

品种 Cultivar	灌溉方式 Irrigation pattern	施氮模式 N management mode	有效穗数 Productive panicle number/(×10 ⁴ hm ⁻²)	每穗粒数 Spikelet number per panicle	结实率 Seed-setting rate /%	千粒重 1000-grain weight /g	总颖花量 Total spikelet Number/(×10 ⁶ hm ⁻²)	产量 Grain yield /(kg·hm ⁻²)
德香 4103 Dexiang 4103(C ₁)	W ₁	CK	212.52±1.47 c	142.58±2.31 c	90.83±2.01 a	33.43±0.60 a	303.01±5.86 c	9 135±334.75 c
		N ₁	235.10±10.11 b	211.16±16.46 a	83.92±0.68 b	30.56±0.47 c	496.21±40.90 a	12 311±266.06 a
		N ₂	246.63±7.95 ab	205.39±4.11 a	80.74±2.67 b	30.90±0.55 bc	506.54±19.50 a	12 077±114.48 a
		N ₃	252.20±4.93 a	162.49±5.79 b	90.72±2.80 a	32.30±0.17 ab	409.94±20.60 b	11 500±401.06 b
		平均 Average	236.61	180.41	86.55	31.80	428.92	11 256
	W ₂	CK	193.72±3.70 c	138.68±3.16 c	91.24±2.40 a	33.63±1.03 a	268.66±11.11 c	8 120±365.81 c
		N ₁	234.15±4.52 b	190.35±6.44 a	84.61±2.51 c	32.78±1.06 a	445.57±10.86 a	11 961±283.28 a
		N ₂	241.84±10.63 ab	185.38±13.41 a	85.76±0.74 bc	32.82±0.16 a	447.65±23.56 a	12 239±341.80 a
		N ₃	249.09±8.14 a	155.33±6.66 b	88.06±1.40 ab	34.43±1.53 a	387.21±27.97 b	11 351±134.61 b
		平均 Average	229.70	167.44	87.42	33.41	387.27	10 918
宜香 3724 Yixiang 3724(C ₂)	W ₁	CK	198.03±2.58 b	131.20±3.42 b	88.85±1.58 a	36.34±1.01 a	259.80±5.30 c	8 373±147.22 c
		N ₁	235.18±10.44 a	183.20±14.44 a	84.48±2.22 b	33.58±0.02 b	430.48±32.50 a	11 977±418.03 a
		N ₂	241.37±6.10 a	178.67±6.04 a	84.77±2.67 b	34.42±0.19 b	431.47±24.29 a	12 048±200.90 a
		N ₃	246.25±10.00 a	143.43±5.56 b	89.16±0.61 a	36.36±0.69 a	352.91±8.82 b	11 132±227.75 b
		平均 Average	230.21	159.13	86.81	35.17	368.67	10 882
	W ₂	CK	190.95±3.65 c	117.47±2.01 c	89.62±0.37 a	36.76±0.53 ab	224.31±6.59 c	7 295±124.53 c
		N ₁	229.79±4.93 b	179.56±7.94 a	81.11±1.21 b	36.66±1.23 ab	412.36±10.38 a	11 887±305.06 a
		N ₂	238.10±11.19 ab	175.79±3.66 a	80.72±3.66 b	35.33±0.85 b	418.28±11.19 a	11 621±233.07 a
		N ₃	243.05±11.10 a	144.32±4.26 b	88.05±1.68 a	37.37±2.33 a	350.94±23.67 b	11 097±199.41 b
		平均 Average	225.47	154.29	84.88	36.53	351.47	10 475
C ₁ 平均 Average			233.16	173.92	86.99	32.61	408.10	11 086.88
C ₂ 平均 Average			227.84	156.71	85.84	35.85	360.07	10 678.71
F 值 F-value		品种 C	3.83 ns	35.53*	5.66 ns	3399.64**	29.55*	19.65*
		灌溉方式 W	16.63*	10.38*	0.55 ns	22.24**	52.69**	183.26**
		施氮模式 N	100.47**	169.12**	44.51**	12.67**	207.92**	826.41**
		C×W	0.58 ns	2.16 ns	3.71 ns	0.17 ns	9.10*	1.59 ns
		C×N	0.39 ns	0.20 ns	0.30 ns	0.23 ns	0.09 ns	4.38*
		W×N	1.19 ns	0.90 ns	1.31 ns	3.02*	0.89 ns	13.01**
		C×W×N	0.61 ns	2.16 ns	4.79**	0.77 ns	0.67 ns	2.19 ns

同列数据 (平均值±标准差) 后跟相同字母表示在 5% 水平差异不显著。*和**分别表示在 0.05、0.01 水平差异显著, ns 表示在 0.05 水平差异不显著。C、W、N 分别代表品种、灌溉方式、施氮模式。C₁—氮高效型德香 4103; C₂—氮低效型宜香 3724; W₁—常规灌溉; W₂—控制性交替灌溉; CK、N₁、N₂、N₃ 分别代表不施氮肥、SPAD 指导施肥、优化施肥模式、农民习惯施肥。C×W—品种与灌溉方式互作; C×N—品种与施肥模式互作; W×N—灌溉方式与施肥模式互作; C×W×N—品种、灌溉方式、氮肥施用模式三者互作。下同。

Values(mean±SD)within a column followed by common letters are not significantly different at $P<0.05$. * and ** mean significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively; ns means insignificant difference at 0.05 level. C, W and N represent cultivar, irrigation pattern and N management mode. C₁, High N-efficiency cultivar (Dexiang 4103); C₂, Low N-efficiency cultivar(Yixiang 3724); W₁, Conventional irrigation; W₂, Controlled alternate irrigation; CK, Without N application; N₁, SPAD-diagnosis N management; N₂, Optimal N management; N₃, Farmer's usual N management. C×W, Cultivar and irrigation pattern interaction; C×N, Cultivar and nitrogen management mode interaction; W×N, Irrigation pattern and nitrogen management mode interaction; C×W×N, Cultivar, irrigation pattern and nitrogen management mode interaction. The same as below.

量降低的情况下每穗粒数始终保持最多。得益于每穗粒数上的优势，氮高效品种单位面积颖花量显著高于氮低效品种，W₁ 下二者群体总颖花量更多，就施氮模式而言，优化施肥 (N₂) 和 N₁ 水稻群体库容量最大，且二者差异不显著。氮高效品种籽粒千粒重极显著低于氮低效品种，W₂ 更有利于花后籽粒灌浆，千粒重更大，对施氮处理来说，库容量较小的 CK 和 N₃ 千粒重普遍较高。水分管理与氮肥施用的互作对水稻千粒重产生显著影响，表现为 W₂ 下，施氮处理与 CK 千粒重的差距比 W₁ 下大幅降低，使得 W₂ 下施用氮肥的增产效果更佳。

综合而言，氮高效品种总颖花量更多，群体库容量更大，这是其产量更具优势的关键，而氮低效品种有较高的籽粒千粒重，缩小了其与氮高效品种的产量差距。就本研究的水分管理而言，W₂ 亦是

依靠千粒重的优势弥补其在群体颖花量上的不足。而对氮肥施用来说，N₂ 和 N₁ 在群体库容量上的巨大优势保证了其相对 N₃ 的产量优势。

2.2 水氮管理对不同氮效率水稻氮素吸收利用的影响

由表 3 可知，不同氮效率水稻氮肥生理利用率存在显著差异，氮积累量、氮肥回收率和农学利用率则差异较小；灌溉方式和施氮模式对氮素吸收利用具有显著或极显著影响。就氮积累量而言，W₁ 下水稻氮积累量较高；且与 N₃ 相比，N₁ 与 N₂ 对氮素积累更为有利。在氮肥回收率和农学利用率方面，W₂ 优势显著；氮肥施用则表现为 N₁>N₂>N₃。从氮肥生理利用率来看，氮高效水稻德香 4103 较氮低效水稻宜香 3724 平均高 8.69%，W₂ 下氮肥生理利用率显著高于 W₁；且 N₁、N₂ 下氮肥生理利用率均

表 3 水氮管理对不同氮效率水稻氮素吸收利用的影响

Table 3. Effects of water-nitrogen management on N accumulation and utilization in rice with different N use efficiencies.

品种 Cultivar	灌溉方式 Irrigation pattern	施氮模式 N management mode	氮积累量 N accumulation	氮肥回收率	氮肥农学利用率	氮肥生理利用率
				N recovery efficiency /%	N agronomic efficiency /(kg·kg ⁻¹)	N physiological efficiency /(kg·kg ⁻¹)
德香 4103 Dexiang 4103 (C ₁)	W ₁	CK	128.20±6.28 c	—	—	—
		N ₁	204.98±2.88 a	63.98±4.04 a	26.47±1.32 a	41.41±1.95 a
		N ₂	205.41±2.56 a	51.47±4.79 b	19.61±1.98 b	38.10±1.40 b
		N ₃	193.27±6.20 b	43.38±5.11 c	15.76±1.59 c	36.40±1.21 b
		平均 Average	182.97	52.95	20.61	38.64
	W ₂	CK	112.16±7.42 c	—	—	—
		N ₁	191.44±5.23 a	66.07±5.57 a	32.01±0.73 a	48.65±3.65 a
		N ₂	198.88±4.84 a	57.82±3.38 b	27.46±2.31 b	47.49±2.83 a
		N ₃	182.03±6.48 b	46.58±2.55 c	21.54±2.62 c	46.12±3.17 a
		平均 Average	171.13	56.82	27.00	47.42
宜香 3724 Yixiang 3724 (C ₂)	W ₁	CK	111.21±4.03 c	—	—	—
		N ₁	205.43±8.41 a	78.52±9.97 a	30.03±4.23 a	38.21±1.03 a
		N ₂	207.89±2.54 a	64.46±3.29 b	24.5±2.30 b	37.95±1.73 a
		N ₃	192.74±7.79 b	54.35±6.04 c	18.39±1.57 c	33.92±1.60 b
		平均 Average	179.32	65.78	24.31	36.69
	W ₂	CK	96.44±2.89 c	—	—	—
		N ₁	199.87±2.84 a	86.19±4.1 a	38.26±3.56 a	44.34±2.17 a
		N ₂	192.88±0.84 ab	64.29±1.82 b	28.84±2.37 b	44.81±2.58 a
		N ₃	187.39±6.43 b	60.63±6.04 b	25.35±2.04 c	41.86±0.80 a
		平均 Average	169.15	70.37	30.82	43.67
F 值 F-value	C1 平均 Average		177.05	54.88	23.81	43.03
	C2 平均 Average		174.23	68.07	27.56	40.18
	品种 C		2.71 ns	13.79 ns	4.27 ns	21.35*
	灌溉方式 W		119.28**	10.78*	250.58**	46.67**
	施氮模式 N		888.36**	107.66**	171.70**	12.58**
	C×W		0.69 ns	0.08 ns	0.02 ns	0.61 ns
	C×N		10.68**	3.09 ns	1.31 ns	1.48 ns
	W×N		1.17 ns	0.21 ns	0.21 ns	1.12 ns
	C×W×N		1.62 ns	2.12 ns	3.41 ns	0.12 ns

不同程度高于 N_3 处理。

2.3 水氮管理对不同氮效率水稻各生育时期根系性状的影响

由表 4 可知, 相同处理下, 拔节期水稻各类根根长占总根长的比例以细分枝根最高, 为 75.89%~76.98%; 粗分枝根次之, 约占 15.41%~16.48%; 不定根长度占比均不足 8%。不同氮效率水稻拔节期根系形态结构未见显著差异, 氮高效、氮低效水稻各根系构型指标差异较小。总体而言, 无论是在常规灌溉还是控制性交替灌溉条件下, 施氮明显促进了水稻根系生长发育, 各根系构型指标均不同程度增长, N_3 水稻根系总干质量、不定根数目、细分枝根长度等形态指标均处于劣势, 显著低于 N_1 和 N_2 。 N_1 和 N_2 对拔节期水稻根系形态结构的影响又会因品种、灌溉方式不同呈现出不同趋势。 W_1 下, 氮高效水稻定根(包括粗分枝根和细分枝根)长度及表面积在 N_1 下显著大于 N_2 , 而氮低效水稻根系指标在这两种施氮模式下则差异较小。 W_2 下, 氮高效和氮低效水稻各根系性状指标在 N_1 和 N_2 下相近。表 7 结果显示, 拔节期氮高效、氮低效水稻根系形态结构指标对产量变化的影响, 均以细分枝根长度最为关键。 W_1 下, N_1 水稻细分枝根长度最长, 较 N_3 提高 50% 左右; W_2 下, 氮高效水稻以 N_2 下细分枝根最长, 而氮低效基因型水稻则以 N_1 较优, 二者分别较 N_3 提高 46.30% 和 44.02%。

水分及氮肥管理模式对不同氮效率水稻抽穗期根系性状的影响见表 5。随生育进程推进, 抽穗期根系各项形态指标较拔节期均大幅增加, 水稻基本完成根系生长及空间拓展。该时期不定根及定根形态特征均呈现出显著的基因型差异, 表现为氮高效品种显著高于氮低效品种, 前者不定根、粗分枝根、细分枝根的根长、根表面积和根体积均较后者高出 20% 以上。就不同施氮模式而言, N_3 下水稻抽穗期根系性状指标最小, 显著低于 N_1 和 N_2 。 W_1 下, 氮高效水稻根系形态指标表现为 N_1 均显著高于 N_2 , 而氮低效水稻则为 N_1 和 N_2 差异较小; W_2 下, 氮高效水稻采用 N_2 比 N_1 在根系形态指标上更具优势, 而对氮低效水稻而言, 显然采用 N_1 更有利于其抽穗期各根系形态指标维持在较高水平。如表 5 所示, W_1 下, 氮高效水稻以 N_1 的粗分枝根最长, 而在 W_2 下, 则以 N_2 最佳, 二者粗分枝根长分别较 N_3 提高 35.87% 和 36.26%。 W_1 和 W_2 下, 氮低效水稻的细分枝根表面积在 N_1 和 N_2 下相近, 均较 N_3 增加 20% 以上。

表 6 为水氮管理模式对不同氮效率水稻成熟期

根系性状的影响。总体而言, 与抽穗期相比, 除 N_1 外, 其余各处理下成熟期根系各项形态指标均呈明显降低趋势。成熟期各根系构型指标未表现出显著的基因型差异, 氮高效品种各根系指标仅略高于氮低效品种。无论是 W_1 还是 W_2 , 均是 CK 水稻各根系形态指标最小, N_3 次之, 二者均显著低于 N_1 和 N_2 。 W_1 下, 氮高效和氮低效水稻根系性状均以采用 N_1 比 N_2 更具优势; W_2 下, 氮高效水稻各根系形态指标在 N_1 与 N_2 下差异较小, 氮低效水稻则表现为 N_1 显著优于 N_2 。成熟期各根系形态指标中, 以不定根长度对产量的影响作用最大。由表 6 可知, 在 W_1 和 W_2 下, 均以 N_1 水稻不定根长最长。

2.4 不同氮效率水稻各生育期根系性状与产量的关系

不同氮效率水稻各生育期根系性状与产量岭回归方程的标准回归系数和决定系数见表 7。6 组样本中, 拔节、抽穗期氮高效型、氮低效型水稻各样本对产量的关联度均超过 0.6, 尤其是抽穗期, 方程决定系数高达 0.9 以上, 表明抽穗期水稻根系性状与产量的关系极为密切, 而成熟期各样本对产量变化的解释程度最低, 均不足 0.5。该时期水稻根系性状与产量的密切程度不及拔节期和抽穗期。从不同氮效率水稻各生育时期根系指标对产量的影响情况来看, 拔节及成熟期氮高效、氮低效型水稻与产量最为密切的指标一致, 两个时期分别以细分枝根长度、不定根长度与产量变化关系最为密切; 而在抽穗期, 对氮高效型水稻而言, 以粗分枝根长度对产量变化的影响最大, 对氮低效型水稻来讲, 则以细分枝根表面积在岭回归方程中的标准回归系数最高。

2.5 不同氮效率水稻各生育期根系性状与氮素吸收利用的关系

以不同氮效率水稻拔节期、抽穗期及成熟期的各根系形态结构参数为自变量, 氮积累量、氮肥回收率、氮肥农学利用率及氮肥生理利用率为因变量, 分别作岭回归分析, 方程的决定系数见表 8。24 组样本中, 仅抽穗期根系性状与水稻群体氮积累量的关系较密切, 其岭回归方程决定系数接近 0.7。其余样本与氮素吸收利用的岭回归方程决定系数则为 0.0720~0.5722, 表明拔节、成熟期水稻根系结构对氮素吸收利用效率的解释程度以及抽穗期根系结构对氮肥利用效率的解释程度均较低。

3 讨论

水和氮是影响作物生产力的关键因素, 通过水

表 4 水氮管理对不同氮效率水稻拔节期根系性状的影响

Table 4. Effects of water-nitrogen management on root traits at jointing stage in rice with different N use efficiencies.

品种 Cultivar	灌溉方式 Irrigation pattern	施氮模式 N management mode	根系总干质量 TRW/(g·plant ⁻¹)				单株不定根 Adventitious root per plant				单株粗分枝根 Coarse lateral root per plant				单株细分枝根 Fine lateral root per plant			
			数量 Number	长度 Length/cm	表面积 Surface area/cm ²	体积 Volume/cm ³	长度 Length/cm	表面积 Surface	体积 Volume/cm ³	长度 Length/cm	表面积 Surface	体积 Volume/cm ³	长度 Length/cm	表面积 Surface	体积 Volume/cm ³			
德香 4103 Dexiang 4103(C ₁)	W ₁	CK	222.17±2.97 d	31.67±0.56 c	62.26±2.16 b	0.90±0.02 b	76.43±2.73 c	39.95±0.60 c	0.15±0.01 b	368.62±3.35 c	57.58±0.97 c	0.08±0.00 b	368.62±3.35 c	57.58±0.97 c	0.08±0.00 b			
		N ₁	370.00±35.63 a	53.72±5.48 a	86.20±9.28 a	1.26±0.19 a	124.48±9.63 a	55.78±5.75 a	0.21±0.02 a	595.80±51.37 a	83.07±8.23 a	0.11±0.01 a	595.80±51.37 a	83.07±8.23 a	0.11±0.01 a			
		N ₂	334.87±24.21 b	49.28±3.94 a	81.46±5.97 a	1.19±0.09 a	104.46±11.72 b	49.63±3.89 b	0.19±0.01 a	520.42±45.61 b	74.31±7.04 b	0.10±0.01 a	520.42±45.61 b	74.31±7.04 b	0.10±0.01 a			
		N ₃	277.71±25.22 c	39.44±4.56 b	66.97±11.14 b	0.96±0.09 b	84.79±8.97 c	39.52±4.26 c	0.15±0.02 b	398.64±54.89 c	57.23±8.18 c	0.08±0.01 b	398.64±54.89 c	57.23±8.18 c	0.08±0.01 b			
		平均 Average	301.19	43.53	74.22	1.08	97.54	46.22	0.18	470.87	68.05	0.09	470.87	68.05	0.09			
	W ₂	CK	197.79±1.38 c	30.85±0.86 c	56.06±2.24 b	0.82±0.03 b	73.37±1.64 b	36.43±1.21 b	0.13±0.00 b	348.23±9.30 b	51.58±0.38 b	0.07±0.00 b	348.23±9.30 b	51.58±0.38 b	0.07±0.00 b			
直香 3724 Yixiang 3724(C ₂)	W ₁	N ₁	330.93±28.40 a	48.97±4.55 a	78.98±6.47 a	1.15±0.08 a	108.46±13.05 a	49.67±4.72 a	0.19±0.01 a	520.25±65.01 a	74.68±7.91 a	0.10±0.01 a	520.25±65.01 a	74.68±7.91 a	0.10±0.01 a			
		N ₂	344.11±52.23 a	51.04±7.36 a	85.35±10.25 a	1.21±0.19 a	113.14±18.55 a	51.85±7.83 a	0.20±0.03 a	541.03±87.87 a	77.60±12.57 a	0.10±0.02 a	541.03±87.87 a	77.60±12.57 a	0.10±0.02 a			
		N ₃	261.06±11.34 b	37.13±1.81 b	60.36±4.60 b	0.93±0.03 b	79.88±3.61 b	37.97±1.77 b	0.14±0.01 b	369.80±23.43 b	53.74±3.29 b	0.08±0.00 b	369.80±23.43 b	53.74±3.29 b	0.08±0.00 b			
		平均 Average	283.47	42.00	70.19	1.03	93.71	43.98	0.17	444.83	64.40	0.09	444.83	64.40	0.09			
		CK	217.21±5.57 c	32.31±0.87 c	61.87±1.56 b	0.92±0.03 b	77.71±3.21 b	39.35±2.41 b	0.15±0.00 b	377.15±11.43 b	56.66±0.59 b	0.08±0.00 b	377.15±11.43 b	56.66±0.59 b	0.08±0.00 b			
	W ₂	N ₁	370.97±33.56 a	53.16±3.95 a	85.60±7.33 a	1.27±0.12 a	121.31±11.03 a	55.81±5.33 a	0.20±0.02 a	592.10±50.51 a	82.90±8.28 a	0.11±0.01 a	592.10±50.51 a	82.90±8.28 a	0.11±0.01 a			
F 值 F-value	W ₁	N ₂	359.48±24.26 a	52.55±1.63 a	86.64±1.24 a	1.27±0.03 a	112.47±6.63 a	53.76±2.64 a	0.20±0.01 a	564.79±36.95 a	79.93±4.08 a	0.11±0.01 a	564.79±36.95 a	79.93±4.08 a	0.11±0.01 a			
		N ₃	278.47±18.90 b	39.43±2.34 b	65.40±3.99 b	0.98±0.06 b	84.77±4.70 b	39.76±2.37 b	0.15±0.01 b	393.03±28.15 b	58.40±3.48 b	0.08±0.01 b	393.03±28.15 b	58.40±3.48 b	0.08±0.01 b			
		平均 Average	306.53	44.36	74.88	1.11	99.07	47.17	0.18	481.77	69.47	0.10	481.77	69.47	0.10			
		CK	195.70±1.17 c	30.49±0.72 c	54.26±1.90 b	0.78±0.03 c	71.55±1.86 b	34.95±0.18 b	0.13±0.01 b	339.50±5.35 b	49.53±1.50 c	0.07±0.00 b	339.50±5.35 b	49.53±1.50 c	0.07±0.00 b			
		N ₁	336.13±23.34 a	50.56±3.00 a	82.87±3.80 a	1.20±0.05 a	112.16±10.40 a	50.92±3.61 a	0.20±0.02 a	537.86±37.35 a	79.06±5.57 a	0.10±0.01 a	537.86±37.35 a	79.06±5.57 a	0.10±0.01 a			
	W ₂	N ₂	312.27±20.63 a	46.18±2.82 a	78.67±5.69 a	1.09±0.08 a	101.61±6.93 a	46.33±2.90 a	0.18±0.01 a	483.88±31.45 a	69.50±3.20 b	0.09±0.00 a	483.88±31.45 a	69.50±3.20 b	0.09±0.00 a			
F 值 F-value	C ₁ 平均 Average	N ₃	260.93±19.47 b	37.54±4.35 b	60.17±7.81 b	0.91±0.07 b	81.11±6.39 b	37.96±3.90 b	0.14±0.01 b	373.46±37.62 b	54.10±5.78 c	0.08±0.01 b	373.46±37.62 b	54.10±5.78 c	0.08±0.01 b			
		平均 Average	276.26	41.19	68.99	1.00	91.61	42.54	0.16	433.68	63.05	0.09	433.68	63.05	0.09			
		C ₁ 平均 Average	292.33	42.76	72.21	1.05	95.63	45.10	0.17	457.85	66.22	0.09	457.85	66.22	0.09			
		C ₂ 平均 Average	291.40	42.78	71.93	1.05	95.33	44.86	0.17	457.72	66.26	0.09	457.72	66.26	0.09			
		C	0.61 ns	0.13 ns	0.03 ns	0.01 ns	0.05 ns	0.11 ns	0.18 ns	0.01 ns	0.01 ns	0.06 ns	0.01 ns	0.01 ns	0.06 ns			
	W	27.39**	185.17**	73.78**	46.33**	37.74**	73.62**	31.18**	92.42**	876.03**	65.00**	191.93**	876.03**	65.00**	191.93**			
F 值 F-value	C ₂ 平均 Average	N	58.38**	134.92**	154.23**	83.57**	89.77**	67.63**	92.42**	99.05**	98.15**	67.00**	99.05**	98.15**	67.00**			
		C×W	3.43 ns	12.67*	9.01*	10.06*	3.91 ns	8.90*	1.07 ns	77.47**	4.94 ns	25.87**	77.47**	4.94 ns	25.87**			
		C×N	0.27 ns	0.08 ns	0.13 ns	0.25 ns	0.06 ns	0.16 ns	0.38 ns	0.07 ns	0.40 ns	0.10 ns	0.07 ns	0.40 ns	0.10 ns			
		W×N	0.72 ns	0.62 ns	0.40 ns	0.35 ns	1.35 ns	0.76 ns	0.84 ns	0.84 ns	0.32 ns	0.29 ns	0.84 ns	0.32 ns	0.29 ns			
		C×W×N	0.75 ns	1.65 ns	2.13 ns	1.55 ns	1.82 ns	1.65 ns	1.70 ns	1.84 ns	2.07 ns	1.27 ns	1.84 ns	2.07 ns	1.27 ns			
	平均 Average	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99			

TRW, Total root dry weight. The same as below.

表 5 水氮管理对不同氮效率水稻抽穗期根系性状的影响

Table 5. Effects of water-nitrogen management on root traits at heading stage in rice with different N use efficiencies.

品种 Cultivar	灌溉方式 Irrigation pattern	施氮模式 N management mode	根系总干质量 TRW (g plant ⁻¹)				单株不定根 Adventitious root per plant				单株粗分枝根 Coarse lateral root per plant				单株细分枝根 Fine lateral root per plant			
			数量 Number	长度 Length/cm	表面积 Surface area/cm ²	体积 Volume/cm ³	数量 Number	长度 Length/cm	表面积 Surface area/cm ²	体积 Volume/cm ³	数量 Number	长度 Length/cm	表面积 Surface area/cm ²	体积 Volume/cm ³	数量 Number	长度 Length/cm	表面积 Surface area/cm ²	体积 Volume/cm ³
德香 4103 Dexiang 4103(C ₁)	W ₁	CK	490.38±11.91 d	111.46±1.47 d	238.83±6.58 d	3.89±0.19 c	532.86±11.72 d	260.60±8.40 d	1.13±0.07 c	1871.52±65.71 c	269.95±4.78 d	0.34±0.01 d						
		N ₁	671.31±39.30 a	182.29±10.99 a	332.09±12.82 a	5.74±0.71 a	831.18±64.23 a	374.15±35.71 a	1.51±0.11 a	2737.43±295.95	390.01±22.67 a	0.47±0.04 a						
		N ₂	611.68±41.08 b	162.68±8.99 b	303.03±27.00 b	4.71±0.43 b	722.97±67.61 b	322.91±23.54 b	1.38±0.06 b	2336.17±112.72	333.10±25.80 b	0.43±0.03 b						
		N ₃	533.02±51.38 c	145.43±14.39 c	264.86±23.79 c	4.21±0.30 bc	611.73±54.62 c	291.48±25.43 c	1.21±0.13 c	2069.37±163.96	300.22±23.83 c	0.38±0.03 c						
		平均 Average	3.72	576.60	150.47	284.70	4.64	674.69	312.29	1.31	2253.62	323.32	0.41					
直香 3724 Yixiang 3724(C ₂)	W ₂	CK	2.55±0.01 d	422.76±19.77 d	103.51±0.36 c	214.26±12.04 b	3.56±0.22 c	516.92±23.35 b	240.49±8.80 d	0.94±0.02 c	1715.61±115.56	251.72±10.00 c	0.31±0.00 c					
		N ₁	3.96±0.43 b	598.18±42.50 b	164.57±16.83 a	308.77±32.46 a	4.87±0.25 b	743.15±59.27 a	326.78±31.68 b	1.36±0.07 a	2398.12±197.90	347.92±27.28 a	0.44±0.04 a					
		N ₂	4.37±0.51 a	652.24±52.75 a	172.60±10.46 a	316.69±17.29 a	5.50±0.94 a	786.57±102.16 a	360.29±45.58 a	1.45±0.12 a	2591.77±395.68	367.68±29.77 a	0.44±0.02 a					
		N ₃	3.11±0.14 c	480.41±18.98 c	126.48±13.64 b	233.28±15.98 b	3.88±0.30 c	577.24±25.07 b	270.19±17.06 c	1.05±0.13 b	1863.10±157.34	285.07±9.88 b	0.36±0.02 b					
		平均 Average	3.50	538.40	141.79	268.25	4.45	655.97	299.44	1.20	2142.15	313.10	0.39					
F 值 F-value	W ₂	CK	1.50±0.02 c	338.50±7.51 d	86.32±3.27 d	172.00±6.05 c	2.79±0.02 c	407.85±18.08 d	188.84±5.30 c	0.79±0.04 c	1363.10±11.04 b	198.31±7.17 c	0.25±0.01 c					
		N ₁	3.52±0.36 a	533.83±28.55 a	142.19±6.97 a	262.43±14.46 a	4.31±0.48 a	644.37±57.92 a	280.66±25.05 a	1.19±0.07 a	2042.68±201.21	298.25±23.99 a	0.37±0.02 a					
		N ₂	3.20±0.21 a	487.82±14.81 b	130.99±5.76 b	243.34±17.41 a	3.75±0.26 b	564.62±36.78 b	263.36±18.70 a	1.09±0.03 a	1888.23±144.26	272.25±23.18 a	0.35±0.02 a					
		N ₃	2.60±0.11 b	402.97±13.11 c	105.94±6.43 c	197.08±10.06 b	3.29±0.20 bc	481.28±26.57 c	223.71±12.96 b	0.90±0.08 b	1580.68±117.05	235.45±13.01 b	0.30±0.02 b					
		平均 Average	2.71	440.78	116.36	218.71	3.54	524.53	239.14	0.99	1718.67	251.07	0.32					
F 值 F-value	C ₁ 平均 Average	CK	3.61	557.5	146.13	276.48	4.55	665.33	305.86	1.25	2197.89	318.21	0.40					
		N ₁	2.84	451.02	119.37	226.18	3.71	544.19	250.05	1.03	1787.83	260.53	0.33					
		N ₂	83.02*	137.13**	74.64*	93.32*	40.58*	59.60*	59.63*	80.47*	77.18*	218.38**	121.72**					
		N ₃	53.11**	40.59**	138.66**	164.55**	30.52**	36.79**	34.94**	49.33**	32.09**	35.67**	125.44**					
		平均 Average	180.74**	149.57**	263.56**	118.41**	63.99**	107.13**	86.13**	124.55**	82.37**	106.92**	114.01**					
F 值 F-value	C ₂ 平均 Average	CK	0.37 ns	3.70 ns	4.49 ns	0.38 ns	3.25 ns	4.64 ns	2.34 ns	2.72 ns	0.37 ns	3.19 ns	0.66 ns					
		N ₁	1.33 ns	0.71 ns	1.42 ns	0.74 ns	0.54 ns	1.08 ns	0.49 ns	1.09 ns	0.57 ns	0.65 ns	1.14 ns					
		N ₂	1.63 ns	1.94 ns	2.26 ns	0.95 ns	1.80 ns	0.35 ns	1.95 ns	2.80 ns	1.15 ns	1.56 ns	0.43 ns					
		N ₃	6.76**	5.46**	6.42**	4.04*	7.15**	5.38**	5.82**	4.18*	5.17**	6.16**	2.63 ns					
		平均 Average	2.97	461.26	122.39	233.66	3.90	563.85	260.96	1.06	1856.98	270.00	0.34					

表6 水氮肥管理不同氮效率水稻成熟期根系性状的影响

Table 6. Effects of water-nitrogen management on root traits at maturity stage in rice with different N use efficiencies.

品种 Cultivar	灌溉方式 Irrigation pattern	施氮模式 N management mode	根系总干质量 TRW/(g plant ⁻¹)				单株不定根 Adv. entitious root per plant				单株粗分枝根 Coarse lateral root per plant				单株细分枝根 Fine lateral root per plant			
			数量 Number	长度 Length/cm	表面积 Surface area/cm ²	体积 Volume/cm ³	长度 Length/cm	表面积 Surface area/cm ²	体积 Volume/cm ³	长度 Length/cm	表面积 Surface area/cm ²	体积 Volume/cm ³	长度 Length/cm	表面积 Surface area/cm ²	体积 Volume/cm ³	长度 Length/cm	表面积 Surface area/cm ²	体积 Volume/cm ³
德香4103 Dexiang4103(C ₁)	W ₁	CK	388.46±4.16 d	91.19±2.48 c	178.21±5.67 d	2.88±0.29 c	377.65±18.62 d	174.80±8.53 c	0.78±0.028 d	1378.85±83.28 d	201.55±11.10 d	0.27±0.005 c						
		N ₁	679.41±21.28 a	159.82±5.28 a	255.89±8.32 a	4.13±0.12 a	580.43±22.15 a	268.75±7.58 a	1.04±0.031 a	1905.11±68.95 a	285.30±8.69 a	0.39±0.015 a						
		N ₂	601.10±38.04 b	151.95±8.96 a	224.81±14.37 b	3.51±0.18 b	502.39±30.88 b	258.22±12.70 a	0.95±0.041 b	1784.56±100.52	257.04±12.93 b	0.33±0.021 b						
		N ₃	524.94±38.04 c	115.05±7.70 b	190.84±12.82 c	3.12±0.21 c	427.85±23.15 c	197.11±12.96 b	0.87±0.057 c	1492.41±97.41 c	216.53±14.10 c	0.29±0.013 c						
		平均 Average	2.84	129.5	212.44	3.41	472.08	224.72	0.91	1640.23	240.11	0.32						
直香3724 Yixiang3724(C ₂)	W ₁	CK	314.61±2.24 c	82.76±1.72 c	155.96±4.95 c	2.59±0.24 c	366.49±10.74 c	158.65±4.94 c	0.63±0.008 c	1225.36±33.62 c	183.75±4.23 c	0.25±0.007 c						
		N ₁	632.37±24.02 a	142.73±6.33 a	240.04±11.65 a	3.60±0.17 a	519.02±24.87 a	239.22±8.98 a	0.93±0.023 a	1732.71±52.00 a	265.53±11.47 a	0.36±0.021 a						
		N ₂	628.62±48.32 a	142.44±15.96 a	221.05±23.27 b	3.73±0.44 a	518.22±69.00 a	239.39±19.57 a	0.94±0.104 a	1811.62±173.49	272.53±24.70 a	0.34±0.041 a						
		N ₃	455.96±15.51 b	109.22±5.46 b	163.99±7.53 c	2.95±0.12 b	409.34±18.33 b	179.43±5.81 b	0.72±0.029 b	1372.67±58.25 b	206.60±7.46 b	0.28±0.007 b						
		平均 Average	2.73	119.29	195.26	3.22	453.27	204.17	0.81	1535.59	232.10	0.31						
	W ₂	CK	359.09±5.61 d	66.99±1.73 c	172.48±4.76 d	2.79±0.23 d	383.67±8.24 d	181.91±6.13 c	0.78±0.018 c	1273.47±62.73 d	191.38±7.65 d	0.25±0.013 d						
		N ₁	651.48±18.65 a	153.92±4.83 a	247.47±9.75 a	4.10±0.13 a	592.96±25.80 a	256.50±5.65 a	1.05±0.045 a	1886.74±66.02 a	281.67±8.32 a	0.38±0.010 a						
		N ₂	573.44±15.79 b	149.93±6.59 a	215.94±5.88 b	3.44±0.04 b	481.92±16.22 b	253.54±7.45 a	0.91±0.017 b	1714.78±74.86 b	244.78±6.69 b	0.32±0.006 b						
		N ₃	520.42±21.95 c	112.13±3.76 b	186.88±6.27 c	3.06±0.11 c	423.70±18.11 c	195.40±6.72 b	0.86±0.026 b	1488.33±42.59 c	212.62±5.52 c	0.28±0.008 c						
		平均 Average	2.68	120.74	205.69	3.35	470.56	221.84	0.90	1590.83	232.61	0.31						
F 值 F-value	C ₁ 平均 Average	CK	279.37±6.43 d	61.99±2.54 d	138.75±3.62 c	2.29±0.03 d	316.69±15.50 d	135.45±8.57 d	0.56±0.015 d	1090.83±66.32 c	163.90±5.77 d	0.21±0.008 d						
		N ₁	608.46±20.89 a	136.25±5.09 a	230.53±9.40 a	3.44±0.12 a	488.76±14.36 a	225.44±6.57 a	0.86±0.021 a	1609.16±46.00 a	251.05±8.93 a	0.34±0.012 a						
		N ₂	538.54±15.03 b	122.31±4.00 b	187.21±4.45 b	3.14±0.08 b	431.10±14.45 b	205.14±6.32 b	0.80±0.021 b	1549.69±47.67 a	236.27±9.27 b	0.28±0.010 b						
		N ₃	416.34±7.54 c	99.67±4.55 c	149.23±4.05 c	2.69±0.08 c	370.24±13.81 c	163.66±3.63 c	0.67±0.016 c	1245.91±37.63 b	186.53±4.88 c	0.26±0.009 c						
		平均 Average	2.36	105.06	176.43	2.89	401.70	182.42	0.72	1373.90	209.44	0.27						
	C ₂ 平均 Average	C ₁ 平均 Average	528.18	124.4	203.85	3.31	462.67	214.45	0.86	1587.91	236.10	0.31						
		C ₂ 平均 Average	493.39	112.9	191.06	3.12	436.13	202.13	0.81	1482.36	221.03	0.29						
		C	7.44 ns	8.03 ns	3.58 ns	2.05 ns	3.05 ns	5.26 ns	4.58 ns	6.13 ns	4.42 ns	4.77 ns						
		W	438.97**	143.98**	1178.37**	221.27**	131.03**	856.43**	1206.95**	81.51**	74.61**	464.71**						
		N	655.17**	495.12**	303.51**	150.01**	196.37**	336.90**	152.85**	189.10**	279.38**	219.91**						
	C×W	C×W	24.11**	6.42 ns	79.82**	35.91**	42.69**	84.82**	81.47**	9.94*	17.68*	84.24**						
		C×N	2.47 ns	6.56**	1.81 ns	1.32 ns	2.72 ns	1.35 ns	1.69 ns	1.59 ns	1.90 ns	1.78 ns						
		W×N	12.51**	3.88*	3.56*	7.32**	5.67**	0.70 ns	7.90**	3.10*	7.47**	2.23 ns						
		C×W×N	2.03 ns	2.45 ns	1.29 ns	1.00 ns	0.36 ns	2.33 ns	0.32 ns	0.80 ns	0.47 ns	1.65 ns						

表 7 不同氮效率水稻各生育期根系性状与产量的岭回归分析

Table 7. Ridge regression analysis between grain yield and root traits at different stages in rice with different N use efficiencies.

根系性状 Root trait	标准回归系数 Standard regression coefficient					
	拔节期 Jointing stage		抽穗期 Heading stage		成熟期 Maturity stage	
	氮高效 HN	氮低效 LN	氮高效 HN	氮低效 LN	氮高效 HN	氮低效 LN
根总干质量 Total root dry weight	-0.0135	-0.019	0.1875	0.1056	-0.0679	-0.0142
不定根 Adventitious root						
数量 Number	-0.1711	-0.0595	0.2143	0.1457	0.1777	0.1591
长度 Length	0.1110	0.0653	0.0698	-0.0331	0.2415	0.4472
表面积 Surface area	0.2074	0.0538	0.0437	0.1587	0.0127	0.1910
体积 Volume	-0.1432	-0.0422	0.0019	-0.006	0.1872	0.0051
粗分枝根 Coarse lateral root						
长度 Length	0.2971	0.1153	0.2625	0.0352	-0.1532	-0.0744
表面积 Surface area	0.1718	0.2337	0.0138	0.0552	0.1450	0.2821
体积 Volume	-0.0805	-0.1707	0.1236	-0.0037	-0.0953	-0.2173
细分枝根 Fine lateral root						
长度 Length	0.3316	0.4615	0.0512	0.0130	0.2036	-0.2006
表面积 Surface area	0.1496	0.1212	-0.0216	0.3743	0.1022	-0.0281
体积 Volume	-0.0537	-0.0096	0.0144	0.1180	-0.1059	0.0025
决定系数 Determination coefficient	0.7204**	0.6292**	0.9009**	0.9028**	0.4587**	0.4198**

氮高效—氮高效型品种德香 4103; 氮低效—氮低效型品种宜香 3724。表 8 同。**, 极显著水平。

HN, Dexiang 4103(High N use efficiency cultivar); LN,Yixiang 3724(Low N use efficiency cultivar). The same as in Table 8.**, Significaant at 0.01 level.

表 8 不同氮效率水稻各生育期根系性状与氮素吸收利用的岭回归分析

Table 8. Ridge regression analysis between root traits at different stages and N accumulation and utilization in rice with different N use efficiencies.

氮素吸收利用 N accumulation and utilization	决定系数 Determination coefficient					
	拔节期 Jointing stage		抽穗期 Heading stage		成熟期 Maturity stage	
	氮高效 HN	氮低效 LN	氮高效 HN	氮低效 LN	氮高效 HN	氮低效 LN
氮积累量 N accumulation	0.4596	0.4945	0.6892	0.6917	0.4036	0.4078
氮肥回收率 N recovery efficiency	0.3801	0.4244	0.4491	0.5722	0.3437	0.4308
氮肥农学利用率 N agronomic efficiency	0.3226	0.2638	0.3451	0.4263	0.3140	0.4197
氮肥生理利用率 N physiological efficiency	0.0720	0.1077	0.2243	0.0928	0.2519	0.4161

氮协同管理提高水稻产量和水、氮利用效率一直是水稻栽培领域的研究热点。前人研究表明, 节水灌溉方式下合理的氮肥运筹能够增加单位面积有效穗数、每穗粒数、总颖花量及千粒重, 从而显著提高产量和氮肥利用率^[16, 17]。本研究亦显示水分管理及氮肥施用互作效应明显, 控制性交替灌溉下, 优化氮肥运筹模式(SPAD 指导施肥、优化施肥)下水稻每穗粒数、单位面积总颖花量以及产量均表现出显著优势, 当前研究普遍认为水稻产量的形成与品种的氮素吸收利用能力密切相关^[18, 19]。本研究中, 氮高效型水稻德香 4103 的产量、每穗粒数、单位面积总颖花量显著高于氮低效型水稻宜香 3724, 但二者有效穗数、结实率均未见显著差异, 这可能与四川盆地的特殊气候条件和地域性水稻育种目标密

切相关。四川盆地“阴雨寡照”的气候特点决定了该地区水稻种植密度及有效穗数均不能过高, 否则易引发并病虫害而影响产量, 因此, 四川盆地水稻育种目标是主攻“大穗型”, 而氮高效型水稻德香 4103 作为典型的大穗型品种, 正是依靠其在每穗粒数及总颖花量方面的显著优势而获得高产的。

作为植物水分养分吸收利用的重要器官, 根系的形态与活性及其与产量形成的关系一直备受关注。前人围绕着高产水稻品种根系应具有何种形态生理特征这一问题开展了较多研究, 部分研究结果认为, 水稻根系干质量、根数、根吸收表面积与产量密切相关, 且根重与穗数及根数与穗数、每穗粒数、千粒重关系密切, 根系生理活性亦与结实率、千粒重呈显著或极显著正相关^[20, 21]; 也有学者认为

根系既是水分养分的吸收器官,同时又需要消耗能量用于自身形态建成及维持功能,因而并非根系生物量及活性越高产量越高。刘桃菊等^[22]研究表明,在根系数量较少的前提下,增加根长、根重能够提高产量,而当二者增加至一定程度后,产量反而会随根量增加而下降;杨建昌等^[23]也观察到水稻新株型品系根量、根系活性均大于 IR72,但其结实率、产量却不及 IR72。根系生物量与活力的关系也并非简单的正相关^[24, 25],尤其是随着水稻品种的演变,根系生物量增大而活力降低的情况也有可能出现^[26],根系与产量的关系是极其复杂的,单纯局限于根系生物量、活性这两个指标,很难把握根系与产量复杂关系的实质。基于这种认识,本研究借助根系扫描及分析软件^[15],对不同氮效率基因型水稻三个关键生育时期各类型根形态指标进行了研究,岭回归分析显示拔节期、抽穗期和成熟期根系性状对产量变化均有一定解释度,其中以抽穗期水稻各根系指标与产量的岭回归方程决定系数最高,表明该时期根系性状指标与产量关系最为密切;各生育时期对产量变化影响最大的根系指标不尽相同,拔节期、成熟期分别是细分枝根根长和不定根根长,而抽穗期则以分枝根特征与产量的关系最为密切,这暗示通过农艺措施调控水稻根系生长与分布需充分考虑生育时期差异。

目前研究普遍认为水稻根系性状存在显著基因型差异。Cassman等^[27]、魏海燕等^[5]研究表明氮高效水稻品种在根系各形态、生理指标方面均显著优于氮低效水稻品种;戢林等^[6]研究结果显示,水稻氮高效型不定根、各分枝根根长、表面积和体积均显著大于氮低效型。本研究中水稻根系各构型指标亦表现出显著的基因型差异,氮高效水稻抽穗期不定根及分枝根各指标均优于氮低效水稻。根系对土壤环境的适应具有可塑性,主要表现在各类根的功能、结构变化以及对环境响应的差异上^[28]。土壤养分含量提高会引起水稻分枝根的大量增生^[29],而适度干旱则会伴随着粗分枝根的比例明显提升^[30],适宜的肥水调控能够塑造良好的根系形态,提高根系代谢能力,从而促进高产^[31]。顾东祥等^[10, 15]的研究结果显示,在抽穗期,水分和氮肥管理对根系形态特征的影响以粗分枝根、细分枝根长的垂直分布比例最为显著。本研究发现,抽穗期以水稻定根(粗分枝根和细分枝根)对产量影响最大,对氮高效水稻而言,粗分枝根数量增加对增产最有利,而对于氮低效水稻来说,则更大程度上是依靠细分枝根表面积增大带来的比表面积迅速增加而增产。产生这种

差异的原因可能是氮高效水稻更高产量的实现需要吸收更多养分来维系自身功能,粗分枝根数量的增加进一步拓展了吸收空间,增加土壤养分供给量。

Cassman等^[27]研究表明氮高效水稻品种在根系形态、生理方面均具有较大优势;戢林等^[6]认为水稻粗分枝根的发育情况对氮素的吸收具有直接影响;而石庆华等^[20]的研究则显示根系性状较优的水稻品种,在氮素吸收利用率方面并未表现出明显优势。本研究中,仅抽穗期根系性状与水稻群体氮积累量的关系较密切,其岭回归方程决定系数接近0.7,其余样本与氮素吸收利用的岭回归方程决定系数则为0.0720~0.5722,表明水稻根系构型对氮素吸收和利用过程的影响表现出不一致性,原因可能是根系作为养分吸收的主要器官,其在形态建成过程中可以通过调整自身构型来响应土壤养分环境的变化,故水稻根系构型能够对氮素吸收产生较大影响^[8];而植株对氮素的利用过程除受氮素吸收状况的影响外,还与光、温等独立性较强的环境因子密切相关,因而,与氮素吸收相比,氮素利用与根系构型的相关性较弱。

总体而言,抽穗期根系构型对水稻产量、氮积累量关系密切。水稻各类型根生长与分布特征存在显著基因型差异,且在不同生育时期与水稻产量变化最为密切的根系性状指标并不一致。氮高效和氮低效水稻拔节期均应提高细分枝根长来促进产量提高;而在抽穗期,氮高效水稻以增加粗分枝根长,氮低效水稻以增大细分枝根表面积对提高产量较为有利;在成熟期,保证水稻较长的不定根长度是获取高产必不可少的。常规灌溉配套SPAD指导施肥(施氮量为120 kg/hm²)和控制性交替灌溉结合优化施氮模式(施氮量为150 kg/hm²)能够使氮高效水稻在抽穗期粗分枝根最长,氮低效水稻细分枝根表面积最大,对获取高产最为关键,为最佳水氮管理模式。

参考文献:

- [1] 朱德峰,程式华,张玉屏,林贤青,陈惠哲. 全球水稻生产现状与制约因素分析. 中国农业科学, 2010, 43(3): 474-479.
Zhu D F, Cheng S H, Zhang Y P, Lin X Q, Chen H Z. Analysis of status and constraints of rice production in the world. *Acta Agron Sin*, 2010, 43(3): 474-479. (in Chinese with English abstract)
- [2] 孙永健,孙园园,徐徽,李玥,严奉君,蒋明金,马均. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量

- 的影响. 作物学报, 2014, 40(9): 1639-1649.
- Sun Y J, Sun Y Y, Xu H, Li Y, Yan F J, Jiang M J, Ma J. Effects of water-nitrogen management patterns on nitrogen utilization characteristics and yield in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(9): 1639-1649. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王绍华, 曹卫星, 丁艳锋, 田永超, 姜东. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响. 中国农业科学, 2004, 37(4): 497-501.
- Wang S H, Cao W X, Ding Y F, Tian Y C, Jiang D. Interactions of water management and nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization in rice. *Sci Agric Sin*, 2004, 37(4): 497-501. (In Chinese with English abstract)
- [4] 梁永书, 周军杰, 南文斌, 段东东, 张汉马. 水稻根系研究进展. 植物学报, 2016, 51(1): 98-106.
- Liang Y S, Zhou J J, Nan W B, Duan D D, Zhang H M. Progress in rice root system research. *Chin Bull Bot*, 2016, 51(1): 98-106. (in Chinese with English abstract)
- [5] 魏海燕, 张洪程, 张胜飞, 杭杰, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 马群, 张庆, 刘艳阳. 不同氮利用效率水稻基因型的根系形态与生理指标的研究. 作物学报, 2008, 34(3): 429-436.
- Wei H Y, Zang H C, Zhang S F, Hang J, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Ma Q, Zhang Q, Liu Y Y. Root morphological and physiological characteristics in rice genotypes with different N use efficiencies. *Acta Agron Sin*, 2008, 34(3): 429-436. (in Chinese with English abstract)
- [6] 戢林, 李廷轩, 张锡洲, 余海英. 氮高效利用基因型水稻根系形态和活力特征. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4770-4781.
- Ji L, Li T X, Zhang X Z, Yu H Y. Root morphological and activity characteristics of rice genotype with high nitrogen utilization efficiency. *Sci Agric Sin*, 2012, 45(23): 4770-4781. (in Chinese with English abstract)
- [7] 史正军, 樊小林, D Klaus, B Sattemacher. 根系局部供氮对水稻根系形态的影响及其机理. 中国水稻科学, 2005, 19(2): 147-152.
- Shi Z J, Fan X L, Klaus D, Sattemacher B. Effect of localized nitrogen supply on root morphology in rice and its mechanism. *Chin J Rice Sci*, 2005, 19(2): 147-152. (in Chinese with English abstract)
- [8] Fan J B, Zhang Y L, Turner D, Duan Y H, Wang D S, Shen Q R. Root physiological and morphological characteristics of two rice cultivars with different nitrogen-use efficiency. *Pedosphere*, 2010, 20(4): 446-455.
- [9] Ju C X, Buresh R J, Wang Z Q, Zhang H, Liu L J, Yang J C, Zhang J H. Root and shoot traits for rice varieties with higher grain yield and higher nitrogen use efficiency at lower nitrogen rates application. *Field Crops Res*, 2015, 175: 47-55.
- [10] 顾东祥, 汤亮, 徐其军, 雷晓俊, 曹卫星, 朱艳. 水氮处理下不同品种水稻根系生长分布特征. 植物生态学报, 2011, 35(5): 558-566.
- Gu D X, Tang L, Xu Q J, Lei X J, Cao W X, Zhu Y. Root growth and distribution in rice cultivars as affected by nitrogen and water supply. *Chin J Plant Ecol*, 2011, 35(5): 558-566. (in Chinese with English abstract)
- [11] 曾翔, 李阳生, 谢小立, 肖国樱, 廖江林. 不同灌溉模式对杂交水稻生育后期根系生理特性和剑叶光合特性的影响. 中国水稻科学, 2003, 17(4): 66-70.
- Zeng X, Li Y S, Xie X L, Xiao G Y, Liao J L. Effects of different irrigation patterns on physiological characteristics of root and photosynthetic traits of flag leaf after flowering stage in hybrid rice. *Chin J Rice Sci*, 2003(4): 66-70. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘永霞, 岳延滨, 刘岩, 曹宏鑫, 葛道阔, 魏秀芳. 不同品种和氮肥条件下水稻根系主要几何参数动态量化. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1782-1790.
- Liu Y X, Yue Y B, Liu Y, Cao H X, Ge D K, Wei X F. Quantitative research of dynamic models of the main geometric parameters of rice root system of different varieties under different nitrogen conditions. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(9): 1782-1790. (in Chinese with English abstract)
- [13] 秦俭, 杨志远, 孙永健, 徐徽, 马均. 不同穗型杂交水稻物质积累、氮素吸收利用和产量的差异比较. 中国水稻科学, 2014, 28(5): 514-522.
- Qin J, Yang Z Y, Sun Y J, Xu H, Ma J. Differential comparison of assimilation products accumulation, nitrogen uptake and utilization and grain yield of hybrid Indica rice combinations with different panicle types. *Chin J Rice Sci*, 2014, 28(5): 514-522. (in Chinese with English abstract)
- [14] 孙永健, 孙园园, 徐徽, 李玥, 严奉君, 蒋明, 马均. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响. 作物学报, 2014, 40(9): 1639-1649.
- Sun Y J, Sun Y Y, Xu H, Li Y, Yan F J, Jiang M J, Ma J. Effects of water-nitrogen management patterns on nitrogen utilization characteristics and yield in rice Cultivars with different nitrogen use efficiencies. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(9): 1639-1649. (in Chinese with English abstract)
- [15] 顾东祥, 汤亮, 曹卫星, 朱艳. 基于图像分析方法的水稻根系形态特征指标的定量分. 作物学报, 2010, 36(5): 810-817.
- Gu D X, Tang L, Cao W X, Zhu Y. Quantitative analysis on root morphological characteristics based on image analysis method in rice. *Acta Agron Sin*, 2010, 36(5): 810-817. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 郭翔, 马均. 水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系. 作物学报,

- 2009, 35(11): 2055-2063.
- Sun Y J, Sun Y Y, Li X Y, Guo X, Ma J. Relationship of activities of key enzymes involved in nitrogen metabolism with nitrogen utilization in rice under water-nitrogen interaction. *Acta Agron Sin*, 2009, 35(11): 2055-2063. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孙永健, 孙园园, 刘凯, 张荣萍, 马均. 水氮互作对结实期水稻衰老和物质转运及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1339-1349.
- Sun Y J, Sun Y Y, Liu K, Zhang R P, Ma J. Effects of water-nitrogen interaction on rice senescence and material transport and yield during grain filling. *Plant Nutr Fert Sci*, 2009, 15(6): 1339-1349. (in Chinese with English abstract)
- [18] 黄丽芬, 董芙蓉, 霍中洋, 全晓艳, 魏海燕, 戴其根, 许钊, 张洪程. 氮素水平对不同氮效率基因型水稻的物质生产与分配的影响. *核农学报*, 2012, 26(9): 1290-1297.
- Huang L F, Dong F R, Huo Z Y, Quan X Y, Wei H Y, Dai Q G, Xu K, Zhang H C. Effects of nitrogen levels on dry matter accumulation and distribution in rice genotype with different nitrogen use efficiencies. *Acta Agric Nucl Sin*, 2012, 26(9): 1290-1297. (in Chinese with English abstract)
- [19] 朴钟泽, 韩龙植, 高熙宗. 水稻不同基因型氮素利用效率差异. *中国水稻科学*, 2003, 17(3): 233-238.
- Piao Z Z, Han L Z, Gao X Z. Variations of nitrogen use efficiency by rice genotype. *Chin J Rice Sci*, 2003, 17(3): 233-238. (in Chinese with English abstract)
- [20] 石庆华, 黄英金, 李木英, 徐益群, 谭雪明, 张佩莲. 水稻根系性状与地上部的相关及根系性状的遗传研究. *中国农业科学*, 1997, 30(4): 62-68.
- Shi Q H, Huang Y J, Li M Y, Xu Y Q, Tan X M, Zhang P L. Studies on the heredity of root characteristics and correlation between the characteristics of roots and upperground parts in rice. *Sci Agric Sin*, 1997, 30(4): 62-68. (in Chinese with English abstract)
- [21] 朱德峰, 林贤青, 曹卫星. 水稻深层根系对生长和产量的影响. *中国农业科学*, 2001, 34(4): 429-432.
- Zhu D F, Lin X Q, Cao W X. Effects of deep roots on growth and yield in two rice varieties. *Sci Agric Sin*, 2001, 34(4): 429-432. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘桃菊, 唐建军, 张佩莲, 戚昌瀚. 水稻根系建成对高产形成的模拟模型与调控决策研究: I. 水稻根系形态建成参数与产量形成关系的初步研究. *江西农业大学学报*, 1998, 20(3): 11-15.
- Liu T J, Tang J J, Zhang P L, Qi C H. A Study on the simulation model and the regulation of rice root growth affecting high yield formation I. A preliminary study on the relationship between the morphological character parameters of root and yield formation in rice. *J Jiangxi Agric Univ*, 1998, 20(3): 11-15. (in Chinese with English abstract)
- [23] 杨建昌, 徐国伟, 仇明, 张文虎, 王志琴, 朱庆森. 新株型水稻生育特性及产量形成特点的研究. *扬州大学学报: 农业与生命科学版*, 2002, 23(1): 45-50.
- Yang J C, Xu G W, Qiu M, Zhang W H, Wang Z Q, Zhu Q S. Growth and development characteristics and yield formation of new plant type rice. *J Yangzhou Univ Agric & Life Sci Edition*, 2002, 23(1): 45-50. (in Chinese with English abstract)
- [24] Yang J C, Zhang H, Zhang J H. Root morphology and physiology in relation to the yield formation of rice. *J Integr Agric*, 2012, 11(6): 920-926.
- [25] 张传胜, 王余龙, 龙银成, 董桂春, 杨连新, 黄建晔. 影响籼稻品种产量水平的主要根系性状. *作物学报*, 2005, 31(2): 137-143.
- Zhang C S, Wang Y L, Long Y C, Dong G C, Yang L X, Huang J Y. Main root traits affecting yield level in conventional Indica rice cultivars (*Oryza sativa* L.). *Acta Agron Sin*, 2005, 31(2): 137-143. (in Chinese with English abstract)
- [26] 杨建昌, 王朋, 刘立军, 王志琴, 朱庆森. 中籼水稻品种产量与株型演进特征研究. *作物学报*, 2006, 32(7): 949-955.
- Yang J C, Wang P, Liu L J, Wang Z Q, Zhu Q S. Evolution characteristics of grain yield and plant type for mid-season Indica rice cultivars. *Acta Agron Sin*, 2006, 32(7): 949-955. (in Chinese with English abstract)
- [27] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*, 2002, 31(2): 132-140.
- [28] de Dorlodot S, Forster B, Pages L, Price A H, Tuberosa R, Draye X. Root system architecture: opportunities and constraints for genetic improvement of crops. *Trends Plant Sci*, 2007, 12(10): 474-481.
- [29] Walch-Liu P, Ivanov I, Filleur S Y, Gan Y, Remans T, Forde B G. Nitrogen regulation of root branching. *Annals of Botany*, 2006, 97(5): 875-881.
- [30] Davies W J. Root growth response and functioning as an adaptation in water limiting soils//In *Advances in Molecular Breeding Toward Drought and Salt Tolerant Crops*. Springer Netherland, 2007: 55-72.
- [31] 徐国伟, 吕强, 陆大克, 王贺正, 陈明灿. 干湿交替灌溉耦合施氮对水稻根系性状及籽粒库活性的影响. *作物学报*, 2016, 42(10): 1495-1505.
- Xu G W, Lv Q, Lu D K, Wang H Z, Chen M C. Effects of wetting and drying alternative irrigation coupling with nitrogen application on root characteristic and grain-sink activity. *Acta Agron Sin*, 2016, 42(10): 1495-1505. (in Chinese with English abstract)