



红壤性水稻土无机磷形态周年内变化及与磷肥利用率的关系

黄 晶^{1, 2}, 周玲红³, 高菊生^{1, 2}, 李冬初^{1, 2}, 刘立生^{1, 2},
邹 平⁴, 刘淑军^{1, 2*}, 张会民^{1, 2*}

(1. 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室 / 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 中国农业科学院衡阳红壤实验站 / 湖南祁阳农田生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南 祁阳 426128; 3. 衡阳市石鼓区农业农村局, 湖南 衡阳 421001; 4. 衡阳县农业农村局, 湖南 衡阳 421200)

摘 要: 红壤区稻田土壤磷素有效供应是保障水稻丰产的关键, 土壤磷素有效性与磷形态转化密切相关, 但目前对于不同施肥下双季稻关键生育期无机磷形态的变化及其与水稻磷肥利用效率的关系仍不明确。基于 1982 年开始的有机肥和化肥配施定位试验, 选择不施肥对照 (CK)、单施有机肥 (M)、单施化肥氮磷钾 (NPK) 和有机肥化肥配合施用 (NPKM) 处理, 监测双季稻关键生育期无机磷组分变化以及磷肥利用率, 并解析它们之间的相关性。结果表明, 不同生育时期各处理之间无机磷总量呈现显著差异 ($P < 0.05$), 表现为 $\text{NPKM} > \text{NPK} > \text{M} > \text{CK}$, 施肥后无机磷总量的变化主要发生在分蘖期和齐穗期。NPK 和 NPKM 处理在早、晚稻不同生育时期的 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 含量均显著高于 M 和 CK 处理 ($P < 0.05$), 各处理晚稻生长季的 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 平均含量高于早稻生长季, 增幅分别为 4.6% ~ 19.8%、0.2% ~ 8.6% 和 3.4% ~ 23.3%, 各处理晚稻季的 O-P 平均含量较早稻降低了 8.4% ~ 35.0%。不同施肥处理之间早稻和晚稻季各无机磷组分占无机磷总量的比例变化趋势相同, 各处理 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 含量占无机磷总量比例均值的大小顺序分别为 $\text{NPKM} > \text{NPK} > \text{M} > \text{CK}$ 、 $\text{M} > \text{CK} > \text{NPK} > \text{NPKM}$ 、 $\text{CK} > \text{M} > \text{NPK} > \text{NPKM}$ 和 $\text{CK} > \text{M} > \text{NPK} > \text{NPKM}$ 。早稻、晚稻的稻谷产量和地上部吸磷量均随着施肥而显著增加 ($P < 0.05$), MPKM 处理的稻谷产量和地上部吸磷量显著高于 NPK 和 M 处理 ($P < 0.05$), 增幅为 25.1% ~ 33.3%, 但不同施肥处理之间的磷肥利用率未呈显著差异。早稻营养生长期的 Al-P 和 Olsen-P 含量对早稻产量和吸磷量的相对重要性更突出; 晚稻则是营养生长期的 Fe-P、生殖生长期的 Al-P 对晚稻产量和吸磷量的相对重要性更突出。有机无机配施情况下需要通过优化磷肥用量, 并加强早稻和晚稻的分蘖期和齐穗期磷肥调控以提高磷肥利用效率。

关键词: 红壤性水稻土; 关键生育期; 无机磷形态; 磷肥利用率; 长期施肥

磷是农作物生长所必需的三大营养元素之一, 红壤区稻田土壤磷素缺乏是限制水稻丰产的主要因素。施用磷肥是水稻增产、稳产的重要农业措施, 也是影响土壤磷库状况及土壤供磷能力的重要因

素^[1]。由于磷在土壤中移动性差、扩散速率低、易被土壤固定, 磷肥的当季利用率只有 10% ~ 25%, 因此为保证作物产量, 人们往往施用超过作物需求量的磷肥以维持土壤肥力, 导致土壤中磷素的过量累积, 我国主要稻田土壤磷素年均磷盈余量为 35 kg/hm², 约占磷肥平均施用量的 44.2%, 且以南方稻区累积盈余量最高, 增大了磷素环境损失风险^[2]。中国磷矿有 75.6% 用于制造磷肥, 而磷矿石是一种不可再生资源, 按照目前的磷矿石耗竭速度, 2050 年后, 中国的磷矿将会成为短缺资源, 直接威胁国家粮食安全^[3]。因此, 合理施磷和提高土壤磷素有效性是保障农业磷资源可持续利用的关键。

收稿日期: 2024-05-20; 录用日期: 2024-07-28

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (2022JJ30648, 2024JJ7621); 国家水稻产业技术体系 (CARS-01-88); 井冈山农高区省级科技专项揭榜挂帅项目 (20222-051246); 湖南省农业创新资金项目 (2023CX73)。

作者简介: 黄晶 (1983-), 副研究员, 博士, 主要从事土壤质量演变过程和提升技术的研究。E-mail: huangjing@caas.cn。

通讯作者: 刘淑军, E-mail: liushujun@caas.cn; 张会民, E-mail: zhanghuimin@caas.cn。

磷施入土壤后可很快通过土壤物理化学和生物反应转化为生物有效性较低的无机和有机态磷,能被植物或微生物直接吸收利用的可溶性磷仅占土壤总磷的小部分,土壤磷素有效性在很大程度上受磷形态及其化学行为所控制^[4]。土壤中的磷就其化学属性而言可分为有机磷和无机磷两大类,其中无机磷占总磷量的60%~80%,包括活性无机磷(Olsen-P)和吸附态无机磷(Fe、Al、Ca结合态以及闭蓄态磷)^[5],且不同形态无机磷的有效性差异很大。Fe-P和Al-P相对其他无机磷组分(Ca-P和O-P)对红壤性水稻土有效磷的贡献更大,长期施肥主要促进了O-P比例的降低和Al-P的增加^[6],土壤Al-P、Fe-P、Ca-P与水稻产量及土壤无机磷含量呈显著相关性^[7]。尽管磷素不同形态的有效性存在很大差异,但各形态磷处于互相转化的动态平衡之中^[5],长期施肥下不同磷形态年际间呈阶段性的变化特征^[8-10]。同时,在作物生长季节,土壤有机磷的矿化与积累同气候环境条件与作物生长过程有密切的关系,而生育期土壤有效磷含量又与作物对磷的吸收紧密相关。因为不同生育时期的作物根系通过一系列机制(释放分泌物、氧气、酶、有机质等物质)改变根际的物理化学性质和生物组成,进而影响土壤微生物量及土壤无机磷组分含量变化^[11]。红壤区双季稻由于早稻和晚稻生长季气温差别较大,使得两个时期的水稻吸磷量和土壤磷素有效性具有明显差异^[12],同时,大量研究表明,有机无机肥配施和常规施肥配合紫云英及稻草还田可以显著提高红壤区稻田磷素利用效率^[13-14]。但目前对于不同施肥下双季稻关键生育期无机磷形态的变化及其与水稻磷素利用效率的关系仍不明确。本研究基于1982年开始的有机肥和化肥配施定位试验,通过监测双季稻关键生育期无机磷组分变化,旨在明确:1)长期不同施肥后水稻生育期内土壤无机磷组分变化特征,2)水稻产量和磷肥利用率对不同生育期无机磷组分的响应关系,以期红壤区双季稻田磷素资源高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本长期定位试验开始于1982年,地点设在湖南省祁阳市文富市镇中国农业科学院红壤实验站内(26°45'42" N, 111°52'32" E),实验站海拔

150~170 m,地处中亚热带,年均气温18℃,≥10℃积温5600℃,多年平均降水量1255 mm,年均蒸发量1470 mm,无霜期约300 d,年均日照时数1610 h。土壤为第四纪红土母质发育的红壤性水稻土,试验开始前一直种植水稻,试验开始时0~20 cm土层土壤基本理化性状:pH 5.97,有机质19.8 g/kg,全氮1.5 g/kg,碱解氮158.0 mg/kg,全磷0.48 g/kg,有效磷9.6 mg/kg,全钾14.2 g/kg,速效钾65.9 mg/kg,无机磷总磷为292 mg/kg,Al-P、Fe-P、O-P和Ca-P含量分别为4、117、148和24 mg/kg。

1.2 试验方法

本研究选择4个处理:不施肥对照(CK);施用有机肥(M);施用化肥氮、磷、钾(NPK);化肥氮、磷、钾和有机肥配施(NPKM)。小区面积27 m²,重复3次,随机排列,各小区之间用水泥埂分隔。有机肥为腐熟牛粪(养分含量为多年测定平均值,含N 0.32%、P₂O₅ 0.25%、K₂O 0.15%),氮肥为尿素(N 46%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 12%),钾肥为氯化钾(K₂O 60%),所有肥料均作底肥一次性施入。种植制度为稻-稻-冬闲,水稻地上部均离田,早、晚稻施肥量一致,各处理肥料每季用量见表1。

表1 各处理每季水稻肥料施用量(kg/hm²)

处理	有机肥			化肥		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0	0	0	0	0	0
M	72.5	56.3	67.5	0	0	0
NPK	0	0	0	72.5	56.3	67.5
NPKM	72.5	56.3	67.5	72.5	56.3	67.5

1.3 样品采集和测定方法

分别于2020年早稻苗期(4月28日)、分蘖期(6月11日)、齐穗期(7月3日)、成熟期(7月27日),晚稻苗期(8月2日)、分蘖期(8月24日)、齐穗期(9月8日)、成熟期(10月20日)等关键生育时期,其中苗期和分蘖期划分为营养生长期,齐穗期和成熟期划分为生殖生长期,采集0~20 cm表层土样,各小区按“S”形取样法取4个点混合样,自然风干后分别过0.85和0.25 mm筛,用于土壤理化性质测定。土壤有效磷用Olsen法测定,无机磷组分按照化学分馏法逐步提取:依次用1 mol/L NH₄Cl和0.5 mol/L NH₄F

提取 Al-P, 1 mol/L NaOH 提取 Fe-P, 0.3 mol/L $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 提取 O-P, 0.25 mol/L H_2SO_4 提取 Ca-P^[15]。早稻和晚稻收获时, 各小区单打单晒, 测定稻谷产量, 同时采集水稻秸秆和籽粒样品, 烘干粉碎后, 全磷含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-钼锑抗比色法测定^[15]。

1.4 数据处理

由施肥处理和不施肥对照处理地上部吸磷量差值计算磷肥利用率^[16]。

$$\text{磷肥利用率}(\%) = \frac{\frac{\text{施肥处理地上部吸磷量} - \text{不施肥对照地上部吸磷量}}{\text{磷肥施用量}}}{\text{地上部吸磷量}} \times 100$$

地上部吸磷量为水稻籽粒与秸秆吸磷量的总和 (kg/hm^2), 磷肥施用量为各施肥处理化学磷肥和有机肥施入的总磷量 (kg/hm^2)。

采用 Origin 2023 对数据进行绘图和相关性分析, 运用 SPSS 19.0 对数据进行差异显著性检验 (LSD 法), 采用 R 语言中的 “Random Forest” 数据包计算营养生长和生殖生长阶段不同磷形态含量等指标影响水稻产量和磷吸收的相对重要性。

2 结果与分析

2.1 红壤性水稻土无机磷总量的变化特征

不同施肥措施下, 早、晚稻关键生育时期土壤无机磷总量变化趋势各异 (图 1)。CK、M、NPK

和 NPKM 处理的无机磷总量的变化范围分别为 192 ~ 244、224 ~ 291、352 ~ 597 和 577 ~ 763 mg/kg , 不同生育时期各处理之间无机磷总量呈现显著差异 ($P<0.05$), 大小表现为 $\text{NPKM}>\text{NPK}>\text{M}>\text{CK}$ 。早、晚稻各生育时期的无机磷总量平均值 NPKM 处理较 NPK、M 和 CK 处理分别高出 25.4%、142.8% 和 205.3%; NPK 处理较 M 和 CK 处理分别高出 93.6% 和 143.4%。早稻的无机磷总量随着生育期的推进逐步降低, 到成熟期有所上升, NPKM 和 M 处理苗期和成熟期的无机磷总量显著高于分蘖期和齐穗期 ($P<0.05$), NPK 处理的无机磷总量在各关键生育期没有显著差异。晚稻生长季, NPK 和 NPKM 处理先升后降, 总体呈下降趋势, 分蘖期无机磷总量显著高于苗期和成熟期 ($P<0.05$), M 处理的变化不显著, CK 处理总体呈下降趋势, 成熟期无机磷总量显著低于其他各时期 ($P<0.05$)。可见, 施肥后无机磷总量的变化主要发生在分蘖期和齐穗期。

2.2 红壤性水稻土无机磷组分含量和占比的变化特征

早、晚稻不同生育时期 NPK 和 NPKM 处理的 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 含量均显著高于 M 和 CK 处理 ($P<0.05$), 各处理晚稻生长季的 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 平均含量高于早稻生长季, 增幅分别为 4.6% ~ 19.8%、0.2% ~ 8.6% 和 3.4% ~ 23.3%, 各处理晚稻季的 O-P 平均含量较早稻降低了 8.4% ~ 35.0% (图 2)。

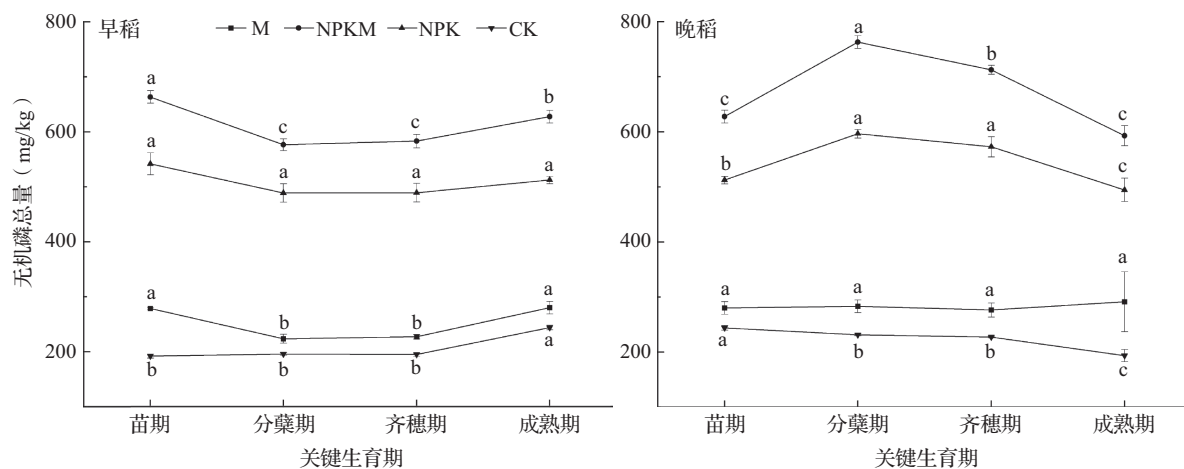


图 1 不同施肥处理早稻和晚稻土壤无机磷总量变化

注: 连线上不同小写字母表示同一处理不同生育期差异显著 ($P<0.05$)。

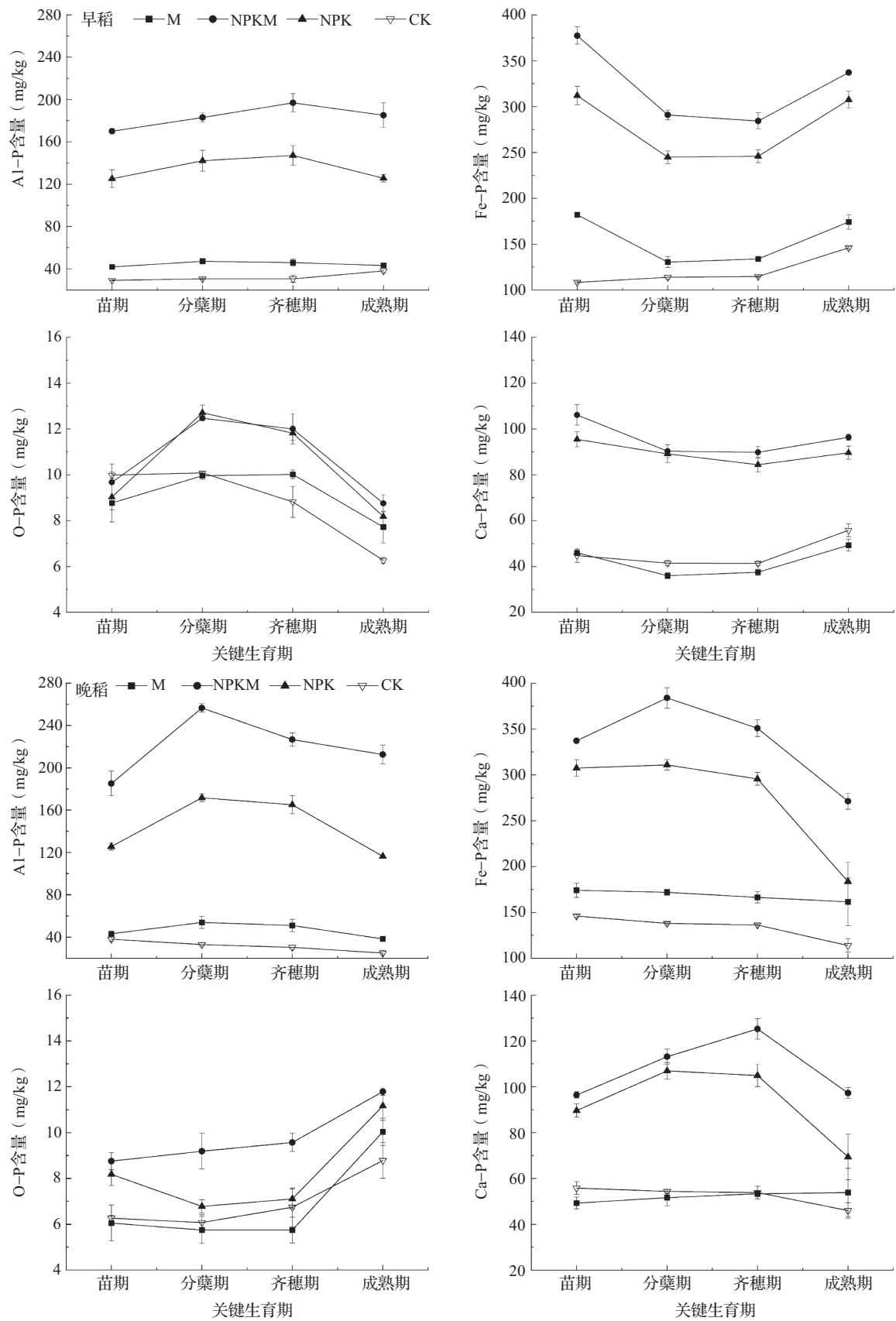


图2 不同施肥处理早稻和晚稻土壤无机磷组分变化



各无机磷组分在早稻和晚稻生育期的变化趋势呈现明显差异(图2)。早稻生长季,不同施肥处理的 Al-P 含量随着生育期的推进总体呈增加趋势;Fe-P 含量呈先降后升的变化趋势,M、NPK 和 NPKM 处理分蘖期和齐穗期的 Fe-P 含量显著低于苗期和成熟期($P<0.05$);CK 处理的 O-P 含量呈显著下降趋势($P<0.05$),M 处理不同生育期的 O-P 含量没有显著差异,NPK 和 NPKM 处理分蘖期和齐穗期的 O-P 含量显著高于苗期和成熟期($P<0.05$);不同施肥处理 Ca-P 含量均呈先降后增的趋势,M、NPK 和 NPKM 处理齐穗期的 Ca-P 含量显著低于苗期($P<0.05$)。

无机磷各组分在晚稻生长季的变化趋势和早稻有所不同。各处理 Al-P 含量随生育期呈先增后降的趋势,各处理分蘖期的 Al-P 含量显著高于成熟期($P<0.05$);从苗期到成熟期,各处理 Fe-P 含量总体呈降低趋势,除 M 处理外,其他处理成熟期的 Fe-P 含量均显著低于其他关键生育期($P<0.05$);各处理 O-P 含量随着生育期总体呈增加趋势,成熟期 O-P 含量均显著高于其他关键生育期($P<0.05$);M 和 CK 处理 Ca-P 含量在整个生育期变化幅度较小,NPK 和 NPKM 处理 Ca-P 含量分别在分蘖期和齐穗期达到最高水平,之后呈降低趋势,成熟期的 Ca-P 含量显著低于分蘖期和齐穗期($P<0.05$)。

不同施肥措施下各无机磷组分占无机磷总量的比例变化呈现明显差异(图3)。早稻季及晚稻季各处理 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 含量占无机磷总量比例均值的变化范围分别为 15.5% ~ 30.1%、52.5% ~ 61.2%、1.8% ~ 4.2% 和 15.6% ~ 22.1%,及 13.9% ~ 32.7%、49.8% ~ 60.0%、1.5% ~ 3.2% 和 16.1% ~ 23.4%。不同施肥处理之间早稻季和晚稻季各无机磷组分占无机磷总量的比例变化趋势相同,各处理 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 含量占无机磷总量比例均值的大小顺序分别为 NPKM>NPK>M>CK、M>CK>NPK>NPKM、CK>M>NPK>NPKM 和 CK>M>NPK>NPKM。M 和 NPKM 处理晚稻季的 Al-P 含量占无机磷总量的比例较早稻季分别增加 0.5 和 2.5 个百分点;NPK、M 和 NPKM 处理晚稻季 Fe-P 含量占无机磷总量的比例较早稻降低 0.2 ~ 2.7 个百分点;晚稻季所有处理的 O-P 含量占无机磷的比例均低于早稻季,降低了 0.2 ~ 1.0 个百分点,而 Ca-P 含量占无机磷的比例均高于早稻季,增加了 0.4 ~ 1.7 个百分点。

早稻季,不同处理 Al-P 含量占无机磷总量的比例均以苗期最低,随着生育期的推进呈先升后降的趋势,施肥处理(M、NPK 和 NPKM)齐穗期和分蘖期 Al-P 含量占无机磷总量的比例显著高于苗期($P<0.05$);不同处理 Fe-P 含量占无机磷总量的比例随着生育期的推进呈先降后升的趋势,施肥处理(M、NPK 和 NPKM)分蘖期和齐穗期 Fe-P 含量占无机磷总量的比例显著低于苗期($P<0.05$);施肥处理(M、NPK 和 NPKM)的 O-P 含量占无机磷总量的比例均以分蘖期最高、成熟期最低,分蘖期和齐穗期 O-P 含量占无机磷总量的比例显著高于苗期($P<0.05$);M、NPKM 和 CK 处理 Ca-P 占无机磷总量的比例在不同生育期没有产生显著变化。

晚稻季,施用有机肥的 M 和 NPKM 处理 Al-P 含量占无机磷总量的比例随着生育期的推进逐渐增加,其在成熟期的比例显著高于苗期($P<0.05$),CK 和 NPK 处理的变化趋势有所不同,以分蘖期和齐穗期的比例高于成熟期;施用有机肥的 M 和 NPKM 处理 Fe-P 含量占无机磷总量的比例随着生育期的推进逐渐降低,其在成熟期的比例显著低于苗期($P<0.05$),除分蘖期 NPK 处理外,CK 和 NPK 处理 Fe-P 含量占无机磷总量的比例在不同生育期没有显著变化;施用化肥的 NPK 和 NPKM 处理 O-P 占无机磷总量的比例随生育期的推进呈先降后升的趋势,成熟期的占比显著高于其他生育期($P<0.05$),除成熟期外,单施有机肥 M 处理 O-P 占无机磷总量的比例在各生育期之间没有显著差异;各处理 Ca-P 占无机磷总量的比例在不同生育期之间的变幅较小,均表现为齐穗期和成熟期的占比大于苗期和分蘖期,NPK 和 NPKM 处理齐穗期的占比显著高于苗期($P<0.05$),其他处理在各生育期的差异不显著。

2.3 水稻吸磷量和磷肥利用率与无机磷组分的关系

不同施肥措施下稻谷产量和地上部吸磷量呈显著差异(表2)。早稻、晚稻的稻谷产量和地上部吸磷量均随着施肥而显著增加($P<0.05$),MPKM 处理的稻谷产量和地上部吸磷量显著高于 NPK 或 M 处理($P<0.05$),增幅为 25.1% ~ 33.3%,M 和 NPK 处理之间的差异不显著。早稻季的磷肥利用率以 NPKM 处理最高,较 NPK 和 M 处理分别提高 10.3 和 4.3 个百分点;晚稻季的磷肥利用率以 NPK 处理最高,较 M 和 NPKM 处理分别提高 9.2 和 5.3

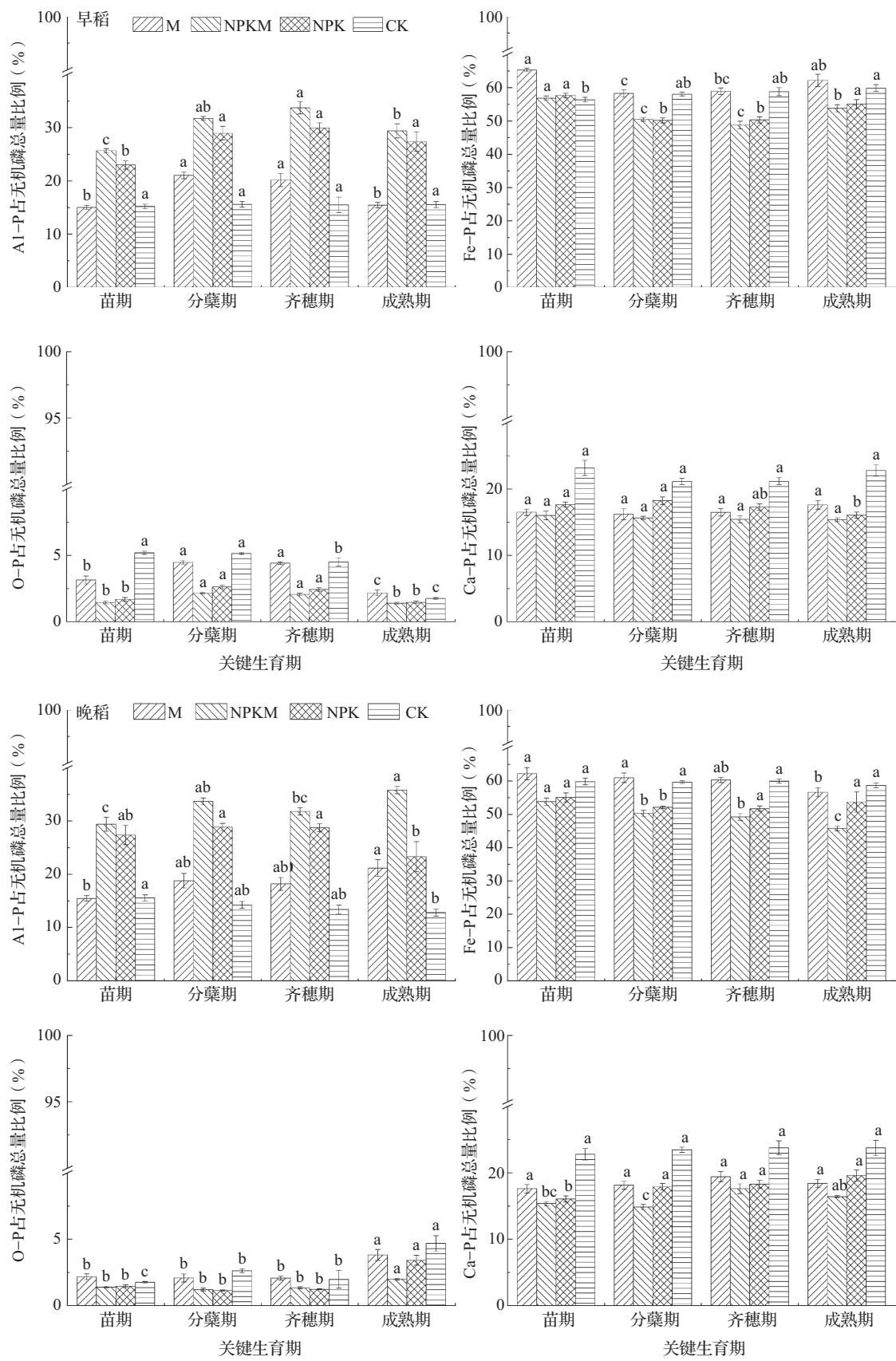


图3 不同施肥处理早稻和晚稻土壤无机磷组分占无机磷总量比例变化

注: 柱上不同小写字母表示同一处理不同生育期差异显著 ($P<0.05$)。

表 2 各处理 2020 年稻谷产量和磷肥利用率

处理	早稻			晚稻		
	稻谷产量 (kg/hm ²)	地上部吸磷量 (kg/hm ²)	磷肥利用率 (%)	稻谷产量 (kg/hm ²)	地上部吸磷量 (kg/hm ²)	磷肥利用率 (%)
CK	3352 ± 75c	12.4 ± 0.2c	—	3407 ± 43c	12.9 ± 0.2c	—
M	5037 ± 57b	19.8 ± 0.1b	30.0 ± 0.6a	4827 ± 101b	21.3 ± 1.9b	34.2 ± 7.7a
NPK	5259 ± 128b	18.3 ± 1.4b	24.0 ± 5.9a	4531 ± 118b	23.5 ± 1.8b	43.4 ± 7.1a
NPKM	6716 ± 178a	29.4 ± 0.8a	34.3 ± 1.6a	6037 ± 86a	31.7 ± 0.9a	38.1 ± 1.7a

注：不同小写字母表示处理间达到显著差异 ($P<0.05$)。

个百分点，但各处理间未呈显著差异水平。

2.4 无机磷组分和有效磷含量对水稻产量和吸磷量影响的因子分析

不同生育阶段有效磷和无机磷组分含量影响早、晚稻产量和吸磷量的相对重要性存在明显差异 (图 4)。早稻产量主要受营养生长阶段的

Al-P、Olsen-P、Fe-P 和生殖生长阶段的 Al-P 含量影响，4 个因素总的相对重要性达 72.3%，其中营养生长阶段的 Al-P 和 Olsen-P 相对重要性均超过 19.0% (图 4A)；早稻吸磷量主要受营养生长阶段的 Olsen-P、Al-P、生殖生长阶段的 Al-P 和营养生长阶段 Fe-P 含量影响，4 个因素总的相对

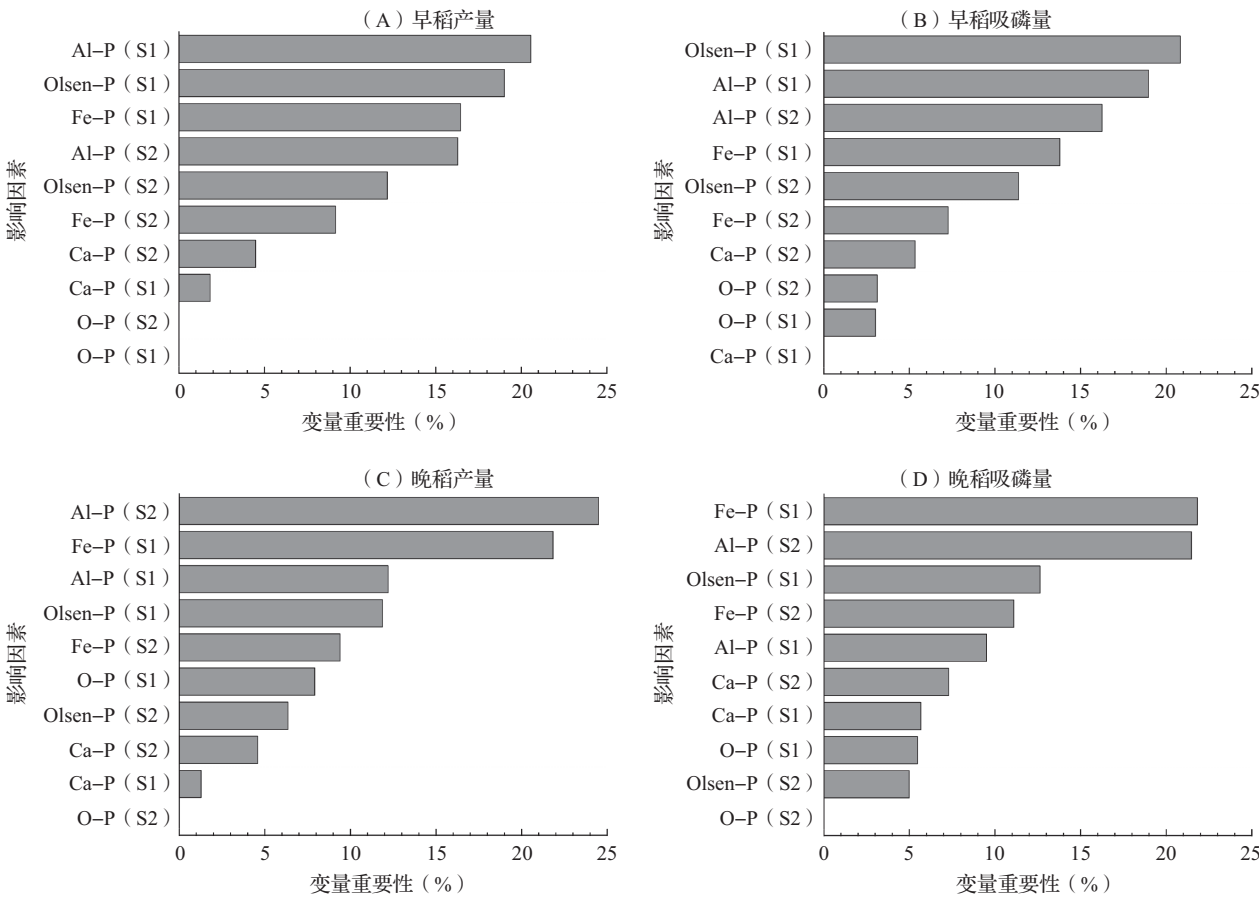


图 4 各因子影响水稻产量和吸磷量的相对重要性

注：Olsen-P (S1) 一营养生长期有效磷含量；Al-P (S1) 一营养生长期 Al-P 含量；Fe-P (S1) 一营养生长期 Fe-P 含量；O-P (S1) 一营养生长期 O-P 含量；Ca-P (S1) 一营养生长期 Ca-P 含量。Olsen-P (S2) 一生殖生长期有效磷含量；Al-P (S2) 一生殖生长期 Al-P 含量；Fe-P (S2) 一生殖生长期 Fe-P 含量；O-P (S2) 一生殖生长期 O-P 含量；Ca-P (S2) 一生殖生长期 Ca-P 含量。

重要性达 69.9%，其中营养生长阶段的 Olsen-P 和 Al-P 相对重要性均超过 19.0% (图 4B)。晚稻产量主要受生殖生长阶段的 Al-P、营养生长阶段的 Fe-P、Al-P 和 Olsen-P 含量影响，4 个因素总的相对重要性达 70.4%，其中生殖生长阶段的 Al-P 和营养生长阶段的 Fe-P 相对重要性均超过 20.0% (图 4C)；晚稻吸磷量主要受营养生长阶段的 Fe-P、生殖生长阶段的 Al-P、营养生长阶段的 Olsen-P 和生殖阶段的 Fe-P 含量影响，4 个因素总的相对重要性达 67.0%，其中营养生长阶段的 Fe-P 和生殖生长阶段的 Al-P 相对重要性均超过 20.0% (图 4D)。

3 讨论

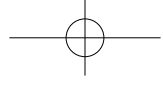
3.1 无机磷总量和无机磷组分含量变化对长期施肥的响应

38 年连续施肥后，化肥磷和有机肥磷配合施用比单施化肥或有机肥能够显著提高土壤无机磷总量 (图 1)，主要是由于 NPKM 处理的施磷量是 NPK 和 M 处理的 2 倍 (表 1)，随着施磷量的增加，水稻土各磷组分含量均呈上升趋势^[17]。等磷投入情况下，单施化肥较单施有机肥更能有效提高土壤无机磷总量 (图 1)。造成这种差异的原因是土壤中无机磷含量的变化取决于外源磷种类，化学磷肥对于土壤中无机磷积累比例的促进作用更大^[18]，有机肥中包含有机和无机磷化合物，其无机磷库的占比更大，且基本是可溶的，更容易被植物吸收利用，同时长期施用有机肥会降低对外源投入磷的吸附固定能力^[19-20]，所以长期单施有机肥后土壤无机磷总量相对较低。NPKM 处理较 NPK、M 处理，以及 NPK 处理较 M 处理，能够增加 Al-P 占无机磷总量的比例，同时降低 Fe-P、O-P 和 Ca-P 含量占无机磷总量的比例 (图 3)。在热带或亚热带酸性土壤中铁铝离子含量较高，磷素形态以 Fe/Al-P 为主^[10, 21]，施肥主要促进了 Al-P 比例的上升和 O-P 比例的降低，尤其是施用化学磷肥或化学磷肥与有机肥配施之后，促进作用更加明显，可能是因为土壤中的磷主要是与有机质或铁铝氧化物相结合^[22]。长期施用有机肥可以使土壤有机碳含量和非晶形 Fe、Al 含量 (特别是 Al_{ox}) 增加，从而增加土壤中磷的吸附位点^[23]，以促进土壤中 O-P 向 Al-P 和 Fe-P 转化。

早稻季无机磷总量随着生育时期推进逐步降低，成熟期有所增加。可能是由于早稻季长期淹水，到成熟期使土壤中无定形铁氧化物大大增加，而无定形铁氧化物中吸附磷的能力比其他铁氧化物高出近两个数量级^[24-25]。晚稻季无机磷总量先增加后降低，可能是因为前期作物的吸收逐步减少，至早稻成熟期水稻根系停止生长，温度升高，微生物活性增强，促进有机磷向无机磷的转化^[26]。在晚稻前期，前茬根系及植株残体腐解，矿化一部分又转化为无机磷，补充了耕层土壤无机磷库^[27]。同时由于土壤无机磷部分来自于有机磷矿化，矿化过程主要受土壤磷酸酶活性的影响，而磷酸酶活性易受温度和水分等土壤环境因子的影响^[12]，早稻和晚稻季温度差距大，以及田间水分管理的差异 (早稻长期淹水，晚稻干湿交替) 可能导致早稻和晚稻季无机磷组分变化趋势不同。

3.2 水稻产量和吸磷量与不同磷形态含量之间的相关关系

不同施肥处理的早稻和晚稻吸磷量均以 NPKM 处理最高，且各处理晚稻的吸磷量均高于早稻。长期有机无机配施能够提高水稻地上部磷累积量^[28-29]，晚稻生长季较早稻气温高、生育期更长，水稻磷素吸收量会显著增加^[12]。早稻、晚稻稻谷产量和吸磷量均与不同时期的有效磷含量呈极显著正相关，主要是由于提高土壤有效磷量，有利于促进磷素在水稻体内的吸收及转运^[30]。随机森林模型表明，Al-P、Fe-P 和 Olsen-P 含量是影响水稻产量和吸磷量相对重要性更大的因子 (图 4)，在稻田生态系统中，Al-P 和 Fe-P 是作物磷营养的主要来源，其含量相比于其他作物类型土壤更高^[31]，红壤性水稻土呈酸性，土壤矿物中的 Al 和 Fe 更易溶解并生成无定型的铝、铁氢氧化混合物供作物吸收^[32]。从苗期到分蘖期和齐穗期，随着水稻不断生长，施肥处理下 Al-P 所占无机磷总量比例增幅较大，尤其以化肥和有机肥配施处理表现更为明显。这进一步证实磷肥适当后移可增加水稻生育后期磷素含量、净吸收量和累积量，提高水稻产量和磷肥利用效率^[33]，已有研究也得出 NPKM 处理更有利于促进土壤无机磷组分中 O-P 向 Al-P 转化，提高土壤磷素有效性^[34]。因此建议通过采取有机肥和化肥配施，并加强水稻生育后期肥水管理，增加土壤无机磷中 Fe-P 和 Al-P 占比，以提高水稻产量和磷素利用效率。



4 结论

长期不同施肥对早稻和晚稻生育期内无机磷总量和形态变化产生显著影响。与单施有机肥比较,长期施用化肥磷或化肥有机肥配施能够显著增加土壤无机磷总量,施肥后无机磷总量的变化主要发生在分蘖期和齐穗期;能够增加 Al-P 含量占无机磷总量的比例,同时降低 Fe-P、O-P 和 Ca-P 含量占无机磷总量的比例。有机无机肥配施能够显著增加稻谷产量和吸磷量,提高早稻季磷肥利用率。早稻营养生长期的 Al-P 和 Olsen-P 含量对早稻产量和吸磷量的相对重要性更突出;晚稻则是营养生长期的 Fe-P、生殖生长期的 Al-P 对晚稻产量和吸磷量的相对重要性更高。因此,有机无机配施情况下需要通过优化磷肥用量,并加强早稻和晚稻分蘖期和齐穗期水肥调控以提高磷肥利用效率。

参考文献:

- [1] 张淑香, 徐明岗. 土壤磷素演变与高效利用 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (21): 3828-3829.
- [2] 都江雪, 柳开楼, 黄晶, 等. 中国稻田土壤有效磷时空演变特征及其对磷平衡的响应 [J]. 土壤学报, 2021, 58 (2): 476-486.
- [3] 崔荣国, 张艳飞, 郭娟, 等. 资源全球配置下的中国磷矿发展策略 [J]. 中国工程科学, 2019, 21 (1): 128-132.
- [4] Shi Y C, Ziadi N, Messiga A J, et al. Soil phosphorus fractions change in winter in a corn-soybean rotation with tillage and phosphorus fertilization [J]. *Pedosphere*, 2015, 25 (1): 1-11.
- [5] He Z L, Zhu J. Microbial utilization and transformation of phosphate adsorbed by variable charge minerals [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30: 917-923.
- [6] 黄晶. 基于几个长期定位试验的长江上、中游水稻土磷素肥力与磷肥肥效的演变规律 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- [7] 张成兰, 刘春增, 吕玉虎, 等. 减量化肥配施不同量紫云英对土壤磷素形态及水稻产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (1): 100-106.
- [8] Soltangheisi A, Haygarth P M, Pavinato P S, et al. Long term sugarcane straw removal affects soil phosphorus dynamics [J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 208: 104898.
- [9] Zhu W B, Zhao X, Wang S Q, et al. Inter-annual variation in P speciation and availability in the drought rewetting cycle in paddy soils [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2019, 286: 106652.
- [10] Huang J, Muhammad Q, Muhammad N K, et al. Long-term application of chemical and organic fertilizers over 35 years differentially affects interannual variation in soil inorganic phosphorus fractions in acidic paddy soil [J]. *Eurasian Soil Science*, 2021, 54 (5): 772-782.
- [11] Richardson A E, Barea J M, Mcneill A M, et al. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms [J]. *Plant and Soil*, 2009, 321: 305-339.
- [12] 蒋炳伸, 沈健林, 王娟, 等. 秸秆还田稻田土壤生物有效性磷及水稻磷吸收 [J]. 水土保持学报, 2020, 34 (6): 309-317.
- [13] 周卫军, 王凯荣, 刘鑫. 有机物料循环对红壤稻田系统磷素营养的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11 (5): 602-608.
- [14] 叶会财, 李大明, 柳开楼, 等. 不同有机培肥方式对红壤性水稻土磷素的影响 [J]. 土壤通报, 2019, 50 (2): 374-380.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 2008, 45 (5): 915-924.
- [17] Pratap B, Amaresh K N, Mohammad S, et al. Effects of 42-year long-term fertilizer management on soil phosphorus availability, fractionation, adsorption-desorption isotherm and plant uptake in flooded tropical rice [J]. *The Crop Journal*, 2015, 3 (5): 387-395.
- [18] Soltangheisi A, Rodrigues M, Coelho M J A, et al. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops [J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 179: 20-28.
- [19] Sharpley A N, Moyer B. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 22: 597-601.
- [20] Waqas A, Huang J, Liu K L, et al. Impacts of long-term inorganic and organic fertilization on phosphorus adsorption and desorption characteristics in red paddies in southern China [J]. *PLoS One*, 2021, 16 (1): e0246428.
- [21] 许琛, 沈素素, 何竹, 等. 长期施无机磷肥对黄泥土稻田土壤磷库的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2022, 41 (11): 2506-2514.
- [22] Yang W J, Cheng H G, Hao F H, et al. The influence of land-use change on the forms of phosphorus in soil profiles from the Sanjiang Plain of China [J]. *Geoderma*, 2012, 189-190 (6): 207-214.
- [23] Yan X, Wei Z Q, Hong Q Q, et al. Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources [J]. *Geoderma*, 2017, 295: 80-85.
- [24] 苏玲, 林咸永, 章永松, 等. 水稻土淹水过程中不同土层铁形态的变化及对磷吸附解吸特性的影响 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2001, 27 (2): 124-128.
- [25] Cheng Y Q, Pan S, Xu S, et al. The high accumulation of phosphorus in high-yield paddy soils: a new insight from cutans [J]. *Geoderma*, 2023, 429: 116249.
- [26] Liang X, Jin Y, He M, et al. Composition of phosphorus species and phosphatase activities in a paddy soil treated with manure at varying rates [J]. *Agriculture Ecosystems and*

- Environment, 2017, 237: 173–180.
- [27] Luo G, Ling N, Nannipieri P, et al. Long-term fertilization regimes affect the composition of the alkaline phosphomonoesterase encoding microbial community of a vertisol and its derivative soil fractions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53: 375–388.
- [28] 陈贵, 赵国华, 张红梅, 等. 长期施用有机肥对水稻产量和氮磷养分利用效率的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2017 (1): 91–97.
- [29] 黄晶, 张淑香, 石孝均, 等. 长期不同施肥模式下南方典型农田磷肥回收率变化 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (6): 1630–1639.
- [30] 李汉常, 谭歆, 李宗浩, 等. 施磷量和灌溉方式对水稻磷素吸收利用的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40 (6): 45–52.
- [31] Gao P, Liu Y, Wang Y, et al. Spatial and temporal changes of P and Ca distribution and fractionation in soil and sediment in a karst farmland–wetland system [J]. *Chemosphere*, 2019, 220: 644–650.
- [32] Zhao W, Gu C, Zhu M, et al. Chemical speciation of phosphorus in farmland soils and soil aggregates around mining areas [J]. *Geoderma*, 2023, 433: 116465.
- [33] 龚海青, 张敬智, 陈晨, 等. 磷肥后移与减量对水稻磷素利用效率的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22 (5): 144–152.
- [34] 张洪霞. 红壤旱地和稻田土壤磷素微生物转化及其有效性研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.

Annual changes of inorganic phosphorus form in red paddy soil within one year and its relationship with phosphorus fertilizer utilization

HUANG Jing^{1, 2}, ZHOU Ling-hong³, GAO Ju-sheng^{1, 2}, LI Dong-chu^{1, 2}, LIU Li-sheng^{1, 2}, ZOU Ping⁴, LIU Shu-jun^{1, 2*}, ZHANG Hui-min^{1, 2*} (1. State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2. Hengyang Red Soil Experimental Station, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Qiyang Farmland Ecosystem National Observation and Research Station in Hunan Province, Qiyang Hunan 426128; 3. Agricultural and Rural Bureau of Shigu District, Hengyang Hunan 421001; 4. Agricultural and Rural Bureau of Hengyang County, Hengyang Hunan 421200)

Abstract: The effective supply of phosphorus in paddy soil in red soil area is the key to ensure the high yield of rice. Soil phosphorus availability is closely related to the transformation of phosphorus forms. However, the changes of inorganic phosphorus forms in the key growth period of double cropping rice under different fertilization and its relationship with rice phosphorus utilization efficiency are still unclear. Based on the long-term experiment of combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer since 1982, control (CK), single application of organic fertilizer (M), single application of chemical fertilizer (NPK) and combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer (NPKM) were selected. This study monitored the changes of inorganic phosphorus components and phosphorus utilization rate in the key growth period of double cropping rice, and analyzed the correlation between them. The result showed that there were significant differences in the total amount of inorganic phosphorus among different treatments at different growth stages (NPKM>NPK>M>CK, $P<0.05$). The change of total inorganic phosphorus after fertilization mainly occurred in tillering stage and full heading stage. The contents of Al-P, Fe-P and Ca-P in NPK and NPKM treatments were significantly higher than those in M and CK treatments at different growth stages of early and late rice ($P<0.05$). The average contents of Al-P, Fe-P and Ca-P in the late rice growing season of each treatment were higher than those in the early rice growing season, with an increase of 4.6%–19.8%, 0.2%–8.6% and 3.4%–23.3%, respectively. The average content of O-P in the late rice season of each treatment was 8.4%–35.0% lower than that in the early rice. The change trend of the proportion of inorganic phosphorus components to total inorganic phosphorus in early rice season and late rice season was the same among different fertilization treatments. The order of the average proportion of Al-P, Fe-P, O-P and Ca-P to total inorganic phosphorus in each treatment was NPKM>NPK>M>CK, M>CK>NPK>NPKM, CK>M>NPK>NPKM and CK>M>NPK>NPKM, respectively. The grain yield and phosphorus uptake of early and late rice increased significantly with fertilization ($P<0.05$). The rice yield and phosphorus uptake of MPKM were significantly higher than those of NPK and M treatments ($P<0.05$), with an increase of 25.1%–33.3%, but there was no significant difference in phosphorus utilization rate between different fertilization treatments. The relative importance of Al-P and Olsen-P content in the vegetative growth period of early rice to the yield and phosphorus uptake of early rice was more prominent, while Fe-P in vegetative growth period and Al-P in reproductive growth period were more important to yield and phosphorus uptake of late rice. In the case of combined application of organic and inorganic fertilizers, it is necessary to optimize the amount of phosphorus fertilizer and strengthen the regulation of phosphorus fertilizer at tillering stage and full heading stage of early rice and late rice to improve the utilization efficiency of phosphorus fertilizer.

Key words: red paddy soil; key growth period; inorganic phosphorus form; utilization rate of phosphorus; long-term fertilization