

基于模糊数学和主成分分析的长期 施肥红壤旱地土壤肥力评价

杨旭初, 叶会财, 李大明*, 余喜初, 柳开楼, 胡秋萍, 胡志华,
谷子寒, 胡惠文, 周利军, 黄庆海, 林小兵

(江西省红壤研究所/国家红壤改良工程技术研究中心, 江西 南昌 331717)

摘 要: 为评价红壤旱地长期不同施肥方式下土壤肥力水平, 基于 1986 年建立的江西进贤红壤旱地玉米定位试验, 选用土壤 pH 值、有机质含量、有效磷含量、速效钾含量、阳离子交换量 5 个指标, 采用模糊数学和主成分分析方法, 评价和比较了连续施肥 30 年后不同施肥模式下红壤旱地土壤综合肥力水平。结果表明, 数据球形假设检验 KMO 值为 0.73, Bartlett 值为 127.98, Sig < 0.01, 可以进行主成分分析。土壤肥力综合指数 (SNI) 以氮磷钾配施猪粪处理最高 (0.94), 单施猪粪次之 (0.92), 单施氮肥最低 (0.42)。因此, 红壤旱地施用有机肥或有机无机肥配施是维持和提高土壤肥力水平的重要措施。

关键词: 长期施肥; 红壤旱地; 玉米; 肥力评价

中图分类号: S151.9+5

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257 (2018) 03-0079-06

玉米作为中国 3 大主产粮食之一, 据《2015 中国统计年鉴》显示, 中国玉米播种面积占农作物播种总面积的 22.9%, 玉米产量占农作物总产量的 36.1%^[1]。随着畜牧业的发展, 玉米用途主要由粮食向饲料原料转变, 据廖永松等^[2]估计, 到 2020 年, 80% 以上的玉米将用来做饲料, 我国饲料玉米仍有缺口, 因此玉米生产同样关乎国家粮食安全。

施肥对土壤生产力、养分回收率、作物产量等方面具有主要贡献作用。国内外长期定位试验表明, 均衡施肥或有机无机肥料配施是维持作物高产、稳产的有效措施, 但是长期施用化肥 (尤其是过量), 土壤质量及生产力出现下降^[3]。据段英华等^[4]研究表明, 湖南红壤长期施用化肥, 土壤 pH 值平均每年下降 0.06 个单位, 在土壤 pH 值 4.5 ~ 6.3 范围内, pH 值每降低 1 个单位, 玉米氮肥回收率下降 10.9%。

土壤肥力评价至今无统一的方法、指标和模

型, 目前主要有专家打分法、Fuzzy 综合评判法、全量数据集法、最小数据集法等^[5-6]。除专家打分是主观评价外, 其余都是采用模糊数学和相关分析的理论, 由于不同研究者对不同指标重要性的认识不同, 因此土壤肥力指标的选择及权重确定各有不同^[7]。例如包耀贤等^[8]选用土壤有机质、速效氮、速效磷、速效钾、粘粒、团聚度、团聚体稳定率 8 个指标作为最小数据集评价红壤性水稻土综合肥力。温延臣等^[9]选用土壤物理、化学、生物学共 14 个指标评价了潮土小麦-玉米轮作区土壤综合肥力。

我国红壤面积达 218 万 km², 资源丰富, 约占全国总土地面积的 21.8%, 主要分布在江西、湖南等长江以南的低山丘陵区。目前南方红壤旱地的土壤肥力评价方法较少, 且缺少对其评价结果的客观性验证。因此, 本研究选自 1986 年建立的江西省进贤县红壤旱地玉米定位试验, 基于模糊数学和主成分分析的方法评价长期不同施肥模式下土壤综合肥力, 并结合产量及产量稳定性进行验证, 以期为玉米施肥提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

玉米长期定位试验位于江西省进贤县江西省红壤研究所内 (116°20'24"N、28°15'30"E), 为典型

收稿日期: 2017-08-11; 最后修订日期: 2017-11-04

基金项目: 江西现代农业科研协同创新专项 (JXXTCX2015003-005); 江西省科技支撑计划项目 (20151BBF60060); 国家自然科学基金 (41671301)。

作者简介: 杨旭初 (1991-), 男, 湖南娄底人, 硕士, 助理研究员, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: yxu0078@163.com。

通讯作者: 李大明, E-mail: lid_2005@126.com。

低丘地形 (海拔 25 m, 坡度 5°), 土壤类型为第四纪红粘土发育的红壤。中亚热带季风气候, 年平均气温 18.7 °C, 年降水量 1 807.5 mm, 年日照时数 1 657.8 h, >10°C 有效积温 3 511.1°C。试验前耕层土壤理化性状: pH 值 6.0, 有机质 16.2 g/kg, 全氮 0.9 g/kg, 全磷 14.2 g/kg, 全钾 15.8 g/kg, 碱解氮 60.3 mg/kg, 有效磷 12.9 mg/kg, 速效钾 102.5 mg/kg。种植制度为春玉米-秋玉米-冬闲, 1986~2015 年春秋季玉米品种为掖单 13 号。

1.2 试验设计

长期定位试验共设 10 个处理, 分别为: 不施肥 (CK)、单施猪粪 (M)、单施氮肥 (N)、单施磷肥 (P)、单施钾肥 (K)、施氮磷肥 (NP)、施氮钾肥 (NK)、氮磷钾平衡施肥 (NPK)、施 2 倍氮磷钾化肥 (NPK2)、施氮磷钾化肥 + 猪粪 (NPKM)。3 次重复, 小区面积 22.2 m², 种植密度 79 200 株/hm², 春、秋季玉米肥料用量相同 (表 1)。氮肥为尿素 (N 46%), 磷肥为钙镁磷肥 (P₂O₅ 12%), 钾肥为氯化钾 (K₂O 60%)。磷肥、猪粪作基肥施用, 钾肥在播种后第 7 d 全部做追肥施用, 氮肥在播种后第 7 和第 14 d 各追肥 50%。

表 1 不同处理施肥量 (kg/hm²)

处理	年施肥量			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	猪粪
CK	—	—	—	—
M	—	—	—	30 000
N	120	—	—	—
P	—	60	—	—
K	—	—	120	—
NP	120	60	—	—
NK	120	—	120	—
NPK	120	60	120	—
NPK2	240	120	240	—
NPKM	120	60	120	30 000

1.3 土壤肥力综合指数计算

本研究构建土壤肥力综合指数 (soil nutrient index, SNI) 作为土壤养分综合评价依据, 其值越高, 土壤肥力越好, 具体计算过程如下:

$$W_j^* = \sum_{p=1}^n |W_{jp}^*| \times F_p (j = 1, 2, 3 \cdots 5; p = 1, 2 \cdots n) \quad (1)$$

式中, W_j^* 为第 j 个指标的权重分配系数, W_{jp}^*

为第 j 个指标在第 p 个主成分上的载荷值, F_p 为第 p 个主成分的特征值。

$$W_j = \left(W_j^* / \sum_{j=1}^5 W_j^* \right) \times 100 \quad (2)$$

式中, W_j 为第 j 个指标的权重。

$$SNI = \sum_{j=1}^5 Q_j \times W_j \quad (3)$$

式中, Q_j 表示第 j 个指标的隶属度值。

要计算 SNI, 一是土壤指标的选择; 二是指标权重的确定, 三是隶属函数的建立。

1.3.1 土壤指标的选择

参考文献 [10] 选取土壤 pH 值、有机质含量、有效磷含量、速效钾含量、阳离子交换量进行红壤旱地土壤肥力评价。土壤 pH 值的测定采用电极法 (水土比为 2.5:1), 土壤有机质的测定采用水合重铬酸钾氧化-比色法, 土壤有效磷的测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法, 土壤速效钾的测定采用醋酸铵浸提-火焰光度法, 土壤阳离子交换量的测定采用醋酸铵交换-火焰光度法^[11]。

1.3.2 指标权重的确定

利用主成分分析对上述土壤指标进行权重确定。

1.3.3 隶属函数建立和隶属度的计算

隶属度函数实际上是评价指标与作物生长曲线之间的数学表达式, 它可以将不同量纲的指标转化数值为 0~1 之间的无量纲值, 单一指标隶属度越大, 反映该指标的肥力水平越高。土壤 pH 值采用梯型隶属函数, 按公式 (4) 计算隶属度; 土壤有机质含量、有效磷含量、速效钾含量、阳离子交换量采用 S 型隶属函数, 按公式 (5) 计算隶属度。

$$f(X) = \begin{cases} 0.1 & X < X_1; X > X_2 \\ 0.1 + 0.9(X - X_1) / (X_3 - X_1) & X_1 \leq X < X_3 \\ 1.0 & X_3 \leq X \leq X_4 \\ 1.0 - 0.9(X - X_4) / (X_2 - X_4) & X_4 < X \leq X_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$f(X) = \begin{cases} 1.0 & X > X_2 \\ 0.1 + 0.9(X - X_1) / (X_2 - X_1) & X_1 \leq X \leq X_2 \\ 0.1 & X < X_1 \end{cases} \quad (5)$$

公式 (4) 和 (5) 中 X 为上述土壤指标实际含量, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别为各土壤指标的下临界值、上临界值、最优值下限、最优值上限。其值参考文献 [12] 及江西红壤旱地实际情况来确定。

表 2 土壤指标的隶属函数类型和拐点值

土壤指标	函数类型	下临界值 (X_1)	最优值下限 (X_3)	最优值上限 (X_4)	上临界值 (X_2)
pH 值	梯型	4.5	6.0	7.0	8.5
有机质	S 型	5.0			20.0
有效磷	S 型	5.0			20.0
速效钾	S 型	50.0			150.0
阳离子交换量	S 型	5.0			15.0

1.4 土壤综合肥力验证

玉米产量受当季气候影响波动较大,因此选取试验 30 年的平均年产量及其变异系数 (CV)、稳定系数 (SYI) 3 个指标来验证土壤肥力^[13]。产量统计方法:于 1986 ~ 2015 年每季玉米收获时,整个小区单收单晒,并按 14% 籽粒含水率折算产量,年产量为春、秋季产量之和;年产量变异系数、稳定系数按公式 (6)、(7) 计算,标准差越大,稳定系数越低,变异系数越大。

$$SYI = \frac{\bar{Y} - \sigma}{Y_{\max}} \quad (6)$$

$$CV = \sigma / \bar{Y} \quad (7)$$

式中, $\bar{Y}$ 为平均年产量, kg/hm^2 ; σ 为标准差, kg/hm^2 ; $Y_{\max}$ 为所有年份中的最大年产量。

1.5 数据统计

数据采用 SPSS 17.0 进行方差分析, Duncan 法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对红壤旱地土壤养分及特性的影响

由表 3 可知,长期不同施肥处理对土壤 pH 值及有机质含量、有效磷含量、速效钾含量、阳离子交换量均有显著影响 ($P < 0.05$)。土壤 pH 值、有效磷含量、阳离子交换量以单施猪粪 (M) 最高,偏施氮肥 (N) 最低;有机质含量以化肥配施猪粪 (NPKM) 处理最高,CK 最低;速效钾含量以施 2 倍氮磷钾化肥 (NPK2) 最高,偏施氮磷肥 (NP) 最低。

表 3 长期施肥对土壤养分含量及特性的影响

处理	pH 值	有机质 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	阳离子交换量 (cmol/kg)
CK	5.20 c	13.50 c	10.20 c	80.00 ef	9.71 e
M	6.40 a	17.83 a	183.50 a	141.67 d	12.78 a
N	4.40 e	14.67 c	9.80 c	78.33 ef	9.47 e
P	5.34 c	14.73 bc	23.00 bc	103.33 e	10.33 cd
K	5.26 c	13.73 bc	20.70 bc	268.33 b	10.17 cd
NP	5.18 c	13.90 bc	22.90 bc	65.00 f	10.60 c
NK	4.80 d	15.70 c	14.90 bc	206.67 c	9.89 de
NPK	4.85 d	15.27 bc	16.70 c	185.00 c	9.59 e
NPK2	4.84 d	15.43 b	29.80 b	321.67 a	9.94 de
NPKM	6.03 b	20.00 a	177.30 a	246.67 b	11.73 b

注: 同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,下同。

2.2 长期施肥红壤旱地土壤肥力评价

从图 1 可知,5 个土壤指标的平均隶属度以氮磷钾配施猪粪 (NPKM) 最高,为 0.94;其次为单施猪粪 (M),为 0.92;单施氮肥 (N) 最低,为 0.41。从 5 个指标来看,土壤有效磷平均隶属度最高,为 0.83;土壤速效钾次之,为 0.75;土壤 pH

值最低,为 0.52。

将土壤 pH 值、有机质含量、有效磷含量、速效钾含量、阳离子交换量数据进行球形假设检验, KMO 值为 0.73, Bartlett 值为 127.98, sig = 0.00 < 0.01, 且 Person 相关性分析 (表 4) 表明除土壤速效钾外,土壤 pH 值、有机质含量、有效磷含量、阳

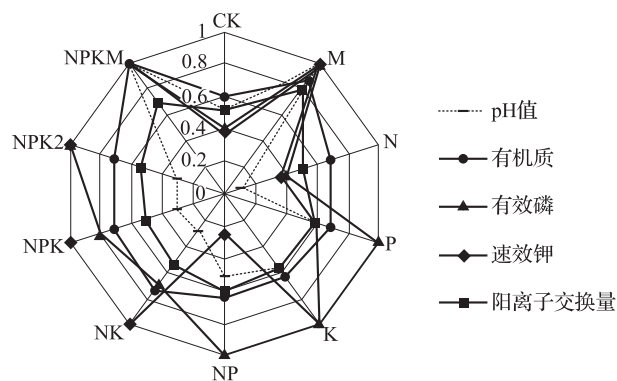


图1 土壤指标平均隶属度雷达图

表4 土壤养分及特性的相关性

项目	pH 值	有机质	有效磷	速效钾
有机质	0.559 **			
有效磷	0.854 **	0.786 **		
速效钾	0.051	0.294	0.183	
阳离子 交换量	0.903 **	0.591 **	0.907 **	0.036

注:**表示在0.01水平上显著相关。

离子交换量之间均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 说明5个指标之间可以进行主成分分析。前2个主因子的方差贡献率为92.0%, 说明前2个主因子可以代表原始数据92.0%的数据。土壤pH值和土壤养分指标的权重结果见表5。

从图2可知, 试验30年后, 玉米土壤肥力综合指数(SNI)从高到低依次为 $NPKM > M > K > P > NPK2 > NPK > NP > NK > CK > N$ 。化肥配施猪粪(NPKM)土壤肥力综合指数最高, 为0.94; 单施猪粪(M)次之, 为0.92; 单施氮肥(N)最差, 为0.42。

表5 变量在主成分上的载荷矩阵及变量权重

变量	因子1	因子2	公因子方差	权重
pH 值	0.92	-0.22	3.05	0.20
有机质	0.88	0.24	3.39	0.23
有效磷	0.99	-0.03	3.50	0.23
速效钾	0.23	0.95	1.83	0.12
阳离子 交换量	0.95	-0.21	3.18	0.21
特征值	3.56	1.06		
累计方差 贡献率	0.71	0.92		

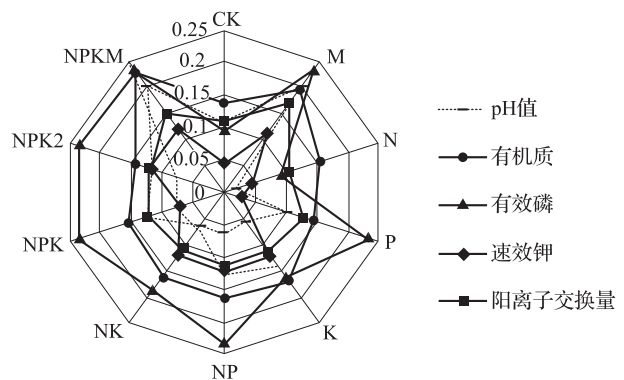


图2 各土壤指标综合肥力贡献率雷达图

2.3 红壤旱地土壤肥力验证

从表6可知, 除单施猪粪(M)处理外, 其余各处理平均年产量、产量稳定系数、产量变异系数与土壤肥力综合指数相比, 排名规律基本相同。长年单施猪粪(M), 土壤肥力综合指数排第2, 而平均周年产量、产量稳定系数、产量变异系数分别排第3、第6、第6。

表6 玉米平均周年产量描述性统计

处理	平均周年产量 (kg/hm ²)	平均周年产量排名 (从大至小)	稳定系数 (SYI)	稳定系数排名 (从大至小)	变异系数 (CV)	变异系数排名 (从小至大)
CK	1 491.1f	10	0.24	7	0.44	7
M	7 657.5c	3	0.28	6	0.41	6
N	2 290.5f	7	0.10	8	0.73	10
P	1 563.5f	9	0.09	10	0.71	9
K	1 794.3f	8	0.10	8	0.68	8
NP	4 269.6e	6	0.41	5	0.33	4
NK	5 424.5d	5	0.35	4	0.40	5
NPK	6 433.5d	4	0.43	3	0.32	3
NPK2	9 243.0b	2	0.49	1	0.27	2
NPKM	11 181.9a	1	0.49	1	0.25	1

3 讨论与结论

土壤基础肥力是作物可持续生产的物质基础,长期不同施肥模式通过影响土壤肥力从而影响土壤生产力。南方红壤具有酸、瘦、板、粘的特点,其中土壤酸化严重^[14]。本文研究表明,与试验前相比,试验30年后,单施猪粪和氮磷钾配施猪粪处理土壤pH值提高0.40、0.03个单位,其余处理下降0.74~1.60个单位,对照处理下降0.80个单位。说明酸沉降等自然因素是红壤旱地酸化的主要原因之一,施用有机肥猪粪和氮磷钾配施猪粪可以维持和提高土壤pH值,是阻控红壤酸化的有效措施,不均衡施肥显著加剧红壤酸化。这与前人^[15-16]的研究结果一致。

南方红壤富含铝铁氧化物,对有效磷固定能力很强,使磷素由可溶态向难溶态转变,大大降低了土壤磷素的有效性,造成红壤普遍缺磷^[17]。本研究表明,不同处理间土壤有效磷含量为9.80~177.30 mg/kg,长期施用猪粪和氮磷钾配施猪粪土壤有效磷含量较对照分别提高16.99、16.38倍,活化了土壤磷素,提高了土壤有效磷含量。可能的原因是施用猪粪降低了土壤交换性 Al^{3+} 浓度,减轻了铝铁氧化物对磷素的固定,从而缓解了铝毒。

长期定位试验系统科学地反映了土壤肥力演变及肥效变化规律,是研究土壤的经典试验^[18]。土壤肥力评价关键在于土壤指标的选择、指标权重和隶属函数阈值的确定,本评价体系表明,采用主成分分析确定指标权重的方法是可行的。本文研究表明,红壤旱地土壤肥力综合指数排名以氮磷钾配施猪粪最高,施用猪粪次之,偏施氮肥最低。对比产量、产量稳定系数、变异系数排名顺序,除单施猪粪处理外,其余各处理土壤肥力验证结果均较好。施用猪粪处理土壤肥力综合指数和平均年产量排名靠前,产量稳定系数和变异系数排名靠后。可能的原因是猪粪中有机质含量高,养分释放过程较慢,其主要功能在于培肥,玉米产量逐年缓慢增加,因此,产量稳定系数较低、变异系数较高。

参考文献:

- [1] 郭泽林,赵旭.山东省粮经作物播种比例演变及结构优化研究—基于1986~2015统计数据[J].中国农业资源与区划,2017,38(7):164-171.
- [2] 廖永松,黄季焜.21世纪全国及九大流域片粮食需求预测分析[J].南水北调与水利科技,2004,2(1):29-32.
- [3] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥科学报,2013,19(2):259-273.
- [4] 段英华,徐明岗,王伯仁,等.红壤长期不同施肥对玉米氮肥回收率的影响[J].植物营养与肥科学报,2010,16(5):1108-1113.
- [5] 高洪军,彭畅,张秀芝,等.长期不同施肥对东北黑土区玉米产量稳定性的影响[J].中国农业科学,2015,48(23):4790-4799.
- [6] 叶回春,张世文,黄元仿,等.北京延庆盆地农田表层土壤肥力评价及其空间变异[J].中国农业科学,2013,46(15):3151-3160.
- [7] 叶回春,张世文,黄元仿,等.粗糙集理论在土壤肥力评价指标权重确定中的应用[J].中国农业科学,2014,47(4):710-717.
- [8] 包耀耀,黄庆海,徐明岗,等.长期不同施肥下红壤性水稻土综合肥力评价及其效应[J].植物营养与肥科学报,2013,19(1):74-81.
- [9] 温延臣,李燕青,袁亮,等.长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J].农业工程学报,2015,31(7):91-99.
- [10] 曹志洪.中国土壤质量[M].北京:科学出版社,2008.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析(3版)[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [12] 何园球,孙波.红壤质量演变与调控[M].北京:科学出版社,2008.
- [13] 戴茨华,王劲松,徐红,等.旱地红壤长期定位施肥养分下移特征及作物产量效应研究[J].中国农学通报,2012,28(9):70-74.
- [14] 颜雄,彭新华,张杨珠,等.长期施肥对红壤旱地玉米生物量及养分吸收的影响[J].水土保持学报,2013,27(2):120-125.
- [15] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [16] 张祥,王典,姜存仓,等.生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(8):979-984.
- [17] 李昌新.长期施肥对红壤旱地玉米生产力和土壤肥力的影响及其机制研究[D].南京:南京农业大学,2009.
- [18] 马力,杨林章,沈明星,等.基于长期定位试验的典型稻麦轮作区作物产量稳定性研究[J].农业工程学报,2011,27(4):117-124.

Assessment of red soil upland fertility in long-term fertilization based on fuzzy mathematics and principal component analysis

YANG Xu-chu, YE Hui-cai, LI Da-ming*, YU Xi-chu, LIU Kai-lou, HU Qiu-ping, HU Zhi-hua, GU Zi-han, HU Hui-wen, ZHOU Li-jun, HUANG Qing-hai, LIN Xiao-bing (Jiangxi Institute of Red Soil, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang Jiangxi 331717)

Abstract: In order to assess the red upland soil fertility under long-term different fertilization patterns, 5 indexes, including the soil pH, organic matter content, available phosphorus content, available potassium content and cation exchange capacity were selected to assess and compare the comprehensive soil fertility under different fertilization patterns after 30 years by fuzzy mathematics and principal component analysis in double-maize cropping system from 1986 in red upland soil. The results showed that the KMO of data sphericity test was 0.73, and the bartlett was 127.98, the principal component analysis could be carried out with these data. The soil nutrient index (SNI) of application of chemical fertilizer combined with pig manure was the highest (0.94), followed by single application of pig manure (0.92), and the single application of nitrogen fertilizer (0.42) was the lowest. Therefore, the application of organic manure or organic manure combined chemical fertilizer is wise measure to maintain and improve soil fertility in red dryland soil.

Key words: long-term fertilization; red soil upland; maize; fertility assessments

[上接第 66 页]

Effects of long-term fertilization on phosphorus sorption and soil properties in paddy soil

HONG Qian-qian, YAN Xiao, WEI Zong-qiang*, WU Jian-fu* (School of Environmental and Land Resource Management, Key Laboratory of Poyang Lake Basin Agricultural Resource and Ecology of Jiangxi Province, Jiangxi Agricultural University, Nanchang Jiangxi 330045)

Abstract: The effects of long-term different fertilization practices (initiated in 1981) and resultant changes in soil properties on phosphorus (P) sorption characteristics were studied using P sorption isotherm experiment. We selected 12 soil samples at depth of 0 ~ 15 cm from a long-term field trial with four fertilization practices including no fertilizer (CK), only application of chemical fertilizer, straw retention, and biogas slurry incorporation. The results showed that the amount of sorbed P increased with initial added P concentration increasing. The Langmuir equation was more ideal than Freundlich and Temkin equations in fitting the P sorption isotherm, which had determination coefficients greater than 0.99 for all treatments. Biogas slurry incorporation had the greatest Langmuir P sorption maximum (X_m), which was significantly higher than the other three treatments ($P < 0.05$), followed by straw retention and chemical fertilization treatments, and the lowest in CK. In addition, biogas manure treatment had the highest value of degree of P saturation. However, there were no significant differences in the constant related to the bonding strength and maximum buffer capacity among the four treatments. Oxalate-extracted Fe, Al, and P (Fe-ox, Al-ox, and P-ox, respectively), and Mehlich 3-extracted Ca and Mg (Ca-M3 and Mg-M3) were positively correlated with X_m , especially for P-ox and Fe-ox, for which the correlation coefficient was 0.95 ($P < 0.01$) and 0.64 ($P < 0.05$), respectively. Principal component analysis showed that Fe-ox, Al-ox, Ca-M3 and Mg-M3 contributed mostly to the variation of P sorption characteristics among the four fertilization regimes. Compared with CK and chemical fertilizer application treatments, long-term incorporation of biogas manure increased the contents of amorphous Fe and Al minerals in paddy soil, and thus enhanced soil P sorption capacity.

Key words: phosphorus; paddy soil; phosphorus sorption; biogas manure