植物营养与肥料学报 2015,21(2): 492 -499 doi: 10.11674/zwyf.2015.0225
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

利用功能叶片钾含量作为水稻钾营养诊断指标的可行性研究

薛欣欣, 李岚涛, 鲁剑巍*, 李小坤, 任 涛, 丛日环, 周 鹏
(华中农业大学资源与环境学院, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要:【目的】植株组织分析是广泛应用的营养状况评价方法。水稻主茎从上往下的第二功能样品采集方便,对水稻植株损伤较小;叶片以全展开叶的状态存在于整个生育期。本文探讨了利用第二功能叶钾含量作为水稻钾营养诊断指标的可行性,为水稻种植提供一种操作性强且准确性高的钾营养诊断方法及指标。**【方法】**采用田间试验,设置施钾量(K_2O) 0、60、120、180、240、300 和 360 kg/hm^2 7 个处理,测定各生育期第二功能叶的钾含量和成熟期收获的稻谷产量,对各处理的产量进行显著性检验及肥效模型的拟合,并根据肥效模型对水稻产量进行分级;结合产量分级指标与钾含量和产量的回归方程,最终计算出水稻不同生育期的钾营养诊断指标值。**【结果】**施用钾肥显著增加稻谷产量,施钾量和稻谷产量适合用二次加平台模型拟合,满足营养诊断的要求。第二功能叶钾含量随施钾量的增加而显著增加,随生育进程先上升后下降,在拔节期达到最大;从分蘖初期到齐穗期,第二功能叶钾含量变化范围为 0.85%～2.72%。各生育期第二功能叶钾含量与稻谷产量和施钾量具有极显著的相关性,可以作为诊断指标来预测稻谷产量及反映钾肥施用水平。按小于最佳产量的 85%、85%～90%、90%～95%、95%～100% 将产量分为 5 个等级,和大于 100%,根据钾含量与产量回归方程计算出各时期的不同产量等级对应的钾含量分级指标,当临界产量为最佳产量的 95% 时,各时期对应的第二功能叶钾含量分别为 1.34%、1.58%、1.98%、2.09%、1.33% 和 1.27%。**【结论】**第二功能叶钾含量与施钾量和水稻产量相关极显著,其关系可用二次加平方程模拟,故可作为水稻不同生育期的钾营养诊断指标;以最佳产量的 95% 作为产量临界值标准,当第二功能叶钾含量在分蘖初期、分蘖盛期、有效分蘖临界期、拔节期、孕穗期和齐穗期分别低于 1.34%, 1.58%, 1.98%, 2.09%, 1.33% 和 1.27%,则水稻植株处于钾素缺乏水平,需要补充钾肥以维持其正常的钾素需求。

关键词: 水稻; 功能叶; 钾素营养; 诊断指标
中图分类号: S158.3; S511.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)02-0492-08

Feasibility study of using potassium content of functional leaves of rice as potassium diagnostic index

XUE Xin-xin, LI Lan-tao, LU Jian-wei*, LI Xiao-kun, REN Tao, CONG Ri-huan, ZHOU Li
(*College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation of Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China*)

Abstract:【Objectives】 Plant tissue is widely used for the diagnose of plant nutrient status. The second functional leaf from the top of rice is easy sampled, with negligible injury to rice growth, and will not abscise during the whole growth stages. The feasibility of using the potassium content in the 2nd functional leaf as rice nutrition diagnosis method was studied. **【Methods】** A field experiment was conducted with different K_2O application rates of 0, 60, 120, 180, 240, 300 and 360 kg/ha. The potassium contents in the 2nd functional leaf were tested at different growth periods and the grain yields were weighed. Regression analysis was performed to evaluate the relationship between the potassium contents in the 2nd functional leaf and the grain yields and K application rates. **【Results】**

收稿日期: 2014-01-02 **接受日期:** 2014-05-04
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203013);中央高校基本科研业务费专项(2013PY113);长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1247)资助。
作者简介: 薛欣欣(1986—),男,陕西咸阳人,博士研究生,主要研究作物养分管理方面的研究。E-mail: xuexinxin.2010@webmail.hzau.edu.cn
* 通信作者 Tel: 027-61379276, E-mail: lunm@mail.hzau.edu.cn

The grain yields are significantly different under different K application rates. A quadratic plus plateau model well descriped the significant relationship between K application rates and the grain yield, satisfies the requirement of potassium status diagnosis. The potassium contents of the 2nd functional leaves was increased significantly with the increase of the K application rates. The K contants of the 2nd functional leaves was in range of 0.85%–2.72% from the beginning of the tillering stage to the full heading stage and reach the highest values at the jointing stage. The correlation analysis shows that the potassium content of the 2nd functional leaves were significantly correlated with the grain yield and potassium application rates ($P<0.05$). The yields are classified as five ranks, i.e., < 85%, 85%–90%, 90%–95%, 95%–100% and >100% of the maximum yield. The corresponding K contents of the 2nd functional leaves were calculated according to the regression equation. When the 95% of optimal yield was set as the critical yield, the calculated K contents were 1.34%, 1.58%, 1.98%, 2.09%, 1.33% and 1.27% at initial tillering, active tillering, effective tillering, jointing, booting and full heading stages, respectively. **【Conclusions】** The potassium content of the 2nd functional leaves are significantly related to the K_2O application rates and yields, so, is suitable to be used as the potassium status diagnosis index at the different rice development periods. If the 95% of optimum yield is set as the critical yield level, rice would be found potassium deficiency when the 2nd functional leaf contents are below 1.34%, 1.58%, 1.98%, 2.09%, 1.33% and 1.27% at the tillering stage, active tillering stage, effective tillering critical stage, jointing stage, booting stage and full heading stage, respectively.

Key words: rice; functional leaf; potassium status; diagnostic index

作物化学分析诊断是一种传统且最为常用的营养诊断方法,与土壤诊断、无损诊断等方法相比,能够更直观、精确地反映作物营养状况,并且在较长一段时间内仍将是作物营养诊断的主要手段[1-2]。有学者指出作物出现缺乏症状时的养分含量较稳定,受养分来源的影响较小,因此作物化学分析诊断具有普遍意义[3]。

化学分析诊断通常用最佳诊断部位的养分含量来评价作物自身的养分状况,水稻钾营养诊断通常以测定不同叶位的叶片或叶鞘来了解钾素营养状况。郭彬等[4]认为,水稻主茎上部叶片适合作为孕穗期钾素诊断的叶位;陈智慧、朱维和等[5-6]研究表明,下位叶与上位叶的钾素含量可以用来评价水稻钾素营养状况;王强盛等[7]认为,顶2叶鞘钾含量适合作为水稻分蘖期钾素营养的诊断指标。关于氮的研究有较多学者认为以顶1叶或第二功能叶等固定叶位作为营养诊断部位[8-10];而 Lin 等[11]则认为,上部叶片和下部叶片的比值作为水稻氮素诊断的最可靠指标。由于受水稻品种及诊断时期等因素的影响,造成了各研究结果存在较大差异;且多数研究将侧重点放在了精准性方面,而对可操作性考虑较少,从而增加了诊断的难度。确定诊断部位是建立养分临界诊断指标的前提。通常用诊断部位的养分含量与产量或相对产量建立相关方程,来确定临界值指标[2-3,12-14]。Bates 等[15]认为,生育时期、测试部位、养分组分、作物品种、养分之间相互的影响以及环境等因素都会对植株养分临界值产生影响。有关钾素临界值的研究在水稻、烤烟、柑橘等作物上已有报道: 朱维和等[6]指出水稻幼穗分化期下部叶鞘钾含量低于1.20%时需要施用钾肥;张晓海等[16]认为,烤烟在打顶期的钾含量小于2.00%时会影响烟叶品质;Raveh 等[12]最新研究表明,甜橙叶片钾素适宜含量为0.80%～1.00%,其与 Raber 等[17]早期认为的0.45%～1.00%有所不同。然而关于水稻各生育期钾素诊断丰缺指标的研究报道较少,且尚停留在20世纪80年代。随水稻品种、产量水平、气候环境、经营措施以及土壤钾素状况等因素的变化[18],水稻钾素临界值可能亦随之发生了较大的改变。因此针对目前的水稻种植现状亟需建立一套操作性强且准确性高的水稻钾素营养诊断指标。

本研究在前人成果的基础上,选择了水稻主茎从上往下的第二功能叶作为全生育期钾素营养的诊断部位。一方面考虑到该叶位的叶片样品采集方便,对水稻植株损伤较小;另一方面则考虑到该叶位的叶片以全展开叶的状态存在于整个生育期。本研究在田间试验的基础上,探讨利用水稻功能叶片作为水稻钾素营养诊断指标的可行性,旨在为水稻钾肥的合理施用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间试验于2012年5月至9月在湖北省蕲春县向桥乡进行。供试水稻品种为两优6326,土壤为花岗片麻岩母质发育的砂壤性水稻土。土壤基础理化性状: pH 5.0,有机质含量36.1 g/kg,全氮2.0 g/kg,速效磷2.1 mg/kg,速效钾36.0 mg/kg,缓效钾114.2 mg/kg。试验设 K_2O 0、60、120、180、240、300和360 kg/hm^2 7个钾肥处理,分别用 K_0、K_{60}、K_{120}、K_{180}、K_{240}、K_{300}和 K_{360}表示。为避免生育期间追施钾肥对水稻植株钾含量变化曲线的影响,因此钾肥作基肥一次性施入;氮肥按N 180 kg/hm^2 分3次施用,分别为基肥50%、分蘖肥25%和穗肥25%;磷肥按 $P_2O_5$90 kg/hm^2 作基肥一次性施入。水稻种植采用大田育秧、移栽的方式,秧田肥料用量按N 57 kg/hm^2,P_2O_5 26 kg/hm^2 和 K_2O 30 kg/hm^2 施用;移栽密度为25.5 × 10^4/hm^2,单株/穴,秧苗生长良好。试验采用随机区组排列,小区面积4 m × 7.5 m,3次重复。其他栽培管理措施同常规大田。

1.2 样品采集及分析

第二功能叶的采集 于水稻分蘖初期(移栽后10 d)、分蘖盛期(移栽后20 d)、有效分蘖临界期(移栽后31天)、拔节期(移栽后44 d)、孕穗期(移栽后58 d)、齐穗期(移栽后68 d)分别在各小区采集代表性植株6株,将主茎从上到下的第二功能叶进行收集,105℃杀青30min,70℃烘干至恒重,记录各时期的干重,磨碎、过筛后测钾。成熟期取未采样的1/2小区进行测产,单打单收记录各小区稻谷产量。

植物样品钾含量用1 mol/L的HCl振荡浸提2 h,过滤、稀释、火焰光度计测定[19]。

1.3 相关计算公式及方法

1)二次加平台(quadratic plus plateau)钾肥肥效模型[20]:

$$y = a + b\,x + c\,x^2 (x < m)$$

$$y = p (x \geqslant m)$$

式中: y 为稻谷产量(kg/hm^2),x 为钾肥用量(K_2O kg/hm^2),a 为截距,b 为直线回归系数,c 为二次回归系数,m 为二次型曲线与平台的交点,p 为平台产量(kg/hm^2)。

2)钾含量诊断指标的建立方法(图1): 首先拟合施钾量和稻谷产量的肥效方程,按最佳产量的100%、95%、90%、85%等进行分级;拟合第二功能叶钾含量与产量的回归方程;将各级临界产量值代入回归方程中求出对应的第二功能叶钾含量临界值,最终建立钾素营养诊断指标。

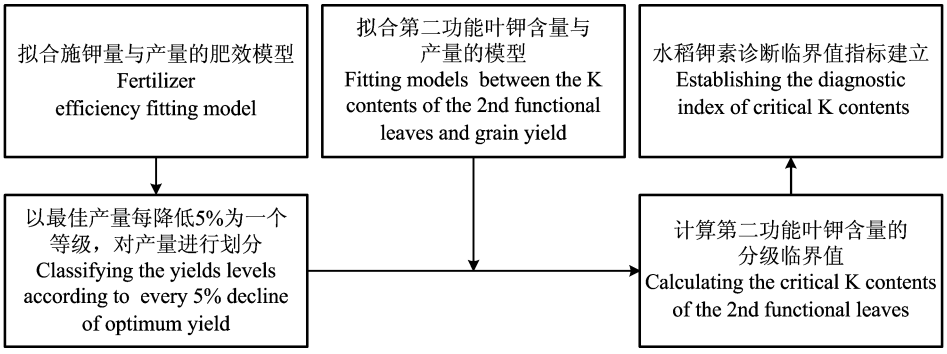

图1 功能叶钾含量诊断指标建立方法

Fig. 1 Method of establishing the diagnosis index of the functional leaf potassium content

1.4 数据处理

数据分析和绘图运用Microsoft Excel、Origin 8.0、SPSS 17.0和SAS统计软件进行。

2 结果与分析

2.1 钾肥用量对稻谷产量的影响

施钾肥显著增加了稻谷产量,各施钾处理的增产率分别为15.0%、18.4%、25.2%、24.4%、23.6%和23.6%(图2)。钾肥用量在 K_2O 0～180 kg/hm^2 之间,稻谷产量随钾肥用量增加而明显增加,K_{180}处理的稻谷产量显著高于 K_0 和 K_{60}处理;钾肥用量在 K_2O 180～360 kg/hm^2 之间,稻谷产量随钾肥用量增加而无增加现象。钾肥用量和产量的关系适合二次加平台模型,肥效方程为 y = 5334 +

$12.8x-0.033x^2$, $x<150.2$; $y=6571$, $x\geqslant 150.2$; 相关系数极显著($R^2=0.9752$, $P<0.001$)。由以上分析可知,本研究所设置的钾肥用量梯度满足钾肥缺乏、适宜和过量的需求,为本试验所用数据可为水稻植株钾营养诊断提供了可行性。

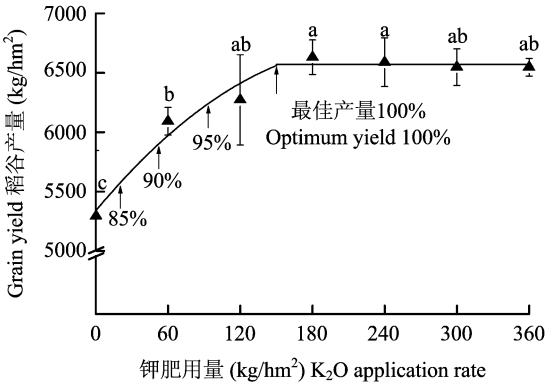

图 2　钾肥用量对水稻产量的影响及钾肥肥效模型

Fig. 2　Effect of potassium application rates on the grain yield and the potassium fertilizer efficiency model

[注(Note): 图中不同字母表示施肥处理间差异达到 5% 显著水平 Different letters indicate significant at 5% level between treatments.]

2.2　钾肥用量对第二功能叶钾含量的影响

由图 3 可知,第二功能叶钾含量随钾肥用量的增加而增加,K_0 处理显著低于各施钾处理。在有效分蘖临界期和拔节期钾含量梯度差异最大,而 K_{300} 和 K_{360} 在各时期的差异较小。第二功能叶钾含量随生育进程先增加后降低,K_0 ～ K_{60} 处理从分蘖初期的 0.85% ～ 1.33% 增加至拔节期的 1.30% ～ 1.91%,而后下降至齐穗期的 0.86% ～ 1.10%; 而 K_{120} ～ K_{360} 处理从分蘖初期的 1.36% ～ 1.63% 增加至有效分蘖临界期的 2.01% ～ 2.72%,而后至拔节期变幅较小,之后下降至齐穗期的 1.32% ～ 1.51%。分蘖盛期到有效分蘖临界期,第二功能叶钾含量的增加速率随钾肥用量的增加而增加;拔节期到孕穗期,第二功能叶钾含量的下降速率随钾肥用量的增加而增加。

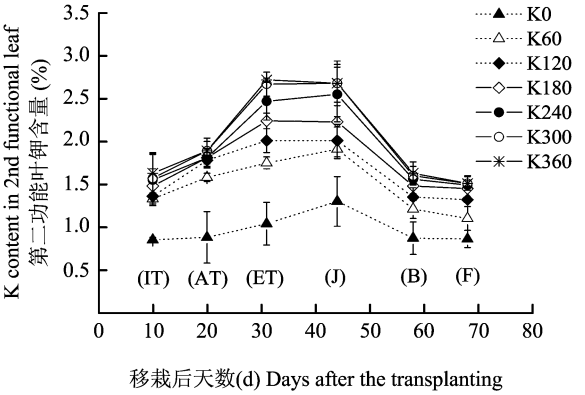

图 3　水稻第二功能叶钾含量的变化特征

Fig. 3　Temporal variations of the K contents of the 2nd functional leaves of rice at different growth stages under different K application rates

[注(Note): IT—分蘖初期 Initiation of the tillering stage; AT—分蘖盛期 Active tillering stage; ET—有效分蘖临界期 Effective tillering critical stage; J—拔节期 Jointing stage; B—孕穗期 Booting stage; F—齐穗期 Full heading stage.]

2.3　第二功能叶钾含量与稻谷产量和钾肥用量的相关性分析

第二功能叶钾含量与稻谷产量和钾肥用量相关分析结果(表 1)表明,第二功能叶钾含量与稻谷产量的关系适合用对数方程拟合,各时期的相关系数

表 1　第二功能叶钾含量与稻谷产量和钾肥用量的相关系数(R^2)

Table 1　Correlation coefficients of the grain yield or potassium application with potassium content of top 2nd leaves at different growth stages

生育时期 Growth stage	移栽后天数 (d) DAT	稻谷产量 Grain yield	钾肥用量 K application rate
分蘖初期 Initiation of the tillering stage	10	0.953**	0.918**
分蘖盛期 Active tillering stage	20	0.932**	0.885*
有效分蘖临界期 Effective tillering critical stage	31	0.940**	0.983**
拔节期 Jointing stage	44	0.903**	0.969**
孕穗期 Booting stage	58	0.960**	0.985**
齐穗期 Full heading stage	68	0.957**	0.996**

注(Note): * 和 ** 分别表示相关系数达 5% 和 1% 显著水平 Indicate the correlation coefficients are significant at the 5% and 1% levels, respectively. DAT—Days after the transplanting.

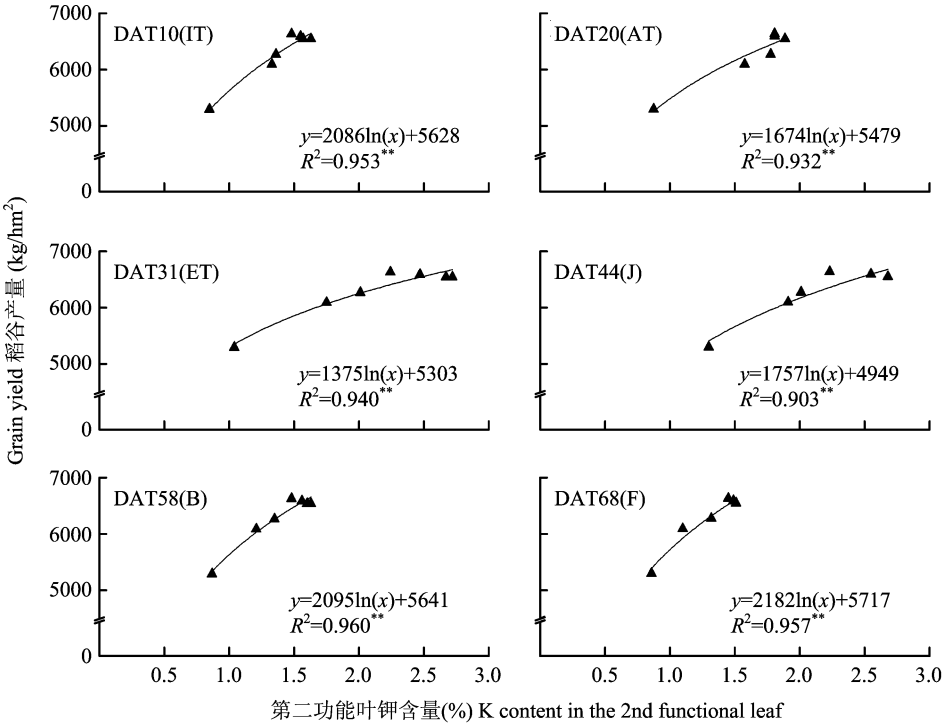

图 4 第二功能叶钾含量和稻谷产量的关系

Fig. 4 Relationship between the potassium contents of the 2nd functional leaves and the grain yields of rice at different stages

[注(Note): IT—分蘖初期 Initiation of the tillering stage; AT—分蘖盛期 Active tillering stage; ET—有效分蘖临界期 Effective tillering critical stage; J—拔节期 Jointing stage; B—孕穗期 Booting stage; F—齐穗期 Full heading stage. * 和 * * 分别表示相关系数达 5% 和 1% 显著水平 Indicate the correlation coefficients are significant at the 5% and 1% levels, respectively. DAT—Days after the transplanting.]

表 2 第二功能叶各时期钾素含量分级指标

Table 2 Indices of the potassium contents of the 2nd functional leaves of at different stages

生育时期 Growth stage	移栽后天数 DAT (d)	最佳产量相对值(%) Relative value of optimum yield				
		<85	85～90	90～95	95～100	≥100
分蘖初期 Initiation of the tillering stage	10	<0.98	0.98～1.15	1.15～1.34	1.34～1.57	≥1.57
分蘖盛期 Active tillering stage	20	<1.07	1.07～1.30	1.30～1.58	1.58～1.92	≥1.92
有效分蘖临界期 Effective tillering critical stage	31	<1.23	1.23～1.56	1.56～1.98	1.98～2.51	≥2.51
拔节期 Jointing stage	41	<1.44	1.44～1.73	1.73～2.09	2.09～2.52	≥2.52
孕穗期 Booting stage	58	<0.97	0.97～1.14	1.14～1.33	1.33～1.56	≥1.56
齐穗期 Full heading stage	68	<0.94	0.94～1.09	1.09～1.27	1.27～1.48	≥1.48

注(Note): DAT—Days after the transplanting.

均达极显著水平($P<0.01$);钾肥用量和第二功能叶钾含量的关系则适合用一元二次方程拟合,除分蘖盛期显著相关外($P<0.05$),其余各时期均达极显著相关($P<0.01$)。由此可以看出,第二功能叶钾含量可以准确地预测稻谷产量水平和反映钾肥施用水平,适合作水稻钾营养的诊断部位。

2.4 第二功能叶钾含量作为钾营养诊断指标的建立

由产量结果可知,本研究所设置的钾肥梯度为水稻钾素诊断提供了可行性(图 2)。回归分析结果表明,第二功能叶钾含量和产量适合用对数方程拟合(图 4)。根据图 1 所示的植株钾含量诊断指标建

立方法,经计算得到第二功能叶钾含量分级指标(表2)。若以最佳产量的95%为临界值标准,当第二功能叶钾含量在分蘖初期、分蘖盛期、有效分蘖临界期、拔节期、孕穗期和齐穗期分别低于1.34%、1.58%、1.98%、2.09%、1.33%和1.27%时,则需要追施钾肥以避免水稻植株因缺钾而导致减产。

3　讨论

3.1　第二功能叶钾含量的变化及差异

本研究结果表明,第二功能叶钾含量随钾肥用量的增加而增加,当钾肥用量达到 K_2O 300 kg/hm^2 时,第二功能叶钾含量不再增加,造成这种现象的主要原因是,高等植物自身存在一种钾离子稳态,根系不仅能够吸收介质中的钾离子,也能够根据体内的钾离子浓度调节吸收速率,植株对钾素的吸收不会随钾肥用量增加而持续增加[21]。第二功能叶钾含量从分蘖初期到有效分蘖临界期或拔节期随植株生长量逐渐增大而持续增加,从有效分蘖临界期到拔节期,K_0 ～ K_{60}处理的植株生长量持续增加,而 K_{120} ～ K_{360}处理则较稳定,有研究表明[22],土壤供钾较低时,植株吸收的钾优先向上部叶片转移;拔节期之后,随营养生长和生殖生长并进,生物量增加迅速,对钾素的稀释效应明显,从而造成第二功能叶钾含量迅速下降,而生殖生长期变化则较平稳。

在该试验条件下,水稻第二功能叶钾含量的变幅为分蘖期0.85%～2.72%,拔节期1.30%～2.68%,孕穗期0.87%～1.63%,齐穗期0.86%～1.51%;陈智慧等[5]研究表明,第二功能叶钾含量的变幅为分蘖期1.0%～4.0%,拔节期1.0～3.0%,齐穗期0.3%～2.4%;王强盛等[7]等研究表明,有效分蘖临界期第二功能叶钾含量的变幅为1.5%～3.0%;本研究结果与前述研究相似。郭彬等[4]的研究结果显示,拔节期水稻第二功能叶钾含量的变幅为1.86%～3.31%,孕穗期为1.96%～3.16%;本研究结果较其偏低。种植品种、气候环境、取样时期以及施肥量等影响因素可能是造成本研究结果与前人研究结果存在差异的重要原因。

3.2　第二功能叶作为钾素诊断指标的可行性分析

近年来,用第二功能叶作为诊断部位建立植株钾素含量临界指标的研究较少,而前人在早期关于钾素临界指标的研究多集中在整株叶片或某一敏感叶鞘;朱维和等[6]研究表明,分蘖期水稻植株钾含量临界值在1.40%～1.80%以下,齐穗期在1.25%以下;王强盛等[7]研究表明,分蘖期水稻叶片钾含量临界值在1.00%～1.50%以下。本研究结果表明,分蘖期第二功能叶钾含量临界值在1.34%～1.98%以下,齐穗期在1.27%以下,与前人研究结果基本相似。然而由于不同部位钾素含量可能存在差异,因此前人研究结果仅能作为参考。

水稻从分蘖期到齐穗期对钾素的需求占整个生育期的80%以上[23-24],掌握该阶段的水稻钾素营养状况对作物正常生长及产量形成具有重要的意义。本文研究发现各生育期的第二功能叶钾含量与产量和施钾量相关关系极显著;从取样原则上来讲,第二功能叶存在于整个生育期,而且该叶位叶片容易获取并对作物的损坏程度小。综上所述,以水稻主茎第二功能叶作为分蘖期到齐穗期的营养诊断部位是可行的。施用效果显著为钾营养诊断提供了可靠的保证。陈新平等[25]认为,在对肥效模型进行评价时,应该从模型的拟合程度和推荐施肥量的节省程度两方面综合考虑。本研究用二次加平台模型进行拟合的程度远高于其他模型,而且节省钾肥;通过肥效方程以及第二功能叶钾含量的回归方程,建立了营养诊断指标,既节约钾资源,又保证较高的经济产出。

本研究阐明了以功能叶片钾含量作为钾营养诊断指标的可行性,初步建立了该试验条件下各生育期水稻植株钾营养诊断指标;然而该研究结果是否受种植品种、种植时期及气候环境等诸多因素的影响,仍需进行深入研究。

4　结论

1)在该试验条件下,钾肥施用效果显著。在 K_2O 0～180 kg/hm^2 范围内,稻谷产量随钾肥用量的增加而显著增加;大于 K_2O 180 kg/hm^2 时,稻谷产量不再增加。施钾量和稻谷产量适合用二次加平台模型进行拟合,相关关系极显著。本研究所设置的钾肥用量梯度适合进行水稻钾营养诊断。

2)第二功能叶钾含量随钾肥用量增加而增加,到 K_{300}处理之后增幅减小。K_0 ～ K_{60}处理,第二功能叶钾含量从分蘖初期增加至拔节期,而后至齐穗期下降;而钾肥施用较多的 K_{120}～ K_{360}处理则从分蘖初期增加至有效分蘖临界期,之后至拔节期变化缓慢,而后至齐穗期下降。

3)第二功能叶钾含量作为植株钾营养诊断指标的操作性较强,且能够精准地预测稻谷产量水平。若以95%为产量临界值标准,在该试验条件下,当第二功能叶钾含量在分蘖初期、分蘖盛期、有效分蘖

临界期、拔节期、孕穗期和齐穗期分别低于1.34%、1.58%、1.98%、2.09%、1.33%和1.27%时,则水稻植株处于钾素缺乏水平,需要补充钾肥以维持正常的钾素需求。

参考文献:

[1] 江立庚, 曹卫星, 姜东, 等. 水稻叶氮量等生理参数的叶位分布特点及其与氮素营养诊断的关系[J]. 作物学报, 2004, 30(8): 745-750.
Jiang L G, Cao W X, Jiang D *et al*. Distribution of leaf nitrogen, amino acids and chlorophyll in leaves of different positions and relationship with nitrogen nutrition diagnosis in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(8): 745-750.

[2] Yue S, Meng Q, Zhao R *et al*. Critical nitrogen dilution curve for optimizing nitrogen management of winter wheat production in the north China plain[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(2): 523-529.

[3] 李延, 马居米·让德迪优, 秦遂初. 缺镁对水稻生理代谢的影响及诊断指标研究[J]. 浙江农业大学学报, 1995, 21(3): 279-283.
Li Y, Macumi J D D, Qin S C. Studies on diagnosis of Mg-deficiency and physiological metabolism of rice grown under Mg-deficiency conditions[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1995, 21(3): 279-283.

[4] 郭彬, 林义成, 丁能飞, 等. 水稻氮素及钾素叶位分布特点及诊断叶位研究[J]. 浙江农业学报, 2009, 21(3): 299-302.
Guo B, Lin Y C, Ding N F *et al*. Distribution of nitrogen and potassium in different leaf positions and relationship with nitrogen and potassium diagnosis in rice (*Oryza sativa*)[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2009, 21(3): 299-302.

[5] 陈智慧, 王火焰, 周健民, 等. 不同钾素水平对水稻不同部位含钾量的影响[J]. 土壤, 2013, 45(3): 489-494.
Chen Z H, Wang H Y, Zhou J M *et al*. Dynamic changes of rice K content influenced by different soil K levels[J]. Soils, 2013, 45(3): 489-494.

[6] 朱维和, 温应和, 谢茂和. 水稻植株体内钾素的分布[J]. 土壤通报, 1982, (2): 53-58.
Zhu W H, Wen Y H, Xie M H. Distribution of potassium in rice plants[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1982, (2): 53-58.

[7] 王强盛, 丁艳锋, 王绍华. 水稻分蘖期钾素营养诊断研究[A]. 中国作物学会. 中国作物学会栽培专业委员会换届暨学术研讨会论文集[C]. 北京: 中国作物学会, 2007.
Wang Q S, Ding Y F, Wang S H. Nutrition diagnosis of potassium at tillering stage of rice[A]. The Crop Science Society of China, Chinese Crop Cultivation of Professional Committee of the transition and academic symposium proceedings[C]. Beijing: The Crop Science Society of China, 2007.

[8] 李刚华, 丁艳峰, 薛利红, 王绍华. 利用叶绿素计(SPAD-502)诊断水稻氮素营养和推荐追肥的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 412-416.
Li G H, Ding Y F, Xue L H, Wang S H. Research progress on diagnosis of nitrogen nutrition and fertilization recommendation for rice by use chlorophyll meter[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(3): 412-416.

[9] Wallihan E F, Moomaw J C. Selection of index leaf for studying the critical concentration of nitrogen in rice plants[J]. Agronomy Journal, 1967, 59(5): 473-474.

[10] Peng S, Garcia F V, Laza R C *et al*. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice[J]. Field Crops Research, 1996, 47(2): 243-252.

[11] Lin F F, Qiu L F, Deng J S *et al*. Investigation of SPAD meter-based indices for estimating rice nitrogen status[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(1): 60-65.

[12] Raveh E. Citrus leaf nutrient status: A critical evaluation of guidelines for optimal yield in Israel[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, 176(3): 420-428

[13] 李刚华, 薛利红, 尤娟, 等. 水稻氮素和叶绿素SPAD叶位分布特点及氮素诊断的叶位选择[J]. 中国农业科学, 2007, 40(6): 1127-1134.
Li G H, Xue L H, You J *et al*. Spatial distribution of leaf N content and SPAD value and determination of the suitable leaf for N diagnosis in rice[J]. Scienica Agricultura Sinica, 2007, 40(6): 1127-1134.

[14] 危常州, 张福锁, 朱和明, 等. 新疆棉花氮营养诊断及追肥推荐研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1500-1505.
Wei C Z, Zhang F S, Zhu H M *et al*. Study on cotton nitrogen diagnosis and top dressing recommendation in North Xinjiang[J]. Scienica Agricultura Sinica, 2002, 35(12): 1500-1505.

[15] Bates T E. Factors affecting critical nutrient concentrations in plants and their evaluation: a review[J]. Soil Science, 1971, 112(2): 116-130.

[16] 张晓海, 苏贤申, 廖德智. 烤烟钾素营养快速诊断研究[A]. 马阳. 全国学术年会农业分会场论文专集[C]. 北京: 中国农学通报期社, 2004.
Zhang X H, Su X S, Liao D Z. Studies of diagnose on potassium nutrition of flue-cure tobacco[A]. Ma Y. The national conference on agriculture[C]. Beijing: Chinese Agricultural Science Bulletin Press, 2004.

[17] Raber D. Fertilization recommendations for citrus orchards in seasonal recommendations for citrus orchards[M]. Israel: Extension Service, Ministry of Agriculture and Rural Development, State of Israel, 2011. 28-37.

[18] 马忠玉, 吴永常. 我国水稻品种遗传改进在增产中的贡献分析[J]. 中国水稻科学, 2000, 14(2): 112-114.
Ma Z Y, Wu Y C. Contribution of rice genetic improvement to yield increase in China[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2000, 14(2): 112-114.

[19] 夏颖, 姜存仓, 王晓丽, 等. 嫁接对不同棉花基因型钾效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 34-39.
Xia Y, Jiang C C, Wang X L *et al*. Effects of grafting on potassium use efficiency of different cotton genotypes[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(1): 34-39.

[20] 贾良良, 陈新平, 张福锁, 等. 北京市冬小麦氮肥适宜用量

评价方法的研究[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(3): 67 - 73.
Jia L L, Chen X P, Zhang F S *et al.* Study of optimum N supplying rate in winter-wheat of Beijing area[J]. Journal of China Agricultural University, 2001, 6(3): 67-73.

[21] 谢少平. 高等植物钾离子吸收的调节[J]. 植物生理学通讯, 1989, (4): 1-7.
Xie S P. Regulation of potassium absorption in higher plants[J]. Plant Physiology Communications, 1989, (4): 1-7.

[22] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
Lu J L. Plant nutrition[M]. Beijing: Chinese Agricultural University Press. 2003.

[23] 潘圣刚, 翟晶, 曹凑贵, 等. 氮肥运筹对水稻养分吸收特性及稻米品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 522-527.
Pan S G, Zhai J, Cao C G *et al.* Effects of nitrogen management practices on nutrition uptake and grain qualities of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 522-527.

[24] 李云春. 几种不同类型水稻养分吸收特性及施肥效果研究[D]. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2012.
Li Y C. Study on nutrients absorption characteristics and NPK fertilization effects of several different types of rice[D]. Wuhan: Ms Thesis of Huazhong Agriculture University, 2012.

[25] 陈新平, 周金池, 王兴仁, 等. 小麦-玉米轮作制中氮肥效应模型的选择-经济和环境效益分析[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 346-354.
Chen X P, Zhou J C, Wang X R *et al.* Economic and environmental evaluation on models for describing crop yield response to nitrogen fertilizers at winter-wheat and summer-corn rotation system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(3): 346-354.