植物营养与肥料学报 2016, 22(6): 1494–1502
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.15496
http://www.plantnutrifert.org

# 不同施氮量下缺钾对水稻叶片营养及生理性状的影响

薛欣欣，鲁剑巍，李小坤*，任 涛，丛日环，明 日
（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，
华中农业大学微量元素研究中心，湖北武汉 430070）

**摘要:【目的】**氮和钾是作物生长所必需的大量元素，在水稻生长发育、产量形成等过程中发挥着至关重要的作用。南方稻田缺钾以及氮钾肥不合理施用已成为限制水稻高产的重要影响因子。本研究在田间条件下，探讨了不同施氮量下缺钾对水稻生长发育与叶片生理特性的影响，进而阐明缺钾导致营养生长期水稻叶色暗绿的营养及生理机制。**【方法】**采用两因素完全随机设计田间试验，因素 A 为不同施氮水平，包括不施氮、低氮 (N 90 kg/hm$^2$) 和正常施氮 (N 180 kg/hm$^2$)；因素 B 为不同施钾水平，包括不施钾和正常施钾 ($K_2O$ 120 kg/hm$^2$)。测定水稻分蘖期和幼穗分化期地上部干物质，叶面积指数，叶片氮、钾、镁和叶绿素含量 (叶色值)，叶片含水率、叶片可溶性糖含量、比叶重以及叶片 SPAD 值。**【结果】**1) 在不施氮条件下缺钾对水稻分蘖期和幼穗分化期干物质、叶面积指数均无显著影响，而在施氮条件下显著降低水稻分蘖期和幼穗分化期干物质、叶面积指数；随施氮量的增加，缺钾对干物质及叶面积指数的影响加剧，其中 $N_{180}K_0$ 处理的降幅最为明显；氮钾交互作用对水稻各生育期的干物质和叶面积指数均有显著或极显著影响。2) 在不施氮条件下缺钾对分蘖期和幼穗分化期叶片氮含量和叶绿素含量、叶片可溶性糖含量、比叶重以及叶片 SPAD 值均无显著影响，而在施氮条件下以上各指标显著增加，其中 $N_{90}K_0$ 处理的叶片氮含量和叶绿素含量均可以达到 $N_{180}K_{120}$ 处理水平；无论施氮与否，缺钾均显著降低分蘖期和幼穗分化期叶片钾含量，而显著增加叶片镁含量。3) 回归分析结果表明，比叶重与叶片可溶性糖含量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。**【结论】**水稻干物质、叶面积指数、叶片营养及生理状况、叶色表现等对缺钾的响应明显受到施氮量的影响。在施氮条件下缺钾造成叶片中可溶性糖大量积累，进而导致比叶重增加；结合田间试验观察及叶片营养及生理性状可知，水稻叶色 (叶绿素含量) 在不施氮条件下不受缺钾的影响；而在施氮条件下，缺钾造成水稻叶片单位质量及单位叶面积氮含量和叶绿素含量显著增加，这是田间条件下水稻叶色呈现暗绿的主要原因，从而也影响生育期植株氮素营养诊断。

**关键词:** 水稻；施氮量；缺钾；叶片营养；叶片生理
**中图分类号:** S143.1；S143.3；S511.3$^+$2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)06–1494–09

# Nutritional and physiological characters of rice leaves exposure to potassium deficiency under different nitrogen rates

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

**Abstract:【Objectives】**Nitrogen (N) and potassium (K) play important roles in rice growth, development and yield formation. K deficiency stress and unbalanced fertilization of N and K in paddy fields have been the most important factors restricting rice grain yields. A field trial was carried out to explore the effects of K deficiency stress on rice growth, leaf nutrients and physiological status under different N rates, and further to clarify the physiological mechanism of leaf color dark green due to potassium deficiency.**【Methods】**A completely random two-factor field trial was conducted. The first factor was N application rates: 0, 90 kg/hm$^2$ (low N) and 180 kg/hm$^2$

收稿日期：2015–12–15　　接受日期：2016–06–06
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（2662015PY135）资助。
作者简介：薛欣欣（1986—），男，陕西咸阳人，博士研究生，主要从事水稻钾素管理的研究。
E-mail: xuexinxin.2010@webmail.hzau.edu.cn。 * 通信作者 Tel：027-61379276；E-mail：lixiaokun@mail.hzau.edu.cn

(normal N); the second factor was $K_2O$ application rates of 0 and 120 kg/hm$^2$ (normal K). The dry matter, leaf area index, contents of N, K and Mg of leaves, and chlorophyll (leaf color value) of leaves, leaf water content, leaf soluble sugar content, specific leaf weight, and leaf SPAD value at the tillering and panicle initiation stages were measured.【**Results**】1) Without N application, the rice dry matter and leaf area index were not significantly affected by K deficiency at tillering and initial panicle stages, but with N application, the effect became significant, and the decrease became larger with the higher N application, . The interaction of N and K fertilization was significant on the dry matter and leaf area index in all the growth stages. 2) Without N application, neither the contents of N, chlorophyll and soluble sugar in leaves, nor leaf weight and leaf SPAD values were significantly affected by K deficiency at the tillering and panicle initiation stages, on the contrary, these index values were increased significantly under the N application condition, and the leaf N and chlorophyll contents in treatment of N 90 kg/hm$^2$ plus zero K were similar to those under the combination of N 180 kg/hm$^2$ plus $K_2O$ 120 kg/hm$^2$. No matter with or without N application, K deficiency significantly reduced the leaf K content while increased leaf Mg content at the tillering and panicle initiation stages. 3) There was a significant ($P < 0.01$) and positive relationship between the specific leaf weight and the leaf soluble sugar content.【**Conclusions**】The responses of leaf nutritional and physiological status to K deficiency are affected significantly by N application rates. The K deficiency stress results in high soluble sugar content and leads to the increased unit leaf weight in case of N application. However, K deficiency stress significantly increases leaf N contents and leaf chlorophyll contents and weight of unit leaf area under the condition of N application, which is the most important cause of the dark green leaf and this phenomenon might be detrimental to plant nitrogen nutrition diagnosis at the early growth stage of rice.

**Key words:** rice; nitrogen rate; potassium deficiency; leaf nutrition; leaf physiology

钾是植物生长发育必需的营养元素之一，参与植物体内一系列生理生化过程，影响作物水分、光合作用、同化产物运输和酶活性，同时也在作物产量及品质等方面发挥着重要的作用[1]。我国有 25%～30%的耕地存在不同程度的缺钾现象，而长江以南水稻主产区缺钾现象更为严重[2]。稻田缺钾易造成水稻生长发育受阻、病虫害侵染并出现倒伏现象；水稻早期缺钾老叶叶尖失绿，严重缺钾时，症状由叶尖发展到叶缘最终造成叶片组织坏死[3]。然而也有学者发现，水稻缺钾时，分蘖期出现生长不齐、叶色暗绿、成熟期籽粒减产等现象[4]；金玉峰等[5]发现甘蔗缺钾时，叶色加深、生物量下降。

叶片是水稻进行光合作用的主要器官，富含叶绿素薄壁组织，选择性地吸收可见光而使叶片呈现出绿色[6]。柴家荣等[7]在烟草上的研究表明，叶绿素的变化不仅与生育期有关，而且与氮素营养及磷、钾配比关系密切，适宜的配比能保障烟叶正常发育。再者，由于钾高效及钾低效水稻品种在缺钾条件下产生的浓缩效应或叶片镁含量的增加，导致了叶绿素含量的增加[8-9]。笔者在田间试验中发现，缺钾在施氮条件下造成水稻叶色暗绿，而在不施氮条件下对水稻叶色的影响无法用肉眼进行判别。由此可见，氮、钾营养水平及其二者互作效应在水稻叶色等营养生理性状方面起着重要的作用。已有大量研究表明水稻叶色的深浅与叶绿素含量密切相关，一般情况下叶绿素含量越高，水稻叶色越深[10-12]。以往研究主要通过调控氮素营养来调节叶色 (叶绿素含量)，被广泛应用于植株氮素营养诊断[13-14]，而通过调控氮、钾营养来共同调节水稻叶色的研究鲜有报道。

因此，本研究通过研究氮、钾肥配施对水稻生长发育、叶片营养及生理性状的影响，进而阐明缺钾造成叶色暗绿的生理机制，为水稻氮、钾肥在生产时间中的合理施用提供理论基础。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验设计

田间试验于 2014 年 5～9 月在武穴市梅川镇郭坦村试验田进行。该区域属亚热带季风性湿润气候，年平均气温为 16.8℃，年降雨量为 1361 mm，水稻种植为一季中稻。试验田土壤为花岗片麻岩发育的砂壤性水稻土。土壤基础理化性状为：pH 5.5、有机质 18.9 g/kg、全氮 1.4 g/kg、速效磷 5.7 mg/kg、速效钾 32.4 mg/kg、缓效钾 101.9 mg/kg。供试水稻品种为两系籼稻两优 6326 (*Oryza sativa* L.)。

试验采用两因素完全随机设计，因素 A 为 3 个施氮水平，分别为不施氮 ($N_0$)、低氮 (N 90 kg/hm$^2$，$N_{90}$) 和正常施氮 (N 180 kg/hm$^2$，$N_{180}$)；因素 B 为 2 个施钾水平，分别为不施钾 ($K_0$) 和正常施钾 ($K_2O$ 120 kg/hm$^2$，$K_{120}$)，共组合成 6 个处理。氮肥为尿素 (含 N 46%)，按基肥 50%、分蘖肥 25% 和幼穗分化肥 25% 施用；钾肥为氯化钾 (含 $K_2O$ 60%)，按基肥 70% 和幼穗分化肥 30% 施用；各处理磷肥 ($P_2O_5$) 用量均为 90 kg/hm$^2$，以过磷酸钙 (含 $P_2O_5$ 12%) 为肥源，作基肥一次性施入；小区面积 20 m$^2$(4 m × 5 m)，各处理 3 次重复。水稻采用移栽种植，5 月 17 日育秧，6 月 17 日 (四叶期) 移栽，行株距为 24 cm × 15 cm，每穴 1 棵苗。试验期间采用塑料薄膜覆盖各小区田埂，避免小区间渗水渗肥。田间管理同当地农民习惯。

### 1.2 植株样品采集、分析及 SPAD 测定

于分蘖期和幼穗分化期在各小区齐地割取具有代表性的 6 穴水稻植株，将茎鞘与叶片分离，记录所有叶片鲜重，从中随机选取 20 片叶，测定叶片长、宽 (叶片最大宽度)，根据长 × 宽 × 0.76 计算叶面积；将此部分叶片、剩余叶片和茎鞘 (茎 + 鞘) 分别置于 105℃ 烘箱中杀青 30 min，于 70℃ 烘至恒重、分别记录烘干重，根据所选 20 片叶的烘干重及其叶面积的比值计算比叶重；根据叶片总鲜重和烘干重计算含水率；根据重量法换算 6 穴水稻叶片面积，计算总叶面积及叶面积指数。水稻地上部干物质由所有叶片与茎鞘烘干重相加所得。

烘干叶片经磨碎、过筛后装于密闭的自封袋中待测养分含量。采用 $H_2SO_4$–$H_2O_2$ 消煮，消煮液用于氮、钾含量的测定；$HClO_3$–$HNO_3$消煮，消煮液用于镁含量的测定；AA3 流动注射法测定氮含量，火焰光度计法测定钾含量，原子吸收分光光度法测定镁含量[15]。叶片可溶性糖含量采用沸水浴浸提—蒽酮比色法进行测定[16]。于分蘖期和幼穗分化期分别在各小区采集 10 片主茎顶端完全展开的叶片，低温保存，采用 95% 乙醇对新鲜叶片浸提 48 h，采用 721 分光光度计测定新鲜叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 含量，计算总叶绿素含量[16]；本研究采用叶绿素含量表示叶色值。单位叶面积叶片养分含量采用叶片总养分积累量与总叶面积的比值表示。

采用 SPAD-502 叶绿素计 (日本 MINOLTA) 测定分蘖期及幼穗分化期主茎顶部完全展开叶上部 1/3 处，共测定 10 片叶，获得每片叶的 SPAD 读数，取其平均值即为各小区的 SPAD 读数。

### 1.3 数据处理

采用 Excel 2007 软件计算数据，Origin 8.0 软件绘图，SPSS 20.0 软件统计分析，LSD 法检验 $P < 0.05$ 水平上的差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 地上部干物质

由图 1 可知，就分蘖期而言，在缺钾条件下，水稻地上部干物质重随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势，$N_{90}K_0$ 处理显著高于 $N_0K_0$ 和 $N_{180}K_0$ 处理，增幅分别为 23.1% 和 33.0%，$N_0K_0$ 和 $N_{180}K_0$ 处理间无显著差异；在施钾条件下，增施氮肥则显著提高水稻地上部干物质重，$N_{90}K_{120}$ 和 $N_{180}K_{120}$ 处理较 $N_0K_{120}$ 处理的增幅分别为 25.8% 和 32.7%，$N_{90}K_{120}$ 和 $N_{180}K_{120}$ 处理间无显著差异；在不施氮条件下，水稻地上部干物质重在 $K_0$ 和 $K_{120}$ 水平间无显著差异，而在施氮条件下，缺钾则显著降低水稻地上部干物质重，$N_{90}K_0$ 和 $N_{180}K_0$ 处理分别较 $N_{90}K_{120}$ 和 $N_{180}K_{120}$ 处理降低 9.9% 和 30.3%；就幼穗分化期而言，相同钾水平下，增施氮肥均可显著提高水稻地上部干物质；在缺钾条件下，$N_{90}K_0$ 和 $N_{180}K_0$ 处理较 $N_0K_0$ 处理增幅分别为 12.0% 和 15.8%，在施钾条件下，$N_{90}K_{120}$ 和 $N_{180}K_{120}$ 处理较 $N_0K_{120}$ 处理分别增加 12.0% 和 24.0%；在 $N_0$ 和 $N_{90}$ 水平下，水稻地上部干物质重在 $K_0$ 和 $K_{120}$ 水平间均无显著差异，在 $N_{180}$ 水平下，缺钾则显著降低水稻地上部干物质重，$N_{180}K_0$ 处理较 $N_{180}K_{120}$ 处理降低 21.1%。由图 1 还可以看出，$N_0K_{120}$ 处理下的水稻干物质重高于 $N_{180}K_0$ 处理或达到与其相当水平；方差分析结果表明，氮钾交互作用对各时期干物质均有极显著影响 ($P < 0.01$)。综上所述，氮钾肥配合施用可显著提高水稻地上部干物质重；水稻干物质重在缺钾时降幅随施氮水平增加而增加。

### 2.2 叶面积指数

由图 2 可知，在缺钾条件下增施氮肥对水稻分蘖期叶面积指数无显著影响，在施钾条件下，则显著提高叶面积指数，$N_{90}K_{120}$ 和 $N_{180}K_{120}$ 处理较 $N_0K_{90}$ 处理分别提高 51.5% 和 46.9%；在不施氮条件下，叶面积指数在各钾水平间无显著差异，而缺钾和施氮条件下显著抑制叶面积指数的增加，$N_{90}K_0$ 和 $N_{180}K_0$ 处理分别较 $N_{90}K_{120}$ 和 $N_{180}K_{120}$ 处理降低 32.8% 和 33.3%。就幼穗分化期而言，相同施钾水平下，叶面积指数随施氮量增加而显著增加；在不施氮条件下，叶面积指数在两个钾水平间无显著差异，而缺

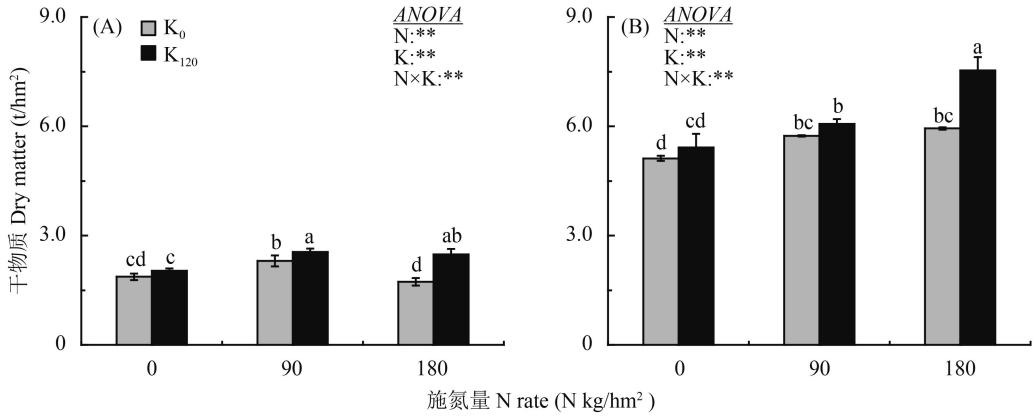


**图 1　氮、钾肥配施对水稻分蘖期 (A) 和幼穗分化期 (B) 地上部干物质重的影响**

**Fig. 1　Effects of the interaction between N and K on dry matter accumulation of aboveground parts of rice at the tillering (A) and panicle initiation (B) stages**

[注（Note）：柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate significant differences between treatments at the 0.05 level. ** 表示在 0.01 水平上显著 Indicates significantly different at the 0.01 level between treatments.]

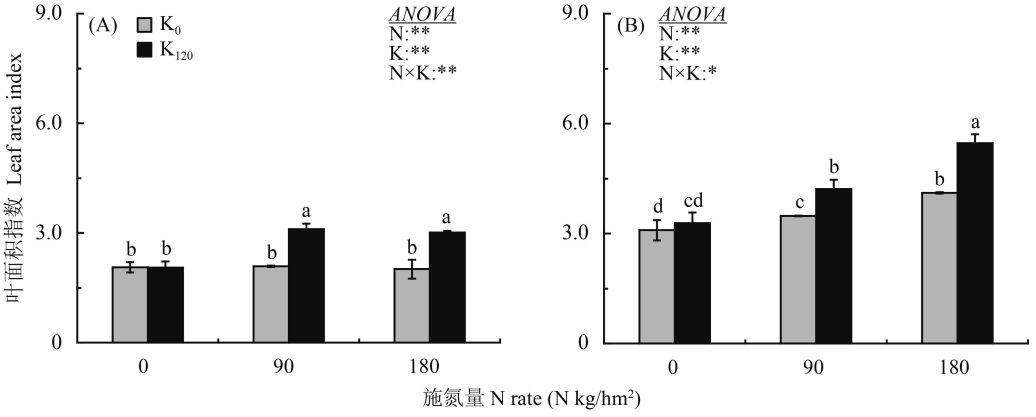


**图 2　氮、钾肥配施对水稻分蘖期 (A) 和幼穗分化期 (B) 叶面积指数的影响**

**Fig. 2　Effects of the interaction between N and K on leaf area index of rice at the tillering (A) and panicle initiation (B) stages**

[注（Note）：柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate significant differences between treatments at the 0.05 level. *和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著 Indicate significantly different at 0.05 and 0.01 levels between treatments, respectively.]

钾和施氮条件下显著降低叶面积指数，$N_{90}K_0$ 和 $N_{180}K_0$ 处理分别较 $N_{90}K_{120}$ 和 $N_{180}K_{120}$ 处理降低 17.3%和 24.7%。方差分析结果表明，氮钾交互作用对水稻分蘖期和幼穗分化期叶面积指数有极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$) 的影响。综上所述，氮钾肥配合施用可显著提高水稻叶面积指数，钾肥效应在施氮量为 N 180 kg/hm² 时表现最明显。

### 2.3　叶片氮、钾和镁含量

由图 3 可知，相同钾水平下，各时期叶片氮含量均随施氮量增加而显著增加；相同施氮水平下，缺钾不同程度地提高了叶片氮含量，在分蘖期 $N_{90}$ 和 $N_{180}$ 处理达到显著水平，缺钾分别提高氮含量 0.39 和 0.49 个百分点，幼穗分化期$N_{180}$ 处理达到显著水平，缺钾提高叶片氮含量 0.34 个百分点；由图 3 也可看出，$N_{90}K_0$ 处理与 $N_{180}K_{120}$ 处理叶片氮含量相当。相同氮水平下，缺钾均显著降低叶片钾含量，分蘖期和幼穗分化期降幅为 0.55～0.81 和 0.62～0.81 个百分点；增施氮肥可不同程度降低叶片钾含量，但在幼穗分化期缺钾条件下施氮叶片钾含量降幅未达显著水平。而相同钾水平下，施氮可显著提高叶片的镁含量，但$N_{90}$和 $N_{180}$ 处理间无显著差异；相同氮水平下，缺钾均可显著提高叶片镁含量，其中分蘖期和幼穗分化期缺钾分别提高镁含量 0.06～0.08 和 0.05～0.08 个百分点。方差分析结果表明，氮、钾肥施用对叶片氮、钾、镁含量均有显著影响 ($P < 0.05$)，二者交互作用对各养分含量均无显著影响。

### 2.4　叶绿素含量

相同钾水平下，增施氮肥均可显著提高分蘖期

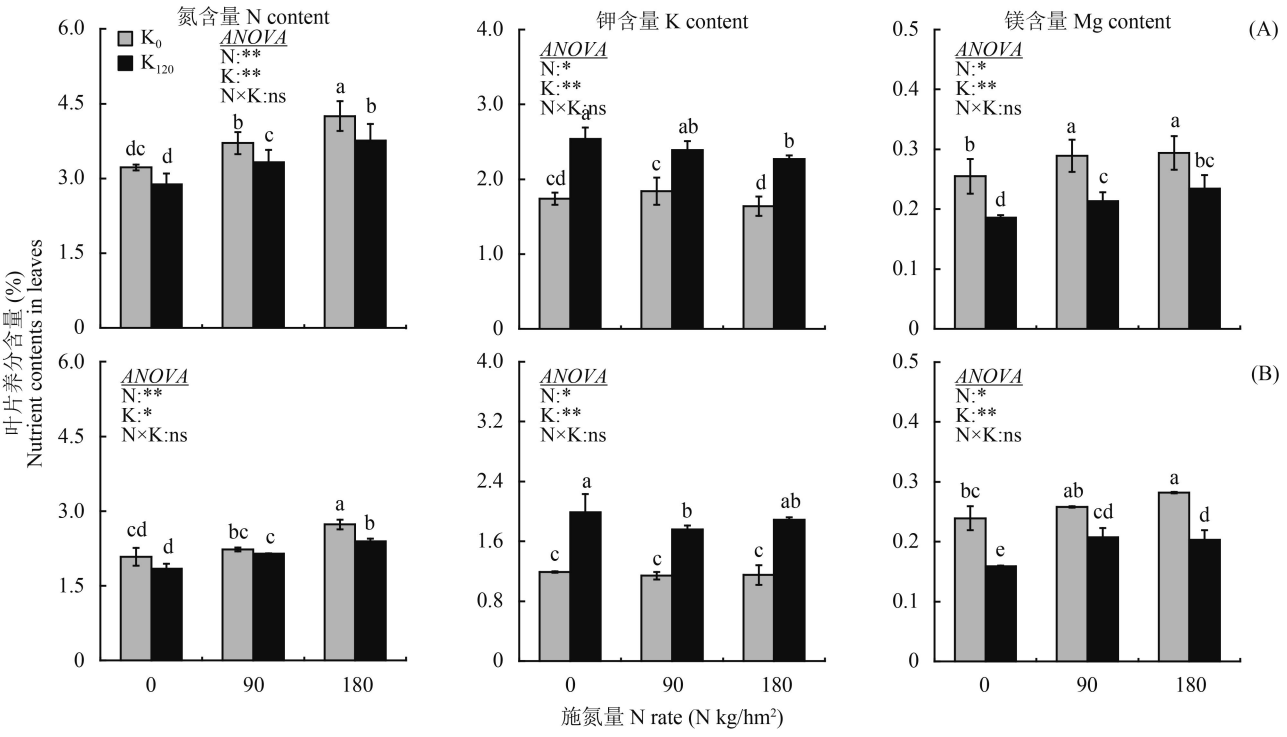


**图 3 氮、钾肥配施对水稻分蘖期 (A) 和幼穗分化期 (B) 叶片养分含量的影响**

**Fig. 3 Effects of the interaction between K and N on leaf nutrients contents of rice at the tillering (A) and panicle initiation (B) stages**

[注（Note）：柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate significant differences between treatments at the 0.05 level. *和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Indicate significantly different at 0.05 and 0.01 levels between treatments, respectively.]

(图 4A) 和幼穗分化期 (图 4B) 叶片叶绿素含量；在 $K_0$ 水平下，分蘖期 $N_{180}K_0$ 较 $N_0K_0$ 处理的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a + b 含量分别增加 31.1%、70.1% 和 36.6%，在幼穗分化期则分别为 36.6%、35.9% 和 36.5%，而在 $K_{120}$ 水平时，$N_{180}K_{120}$ 较 $N_0K_{120}$ 处理叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a + b 含量在分蘖期分别增加 17.5%、47.5% 和 22.0%，在幼穗分化期则分别增加 28.6%、26.7% 和 28.4%，其中在 $K_0$ 水平下施氮处理的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a + b 含量增幅均明显高于 $K_{120}$ 水平下的施氮处理。不施氮条件下，分蘖期和幼穗分化期各组分叶绿素含量在两种钾水平间均无显著差异；而在施氮条件下，缺钾均可不同程度增加叶绿素含量，其中在 $N_{180}$ 水平下的增幅明显高于 $N_{90}$ 水平下的增幅。由图 4 还可以看出，$N_{90}K_0$ 处理下的叶绿素含量可以达到 $N_{180}K_{120}$ 处理水平；方差分析结果表明，氮、钾肥施用对叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a + b 含量均有显著或极显著的影响，二者交互作用对叶绿素各组分含量均无显著影响。

### 2.5 叶片含水率、比叶重和叶片可溶性糖含量

方差分析表明，钾肥对叶片含水率、比叶重和叶片可溶性糖含量均有显著或极显著的影响 (表 1)。不施氮条件下，叶片含水率在各施钾水平间无显著差异，在施氮条件下缺钾显著降低叶片含水率，其中在 $N_{90}$ 和 $N_{180}$ 水平下，分蘖期降低 1.69 和 1.70 个百分点，幼穗分化期分别降低 1.97 和 2.05 个百分点。不施氮条件下，比叶重在各施钾水平间无显著差异，在施氮条件下缺钾显著提高比叶重，其中在 $N_{90}$ 和 $N_{180}$水平下，分蘖期比叶重增幅分别为 11.2% 和 8.2%，幼穗分化期增幅则有所降低，分别为 7.8% 和 5.3%；不施钾水平下，增施氮肥显著增加分蘖期和幼穗分化期比叶重，平均增幅分别为 11.3% 和 4.8%；所有处理中，$N_{90}K_0$ 和 $N_{180}K_0$ 处理的比叶重均处于较高水平。不施氮条件下，叶片可溶性糖含量在各施钾水平间无显著差异，在施氮肥条件下缺钾显著提高叶片可溶性糖含量，其中在 $N_{90}$和 $N_{180}$ 水平下，分蘖期叶片可溶性糖含量分别提高 0.031 和 0.016 个百分点，幼穗分化期则分别提高 0.047 和 0.045 个百分点。回归分析结果 (图 5) 表明，比叶重和可溶性糖含量具有极显著的线性相关关系 ($P < 0.01$)，比叶重随叶片可溶性糖含量的增加而增加。

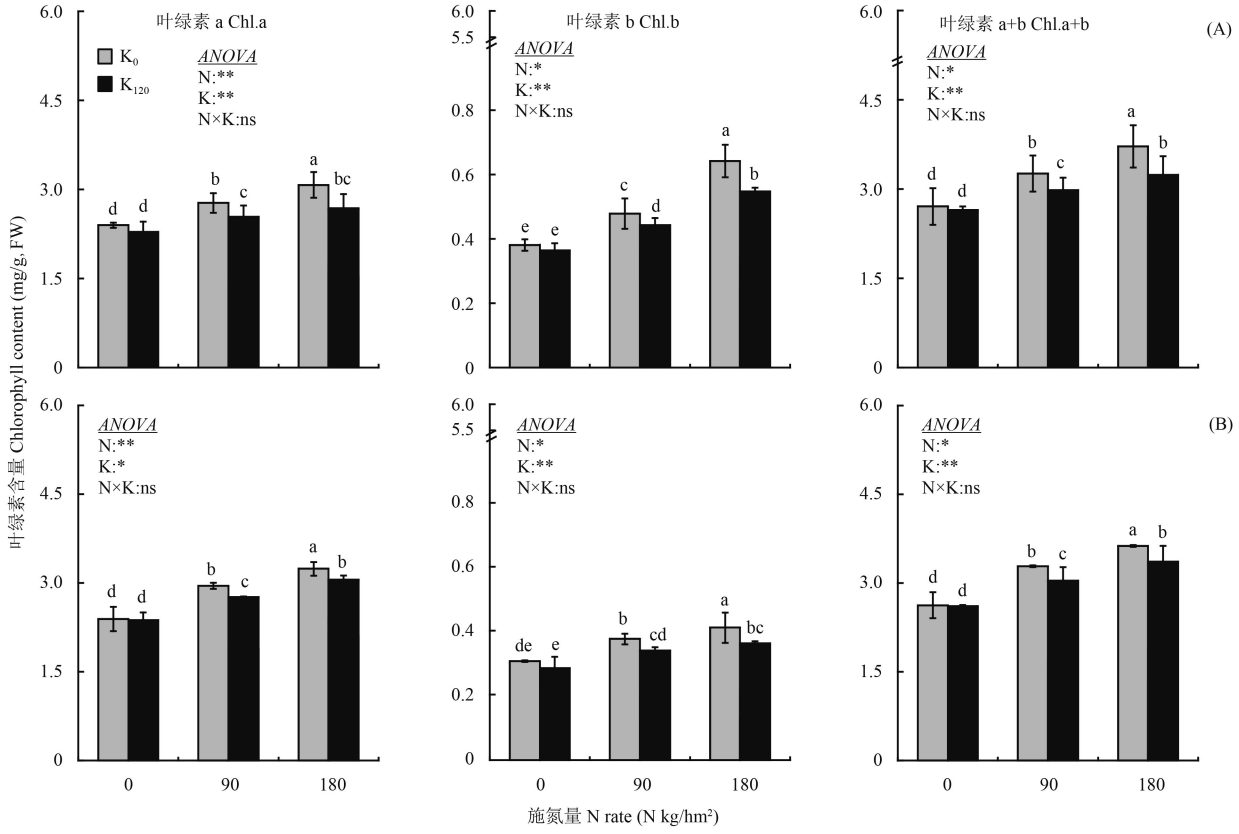


**图 4　氮、钾肥配施对水稻分蘖期 (A) 和幼穗分化期 (B) 叶片叶绿素含量的影响**

**Fig. 4　Effects of the interaction between K and N on leaf chlorophyll contents of rice at the tillering (A) and panicle initiation (B) stages**

[注（Note）：柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate significant differences between treatments at the 0.05 level. *和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Indicate significantly different at 0.05 and 0.01 levels between treatments, respectively.]

**表 1　氮、钾肥配施对叶片含水率、比叶重和叶片可溶性糖含量的影响**

**Table 1　Effects of the interaction between N and K on leaf water content (LWC), specific leaf weight (SLW) and leaf soluble sugar content (LSSC) of rice at the tillering and panicle initiation stages**

| 处理 Treatment | 分蘖期 Tillering stage | | | 幼穗分化期 Panicle initiation stage | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 叶片含水率 (%) LWC | 比叶重 (g/m²) SLW | 叶片可溶性糖 (%) LSSC | 叶片含水率 (%) LWC | 比叶重 (g/m²) SLW | 叶片可溶性糖 (%) LSSC |
| $N_0K_0$ | 75.80 c | 43.3 b | 0.23 a | 66.44 c | 53.8 bc | 0.31 a |
| $N_0K_{120}$ | 76.96 bc | 43.8 b | 0.21 ab | 67.37 c | 54.7 ab | 0.29 a |
| $N_{90}K_0$ | 76.34 c | 48.5 a | 0.22 a | 71.52 b | 56.2 a | 0.29 a |
| $N_{90}K_{120}$ | 78.03 ab | 43.6 b | 0.19 bc | 73.49 a | 52.2 c | 0.24 b |
| $N_{180}K_0$ | 76.88 bc | 47.8 a | 0.17 dc | 71.55 b | 56.5 a | 0.29 a |
| $N_{180}K_{120}$ | 78.59 a | 44.2 b | 0.16 d | 73.60 a | 53.7 bc | 0.25 b |
| N | ns | * | ** | ** | ns | ns |
| K | * | * | ** | ** | * | * |
| N × K | ns | ns | ns | ns | ns | ns |

注（Note）：同列数据后不同字母表示施肥处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different lower-case letters in the same column are significantly different among the treatments at the 0.05 level. *和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著 Indicate significantly different at 0.05 and 0.01 levels between treatments, respectively.

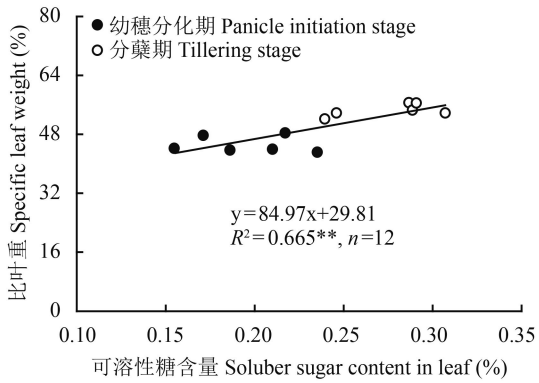


**图 5 比叶重与叶片可溶性糖含量的相关性分析**

**Fig. 5 Relationship between specific leaf weight and leaf soluble sugar content**

## 3 讨论

### 3.1 氮、钾肥配施对水稻营养生长期干物质及叶面积指数的影响

氮和钾作为水稻生长发育过程中必需的两大营养元素，在植株体内的物质合成及转运等方面起着重要的作用[1]。本研究结果表明，氮、钾肥的不合理施用显著降低水稻分蘖期和幼穗分化期干物质；随施氮量增加，钾肥效应也更加明显，氮、钾交互作用对水稻干物质有极显著影响。分蘖期 $N_{180}K_0$ 处理下的干物质明显低于 $N_{90}K_0$ 处理，本研究结果与 Balkos 等[17]的研究结果相似，该作者的研究表明，随溶液中铵态氮浓度的提高，低钾浓度条件下的水稻鲜重显著受到抑制，降幅高于铵态氮浓度较低的处理。从叶面积指数结果可以看出，在不施氮条件下，钾肥效果并不显著，而随施氮量增加，缺钾显著降低叶面积指数；在不施钾条件下，增施氮肥对分蘖期叶面积指数并无促进作用。以上结果进一步证实，在缺钾稻田重视氮肥投入的同时，应增加钾肥的施用比例，并且应重视氮、钾肥的互作效应。

### 3.2 缺钾影响水稻叶色进而对影响植株氮素营养诊断

前人研究表明，缺钾导致水稻叶片叶绿素含量增加可能归结于两个原因：一是低钾胁迫造成水稻生长受阻进而产生的浓缩效应，二是低钾胁迫叶片镁离子含量增加，促进叶绿素合成，但目前尚未有定论[8]。本研究结果表明，在不施氮条件下，水稻营养生长期叶片氮含量和叶绿素含量在各施钾水平间均无显著差异；增施氮肥条件下，缺钾显著提高叶片氮含量及叶绿素含量；而在任意氮水平下，缺钾均显著提高镁含量，钾镁离子间存在明显的互补效应；因此由以上结果也可以推断，缺钾造成镁含量增加可能并不是造成叶绿素含量增加的主要原因。氮是叶绿素结构形成重要元素，其与叶色表现关系密切[18]；叶绿素含量的多少影响叶色的深浅，而叶色的变化又是反映植物营养状况的一个灵敏指标[14]。本研究在田间试验中发现，施氮条件下低钾胁迫时水稻叶色呈现暗绿的现象，而不施氮条件下缺钾胁迫对水稻叶色的影响无法用肉眼进行判别。由表 2 也可以看出，施氮条件下，单位叶面积的叶片氮含量及叶绿素含量均表现为缺钾水平显著高于施钾水平，同时，叶片 SPAD 读数也表现为缺钾水平显著高于施钾水平。因此，综合以上分析及田间观察可以推断缺钾造成叶绿素含量增加和叶色暗绿，其与缺钾抑制水稻生长，产生的浓缩效应显著增加叶片氮含量及叶绿素含量有密切的关系。

利用水稻叶色参数进行植株氮素营养诊断是重要的营养诊断方法，可以节省肥料及提高产量[10]；另外，近年来利用数字成像、冠层反射仪以及高光谱等技术来诊断氮素营养状况也得到了广泛的应用[19–20]，然而获取准确的叶色参数是水稻定量追肥的基础。本研究发现，水稻营养生长期田间叶色外观表现以及叶色值 (叶绿素含量) 不仅受到氮素影响，还受到钾素水平以及氮钾互作效应的影响。当施用低氮 (90 kg/hm²) 和适量氮 (180 kg/hm²) 条件下，缺钾水平会造成叶绿素含量高于施钾水平，并在田间条件下表现出叶色暗绿的现象；$N_{90}K_0$ 与 $N_{180}K_{120}$ 处理间的氮含量及叶绿素无显著差异，但 $N_{90}K_0$ 处理干物质重及叶面积指数均受到一定的限制，而 $N_{180}K_{120}$ 处理干物质和叶面积则均处于较高水平。综合以上分析，氮钾互作效应对水稻叶色表现以及叶色诊断的效果均可能产生影响。当水稻处于缺钾环境时，根据叶色诊断施肥可能会降低诊断结果的准确性，甚至导致水稻生长发育受到限制。因此，在水稻氮营养诊断时应该注重氮、钾互作效应及尽可能保证适量的钾肥供应，进而提高其营养诊断、定量追肥的准确性。

### 3.3 含水率、比叶重和可溶性糖含量之间的关系

本研究结果表明，缺钾在施氮条件下显著降低叶片含水率 (表 1)。钾离子在调节气孔开闭方面起着重要的作用；缺钾条件下，叶片气孔闭合，导致 $CO_2$ 无法进入叶片细胞中，造成叶肉细胞膨压增加，进而降低叶片含水率[21]。Huber 等[22]指出，叶片养分和碳水化合物含量的变化会影响叶片水分状况，其主要由于钾离子和碳水化合物影响了叶肉细胞渗透势所致。因此当水稻受缺钾胁迫影响时，叶

**表 2　氮、钾肥配施对单位面积叶片含氮量、叶绿素含量及 SPAD 值**

**Table 2　Effects of the interaction between N and K on leaf N contents, chlorophyll contents and SPAD values of rice at the tillering and panicle initiation stages**

| 处理 Treatment | 分蘖期 Tillering stage | | | | | 幼穗分化期 Panicle initiation stage | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 含氮量 N content ($g/m^2$) | 叶绿素 a Chl. a ($g/m^2$) | 叶绿素 b Chl. b ($g/m^2$) | 叶绿素 a+b Chl. a+b ($g/m^2$) | SPAD | 含氮量 N content ($g/m^2$) | 叶绿素 a Chl. a ($g/m^2$) | 叶绿素 b Chl. b ($g/m^2$) | 叶绿素 a+b Chl. a+b ($g/m^2$) | SPAD |
| $N_0K_0$ | 1.46 cd | 0.453 d | 0.075 d | 0.549 cd | 35.4 cd | 1.12 cd | 0.377 c | 0.049 d | 0.425 c | 35.7 de |
| $N_0K_{120}$ | 1.32 d | 0.468 cd | 0.076 d | 0.543 d | 34.7 d | 1.01 d | 0.391 c | 0.048 d | 0.438 c | 34.3 e |
| $N_{90}K_0$ | 1.86 ab | 0.586 a | 0.102 bc | 0.688 ab | 37.7 b | 1.31 b | 0.582 ab | 0.075 b | 0.657 b | 39.2 b |
| $N_{90}K_{120}$ | 1.44 cd | 0.510 bc | 0.089 c | 0.596 c | 36.4 bc | 1.12 cd | 0.534 b | 0.066 c | 0.600 bc | 37.0 cd |
| $N_{180}K_0$ | 1.98 a | 0.587 a | 0.126 a | 0.733 a | 40.7 a | 1.57 a | 0.648 a | 0.083 a | 0.731 a | 41.6 a |
| $N_{180}K_{120}$ | 1.63 bc | 0.527 b | 0.109 b | 0.658 b | 37.6 b | 1.31 b | 0.568 b | 0.068 c | 0.636 b | 39.1 bc |
| N | ** | * | ** | * | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| K | ** | * | * | * | ** | ** | * | ** | * | * |
| N × K | ns | ns | ns | ns | * | ns | ns | ns | ns | ns |

注（Note）：同列数据后不同字母表示施肥处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different lower-case letters in the same column are significantly different among treatments at the 0.05 level. *和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著 Indicate significantly different at 0.05 and 0.01 levels between treatments, respectively.

片含水率下降，进而造成净光合速率降低，限制光合产物与干物质的形成。缺钾在施氮条件下显著降低叶面积、提高比叶重及叶片可溶性糖含量 (表 1)，该研究结果与 Pettigrew 等[21]在棉花上的研究结果相似。本研究结果还表明，水稻比叶重与叶片可溶性糖含量呈极显著正相关关系 (图 5)；钾素在水稻光合产物运输及碳水化合物的合成方面均起着至关重要的作用；Pettigrew 等[23]认为缺钾限制了源组织中光合产物向韧皮部的装载运输，造成糖在叶片中大量积累，其中以己糖为主，进而导致比叶重增加。Li 等[12]在水稻上的研究表明，比叶重与叶片厚度呈显著正相关关系，因此可以推测，在施氮条件下缺钾增加比叶重进而增加水稻叶片厚度。潘勇辉等[24]在油菜上的研究表明，缺钾胁迫下叶肉细胞叶绿体长度降低但是其厚度显著增加。叶片厚度对环境胁迫可以做出快速的响应，其与叶片组织膨压有较密切的关系[25]。缺钾导致叶片变厚的可能原因还与缺钾造成叶肉细胞膨压增加，细胞快速扩张有关。Marenco 等[26]研究表明，较厚的叶片其多重散射和光子通路较正常叶片有所增加，进而导致较低的透明度，可能会影响到 SPAD 值测定结果的可靠性。综上所述，缺钾造成叶片中碳水化合物大量积累，增加水稻比叶重及叶片厚度，限制水稻营养生长阶段干物质的形成与转运，造成水稻正常生长发育受限。

## 4　结论

1) 在施氮条件下缺钾显著降低水稻干物质及叶面积指数，其中施氮水平为 N 180 kg/hm² 时的干物质及叶面积指数降幅最大；氮钾交互效应对水稻干物质及叶面积指数有显著或极显著的影响。

2) 在不施氮条件下缺钾对叶片氮含量、比叶重和可溶性糖含量均无显著影响，而在施氮条件下显著增加叶片氮含量、可溶性糖含量、比叶重；无论施氮与否，缺钾均显著降低叶片钾含量且增加叶片镁含量，其中叶片钾和镁离子间具有明显的补偿效应；比叶重与可溶性糖含量具有极显著正相关关系。

3) 在不施氮条件下缺钾对叶绿素含量及叶片 SPAD 值均无显著影响，水稻叶色在田间以缺氮黄化为主；而在施氮条件下缺钾造成水稻生长受阻从而产生浓缩效应，促使单位质量及单位面积叶片氮含量、叶绿素含量 (叶色值) 及 SPAD 读数显著增加，水稻叶色在田间表现为暗绿的现象。

**参 考 文 献：**

[1] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants[M]. London: Academic press, 2011.

[2] 刘国栋, 刘更另. 论缓解我国钾源短缺问题的新对策[J]. 中国农业科学, 1995, 28(1): 25–32.
Liu G D, Liu G L. A new strategy alleviating shortage of potassium resource in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1995, 28(1): 25–32.

[3] Zörb C, Senbayram M, Peiter E. Potassium in agriculture-status and perspectives[J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171(9): 656–669.

[4] 周伯瑜. 作物缺钾症状及钾肥的施用[J]. 中国农学通报, 1989, (3): 38–39.
Zhou B Y. Study on the symptoms of potassium deficiency and potassium fertilizer application in crops[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 1989, (3): 38–39.

[5] 金玉峰, 陈迪文, 李奇伟, 等. 不同钾水平对甘蔗萌芽及幼苗生长的影响[J]. 广东农业科学, 2013, 40(8): 72–74.
Jin Y F, Chen D W, Li Q W, *et al*. Effects of different levels of potassium on sugarcane germination and seedling growth[J]. Guangdong Agricultural Science, 2013, 40(8): 72–74.

[6] 严德福. 松嫩平原异质生境芦苇不同叶龄叶片光合色素的季节变化规律[D]. 长春: 东北师范大学硕士学位论文, 2012.
Yan D F. Seasonal variation of reed photosynthetic pigments of different leaf age class from heterogeneous habitats in Songnen Plain[D]. Changchun: MS Thesis of Northeast Normal University, 2012.

[7] 柴家荣, 尚志强, 戴福斌, 等. 氮、磷、钾营养对白肋烟叶绿体色素、化学成分的影响及相关性分析[J]. 中国烟草科学, 2006, 27(2): 5–9.
Chai J R, Shang Z Q, Dai F B, *et al*. Relative analysis and effect of N, P and K on burley tobacco chlorophyll and chemical compositions[J]. Chinese Tobacco Science, 2006, 27(2): 5–9.

[8] 刘建祥, 杨肖娥, 杨玉爱, 等. 低钾胁迫对水稻叶片光合功能的影响及其基因型差异[J]. 作物学报, 2001, 6(6): 1000–1006.
Liu J X, Yang X E, Yang Y A, *et al*. The effects of low potassium stress on the photosynthetic function of rice leaves and their genotypic difference[J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 6(6): 1000–1006.

[9] 蒋德安, 陆庆, 薛建明. 钾营养对稻叶光合功能及光能吸收的调节[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 1992, 18(4): 25–29.
Jiang D A, Lu Q, Xue J M. Regulation of potassium nutrition to photosynthetic function and light-energy absorption of rice leaf[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University (Agriculture and Life Science edition), 1992, 18(4): 25–29.

[10] 陶勤南, 方萍, 吴良欢, 等. 水稻氮素营养的叶色诊断研究[J]. 土壤, 1990, (4): 190–193.
Tao Q N, Fang P, Wu L H, *et al*. Study on leaf color diagnosis of rice nitrogen nutrition[J]. Soils, 1990, (4): 190–193.

[11] Singh B, Singh Y, Ladha J K, *et al*. Chlorophyll meter and leaf color chart-based nitrogen management for rice and wheat in Northwestern India[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(4): 821–829.

[12] Li J, Yang J, Fei P, *et al*. Responses of rice leaf thickness, SPAD readings and chlorophyll a/b ratios to different nitrogen supply rates in paddy field[J]. Field Crops Research, 2009, 114(3): 426–432.

[13] 李刚华, 丁艳锋, 薛利红, 等. 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, *et al*. 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.

[14] 赵全志, 丁艳锋, 王强盛, 等. 水稻叶色变化与氮素吸收的关系[J]. 中国农业科学, 2006, 39(5): 916–921.
Zhao Q Z, Ding Y F, Wang Q S, *et al*. Relationship between leaf color and nitrogen uptake of rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(5): 916–921.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
Bao S D. Methods of soil agricultural chemical analysis (Third edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.

[16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 194–197.
Li H S. The experiment principle and technique on plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 194–197.

[17] Balkos K D, Britto D T, Kronzucker H J. Optimization of ammonium acquisition and metabolism by potassium in rice (*Oryza sativa* L. cv. IR-72)[J]. Plant Cell and Environment, 2010, 33(1): 23–34.

[18] 付欣雨, 黄旭明, 王慧聪, 李建国. 不同品种荔枝叶色差异及其与大量元素的关系[A]. 全国热带亚热带水果产业发展研讨会暨中国园艺学会热带南亚热带果树分会第三届学术年会论文集[C]. 2010. 117–123.
Fu X Y, Huang X M, Wang H C, Li J G. A study of the correlation between leaf chlorophyll content and N, P and K concentrations in Litchi[A]. National conference on tropical and subtropical fruit industry development and the third annual conference of tropical and subtropical fruit branch, Chinese Society of Horticulture[C]. 2010. 117–123.

[19] 李岚涛, 张萌, 任涛, 等. 应用数字图像技术进行水稻氮素营养诊断[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 259–268.
Li L T, Zhang M, Ren T, *et al*. Diagnosis of N nutrition of rice using digital image processing technique[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 259–268.

[20] 李颖, 薛利红, 马资厚, 等. 氮磷互作水稻冠层氮素敏感光谱筛选研究[J]. 土壤, 2015, 47(1): 33–41.
Li Y, Xue L H, Ma Z H, *et al*. Research on sensitive spectrum of rice canopy for nitrogen under nitrogen and phosphorus interaction[J]. Soils, 2015, 47(1): 33–41.

[21] Pettigrew W T. Potassium deficiency increases specific leaf weights and leaf glucose levels in field-grown cotton[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(6): 962–968.

[22] Huber S C. Role of potassium in photosynthesis and respiration[J]. Potassium in Agriculture, 1985. 369–396.

[23] Pettigrew W T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton[J]. Physiologia Plantarum, 2008, 133(4): 670–681.

[24] 潘勇辉, 陆志峰, 鲁剑巍, 等. 缺钾对越冬期油菜光合特性和叶绿体超微结构的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(5): 688–693.
Pan Y H, Lu Z F, Lu J W, *et al*. Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of wintering oilseed rape under potassium deficiency[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015, 37(5): 688–693.

[25] Seelig H D, Wolter A, Schröder F G. Leaf thickness and turgor pressure in bean during plant desiccation[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 184: 55–62.

[26] Marenco R A, Antezana S A, Nascimento H C S. Relationship between specific leaf area, leaf thickness, leaf water content and SPAD-502 readings in six Amazonian tree species[J]. Photosynthetica, 2009, 47(2): 184–190.