

有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响

吕真真^{1,2}, 吴向东³, 侯红乾^{1,2}, 冀建华^{1,2}, 刘秀梅^{1,2}, 刘益仁^{1,2*}

(1 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 江西南昌 330200; 2 国家红壤改良工程技术研究中心, 江西南昌 330200; 3 江西省水利科学研究院, 江西南昌 330029)

摘要: 【目的】利用江西省稻田土壤质量演变定位监测试验为平台, 系统分析长期不同施肥措施下土壤质量状况, 明确提升红壤性双季稻田土壤质量的优化施肥措施。【方法】长期定位试验设置 8 个处理, 分别为不施肥处理 (CK), 施磷钾肥处理 (PK), 施氮磷肥处理 (NP), 施氮钾肥处理 (NK), 施氮磷钾肥处理 (NPK), 施 70% 化肥 + 30% 有机肥处理 (70F + 30M), 施 50% 化肥 + 50% 有机肥处理 (50F + 50M), 施 30% 化肥 + 70% 有机肥处理 (30F + 70M), 于 2012 年晚稻收获后测定 2 个土壤物理性质指标 (容重和总孔隙度)、7 个基础化学性质指标 (有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾和 pH 值) 及 3 个生物学性质指标 (细菌、真菌和放线菌数量), 分析长期不同施肥对各土壤性质的影响, 并运用主成分分析对各处理土壤质量进行综合评分, 最后将综合得分进行聚类分析, 以评价长期不同施肥措施对红壤性双季稻田土壤质量的影响。【结果】经 28 年连续不同施肥处理后, 各土壤性质在处理间均产生显著差异, 但各土壤性质在处理间的变化趋势并不完全一致。化肥配施有机肥处理较化肥处理土壤容重降低 12.7%~20.6%, 土壤孔隙度增加 2.3%~17.4%, 有机质增加 22.5%~41.8%, 全氮和碱解氮分别提高 9.8%~20.9% 和 11.1%~30.3%, 全磷和有效磷分别提高 11.1%~71.7% 和 1.31~1.75 倍, pH 值提高 0.19~0.48 个单位; 主成分分析方法将原 12 个土壤性质指标降维、提取出 2 个主成分, 反映了原信息量的 87.4%, 有机质、容重、真菌、全氮、有效磷、放线菌、总孔隙度、细菌、全磷和碱解氮在第一主成分上有较高载荷值, pH 值和速效钾在第二主成分上有较高载荷; 各施肥处理下土壤质量综合水平高低排序为: 30%F + 70M > 50F + 50M > 70F + 30M > NPK > NP > NK > PK > CK; 聚类分析方法将长期不同施肥制度下稻田土壤质量划分为一级 (30F + 70M), 二级 (50F + 50M, 70F + 30M), 三级 (NPK, NP), 四级 (NK, PK, CK) 4 个等级。【结论】与单施化肥相比, 有机无机配施可有效增加土壤养分含量, 改善土壤物理性质, 缓解土壤酸化, 提高土壤微生物数量, 是提高红壤性双季稻田土壤质量的有效施肥措施。

关键词: 长期施肥; 红壤性水稻土; 土壤质量; 主成分分析; 聚类分析

Effect of different application ratios of chemical and organic fertilizers on soil quality in double cropping paddy fields

LÜ Zhen-zhen^{1,2}, WU Xiang-dong³, HOU Hong-qian^{1,2}, JI Jian-hua^{1,2}, LIU Xiu-mei^{1,2}, LIU Yi-ren^{1,2*}

(1 Institute of Soil Fertilizer and Resource Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China;

2 National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200, China;

3 Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

Abstract: 【Objectives】A long-term paddy soil quality evolution experiment started from 1984 in Jiangxi Province was conducted to systematically analyze soil quality of double-rice cropping field in red soil region, and acquire the optimum fertilization measures to improve soil quality. 【Methods】The long-term experiment included eight treatments, control (CK, no nutrient input), phosphorus (P) and potassium (K) fertilizer treatment (PK), nitrogen (N) and P fertilizer treatment (NP), N and K fertilizer treatment (NK), N, P and K fertilizer treatment (NPK), 70% chemical fertilizer and 30% organic fertilizer treatment (70F + 30M), 50% chemical

收稿日期: 2016-11-18 接受日期: 2017-03-06

基金项目: 国家自然科学基金 (31460544); 江西省现代农业科研协同创新专项 (JXXTCL2016003); 江西省农业科学院创新基金 (20162CBS001) 资助。

作者简介: 吕真真 (1987—), 女, 山东菏泽人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤肥料与植物营养方面的研究。

E-mail: lvzhenzhen808@163.com. *通信作者 E-mail: jxnclyr@163.com

fertilizer and 50% organic fertilizer treatment (50F + 50M), and 30% chemical fertilizer and 70% organic fertilizer treatment (30F + 70M). Two soil physical properties (soil bulk density and total porosity), 7 basic chemical properties (organic matter, total N, total P, available N, available P, readily available K and pH) and 3 biological properties (the number of bacteria, fungi and actinomycetes) were determined after the harvest of late rice in 2012. Effects of the long-term fertilization on soil properties were analyzed. Principal component and cluster analysis were used to evaluate the effect of long-term different fertilization systems on soil quality of double-rice cropping field in red soil region. 【 **Results** 】 The significant differences of soil properties were founded among the treatments. Compared with the chemical fertilizer treatments, the long-term application of chemical fertilizer and organic manure reduced soil bulk density by 12.7%–20.6%, and increased soil total porosity by 2.3%–17.4%, increased organic matter, total N, available N, total P and available P by 22.5%–41.8%, 9.8%–20.9%, 11.1%–30.3%, 11.1%–71.7% and 131%–175%, respectively. In addition, the soil pH in the treatments of chemical fertilizer combined with organic manure were increased by 0.19–0.48 than those of the chemical fertilizer treatments. The 2 principal components which could reflect 87.4% of the original information were extracted from the initial 12 indices. In the first principal component, organic matter, bulk density, fungi, total nitrogen, available P, actinomycetes, total porosity, bacteria, total P and available N had higher load value, while pH and readily available K had higher load value in the second principal component. The levels of soil quality under different fertilization treatments were sorted as follows: 30F + 70M > 50F + 50M > 70F + 30M > NPK > NP > NK > PK > CK. The soil quality of paddy soil under the long-term different fertilization systems was divided into 4 grades: first grade (30F + 70M), second grade (50F + 50M, 70F + 30M), third grade (NPK, NP), and fourth grade (NK, PK, CK). 【 **Conclusions** 】 The study suggested that chemical fertilizer combined with organic manure can increase soil nutrient content compared with chemical fertilizer, improve soil physical properties, reduce soil acidification and improve soil microbial counts. Thus, chemical fertilizer combined with organic manure is the most effective fertilization measure to improve the soil quality of double-rice cropping field in red soil region.

Key words: long-term fertilization; red paddy soil; soil quality; principal component analysis; cluster analysis

我国人口基数大、增长快,对粮食的需求日益增加,粮食问题关系国计民生,随着工业化加速、城镇化步伐的加快及生态退耕,耕地面积锐减^[1-2],不断增长的粮食需求和不断减少的耕地面积之间的矛盾日益突出。粮食生产受多种因素制约,土壤质量是影响单位面积粮食产量和粮食安全的关键因素^[3]。近年来,耕地质量问题日益突显,土壤肥力退化、土壤酸化、盐碱化、重金属污染等问题逐渐加剧,我国土壤质量状况不容乐观,提高土壤质量是实现我国粮食安全的基础^[4],提升技术及其优劣评价成为研究热点。

稻米是我国消费的主要粮食种类,双季稻在粮食生产中占有重要地位^[5],施肥是水稻增产稳产最重要的农艺措施之一^[6-7],但不合理施肥现象普遍,肥料利用率低,不仅导致资源浪费及环境污染^[8-9],而且导致土壤养分不均衡、土壤肥力低下^[10]以及土壤酸

化^[11],影响水稻产量。施肥制度不同,土壤物理、化学和生物学性质不同^[12-14],而这种差异又会对土壤结构、肥力和生产力产生重要影响。长期肥料定位试验在研究土壤-植物-环境评价对不同施肥制度的响应关系中具有重要作用^[15],是评价和检验施肥制度的有效手段。近年来,利用长期定位试验平台,开始进行长期施肥对水稻产量^[16-18]、土壤养分^[19-21]、理化性质^[12,22-23]、微生物学特性^[24-25]、酶活性^[26-28]等影响的众多研究,但多是对单一或几种土壤性质指标的影响,而缺乏对土壤质量的综合评价研究。本研究以1984年建立在第四纪亚红粘土母质发育的中潜黄泥田上的肥料长期定位实验为平台,研究不同施肥制度对土壤物理、化学和生物学性质的影响,并结合各土壤性质指标综合评价土壤质量对长期不同施肥制度的响应,为建立双季稻科学施肥制度,提高土壤质量和土地生产力,为农业可持续发展及实现“藏粮于地”提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

红壤性双季稻长期定位试验位于江西省农业科学院试验农场内, 地处江西省南昌市南昌县 (N28°57', E115°94'), 海拔高度 25 m。地处中亚热带, 隶属鄱阳湖气候区, 年平均气温 17.5℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 5400℃, 年降雨量 1600 mm, 年蒸发量 1800 mm, 无霜期约 280 d。试验基地土壤为第四纪亚红粘土母质发育的中潜黄泥田, 种植制度为一年两熟双季稻 (早稻-晚稻), 0—20 cm 土层土壤基本理化性质 (1984 年): 有机质 25.6 g/kg、全氮 1.36 g/kg、全磷 0.49 g/kg、碱解氮 81.6 mg/kg、有效磷 20.8 mg/kg、速效钾 35.0 mg/kg、缓效钾 240 mg/kg、阳离子交换量 7.54 cmol/kg、容重 1.25、pH 6.50。

1.2 试验设计

试验始于 1984 年, 共设 8 个处理, 3 次重复, 随机区组排列, 小区面积为 33.3 m², 小区间以 0.50 m 深和 0.50 m 宽的水泥田埂隔开, 各小区独立排灌。每年 4 月中下旬移栽早稻, 7 月中旬收获; 7 月下旬移栽晚稻, 10 月下旬收获。试验处理: 1) 不施肥 (CK); 2) 磷钾肥 (PK); 3) 氮磷肥 (NP); 4) 氮钾肥 (NK); 5) 氮磷钾肥 NPK; 6) 70% 化肥 + 30% 有机肥 (70F + 30M); 7) 50% 化肥 + 50% 有机肥 (50F + 50M); 8) 30% 化肥 + 70% 有机肥 (30F + 70M), 处理 6)、7)、8) 中 30%、50% 及 70% 配施比例是根据氮肥用量计算, 磷和钾用化肥补足。

早稻施用纯 N、P₂O₅ 和 K₂O 量分别为 150、60 和 150 kg/hm²; 晚稻施用纯 N、P₂O₅ 和 K₂O 量分别为 180、60 和 150 kg/hm²。早晚稻氮、磷和钾化肥施用品种相同, 分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾, 有机肥品种分别为紫云英和腐熟猪粪, 紫云英 N、P₂O₅ 和 K₂O 含量分别为 0.30%、0.08% 和 0.23%, 腐熟猪粪分别为 0.45%、0.19% 和 0.60%。磷肥和有机肥全部作基肥; 化学氮肥 50% 作基肥, 25% 作分蘖肥, 25% 作幼穗分化肥; 钾肥 50% 作分蘖肥, 50% 作幼穗分化肥。

1.3 土壤样品采集及分析方法

早晚稻分小区单打单收, 测定产量。于 2012 年晚稻收获后, 采用多点混合取样法用土钻在各小区采集 0—20 cm 土层土壤样品, 剔除石块、植物残根等杂物, 混合装袋带回实验室, 一部分土壤样品在 4℃ 冷藏保存, 进行土壤微生物性质测定; 其余土壤

样品自然风干, 研磨、过筛分装以备测定土壤养分含量和 pH 值。用环刀在各小区采集原状土, 测定土壤容重和土壤孔隙度。

参照《土壤农业化学分析方法》^[29] 进行土壤指标测定: 土壤 pH 用 pH 计法, 有机质用油浴加热—重铬酸钾容量法, 全氮用凯氏定氮法, 全磷用高氯酸—硫酸—钼锑抗比色法, 碱解氮用 1.0 mol/L NaOH 碱解扩散法, 速效钾用 1.0 mol/L NH₄OAc—火焰光度计法, 有效磷用 Olsen 法; 细菌、真菌和放线菌数量采用稀释平板法, 分别用牛肉膏蛋白胨、孟加拉红和高氏 1 号培养基。

1.4 数据处理

原始数据经 Excel 2010 软件整理后, 运用 SPSS 19.0 软件进行 LSD 法多重比较、相关性分析、主成分分析及聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥制度对红壤性双季稻田土壤质量评价指标的影响

2.1.1 土壤物理指标 连续施肥 28 年, 不同施肥制度下土壤物理性质发生了显著变化 (图 1)。施肥处理较不施肥处理土壤容重显著降低, 降低了 4.0%~23.8%, 土壤孔隙度显著增加, 增加了 5.0%~14.8%, 且差异均达显著性水平 ($P < 0.05$); 化肥处理 (PK、NP、NK 和 NPK) 间土壤容重差异不显著; 有机-无机配施处理 (70F + 30M、50F + 50M 和 30F + 70M)

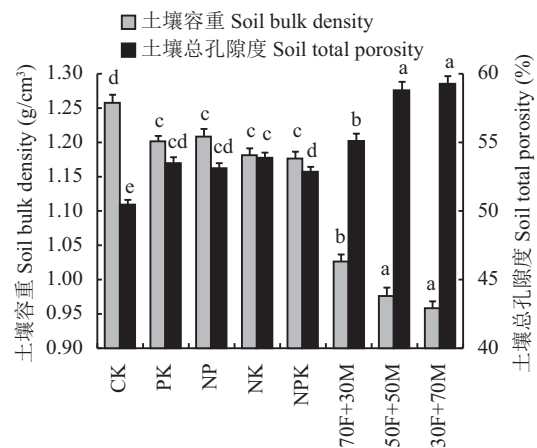


图 1 不同施肥制度对土壤物理性质的影响

Fig. 1 Effects of different fertilization systems on soil physical properties

[注 (Note): 柱上不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different letters above the bars indicate significant difference among the treatments ($P < 0.05$).]

较化肥处理 (PK、NP、NK 和 NPK) 土壤容重显著降低 ($P < 0.05$), 降低幅度为 12.7%~20.6%, 土壤孔隙度显著增加, 增加幅度为 2.3%~17.4%, 且随有机肥配施比例的增加, 土壤容重降低, 土壤总孔隙度增大, 但配施 70% 有机肥和 50% 有机肥处理间差异未达到显著水平。由此可知, 施肥均有疏松土壤、改善土质、增加土壤通气性能的作用, 其中配施有机肥效果更优。在 4 个均衡施肥处理 (NPK、70F + 30M、50F + 50M 和 30F + 70M) 中, 以均衡施化肥 (NPK) 的土壤容重最高, 配施 30% 有机肥处理次之, 配施 70% 有机肥处理最低, 呈现出随着有机肥配施比例的增而显著减小的变化趋势; 土壤总孔隙度变化趋势与之相反。表明增施有机肥是降低土壤容重、增加土壤孔隙度的主要原因, 长期有机-无机配施与单纯施用化肥相比可有效改善土壤物理性质。

2.1.2 土壤化学指标 不同施肥制度下土壤基础肥力指标及 pH 结果 (表 1) 显示, 长期施肥较不施肥处理, 土壤基础肥力指标均有不同程度的提高。具体表现在: 与 CK 相比, 化肥处理可以提高土壤有机质含量, 增加幅度为 3.8%~17.2%, 其中 NP 处理土壤有机质含量最高, 与 CK 具有显著性差异, 其他处理虽增加了有机质含量, 但影响程度均未达到显著性水平。化肥处理间比较, NP 和 NK 有机质含量差异显著, 其他处理间均差异不显著; 化肥处理土壤全氮和碱解氮含量较 CK 均有不同程度的增高, 增高幅度范围分别为 14.9%~29.8% 和 8.5%~51.7%, 施氮处理 (NP、NK 和 NPK) 较缺氮处理 (PK) 土壤全氮和碱解氮含量均显著提高, 但施氮的 3 个处理间差异不显著; 除缺磷处理 (NK) 土壤全磷和有效磷与

不施肥处理没有显著差异外, 施磷处理 (NP、PK 和 NPK) 均显著提高, 提高幅度分别为 92.0%~110.0% 和 1.94~2.92 倍; 施钾处理 (PK、NK 和 NPK) 土壤速效钾含量较 CK 显著提高, 提高幅度为 62.3%~137.7%, 其中 PK 处理提高幅度最大; 施化肥各处理 (PK、NP、NK 和 NPK) pH 显著低于 CK, NPK 处理 pH 最低, 较对照降低了 0.46, 其次是 NP 和 NK 处理, 分别降低了 0.33 和 0.35, 施氮处理 (NP、NK 和 NPK) pH 均低于缺氮处理 (PK), 差异均达到显著性水平 ($P < 0.05$), 可见长期施化肥尤其是氮素化肥会加速土壤酸化。

经过 28 年连续施肥, 4 个平衡施肥处理间土壤养分含量和 pH 产生了显著差异, 与 NPK 相比, 配施有机肥显著提高了土壤有机质含量, 提高幅度为 22.5%~41.8%, 不同配比条件下提高幅度不同, 土壤有机质含量随有机肥配施比例的提高而增加; 全氮和碱解氮与土壤有机质呈现出相似规律, 与 NPK 相比, 配施有机肥较化肥处理, 可以提高土壤全氮和碱解氮含量, 提高幅度分别为 9.8%~20.9% 和 11.1%~30.3%, 以高比例配施有机肥处理 (30F + 70M) 的全氮和碱解氮含量最高, 分别为 1.85 g/kg 和 181.38 mg/kg, 低比例 (70F + 30M) 和中比例 (50F + 50M) 配施有机肥处理较化肥处理虽然有提高土壤全氮和碱解氮含量的趋势, 但差异未达到显著水平, 且低比例 (70F + 30M) 和中比例 (50F + 50M) 配施有机肥的 2 个处理间差异不显著, 高比例 (30F + 70M) 和中比例 (50F + 50M) 配施有机肥处理间差异同样不显著, 但高比例 (30F + 70M) 与低比例 (70F + 30M) 配施有机肥处理相比, 差异达显著水平, 这表明在

表 1 不同施肥制度对土壤化学性质的影响

Table 1 Effect of different fertilization systems on soil chemical properties

处理 Treatment	有机质 (g/kg) OM	全氮 (g/kg) Total N	全磷 (g/kg) Total P	碱解氮 (mg/kg) Avail. N	有效磷 (mg/kg) Avail. P	速效钾 (mg/kg) Avail. K	pH
CK	22.25 d	1.21 e	0.50 d	95.99 c	10.92 e	36.45 c	5.83 a
PK	24.36 cd	1.39 d	0.96 c	104.19 c	42.85 c	110.42 a	5.77 b
NP	26.08 c	1.57 bc	1.05 c	145.65 b	40.05 c	52.53 bc	5.48 d
NK	23.09 d	1.47 c	0.47 d	132.47 b	11.72e	83.65 ab	5.50 cd
NPK	25.71 cd	1.53 bc	0.99 c	139.22 b	32.06 d	75.38 b	5.39 e
70F + 30M	31.50 b	1.68 b	1.10 c	154.67 b	74.09 b	57.38 bc	5.58 bc
50F + 50M	34.43 ab	1.76 ab	1.42 b	160.31 ab	83.09 a	53.11 bc	5.55 c
30F + 70M	36.45 a	1.85 a	1.70 a	181.38 a	88.29 a	52.60 bc	5.87 a

注 (Note): 数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$).

等氮量条件下配施有机肥比纯化肥处理显著增加氮素库容;与化肥处理相比,配施有机肥可以提高土壤全磷和有效磷含量,且提高幅度随有机肥配施比例的增高而增加,提高幅度分别为 11.1%~71.7% 和 1.31~1.75 倍,低比例配施有机肥处理 (70F + 30M) 未能显著提高全磷含量,但显著提高了有效磷含量,总之,配施有机肥处理较纯化肥处理能够显著提高土壤供磷能力。4 个平衡施肥处理间,土壤速效钾含量差异不显著,且配施有机肥处理的速效钾含量低于化肥处理,可能因外源提供钾素不足,而配施有机肥促进了作物对钾素的吸收利用所致;与化肥处理相比,配施有机肥处理可以显著提高土壤 pH 0.19~0.48 个单位,表明配施有机肥可以有效减缓土壤的酸化趋势。

2.1.3 土壤生物指标 连续施肥 28 年后,不同施肥制度下土壤细菌、真菌和放线菌数量发生了显著变化 (表 2)。配施有机肥处理的细菌、真菌和放线菌数量显著高于不施肥处理,分别提高了 0.94~2.68 倍、1.67~3.43 倍和 1.22~1.53 倍,其中高比例配施有机肥处理提高幅度均最大。高比例配施有机肥处理,细菌数量与低、中比例配施有机肥处理间存在显著性差异,而中、低比例配施有机肥的两个处理间差异不显著。3 个配施有机肥处理真菌数量相互间差异显著,放线菌数量无显著差异。

2.1.4 土壤质量评价指标相关关系 对上述土壤物理、化学和生物学性质进行相关性分析 (表 3) 表明,有机质、全氮、全磷、碱解氮及有效磷均与各土壤物理性质 (土壤容重和总孔隙度) 及生物学性质 (细菌、真菌及放线菌数量) 呈很好的相关性,其中

土壤有机质与各物理和生物学性质呈极显著相关性,且有机质、全氮、全磷、碱解氮及有效磷之间存在显著或极显著相关性;土壤容重与总孔隙度呈极显著负相关,表征生物学性质的 3 个指标间存在显著或极显著正相关;速效钾、pH 与其他指标间相关系数未达到显著水平。分析速效钾与其他指标相关性不显著的原因可能为,本试验设计的钾肥施用量偏低,致使钾素亏缺,不同施肥处理下土壤速效钾含量差异较小,施肥对土壤钾库影响不显著。pH 与其他指标不存在显著相关性,但与速效钾、有效磷和全磷的相关性相对较强,且呈现负相关关系,表明磷肥施用在一定程度上导致土壤酸化。

2.2 不同施肥制度红壤性双季稻田土壤质量评价

由上文对土壤物理、化学和生物学性质分析结果可知,土壤属性指标在不同施肥处理间的变化趋势存在差异,故不能简单地通过一个或几个土壤性质指标对土壤质量进行评价,因此需要对土壤质量进行综合评价。各指标相关分析结果表明,各指标间存在不同程度的相关性,直接利用上述指标对土壤质量进行综合评价将会产生信息重叠,使评价结果出现偏差,不能对不同施肥制度条件下的土壤质量状况进行科学评价。下面以主成分分析综合得分法来综合评价不同施肥制度对土壤质量的影响程度。评价过程:以上述 2 个土壤物理指标、7 个化学指标和 3 个微生物指标构建原始数据矩阵,经过数据标准化处理,分别求主成分的方差贡献率及累积贡献率,选择主成分个数,然后求出相关矩阵的特征向量,建立主成解释释表达式,然后计算各主成分得分和综合得分,根据综合得分评价土壤质量。

表 2 不同施肥制度对土壤细菌、真菌和放线菌数量的影响

Table 2 Effects of different fertilization systems on quantities of soil bacteria, fungi and actinomycetes

处理 Treatment	细菌 ($\times 10^7$ cfu/g) Bacterium	真菌 ($\times 10^4$ cfu/g) Fungus	放线菌 ($\times 10^6$ cfu/g) Actinomycete	微生物总量 ($\times 10^7$ cfu/g) Total microbial
CK	1.16 ± 0.49 cd	0.88 ± 0.22 de	1.63 ± 0.35 c	1.32 ± 0.53 cd
PK	0.73 ± 0.22 d	0.63 ± 0.17 de	1.47 ± 0.51 c	0.87 ± 0.21 d
NP	0.52 ± 0.16 d	0.72 ± 0.20 de	2.07 ± 0.35 bc	0.73 ± 0.15 d
NK	0.80 ± 0.24 d	0.49 ± 0.15 e	1.97 ± 0.40 bc	1.00 ± 0.25 d
NPK	1.55 ± 0.16 c	1.07 ± 0.31 d	2.7 ± 0.36 b	1.82 ± 0.13 c
70F + 30M	2.25 ± 0.23 b	2.35 ± 0.40 c	4.13 ± 0.57 a	2.67 ± 0.19 b
50F + 50M	2.79 ± 0.57 b	3.00 ± 0.40 b	3.63 ± 0.47 a	3.15 ± 0.57 b
30F + 70M	4.27 ± 0.55 a	3.90 ± 0.57 a	4.07 ± 0.72 a	4.68 ± 0.51 a

注 (Note): 数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

表 3 各土壤质量指标相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficients matrix among soil quality indices

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂
X ₁	1.00											
X ₂	-0.95**	1.00										
X ₃	-0.97**	0.92**	1.00									
X ₄	-0.92**	0.91**	0.93**	1.00								
X ₅	-0.84**	0.84**	0.92**	0.88**	1.00							
X ₆	-0.86**	0.83*	0.88**	0.98**	0.81*	1.00						
X ₇	-0.93**	0.88**	0.97**	0.89**	0.94**	0.79*	1.00					
X ₈	0.24	-0.12	-0.34	-0.20	-0.19	-0.31	-0.21	1.00				
X ₉	0.06	-0.02	-0.06	-0.07	-0.20	0.05	-0.20	-0.37	1.00			
X ₁₀	-0.90**	0.82*	0.91**	0.79*	0.81*	0.77*	0.82*	-0.39	0.06	1.00		
X ₁₁	-0.95**	0.87**	0.97**	0.84**	0.86**	0.80*	0.90**	-0.43	0.03	0.98**	1.00	
X ₁₂	-0.93**	0.78*	0.92**	0.88**	0.77*	0.87**	0.86**	-0.39	-0.13	0.86**	0.90**	1.00

注 (Note): X₁、X₂、...、X₁₂ 分别为容重、总孔隙度、有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾、pH 值、细菌、真菌和放线菌数量; * 代表差异显著 ($P < 0.05$), ** 代表差异极显著 ($P < 0.01$) X₁, X₂, ..., and X₁₂ represent bulk density, total porosity, organic matter, total N, total P, available N, available P, available K, pH, bacteria, fungi and actinomycetes counts; * indicates significant difference ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant difference ($P < 0.01$).

2.2.1 土壤质量的主成分分析 土壤质量各指标具有不同的含义, 因而在数量级和量纲上都不同, 为了保证其客观性和科学性, 需对原始数据矩阵进行标准化处理, 采用 Z-score 方法对原始数据进行标准化。对标准化的数据计算特征值及其方差贡献率和累积方差贡献率 (表 4), 根据特征值大于 1 的原则选取主成分, 据此本文提取了 2 个主成分, 第 1 和 2 个主成分对总方差的贡献率分别为 75.8% 和 11.6%, 前 2 个主成分累积方差贡献率为 87.4%, 特征值之和为 10.50, 即前 2 个主成分可以反映出土壤全部指标提供信息的 87.4%。

表 4 主成分特征根和贡献率

Table 4 Eigenvalues and variance contributions of the principal components

主成分 Component	特征值 Eigenvalue	贡献率 (%) Contribution	累计贡献率 (%) Cumulative contribution
1	9.10	75.8	75.8
2	1.40	11.6	87.4
3	0.64	5.3	92.7
4	0.39	3.2	95.9
5	0.25	2.1	98.0
6	0.14	1.2	99.2
7	0.09	0.8	100.0

主成分因子载荷是主成分因子与原始变量因子之间的相关系数, 因子负荷越大, 变量在相应主成分中的权重就越大, 由土壤性质在第 1 和第 2 主成分 (PC₁ 和 PC₂) 上的因子载荷 (图 2) 可以看出, 有机质、真菌、全氮、有效磷、放线菌、总孔隙度、细菌、全磷和碱解氮在 PC₁ 上有较高载荷值, 且均为正向负荷, 载荷值均高于 0.9, 说明以上土壤指标与 PC₁ 相关性较高, 显著影响土壤质量高低, 且为正效应; 容重在第一主成分的载荷值为负, 值为 -0.975, 说明土壤容重亦显著影响土壤质量, 且为负效应, 即土壤容重增大可以显著降低土壤质量; pH 在 PC₂ 上载荷值为 -0.876, 载荷值较大, 且为负值, 而 PC₂ 贡献率为 11.6%, 说明土壤 pH 值同样是影响土壤质量的重要因子, 且是负效应; 速效钾在 PC₂ 上具有较高正向载荷值。由以上分析可知, 对双季稻的土壤质量系统来说, 本文选取的 12 个土壤质量指标在上述两个主成分上均有较高因子载荷, 表明用这两个主成分可以反映由上述土壤物理、化学和生物学指标所表征的土壤质量水平的高低。

主成分载荷矩阵除以主成分相对应特征值算术平方根, 即为各个主成分中每个指标所对应的系数, 也就是主成分的特征向量。各主成分的特征向量与各土壤指标标准化后数据的乘积之和可以得出 2 个主成分解析表达式:

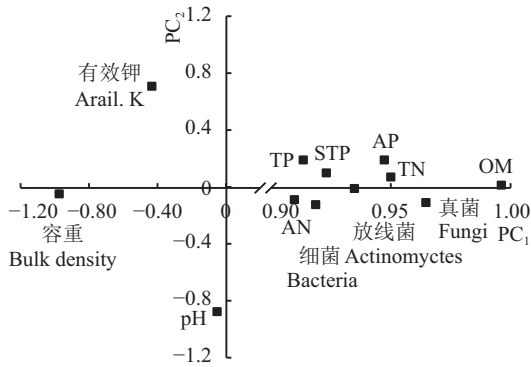


图 2 土壤性质在 PC₁ 和 PC₂ 的因子负荷分布图

Fig. 2 Correlation between soil property and principal component in projection of components 1 and 2

[注 (Note): TP—全磷 Total P; STP—总孔隙度 Soil total porosity; AP—有效磷 Avail. P; TN—全氮 Total N; OM—有机质 Organic matter.]

$$F_1 = -0.324X_1 + 0.307X_2 + 0.330X_3 + 0.316X_4 + 0.305X_5 + 0.300X_6 + 0.317X_7 - 0.133X_8 - 0.030X_9 + 0.303X_{10} + 0.318X_{11} + 0.310X_{12} \quad (1)$$

$$F_2 = -0.006X_1 - 0.051X_2 + 0.025X_3 - 0.025X_4 - 0.128X_5 + 0.108X_6 - 0.127X_7 - 0.615X_8 + 0.739X_9 + 0.138X_{10} + 0.128X_{11} + 0.043X_{12} \quad (2)$$

式中: F_1 和 F_2 分别为第一、二主成分得分, X_1, X_2, \dots, X_{12} 分别为容重、总孔隙度、有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾、pH 值、细菌、真菌和放线菌进行标准化后的数值。

将标准化的数据代入式 (1)、(2) 获得不同施肥制度下第一和第二主成分得分 (图 3)。

结果显示, 在以 PC_1 为代表的土壤质量水平上, 不同施肥处理对土壤质量变化影响的大小顺序为 $30F + 70M > 50F + 50M > 70F + 30M > NPK > NP > PK > NK > CK$; 在以 PC_2 为代表的土壤质量水平上, 不同施肥处理对土壤质量变化影响的大小顺序为 $30F + 70M > CK > NP > NK > 70F + 30M > 50F +$

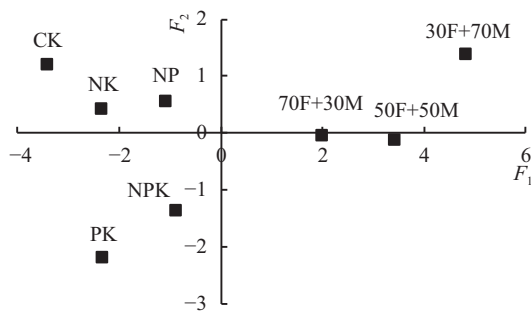


图 3 不同施肥处理下土壤在 PC₁ 和 PC₂ 的得分分布图
Fig. 3 Distribution of scores from different fertilization soil on PC₁ and PC₂

$50M > NPK > PK$ 。不同施肥制度下土壤质量在两个主成分上的排序差异显著, 主要因影响两个主成分的影响因子存在差异所致。

以每个主成分所对应的特征值占所提取主成分总的特征值之和的比例作为权重, 计算主成分综合表达式:

$$F = \frac{E_1}{E_1 + E_2} F_1 + \frac{E_2}{E_1 + E_2} F_2 \quad (3)$$

式中: F 为主成分综合得分; E_1, E_2 分别为第一和第二主成分的特征值。

将 2 个主成分特征值代入式 (3), 结合式 (1) 和 (2) 获得主成分综合得分解析表达式:

$$F = -0.280X_1 + 0.260X_2 + 0.290X_3 + 0.270X_4 + 0.248X_5 + 0.275X_6 + 0.258X_7 - 0.197X_8 + 0.073X_9 + 0.281X_{10} + 0.293X_{11} + 0.274X_{12} \quad (4)$$

将标准化的数据代入式 (4) 计算获得不同施肥制度下主成分综合得分 (图 4), 对土壤质量做出综合评价。不同施肥处理对土壤质量变化影响的大小顺序为: $30F + 70M > 50F + 50M > 70F + 30M > NPK > NP > NK > PK > CK$ 。由此可知, 施肥处理土壤质量均优于不施肥处理; 施肥处理中均衡施肥优于不均衡施肥; 均衡施肥处理中, 有机-无机配施处理优于化肥处理, 且随有机肥配施比例增大而升高; 不均衡施肥处理中, 缺氮处理质量水平最低, 其次是缺磷处理。

2.2.2 不同施肥制度下红壤性双季稻田土壤质量等级划分 以各处理的主成分综合得分作为评价其肥力的新指标, 以欧氏距离衡量各处理肥力差异大小, 采用最短距离法对各处理土壤质量水平的亲疏相似程度进行系统聚类。

由聚类树形图 (图 5) 可直观地看出各施肥方式

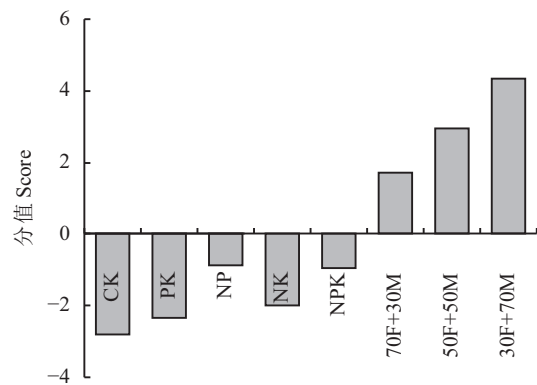


图 4 不同施肥处理下土壤在 PC₁ 和 PC₂ 的综合得分
Fig. 4 General scores of different fertilization soil in PC₁ and PC₂

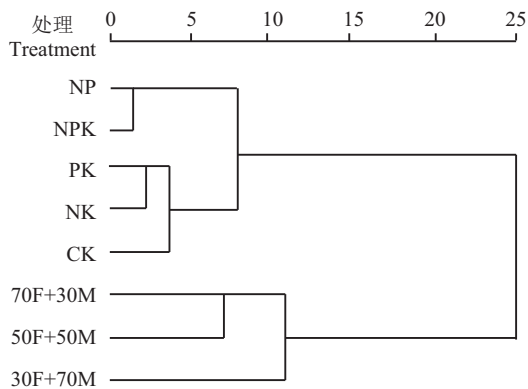


图 5 聚类树形图

Fig. 5 Arborescence of cluster analysis

的归类情况: $30F + 70M > 50F + 50M$ 、 $70F + 30M > NPK$ 、 $NP > NK$ 、 PK 、 CK 。即 8 种不同施肥制度下土壤质量水平划分为 4 个等级: 一级 ($30F + 70M$); 二级 ($50F + 50M$ 、 $70F + 30M$); 三级 (NPK 、 NP); 四级 (NK 、 PK 、 CK)。有机肥施用能显著提高土壤质量水平, 高比例配施有机肥处理的土壤质量等级高于中、低比例配施, 而中、低 2 个比例配施有机肥处理的土壤质量属于相同等级, 说明在本文土壤质量综合评价系统下, 高比例配施有机肥提高土壤质量等级效果优于中、低比例配施, 而中、低比例配施效果相同; NPK 和 NP 两个处理的土壤质量属于同一个等级, 说明在本试验设计的钾肥施用量下, 钾肥施用对土壤质量等级的提升效果不显著; 缺氮 (PK) 和缺磷 (NK) 处理土壤质量等级与不施肥处理 (CK) 处于相同等级, 且土壤质量等级最低, 说明氮肥和磷肥对提升红壤性双季稻田土壤质量的重要性, 表明平衡施肥是提升红壤性双季稻田土壤质量等级的关键。

3 讨论

土壤质量是众多土壤物理、化学和生物学性质以及形成这些性质的一些重要过程的综合体现^[30], 能综合反映土壤特性, 是揭示土壤条件动态变化的最敏感指标^[31]。国内外已在土壤质量评价指标体系和评价方法方面开展了大量的研究工作, 但目前尚未有统一的土壤质量评价标准, 也没有固定的方法。早期的评价方法主要是利用简单相关性分析论述单项土壤性质与土壤质量的关系。近年来, 随着统计学在相关领域的应用, 主成分分析和聚类分析法在土壤质量评价中得到大量的应用^[32-35], 此方法能够减少计算量, 降低主观随意性, 增强了土壤质量评价的

可靠性。本研究利用主成分分析方法, 将原始表征土壤物理、化学和生物学性质的 12 个指标降维、提取出 2 个主成分, 累计贡献率达 87.4%, 有机质、容重、真菌、全氮、有效磷、放线菌、总孔隙度、细菌、全磷和碱解氮在第一主成分上有较高载荷值, pH 和速效钾在第二主成分上有较高载荷, 2 个主成分涵盖了土壤物理、化学和生物学指标, 原变量信息整体无丢失, 因此, 利用文中所选取的 2 个土壤物理指标, 7 个基础化学指标和 3 个生物学指标对长期不同施肥制度下红壤性双季稻田土壤质量进行评价是可靠的。

在长期不同施肥制度下的双季稻田的主成分综合得分产生较大差异, 本研究把主成分综合得分聚类分析, 将 8 个不同施肥处理下的土壤质量分为四个等级, 高质量等级 ($30F + 70M$); 较高质量等级 ($50F + 50M$ 、 $70F + 30M$); 中等质量等级 (NPK 、 NP); 低质量等级 (NK 、 PK 、 CK)。由土壤质量等级划分可以得出, 施肥处理土壤质量均优于不施肥处理; 施肥处理中均衡施肥优于不均衡施肥; 均衡施肥处理中, 有机-无机配施处理优于化肥处理, 且随有机肥配施比例增大而升高; 不均衡施肥处理中, 缺 N 处理质量水平最低, 其次是缺磷处理, 可见施肥结构对双季稻田土壤质量高低水平的影响显著, 聂军等^[23]和陈吉等^[35]也得到类似结论。

本研究表明, 在等氮量条件下, 长期有机-无机配施在提升稻田土壤质量方面优于纯化肥, 且配施 70% 有机肥土壤质量优于配施 50% 和 30%, 即有机肥施用比例增加, 提升土壤质量效果更显著^[36], 由此可知, 有机-无机配施提升土壤质量的原因主要是有机肥的作用。大量研究表明, 有机肥可以改善土壤结构性能, 提高土壤养分供应能力, 减缓土壤酸化, 提高土壤微生物数量, 对改土培肥, 提高土壤质量具有积极作用^[7, 13]。但近年来有关施用有机肥尤其是畜禽粪便会增加土壤重金属含量^[37], 促进稻田甲烷排放^[38], 提高磷素潜在环境风险^[39], 且随施用量增加其危险性越强等负面报道增多, 故在有机-无机配施中应当注意配施比例。本研究未考虑施肥对环境的影响, 下一步应当注重施肥对土壤及周边环境影响, 以更全面地评价施肥对土壤质量的影响, 为提升土壤质量, 保障环境健康, 建立科学友好的施肥制度提供科学依据。

4 结论

在不同化肥与有机肥配施比例下, 红壤性双季稻田的物理、化学和生物学性质均发生了较大变

化。长期施肥显著降低了土壤容重,增加了土壤总孔隙度,在等氮量投入下,有机-无机配施较单施化肥的效果更显著。有机-无机配施在提高土壤有机质、氮和磷养分含量,延缓土壤酸化趋势,提高土壤微生物数量方面显著优于单施化肥。

土壤质量综合评价及聚类分析表明,有机-无机配施优于纯化肥,且土壤质量随有机肥配施比例增加而提高,不均衡施肥提升土壤质量不显著,缺氮施肥处理最低。由此可见,对于红壤性双季稻田而言,有机肥和无机肥配施有利于培肥土壤,提升土壤质量,且有机肥配施比例越高,效果越好,是提升红壤性双季稻田土壤质量的优化施肥措施。

参 考 文 献:

- [1] Chen J, Chen J. Rapid urbanization in China: A real challenge to soil protection and food security[J]. *Catena*, 2007, 69(1): 1-15.
- [2] Tan M, Li X, Xie H, *et al.* Urban land expansion and arable land loss in China—a case study of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Land Use Policy*, 2005, 22(3): 187-196.
- [3] 李琳, 温珍梁. 土壤质量和国家粮食安全[J]. *农业考古*, 2006, (6): 277-280.
- Li L, Wen Z L. Soil quality and national food security[J]. *Archaeology Agriculture*, 2006(6): 277-280.
- [4] 曹志洪, 史学正. 提高土壤质量是实现我国粮食安全保障的基础[J]. *科学新闻*, 2001, (46): 9-10.
- Cao Z H, Shi X Z. Improving the soil quality is the basis of realizing China's food security[J]. *Science News*, 2001(46): 9-10.
- [5] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China[J]. *Plant Production Science*, 2015, 12(1): 3-8.
- [6] Yadav R L, Dwivedi B S, Prasad K, *et al.* Yield trends, and changes in soil organic-C and available NPK in a long-term rice-wheat system under integrated use of manures and fertilizers[J]. *Field Crops Research*, 2000, 68(3): 219-246.
- [7] 廖育林, 郑圣先, 聂军, 等. 长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(10): 3541-3550.
- Liao Y L, Deng S X, Nie J, *et al.* Effects of long-term application of fertilizer and rice straw on soil fertility and sustainability of a reddish paddy soil productivity[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(10): 3541-3550.
- [8] Ju X T, Xing G X, Shen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [9] 张智, 李小坤, 丛日环, 等. 稻田优化施肥效果与氮、磷环境效益评价[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(5): 906-915.
- Zhang Z, Li X K, Cong R H, *et al.* Optimized fertilization effects and environmental benefits evaluation of nitrogen and phosphorus in the paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(5): 906-915.
- [10] 郭腾飞, 梁国庆, 周卫, 等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的
- 影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 337-345.
- Guo T F, Liang G Q, Zhou W, *et al.* Effect of fertilizer management on greenhouse gas emission and nutrient status in paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(2): 337-345.
- [11] 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, 等. 长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1615-1621.
- Zhou X Y, Xu M G, Zhou S W, *et al.* Soil acidification characteristics in southern China's croplands under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1615-1621.
- [12] 刘禹池, 曾祥忠, 冯文强, 等. 稻-油轮作下长期秸秆还田与施肥对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1450-1459.
- Liu Y C, Zeng X Z, Feng W Q, *et al.* Effects of long-term straw mulch and fertilization on crop yields and soil physical and chemical properties under rice-rape seed rotation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6): 1450-1459.
- [13] 鲁艳红, 杨曾平, 郑圣先, 等. 长期施用化肥、猪粪和稻草对红壤水稻土化学和生物化学性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(4): 921-929.
- Lu Y H, Yang Z P, Zheng S X, *et al.* Effects of long-term application of chemical fertilizer, pig manure, and rice straw on chemical and biochemical properties of reddish paddy soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4): 921-929.
- [14] 汪吉东, 张辉, 张永春, 等. 连续施用不同比例鸡粪氮对水稻土有机质积累及土壤酸化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1178-1185.
- Wang J D, Zhang H, Zhang Y C, *et al.* Effect of different ratios of chicken manure N on organic matter accumulation and acidification of paddy soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1178-1185.
- [15] 徐明岗, 梁国庆, 张夫道. 中国土壤肥力演变[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006.
- Xu M G, Liang G Q, Zhang D F. Evolution of soil fertility in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006.
- [16] Pu S, Li D C, Gao J S, *et al.* Effects of long-term application of sulfur-containing and chloride-containing chemical fertilizers on rice yield and its components[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(5): 747-753.
- [17] 董春华, 曾闹华, 高菊生, 等. 长期不同施肥模式下红壤性稻田水稻产量及有机碳含量变化特征[J]. *中国水稻科学*, 2014, 28(2): 193-198.
- Dong C H, Zeng N H, Gao J S, *et al.* Effects of different fertilization models on rice yield and soil organic carbon content in a long period in red soil paddy field[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(2): 193-198.
- [18] 董春华, 曾希柏, 刘强, 等. 有机无机肥配施对晚稻产量和杂草群落的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(9): 1815-1823.
- Dong C H, Zeng X B, Liu Q, *et al.* Effects of combined application of organic and inorganic fertilizer on weed community and late rice yield[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(9): 1815-1823.

- [19] Abedin M J, Bhuiyan N I, Zaman S K, *et al.* Long-term effects of inorganic fertilizer sources on yield and nutrient accumulation of lowland rice[J]. *Field Crops Research*, 2004, 86(1): 53–65.
- [20] 吴晓晨, 李忠佩, 张桃林. 长期不同施肥措施对红壤水稻土有机碳和养分含量的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(5): 2019–2023.
Wu X C, Li Z P, Zhang Y L. Long-term effect of fertilization on organic carbon and nutrients content of paddy soils in red soil region[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(5): 2019–2023.
- [21] 徐丽丽, 王秋兵, 张心昱, 等. 不同施肥处理对红壤丘陵区水稻土养分状况的影响[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(11): 1890–1898.
Xu L L, Wang Q B, Zhang X Y, *et al.* Effects of different fertilization treatment on paddy soil nutrients in red soil hilly region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(11): 1890–1898.
- [22] Xin X, Zhang J, Zhu A, *et al.* Effects of long-term (23 years) mineral fertilizer and compost application on physical properties of fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 156: 166–172.
- [23] 聂军, 郑圣先, 杨曾平, 等. 长期施用化肥、猪粪和稻草对红壤性水稻土物理性质的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(7): 1404–1413.
Nie J, Zheng S X, Yang Z P, *et al.* Effects of long-term fertilization on reddish paddy soil quality and its evaluation in a typical double-rice cropping region of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(7): 1404–1413.
- [24] Su J Q, Ding L J, Xue K, *et al.* Long-term balanced fertilization increases the soil microbial functional diversity in a phosphorus-limited paddy soil[J]. *Molecular Ecology*, 2015, 24(1): 136–150.
- [25] 夏昕, 石坤, 黄欠如, 等. 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 697–705.
Xia X, Shi K, Huang Q R, *et al.* The changes of microbial community structure in red paddy soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 697–705.
- [26] Tang Y S, En C I, Yan T M, *et al.* Effects of long-term site-specific fertilization on soil enzyme activities of paddy fields under wheat-rice rotation system in Taihu region[J]. *Soils*, 2008, 40(5): 732–737.
- [27] 颜慧, 钟文辉, 李忠佩, 等. 长期施肥对红壤水稻土磷脂脂肪酸特性和酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 71–75.
Yan H, Zhong W H, Li Z P, *et al.* Effects of long-term fertilization on phospholipid fatty acids and enzyme activities in paddy red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 71–75.
- [28] 邵兴华, 张建忠, 夏雪琴, 等. 长期施肥对水稻土酶活性及理化特性的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 74–77.
Shao X H, Zhang J Z, Xia X Q, *et al.* Effect of long-term fertilization on enzyme activities and chemical properties of paddy soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1): 74–77.
- [29] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [30] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, *et al.* Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(1): 4–10.
- [31] 卢铁光, 杨广林, 王立坤. 基于相对土壤质量指数法的土壤质量变化评价与分析[J]. *东北农业大学学报*, 2003, 34(1): 56–59.
Lu T G, Yang G L, Wang L K. Evaluation and analysis on soil quality changes based on relative soil quality index method[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2003, 34(1): 56–59.
- [32] Gong L, Ran Q, He G, *et al.* A soil quality assessment under different land use types in Keriya River Basin, Southern Xinjiang, China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 146: 223–229.
- [33] Govaerts B, Sayre K D, Deckers J. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 87(2): 163–174.
- [34] Vasu D, Singh S K, Ray S K, *et al.* Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India[J]. *Geoderma*, 2016, 282: 70–79.
- [35] 陈吉, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 主成分分析方法在长期施肥土壤质量评价中的应用[J]. *土壤*, 2010, 42(3): 415–420.
Chen J, Zhao B Z, Zhang J B, *et al.* Application of principal component analysis in evaluation of soil quality under different long-term fertilization[J]. *Soils*, 2010, 42(3): 415–420.
- [36] 张鹏, 贾志宽, 路文涛, 等. 不同有机肥施用量对宁南旱区土壤养分、酶活性及作物生产力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1122–1130.
Zhang P, Jia Z K, Lu W T, *et al.* Effects of organic fertilization on soil nutrient, enzyme activity and crop productivity in semi-arid areas of southern Ningxia[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5): 1122–1130.
- [37] Ociepa A, Pruszek K, Lach J, *et al.* Influence of long-term cultivation of soils by means of manure and sludge on the increase of heavy metals content in soils[J]. *Ecological Chemistry and Engineering*, 2008, 15(1): 103–109.
- [38] Iqbal J, Hu R G, Lin S, *et al.* CO₂ emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: a case study in Southern China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 131(3–4): 292–302.
- [39] 尹岩, 梁成华, 杜立宇, 等. 有机肥对稻田土壤磷素潜在环境风险的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013, (2): 11–16.
Yin Y, Liang C H, Du L Y, *et al.* Potential environmental risk of phosphorus in paddy soil as affected by organic fertilizer[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(2): 11–16.