

土壤水分含量和施磷量对旱作水稻磷素吸收的影响*

何园球¹ 李成亮¹ 王兴祥¹ 熊又升¹ 沈其荣²

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要 通过温室盆栽和大田试验研究了土壤含水量和施磷量对旱作水稻全磷吸收量的影响。结果表明: 土壤水分和施磷量对大田旱作水稻全磷吸收量的影响不显著; 对盆栽而言, 施磷量的影响显著, 但二者的交互作用明显, 因而其差异主要体现在水和磷的复合效应; 当施磷量(P)为 0.030 g kg^{-1} 、土壤含水量为饱和持水量的 80% 时旱作水稻吸磷量最高, 但相同土壤水分条件下, 施磷与不施磷间旱作水稻吸磷量差异最大, 而不同施磷量间差异较小; 旱作水稻各部分全磷平均吸收量为: 籽粒 > 茎 > 根。实验结果可以为中国南方丘岗区地区水稻旱作的水分和磷素管理提供理论依据。

关键词 土壤水分; 施磷量; 旱作水稻; 磷素营养

中图分类号 S154.4 **文献标识码** A

我国红壤地区高温多雨, 为水稻作物生产提供了得天独厚的气候条件。但一方面, 由于降雨分布不均, 季节性干旱非常严重, 造成作物的生理性缺水导致作物产量的减少和质量的下降; 另一方面, 红壤地区平地较少, 丘岗地占总面积的 70%。红壤地区特殊的水分和地形条件, 大大限制了水稻水作种植及其产量的增加^[1]。近年来采用土壤表层秸秆覆盖进行水稻旱作能获得几乎与传统水稻水作差不多的产量, 而节水 60%~100%^[2~4], 这对非水网且夏季雨水量又较多的南方丘陵地区种植水稻是一个很好的选择或替代耕作系统。

红壤地区土壤本来就缺磷, 主要是由于红壤母质如第四纪红粘土中磷的含量低, 同时酸性环境易使磷与铁、铝和钙等形成磷酸盐络合物等原因造成的^[5]。淹水后土壤中闭蓄态磷的有效性大大提高, 因此, 淹水种植水稻磷素营养不成为突出问题。但水稻旱作后其土壤磷素的有效性大大降低, 土壤有效磷的供应不足往往成为限制旱作水稻产量的重要因子之一^[6~8]。因此, 研究不同土壤水分含量和供磷水平条件下旱作水稻的生物量和吸磷能力以及土壤有效磷的状况, 对揭示红壤水分与磷素的交互作用以及为南方丘陵地区推广地面秸秆覆盖和水稻旱作的合理的磷素管理提供理论依据具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试土壤于 2000 年 11 月采自中国科学院红壤生态试验站, 为第四纪红粘土发育的栽种 10 a 水稻后所形成的轻度发育的水稻土, 在作物收获后采集的表层 0~15 cm 土壤, 样品风干后剔除动植物残体和石块等, 磨细过 0.5 mm 筛备用。

1.2 试验设计

实验分为水稻盆栽试验(大钵: $\pm 7.0 \text{ kg pot}^{-1}$, 全生育期试验; 小钵: $\pm 2.5 \text{ kg pot}^{-1}$; 施磷量(P)分为 0、0.0075、0.015 和 0.030 g kg^{-1} 土四个水平)和大田试验(小区面积为 $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 施磷量(P)分为 0、2.625、5.250 和 $10.500 \text{ g plot}^{-1}$ 四个水平)两部分。四种磷水平分别称为无磷(P₀)、低磷(P₁)、中磷(P₂)和高磷(P₃)。所用磷肥盆栽实验为 KH_2PO_4 , 大田实验为过磷酸钙, 含磷量(P₂O₅)为 16%。土壤水分含量设置为土壤饱和持水量的 60%、80% 和 100%, 分别称为低水(W₁)、中水(W₂)和高水(W₃)。所有试验均施等量的 N 和 K, 即 100 mg kg^{-1} 土。供试肥料为尿素、氯化钾和分析纯的磷酸二氢钾(KH_2PO_4)。

* 中国科学院知识创新项目(KZCX2-413, ISSASIP0201)资助

作者简介: 何园球(1955~), 男, 博士, 研究员, 长期从事农业生态学方面的研究。Tel: 025 86881532, E-mail: yqhe@issas.ac.cn

收稿日期: 2004-06-18; 收到修改稿日期: 2004-12-26

1.3 试验管理

供试水稻品种为当地高产优质的赣优 2 号, 盆栽实验于 2001 年 5 月 10 日播种, 大钵共 45 盆为全生育期实验, 每钵播种 4 穴, 每穴两粒种子, 小钵共 90 盆分为两组, 每钵播种 3 穴, 每穴两粒种子; 其中 45 盆出苗后 30 d 时取出, 其他 60 d 时取出。大田于 2001 年 7 月 17 日播种, 成熟时收割, 每小区播种 120 穴, 每穴两粒种子, 水稻生长到两片叶时每穴只保留一株幼苗; 各实验在播种后均用稻草覆盖表土。每个处理均为 3 次重复, 同时, 加了一组无作物处理作为对照; 根据上述饱和持水量, 每天加水一次(盆栽试验用精度为 0.1 g 的天平称重, 大田则安装中国科学院南京土壤研究所生产的测水笔)。盆栽实验在玻璃温室里进行, 大田实验不同水分水平的小区用深度 1 m 的尼龙布隔离, 相同水平内用深度为 0.3 m 的尼龙布隔离。

1.4 采样与分析方法

实验期间共采样 3 次: 水稻出苗后 30 d 进行第

一次采样, 60 d 第二次采样, 收获时(120 d)第三次采样。水稻样品取出后, 仔细地洗净水稻根上的泥土, 然后把茎和根分离, 用蒸馏水冲洗干净, 在 70℃ 的条件下保持 24 h, 记录水稻根和茎的烘干重。采用酸溶-钼锑抗比色法(波长 700 nm)测定植株全磷, 操作方法按土壤农业化学分析方法进行^[9]。用 DPS 2.0 进行数据统计分析。

2 结 果

2.1 盆栽条件下水和磷对旱作水稻磷素吸收的影响

2.1.1 水分对旱作水稻磷素吸收的影响 表 1 说明, 当施磷量为中磷时, 土壤水分对旱作水稻根、茎、籽粒和全株的全磷吸收量没有显著影响, 但在量上存在差异: 根和茎中全磷吸收量随土壤持水量的增加而下降, 籽粒和全株总吸收磷量以中水时最高。

表 1 中磷(P, 0.015 g kg⁻¹)条件下土壤水分对旱作水稻吸磷量的影响

Table 1 Effect of soil moisture on P uptake of rice growing in soils different in water regimes and medium in P application rate

水稻生长时间 Rice growth (d)	土壤含水量 Soil moisture(%)	根 Root (P, mg pot ⁻¹)	茎 Shoot (P, mg pot ⁻¹)	籽粒 Grain (P, mg pot ⁻¹)	总磷 Total P (P, mg pot ⁻¹)
30	W ₁ (60)	0.67a	4.19a		4.86a
	W ₂ (80)	0.89a	4.72a		5.61a
	W ₃ (100)	0.59a	3.11a		3.70a
60	W ₁ (60)	2.99c	11.79a		14.78a
	W ₂ (80)	4.80b	10.18a		14.98a
	W ₃ (100)	5.84a	11.39a		17.23a
120	W ₁ (60)	8.17a	12.04a	28.83a	49.04a
	W ₂ (80)	8.27a	10.95a	34.69a	53.91a
	W ₃ (100)	7.40a	10.73a	30.05a	48.18a

注: 同一列内不同字母表示差异显著水平达 0.05, 下表同 Note: Within each column, values followed by the same letter are not significantly different at 0.05 level, so is it in the following tables

同时, 从表 1 中还可看到: 旱作水稻的全磷吸收量(P)随着水稻的生长而增加: 0~30 d、31~60 d 和 61~120 d 根的平均值分别为 0.72、4.54 和 7.95 mg pot⁻¹; 茎的平均值分别为 4.01、11.12 和 11.24 mg pot⁻¹; 而全株的平均值分别为 4.72、15.66 和 50.38 mg pot⁻¹; 说明水稻播种后前 30 d 吸收磷量少, 30 d 以后吸收量大, 茎的吸收量比根要大得多。土壤含水量对水稻全磷吸收量影响较小, 根在低水时全磷吸收量(P)平均为 3.94 mg pot⁻¹, 中水时为 4.65 mg pot⁻¹, 高水时为 4.61 mg pot⁻¹, 说明在中磷

条件下, 就平均值而言, 不同土壤含水量间对水稻根中全磷的吸收量影响较小, 但在各个生育时期的影响则较大, 总的来说, 以中水>高水>低水; 茎在低水时全磷吸收量(P)平均为 9.34 mg pot⁻¹, 中水时为 8.62 mg pot⁻¹, 高水时为 8.41 mg pot⁻¹, 说明在中磷条件下, 不同土壤含水量间对水稻茎中全磷吸收量影响很小, 以低水>中水>高水; 籽粒中全磷吸收量以中水>高水>低水。水稻各部分全磷平均吸收量则以籽粒>茎>根; 这说明水对旱作水稻全磷吸收量的影响在生育后期最大, 对各部分的影响以根>

籽粒> 茎。

水分过低时,根与茎秆竞争水分而影响水稻的发育;水分过多时,土壤由氧化转为还原状况,一方面使 Fe^{3+} 还原成溶解度更高的 Fe^{2+} ,部分被氢氧化铁所吸持的闭蓄态磷得以释放,这在淹水初期表现更为明显^[10-13],随着淹水时间的增加,土壤磷的释放有所增加,土壤对磷的吸持能力有所减少,但当作物进入生长旺盛期,作物对土壤中磷的吸收也在逐渐增加^[14-16]。另一方面,土壤处于还原状态不利于根的发育。而土壤含水量为饱和持水量的 80% 时能使土壤保持良好的通气状况,有利于养分的转化和供给,使水肥间发挥良好的协同效应。水稻进入生殖生长后,吸收水分和养分能力差,养分不断向籽粒中转移,因而水稻根茎中磷的含量低,但由于巨大的生物量而使磷的吸收量增加,这与 Zhu 等^[17]、

Mackaky 等^[18]、Vvadas 等^[19] 的研究结果基本一致。因此,在旱作水稻生育后期要保持中水,同时也要注意秸秆还田并补充适量的磷肥以保持土壤肥力在稳定的水平。

2.1.2 供磷水平对旱作水稻磷素吸收的影响 当土壤含水量为中水时,水稻生长时间和施磷量对旱作水稻的全磷吸收量有极显著的影响。根、茎、籽粒各部分的全磷吸收量均随水稻的生长和施磷量的增加而增加,不同生长阶段的全磷吸收量以生长后期> 中期> 前期;不同部位以籽粒> 茎> 根;不同施磷量以施磷与不施磷间全磷吸收量差异最大,不同施磷量间差异较小。对根而言,施磷与不施磷间差异极显著,不同施磷量间差异不显著;对茎而言,低磷与中磷间没有显著差异,中低磷与高磷间差异显著;对产量和全株而言,不同施磷量均有显著差异(表 2)。

表 2 中水(饱和持水量的 80%)条件下施磷量对旱作水稻吸磷量的影响

Table 2 Effect of P application rates on P uptake by rice grown in aerobic soil medium in soil moisture

水稻生长时间 Rice growth (d)	施磷量 P application (P, g kg ⁻¹ soil)	根 Root (P, mg pot ⁻¹)	茎 Shoot (P, mg pot ⁻¹)	籽粒 Grain (P, mg pot ⁻¹)	总磷 Total P (P, mg pot ⁻¹)
30	P ₀ (0)	0.17c	0.42c		0.59c
	P ₁ (0.0075)	0.70b	3.02b		3.72b
	P ₂ (0.015)	0.89ab	4.72b		5.61b
	P ₃ (0.030)	1.27a	6.58a		7.85a
60	P ₀ (0)	1.09b	1.80c		2.89c
	P ₁ (0.0075)	5.03a	8.35b		13.38b
	P ₂ (0.015)	4.80a	10.18b		14.98b
	P ₃ (0.030)	5.22a	12.79a		18.01a
120	P ₀ (0)	3.90b	4.67c	7.60d	16.17d
	P ₁ (0.0075)	7.95a	9.35b	20.06c	37.36c
	P ₂ (0.015)	8.27a	10.95ab	34.69b	53.91b
	P ₃ (0.030)	8.78a	12.02a	48.76a	69.56a

同时,从表 2 中还可以看出下列几点:旱作水稻的全磷吸收量(P)随着水稻的生长而增加:0~ 30 d、31~ 60 d 和 61~ 120 d 根的平均值分别为 0.72、4.04 和 7.23 mg pot⁻¹;茎的平均值分别为 3.68、8.28 和 9.25 mg pot⁻¹;而全株的平均值分别为 4.44、12.32 和 44.38 mg pot⁻¹;说明水稻播种后前 30 d 吸收磷量少,30 d 以后吸收量大,茎的吸收量比根要大得多。土壤施磷量对水稻全磷吸收量影响较大:根在无磷时全磷平均吸收量(P)为 1.72 mg pot⁻¹,低磷时平均为 4.56 mg pot⁻¹,中磷时为 4.65 mg pot⁻¹,高磷时为

5.09 mg pot⁻¹,说明在中水条件下,随着施磷量的增加水稻根中全磷吸收量增加,但无磷与低磷间增加的幅度最大,不同施磷量间幅度较小;茎在无磷时全磷吸收量(P)平均为 2.30 mg pot⁻¹,低磷时为 6.91 mg pot⁻¹,中磷时为 8.62 mg pot⁻¹,高磷时为 10.46 mg pot⁻¹,说明在中水条件下,随着施磷量的增加水稻茎中全磷吸收量增加,且不同施磷量间差异较大;籽粒中全磷吸收量随着施磷量的增加而增加。水稻各部分全磷平均吸收量则以籽粒> 茎> 根。这说明磷对旱作水稻全磷吸收量的影响在生育后期最大,

对各部分的影响以籽粒> 茎> 根。

这是因为水稻苗期根系不发达, 对磷的吸收力不强, 中后期水稻生长旺盛, 尽管土壤中磷含量较低, 但由于发达的根系对磷的吸收能力强, 因而施磷量的高低对水稻根系生物量影响不大, 但对茎秆和籽粒的影响较大, 随着施磷量的增加在满足根的发育后使茎秆的生长更加旺盛, 因而水稻的生物量就高。这与在中国干旱地区的一些研究结果完全一致^[20~25]。因此, 在旱作水稻生育后期要保持有足量的磷肥供应, 以提高旱作水稻的产量并保持土壤肥力在稳定的水平。

2.1.3 水和磷交互对旱作水稻磷素吸收的影响

表3说明, 在水稻生长的前 30 d, 土壤水分和磷对根和茎的全磷吸收有显著的影响, 但二者间的交互作用不显著; 在 31~ 60 d, 土壤水分对根和茎的全磷

吸收量没有显著的影响, 而磷则影响显著, 水和磷对根的交互作用显著, 对茎则不显著; 在 61~ 120 d, 水对旱作水稻根、茎和籽粒的全磷吸收量的影响均不显著, 磷则有显著的影响, 但二者间的交互作用极显著。水磷对旱作水稻不同部分吸磷量的交互作用以籽粒> 茎> 根。这是因为水、肥间存在协同效应, 一定量的水分和充足的磷加速了水稻的营养生长和生物量的快速积累, 但过多的水分“稀释”了水稻根茎中的养分, 而过多的磷又促进水稻对磷的吸收。此外, 磷在提高产量的同时对提高作物的抗旱能力, 提高土壤水分的利用效率有明显的效果, 而不同的水分水平对矿质养分在土壤和作物体内的运移有重要的促进作用。这与汪德水^[23]、赵彦锋等^[26]、He 等^[27]和 Wang 等^[28]的研究结果基本一致。

表 3 水分和施磷量对旱作水稻中全磷吸收量的影响

Table 3 Effect of soil water and P fertilization on P uptake of rice cultivated in aerobic soil in the pot experiment

变异分析 Variances analysis	30 d		60 d		120 d		
	根	茎	根	茎	根	茎	籽粒
	Root	Shoot	Root	Shoot	Root	Shoot	Grain
施磷量 P Supply (P)	< 0.01 ¹⁾	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.01	< 0.01
水分水平 Water (W)	< 0.05	< 0.05	0.05	0.99	0.16	0.34	0.14
水磷交互作用 P×W	0.09	0.14	< 0.01	0.05	< 0.01	< 0.01	< 0.01

1) 表示用新复极差测验多重比较(Duncan's) $p < 0.01$ 水平无显著性差异 Means that the differences between the treatments are less than Duncan's values

总体来说, 旱作水稻根茎中全磷吸收量随施磷量的增加而增加, 但生长前期以中水时最高, 中后期以中高水时最高; 磷吸收量以生长后期> 中期> 前期; 无磷处理与有磷处理间全磷吸收量差异最大, 不同施磷量处理间差异较小。旱作水稻种子中全磷吸收量随施磷量的增加而增加, 随土壤含水量的降低而下降。这说明, 在水稻生长的前、中期要使土壤保持中水水平, 中后期要保持中高水水平, 同时, 要保持较高的磷肥供应以满足前期的营养生长和后期种子生育的需求。

2.2 大田条件下水和磷对旱作水稻磷素吸收的影响

2.2.1 水分对旱作水稻磷素吸收的影响 表4说明, 当施磷量为中磷时, 土壤水分对旱作水稻根、茎中全磷吸收量有显著的影响, 而对籽粒和全株则没有显著影响, 总的吸磷量以中水> 高水> 低水; 以籽粒> 茎> 根。说明在中磷条件下中水最有利于水稻对磷的吸收。因此, 旱作水稻生育前期要保持较好的水分状况, 生育后期要保持中水和足量的磷肥供应。

表 4 施磷量为中磷(P, 5.250 g plot⁻¹) 条件下土壤水分对旱作水稻吸磷量的影响

Table 4 Effect of soil moisture on P uptake of rice growing in aerobic soil different in water regimes and medium in P application rate

土壤含水量 Soil moisture (%)	根 Root (P, mg plot ⁻¹)	茎 Shoot (P, mg plot ⁻¹)	籽粒 Grain (P, mg plot ⁻¹)	总磷 Total P (P, mg plot ⁻¹)
W ₁ (60)	405.7b	1.709b	3.379a	5.494a
W ₂ (80)	490.8a	2.170a	3.777a	6.438a
W ₃ (100)	474.4a	1.994ab	3.388a	5.856a

2.2.2 供磷水平对旱作水稻磷素吸收的影响

当土壤含水量为中水时,施磷量对旱作水稻的全磷吸收量产生极显著的影响,但对茎而言,高磷与其他磷之间差异极显著,无磷、低磷和中磷间差异不显

著。各部分的全磷吸收量均随施磷量的增加而增加,但以高磷条件下差异最大。总的吸磷量以籽粒 > 茎 > 根。说明多施磷肥对提高旱作水稻的产量有重要的作用(表5)。

表5 中水(饱和持水量的80%)条件下施磷量对旱作水稻吸磷量的影响

Table 5 Effect of P application rates on P uptake by rice growing in aerobic soil medium in soil moisture

施磷量 P applied (P, g kg ⁻¹ soil)	根 Root (P, mg plot ⁻¹)	茎 Shoot (P, mg plot ⁻¹)	籽粒 Grain (P, mg plot ⁻¹)	总磷 Total P (P, mg plot ⁻¹)
P ₀ (0)	351.9d	2.037b	3.378c	5.767c
P ₁ (0.0075)	414.7c	2.137b	3.715bc	6.267bc
P ₂ (0.015)	490.8b	2.170b	3.777b	6.438b
P ₃ (0.030)	593.3a	2.620a	5.039a	8.252a

2.2.3 水和磷交互对旱作水稻磷素吸收的影响

表6说明水和磷对大田旱作水稻全磷吸收量交互作用的影响。土壤含水量和施磷量(除施磷量对根的含磷量产生极显著影响外)各自对旱作水稻根、茎和籽粒中全磷吸收量的影响不显著,但二者间的交互作用极显著,因而其吸收量的差异主要体现为水和磷的复合效应。

水磷对旱作水稻全磷吸收量的影响,在盆栽和大田实验中存在一定的差异。这主要是因为在大田中旱作水稻的根系较发达,能充分吸收土壤中的水分和磷,促进旱作水稻早期根系的快速发育和生长,中后期发达的根系就能充分吸收土壤中的磷,盆栽中旱作水稻的根系因受土壤数量的限制,水稻的生长只能依赖磷肥的加入。

表6 大田条件下水分和施磷量对旱作水稻中全磷吸收的影响

Table 6 Effect of soil water and P fertilization on P uptake of rice cultivated in aerobic soil in the field experiment

变异分析 Variances analysis	根 Root	茎 Shoot	籽粒 Grain
施磷量 P Supply (P)	< 0.01 ¹⁾	0.18	0.06
水分水平 Water (W)	0.13	0.93	0.77
水磷交互作用 P×W	< 0.01	< 0.01	< 0.01

1) 表示用新复极差测验多重比较(Duncan's) $p < 0.01$ 水平无显著性差异 Means that the differences between the treatments are less than Duncan's values

3 结论

1) 水和磷间的交互作用:水和磷对大田旱作水稻全磷吸收量有一定影响,但影响不显著;对盆栽而言,水不显著磷则显著;但二者间的交互作用明显,因而其差异主要体现为水和磷的复合效应。

2) 水和磷对旱作水稻磷素吸收的影响:在中磷条件下,水分对旱作水稻磷素吸收的影响盆栽条件下以中水 > 高水 > 低水;大田条件下,根茎中全磷吸收随着土壤含水量的下降而下降,籽粒中则相反,吸磷量以中水 > 高水 > 低水。在中水条件下,随着施磷量的增加水稻全磷吸收量增加,但无磷与低磷间增加的幅度最大,不同施磷量间幅度较小。旱作水

稻各部分全磷平均吸收量以籽粒 > 茎 > 根。

3) 旱作水稻生育前期要保持较好的水分状况,中后期对水分的要求较低要控制水分;磷肥可作基肥全部施入,以满足茎秆前期和中期的发育,使更多的磷转移到水稻籽粒中并获得更高的产量。同时,要注意秸秆中还田,使大部分磷保留在土壤中。

结果表明,旱作水稻适合在有一定水源的红壤丘岗地区种植,在保证80%的饱和持水量的常规氮和钾等养分投入条件下,施磷量(P)为45~90 kg hm⁻²就能获得较好的水稻籽粒产量。

参考文献

- [1] Kramer P J S. Water Relations of Plants and Soil. San Diego, CA: Academic Press, 1995

- [2] 钱晓晴, 沈其荣, 徐勇. 不同水分管理方式下水稻的水分利用效率与产量. 应用生态学报, 2003, 14(3): 399~ 404. Qian X Q, Shen Q R, Xu Y. Water utilization efficiency and yield of paddy under different water managements (In Chinese). Chin. J. Appl. Ecol. , 2003, 14(3): 399~ 404
- [3] 石英, 沈其荣, 茆泽圣, 等. 旱作条件下水稻的生物效应及表层覆盖对它的影响. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 47~ 53. Shi Y, Shen Q R, Mao Z S, *et al.* Biological response of rice crop cultivated on upland soil condition and the effect of mulching on it (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(3): 47~ 53
- [4] 崔国贤, 沈其荣, 崔国清, 等. 水稻旱作及对旱作环境的适应性研究进展. 作物研究, 2002, 3: 70~ 76. Cui G X, Shen Q R, Cui G Q, *et al.* Study on rice crop dry farming and its adaptability to aerobic environment (In Chinese). Crop Research, 2002, 3: 70~ 76
- [5] 鲁如坤, 时正元, 钱承梁. 土壤积累态磷研究 III. 几种典型土壤中积累态磷的形态特征及其有效性. 土壤, 1997, 29(2): 57~ 61. Lu R K, Shi Z Y, Qian C L. Study on unused phosphorus in soil III. Conformation characteristics and validity of unused phosphorus in several kinds of representative soil (In Chinese). Soils, 1997, 29(2): 57~ 61
- [6] De Varennes A, de Melo Abreu J P, Ferreira M E. Predicting the concentration and uptake of nitrogen, phosphorus and potassium by field grown green beans under non limiting conditions. European Journal of Agronomy, 2002, 17: 63~ 72
- [7] Willet I R, Higgins M L. Phosphorus sorption by reduced and re oxidized rice soils. Aust. J. Soils Res. , 1978, 16: 319~ 326
- [8] Jugujinda A, Kraipanond A, Patrick Jr W H. Influence of extractable iron, aluminum and management on P sorption in flooded acid sulfate soils. Biol. Fer. Soils, 1995, 20: 118~ 124
- [9] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业出版社, 2000. 314~ 315. Lu R K. ed. Analytic Method of Soil and the Agriculture Chemistry (In Chinese). Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000. 314~ 315
- [10] Stran L, Owen A G, Douglas L, *et al.* Organic acid mediated P mobilization in the rhizosphere and uptake by maize roots. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34: 703~ 710
- [11] Patrizia Z, Pierluigi G, Daniele A. The role of manure the management of phosphorus resources at an Italian crop live stock production fam. Agriculture Ecosystem and Environment, 1997, 66: 231~ 239
- [12] Gutierrez boem F, Thomas G W. Phosphorus nutrition and water deficits in field grown soybeans. Plant and Soil, 1999, 207: 91~ 95
- [13] Matar A, Torrent J. Soil and fertilizer phosphorous and crop response in the dry land Mediterranean Zone. Adv. Soil Sci. , 1992, 18: 81~ 135
- [14] Bryla D R, Duniway J M. Growth, phosphorus uptake and water relations of sunflower and wheat infected with an arbuscular mycorrhizal fungus. New Phytol. , 1997, 136: 581~ 589
- [15] 何园球, 沈其荣, 王兴祥, 等. 不同水分和施磷量对旱作水稻耗水量和水分利用率的影响. 土壤学报, 2003, 40(6): 901~ 907. He Y Q, Shen Q R, Wang X X, *et al.* Effect of soil moisture and phosphorus supply on water consumption and water use efficiency by paddy rice cultivated in aerobic soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(6): 901~ 907
- [16] 鲁如坤等著. 土壤植物营养学原理和施肥. 北京: 化学工业出版社, 1998. Lu R K, *et al.* Soil-plant Nutrition Theory and Fertilization (In Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 1998
- [17] Zhu Y G, He Y Q, Smith S E, *et al.* Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) has high capacity to take up phosphorus (P) from a calcium (Ca)-bound source. Plant and Soil, 2002, 239: 1~ 8
- [18] Mackay AD, Barber S A. Soil moisture effects on root growth and phosphorus uptake by corn. Agron. J. , 1985, 77: 967~ 976
- [19] Vvadas P A, Sims J T. Phosphorus sorption in matured Atlantic coastal plain soils under flooded and drained conditions. J. Environ. Qual. , 1999, 28: 1 870~ 1 877
- [20] 石岩, 林琪, 李素美, 等. 土壤水分胁迫对小麦养分分配及产量的影响. 植物营养与肥料学报. 1998, 4(1): 50~ 56. Shi Y, Lin Q, Li S M, *et al.* Effect of soil water stress on nutrient distribution and yield of wheat (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(1): 50~ 56
- [21] 程宪国, 汪德水, 张美荣, 等. 不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响. 中国农业科学, 1996, 29(4): 67~ 74. Cheng X G, Wang D S, Zhang M R, *et al.* Effects of different soil moisture conditions on winter wheat growth and nutrient uptake (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 1996, 29(4): 67~ 74
- [22] 山仑, 陈培元主编. 旱地农业生理生态基础. 北京: 科学出版社, 1998. 222~ 232. Shan L, Chen P Y. ed. Base on Physiological and Ecological Agriculture (In Chinese). Beijing: Science Press, 1998. 222~ 232
- [23] 汪德水主编. 旱地农田水肥协同效应与耦合模式. 北京: 气象出版社, 1999. 145~ 148. Wang D S. ed. Cooperated Effect and Interactive Model Between Water and Nutrient in Upland Field (In Chinese). Beijing: Meteorologic Press, 1999. 145~ 148
- [24] 康绍忠, 梁银丽, 蔡焕杰, 等著. 旱区水土-作物关系及其最优调控原理. 北京: 中国农业出版社, 1998. 123~ 125. Kang S Z, Liang Y L, Cai H J, *et al.* The Relation of Water soil plant and Its Optimization Theory of Adaptation and Control in Drought Area (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1998. 123~ 125
- [25] 梁银丽, 康绍忠. 限量灌水和磷营养对冬小麦产量及水分利用效率的影响. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 61~ 68. Liang Y L, Kang S Z. Effect of irrigating limited and phosphorus supplied on yield and water use of winter wheat (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 3(1): 61~ 68
- [26] 赵彦锋, 吴克宁, 李玲, 等. 玉米苗期调亏水与磷协同效应研究. 河南农业科学, 2002, 2: 4~ 7. Zhao Y F, Wu K N, Li L, *et al.* The effect of the combination of RDI and fertilizer phosphorus on maize in seedling stage (In Chinese). Agriculture Sciences of Heran, 2002, 2: 4~ 7
- [27] He Y Q, Zhu Y G, Smith S E, *et al.* Interactions between soil moisture content and phosphorus supply in spring wheat plants grown in pot culture. Journal of Plant Nutrition, 2001, 25(4): 913~ 925
- [28] Wang H Y, Zhou J M, Chen X Q, *et al.* Interaction of NPK fertilizers during their transformation in soils: III. Transformations of monocalcium phosphate. Pedosphere, 2004, 14(3): 379~ 386

EFFECT OF SOIL MOISTURE CONTENT AND PHOSPHORUS APPLICATION ON PHOSPHORUS UPTAKE BY RICE CULTIVATED IN AEROBIC SOIL

He Yuanqiu¹ Li Chengliang¹ Wang Xingxiang¹ Xiong Yousheng¹ Shen Qirong²

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract Pot experiments in a glasshouse and field experiments were conducted to investigate effects of soil moisture content and phosphorus (P) supply on total P uptake by rice cultivated in aerobic soil. Results showed that soil moisture and P application did not affect significantly total P uptake by rice cultivated in aerobic soil in the field experiment. But in the pot experiments, P application increased significantly P uptake by the rice plants, though the effect of soil moisture was not significant. A big interaction between soil moisture and P application was founded. And, thus, the highest P uptake by the rice plants was found in the treatment with 0.0300 g kg⁻¹ of P application rate and 80% in saturated water content. The biggest difference of total P uptake by the rice plants was observed between the application and no application of P under 80% of soil saturated water content and the difference of P uptake by the rice plants between different P application rates was less. Distribution of the P taken up by the rice plants, was in the following order: grain > shoot > root. The results obtained in this experiment could serve as a theoretic basis for water and P management of rice cultivated in aerobic soil in the hilly areas of Southern China.

Key words Soil moisture; P application rate; Rice cultivated in aerobic soil; Phosphorus nutrition