

李进, 段婷婷, 高宇, 等. 不同种植模式对雷州半岛玄武岩母质砖红壤氮磷钾养分状况的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(2): 62-69.

不同种植模式对雷州半岛玄武岩母质砖红壤氮磷钾养分状况的影响

李进^{1†}, 段婷婷^{1†}, 高宇¹, 邓凯¹, 梁燕秋, 邓卓楠²,
钟来元¹, 蔺中¹, 郑超¹

(1 广东海洋大学 化学与环境学院, 广东 湛江, 524088; 2 以色列理工学院 环境工程系, 以色列 海法, 3200003)

摘要:【目的】研究不同种植模式对雷州半岛玄武岩母质砖红壤氮磷钾养分状况的影响。【方法】以我国雷州半岛的典型玄武岩母质砖红壤为研究对象, 对 8 种不同种植模式下的土壤肥力属性进行方差分析, 并运用主成分分析 (PCA) 方法研究各养分变量的相互关系、土壤综合肥力特征及其障碍因子。【结果】研究区不同种植模式对土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、速效磷、缓效钾和速效钾含量的影响显著 ($P<0.001$)。主成分分析表明, 8 种植模式的土壤综合肥力区分显著 ($P<0.0001$), 这种差异是由不同种植模式下的土壤田间管理方式引起的。香蕉、蔬菜和水稻地的土壤综合肥力较好, 其中香蕉地肥力最高, 蔬菜和水稻地肥力次之, 香蕉地的土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾和缓效钾分别是木薯地的 2.55、2.44、3.50、2.30、15.36 和 7.73 倍, 但土壤 pH 较低是香蕉地土壤肥力进一步提高的障碍因子, 其土壤 pH 较木薯地降低了 0.89。有机质含量较低则是蔬菜地肥力的限制因子, 速效磷含量较低则是水稻地肥力的限制因子; 水稻与甘薯、花生与水稻、花生与大豆轮作地的土壤综合肥力中等; 而木薯和甘薯地的土壤综合肥力相对较差, 有机质和氮素养分缺乏是其综合肥力最低的主要原因。【结论】该区域增施有机肥、有机-无机肥料的合理配施以及对土壤酸度的适当调节是进一步提高耕地土壤综合肥力的关键。

关键词: 砖红壤; 种植模式; 土壤肥力; 施肥管理; 养分; 主成分分析
中图分类号: S158 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-411X(2018)02-0062-08

Effects of different tillage modes on the status of nitrogen, phosphorus and potassium in Leizhou Peninsula latosol from basalt

LI Jin^{1†}, DUAN Tingting^{1†}, GAO Yu¹, DENG Kai¹, LIANG Yanqiu, DENG Zhuonan²,
ZHONG Laiyuan¹, LIN Zhong¹, ZHENG Chao¹

(1 College of Chemistry and Environment, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2 Faculty of Civil and Environmental Engineering, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa 3200003, Israel)

Abstract: 【Objective】To investigate the effects of different tillage modes on soil fertility properties of Leizhou Peninsula latosol from basalt. 【Method】Taking the latosol from basalt in Leizhou Peninsula of China as test object, the variability of soil fertility properties were studied under eight tillage modes. The relationships

收稿日期: 2017-06-29 优先出版日期: 2018-01-17
优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20180117.1559.012.html>
作者简介: 李进 (1985—), 男, 讲师, 博士研究生, E-mail: 550210506@qq.com; 段婷婷 (1987—), 女, 讲师, 博士研究生, E-mail: duan_1257@126.com; †对本文贡献相同; 通信作者: 郑超 (1972—), 女, 副教授, 博士研究生, E-mail: 1415252925@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金 (41371316); 农业部公益性行业 (农业) 科研专项 (A13174); 广东省自然科学基金 (2017A030310662); 吴川市 2015 年度测土配方施肥项目 (B16413); 广东海洋大学科研启动费资助项目 (E15038); 广东海洋大学大学生创新创业训练计划 (CXXL2017028); 广东海洋大学“海之帆”起航计划 (qhjh2017zr16)

among numerous fertility variables, integrated soil fertility, and key limiting factors were evaluated by principal component analysis (PCA). 【Result】 The effects of tillage modes on soil pH, organic matter, total nitrogen (N), available N, phosphorus (P), potassium (K), and slowly available K contents were significant ($P<0.001$). The results of PCA indicated that the differences in integrated soil fertility under eight tillage modes were significant ($P<0.0001$), which was closely related to the field management. The integrated fertility of banana, vegetable, and paddy-paddy rotation fields were higher, in which that of banana field was the highest, followed by that of vegetable and paddy-paddy rotation fields. The soil organic matter, total N, available N, P, K, and slowly available K of banana field were 2.55, 2.44, 3.50, 2.30, 15.36 and 7.73 times respectively higher than those of cassava field. The limiting factor of fertility enhancement of banana field was the low soil pH, which was 0.89 lower than cassava field. The low organic matter and available P contents were limiting factors of fertility enhancement of banana, and paddy-paddy rotation fields, respectively. The paddy-sweet potato rotation, peanut-paddy rotation, and peanut-soybean rotation fields showed medium integrated fertility, while that of cassava and sweet potato fields were relatively low. The deficiencies of organic matter and N were the main limiting factors of their low integrated soil fertility. 【Conclusion】 Increasing application of organic fertilizer, reasonable combination of organic and inorganic fertilizers, and regulation of soil pH are key factors to further improve the integrated soil fertility of cultivation land.

Key words: latosol; tillage mode; soil fertility; fertilization management; soil nutrient; principal component analysis

砖红壤是我国最南端热带雨林或季雨林地区的地带性土壤。广东省雷州半岛是我国砖红壤4个主要分布地区之一,也是我国热带经济作物的重要农业生产基地^[1]。丰富的水热资源为农业生产提供了良好的自然条件,但热带地区具有高温多雨的特点,引起水土流失,土壤有机质分解快,养分淋溶流失强烈,因此热带地区的红壤和砖红壤的有机质和速效养分含量都较低。再加上不合理的耕地利用方式,导致土壤质量退化^[2],对该地区农业可持续发展产生了严重的影响^[3]。近年来有关华南地区红壤、赤红壤的退化及持续利用研究已引起广泛重视^[4-5],但关于我国雷州半岛地区玄武岩母质砖红壤养分特征及高效管理的研究仍鲜有报道。为了研究该地区不同种植模式下的砖红壤养分特征,以便更合理地利用砖红壤地区耕地资源,本研究选取了我国玄武岩母质砖红壤典型区域——雷州半岛吴川市11个镇的木薯地、水稻地、水稻与甘薯轮作地、花生与水稻轮作地、甘薯地、花生与大豆轮作地、蔬菜园以及香蕉园共8种耕地土壤作为研究对象,探讨不同种植模式下砖红壤养分特征及其差异,揭示不同种植模式与土壤肥力属性的关系,以期砖红壤资源的合理利用及典型地区土地的高效管理提供理论依据。

<http://xuebao.scau.edu.cn>

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

样品采集区位于广东省雷州半岛吴川市的11个镇(21°32′~21°54′N, 110°48′~110°95′E),包括大山江镇、海滨镇、黄坡镇、王村港镇、兰石镇、覃巴镇、塘尾镇、塘缀镇、吴阳镇、樟铺镇、长歧镇。该地区属亚热带性季风气候,日照充足,热量丰富,高温多雨。年均气温、降雨量和日照分别为22.5℃、1 597.8 mm和2 008.2 h,日照百分率为45%,日均温≥10℃的连续积温为8 991.8℃。土壤类型主要是由玄武岩发育而成的砖红壤(黏土)或砖红壤性水稻土。

研究区主要选取地形、地貌和成土母质基本一致,种植制度连续5年以上不变的香蕉园、木薯地、水稻地(水稻-水稻)、水稻与甘薯轮作地(水稻-甘薯)、花生与水稻轮作地(花生-水稻)、甘薯地、花生与大豆轮作地(花生-大豆)、蔬菜园共8种不同种植模式的地块进行研究。该区域平均海拔5.7 m,地貌类型为平原,地形均为平地。香蕉园植被为一年一熟的香蕉,该地块年均施肥7~8次,施肥量较大,氮、钾肥多于磷肥,并进行较为精细的耕作;木薯地和甘薯地主要作物分别为一年一熟的木薯和甘薯,该地块为无灌溉设施的旱地,每年施入较少化肥及进行少量耕作;水稻-水稻地为水稻连作,水稻-甘

薯地为水稻与甘薯轮作,花生-水稻地为花生与水稻轮作,均为一年两熟,其年均分 4 次施入农肥和化肥,并进行较为精细的耕作;蔬菜地主要为蔬菜连作,一年三熟,主要种植制度为芥菜-菜心-长茄、菜心-菜心-辣椒、芥菜-大白菜-长茄、青瓜-豆角-菜心或菜心-青瓜-辣椒。该地块年均施肥 6 次,施肥量大,氮、钾肥多于磷肥,并进行较为精细的耕作。为了提高蔬菜的成活率和产量,研究区的菜农大多先利用蔬菜育苗基质土(将泥炭、蛭石和珍珠岩与当地土壤混合)在蔬菜大棚或网室中育苗,待蔬菜种子发芽,苗长势健壮,再将蔬菜苗连同育苗盘里的基质土一并移栽到大田蔬菜地里,经过多年的蔬菜连作,该区蔬菜地耕层中含有了一定量的蛭石和珍珠岩;花生-大豆地为花生与大豆轮作,一年两熟,年均施肥 4 次,并进行常规耕作。研究区主要使用的化肥为尿素、磷酸二氢铵和氯化钾。

1.2 土样采集与分析方法

根据研究区 8 个种植模式耕地面积的实际大小,分别选取具有代表性的田块并 GPS 定位,木薯地为 10 个、甘薯地 13 个、蔬菜地 45 个、花生-水稻地 57 个、花生-大豆地 15 个、水稻-甘薯 12 个、水稻-水稻 71 个、香蕉 35 个田块。每个田块内随机选取 10 m×10 m 的正方形样地,依据“对角线法”选取 5 点采集 0~20 cm 深的耕层土壤,将样品混匀、用四分法分取备用。土样在室温下自然风干,磨碎,分别过 2.000 和 0.149 mm 筛,密封保存,用于测定各项土壤肥力指标。

土壤 pH 的测定选用 pH 计电位法(10 g 土加

入到 25 mL 去离子水中);土壤有机质的测定采用重铬酸钾容量法;全氮的测定采用凯氏消煮法;碱解氮的测定采用碱解扩散法;速效磷的测定采用 Olsen 法;缓效钾的测定采用热 HNO₃ 浸提-火焰光度法;速效钾的测定采用 NH₄AOC 浸提-火焰光度法^[6]。

1.3 数据分析

数据统计采用 SAS 9.0 和 ADE-4^[7]等软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式的土壤肥力指标比较

如表 1 所示,不同种植模式对土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、速效磷、缓效钾和速效钾含量的影响达到极显著水平($P<0.001$)。其中香蕉地土壤的 pH 最小,显著小于除水稻-甘薯轮作外的其他耕地。水稻-甘薯轮作地土壤 pH 显著小于花生-水稻轮作、木薯和蔬菜地;

从土壤有机质含量的方差分析结果看出,香蕉地和水稻-水稻连作地土壤有机质含量显著大于其他耕地土壤,水稻-水稻连作地和香蕉地较木薯地有机质含量分别增加 168% 和 154%。蔬菜、花生-水稻、花生-大豆和水稻-甘薯轮作地有机质含量显著大于木薯和甘薯地;各种植模式耕地的土壤全氮含量比较结果为:水稻-水稻连作地和香蕉地土壤全氮含量最高,其中水稻-水稻连作地显著大于除香蕉地以外的其他耕地,香蕉地显著大于木薯和甘薯地土壤的全氮含量。水稻-水稻连作地和香蕉地较木薯地土壤全氮含量分别增加 155% 和 144%;土

表 1 不同种植模式的土壤肥力指标及方差分析¹⁾
Tab. 1 ANOVA results and soil fertility properties under different tillage modes

种植模式	pH	w/(g·kg ⁻¹)		w/(mg·kg ⁻¹)			
		有机质	全氮	碱解氮	速效磷	缓效钾	速效钾
甘薯	5.45±0.21ab	8.9±3.3c	0.498±0.211c	67.9±27.7de	37.6±22.6b	80.2±119.1b	141.0±264.4bcd
花生-大豆	5.12±0.54ab	14.5±7.6b	0.810±0.402b	69.6±37.8de	8.8±9.4c	96.1±72.2b	256.1±311.8ab
花生-水稻	5.48±0.69a	14.5±8.5b	0.818±0.469b	116.8±63.8bcd	32.0±27.2bc	325.5±429.9b	129.8±249.5bcd
木薯	5.50±0.66a	8.0±2.9c	0.455±0.170c	55.5±27.3e	29.4±21.5bc	87.0±43.7b	24.5±11.2d
蔬菜	5.57±0.67a	14.0±5.7b	0.816±0.330b	162.0±48.6ab	65.9±34.1a	745.6±413.3a	194.6±213.3bc
水稻-甘薯	4.98±0.86bc	14.7±9.0b	0.814±0.468b	88.0±56.6cde	13.5±16.7c	253.8±271.3b	95.6±62.3bcd
水稻-水稻	5.24±0.66ab	21.5±9.6a	1.159±0.518a	126.1±91.3bc	19.4±20.5bc	373.3±398.7b	68.3±85.0cd
香蕉	4.61±0.79c	20.4±8.7a	1.111±0.466ab	194.5±103.5a	67.6±63.8a	672.2±609.8a	376.4±381.3a
F	7.558	9.561	8.208	10.158	14.608	10.185	7.366
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

1) 同列数据后凡是具有一个相同小写字母者表示不同种植模式间差异不显著($P>0.05$, DMRT 法)

壤碱解氮含量的分析结果显示: 香蕉、蔬菜地和水稻-水稻连作地土壤碱解氮含量较其他耕地高, 香蕉地显著大于除蔬菜地以外的其他耕地, 蔬菜地和水稻-水稻连作地显著大于水稻-甘薯、花生-大豆、甘薯和木薯地, 其中碱解氮含量最高的香蕉地是含量最低的木薯地的 3.50 倍, 蔬菜地是木薯地的 2.92 倍, 水稻-水稻连作地是木薯地的 2.27 倍;

土壤速效磷含量的方差分析结果表明, 香蕉和蔬菜地土壤的速效磷含量最高, 花生-大豆和水稻-甘薯轮作地的含量最低。香蕉和蔬菜地的速效磷含量显著大于其他耕地, 甘薯、花生-水稻、木薯和水稻-水稻地显著大于或大于花生-大豆和水稻-甘薯地, 其中速效磷含量最多的香蕉和蔬菜地分别是含量最少花生-大豆地的 7.65 和 7.46 倍;

土壤缓效钾含量的方差分析结果表明, 蔬菜和香蕉地缓效钾含量最高, 显著大于其他种植模式的耕地, 其中蔬菜和香蕉地的缓效钾含量是含量最少的甘薯地的 9.30 倍和 8.39 倍; 土壤速效钾的分析结果表明, 香蕉地的速效钾含量最高, 显著大于除花生-大豆地以外的其他耕地土壤, 是含量最低木薯地的 15.36 倍。花生-大豆和蔬菜地的速效钾含量较高, 显著大于水稻-水稻和木薯地, 分别是木薯地的 10.45 和 7.94 倍。

2.2 不同种植模式对土壤肥力的综合影响

主成分分析可以实现对各指标及主成分得分的综合变异分析^[8]。本研究对 8 个不同种植模式的土壤肥力质量综合特征进行了主成分分析, 结果如图 1 所示:

第 1 和第 2 主成分累计方差贡献率达到

62.92%, 8 个种植模式下 7 个土壤肥力变量的全部信息均可以由图 1 体现出来。主成分空间载荷图(图 1a)中箭头代表各土壤肥力指标的矢量, 矢量在 2 个主成分轴(X和Y)上的垂直投影长短代表该变量与主成分的关系, 投影越长, 该变量在主成分上的贡献率越大; 主成分得分空间分布图(图 1b)中①~⑧这 8 个种植模式的土壤综合得分位置, 与该样点在载荷图上土壤肥力矢量的位置相对应。由图 1 可以看出, 第 1 主成分方差贡献率为 43.64%, 其主要与土壤 pH 及有机质、全氮、碱解氮、缓效钾含量等变量密切相关(图 1a), 水稻-水稻(②)、香蕉(⑦)和蔬菜(⑧)地与其他 5 个种植模式土壤肥力质量综合差异主要由这些因素决定。水稻-水稻、香蕉和蔬菜地的土壤样点明显向较高有机质、全氮、碱解氮和缓效钾以及较低 pH 的方向偏移(图 1b), 而其他 5 个种植模式的土壤样点则向相反的方向偏移, 其中⑦在第 1 主成分上能够与木薯(①)、水稻-甘薯(③)、花生-水稻(④)、甘薯(⑤)、花生-大豆(⑥)种植模式的土壤样点明显区分, ②和⑧与④和⑤明显区分($P<0.0001$)。

第 2 主成分方差贡献率为 19.28%(Y 轴), 其与土壤有机质、全氮、速效磷、缓效钾和 pH 等变量紧密联系(图 1a), ⑧的土壤肥力特征能与②、③和⑥的土壤明显区分, 前者的土壤样点明显向 pH、速效磷和缓效钾含量较高以及全氮和有机质含量较低的方向偏移($P<0.0001$, 图 1b), 而后三者则向相反的方向偏移。

综上所述, 在第 1 和第 2 主成分上, 香蕉地与蔬菜地, 以及它们与其他种植模式耕地之间的土壤

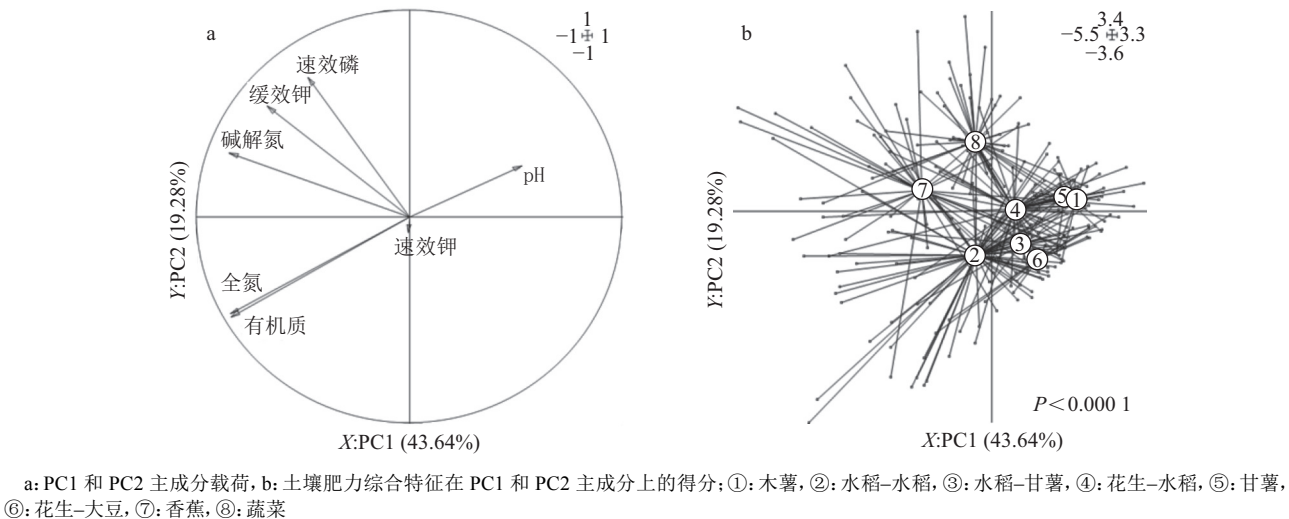


图 1 不同种植模式下砖红壤肥力特征差异的主成分分析

Fig. 1 Principal component analyses of fertility properties of latosols under different tillage modes

肥力质量特征区分明显 ($P<0.000\ 1$, 图 1b); 在本文研究中, 相比其他土壤肥力指标, 速效钾的矢量在主成分上的垂直投影最短, 因此其引起 8 个种植模式耕地之间综合肥力差异的贡献率最小, 即 8 个种植模式耕地对速效钾的总体影响较小。

2.3 不同种植模式下土壤肥力指标的相关性

主成分载荷图 (图 1a) 中的矢量箭头代表各土壤变量, 2 个箭头间余弦角度显示了 7 个变量的相互关系, 角度越小, 相关性越高。由图 1a 可以看出, 土壤缓效钾、速效磷、碱解氮含量之间具有一定程

度的正相关性, 土壤有机质、全氮、碱解氮含量之间也有一定程度的正相关性, 而土壤 pH 与有机质、全氮、速效钾含量有一定的负相关关系, 因此本文对土壤肥力各变量进行了进一步的相关性分析, 结果如表 2 所示。土壤 pH 与有机质、速效钾含量之间有显著的负相关关系。而有机质含量与全氮、碱解氮含量呈显著正相关关系, 且碱解氮含量与全氮含量之间也呈显著正相关关系。速效磷含量与碱解氮含量之间有显著的正相关关系。缓效钾含量与有机质、全氮、碱解氮、速效磷含量之间呈显著正相关关系。

表 2 土壤各变量间相关分析¹⁾
Tab. 2 Correlation analysis among soil variables

变量	pH	有机质	全氮	碱解氮	速效磷	缓效钾	速效钾
pH	1						
有机质	-0.622*	1					
全氮	-0.598	0.998**	1				
碱解氮	-0.415	0.715*	0.741*	1			
速效磷	-0.067	0.115	0.145	0.759*	1		
缓效钾	-0.246	0.621*	0.626*	0.959**	0.786**	1	
速效钾	-0.642*	0.423	0.440	0.618	0.525	0.509	1

1) “*” 和 “**” 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关 (Pearson 相关分析法)

3 讨论与结论

土壤的物理、化学质量与土壤质地、气候、水文和相关农田管理措施密切相关^[4]。因为本文研究区域的土壤均为雷州半岛玄武岩母质砖红壤, 且研究中的采样时间一致, 海拔、坡度、地下水位、温度、降水量等因素差异不大, 因此耕地不同种植模式所引起的施肥时间和方法、种植种类和结构、灌溉和耕作制度的差异是造成土壤肥力特征不同的主要原因。本研究结果显示, 香蕉地的土壤 pH 显著低于其他种植模式耕地, 这是因为香蕉树体较大, 根茎叶生物量明显大于其他作物, 当地香蕉园整地时将上年残留的香蕉根茎叶搅碎, 并归还到土壤后, 大量的根茎叶在土壤中腐烂产生较多的有机酸可能是造成其 pH 较低的一个重要原因^[9]; 同时香蕉整个生育期需氮钾养分较多, 根据当地蕉园施肥习惯, 每年每株香蕉施入不少于 300 g 氮 (N) 的尿素和 600 g 钾 (K₂O) 的氯化钾, 多年来化肥的大量施用也可能直接影响土壤的交换性氢和铝的含量, 造成其酸度较大^[10-11]。对土壤有机质和速效钾含量的方差分析结果也表明, 其在香蕉地土壤中的含量显著高于其他种植模式耕地, 引起此结果的原因同样是

大量香蕉根茎叶的还田和化肥的施用。这也是 8 个种植模式的土壤 pH 与有机质、速效钾含量呈显著负相关关系的主要原因。

为了增加农作物的产量和品质, 提高经济效益, 所研究区域长期大量施用尿素、磷酸二铵、氯化钾等化肥, 这是耕地具有较高的速效氮磷钾养分含量的主要原因^[12]。蔬菜和香蕉在生长过程中需肥量很大, 香蕉整个生育期长, 所研究区域的香蕉地施肥次数多, 施肥量大。蔬菜虽然生长期较短, 但需肥量较大, 且所研究区域一年种植三茬蔬菜, 因此施肥量同样较大。这是研究区域蔬菜和香蕉地土壤中氮磷钾速效养分含量显著大于其他耕地的主要原因^[13-14]; 相关分析结果显示, 所研究区域的土壤速效钾与 pH 呈显著负相关, 而土壤速效磷和碱解氮则呈显著正相关, 这主要是因为长期施用氯化钾肥料导致土壤 pH 降低^[10], 施用磷酸二胺肥料引起土壤速效磷和碱解氮含量同时增加^[15]。化肥的大量施用可以有效提高土壤中速效养分的含量, 但是作为土壤肥力的重要标志, 即有机质含量不能通过施用化肥来提高^[16]。主成分分析结果显示蔬菜地的主要肥力障碍因子是有机质不足, 相比香蕉和水稻-水稻

等耕地,其有机质含量较低,这主要是因为研究区域蔬菜地1年收获3次,大量土壤养分被带走,加速有机质分解消耗,且绝大部分蔬菜没有还田,又考虑到成本,当地农户很少施用有机肥,这就导致了蔬菜地长期有机质消耗大于补充。由于碳素和氮素是植物和微生物生长及酶活性的限制因素^[17],已有大量研究表明施用有机肥能够补充植物所需的营养元素,也能显著改善土壤微生物种群结构和酶活性^[18],土壤酶和微生物作为土壤物质循环和能量转化的关键参与者,将最终活化土壤养分并提高肥料利用率^[19]。因此需要施用有机肥或生物有机肥来进一步提高研究区蔬菜地土壤肥力。

缓效钾是速效钾的储备库,是土壤长期供钾潜力的指标,它一般被固定在黑云母、伊利石、含水云母分解的中间体以及黏土矿物晶格中,在速效钾耗竭情况下,是作物吸收钾的主要来源^[20]。相关分析结果表明,缓效钾与有机质、全氮、碱解氮、速效磷之间成显著正相关关系。这可能是由于有机质和土壤矿物黏粒形成稳定的团粒结构,钾的固定量增加^[21]。铵根离子进入土壤黏粒层间,并将钙离子和镁离子置换出来,将非交换性钾离子闭蓄在晶层间的空穴中,降低缓效钾的释放^[22]。所研究区域的施肥特点是氮磷钾肥料一起配合施用,同时补充土壤中速效氮、磷、钾养分,由于8种作物多数吸收氮和钾多,磷少,因此收获时从土壤中携出的养分以钾和氮最多,磷最少,每次施肥后速效磷将同缓效钾一样在土壤中累积;本研究还表明,香蕉和蔬菜地土壤中的缓效钾含量显著大于其他耕地的缓效钾含量,主要因为香蕉地的有机质含量最高,大量的有机质和土壤矿物黏粒形成稳定的团粒结构,更有利于土壤对交换性钾离子的固定。蔬菜地缓效钾含量较高是因为其相比于其他耕地,土壤中含有一定量的蛭石和珍珠岩,蛭石等矿物质对交换性钾有较强的固定能力^[23]。并且香蕉和蔬菜需钾量较大,施用速效钾肥较多,土壤中的可溶性和交换性钾含量较高,则进入黏土矿物层间被固定的钾离子就较高,因此形成的非交换性缓效钾就较多^[24]。

研究区8种耕地连续种植5年以上作物后,对土壤肥力指标的影响均达到显著水平。这说明不同种植模式通过改变土壤养分投入和管理,影响营养元素的循环强度、总量及路径,从而使土壤肥力发生变化^[25]。但是基于方差分析的多重比较是针对单个肥力指标的变异情况,并不能全面地反映种植模式对土壤肥力综合影响的规律和趋势^[5]。相关分析

表明,土壤肥力的各个属性之间并不是孤立的,它们具有一定的相关性。在评价众多的土壤肥力属性时,变量彼此间紧密的相互关系一定程度上影响了对土壤综合肥力起决定作用的主要因子的查找^[4]。Velasquez等^[26]和Jouquet等^[27]研究结果已证实主成分分析方法有助于评价不同土地利用方式下土壤多变量的综合质量特征。本研究在方差分析的基础上利用ADE-4软件进行主成分分析,该方法不仅能有效区别不同种植模式的土壤肥力属性差异,并能显示出各变量的相互关系,而且也能直观地识别影响耕地土壤肥力质量的主要因子,这将为土壤的进一步改良和高效管理提供参考。主成分分析结果显示,相比其他耕地,有机质和氮素(全氮和碱解氮)养分缺乏是木薯和甘薯地(旱地)土壤肥力质量较差的主要原因,这与红壤旱地有机质含量逐年呈显著下降趋势的结果一致^[28]。因此认为施用有机肥、有机无机复合肥或生物有机肥来提高土壤肥力,是增加产量的有效措施^[29];速效磷含量不足是水稻-甘薯、花生-大豆耕地土壤肥力较低的主要原因,建议增加速效磷肥(过磷酸钙)或有机肥的施用量来提高耕地中速效磷的含量,增加土壤综合肥力;在8种耕作模式中,香蕉地的土壤综合肥力最高,但其pH较其他耕地土壤低,土壤酸化加剧会导致土壤养分离子的淋失,使土壤日趋贫瘠化,同时释放出有害铝离子和重金属等污染物,可达到对植物生长有害水平^[30]。因此在种植香蕉前,应向每公顷耕地中施入1200~1800 kg的石灰,以调节土壤酸度,提高产量^[31]。8种耕作模式中,水稻-水稻连作地和蔬菜地的综合肥力仅次于香蕉地,水稻-水稻连作地较香蕉和蔬菜地,速效磷含量不足,因此建议增施磷肥(过磷酸钙)以补充土壤中的速效磷。蔬菜地较香蕉地和水稻-水稻连作地有机质含量有所不足,因此建议增施有机肥;所有肥力指标中,速效钾引起8种耕作模式土壤综合肥力差异的贡献率最小,且8种耕地模式土壤速效钾的标准差较大,说明其变异程度较其他肥力指标高。这可能与土壤矿物黏粒对钾的固定以及作物对矿物钾的活化作用有关。一方面,当为作物施速效钾肥料后,土壤水溶性和交换性钾离子浓度增加,土壤矿物黏粒对钾的固定作用随之增大^[24]。另一方面,作物对钾的吸收会导致土壤溶液中钾离子浓度的下降,原本土壤中各种形态钾之间的平衡被打破,促进矿物钾向交换性或水溶性钾的转化。同时作物根系分泌物的有机酸也可促进矿物钾的释放^[32]。

本研究结果显示,研究区不同耕作模式对土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、速效磷、缓效钾和速效钾含量的影响显著。其中香蕉地和水稻-甘薯轮作地土壤 pH 最低;香蕉地和水稻-水稻连作地土壤有机质和全氮含量最高,而在木薯和甘薯地中其含量最低;香蕉、蔬菜地和水稻-水稻连作地土壤碱解氮含量较其他耕地多;香蕉和蔬菜地土壤的速效磷含量最高,而花生-大豆和水稻-甘薯轮作地其含量最低;土壤缓效钾在蔬菜和香蕉地中含量最高;速效钾含量也在香蕉地中最高,而木薯地中含量最低。

研究区 8 种植模式的土壤综合肥力差异明显,这种差异与各种种植模式下的土壤田间管理方式密切相关。香蕉、蔬菜地和水稻-水稻连作地综合肥力较好,其中香蕉地最高,蔬菜地和水稻-水稻连作地次之,土壤 pH 较低是香蕉地土壤肥力进一步提高的障碍因子,有机质含量较低是蔬菜地肥力的限制因素,速效磷含量较低则是水稻-水稻连作地肥力的限制因素;水稻-甘薯、花生-水稻和花生-大豆轮作地土壤综合肥力中等;而木薯和甘薯地综合肥力相对较差,有机质和氮素养分缺乏是其土壤综合肥力最低的主要原因,因此该区域增施有机肥、有机无机肥料的配合施用以及对土壤酸度的适当调节是进一步提高耕地土壤综合肥力的关键。

参考文献:

- [1] 魏玉云. 热带地区砖红壤上不同土壤 pH 和含水量对尿素氮挥发的影响研究[D]. 儋州: 华南热带农业大学, 2006: 23-25.
- [2] 张静, 高云华, 张池, 等. 不同土地利用方式下赤红壤生物学性状及其与土壤肥力的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3423-3430.
- [3] 吴箐, 王诗忠, 张景书, 等. 模拟酸雨对鹤山赤红壤风化过程的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2006, 45(5): 113-117.
- [4] 张池, 高云华, 陈旭飞, 等. 不同土地利用方式对赤红壤理化性质的综合影响[J]. 自然资源学报, 2013, 28(12): 2140-2149.
- [5] 周波, 高云华, 张池, 等. 华南赤红壤地区 4 种不同耕作模式对土壤肥力属性的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(增刊): 315-319.
- [6] 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: 67-324.
- [7] THIOULOUSE J, CHESSEL D, DOLE D S, et al. ADE-4: A multivariate analysis and graphical display software[J]. Stat Comput, 1997, 7(1): 75-83.
- [8] ELLIS M B. Dematiaceous Hyphomycetes[M]. Kew, London: Commonwealth Mycological Institute, 1971: 1-608.
- [9] 张星, 刘杏认, 林国林, 等. 生物炭和秸秆对华北农田表层土壤矿质氮和 pH 值的影响[J]. 中国农业气象, 2016, 37(2): 131-142.
- [10] YANG L S, ZHANG Y T, HUANG X C, et al. Effects of long-term application of chloride containing fertilizers on the biological fertility of purple soil under a rice-wheat rotation system[J]. Sci Agric Sin, 2016, 49(4): 686-694.
- [11] TIAN D, NIU S. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition[J]. Environ Res Lett, 2015, 10(2): 024019. doi: [10.1088/1748-9326/10/2/024019](https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024019).
- [12] ANIKWE M A N, EMMANUEL O P, EZE J C, et al. Identifying fertilizer management strategies to maximize soil nutrient acquisition by Cocoyam (*Colocasia esculenta*) in a degraded ultisol in Agbani, Enugu Area, Southeastern Nigeria[J]. Am J Plant Nutr Fert Technol, 2015, 5(2): 61-70.
- [13] BUTANI A, THUMAR B V, DHINGANI J C. Fertilizer management of banana crop cv. grand naine[M]. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016: 152.
- [14] OBOUR P B, DADZIE F A, KRISTENSEN H L, et al. Assessment of farmers' knowledge on fertilizer usage for peri-urban vegetable production in the Sunyani Municipality, Ghana[J/OL]. Resour Conserv Recycl, 2015, 103: 77-84[2017-06-20]. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.018>.
- [15] ABEBE B, WORKAYEHU T. Effect of method of sowing and time of di-ammonium phosphate (DAP) fertilizer application, on yield and yield components of tef (*Eragrostic tef* Trotter) at Shebedino, Southern Ethiopia[J/OL]. Adv Crop Sci Technol, 2015, 3(2): 1-7[2017-06-20]. <http://dx.doi.org/10.4172/2329-8863.1000168>.
- [16] BOONYEN S, INTHASAN J. Effect of chemical fertilizer and organic fertilizer on soil fertility and yield of sweet corn (var. Hibrix 53) at Maewang District, Chiang Mai[J]. J Agric Res Ext, 2015, 32(1): 17-27.
- [17] BARDGETT R D, BARDGETT R D. The biology of soil: A community and ecosystem approach[J]. Soil Use Manage, 2006, 22(3): 323-324. doi: [10.1111/j.1475-2743.2006.0049.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.0049.x).
- [18] TIAN J, SUN C, YANG M Y, et al. Studies on the activities of three kinds of soil enzyme, organic matters, microbes and the yields and quality of apple in different tree-aged apple orchards in Loess plateau[J]. J Agric Sci Technol, 2012, 14(5): 115-122.
- [19] BOWLES T M, ACOSTA-MARTÍNEZ V, CALDERÓN F, et al. Soil enzyme activities, microbial communities, <http://xuebao.scau.edu.cn>

and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape[J]. *Soil Biol Biochem*, 2014, 68: 252-262.

[20] MILES N, FARINA M P W. Towards the more efficient use of fertilizer potassium: Prediction of ‘slowly-available’ potassium reserves in soils[J]. *Proc S Afr Sug Technol Ass*, 2014, 87: 330-333.

[21] ATTOE O J, TRUOG E. Exchangeable and acid-soluble potassium as regards availability and reciprocal relationships[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1946, 10: 81-86.

[22] MARTIN H W, SPARKS D L. On the behavior of nonexchangeable potassium in soils 1[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1985, 16(2): 133-162.

[23] 罗家贤, 包梅芬. 几种粘土矿物和一些土壤的钾固定[J]. *土壤学报*, 1988, 25(4): 379-386.

[24] TAN D, JIN J, JIANG L, et al. Potassium assessment of grain producing soils in North China[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2012, 148: 65-71. doi: [10.1016/j.agee.2011.11.016](https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.016).

[25] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 255-262.

[26] VELASQUEZ E, LAVELLE P, ANDRADE M. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality[J]. *Soil Biol Biochem*, 2007, 39(12): 3066-3080.

[27] JOUQUET P, BEMARD-REVERSAT F, BOTTINELLI N, et al. Influence of changes in land use and earthworm activities on carbon and nitrogen dynamics in a steep land ecosystem in Northern Vietnam[J]. *Biol Fert Soils*, 2007, 44(1): 69-77.

[28] 王伯仁, 蔡泽江, 李冬初. 长期不同施肥对红壤旱地肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 85-88.

[29] YANG Z C, ZHAO N, HUANG F, et al. Long-term effects of different organic and inorganic fertilizer treatments on soil organic carbon sequestration and crop yields on the North China Plain[J]. *Soil Till Res*, 2015, 146(10): 47-52.

[30] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.

[31] HÖPER H, STEINBERG C, ALABOUVETTE C. Involvement of clay type and pH in the mechanisms of soil suppressiveness to fusarium wilt of flax[J]. *Soil Biol Biochem*, 1995, 27(7): 955-967.

[32] KRAFFCZYK I, TROLLDENIER G, BERINGER H. Soluble root exudates of maize: Influence of potassium supply and rhizosphere microorganisms[J]. *Soil Biol Biochem*, 1984, 16(4): 315-322.

【责任编辑 李晓卉】