

## 淮河平原旱稻-小麦两熟制的土壤氮磷钾供应、 养分吸收利用效率及肥料需求

张洪艳 陶光灿 余璿 阎静 郭兴强 谢光辉

(中国农业大学 农学与生物技术学院, 北京 100094)

**摘要** 在淮河平原进行田间试验,研究了旱稻-小麦两熟种植系统土壤氮、磷、钾供应状况、养分吸收利用效率及肥料需求规律。结果表明:小麦产量对肥料的依赖性以及对磷和钾素的敏感程度高于旱稻。旱稻-小麦两熟种植系统一个周期内的土壤氮素供应量为 $12.5\text{ g/m}^2$ 、磷素为 $3.3\text{ g/m}^2$ 和钾素为 $22.7\text{ g/m}^2$ 。土壤对第一季旱稻和小麦的氮、磷和钾素供应能力均显著高于第二季,表明土壤养分供应能力很大程度上受施肥的影响。旱稻氮、磷和钾肥表观利用率平均值分别为33.4%、3.0%和-8.5%,小麦分别为69.3%、13.4%和36.9%。每生产1t旱稻籽粒需氮素14.9~33.7 kg、磷素2.9~5.9 kg和钾素17.9~38.1 kg;每生产1t小麦籽粒需氮素15.9~28.3 kg、磷素3.1~4.2 kg和钾素15.9~21.6 kg。在淮河平原,两季旱稻施氮、磷、钾(NPK)比不施氮(PK)处理分别显著增产18.4%、25.8%;两季小麦NPK比PK处理分别显著增产54.1%、158.7%,两季旱稻、小麦NPK处理的产量均显著高于PK处理,表明氮素是限制淮河平原旱稻-小麦两熟制旱稻和小麦产量的主要肥料因素。

**关键词** 旱稻;小麦;氮;磷;钾;养分吸收;利用效率;养分供应能力

中图分类号 S158.3;S511.6;S512

文章编号 1007-4333(2007)06-0031-08

文献标识码 A

## Supply, uptake and use efficiency of N, P and K in aerobic rice and wheat rotation system

Zhang Hongyan, Tao Guangcan, Yu Jun, Yan Jing, Guo Xingqiang, Xie Guanghui

(College of Agriculture and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

**Abstract** The paper is about supply, uptakes and use efficiency of N, P and K in aerobic rice and wheat cropping system. The results indicated that wheat had higher requirement for the nutrients and was more sensitive to P and K than aerobic rice. On the average, the soil supplied about  $12.5\text{ g/m}^2$  (N),  $3.3\text{ g/m}^2$  (P) and  $22.7\text{ g/m}^2$  (K), more in the first season. The nutrient supplying capacity of the soil largely depended upon fertilization. The apparent use efficiencies of applied N, P and K were 33.4%, 3% and -8.5% for the rice, and 69.3%, 13.4%, 36.9% for the wheat. Producing one ton of rice grain required for N 14.9 to 33.7 kg, P 2.9 to 5.9 kg and K 17.9 to 38.1 kg respectively, but 15.9 to 28.3 kg N, 3.1 to 4.2 kg P and 15.9 to 21.6 kg K for the wheat grain. NPK treatments resulted in 18.4% and 25.8% higher rice yield than PK treatment in the first and the second season respectively, but for the wheat, the yields were significantly improved 54.1% and 158.7% respectively. Obviously, N is the main factors confining the yield of aerobic rice and wheat in Huar river plain.

**Key words** aerobic rice; winter wheat; N; P; K; nutrient uptake; use efficiency; soil nutrient supply

为了节约用水和保证粮食安全,国内外均在开展旱稻的研究和推广<sup>[1,2]</sup>。旱稻研究主要集中在不同土壤水分和氮水互作条件下旱稻的产量形成及水分、氮肥利用率<sup>[3,5]</sup>,水稻、旱稻生育早期,对硝态氮、

铵态氮吸收偏好的差异<sup>[6]</sup>以及旱稻的连作障碍<sup>[7,8]</sup>等方面,研究表明:旱地条件下水分胁迫、矿质营养限制了旱稻产量<sup>[9]</sup>。我国淮河流域是旱稻的重点发展地区,旱稻-小麦轮作系统正在形成,本研究试图

收稿日期:2007-04-04

基金项目:国际合作项目“CGIAR Challenge Program on Water and Food”资助

作者简介:张洪艳,硕士研究生;谢光辉,教授,通讯作者,主要从事土壤肥料与能源作物研究,E-mail:xiegh@cau.edu.cn

探索该系统的土壤氮、磷、钾供应能力以及2种作物的养分吸收利用、肥料需求规律,为进一步深入研究旱稻生产,旱稻-小麦两熟种植条件下的肥料施用方式提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于2005—2006年在安徽省蒙城县双湖村进行。该村位于北纬33.17°,东经116.33°,海拔25.4 m,年均降水量838.3 mm,10年积温4 800~4 900,年无霜期209 d。试验地土壤为砂浆黑土,土壤属性见表1。供试旱稻品种为中国农业大学北方旱稻研究中心培育的“旱稻502”,小麦品种为市售的“豫麦18”。

表1 试验区土壤养分与属性

Table 1 Soil characteristics of the experiment site

土壤养分与属性	数值	土壤养分与属性	数值
pH	7.5	w(速效磷)/(mg/kg)	12.6
w(有机碳)/(g/kg)	8.7	w(可交换钾)/(mg/kg)	106.9
w(全氮)/(g/kg)	1.4	砂粒*(0.05~2.00 mm)/%	10
w(全磷)/(g/kg)	0.4	粉粒*(0.002~0.050 mm)/%	58
w(全钾)/(g/kg)	22.7	黏粒*( <0.002 mm)/%	32
w(矿化氮)/(mg/kg)	21.0		

注:2005-05试验地整地后播种以前用土钻按“折线形”取耕层0~30 cm土样,测定方法见1.3养分测定方法。\*为不同土壤颗粒。

### 1.2 试验方法

试验设2个相邻试验区,完成旱稻-小麦轮作与小麦-旱稻轮作养分吸收利用的比较试验。试验区一:2005-06-14种植第一季旱稻;10-19收获后,在对应小区种植第二季小麦。试验区二:10-23种植第一季小麦;2006-06-01收获后在对应小区种植第二季旱稻。试验设4个处理和一个对照:PK,施磷、钾肥;NK,施氮、钾肥;NP,施氮、磷肥;NPK,施氮、磷、钾肥;CK,不施肥。氮肥为尿素(N,46%,质量分数,下同),磷肥为过磷酸钙( $P_2O_5$ ,12%),钾肥为氯化钾( $K_2O$ ,60%)。旱稻全生育期施肥量为:N,120 kg/hm<sup>2</sup>;  $P_2O_5$ ,50 kg/hm<sup>2</sup>;  $K_2O$ ,75 kg/hm<sup>2</sup>。氮肥按基肥占40%、分蘖肥20%和拔节肥40%,3次施入;磷肥作基肥一次性施入;钾肥按基肥、拔节肥各50%,2次施入。小麦全生育期施肥量为:N,180 kg/hm<sup>2</sup>;  $P_2O_5$ ,50 kg/hm<sup>2</sup>;  $K_2O$ ,90 kg/hm<sup>2</sup>。氮肥按基肥占40%、返青期40%和孕穗期20%,3次施入;

磷肥作基肥一次性施入;钾肥按基肥和返青期各50%,2次施入。除施肥外,其他田间管理措施与同季作物一致。试验采用随机区组设计,4次重复,每个小区面积为20 m<sup>2</sup> (4 m ×5 m)。

### 1.3 养分测定方法

1.3.1 植物样品测定方法 用  $H_2SO_4 - H_2O_2$  消煮,测定茎叶和籽粒的全氮用半微量开氏法;全磷用钼锑抗比色法;全钾用原子吸收光谱法。

1.3.2 土壤样品测定方法 采用水溶液法测定pH;重铬酸钾容量法测定土壤有机质;分别采用半微量开氏法、 $HClO_4 - HNO_3$ 法和NaOH碱熔法测定全氮、磷、钾;分别采用Zn-FeSO<sub>4</sub>还原法,0.5 mol/L的NaHCO<sub>3</sub>浸提、钼锑抗比色法和NH<sub>4</sub>OAc浸提、原子吸收法测定无机氮、速效磷和可交换钾;采用比重计法测定土壤质地。

### 1.4 养分评价指标与数据统计分析

地力贡献率是指不施肥作物与施肥作物产量之比,是农田土壤养分供给力的一种相对评价方式<sup>[10]</sup>。土壤地力贡献率低,则表明土壤肥力水平低,作物对肥料的依赖性强<sup>[11]</sup>。

土壤养分供应能力是指其他养分充足并且作物生长环境良好条件下作物从土壤中吸收的此种养分的量<sup>[12-14]</sup>。不施某种养分时,作物对该养分的吸收量反映了土壤的供肥能力<sup>[11]</sup>。

土壤供氮能力为PK处理植株地上部全氮含量;供磷能力为NK处理植株地上部全磷含量;供钾能力为NP处理植株地上部全钾含量<sup>[12]</sup>。

氮(磷、钾)素养分利用效率 =

$$\frac{\text{籽粒产量}}{\text{植株地上部氮(磷、钾)素积累量}} \times \frac{\text{NPK处理作物吸氮量} - \text{PK处理作物吸氮量}}{\text{氮肥供应量}} \times 100\%$$

$$\frac{\text{NPK处理作物吸磷量} - \text{NK处理作物吸磷量}}{\text{磷肥供应量}} \times 100\%$$

$$\frac{\text{NPK处理作物吸钾量} - \text{NP处理作物吸钾量}}{\text{钾肥供应量}} \times 100\% \quad [15-16]$$

式中养分吸收量为每m<sup>2</sup>作物地上部养分的吸收量。

推荐施肥量<sup>[16]</sup> =

目标产量所需养分 - 土壤供应量

肥料表观利用率 × 肥料养分含量

本试验运用 Excel 进行数据整理，利用 Spss13 软件 Duncan 检验进行统计分析。当处理在  $P < 0.05$  水平上出现差异时，为显著差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 淮河平原两熟制地区土壤地力贡献率与养分限制因子

#### 2.1.1 产量及地力贡献率 根据 NPK 处理和 CK

产量得到了基础地力贡献率(表 2)。两季旱稻 NPK 处理的籽粒产量分别为 373.5、378.9 g/m<sup>2</sup>，比 CK 分别增产 13.6%、30.3%；两季小麦分别为 664.7、713.0 g/m<sup>2</sup>，比 CK 分别增产 52.6%、167.3%。第一季旱稻比第二季小麦、第二季旱稻比第一季小麦的地力贡献率分别高 50.6%、11.2%；第一季旱稻比第一季小麦、第二季旱稻比第二季小麦的地力贡献率分别高 14.5%、39.3%，表明砂浆黑土对夏季作物旱稻的地力贡献率高于冬季作物小麦，小麦对肥料的依赖性高于旱稻。

#### 2.1.2 养分限制因子 旱稻、小麦缺乏氮素后产量

表 2 淮河平原两熟制地区不同施肥处理旱稻和小麦的籽粒产量

Table 2 Yields of aerobic rice and wheat and contribution ratio of soil in different treatments

施肥处理	2005-06—2006-06 两熟作物籽粒产量/(g/m <sup>2</sup> )		2005-10—2006-10 两熟作物籽粒产量/(g/m <sup>2</sup> )	
	旱稻(第一季)	小麦(第二季)	小麦(第一季)	旱稻(第二季)
NPK	373.5 a	713.0 a	664.7 a	378.9 a
PK	315.5 b	275.6 c	431.4 b	301.3 b
NK	408.2 a	546.6 b	612.4 a	365.6 a
NP	413.7 a	592.9 b	640.0 a	396.4 a
CK	328.7 b	266.7 c	435.6 b	290.8 b
地力贡献率/%	88	37.4	65.5	76.7

注：同列数据不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )，下同。

表现相似，缺磷或钾素后产量表现存在着差异(表 2)。两季旱稻 NPK 比 PK 处理分别显著增产 18.4%、25.8%；两季小麦分别显著增产 54.1%、158.7%。两季旱稻 NPK 与 NK 处理间差异不显著；第二季小麦 NPK 比 NK 处理显著增产 30.4%。第一季小麦 NPK 与 NP 处理间差异不显著；第二季小麦 NPK 比 NP 处理显著增产 20.3%。两季旱稻、小麦 PK 处理的产量均显著低于 NPK 处理，说明氮素是影响供试田块旱稻、小麦产量的土壤限制因子。第一季旱稻 NPK 处理产量比 NK、NP 处理低，差异不显著；第二季旱稻 NPK 处理产量比 NK 处理高，比 NP 处理低，差异均不显著。两季小麦 NPK 处理产量比 NK、NP 处理高，这种差异在第一季中不显著，第二季中显著。分析表明磷、钾素不是影响供试田

块两季旱稻以及第一季小麦产量的限制因子，在未向第一季旱稻土壤补充磷、钾素的情况下，土壤不能满足第二季小麦获得高产的养分需求，磷、钾素成为影响当季小麦产量的限制因子，表明小麦产量对磷、钾素的敏感程度高于旱稻。

### 2.2 淮河平原两熟制地区土壤养分供应能力

土壤对第一季旱稻、第二季小麦一个轮作周期内供应氮、磷和钾素分别为 12.2、3.5 和 25.3 g/m<sup>2</sup>；对第一季小麦、第二季旱稻分别为 12.8、3.1 和 20.0 g/m<sup>2</sup>。由此得到旱稻、小麦两熟种植系统一个周期内土壤平均供应氮、磷和钾素分别为 12.5、3.3 和 22.7 g/m<sup>2</sup>。两季土壤对旱稻氮、磷和钾素的平均供应能力分别为 6.2、1.4 和 11.8 g/m<sup>2</sup>；对小麦分别为 6.4、1.9 和 10.9 g/m<sup>2</sup>(表 3)。土壤对第一季旱稻

表 3 土壤对淮河平原两熟制地区旱稻和小麦的氮、磷和钾素的供应能力\*

Table 3 Soil indigenous N, P and K supply to aerobic rice and wheat

g/m<sup>2</sup>

作物生长季	作物(栽培季)	土壤供氮能力	土壤供磷能力	土壤供钾能力
2005-06—2006-06	旱稻(第一季)	7.8 a	1.8 ab	15.8 a
	小麦(第二季)	4.4 b	1.7 b	9.5 c
2005-10—2006-10	小麦(第一季)	8.3 a	2.1 a	12.2 b
	旱稻(第二季)	4.5 b	1.0 c	7.8 c

注：\*为作物地上部每 m<sup>2</sup> 吸收养分的量。

的氮、钾素供应能力显著高于对第二季小麦的供应能力。对第一季小麦显著高于第二季旱稻;对第一季旱稻显著高于对第二季旱稻;对第一季小麦显著高于对第二季小麦。分析结果表明土壤养分供应能力很大程度受施肥的影响。

### 2.3 淮河平原两熟制地区旱稻和小麦氮、磷、钾素吸收状况

由旱稻、小麦各处理的籽粒、茎秆氮、磷、钾质量分数(表4),以及籽粒产量、经济系数,得到旱稻、小麦收获期地上部养分吸收积累量。

表4 淮河平原两熟制地区不同施肥处理旱稻和小麦的籽粒和茎秆中的氮、磷、钾素质量分数

Table 4 N, P and K contents in grain and straw of aerobic rice and wheat in different treatments

测定时间	作物	施肥处理	w(N)/%		w(P)/%		w(K)/%	
			籽粒	茎	籽粒	茎	籽粒	茎
2005-06— 2006-06	旱稻 (第一季)	NPK	1.33 ±0.20	1.00 ±0.07	0.29 ±0.02	0.12 ±0.02	0.40 ±0.03	1.49 ±0.15
		PK	1.15 ±0.06	0.75 ±0.07	0.32 ±0.02	0.15 ±0.01	0.40 ±0.02	1.61 ±0.11
		NK	1.34 ±0.05	0.95 ±0.06	0.28 ±0.02	0.10 ±0.02	0.38 ±0.02	1.64 ±0.10
		NP	1.32 ±0.12	0.99 ±0.10	0.31 ±0.01	0.14 ±0.03	0.41 ±0.01	1.54 ±0.05
		CK	1.09 ±0.06	0.78 ±0.02	0.33 ±0.01	0.12 ±0.05	0.38 ±0.02	1.56 ±0.07
	小麦 (第二季)	NPK	2.17 ±0.06	0.57 ±0.26	0.31 ±0.01	0.07 ±0.01	0.44 ±0.01	1.16 ±0.07
		PK	1.36 ±0.13	0.34 ±0.03	0.36 ±0.01	0.07 ±0.01	0.45 ±0.01	0.99 ±0.07
		NK	2.17 ±0.13	0.65 ±0.07	0.28 ±0.01	0.05 ±0.01	0.41 ±0.01	1.19 ±0.06
		NP	1.99 ±0.18	0.78 ±0.06	0.32 ±0.01	0.07 ±0.01	0.45 ±0.01	0.86 ±0.06
		CK	1.38 ±0.09	0.36 ±0.06	0.38 ±0.02	0.06 ±0.01	0.44 ±0.01	0.88 ±0.07
2005-10— 2006-10	小麦 (第一季)	NPK	2.12 ±0.08	0.71 ±0.07	0.32 ±0.01	0.08 ±0.03	0.44 ±0.01	1.26 ±0.12
		PK	1.53 ±0.18	0.39 ±0.11	0.34 ±0.02	0.05 ±0.00	0.44 ±0.01	1.02 ±0.09
		NK	2.15 ±0.05	0.66 ±0.14	0.31 ±0.01	0.05 ±0.02	0.43 ±0.01	1.21 ±0.05
		NP	2.13 ±0.16	0.67 ±0.07	0.33 ±0.01	0.07 ±0.01	0.45 ±0.01	1.03 ±0.09
		CK	1.69 ±0.09	0.38 ±0.04	0.34 ±0.01	0.05 ±0.01	0.45 ±0.01	1.00 ±0.08
	旱稻 (第二季)	NPK	1.21 ±0.11	0.76 ±0.05	0.24 ±0.02	0.10 ±0.02	0.34 ±0.02	1.50 ±0.07
		PK	1.02 ±0.02	0.47 ±0.06	0.29 ±0.01	0.10 ±0.01	0.35 ±0.01	1.34 ±0.13
		NK	1.18 ±0.13	0.77 ±0.07	0.21 ±0.01	0.08 ±0.01	0.31 ±0.01	1.45 ±0.11
		NP	1.27 ±0.10	0.77 ±0.08	0.24 ±0.01	0.11 ±0.02	0.33 ±0.01	1.28 ±0.11
		CK	1.07 ±0.03	0.49 ±0.04	0.28 ±0.02	0.10 ±0.01	0.34 ±0.02	1.25 ±0.08

**2.3.1 氮素** 旱稻和小麦 NP、NK 和 NPK 处理的肥料施用明显促进了氮素吸收,而 PK 处理与 CK 间差异不显著(图 1(a))。第一季旱稻 NP、NK 和 NPK 处理氮素吸收积累量分别比 CK 显著提高 6.0、4.6 和 4.3 g/m<sup>2</sup>; 第二季分别比 CK 显著提高 4.0、3.2 和 3.7 g/m<sup>2</sup>。第一季小麦 NP、NK 和 NPK 处理氮素吸收积累量分别比 CK 显著提高 7.3、8.3 和 10.2 g/m<sup>2</sup>; 第二季分别比 CK 显著提高 12.0、10.3 和 14.3 g/m<sup>2</sup>。旱稻氮素吸收积累量最高与最低分别是第一季 NP 处理的 13.9 g/m<sup>2</sup> 和第二季 CK 的 4.4 g/m<sup>2</sup>。小麦氮素吸收积累量最高与最低分别是第二季 NPK 处理的 18.9 g/m<sup>2</sup> 和第二季 PK 的 4.4 g/m<sup>2</sup>; 第二季 NPK 处理显著高于 NK 处理。两季旱稻、第一季小麦 NPK 处理氮素吸收积累量均显著高于 PK 处理;其他处理间无显著差异(图 1(a))。表明在磷、钾供应较丰富的情况

下,施氮能够显著提高 2 种作物的氮素吸收;在氮、钾供应较丰富的情况下施磷或在氮、磷供应较丰富的情况下施钾,对 2 种作物氮素吸收的影响不显著。

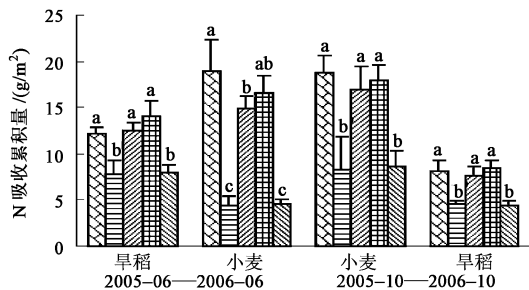
**2.3.2 磷素** 两季旱稻磷素吸收积累量 NP 处理比 CK 分别显著提高 0.7 和 0.3 g/m<sup>2</sup>; 第一季其他处理与 CK 间无显著差异,第二季除 NPK 处理显著高于 CK 外,其他处理与 CK 间无显著差异(图 1(b))。两季小麦磷素吸收积累量为 NP、NPK 处理显著高于 PK 处理和 CK; 第一季 NK 处理与 CK 间无显著性差异,第二季 NK 处理比 CK 显著提高 0.5 g/m<sup>2</sup>。第一季旱稻磷素吸收率积累量最高为 NP 处理的 2.4 g/m<sup>2</sup>, 最低为 CK 的 1.7 g/m<sup>2</sup>; 第二季最高为 NP 处理的 1.4 g/m<sup>2</sup>, 最低为 NK 处理的 1.0 g/m<sup>2</sup>。第一季小麦磷素吸收最高为 NPK 和 NP 处理的 2.5 g/m<sup>2</sup>, 最低为 CK 和 PK 处理的 1.6 g/m<sup>2</sup>; 第二季最高为

NPK处理的 $2.5\text{ g/m}^2$ ,最低为CK和PK处理的 $1.1\text{ g/m}^2$ 。两季旱稻收获期磷素吸收积累量最高均为NP处理,小麦最高均为NPK处理。旱稻不同处理磷素吸收积累量从 $1.0\sim 2.4\text{ g/m}^2$ 变化,小麦从 $1.1\sim 2.5\text{ g/m}^2$ 变化。

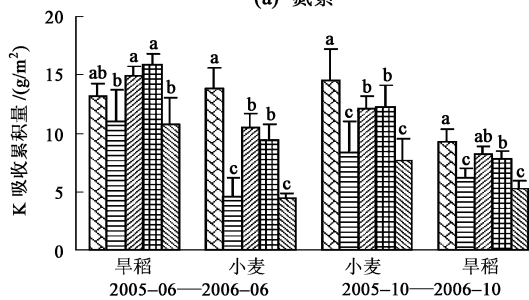
两季旱稻NPK与PK处理间磷素吸收积累量无显著差异(图1(c))。两季小麦磷素吸收积累量NPK比PK处理分别显著提高 $0.9、1.4\text{ g/m}^2$ ;第一季NPK与NK处理间无显著差异,第二季前者显著高于后者。第一季旱稻磷素吸收积累量NPK与NK处理间无显著差异,第二季NPK显著高于NK处理;第一季NPK比NP处理显著低 $0.5\text{ g/m}^2$ ,第二季两处理间无显著差异。两季小麦磷素吸收积累量为NPK与NP处理间差异不显著。分析结果表明:在磷、钾

素较丰富的情况下施氮不能显著提高旱稻磷素吸收,但能显著提高小麦的磷素吸收。氮、钾素供应较丰富的情况下施用磷肥不能提高第一季作物的磷素吸收,但能提高第二季作物的磷素吸收。说明第一季作物未施磷肥,土壤磷源可以满足作物对磷素的需求;两季作物未施磷肥,作物养分吸收受到限制。在氮、钾素供应较丰富的情况下,施钾不能提高小麦磷素吸收,对于第一季旱稻的磷素吸收有显著的促进作用,而对第二季没有显著影响。

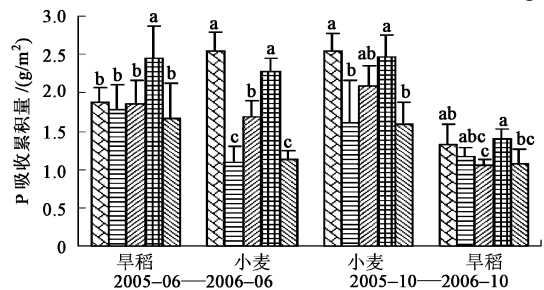
**2.3.3 钾素** 第一季旱稻钾素吸收积累量NPK处理与CK间无显著差异,第二季旱稻、两季小麦的NP、NK和NPK处理较CK显著提高钾素的吸收,而PK处理与CK间无显著差异(图1(c))。第一季旱稻钾素吸收积累量最高为NP处理的 $15.8\text{ g/m}^2$ ,最



(a) 氮素



(c) 钾素



(b) 磷素

▣ NPK ▤ PK ▥ NK ▦ NP ▧ CK

不同字母表示同季作物不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

图1 不同施肥处理旱稻和小麦地上部氮、磷、钾吸收积累量

Fig. 1 N, P and K uptakes of aerobic rice and wheat in different treatments

低为CK的 $10.7\text{ g/m}^2$ ;第二季旱稻最高为NPK处理的 $9.2\text{ g/m}^2$ ,最低为CK的 $5.2\text{ g/m}^2$ 。第一季小麦钾素吸收积累量最高为NPK处理的 $14.5\text{ g/m}^2$ ,最低为CK的 $7.7\text{ g/m}^2$ ;第二季小麦最高为NPK处理的 $13.8\text{ g/m}^2$ ,最低为CK的 $4.5\text{ g/m}^2$ 。旱稻不同处理钾素吸收积累量从 $5.2\sim 15.8\text{ g/m}^2$ 变化,小麦从 $4.5\sim 14.5\text{ g/m}^2$ 变化。两季旱稻钾素吸收积累量NPK比PK处理分别高 $2.1$ 和 $3.0\text{ g/m}^2$ ,前者不显著,后者显著;小麦则分别高 $6.2、9.2\text{ g/m}^2$ ,均达显著水平,说明磷、钾供应丰富条件下施氮可显著提高小麦钾素吸收,当磷、钾供应丰富而氮素供应较缺乏时施氮可以显著提高旱稻钾素吸收。两季旱稻的钾素吸收积累量NPK与NK处理间差异均不显著,两季小麦

NPK比NK处理分别高 $2.4、3.4\text{ g/m}^2$ ,前者不显著,后者显著,说明氮、钾供应较丰富时,施磷不会显著影响旱稻钾素吸收,在氮、钾供应较丰富而磷素较缺乏时,施磷可以显著提高小麦钾素吸收。第一季旱稻NPK与NP处理间差异不显著,第二季显著高于NP处理的 $1.4\text{ g/m}^2$ 。两季小麦NPK比NP处理分别高 $3.3、4.3\text{ g/m}^2$ ,前者不显著,后者显著。说明氮、磷供应较丰富而钾供应不足时,施钾能够显著促进旱稻和小麦的钾素吸收。

**2.3.4 肥料表观利用率** 小麦的氮、磷、钾肥表观利用率高于旱稻。旱稻、小麦氮肥表观利用率平均值分别为 $33.4\%、69.3\%$ ;磷肥分别为 $3.0\%、13.4\%$ 。钾肥分别为 $-8.5\%、36.9\%$ 。第一季旱稻

的磷、钾素的表观利用率分别为 0.4 %、- 35.6 %，较低的利用率也反映出土壤磷、钾素不是早稻产量的限制因子。

### 2.4 淮河平原两熟制地区早稻和小麦养分利用效率

两季早稻、小麦氮素利用效率缺氮 PK 处理和 CK 均显著高于施氮的 NP、NK 和 NPK 处理 (图 2)。两季早稻氮素利用效率从 29.9 ~ 67.1 kg/kg 变化，最低、最高分别为 NP、PK 处理；小麦从 35.4 ~

63.7 kg/kg 变化，最低、最高分别为 NPK、PK 处理。

两季早稻、小麦磷素利用效率 NK 处理最高 (图 2)。两季早稻磷素利用效率从 201.2 ~ 349.5 kg/kg 变化，最低、最高分别为 NP、NK 处理；小麦从 238.6 ~ 328.1 kg/kg 变化，最低、最高分别为 CK、NK 处理。

图 2 示出，两季早稻钾素利用效率从 26.3 ~ 56.0 kg/kg 变化，最低、最高分别为 NP 处理、CK；小麦从 46.6 ~ 63.8 kg/kg 变化，最低、最高分别为 NPK、PK 处理。

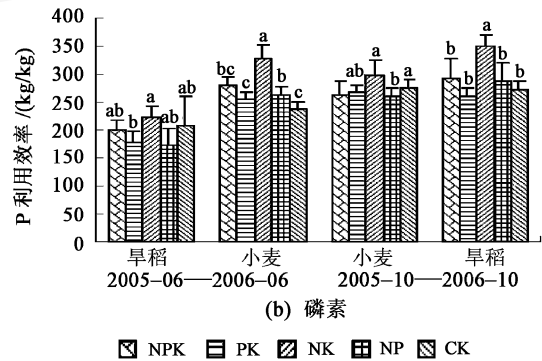
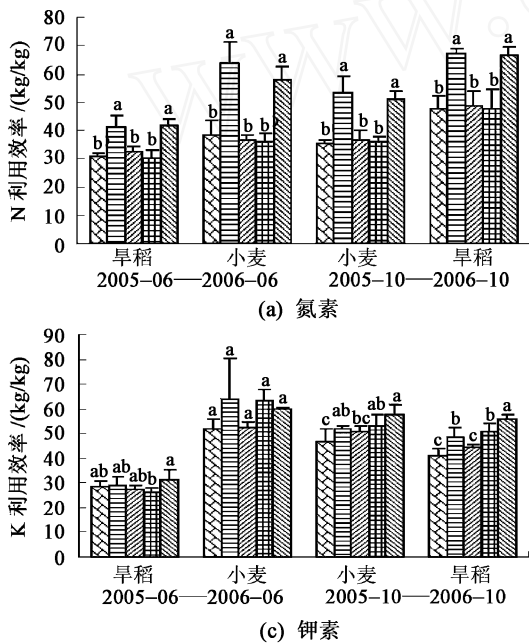


图 2 不同施肥处理早稻和小麦地上部氮、磷、钾利用效率

Fig. 2 N, P and K use efficiency of aerobic rice and wheat in different treatments

### 2.5 施肥建议

利用本试验得到早稻、小麦肥料表观利用率，在已知所用肥料养分质量分数情况下可计算出每季作物的推荐施肥量。参考周边的常规产量，假设早稻目标产量为 4.5 t/hm<sup>2</sup>，小麦为 7.5 t/hm<sup>2</sup>，本研究得到早稻每生产 1 t 籽粒需要氮素 14.9 ~ 33.7 kg；磷素 2.9 ~ 5.9 kg；钾素 17.9 ~ 38.1 kg。小麦每生产 1 t 籽粒需要氮素 15.9 ~ 28.3 kg；磷 3.1 ~ 4.2 kg；钾素 15.9 ~ 21.6 kg。不同施肥处理对早稻、小麦养分利用效率的不同影响，造成各处理间每生产 1 t 作物的养分需求的差异。以本试验每生产 1 t 籽粒所需养分中最优结果为依据，得出早稻需氮素 33.7 kg/t，磷素 5.9 kg/t，钾素 38.1 kg/t，小麦需氮素 28.3 kg/t，磷素 4.2 kg/t，钾素 21.6 kg/t。

### 3 结论与讨论

1) 在两季栽培系统中，王定勇等研究认为水作季节紫色土供肥能力高于旱作季节，小麦对肥料依

赖性高于水稻，在 10 年定位试验中，紫色土对小麦的地力贡献率稳定在 50 % 左右。每季小麦可从土壤和环境吸收氮素 28.1 ~ 60.9 kg/hm<sup>2</sup>，平均 37.1 kg/hm<sup>2</sup>；水稻为 50.4 ~ 102.6 kg/hm<sup>2</sup>，平均 81.8 kg/hm<sup>2</sup>。在一年两熟稻-麦水旱轮作制度中，紫色土每年平均供氮素 119 kg/hm<sup>2</sup> [11]。本研究表明砂浆黑土对第一季早稻的地力贡献率高于第二季作物小麦，小麦对肥料的依赖性高于早稻。由两季平均得到的土壤对早稻氮、磷和钾素供应量分别为 6.2、1.4 和 11.8 g/m<sup>2</sup>，对小麦分别为 6.4、1.9 和 10.9 g/m<sup>2</sup>。在一年两熟早稻小麦轮作制度中，砂浆黑土每年平均供氮、磷和钾素量分别为 12.5、3.3 和 22.7 g/m<sup>2</sup>。与王定勇结果比较，在两季栽培系统中砂浆黑土每年平均供氮素量虽比紫色土低 0.6 g/m<sup>2</sup>，但在误差范围内。

2) 早稻、小麦未施氮肥与施氮肥区的产量对比表明缺氮是该供试土壤的典型特征。在现有产量水平上，土壤供磷、钾能力不是影响产量的限制因子。

两季旱稻和第二季小麦, NPK与NK、NP处理产量间无显著差异, 表明两季旱稻和第二季小麦的土壤供磷、钾量均能满足现有产量水平的养分需要; 而第二季小麦NPK处理产量显著高于NK、NP处理, 说明当季土壤供磷、钾量不能满足现有产量水平的要求, 表明小麦比旱稻对磷、钾素的需求量要高。本试验第一季作物土壤供氮、磷、钾的能力均显著高于第二季。表明在上一季未通过施肥补充作物从土壤中带走的养分的情况下, 降低了土壤对下季作物的养分供应能力。

3) 连续定位缺素处理, 导致未施元素成限制因素, 影响其他养分的正常发挥联应效果<sup>[17]</sup>。适量施氮可促进小麦植株对氮素的吸收与积累, 与不施氮相比, 施氮显著提高植株磷素积累量<sup>[18]</sup>。施钾促进植株对钾素的吸收, 使其累积量增加, 而土壤中磷的含量很高时, 施磷肥没有明显提高植株对磷素的吸收<sup>[19]</sup>。本研究表明旱稻氮、磷和钾素吸收累积量变化分别在 $4.4 \sim 13.9 \text{ g/m}^2$ 、 $1.0 \sim 2.4 \text{ g/m}^2$ 和 $5.2 \sim 15.8 \text{ g/m}^2$ 之间; 小麦分别在 $4.4 \sim 18.9 \text{ g/m}^2$ 、 $1.1 \sim 2.5 \text{ g/m}^2$ 和 $4.5 \sim 14.5 \text{ g/m}^2$ 之间。不同施肥处理对作物吸收的影响不同。与赵俊晔等<sup>[18]</sup>研究结果相同的是施氮能够显著提高2种作物的氮素、小麦的磷和钾素、第二季旱稻钾素吸收, 对两季旱稻磷素、第一季旱稻的钾素吸收有促进作用, 但不显著。本研究中施用磷肥对2种作物氮素利用效率的影响不显著, 施磷和钾肥显著提高第二季小麦的钾素吸收。施磷肥能提高第二季作物的磷素吸收, 表明在某种养分缺乏的条件下向土壤中补充该养分才会促进作物对该养分的吸收, 体现了最小养分原理。每生产单位质量作物所需养分及作物养分利用效率2项指标的数值互为倒数, 本研究每生产1t旱稻或小麦所需养分及作物养分利用效率变幅较大的结论, 与国际水稻所以对水稻的研究结果相似<sup>[20]</sup>。本研究结果变幅大是由各肥料处理不同造成养分供应的差异所致。

4) 土壤养分主要靠前茬施肥归还而保持或提高, 合理的施肥结构既可增产, 也可培肥土壤<sup>[17]</sup>。肥沃的土壤上种植作物的70%产量是靠土壤供给养分取得的, 瘠薄土壤对产量贡献在50%左右<sup>[17]</sup>。通过合理施肥培肥土壤尤为重要。本研究通过2年大田试验得出淮河流域砂浆黑土土壤对旱稻-小麦两熟种植系统土壤养分供应情况, 对这一类型土壤在生产实践中的施肥具有一定的指导作用, 但同一

类型的土壤由于气候、大田管理等原因, 养分供应存在着变异<sup>[13]</sup>, 因此有必要进行长期定位土壤养分供应能力研究。此外, 国内外对水稻或水稻-小麦水旱轮作系统土壤养分供应研究的较多<sup>[12,13,21-22]</sup>, 而对旱稻或旱稻-小麦旱地轮作种植系统养分供应研究较少。为了建立合理施肥制度, 进行旱稻-小麦旱地轮作种植系统土壤养分供应状况以及轮作系统中作物养分需求的研究尤为重要。

## 参 考 文 献

- [1] 江巨鳌, 邬克彬. 旱稻生产现状分析及发展策略[J]. 作物研究, 2004, (1): 48-51
- [2] 胡颂平, 周清明. 陆稻抗旱性研究进展[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2001, 27(3): 240-244
- [3] Belder P, Bouman B A M, Spiertz J H J, et al. Crop performance, nitrogen and water use in flooded and aerobic rice[J]. Plant Soil, 2005, 273:167-182
- [4] Yang Xiaoguang, Bouman B A M, Wang Huaqi, et al. Performance of temperate aerobic rice different water regimes in North China [J]. Journal of Agricultural Water Management, 2005, 74(2): 107-122
- [5] Bouman B A M, Yang Xiaoguang, Wang Huaqi, et al. Performance of aerobic rice varieties under irrigated conditions in North China[J]. Field Crops Research, 2006, 97: 53-65
- [6] Lin Shan, Li Jie, Sattelmacher B, et al. Lowland and aerobic rice respond to ammonium and nitrate supply during early growth stages[J]. Journal of Plant Nutrition, 2005, 28(9): 1495-1510
- [7] George T, Magbanua R, Garrity D P, et al. Rapid yield loss of rice cropped successively in aerobic soil [J]. Agronomy Journal, 2002, 94: 981-989
- [8] Peng Shaobing, Bouman B A S, Visperas R M, et al. Comparison between aerobic and flooded rice in the tropics: Agronomic performance in an eight-season experiment [J]. Field Crops Research, 2006, 96: 252-259
- [9] Yoshida S. Factors That Limit the Growth and Yields of Upland Rice in the Philippines [M]. Manila: International Rice Research Institute, 1975: 46-71
- [10] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 82-86, 91, 474-478
- [11] 王定勇, 石孝均, 毛知耘. 长期水旱轮作条件下紫色土养分供应能力的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 120-126
- [12] Haefele S M, Wopereis M C S, Ndiaye M K, et al. Internal nutrient efficiencies, fertilizer recovery rates and indigenous

- nutrient supply of irrigated lowland rice in Sahelian West Africa[J]. *Field Crops Research*, 2003, 80(1): 19-32
- [13] Dobermann A, Witt C, Abdulrachman S, et al. Fertilizer Management Soil Fertility and Indigenous Nutrient Supply in Irrigated Rice Domains of Asia [J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(4): 913-923
- [14] Janssen B H, Guiking F C T, Van der Eijk D, et al. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS) [J]. *Geoderma*, 1990, 46(4): 299-318
- [15] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. *生态环境*, 2003, 12(2): 192-197
- [16] 吕甚悟, 张勇军. 对磷钾肥利用率和需用量计算探讨[J]. *土壤通报*, 2003, 34(6): 198-201
- [17] 索让东. 长期定位施用不同肥料对养分吸收参数及土壤供肥能力的影响[J]. *中国农学通报*, 2003, 19(1): 51-55
- [18] 赵俊晔, 于振文, 李延奇, 等. 施氮量对小麦氮磷钾养分吸收利用和产量的影响[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(1): 98-103
- [19] 李迎春, 彭正萍, 薛世川, 等. 磷、钾对冬小麦养分吸收、分配及运转规律的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2006, 29(5): 1-6
- [20] Dobermann A, Fairhurst T H. *Rice Nutrient Disorders and Nutrient Mmanagement* [M]. Philippines: International Rice Research Institute, Canada: Potash and Phosphate Institute, 2000: 26
- [21] Cassman K G, Gnes G C, Dizon M A, et al. Nitrogen-use efficiency in tropical lowland rice systems: contributions from indigenous and applied nitrogen [J]. *Field Crops Research*, 1996, 47(1): 1-12
- [22] Olk D C, Cassman K G, Simbahan G C, et al. Interpreting fertilizer-use efficiency in relation to soil nutrient-supplying capacity, factor productivity, and agronomic efficiency[J]. *Nutrient Cycle in Agroecosystem*, 1999, 53: 35-41

## · 简讯 ·

### 我校论文入选首届“中国百篇最具影响优秀国际、国内学术论文”

2007年11月15日,2006年中国科技论文统计结果发布会在北京国际会议中心举行。根据中国科学技术信息研究所公布的结果,我校2篇论文被评为“第一届中国百篇最具影响优秀国际学术论文”、2篇论文被评为“第一届中国百篇最具影响优秀国内学术论文”。

为促进我国高影响、高质量科技论文的发表,引导我国的论文增长模式由重视数量向重视质量方向转变,中国科技信息情报研究所从2007年开始进行“中国百篇最具影响优秀国际学术论文”和“中国百篇最具影响国内学术论文”的评选,每年评选一次。国际论文源为前一年被SCI收录的中国论文,国内论文源为前一年中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)收录的国内论文。对论文学术影响的文献计量指标的选取主要考虑:发表论文的期刊水平、论文的创新性、文献类型、是否为热点论文、论文的合作强度、论文的参考文献数、论文的完整性7个方面。

我校被评为“第一届中国百篇最具影响优秀国际学术论文”的是生物学院武维华教授发表在《CELL》上的论文“A protein kinase, interacting with two calcineurin B-like proteins, regulates K<sup>+</sup> transporter AKT1 in *Arabidopsis*”和生物学院张大鹏教授发表在《NATURE》上的论文“The Mg-chelatase H subunit is an abscisic acid receptor”。

被评为“第一届中国百篇最具影响优秀国内学术论文”的是农学与生物技术学院史雪岩副教授发表在《分析化学》上的论文“聚合<sup>-</sup>一环糊精作手性选择剂的毛细管电泳法分离4种光学活性农药中间体”和资源与环境学院胡克林副教授发表在《农业工程学报》上的论文“农田土壤养分的空间变异性特征”。

(图书馆 王淑凤供稿)