

引用格式:

陈健晓, 王小娟, 屠乃美, 王效宁, 唐清杰, 刘爱玉. 低磷胁迫对 4 种香稻苗期磷积累量及叶绿素荧光参数的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(4): 369-377.

CHEN J X, WANG X J, TU N M, WANG X N, TANG Q J, LIU A Y. Effects of low phosphorus stress on phosphorus accumulation and chlorophyll fluorescence of four scented rice materials at the seedling stage[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(4): 369-377.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



低磷胁迫对 4 种香稻苗期磷积累量 及叶绿素荧光参数的影响

陈健晓^{1,3,4}, 王小娟², 屠乃美¹, 王效宁^{3,4}, 唐清杰^{3,4}, 刘爱玉^{1*}

(1. 湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2. 海南省农业科学院蔬菜研究所, 海南 海口 571100; 3. 海南省农业科学院粮食作物研究所, 海南 海口 571100; 4. 海南省农作物遗传育种重点实验室, 海南 海口 571100)

摘要: 为筛选出耐低磷性较好的香稻, 通过不同磷质量浓度(0.00、0.25、0.50、2.00、8.00、31.00 mg/L)营养液试验, 研究了香稻绿金香、华香、美香占 2 号和海香占在苗期低磷胁迫下磷积累特性及叶绿素荧光参数特征。结果表明: 出苗后 35 d, 无磷(P0, 磷质量浓度为 0.00 mg/L)条件下, 绿金香单瓶秧苗磷积累量(1.45 mg)最大, 海香占单瓶秧苗磷的积累量(0.88 mg)最低; 叶绿素荧光参数方面, 对于 Φ PSII 和 ETR, 受低磷胁迫影响较大的是海香占, 影响的幅度分别为 0.08 和 9.03, qP 受低磷胁迫影响较大的是华香, 影响幅度为 0.15, qN 受低磷胁迫影响较大的是美香占 2 号, 影响幅度为 0.14; 磷的积累量与 SPAD 值、 Φ PSII、qP 和 ETR 呈显著正相关。低磷胁迫下, 耐低磷能力从强到弱依次为绿金香、华香、美香占 2 号、海香占。

关键词: 香稻; 磷胁迫; 磷积累; 叶绿素荧光; 幼苗

中图分类号: S511.01

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)04-0369-09

Effects of low phosphorus stress on phosphorus accumulation and chlorophyll fluorescence of four scented rice materials at the seedling stage

CHEN Jianxiao^{1,3,4}, WANG Xiaojuan², TU Naimei¹, WANG Xiaoning^{3,4}, TANG Qingjie^{3,4}, LIU Aiyu^{1*}

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Vegetable Research Institute, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571100, China; 3.Cereal Crop Research Institute, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571100, China; 4.Hainan Key Laboratory of Crop Genetics Breeding, Haikou, Hainan 571100, China)

Abstract: In order to screen out optimal scented rice materials resistant to low phosphorus, six group of P mass concentration(0.00, 0.25, 0.50, 2.00, 8.00 and 31.00 mg/L) nutrient solution under natural conditions were designed to treat four scented rice materials(Lyujinxiang, Huaxiang, Meixiangzhan 2, Haixiangzhan) at seedling stage. The phosphorus accumulation characteristics and chlorophyll fluorescence parameters were analyzed. The results showed that without P(P0, P mass concentration was 0.00 mg/L) at 35 d, Lyujinxiang was the highest in the phosphorus accumulation(1.45 mg/bottle), Haixiangzhan was the lowest(0.88 mg/bottle). For chlorophyll fluorescence parameters, Haixiangzhan was affected by low phosphorus stress in Φ PSII and ETR with the affection extent coefficient 0.08 and 9.03 respectively, Huaxiang was affected at qP with the affection extent coefficient 0.15 and Meixiangzhan 2 was greatly affected at qN with the affection extent coefficient 0.14. Meanwhile, phosphorus accumulation was significantly positively related to SPAD values, Φ PSII, qP, and

收稿日期: 2020-05-13

修回日期: 2020-06-02

基金项目: 海南省自然科学基金项目(318QN295); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01-89)

作者简介: 陈健晓(1983—), 男, 海南海口人, 博士研究生, 副研究员, 主要从事作物高产高效栽培与生理研究, chenjianxiao2003@163.com; *通信作者, 刘爱玉, 博士, 教授, 主要从事作物生理生化研究, lay8155@163.com

ETR. By comprehensive evaluations, the low phosphorus resistance of the four scented materials from strong to weak was Lyujinxiang, Huaxiang, Meixiangzhan 2, Haixiangzhan under low phosphorus stress.

Keywords: scented rice; phosphorus stress; phosphorus accumulation; chlorophyll fluorescence; seedling

磷是水稻三大营养元素之一,直接参与水稻体内糖、蛋白质和脂肪的代谢。供磷不足会影响水稻植株体内的能量代谢过程,抑制水稻的正常生长^[1]。对海南 18 个市县的土壤分析表明,33.60%属于低磷土壤(速效磷的含量为 5~20 mg/kg),在低磷土壤上,施用磷肥能够增加土壤磷素水平,提高作物产量,但如果不科学施用磷肥,将导致作物磷肥利用率降低,阻碍农业高效健康发展^[2-4]。利用作物耐低磷和高效吸收利用磷的基因资源是提高作物磷吸收效率、降低磷肥用量的有效手段^[5]。陈晨等^[6]研究表明,低磷条件下磷的累积量是评价水稻苗期磷高效的重要指标之一。磷素能够加强作物光合作用和碳水化合物的合成与转运^[7-8]。低磷胁迫下,磷高效品种拥有较高的 qP、ΦPSII、 F_v/F_m 和 ETR^[9]。

前人就不同生育期、磷肥施用方式及不同磷肥施用量下水稻适应性及磷吸收利用的特征进行了研究,研究对象多为普通水稻^[6,10-14],对于香稻磷积累特性及叶绿素荧光参数的相关研究报道较少。本研究中,采用营养液培养方法,研究不同供磷水平对 4 种香稻苗期 SPAD 值、磷素累积、荧光参数等生理指标的影响,对香稻苗期耐低磷性能进行鉴定,对形态生理基础指标进行分析评价,旨在为香稻苗期的耐低磷性机理研究和香稻的示范推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以前期经过缺磷试验筛选出的不同磷效率香稻为主要研究对象,磷高效材料 3 个(绿金香、华香和美香占 2 号),磷低效材料 1 个(海香占),其中美香占 2 号由广东省农业科学院水稻研究所提供,绿金香、华香和海香占由海南省农业科学院粮食作物研究所提供。

1.2 试验设计

试验于 2018 年 11—12 月在海南省农业科学院

粮食作物研究所农作物遗传育种重点实验室(N20°0'45.79", E110°21'39.75")开展。选择饱满的水稻种子,用多菌灵消毒液浸泡 24 h,用自来水清洗后转移至培养皿中,放入智能人工气候箱(RPX-3500C,宁波海曙赛福实验仪器厂生产)进行黑暗 30 °C 催芽,种子露白后,光照 16 h/黑暗 8 h,温度 28 °C,相对湿度 85%,培养期间保证培养皿中有一定量的水分,以确保水稻正常生长。待秧苗长至 3 叶期后,挑选生长基本一致的幼苗移入有营养液^[15]的培养瓶(高 12 cm,下底直径 7 cm,中部直径 10 cm,口径 8 cm,瓶口处挂有深 3 cm 的筛子)中,每瓶 12 株,每个材料 138 瓶,瓶子用黑色塑料纸包裹,放置在实验室外的阳台上,盖上有透明塑料薄膜的小拱棚(宽 90 cm、高 80 cm、长 200 cm),当温度低于 15 °C 或者下雨时,将小拱棚两边薄膜盖上,起保温和防雨作用。自然条件下培养 5 d,秧苗适应水培条件后去除种子残留物,并用清水淋洗根部,转移到不同磷浓度培养液中培养。不同磷浓度培养液是以水稻完全营养液^[15]为基础,将磷的质量浓度设计为 6 个水平(0.00、0.25、0.50、2.00、8.00、31.00 mg/L),分别记为 P0、P0.25、P0.5、P2、P8、P31。4 个水稻材料,2 因素试验,共 24 个处理,每个处理 23 瓶。培养期间每 2 d 每瓶加入 1 mL 3% H₂O₂,预防绿藻滋生,每 4 d 更换 1 次营养液,pH 为 5.5~5.8。从转入不同磷浓度开始,共培养 35 d。

1.3 测定项目与方法

叶绿素含量动态的测定:从秧苗放入不同磷水平培养液开始,每 7 d 每个处理取 3 瓶,用叶绿素测定仪(SPAD-502plus,浙江托普云农科技股份有限公司生产)测定秧苗顶 1 全展叶中部的叶绿素含量,连续测定 10 株,结果取平均值。

磷积累量(PA)的测定:每 7 d 每个处理取 3 瓶,每瓶秧苗用剪刀剪断秧苗地上部和地下部(根系),分开装袋,80 °C 烘干至恒重后称重。粉碎过筛,用

钼锑钒比色法^[16]测定植株含磷量。磷含量与干物质质量的乘积即为磷积累量(PA)。

荧光参数和光响应值的测定:秧苗培养到第 21 天,每个处理取 3 瓶,每瓶取 3 株用叶绿素荧光仪(JUNIOR-PAM,上海泽泉科技股份有限公司生产)测定水稻顶 2 叶在不同光合有效辐射(PAR)下的电子传递效率(ETR),运用 Microsoft Excel 2003 计算光响应值;秧苗培养到第 25 天,每个处理取 3 瓶,每瓶取 3 株用叶绿素荧光仪测定水稻顶 2 叶实际荧光产量(F_v)、实际光化学量子产量(Φ PSII)、电子传递效率(ETR)、光化学淬灭(qP)、非光化学淬灭(qN)、初始荧光产量(F_0)、最大荧光产量(F_m)和最大光化学量子产量(F_v/F_m)。

1.4 数据处理与分析

运用 Microsoft Excel 2003 整理数据;采用 Statistix 8 进行分析 采用 LSD 0.05 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 低磷胁迫对香稻苗期磷积累量的影响

从表 1 可以看出,随着秧苗生育进程的推进,P0、P0.25 和 P0.5 秧苗磷的积累量降低,P2、P8 和 P31 秧苗的 PA 增加,说明 P2 是本试验秧苗 P 积累的临界质量浓度。绿金香和海香占在 35 d 时各处理间 PA 随磷浓度的降低而显著降低;35 d 时,华香经 P0.25 与 P0.5 处理的 PA 差异不显著,但均与其他浓度处理的 PA 差异显著;在 35 d 时,美香占 2 号 P0 与 P0.25 处理的 PA 差异不显著,但与其他处理的磷积累量差异显著。在 35 d 时,P0 处理下绿金香的 PA 最大(1.45 mg/瓶),海香占 PA 最低(0.88 mg/瓶);P31 处理下,绿金香的 PA 最大(19.77 mg/瓶),海香占的 PA 最低(13.16 mg/瓶)。说明绿金香对磷的吸收能力最强,海香占对磷的吸收能力较弱。

表 1 低磷胁迫下香稻苗期的磷积累量

Table 1 P accumulation of scented rice under low phosphorus stress at seedling stage

材料	处理	单瓶秧苗的 PA/mg				
		7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
绿金香	P0	(1.99±0.08)d	(1.89±0.05)f	(1.71±0.12)f	(1.60±0.09)e	(1.45±0.13)f
	P0.25	(2.32±0.04)c	(2.20±0.02)e	(1.92±0.10)e	(1.84±0.11)e	(1.71±0.07)e
	P0.5	(2.36±0.07)c	(2.27±0.03)d	(2.20±0.13)d	(2.15±0.19)d	(1.90±0.08)d
	P2	(2.38±0.08)bc	(2.62±0.27)c	(3.25±0.25)c	(5.33±0.77)c	(7.83±2.01)c
	P8	(2.55±0.06)b	(3.35±0.28)b	(5.14±0.38)b	(7.38±0.56)b	(11.85±1.23)b
	P31	(2.75±0.11)a	(5.87±0.23)a	(9.29±0.76)a	(13.50±1.83)a	(19.77±2.75)a
华香	P0	(1.60±0.05)e	(1.51±0.03)e	(1.45±0.06)e	(1.30±0.08)e	(1.23±0.06)f
	P0.25	(1.80±0.09)d	(1.77±0.07)d	(1.68±0.15)d	(1.56±0.17)d	(1.48±0.11)d
	P0.5	(1.85±0.06)d	(1.80±0.05)d	(1.78±0.13)d	(1.66±0.21)d	(1.58±0.13)d
	P2	(2.03±0.10)c	(2.22±0.21)c	(2.91±0.52)c	(4.65±0.73)c	(6.59±0.98)c
	P8	(2.34±0.12)b	(3.01±0.37)b	(4.65±0.83)b	(6.54±1.07)b	(9.08±1.23)b
	P31	(2.63±0.13)a	(4.36±0.41)a	(8.73±1.26)a	(11.85±1.76)a	(16.97±2.25)a
美香占 2 号	P0	(1.48±0.03)e	(1.30±0.03)e	(1.22±0.05)e	(1.17±0.12)d	(1.02±0.13)e
	P0.25	(1.64±0.05)d	(1.42±0.11)e	(1.32±0.07)de	(1.21±0.08)d	(1.18±0.06)e
	P0.5	(1.92±0.04)c	(1.73±0.08)d	(1.50±0.12)d	(1.37±0.21)d	(1.30±0.08)d
	P2	(2.00±0.05)bc	(2.10±0.12)c	(2.91±0.53)c	(4.32±0.32)c	(6.22±0.84)c
	P8	(2.14±0.16)b	(2.68±0.32)b	(3.62±0.72)b	(5.89±1.07)b	(8.54±1.22)b
	P31	(2.58±0.23)a	(4.05±0.73)a	(6.87±1.32)a	(9.86±1.76)a	(14.35±1.53)a
海香占	P0	(1.41±0.10)d	(1.32±0.08)e	(1.17±0.13)e	(1.01±0.05)f	(0.88±0.03)f
	P0.25	(1.61±0.09)c	(1.53±0.04)d	(1.45±0.14)d	(1.22±0.05)e	(1.02±0.09)e
	P0.5	(1.74±0.13)c	(1.63±0.17)d	(1.56±0.27)d	(1.40±0.07)d	(1.28±0.12)d
	P2	(1.76±0.11)c	(1.99±0.05)c	(2.36±0.22)c	(2.82±0.31)c	(4.80±1.01)c
	P8	(2.07±0.17)b	(2.36±0.21)b	(3.06±0.42)b	(4.63±0.67)b	(7.19±0.58)b
	P31	(2.49±0.23)a	(3.55±0.51)a	(5.44±0.63)a	(8.22±1.25)a	(13.16±1.72)a

同一材料同列数据不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 低磷胁迫对香稻苗期 SPAD 值的影响

从表 2 可以看出,各处理的 SPAD 值随着生育进程的推进而升高;相同时间内(7、14、21、28、35 d),低磷胁迫总体上使秧苗叶片中 SPAD 值随磷

浓度的降低而降低,在 35 d,同一材料不同处理间差异均不显著;P31 和 P0 处理,绿金香 SPAD 值均最大,分别为 36.67、34.58,海香占 SPAD 值均最小,分别为 32.23、31.12。

表 2 低磷胁迫下香稻苗期的 SPAD 值

Table 2 SPAD value of scented rice under low phosphorus stress at seedling stage

材料	处理	SPAD 值				
		7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
绿金香	P0	22.83±1.53	25.84±1.32	(28.75±0.82)d	(31.51±0.58)d	34.58±1.62
	P0.25	21.72±1.67	24.81±2.12	(29.66±1.12)c	(31.86±0.93)cd	34.24±1.37
	P0.5	22.36±2.01	26.60±1.89	(29.62±1.43)c	(33.42±1.03)bcd	34.65±1.04
	P2	22.43±1.75	26.33±1.67	(30.83±1.67)b	(32.75±1.74)bcd	34.64±1.11
	P8	23.75±1.27	26.72±2.01	(31.37±1.52)ab	(35.85±1.37)a	36.23±1.12
	P31	24.28±1.70	26.80±2.22	(31.62±1.32)a	(34.43±1.52)ab	36.67±1.28
华香	P0	21.13±1.47	27.03±2.31	(30.92±1.28)a	33.34±2.23	34.41±1.3
	P0.25	23.22±1.21	27.11±2.11	(31.43±1.83)a	34.22±2.03	34.63±1.57
	P0.5	22.74±1.60	26.26±1.21	(30.61±1.23)ab	33.95±1.45	34.07±2.25
	P2	21.46±1.05	26.85±0.95	(30.26±1.08)ab	33.28±1.63	36.52±1.8
	P8	22.67±1.53	27.63±1.57	(29.62±0.83)ab	35.17±1.25	36.33±2.21
	P31	23.68±1.77	27.51±1.50	(28.73±0.72)b	34.82±0.85	35.99±2.13
美香占 2 号	P0	(24.31±1.68)ab	(26.32±0.85)ab	28.85±2.23	(30.38±1.03)b	33.60±1.34
	P0.25	(23.93±1.34)ab	(27.46±1.27)a	28.14±2.03	(30.35±0.97)b	34.22±1.78
	P0.5	(25.12±0.75)a	(26.17±2.03)ab	27.40±1.39	(33.07±1.67)a	34.64±2.43
	P2	(22.24±0.66)cd	(24.48±0.98)b	26.95±1.57	(33.36±1.43)a	33.87±2.18
	P8	(20.68±2.24)c	(22.36±0.65)c	27.72±2.12	(32.12±0.55)a	33.79±1.09
	P31	(22.63±1.38)abc	(25.92±1.52)ab	28.44±1.28	(32.93±1.53)a	35.22±2.23
海香占	P0	(21.83±1.32)abc	(25.93±0.78)a	(26.63±0.82)ab	28.88±2.26	31.12±1.73
	P0.25	(21.28±0.93)bc	(24.81±1.23)a	(27.12±1.02)ab	29.43±1.32	31.31±1.25
	P0.5	(22.66±1.63)ab	(24.60±1.02)a	(28.35±1.32)a	28.93±1.53	31.82±1.02
	P2	(20.11±0.83)c	(22.45±0.78)b	(26.53±0.31)b	30.52±2.21	32.12±2.10
	P8	(20.72±0.32)c	(22.78±0.63)b	(25.92±0.88)b	29.18±1.73	31.81±1.13
	P31	(23.43±1.56)a	(25.23±0.98)a	(25.47±1.26)b	30.01±2.34	32.23±2.38

同一材料同列数据不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

绿金香在 21 d 时, P0 与其他处理的 SPAD 值差异显著,与 P31 的 SPAD 值差值最大(2.87);28 d 时, P8 与 P31 的 SPAD 值差异不显著,但 P8 与 P0、P0.25、P0.5、P2 的 SPAD 值均差异显著。华香在 21 d 时, P0 与 P31 的 SPAD 值差异显著,与其他处理的 SPAD 值差异不显著。美香占 2 号在 28 d 时, P0 与 P0.25 的 SPAD 值差异不显著, P0.5、P2、P8 和 P31 的 SPAD 值差异不显著。海香占在 21 d 时, P0、P0.25 和 P0.5 的 SPAD 值差异不显著, P0.5 与 P2、P8 和 P31 的 SPAD 值均差异显著。在 35 d 时,

P0 浓度下,海香占 SPAD 值(31.12)最低。

2.3 低磷胁迫对香稻苗期叶绿素荧光参数的影响

从表 3 可知,不同香稻材料的实际荧光产量(F)、初始荧光产量(F_0)、最大荧光产量(F_m)和非光化学淬灭(q_N)随磷浓度的增加而降低,而最大光化学量子产量(F_v/F_m)、实际光化学量子产量(Φ_{PSII})、光化学淬灭(q_P)和电子传递效率(ETR)均随磷浓度的增加而增加。

表 3 低磷胁迫下香稻苗期的叶绿素荧光参数

Table 3 Chlorophyll fluorescence parameters of scented rice under low phosphorus stress at seedling stage					
材料	处理	F	F_0	F_m	F_v/F_m
绿金香	P0	(527.33±22.19)a	(427.33±33.62)a	(2021.67±156.77)a	(0.75±0.03)c
	P0.25	(489.33±33.03)a	(415.33±21.50)ab	(1999.00±152.60)ab	(0.81±0.02)b
	P0.5	(421.67±25.86)b	(406.33±22.03)ab	(1880.67±120.27)ab	(0.83±0.01)ab
	P2	(415.25±30.25)bc	(385.52±18.03)b	(1800.53±108.67)ab	(0.84±0.02)ab
	P8	(372.67±19.86)c	(372.67±30.64)b	(1762.00±102.32)b	(0.84±0.03)ab
	P31	(330.00±11.37)d	(255.33±21.65)c	(1172.67±100.24)c	(0.85±0.01)a
华香	P0	(457.00±19.11)a	(288.33±20.60)a	(1293.00±108.24)a	(0.79±0.02)b
	P0.25	(388.00±29.00)b	(283.00±11.51)a	(1114.00±102.06)ab	(0.80±0.01)b
	P0.5	(350.33±32.64)bc	(274.00±29.87)ab	(1095.00±83.51)b	(0.83±0.01)a
	P2	(343.00±32.51)c	(274.00±21.94)ab	(1083.33±71.41)b	(0.84±0.02)a
	P8	(327.33±10.01)c	(243.33±30.02)b	(1077.33±111.00)bc	(0.84±0.03)a
	P31	(297.67±12.37)d	(227.00±27.84)b	(995.67±43.78)c	(0.85±0.01)a
美香占 2 号	P0	(369.63±26.76)a	(305.33±25.17)a	(1359.00±123.02)a	(0.76±0.01)d
	P0.25	(359.61±19.66)ab	(285.00±24.06)ab	(1282.33±101.01)ab	(0.78±0.03)c
	P0.5	(358.67±35.02)ab	(286.33±20.65)ab	(1278.00±95.11)ab	(0.80±0.02)bc
	P2	(337.00±20.85)b	(286.33±25.58)ab	(1270.67±108.64)ab	(0.81±0.03)abc
	P8	(285.33±14.01)c	(248.00±18.51)b	(1158.33±78.02)b	(0.83±0.01)ab
	P31	(248.00±22.48)d	(211.67±15.94)c	(968.33±64.01)c	(0.84±0.01)a
海香占	P0	(423.67±31.22)a	270.33±23.45	1251.00±102.74	(0.81±0.01)c
	P0.25	(371.67±22.67)b	268.00±29.74	1199.67±129.72	(0.83±0.02)bc
	P0.5	(341.00±10.23)bc	266.02±15.62	1183.28±98.23	(0.83±0.01)b
	P2	(320.67±17.97)c	262.67±21.09	1173.33±122.71	(0.83±0.02)ab
	P8	(324.33±26.39)c	260.33±13.61	1165.67±72.89	(0.84±0.00)ab
	P31	(319.00±19.15)c	258.00±15.72	1163.00±21.70	(0.85±0.01)a
材料	处理	Φ PSII	qP	qN	ETR/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
绿金香	P0	(0.53±0.01)c	(0.74±0.02)d	(0.48±0.03)a	(60.80±1.25)d
	P0.25	(0.55±0.02)bc	(0.77±0.01)c	(0.47±0.05)ab	(64.67±2.22)b
	P0.5	(0.56±0.02)bc	(0.79±0.03)bc	(0.47±0.03)ab	(66.83±2.10)ab
	P2	(0.56±0.01)b	(0.80±0.01)b	(0.45±0.03)ab	(67.83±1.10)ab
	P8	(0.57±0.01)ab	(0.80±0.02)ab	(0.42±0.05)ab	(67.43±1.53)ab
	P31	(0.58±0.01)a	(0.82±0.01)a	(0.40±0.04)b	(69.07±1.27)a
华香	P0	(0.52±0.00)c	(0.73±0.05)c	(0.48±0.03)a	(64.87±1.53)b
	P0.25	(0.54±0.03)bc	(0.80±0.02)bc	(0.47±0.04)ab	(64.80±2.29)b
	P0.5	(0.54±0.01)b	(0.81±0.03)b	(0.44±0.01)b	(64.47±2.09)b
	P2	(0.56±0.02)ab	(0.83±0.01)b	(0.42±0.03)bc	(66.63±2.61)ab
	P8	(0.57±0.01)a	(0.85±0.03)ab	(0.42±0.04)bc	(68.63±1.07)a
	P31	(0.58±0.02)a	(0.88±0.02)a	(0.36±0.03)c	(69.30±2.16)a
美香占 2 号	P0	(0.56±0.02)b	(0.77±0.03)d	(0.51±0.02)a	(64.43±2.56)b
	P0.25	(0.56±0.01)b	(0.79±0.04)cd	(0.47±0.05)ab	(65.20±1.48)b
	P0.5	(0.56±0.02)b	(0.80±0.01)cd	(0.45±0.06)abc	(65.23±1.96)b
	P2	(0.57±0.01)b	(0.82±0.02)bc	(0.44±0.04)bc	(66.40±2.10)b
	P8	(0.57±0.01)b	(0.86±0.03)ab	(0.40±0.05)bc	(67.47±1.10)b
	P31	(0.59±0.00)a	(0.86±0.01)a	(0.37±0.05)c	(70.87±1.21)a
海香占	P0	(0.51±0.02)c	(0.72±0.05)c	(0.50±0.03)a	(57.70±3.41)d
	P0.25	(0.53±0.03)bc	(0.77±0.04)bc	(0.48±0.04)ab	(60.73±2.68)cd
	P0.5	(0.53±0.02)bc	(0.78±0.02)bc	(0.48±0.05)ab	(60.20±1.37)cd
	P2	(0.54±0.03)bc	(0.80±0.03)b	(0.47±0.02)ab	(62.50±1.30)bc
	P8	(0.55±0.02)b	(0.81±0.02)b	(0.45±0.01)b	(64.73±3.05)ab
	P31	(0.59±0.01)a	(0.84±0.01)a	(0.42±0.04)b	(66.73±2.58)a

同一材料同列数据不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

绿金香, P31 的 Φ PSII 显著高于 P0、P0.25、P0.5、P2 的 Φ PSII ;P31 的 qP 均显著高于 P0、P0.25、P0.5 和 P2 的 qP ;P0 的 qN 与 P31 的 qN 差异显著, 是其 120%, 与其他浓度的 qN 差异不显著; P31 的 ETR 与 P8、P2、P0.5 的 ETR 差异不显著, 但与 P0 和 P0.25 的 ETR 差异显著。

华香, P31、P8 和 P2 的 Φ PSII 差异不显著, 与 P0 的 Φ PSII 差异显著, 其中 P31 的 Φ PSII 是 P0 的 112%; P31 的 qP 均显著高于 P0、P0.25、P0.5 和 P2 的, 其中 P31 的 qP 是 P0 的 121%(差值为 0.15); P0 的 qN 与 P0.25 的差异不显著, 但与 P0.5、P2、P8 和 P31 的 qN 差异显著, P31 与 P0 的 qN 的差值为 0.12; P31、P8 和 P2 的 ETR 差异不显著, P0、P0.25 和 P0.5 的 ETR 差异也不显著, 但 P31 和 P8 的 ETR 分别与 P0、P0.25 和 P0.5 的 ETR 差异显著, 其中 P31 的 ETR 是 P0 的 107%。

美香占 2 号, P31 的 Φ PSII 显著高于其他浓度的 Φ PSII, 其他浓度的 Φ PSII 处理间差异不显著; P31 和 P8 的 qP 差异不显著, 但均与 P0、P0.25、P0.5 的 qP 差异显著; P0 的 qN 显著高于 P2、P8、P31 的 qN, 是 P31 的 qN 的 1.38 倍(差值为 0.14)。

P0、P0.25、P0.5、P2 和 P8 的 ETR 差异不显著, 但均与 P31 的 ETR 差异显著, 其中 P31 的 ETR 是 P0 的 110%。

海香占, P31 的 F_v/F_m 和 Φ PSII 均显著高于 P0、P0.25 和 P0.5 的 F_v/F_m 和 Φ PSII, 其中 P31 的 Φ PSII 与 P0 的 Φ PSII 差值(0.08)最大, 是 P0 的 Φ PSII 的 116%; P31 的 qP 显著高于其他浓度的 qP, P31 与 P0 的 qP 差值(0.12)最大; P0、P0.25、P0.5 和 P2 的 qN 的差异不显著, 但 P0 与 P8、P31 的 qN 差异显著, 其中 P0 的 qN 是 P31 的 119%; P31 和 P8 的 ETR 差异不显著, 但均与 P0、P0.25 和 P0.5 的 ETR 差异显著, 其中 P31 的 ETR 是 P0 的 116%, 差值为 $9.03 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

相关性分析结果(表 4)表明, PA 与 SPAD 值、 F_v/F_m 、 Φ PSII、qP、ETR 呈显著正相关, PA 与 F 、qN 呈显著负相关, F 和 qN 越大, 越能限制 PA 的提高; F_v/F_m 与 Φ PSII、qP、ETR 呈显著正相关, 与 qN 呈显著负相关; Φ PSII 与 qP、ETR 呈显著正相关, 与 qN 呈显著负相关; qN 与 ETR 呈显著负相关。

表 4 香稻各指标的相关性

Table 4 The correlation of the indexes in scented rice

指标	相关系数								
	PA	SPAD 值	F	F_o	F_m	F_v/F_m	Φ PSII	qP	qN
SPAD 值	0.473*								
F	-0.579**	-0.05							
F_o	-0.364	0.126	0.820**						
F_m	-0.291	0.094	0.791**	0.983**					
F_v/F_m	0.667**	0.117	-0.600**	-0.388	-0.357				
Φ PSII	0.772**	0.527**	-0.608**	-0.218	-0.173	0.451*			
qP	0.727**	0.423*	-0.807**	-0.506**	-0.494*	0.644**	0.830**		
qN	-0.870**	-0.564**	0.661**	0.432*	0.390	-0.664**	-0.777**	-0.883**	
ETR	0.733**	0.736**	-0.492*	-0.175	-0.156	0.461*	0.877**	0.782**	-0.802**

“*”“**”“***”分别示在 0.05、0.01 水平下差异显著。

2.4 低磷胁迫下香稻苗期光合有效辐射对电子传递效率的影响

从表 5 可知, 不同香稻材料的电子传递效率(ETR)随着光合有效辐射(PAR)的提高而增加, 在 PAR 为 $1500 \text{ W}/\text{m}^2$ 时, ETR 最大。华香在 P8 时, ETR 最大($285.37 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$), 其他材料在 P31 时,

ETR 最大。PAR $< 125 \text{ W}/\text{m}^2$, 不同磷浓度的 ETR 增幅约为 $10 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; PAR $> 125 \text{ W}/\text{m}^2$, 不同磷浓度的 ETR 增幅增大, 并且处理间差异均显著。4 个香稻材料在 PAR 为 $1500 \text{ W}/\text{m}^2$ 时, P0.25 的 ETR 均低于其他磷浓度的 ETR, 其中绿金香的 ETR 最低, 为 $177.8 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

表 5 低磷胁迫下香稻苗期的光响应值

Table 5 The light response of scented rice under low phosphorus stress at seedling stage

材料	PAR/ (W·m ⁻²)	ETR/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)					
		P0	P0.25	P0.5	P2	P8	P31
绿金香	0	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)l
	25	(7.47±0.12)k	(7.23±0.40)k	(7.03±0.83)kl	(7.23±0.23)kl	(7.87±0.06)k	(7.13±0.99)kl
	45	(12.93±0.42)jkk	(12.10±0.60)jkk	(12.60±0.98)jkk	(13.04±0.42)jkk	(13.40±0.17)jkk	(11.90±1.85)jkk
	65	(18.40±0.46)j	(17.00±0.72)j	(18.30±0.92)ij	(18.62±2.53)ij	(18.90±0.44)ij	(16.97±2.25)ij
	90	(25.23±0.85)i	(22.97±0.91)l	(24.87±1.47)hi	(24.38±0.86)i	(25.93±0.49)i	(23.73±2.36)i
	125	(34.33±1.33)h	(31.00±1.31)h	(33.93±3.52)h	(34.52±3.22)h	(35.57±0.67)h	(33.63±1.88)h
	190	(50.67±1.68)g	(44.97±2.15)g	(51.57±4.48)g	(52.63±2.38)g	(53.60±0.87)g	(51.80±2.21)g
	285	(71.93±3.20)f	(62.73±4.97)f	(76.20±5.93)f	(77.53±5.26)f	(78.47±2.21)f	(76.73±2.67)f
	420	(98.20±4.27)e	(87.00±4.33)e	(109.57±8.55)e	(110.42±6.52)e	(111.23±4.35)e	(108.80±3.35)e
	625	(136.80±3.64)d	(115.00±4.97)d	(155.07±10.10)d	(150.82±5.43)d	(150.83±7.53)d	(152.80±4.77)d
	820	(166.57±4.61)c	(140.07±6.16)c	(188.17±12.20)c	(182.63±10.23)c	(183.20±7.20)c	(190.00±8.61)c
1150	(201.03±7.98)b	(154.47±7.17)b	(224.53±17.04)b	(223.20±9.28)b	(226.90±11.75)b	(239.57±4.62)b	
1500	(229.27±11.32)a	(177.80±10.55)a	(271.23±13.98)a	(232.56±7.37)a	(245.40±5.47)a	(269.33±14.89)a	
花香	0	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)l
	25	(7.27±1.01)k	(7.70±0.69)k	(7.87±0.23)kl	(7.93±0.32)kl	(8.30±0.87)k	(7.73±0.12)kl
	45	(13.10±0.95)jkk	(13.63±0.86)jkk	(13.80±0.46)jkk	(13.50±0.87)jkk	(14.67±0.25)jkk	(13.17±0.32)jkk
	65	(19.07±1.16)ij	(19.10±0.98)j	(19.80±0.62)ij	(19.90±0.56)ij	(19.10±1.25)j	(19.20±0.53)ij
	90	(25.83±1.27)i	(26.07±1.25)i	(27.03±0.80)i	(26.30±1.11)i	(27.53±1.16)i	(26.43±0.91)i
	125	(35.90±1.41)h	(36.17±1.22)h	(36.67±1.45)h	(36.50±0.62)h	(36.03±1.21)h	(36.30±1.67)h
	190	(54.30±2.00)g	(53.60±2.40)g	(55.23±1.73)g	(54.27±1.95)g	(52.83±2.59)g	(55.27±2.43)g
	285	(80.43±2.76)f	(77.03±1.52)f	(76.50±4.23)f	(78.47±3.81)f	(78.27±2.84)f	(78.97±1.90) f
	420	(111.53±0.59)e	(107.37±3.52)e	(106.23±6.48)e	(116.30±4.20)e	(110.03±7.84)e	(114.87±3.25)e
	625	(146.40±3.73)d	(140.53±8.37)d	(150.67±8.25)d	(158.13±6.71)d	(175.80±3.02)d	(156.20±7.86) d
	820	(174.00±7.43)c	(161.50±5.63)c	(185.20±11.36)c	(180.37±8.64)c	(206.17±9.46)c	(177.03±6.87) c
1150	(206.73±11.23)b	(184.47±9.53)b	(236.20±8.69)b	(221.53±12.72)b	(232.77±10.03)b	(214.30±13.00)b	
1500	(244.47±2.90)a	(219.20±12.00)a	(262.83±9.52)a	(262.07±16.98)a	(285.37±8.95)a	(265.00±13.42)a	
美香占 2 号	0	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)m	(0.00±0.00)m	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)l
	25	(8.03±0.06)k	(7.80±0.36)l	(8.03±0.29)l	(7.77±0.25)k	(7.40±0.35)k	(8.03±0.21)k
	45	(13.93±0.06)jkk	(13.50±0.44)k	(14.00±0.26)k	(13.60±0.26)jkk	(12.90±0.40)jkk	(13.67±0.55)jkk
	65	(19.77±0.06)j	(19.37±0.40)j	(19.87±0.21)j	(19.43±0.12)j	(18.87±0.42)j	(19.57±0.40)j
	90	(27.17±0.15)i	(26.47±0.91)i	(27.23±0.15)i	(26.87±0.12)i	(26.10±0.20)i	(26.87±0.12)i
	125	(37.53±0.61)h	(36.17±1.23)h	(37.53±0.38)h	(37.20±0.30)h	(36.23±0.12)h	(36.37±0.32)h
	190	(56.07±0.74)g	(53.80±2.05)g	(55.43±0.06)g	(55.80±1.11)g	(53.70±0.10)g	(52.93±1.29)g
	285	(80.47±2.27)f	(77.63±2.58)f	(81.80±0.82)f	(82.77±0.83)f	(79.73±1.04)f	(79.33±2.51)f
	420	(111.5±2.50)e	(108.23±2.60)e	(115.90±2.60)e	(116.77±2.32)e	(112.30±1.85)e	(110.10±5.17)e
	625	(154.00±5.24)d	(147.03±6.52)d	(160.57±3.10)d	(161.70±3.37)d	(156.10±2.72)d	(154.20±6.42)d
	820	(185.87±5.37)c	(176.47±7.31)c	(192.90±2.40)c	(195.40±1.41)c	(189.40±7.97)c	(184.33±7.93)c
1150	(222.70±8.74)b	(216.57±4.51)b	(242.93±2.48)b	(243.90±5.37)b	(232.53±8.38)b	(216.40±5.05)b	
1500	(259.00±7.81)a	(246.97±9.68)a	(270.50±6.60)a	(280.90±11.07)a	(264.93±12.46)a	(265.20±9.76)a	
海香占	0	(0.00±0.00)m	(0.00±0.00)m	(0.00±0.00)m	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)l	(0.00±0.00)m
	25	(7.70±0.46)l	(7.73±0.42)l	(7.90±0.00)l	(7.90±0.20)k	(7.77±0.06)k	(7.87±0.32)l
	45	(13.47±0.76)k	(13.47±0.35)k	(13.65±0.07)k	(13.70±0.10)k	(13.57±0.29)jkk	(13.63±0.38)k
	65	(19.37±0.84)j	(19.27±0.15)j	(19.30±0.42)j	(19.80±0.44)j	(19.43±0.40)j	(19.53±0.57)j
	90	(26.43±1.01)i	(26.60±0.30)i	(26.55±0.35)i	(27.20±1.13)i	(26.47±0.81)i	(26.47±0.40)i
	125	(35.07±1.12)h	(35.93±1.05)h	(36.90±0.14)h	(37.33±1.16)h	(36.73±0.86)h	(36.53±0.65)h
	190	(52.23±1.35)g	(53.53±1.94)g	(54.70±0.57)g	(56.57±1.51)g	(55.43±1.39)g	(55.20±1.10)g
	285	(79.53±3.51)f	(77.10±1.80)f	(77.95±1.34)f	(82.20±2.76)f	(80.40±2.75)f	(78.63±1.81)f
	420	(103.70±5.72)e	(106.37±3.56)e	(107.45±1.48)e	(117.57±3.72)e	(110.97±3.43)e	(109.70±2.67)e
	625	(137.13±5.38)d	(141.93±6.17)d	(140.95±4.74)d	(154.57±4.71)d	(144.83±10.42)d	(151.73±3.61)d
	820	(166.93±5.82)c	(160.50±3.33)c	(165.55±7.14)c	(171.30±4.80)c	(178.87±5.83)c	(178.97±3.07)c
1150	(199.57±9.45)b	(185.77±4.42)b	(209.60±7.21)b	(213.37±6.04)b	(225.00±7.04)b	(229.83±6.96)b	
1500	(236.37±7.07)a	(227.20±7.10)a	(248.15±10.82)a	(254.00±7.92)a	(257.87±5.91)a	(267.27±9.24)a	

同一材料同列数据不同字母表示各处理间差异显著(P < 0.05)。

3 结论与讨论

进行水稻磷高效种质筛选时,采用简单、科学、有效的评价指标是准确筛选苗期磷高效水稻种质资源的关键^[16-18]。前人提出了低磷条件下,整株磷积累量是评价水稻苗期磷高效的重要指标^[6]。在本试验中,P₀下绿金香的PA最大(1.45 mg/瓶),海香占的PA最低(0.88 mg/瓶),说明绿金香是耐低磷或磷高效材料,而海香占是磷低效材料。

低磷胁迫能使作物叶绿素含量降低,影响作物的光合作用^[19]。本试验结果表明,SPAD值与磷积累量呈显著正相关;SPAD值随着磷浓度的降低而降低,但处理间总体上差异不显著,说明低磷胁迫对水稻叶片中叶绿素含量的影响相对较小。在35 d时,P₀浓度下绿金香的SPAD值最高(34.58),海香占的SPAD值最低(31.12)。

低磷胁迫影响叶绿素的光能转换和利用^[7]。对光合作用影响较大的荧光参数主要有ΦPSII、qP、qN和ETR^[20-23],逆境条件下水稻的ΦPSII、qP和ETR显著降低,qN显著提高^[22-23]。本研究结果与前人的结果相类似,其影响的效果与材料有关。在ΦPSII和ETR中,受低磷胁迫影响较大的是海香占,其影响的幅度分别为0.08和9.03;qP受低磷胁迫影响较大的是华香,影响幅度为0.15;qN受低磷胁迫影响较大的是美香占2号,影响幅度为0.14。本研究还发现,ΦPSII、qP和ETR与磷的积累量呈极显著正相关,qN与磷的积累量呈极显著负相关,这表明通过提高水稻磷的积累量可改善水稻光合生产力。

在一定条件下叶片光合速率与光强的增加呈线性提高的关系^[24]。本试验中,电子传递效率(ETR)随着光合有效辐射(PAR)增加呈线性提高的关系,说明光强或光合有效辐射增强能够提高光合系统中ETR,导致光合速率的提高。4个香稻材料在PAR为1500 W/m²,P_{0.25}的ETR均低于其他磷浓度的ETR,其中绿金香的ETR最低(177.8 μmol/(m²·s)),其作用机理有待进一步研究。

综上所述,低磷胁迫能够影响香稻磷积累量、叶绿素荧光参数。香稻在低磷胁迫下,磷素积累量较高,能够整体上减轻低磷胁迫对香稻的影响,绿金香、华香、美香占2号、海香占的耐低磷能力依次降低。

参考文献:

- [1] MORI A, FUKUDA T, VEJCHASARN P, et al. The role of root size versus root efficiency in phosphorus acquisition in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2016, 67(4): 1179-1189.
- [2] 于费, 陈柳燕, 张黎明, 等. 海南省农用地土壤磷素现状的调查研究[J]. *西南农业学报*, 2009, 22(2): 423-427. YU F, CHEN L Y, ZHANG L M, et al. Study on phosphorus content of soil in Hainan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(2): 423-427.
- [3] 张冬明, 吴鹏飞, 郝丽虹, 等. 海南文昌市土壤有效磷时空变异特征及环境风险分析[J]. *土壤通报*, 2010, 41(3): 728-732. ZHANG D M, WU P F, HAO L H, et al. Spatio-temporal variability of soil available phosphorus and environment risk analyze of Wenchang[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(3): 728-732.
- [4] 张冬明, 张永发, 吴鹏飞, 等. 海南岛土壤养分质量综合评价[J]. *热带作物学报*, 2009, 30(9): 1286-1290. ZHANG D M, ZHANG Y F, WU P F, et al. Overall assessment of soil nutrient quality in Hainan island[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2009, 30(9): 1286-1290.
- [5] 李玉京, 李滨, 李继云, 等. 植物有效利用土壤磷特性的遗传学研究进展[J]. *遗传*, 1998, 20(3): 38-41. LI Y J, LI B, LI J Y, et al. Advances in genetic study on character of plant efficiently utilizing soil phosphorus[J]. *Hereditas*, 1998, 20(3): 38-41.
- [6] 陈晨, 龚海青, 金梦灿, 等. NH₄⁺-N和NO₃⁻-N供应条件下水稻磷高效品种初选[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(9): 32-42. CHEN C, GONG H Q, JIN M C, et al. Primary screening of high phosphorus use efficiency of rice varieties under NH₄⁺-N and NO₃⁻-N conditions[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(9): 32-42.
- [7] WU Q, ZHU D Z, WANG C, et al. Diagnosis of freezing stress in wheat seedlings using hyperspectral imaging[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 112(4): 253-260.
- [8] 曾维军. 氮、磷、钾肥对紫色小麦光合生理特性、产量及主要品质的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019. ZENG W J. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on photosynthetic physiological characteristics, yield and main quality of purple wheat[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [9] 刘寒寒, 钟文, 张可炜. 低磷胁迫对玉米自交系齐319和其突变体齐319-96叶片光合作用、叶绿素荧光特性的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(27): 21-28. LIU H H, ZHONG W, ZHANG K W. Effect of low phosphorous stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of maize inbred lines Qi319 and low-phosphorus-tolerant mutant Qi319-96[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(27): 21-28.
- [10] 林诚, 李清华, 王飞, 等. 不同施磷水平对冷浸田水稻

- 磷含量、光合特性及产量的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2016, 24(5): 553-558.
- LIN C, LI Q H, WANG F, et al. Effects of phosphorus fertilizer on phosphorus content, photosynthesis characters and yield of rice in cold waterlogged paddy field[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2016, 24(5): 553-558.
- [11] 郑丽, 樊剑波, 何园球, 等. 不同供磷水平对旱作条件下水稻生长、根系形态和养分吸收的影响[J]. 土壤, 2015, 47(4): 664-669.
- ZHENG L, FAN J B, HE Y Q, et al. Effects of phosphorus on growth, root morphology, phosphorus uptake and utilization efficiency of rice seedlings[J]. Soils, 2015, 47(4): 664-669.
- [12] 李前, 侯云鹏, 高军, 等. 不同供磷水平对水稻干物质累积、磷素吸收分配及产量的影响[J]. 吉林农业科学, 2015, 40(3): 37-41.
- LI Q, HOU Y P, GAO J, et al. Effect of different phosphorus application on dry matter accumulation, phosphorus uptake and distribution and yield of rice[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2015, 40(3): 37-41.
- [13] 李华慧, 辜琼瑶, 黄平, 等. 低磷胁迫对水稻不同基因型苗期氮、磷、钾吸收利用的影响[J]. 西南农业学报, 2014, 27(1): 160-165.
- LI H H, GU Q Y, HUANG P, et al. Absorption effect of nitrogen, phosphorus and potassium of different rice varieties based on low-phosphorus stress at seedling stage[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(1): 160-165.
- [14] 易均, 谢桂先, 刘强, 等. 磷肥减施对双季稻生长和产量及磷肥利用率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(2): 197-201.
- YI J, XIE G X, LIU Q, et al. Effects of phosphorus fertilizer reduction on the growth, yield and its utilization efficiency of double cropping rice[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2016, 42(2): 197-201.
- [15] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- ZHANG Z L, QU W J, LI X F. Plant Physiology Experiment Instruction[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [16] 郭再华, 贺立源, 黄魏, 等. 耐低磷水稻筛选与鉴定[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 642-648.
- GUO Z H, HE L Y, HUANG W, et al. Screening of rice for tolerance to low phosphorus stress[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(5): 642-648.
- [17] 郭玉春, 林文雄, 石秋梅, 等. 水稻苗期磷高效基因型筛选研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1587-1591.
- GUO Y C, LIN W X, SHI Q M, et al. Screening methodology for rice (*Oryza sativa*) genotypes with high phosphorus use efficiency at their seedling stage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(12): 1587-1591.
- [18] 张俊国, 张三元, 杨春刚, 等. 水稻磷高效品种资源筛选的初步研究[J]. 吉林农业科学, 2010, 35(6): 25-29.
- ZHANG J G, ZHANG S Y, YANG C G, et al. Preliminary studies on selection of high-phosphorus-utilization rice variety resources[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2010, 35(6): 25-29.
- [19] 李汶珊, 曾发梁, 王雪莹, 等. 分蘖期遮光对水稻气体交换和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(2): 289-295.
- LI W S, ZENG F L, WANG X Y, et al. Effect of shading on gas exchange and chlorophyll fluorescence of rice leaves in tillering stage[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(2): 289-295.
- [20] KALAJI H M, SCHANSKER G, LADLE R J, et al. Frequently asked questions about in vivo chlorophyll fluorescence practical issues[J]. Photosynthesis Research, 2014, 122(2): 121-158.
- [21] 冯芳, 范佩佩, 刘超, 等. 水稻叶绿素荧光特性对 CO₂ 浓度升高的代际响应研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(3): 463-471.
- FENG F, FAN P P, LIU C, et al. Intergenerational response of chlorophyll fluorescence characteristics of rice to elevated CO₂ concentration[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(3): 463-471.
- [22] 王志军, 叶春秀, 董永梅, 等. 滴灌和淹灌栽培模式下水稻光合生理、荧光参数及产量构成因素分析[J]. 植物生理学报, 2016, 52(5): 723-735.
- WANG Z J, YE C X, DONG Y M, et al. Photosynthetic physiology, chlorophyll fluorescence parameters and yield components of rice under drip irrigation with plastic film mulching and continuous flooding[J]. Plant Physiology Journal, 2016, 52(5): 723-735.
- [23] 朱从桦, 张鸿, 袁继超, 等. 低磷胁迫下加硅对玉米苗期硅、磷营养及叶绿素荧光参数的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 303-309.
- ZHU C H, ZHANG H, YUAN J C, et al. Silicon application on silicon and phosphorus nutrition and chlorophyll fluorescence parameters of maize during seedling stage under low phosphorus stress[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 303-309.
- [24] 萧浪涛, 王三根. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- XIAO L T, WANG S G. Plant Physiology[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2004.

责任编辑: 毛友纯
英文编辑: 柳 正