

长期施肥对双季稻区红壤性水稻土质量的影响及其评价*

聂军^{1,3} 杨曾平^{1,2,3} 郑圣先^{1,3**} 廖育林^{1,2,3} 谢坚^{1,2} 向艳文¹

(¹ 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; ² 湖南农业大学资源与环境学院, 长沙 410128; ³ 农业部望城红壤水稻土生态环境重点野外科学观测实验站, 长沙 410125)

摘要 为量化 27 年连续施用化肥及其与猪粪、稻草配施处理对双季稻区土壤质量的影响, 选择土壤容重、最大持水量、孔隙度、标准化平均质量直径、pH、阳离子交换量、有效养分、土壤有机质、微生物生物量碳、土壤酶和作物生产力等项目作为评价指标, 并根据不同指标所具有的功能归纳为: 抗物理退化的能力、养分供应和贮藏的能力、抗生物化学退化的能力、保持作物生产力的能力 4 项功能, 以这 4 项功能为基础划分土壤质量指数 (SQI). 结果表明: SQI 等级范围为 0.544 (CK) ~ 0.729 (施氮磷钾肥+稻草处理). 与施氮磷钾肥 (NPK) 处理土壤相比, 长期非均衡施肥的 PK、NP、NK 处理土壤质量发生了退化. 土壤缺磷和缺钾是限制水稻生产力的主要因素, 即使每年施用 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 猪粪或 $4.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 稻草也不能达到满足高产水稻所需要的土壤磷、钾含量水平. 长期施用石灰对红壤水稻土质量的提升效果不明显. 在南方红壤水稻种植区, 氮、磷、钾与有机肥配施是提升土壤质量的最佳措施.

关键词 土壤质量指数 长期施肥 红壤性水稻土 猪粪 稻草

文章编号 1001-9332(2010)06-1453-08 **中图分类号** S153 **文献标识码** A

Effects of long-term fertilization on reddish paddy soil quality and its evaluation in a typical double-rice cropping region of China. NIE Jun^{1,3}, YANG Zeng-ping^{1,2,3}, ZHENG Sheng-xian^{1,3}, LIAO Yu-lin^{1,2,3}, XIE Jian^{1,2}, XIANG Yan-wen¹ (¹ Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; ² College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; ³ Ministry of Agriculture Key Field Monitoring Experimental Station for Reddish Paddy Soil Eco-environment in Wangcheng, Changsha 410125, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(6): 1453-1460.

Abstract: In order to quantify the effects of 27 years application of chemical fertilizers, pig manure, and rice straw on the reddish paddy soil quality in double rice cropping region, the indices of soil bulk density, porosity, maximum water holding capacity, normalized mean weight diameter, pH, cation exchange capacity, available nutrients, organic matter, microbial biomass C, enzyme activities, and rice yield were selected as the evaluation indicators, and classified into four functional groups, *i. e.*, resistance to physical degradation, plant nutrients supply and storage, resistance to biochemical degradation, and sustaining of crop productivity. The soil quality index (SQI) was calculated based on the four functional groups. The results showed that the SQI ranged from 0.544 in treatment CK to 0.729 in treatment NPK plus rice straw. Treatments PK, NP, and NK induced soil degradation, compared to treatment NPK. The deficiencies of soil P and K were the main limiting factors for the double rice productivity in reddish paddy soil area. Even though $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ of pig manure and $4.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ of rice straw were applied, the soil P and K were still not adequate for the requirement of rice growth. There was no obvious effect of long-term application of lime on the reddish paddy soil quality. The combined application of NPK with organic manure was an important and effective measure in improving soil quality in double rice cropping regions of Southern China.

Key words: soil quality index; long-term fertilization; reddish paddy soil; pig manure; rice straw.

* 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAD05B09) 和国际植物营养研究所 (IPNI) 项目 (Hunan-14) 资助.

** 通讯作者. E-mail: shengxianzheng@foxmail.com

2009-08-07 收稿, 2010-03-22 接受.

土壤是人类赖以生存发展的物质基础. 随着社会经济的发展, 人口-资源-环境间的矛盾日益尖锐, 土壤质量问题正不断受到世界范围内的广泛关注. 土壤质量与维持生态系统生产力和动植物健康而不发生土壤退化及其环境问题直接相关, 是土壤许多物理、化学和生物性质以及形成这些性质的一些重要过程的综合体现^[1-2]. 土壤利用方式及管理措施是影响土壤质量演变方向和强度的关键因子, 不合理的土壤管理措施会导致土壤有机质含量和质量下降^[3], 土壤结构破坏^[4], 土壤生物多样性和生物活性下降^[5-6], 从而加剧土壤退化. 许多研究表明, 连续施用化肥将导致土壤结构破坏, 土壤质量和生产力下降^[7-8]. 另一些研究则指出, 连续施用化肥对土壤生产力和质量表现出负面影响^[9]、正面影响^[10]或无明显影响^[11]; 而化肥和有机肥长期配合施用一般都能获得最好的产量^[12-13]. 由此可见, 作物产量、土壤肥力和生产力的可持续性受土地利用方式、耕作和施肥等多种因素的影响. 赖庆旺等^[14]通过 9 年定位试验研究表明, 红壤水稻土在连施特别是偏施化肥情况下, 随着有机和无机胶结物质的数量减少, 土壤结构遭到破坏, 容重增加, 孔隙度降低, 水稳性结构破坏率提高, 微团聚体分散系数上升, 致使土壤紧实, 耕性变坏, 土壤肥力衰退. 一般情况下, 施用有机肥和稻草的土壤有机质含量高于施用相同养分的无机肥料^[15]. 在灌溉稻田系统中, 有机肥与化肥配施的土壤容重减小, 有机质含量增加, 导水性提高, 土壤结构改善, 微生物多样性提高^[16-17]. 化肥与有机肥配施的土壤固碳潜力显著高于单施化肥处理, 化肥与有机肥配施是提高稻田生产力和土壤质量, 促进土壤固碳潜力和温室气体减排的双赢措施^[18]. 综上所述, 长期施用无机肥、有机肥和稻草等都对土壤质量有较大影响, 但研究结论不一.

红壤水稻土是在长期水耕熟化过程中, 经过一系列物理、化学和生物作用发育而成的, 是我国长江中游最典型的一种人为水耕土, 由于其在粮食生产中的重要地位, 相关研究受到长期重视. 但目前有关不同施肥措施对水稻土土壤质量影响的长期连续定位研究较少. 本文以位于长江中游红壤地区的长期肥力定位试验为平台, 研究长期不同施肥处理对红壤性水稻土土壤质量的影响, 旨在评价长期施用化肥、猪粪和稻草及水稻连作对水稻土壤质量的影响.

1 材料与方法

1.1 试验地点和试验设计

长期肥力定位试验点位于湖南省望城县黄金乡 (28°37' N, 112°80' E, 海拔高度为 100 m). 试验于 1981 年开始, 1981—2007 年的年均降雨量为 1385 mm, 年平均气温 17 °C, 年平均无霜期约 300 d. 供试土壤为第四纪红土发育的水稻土 (粉质轻粘土, 土壤分类为普通简育水耕人为土). 试验开始前 0 ~ 15 cm 土壤基本性状为: 土壤容重 $1.14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, pH 6.6, 有机质 $34.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全 N $2.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解 N $151.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全 P $0.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效 P $10.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全 K $10.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 交换性 K $62.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

该长期定位试验共设 9 个处理: 1) CK (不施任何肥料); 2) PK (施磷钾化肥); 3) NP (施氮磷化肥); 4) NK (施氮钾化肥); 5) NPK (施氮磷钾化肥); 6) NPK+Ca (施氮磷钾化肥+钙); 7) NK+PM (施氮钾化肥+猪粪); 8) NP+RS (施氮磷化肥+稻草); 9) NPK+RS (施氮磷钾化肥+稻草). 每处理 3 次重复, 共 27 个小区, 随机区组排列. 小区面积为 66.7 m^2 , 每个小区之间用 30 cm 宽水泥埂隔开, 区组之间的排水沟宽度为 50 cm, 区组之间用水泥埂隔开, 以避免灌溉水的串灌和处理之间的交叉污染. 试验的 N、P、K 化肥品种分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾. 在 1981—2007 年期间, 氮肥按早稻 $150 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、晚稻 $180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施入; 磷肥按早、晚稻每季 $38.7 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施入; 钾肥按早、晚稻每季 $99.6 \text{ kg K} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施入; 猪粪施用量按每年 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (含 N $54.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、P $60.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、K $34.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 施入; 稻草还田量按每年 $4.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (含 N $33.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、P $77.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 施入. 磷肥、钾肥、猪粪和稻草在耕田时撒施, 并混入土壤, 氮肥分两次施入: 70% 的 N 在插秧前 1 d 施入, 余下 30% 的 N 在分蘖期施入.

供试品种: 早稻为常规水稻品种, 晚稻为常规水稻品种或杂交水稻组合. 从试验开始, 早稻于 4 月底移栽, 7 月中旬收获; 晚稻于 7 月下旬移栽, 10 月下旬收获. 秧苗生长期为 30 ~ 35 d, 然后把秧苗移栽于试验小区. 常规稻每穴栽插 4 ~ 5 株秧苗, 杂交稻每穴栽插 1 ~ 2 株秧苗, 株行距 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$. 在早、晚稻生长期, 田面灌溉水保持在 5 ~ 8 cm, 水稻收获前 10 d 排水, 冬季休闲, 不进行灌溉和栽培作物. 其他田间管理措施与当地农民的大田管理相同.

1.2 土样采集与分析

土壤样品于 2007 年 11 月 5 日（晚稻收获后 2 周）采自于各处理小区. 取土之前, 移走小区内 的稻草残留物, 用不锈钢铲从每个小区中随机 采取 10 个样点, 剥除土块外面直接与不锈钢铲接触 而变形的土壤. 田间采集的原状土壤样品装 入硬质塑料盒内, 确保在运输过程中不受挤 压, 以保持原来的结构. 土样运回室内后, 在 室温下风干, 当土壤含水量达到土壤塑性时 (含水量 25% 左右), 用手轻轻地将土块沿 自然结构面掰成直径约 1 cm 的小块, 以免 受到机械压力而变碎. 除去粗根和小石块, 风干后用于土壤物理和化学性质分析. 同时 分别测定耕作层 (0 ~ 15 cm) 土壤容重、比 重、孔隙度和田间持水量.

土壤容重 (BD) 和孔隙度 (POR) 用环刀法、土粒密度 (SPD) 用比重瓶法、最大田间持水量 (MWHC) 用威尔科克斯法、水稳性团聚体用湿筛法测定^[19]; 土壤阳离子交换量 (CEC) 用醋酸铵法、pH 用电位法、电导率 (EC) 用铂电极直接测定法、土壤有机质 (SOM) 用重铬酸钾容量法、全 N (TN) 用浓硫酸-蒸馏滴定法、全 P (TP) 用氢氧化钠熔融-钼锑抗法、全 K (TK) 用氢氧化钠熔融-火焰光度法、碱解 N (AN) 用扩散法、有效 P (AP) 用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法、有效 K (AK) 用 NH₄OAc 浸提火焰光度法、有效硫 (AS) 用硫酸-乙酸-硫酸钡比浊法、有效 锌 (AZn) 用 DTPA 浸提-原子吸收分光光度法测定^[20]. 土壤可矿化 N (PMN) 按照 Waring 等^[21] 描述的方法测定. 微生物生物量 C (MBC)、脲酶 (URA)、转化酶 (ITA)、脱氢酶 (DHA)、酸性磷酸酶 (PHA) 和土壤呼吸 (SER) 按 Page 等^[22] 描述的方法测定.

1.3 土壤质量指标的确定

土壤质量指数的成功与否主要取决于对单个土壤性质关键值的设置. 土壤质量是物理、化学和生物等功能的综合体现. 本研究采用的土壤质量评价指标是通过分析 30 块低产、中产、高产和超高产水稻土获得的. 每项土壤质量指标值、基准值和上基线值是在测定低产、中产和超高产水稻土的基础上提出的. 最后定下阈值之后, 采用下列方程将长期早稻-晚稻-冬季休闲种植制度条件下的土壤性质值转换为 0 ~ 1 之间的无量纲值.

非线性评分 (y) = $1/[1 + e^{-b(x-A)}]$ (1)
式中: x 为土壤性质值; A 为基准值或评分等于 0.5 的土壤性质值; b 为斜率, 用这个方程对土壤指标进

行标准化时, 采用 3 类标准评分方程: 1) SSF1, 越多越好; 2) SSF2, 越少越好; 3) SSF3, 最适合范围. 方程将“越多越好”评分曲线定义为正斜率, 将“越少越好”定义为负斜率, 把最佳曲线定义为两者的结合. 将每种土壤质量指标的数值转换为范围从 0 ~ 1 的无量纲评分. 确定评分方程的下限、基准值和上限之后, 将各项土壤质量指标的测定值代入标准评分方程, 得到每个指标的标准得分值. 当测定的土壤性质处于最适合水平时, 土壤性质的得分等于 1; 当测定的土壤性质处于不合格质量等级时, 土壤性质的得分等于 0. 基准值为评分函数等于 0.5 和等于阈值土壤性质值的中点值, 基准值一般被认为是最小目标值. 最佳曲线有两个基线, 即下基线和上基线, 分别与生长曲线和致死曲线相对应^[23-24]. 最终的土壤质量指标 (SQI) 按照以下公式计算:

$$SQI = q_{\text{tpd}}(wt) + q_{\text{pns}}(wt) + q_{\text{rde}}(wt) + q_{\text{scp}}(wt)$$

(2)

式中: q_{tpd} 为土壤抗物理退化的能力; q_{pns} 为土壤供应养分和贮藏养分的能力; q_{rde} 为土壤抗生物化学退化的能力; q_{scp} 为保持作物生产力的能力; wt 为每项土壤功能的数值权重. 这些是依据在完成保持土壤质量的总体目标中的功能重要性设置的. 在本研究中的总体目标是保持作物产量. 所有土壤功能权重的总和等于 1, 每项土壤功能的数值是由许多土壤性质或土壤质量指标确定的.

1.4 可持续性产量指数 (SYI) 的计算

采用多年的产量数据, 按照下列方程, 计算出可持续性产量指数 (SYI)^[3]:

$$SYI = (y - \sigma_{n-1}) y_m^{-1}$$

式中: y 是平均产量; σ_{n-1} 是标准差; y_m 是同一管理条件下一组处理的最高产量.

1.5 数据处理

试验结果采用 Microsoft Excel 软件处理数据和制图, 并利用 SPSS 软件采用 Duncan 方法进行差异显著性检验.

2 结果与分析

2.1 长期施肥对红壤性水稻土物理指标的影响
连续种植 27 年 54 季水稻之后, 不同施肥处理之间耕层 (0 ~ 15 cm) 土壤容重表现出明显差异 (表 1). CK 处理土壤容重由试验前 (1980 年冬季) 的 1.14 g · cm⁻³ 增加到 1.19 g · cm⁻³; 长期施用 NP 和 NK 处理增加到 1.16 ~ 1.20 g · cm⁻³; 长期施用 NPK

表 1 长期施肥对红壤性水稻土物理指标的影响
Tab.1 Effect of long-term fertilization on physical indicators of reddish paddy soil

处理 Treatment	BD	SPD	MWHC	POR	NMWD
CK	1.10d	2.32a	18.5f	47.77cd	0.24h
PK	1.13c	2.28b	19.1e	50.29b	0.45g
NP	1.16b	2.28b	19.9d	48.98c	0.48f
NK	1.07e	2.21d	18.8ef	46.70d	0.56e
NPK	1.07e	2.26c	21.3c	52.65a	0.66d
NPK+Ca	1.26a	2.03f	16.4g	51.66ab	0.88a
NK+PM	1.08de	2.02f	22.5c	52.80a	0.72c
NP+RS	1.08de	2.14e	23.4b	50.78b	0.83b
NPK+RS	1.07e	2.03f	24.1a	51.28b	0.88a

BD: 容重 Bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); SPD: 土粒密度 Soil particle density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); MWHC: 最大持水量 Maximum water holding capacity (%); POR: 孔隙度 Porosity (%); NMWD: 标准化平均质量直径 Normalized mean weight diameter (mm). 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达显著水平 ($P<0.05$) Data with different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

处理较试验前土壤略有降低;NK+PM、NP+RS 和 NPK+RS 处理的土壤容重趋于下降,下降幅度平均达 6.5%. 长期施用化肥处理的土粒密度明显高于无机肥与猪粪和稻草配施处理,平均增幅 7.7%,表明长期施用化肥在淹水状况下土壤淀浆及结构程度加重. 不同处理土壤的标准化平均质量直径 (NMWD)存在明显差异,化肥与猪粪和稻草配施处理的 NMWD 值高于相应的单施化肥处理,差异达到显著水平;CK 处理的 NMWD 值最小. 长期施用有机物料有利于土壤凝聚作用的增强和有机碳含量的提高,从而使土壤持水量得到改善. NK+PM、NP+RS 和 NPK+RS 处理耕层土壤的最大持水量比相应单施化肥处理明显提高,增幅为 5.3%~13.6%,差异达到

显著水平. 在施用化肥的基础上,增施猪粪和稻草有利于提高土壤最大持水量. NPK 处理土壤最大持水量与 CK、NP 和 NK 处理相比,无显著差异.

2.2 长期施肥对红壤性水稻土化学指标的影响

不同施肥处理耕层土壤 pH 值与试验前土壤 (pH 6.6)相比都呈明显下降趋势(表 2). CK 处理较试验前土壤下降了 0.99 个单位,单施化肥处理 (NK、NP、NPK)下降了 1.28 个单位,化肥与猪粪和稻草配施处理 (NK+PM、NP+RS、NPK+RS)下降了 1.29 个单位,表明单施化肥与化肥和有机物料配施处理的 pH 差异不显著. 电导率 (EC)以 CK 处理最高,而单施化肥和化肥与猪粪、稻草配施处理之间差异不明显,表明在我国南方酸性红壤水稻土上无论施用化肥还是施用有机肥均不会导致土壤盐渍化.

单施化肥处理和化肥与猪粪、稻草配施处理的土壤 SOM、TN 和 PMN 含量都明显高于 CK 处理,单施化肥和化肥与有机肥配施处理土壤 SOM、TN 和 PMN 的增加是由于有机肥加入的 C、N 和水稻根茬量提高综合影响的结果. 所有施磷处理 (NP、NPK、NP+RS 和 NPK+RS)的土壤有效 P 含量高于不施磷肥处理 (NK、NK+PM),NK+PM 处理土壤有效 P 含量高于 CK 和 NK 处理. 不施钾肥 (CK、NP 和 NP+RS)处理土壤有效 K 含量低于临界值 ($60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);NPK+RS 处理土壤有效 K 含量高于 NPK 处理. 长期施用稻草而不施钾肥的 NP 处理土壤 AK 含量由试验前的 $62.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $47.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明每年施用 $4.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 干稻草也难以维持土壤 AK 水平. 除了 NPK+RS 处理外,其他处理的 AZn 含量都低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 凡是施用过磷酸钙的土壤 AS 含量都显著高于其他处理.

表 2 长期施肥对红壤性水稻土化学指标的影响
Tab.2 Effect of long-term fertilization on chemical indicators of reddish paddy soil

处 理 Treatment	pH	EC	CEC	SOM	TN	PMN	AP	AK	AZn	AS
CK	5.76b	0.21de	11.5e	33.95f	1.96f	18.0e	4.5f	57.0g	0.86cd	11.8h
PK	5.34f	0.27b	11.9d	33.80f	2.12e	19.6d	48.6a	179.9a	0.96b	47.4c
NP	5.24g	0.21de	12.7b	34.30e	2.54cd	20.0d	26.5c	54.3h	0.96b	49.7a
NK	5.54c	0.20fg	10.6f	36.15d	2.52cd	22.2c	6.7e	168.3b	0.58e	16.9g
NPK	5.33c	0.25c	12.9b	36.90c	2.59bc	22.6bc	23.5d	98.9d	0.67e	27.1e
NPK+Ca	6.56a	0.30a	13.8a	36.55c	2.45d	19.8d	24.3d	90.8f	0.85cd	48.7b
NK+PM	5.61d	0.20fg	12.2c	38.87b	2.70a	24.2a	7.7e	95.3e	0.80d	18.6f
NP+RS	5.36e	0.22d	12.7b	39.60a	2.66ab	23.5ab	28.7b	47.3g	0.88c	43.9d
NPK+RS	5.39h	0.19g	12.9b	39.50a	2.71a	23.7ab	23.1d	130.9c	1.23a	48.8b

EC: 电导率 Electrical conductivity ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$); CEC: 阳离子交换量 Cation exchange capacity ($\text{cmol}(\text{x}) \cdot \text{kg}^{-1}$); SOC: 土壤有机质 Soil organic matter ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); TN: 全 N Total nitrogen ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); PMN: 可矿化 N Potentially mineralizable N ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); AP: 有效 P Available P ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); AK: 有效 K Available K ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); AZn: 有效 Zn Available Zn ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); AS: 有效 S Available S ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 下同 The same below.

2.3 长期施肥对红壤性水稻土生物和生物化学指标的影响

由表 3 可知,在长期不施肥的情况下,稻田土壤维持较低的 MBC 含量. 在不同施肥处理中,化肥与猪粪、稻草配施处理的 MBC 含量显著高于单施化肥处理;NPK 平衡施肥处理显著高于非平衡施肥处理. 方差分析结果表明,不同施肥处理的 MBC 含量存在显著差异. 长期 NPK 均衡施肥处理的脲酶活性高于非均衡施肥处理(NP、NK),说明长期非均衡施肥对脲酶活性有抑制作用,而 NPK 平衡施用则可增加脲酶活性;化肥与猪粪、稻草长期配施可明显提高脲酶活性,特别是化肥与 C/N(C/N≥25)适中、富含新鲜养分的猪厩肥长期配合施用处理的脲酶活性提高更明显. 土壤酸性磷酸酶活性在施用磷肥、猪粪和稻草后增加,不施磷肥处理(CK 和 NK)的磷酸酶活性较低;化肥与猪粪、稻草配施可明显提高磷酸酶活性,与化肥配施猪粪(NK+PM)处理相比,化肥配施稻草的两个处理(NP+RS、NPK+RS)提高效果更明显;NK 处理的磷酸酶活性低于 NP+PM 处理,说明猪粪中的磷素在提高磷酸酶活性方面起着重要作用. 各施肥处理转化酶活性均高于 CK 处理,尤以 NK+PM 处理对转化酶活性的增加效果显著;NP、NPK 配施稻草对转化酶活性也有很好的提高作用,这是因为增施 C/N(C/N≥45)高的稻草,其高含碳量为转化酶提供了更多的酶促基质,提高了酶活性,从而加快了有机质的转化. 化肥与猪粪、稻草配施处理的土壤脱氢酶活性明显高于单施化肥处理,化肥处理略高于 CK 处理,但差异不显著;化肥与稻草配

表 3 长期施肥对红壤性水稻土生物指标的影响
Tab.3 Effect of long-term fertilization on biological indicators of reddish paddy soil

处 理 Treatment	MBC	URA	ITA	DHA	PHA	SER
CK	1239. 1c	54. 54e	22. 24f	17. 0e	121. 5c	2. 81c
PK	1226. 7c	55. 08e	25. 43e	19. 0d	136. 1bc	3. 27d
NP	1470. 6b	78. 63c	27. 11d	19. 7cd	133. 5bc	2. 67f
NK	1052. 9d	70. 39d	27. 80d	20. 6b	129. 7bc	2. 80e
NPK	1246. 0c	86. 86b	29. 46c	20. 5bc	131. 1bc	3. 58c
NPK+Ca	1055. 1d	77. 65c	26. 83d	15. 5f	132. 4bc	3. 22d
NK+PM	1443. 3b	78. 24c	33. 04a	20. 3bc	149. 3ab	4. 11a
NP+RS	1614. 7a	73. 73cd	31. 23b	21. 0b	161. 8a	3. 61c
NPK+RS	1468. 7b	93. 33a	30. 87b	23. 5a	164. 6a	3. 81b

MBC:微生物生物量 C Microbial biomass C (mg · kg⁻¹); URA:脲酶活性 Urease activity (NH₃-N mg · kg⁻¹ · 3 h⁻¹); ITA:转化酶活性 Invertase activity (mg fructose · g⁻¹ · 7 d⁻¹); DHA:脱氢酶活性 Dehydrogenase activity (H⁺ ml · kg⁻¹ · d⁻¹); PHA:磷酸酶活性 Phophatase activity (mg PNP · kg⁻¹ · h⁻¹); SER:土壤呼吸 Soil respiration (mg · CO₂ g⁻¹ · d⁻¹). 下同 The same below.

施处理高于化肥与猪粪配施处理;化肥与猪粪、稻草配施处理明显高于单施化肥处理,且差异显著.

不同处理土壤呼吸从高到低的顺序为 NPK+RS>NK+PM>NP+RS>NPK>NP>NK>CK;其中,化肥与猪粪、稻草配施处理高于单施化肥处理,其最大与最小土壤呼吸速率相差 57. 7%,NPK 与 NP、CK 与 NK 处理间的差异不显著,但 NP 处理土壤呼吸速率较 NK 处理平均增加了 29. 1%. 总体来看,单施化肥虽然增加了土壤呼吸速率,但远低于化肥与猪粪、稻草配施处理,说明猪粪和稻草对增加土壤呼吸起着非常重要的作用.

2.4 长期施肥对红壤性水稻土作物生产力的影响

不同施肥处理显著地影响水稻地上部生物产量和籽粒产量(表 4). 在连续 27 年 54 季水稻种植期间,NPK 和 NPK+RS 处理的早、晚稻全年产量均高于 NP 和 NP+RS 处理. 在本研究期间,早、晚稻的全年产量可达 15 t · hm⁻². 1981 年时,CK 处理的早、晚稻全年产量为 8. 60 t · hm⁻²,到 2007 年时,早、晚稻全年产量降至 5. 36 t · hm⁻². NP 和 NK 处理只在第 1 年期间保持与 NPK 处理相似的产量,此后早、晚稻产量逐年下降,从第 3 年起,NP 处理的早、晚稻全年产量很少超过 10 t · hm⁻²,NK 处理很少超过 8. 0 t · hm⁻²,说明土壤 P、K 供应量,特别是土壤 P 供应量是限制水稻产量的关键因素. 化肥与猪粪、稻草配施(NK+PM、NP+RS 和 NPK+RS)处理的早、晚稻全年地上部生物产量和籽粒产量均高于相应的单施化肥处理(NK、NP、NPK),且差异达到显著水平. SYI 值随肥料施入量的增加而提高,NPK+RS 处理的 SYI 值最大.

2.5 土壤质量评价

本研究采用土壤质量综合评分方法,即在获得

表 4 长期施肥对红壤性水稻土作物生产力的影响
Tab.4 Effect of long-term fertilization on crop productivity of reddish paddy soil

处 理 Treatment	生物产量 Biomass yield	籽粒产量 Grain yield	持续性产量 指数 SYI
CK	10. 48h	6. 21g	0. 37h
PK	14. 14g	8. 04f	0. 45f
NP	17. 79e	9. 44d	0. 57e
NK	15. 58f	8. 25e	0. 47g
NPK	20. 79a	10. 96b	0. 67b
NPK+Ca	19. 23d	10. 01b	0. 68b
NK+PM	20. 00bc	10. 48c	0. 63d
NP+RS	19. 34cd	10. 61c	0. 65c
NPK+RS	20. 61a	11. 67a	0. 71a

表 5 土壤质量指标和评分函数
Tab.5 Soil quality indicators and scoring function

指标 Indicator	评分曲线 Scoring curve	下 限 Lower threshold	上 限 Upper threshold	下基线 Lower baseline	上基线 Upper baseline	基准值 Baseline value (0.5)
BD	越少越好 Less is better	0.8	1.8	1.07	1.26	1.35
WHC	越多越好 More is better	10	35	18	24	20
POR	越多越好 More is better	10	70	46	53	40
NMND	越多越好 More is better	0.2	1.0	0.24	0.88	0.4
pH	最佳 Optimum	4.0	10	5.2	6.6	6
CEC	越多越好 More is better	10	20	10.6	13.8	12.5
SOM	越多越好 More is better	10	60	33.8	39.6	25
TN	越多越好 More is better	0.5	4.0	1.96	2.71	1.5
PMN	越多越好 More is better	12	60	10	60	25
AP	越多越好 More is better	5	50	4.5	48.5	10
AK	越多越好 More is better	50	180	57	179.9	70
AZn	越多越好 More is better	1.0	5	0.58	1.23	1
AS	越多越好 More is better	10	60	11.8	50	25
DHA	越多越好 More is better	5	40	15.5	23.5	20
PHA	越多越好 More is better	50	250	120	165	140
ITA	越多越好 More is better	5	30	22	31	20
SR	越多越好 More is better	2.5	20	2.6	4.1	10
MBC	越多越好 More is better	200	2000	1052	1615	500

表 6 土壤功能及与土壤质量量化有关的土壤质量指标
Tab.6 Soil function and their soil quality indicators associated to quantify soil quality

序列号 Number	功 能 Function	功能权重 Function weight	指 标 Indicator	指标权重 Indicators weights
1	抗物理退化 To resist physical degradation	0.30	BD	0.25
			POR	0.35
			MWHC	0.30
			NMWD	0.10
2	养分供应和贮藏 To supply nutrients and storage	0.35	pH	0.15
			CEC	0.15
			SOM	0.25
			TN	0.15
			AP	0.10
			AK	0.10
			AZn	0.05
			AS	0.05
3	抗生物化学退化 To resist biochemical degradation	0.25	MBC	0.50
			ITA	0.15
			DHA	0.15
			PHA	0.10
			SER	0.10
			PMN	0.35
4	保持作物生产力 To sustain crop productivity	0.10	AP	0.10
			AK	0.15

上述关键土壤功能评价指标组成数据集的基础上,应用非线性评分方程(方程1)将土壤质量指标值转换为0到1的无量纲值,最后对各指标的得分进行综合,得出一个被认为可以综合反映土壤质量的参数值.在土壤质量的评价中,采用了3类曲线形状方程^[25]:即钟形曲线(中点值为最佳)、上渐近S形曲

线(越多越好)、下渐近S形曲线(越少越好)(表5).土壤抗物理退化、土壤养分供应和贮藏、土壤抗生物化学退化的功能权重由专家按照其对总体土壤质量的相对重要性打分确定.各土壤功能中的指标权重采用专家打分和因子分析相结合的方法确定(表6).

本研究表明,NPK化肥均衡施用和化肥与稻草、猪粪长期配合施用处理能显著提高土壤质量等级.长期施用石灰处理(NPK+Ca)虽然能提高土壤团聚体作用和pH值,但土壤容重、最大持水量、孔隙度和多数养分及生物化学指标均低于NPK处理,SQI等级较低.NK处理的土壤质量等级低于NP处理,NP处理也明显低于NPK处理.目前,南方稻区的大多数稻田,农民只施NP或NK肥料,说明这些稻田可能存在土壤退化.通过对总体SQI数据起作用的4项土壤功能分别进行检验(表7),发现CK、PK、NP、NK处理对保持水稻生产力功能的影响大.NPK+RS处理抗生物化学退化的能力大于其他处理.化肥与稻草、猪粪长期配合施用处理的SQI和土壤功能等级高于相应单施化肥处理.NPK处理保持水稻生产力的功能等级高于NP和NK处理,但抗生物化学退化的能力较低,这预示着长期施用NPK肥料也会出现潜在的土壤退化.在酸性红壤水稻土上施用石灰是一项提高土壤pH的措施,在长期种植双季稻条件下,每年施用石灰,在某种程度上可以提

表 7 长期施肥对土壤质量等级和总体土壤质量指数的影响

Tab. 7 Effect of long-term fertilization on soil function rating and the overall soil quality index (SQI)

处 理 Treatment	土壤功能 Soil function				SQI
	q_{tpd} (0.30) *	q_{pns} (0.35)	q_{rde} (0.25)	q_{sep} (0.10)	
CK	0.170	0.177	0.146	0.050	0.544(9)
PK	0.173	0.157	0.159	0.074	0.562(8)
NP	0.180	0.206	0.158	0.061	0.606(7)
NK	0.184	0.220	0.155	0.071	0.631(6)
NPK	0.202	0.234	0.162	0.070	0.668(4)
NPK+Ca	0.193	0.240	0.149	0.068	0.651(5)
NK+PM	0.229	0.222	0.162	0.069	0.682(3)
NP+RS	0.214	0.247	0.176	0.063	0.700(2)
NPK+RS	0.224	0.254	0.175	0.075	0.729(1)

q_{tpd} :抗物理退化 To resist physical degradation; q_{pns} :养分供应和贮藏 To supply nutrient and storage; q_{rde} : 抗生物化学退化 To resist biochemical degradation; q_{sep} :保持作物生产力 To sustain crop productivity; SQI:土壤质量指数 Soil quality index. * 括号内数据为功能权重 Data in bracket was function weight.

高土壤 pH 和水稳性团聚体含量,活化土壤养分,但长期施用石灰可导致土壤微生物生物量、脱氢酶和转化酶活性下降,土壤呼吸速率降低,恶化了土壤生物化学环境,不利于土壤综合质量的改善与提高.

3 讨 论

本研究采用土壤质量综合评分方法,每个指标的限值或阈值都是综合 30 块低、中和高产水稻田测定值确定的.各指标的上限值参考了超高产水稻田的测定值及长期肥力试验田的一般变化及其最佳管理(NPK+稻草)的测定值. Zn 和 S 采用我国常用的临界值^[26]范围以及高产和超高产水稻田的测定值. MBC、转化酶、脱氢酶、磷酸酶和土壤呼吸的下限、上限和基准值等参数,主要参考文献^[27-28]并结合本研究根据低、中、高产田的测定值获得的.

在本研究中,4 项主要土壤功能(表 6)对总体 SQI 起作用.按照专家小组意见,所有土壤功能都是依据每项功能在完成保持水稻土壤质量目标中的相对重要性来确定权重的.在我国南方双季稻种植区,维持和提高水稻土养分供应能力和养分贮藏是长期平衡施肥策略的主要目标.因此,养分供应和贮藏功能接受了最高权重(35%).鉴于双季稻种植区许多稻田土壤物理质量下降的事实,土壤抗物理退化的能力也得到了重要的权重(30%).上述两项功能不是相互独立的.抗生物化学退化和保持作物生产力功能对达到可持续土壤管理的目标也是很重要的,因此对它们给出了 25% 的权重.每项功能权重值是由一组土壤质量指标确定的,这些指标是在专家打分和因子分析的基础上给出的^[27].

土壤抗物理退化功能所选择的指标是土壤 BD、SPD、POR、MWHC 和 NMWD,因为这些指标对抗土壤物理退化起重要作用^[28]. 抗生物化学退化功能所选择的土壤参数是 MBC、ITA、DHA、PHA 和 SR. 养分供应功能所选择的指标是 CEC、SOC、TN、AN、AP、AK、AS 和 AZn. 在本研究中,由于土壤 pH 受肥料处理的影响明显,也把它列于养分供应功能的指标内.保持作物生产力功能指标和权重是用土壤质量指标和水稻籽粒产量(作为因变量)之间的逐步回归方程推导出来的,其中挑选了 SOC、TN、AP 和 AK 4 个指标.本研究所选择的指标与土壤质量指数的早期研究者采用的 TOC、SPD、AN、DHA 和 MBC 指标基本类似^[29].本研究把 AZn 和 AS 作为主要指标之一,突出了红壤地区长期施肥试验田土壤因 AZn 和 AS 较低导致水稻产量减产的影响^[30].

采用非线性方程计算每个处理各项土壤质量指标的标准得分值,得分情况基本反映各项指标的实际情况.不同处理之间 POR、NMWD、TOC、AP 和 AK 的评分值表现出了差异.化肥与猪粪和稻草长期配施处理(NK+PM、NP+RS 和 NPK+RS)的评分值高于单施化肥处理(NK、NP 和 NPK),无机养分均衡施用处理(NPK)高于非均衡施用处理(NK 和 NP). BD 和 pH 的非评分数据表现出了差异,但评分值的差异不明显.这种格局(非得分值显著,得分值不显著)发生在测定差异对土壤功能不显著时,因为得分值处于土壤功能值的范围内,特别是作物生产力和环境保护可接受的范围内.

综合 4 项土壤功能的土壤质量指数,变化范围在 0.503~0.928,其值大小顺序为: NPK+RS>NP+RS>NPK>NK+PM>NP>NPK+Ca>PK>NK>CK. 长期施用石灰对红壤水稻土质量的提升作用不明显,甚至对土壤生物功能产生负作用,因此在酸性红壤水稻土上不建议连续施用石灰.回归分析表明, SQI 与生物产量(稻谷+稻草)($r=0.880$)、水稻籽粒产量($r=0.890$)和 SYI($r=0.892$)呈极显著相关.长期养分非均衡施用处理(NK 和 NP)的 SQI 低于均衡施用处理(NPK). Manna 等^[3]对印度一些热带长期定位试验的产量趋势分析表明,非均衡施肥使作物产量明显下降,这与本研究结论一致.由于土壤质量指标本身的复杂性,有关以水稻为主的轮作制度、耕作方式与有机无机肥配施(有机肥的种类和比例)对土壤物理与生物化学性质的影响还有待进一步研究和探讨.这对南方水稻土质量的提升和实现可持续利用具有重要意义.

参考文献

- [1] Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61**: 4–10
- [2] Zheng Z-P (郑昭佩), Liu Z-X (刘作新). Soil quality and its evaluation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(1): 131–134 (in Chinese)
- [3] Manna MC, Swarup A, Wanjari RH, *et al.* Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India. *Field Crops Research*, 2005, **93**: 264–280
- [4] Fuenres JA, Lopez MV, Martinez CC, *et al.* Tillage effects on soil organic carbon fraction in mediterranean dryland agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **72**: 541–547
- [5] Zibilske LM, Bradford JM. Soil aggregation, aggregate carbon, and nitrogen, and moisture retention induced conservation tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**: 793–802
- [6] Zhou W-J (周卫军), Zeng X-B (曾希柏), Zhang Y-Z (张杨珠), *et al.* Effects of fertilization on microbial biomass C and N in paddy soils derived from different parent materials. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(5): 1043–1048 (in Chinese)
- [7] Elfstrand S, Hedlund K, Martensson A. Soil enzyme activities, microbial community composition and function after 47 years of continuous green manuring. *Applied Soil Ecology*, 2007, **35**: 610–621
- [8] Doran JW, Sarrantonio M, Liebig MA. Soil health and sustainability. *Advances in Agronomy*, 1996, **56**: 1–54
- [9] Yadav RL, Yadav DS, Singh RM, *et al.* Long-term effects of inorganic fertilizer inputs on crop productivity in a rice-wheat cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, **51**: 193–200
- [10] Saleque MA, Abedin MJ, Bhuiyan NI, *et al.* Long-term effects of inorganic and organic fertilizer sources on yield and nutrient accumulation of lowland rice. *Field Crops Research*, 2004, **86**: 53–65
- [11] Liu H-X (刘鸿翔), Wang D-L (王德禄), Wang S-Y (王守宇), *et al.* Changes of crops yield and soil fertility under long-term application of fertilizer and recycled nutrient in manure on a black soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(1): 43–46 (in Chinese)
- [12] Lin B (林葆), Lin J-X (林继雄), Li J-K (李家康). Effect of long-term use chemical fertilizer and farmyard manure on crop yields and soil fertility// Lin B (林葆), Lin J-X (林继雄), Li J-K (李家康), eds. *Change of Crop Yield and Soil Fertility by Long-term Fertilization*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1996: 172–179 (in Chinese)
- [13] Wang J-G (王建国), Liu H-X (刘鸿翔), Wang S-Y (王守宇), *et al.* Low of nutrient equilibrium, gain and loss in black soil farmland. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2003, **40**(2): 246–251 (in Chinese)
- [14] Lai Q-W (赖庆旺), Li C-G (李茶苟), Huang Q-H (黄庆海). Effect of continuous of inorganic fertilizer on soil structure properties of paddy soil derived from red soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1992, **29**(2): 168–174 (in Chinese)
- [15] Gregorich EG, Drury CF, Baldock JA. Change in soil carbon under long-term maize in monoculture and legume-based rotation. *Canadian Journal of Soil Science*, 2001, **81**: 21–31
- [16] Munkholm LJ, Schjonning P, Debosz K, *et al.* Aggregate strength and mechanical behaviour of a sandy loam soil under long-term fertilization treatments. *European Journal of Soil Science*, 2002, **53**: 129–137
- [17] Haefele SM, Wopereis MCS, Schloebom AM, *et al.* Long-term fertility experiment for irrigated rice in the west African Sahel: Effect on soil characteristics. *Field Crops Research*, 2004, **85**: 61–77
- [18] Pan G-X (潘根兴), Zhou P (周萍), Zhang X-H (张旭辉), *et al.* Effect of different fertilization practices on crop carbon assimilation and soil carbon sequestration: A case of a paddy under a long-term fertilization trial from the Tai Lake region, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(11): 3704–3710 (in Chinese)
- [19] Department of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室). *Method for Soil Physical Property*. Beijing: Science Press, 1978 (in Chinese)
- [20] Lu R-K (鲁如坤). *Analytical Methods of Soil Agricultural Chemistry*. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [21] Waring SA, Bremner JM. Ammonium production in soil under waterlogged condition as an index of nitrogen availability. *Nature*, 1964, **201**: 951–952
- [22] Page AL, Miller RH. *Trans.* Min J-K (闵九康), Hao X-R (郝心仁), Yan H-J (严慧峻), *et al.* *Methods of Soil Analysis*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1991 (in Chinese)
- [23] Hussain I, Olson KR, Wander MM, *et al.* Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil & Tillage Research*, 1999, **50**: 237–249
- [24] Glover JD, Reganold JP, Andrews PK. Systematic methods for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchard in Washington State. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, **80**: 29–45
- [25] Karlen DL, Hurley EG, Andrews SS, *et al.* Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean belt locations. *Agronomy Journal*, 2006, **98**: 464–495
- [26] Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences (中国农业科学院土壤肥料研究所). *China Fertilizers*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1994 (in Chinese)
- [27] Masto RE, Chhonkar PK, Singh D, *et al.* Soil quality response to long-term nutrients and crop management on a semi-arid Inceptisol. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, **118**: 130–142
- [28] Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *European Journal of Soil Science*, 2006, **33**: 141–163
- [29] Sharma KL, Mandal UK, Srinivas K, *et al.* Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. *Soil & Tillage Research*, 2005, **83**: 246–259
- [30] Xie ZC, Qian JH, Li JS, *et al.* Study on Zn nutrition of rice and coordinating application of N, P, K and Zn. *Proceedings of The International Symposium on Balanced Fertilization*, Beijing, 1988: 315–320

作者简介 聂军,男,1972年生,博士.主要从事土壤肥力和植物营养研究,发表论文30余篇. E-mail: junnjie@foxmail.com

责任编辑 张凤丽