

刘彦伶,李渝,张雅蓉,等. 长期不同施肥处理对黄壤性水稻土理化性质的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(19):294-298.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.19.069

长期不同施肥处理对黄壤性水稻土理化性质的影响

刘彦伶¹, 李渝¹, 张雅蓉¹, 张文安¹, 黄兴成¹, 蒋天明^{1,2}

(1. 贵州省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵州贵阳 550006;

2. 贵州省农业科学院, 贵州贵阳 550006)

摘要: 依托国家黄壤肥力与肥效长期定位试验, 研究连续施肥 18 年后, 不同施肥处理对西南黄壤性水稻土土壤质地、容重、总孔隙度、阳离子交换量(CEC)、pH 值、有机质、氮、磷、钾等土壤理化性质的影响。研究表明, 长期不施肥土壤容重、孔隙度、阳离子交换量与初始值无明显差异, 而土壤养分含量基本呈下降趋势; 长期单施化肥土壤容重比试验初始值增加 5.1%, 土壤孔隙度降低 2.1 百分点, 土壤物理性质有变劣趋势, 土壤 pH 值也显著低于其他处理, 除土壤磷素养分明显增加外, 有机质、氮、钾等其他土壤养分基本呈下降趋势; 常规有机肥(M)、常规有机肥+常量氮磷钾肥(MNPK)处理黏粒含量显著降低且沙粒含量显著提高, 土壤质地由黏土转变成壤质黏土, 土壤容重比单施化肥处理分别降低 15.9%、18.1%, 土壤孔隙度显著提高。长期施用有机肥可显著提高土壤阳离子交换量(CEC)、pH 值及其他土壤养分, 与试验初始值相比, MNPK 处理土壤 CEC、pH 值、有机质、全氮、全磷分别提高 9.9%、5.0%、29.6%、35.2%、52.6%; 长期施用绿肥效果虽不如有机肥, 但也可在一定程度上改善土壤理化性质; 长期不同施肥处理土壤全钾含量均比试验初始值下降 9.1%~19.5%, 在实际生产中应重视钾肥的施用。在西南黄壤性水稻土上化肥与有机物料配施尤其是与畜禽有机肥配施对改善土壤理化性质效果最佳。

关键词: 黄壤性水稻土; 长期施肥; 土壤理化性质

中图分类号: S157.4⁺1; S153 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)19-0294-05

施肥是农业生产中作物获得高产的必要措施。目前, 盲目施用化肥的现象仍普遍存在, 不仅造成养分大量流失、肥料利用率低下, 还造成土壤板结、酸化及严重的环境污染问题^[1-2]。施用有机肥可改善土壤微生物环境, 提高土壤肥力

和肥料利用率, 是作物增产和地力培肥的重要措施^[3-4]。但有机肥肥效慢、养分含量低, 短期内难以满足作物对养分的需求, 因此需要与化学肥料配合施用, 才能达到缓急相济、互相补充及提高肥料肥效的目的^[5-6]。土壤的物理性状主要通过影响土壤水、气、热进而影响土壤肥力, 而土壤化学性质则是土壤肥力水平的重要体现。因此, 土壤的物理性质和化学性质彼此相互影响、关系密切, 二者可综合反映土壤的质量水平^[7]。长期定位施肥在研究土壤肥力演化、肥料效应、农田养分循环以及施肥与环境关系等方面具有重要价值, 因而关于长期施肥对土壤理化性质的影响已成为研究的热点。黄壤是中国南方山区的主要土壤类型之一, 主要分布于贵州省、四川省以及云南省、广西壮族自治区等地。贵州省黄壤面积已达 703.8 万 hm^2 , 占全国黄壤总面积的 30.27%, 其质地黏重, 土壤淋溶强, 盐基饱和度和低且酸性较强, 严重制约着农作物产量

收稿日期: 2016-05-12

基金项目: 贵州省科技计划(编号: 黔科合支撑[2017]2852); 贵州省农业科学院科技创新专项(黔农科院科技创新[2017]06号); 国家自然科学基金(编号: 41461069); 贵州省科技厅省院联合基金(编号: 黔科合 LH 字[2015]7079号)。

作者简介: 刘彦伶(1989—), 女, 贵州安顺人, 硕士研究生, 研究实习员, 主要从事土壤养分研究。E-mail: ly1890615@163.com。

通信作者: 蒋天明, 博士, 研究员, 主要从事土壤养分和土壤水分研究。E-mail: jtm532@163.com。

[26] Kim K, Jang Y J, Lee S M, et al. Alleviation of salt stress by *Enterobacter* sp. EJ01 in tomato and *Arabidopsis* is accompanied by up-regulation of conserved salinity responsive factors in plants[J]. *Mol Cells*, 2014, 37(2): 109-117.

[27] Li Y, Wang Q, Wang L, et al. Increased growth and root Cu accumulation of *Sorghum sudanense* by endophytic *Enterobacter* sp. K3-2: implications for *Sorghum sudanense* biomass production and phytostabilization[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2016, 124: 163-168.

[28] Kim K, Jang Y J, Lee S M, et al. Alleviation of salt stress by *enterobacter* sp. EJ01 in tomato and *Arabidopsis* is accompanied by up-regulation of conserved salinity responsive factors in plants[J]. *Mol Cells*, 2014, 37(2): 109-117.

[29] Molineux C J, Connop S P, Gange A C. Manipulating soil microbial communities in extensive green roof substrates[J]. *Sci Total Environ*, 2014, 493: 632-638.

[30] Rashad F M, Saleh W D, Moselhy M A. Bioconversion of rice straw and certain agro-industrial wastes to amendments for organic farming systems: 1. Composting, quality, stability and maturity indices[J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101(15): 5952-5960.

[31] Hassan W, Bano R, Bashir F, et al. Comparative effectiveness of ACC-deaminase and/or nitrogen-fixing rhizobacteria in promotion of maize (*Zea mays* L.) growth under lead pollution[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2014, 21(18): 10983-10996.

[32] 魏素娜. 小麦根际具有 ACC 脱氢酶活性细菌菌株的分离、鉴定及接种效应的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.

的提高。目前,关于长期施肥对黄壤性水稻土壤理化性质影响的研究较少,本研究以国家黄壤(水稻土)肥力与肥效长期定位试验为依托,通过研究长期不同施肥种类条件下对土壤理化性质的影响,以期为黄壤性水稻土合理施肥及农田可持续生产提供理论和实践指导。

1 材料与与方法

1.1 试验地概况

国家黄壤性水稻土肥力长期定位试验区位于贵州省贵阳市小河区贵州省农业科学院内(106°07'E,26°11'N),地处黔中黄壤丘陵区,平均海拔1 071 m,年平均气温15.3℃,年降水量1 100~1 200 mm,年平均日照时数1 354 h,相对湿度75.5%,全年无霜期270 d左右。定位试验区的成土母质为三叠系灰岩与砂页岩风化物,试验始于1995年,设置14个处理,本研究选取其中的5个处理,分别为:(1)不施肥(CK);(2)常量氮磷钾肥(NPK);(3)常量有机肥(M);(4)常量有机肥+常量氮磷钾肥(MNPK);(5)常量氮磷钾肥+翻压绿肥(GNPK)。试验采用大区对比试验,小区面积为201 m²(35.7 m×5.6 m),不设重复。土壤基础容重1.165 g/cm³,阳离子交换量17.7 cmol/kg,pH值为6.75,有机质含量44.90 g/kg,全氮含量1.96 g/kg,全磷含量0.95 g/kg,全钾含量16.4 g/kg,碱解氮含量158.9 mg/kg,有效磷含量13.4 mg/kg,速效钾含量293.7 mg/kg。

试验用氮肥为尿素(含N 46%),磷肥为普钙(含P₂O₅ 16%),钾肥为氯化钾(含K₂O 60%)。常规用量为每年施N 330 kg/hm²、P₂O₅ 165 kg/hm²、K₂O 165 kg/hm²,有机肥年用量122 222 kg/hm²,所施用有机肥为牛廐肥(多年平均养分为N 2.7 g/kg、P₂O₅ 1.3 g/kg、K₂O 6 g/kg),每年按照有机肥养分含量来调节化学氮肥施用量,除MNPK处理氮肥施用量不同外,其他施氮小区的氮素施用量相同。种植制度为一年一季水稻,翻压绿肥小区于水稻收获后种植绿肥(早熟苕子)。在水稻播种前按处理分别施用氮磷钾肥或配施有机肥或翻压绿肥作基肥,处理在水稻生长期追施2次尿素。种植的水稻品种为金麻粘(1993—1998年)、农虎禾(1999—2001年)、香两优875(2007—2008年)、汕优联合2号(2009年)、茂优601(2010—2012年),2002—2006年由于试验基地灌溉设施损毁,无法满足水稻种植条件,改种玉米。1995—2012年不同处理年均肥料施用量见表1。

表1 不同试验处理的施肥量

处理	施肥量(kg/hm ²)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0	0	0
NPK	330.0	165.0	165.0
M	330.0	158.9	733.3
MNPK	660.0	323.9	898.3
GNPK	330.0	165.0	165.0

1.2 样品采集与分析方法

2012年于水稻收获后采集土壤样品,将每个处理分3段采集耕层土壤样品作为3个重复,采集方法按照随机(每一个采样点是任意决定的,按照梅花形布点采样)、等量(每点采集土壤量一致)和多点混合(每段采集5个点的土样混合)

的原则进行。土壤容重采用环刀法,土壤机械组成采用吸管法。有机质测定采用重铬酸钾氧化-外加热法;全氮测定采用半微量凯氏法;全磷测定采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法;全钾测定采用氢氧化钠碱熔-火焰光度法;碱解氮测定采用碱解扩散法;速效磷测定采用碳酸氢钠浸提法;速效钾测定采用乙酸铵浸提-火焰光度法;阳离子交换量采用乙酸钠-火焰光度法测定;pH值采用1:2.5土水比进行测定。具体测定方法参考土壤农化分析^[8]。

1.3 统计与分析

数据统计与分析采用Excel 2007、IBM SPSS Statistics 20软件进行,处理间差异性采用邓肯新复极差法(Duncan)检验。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理土壤质地

不同施肥处理可显著影响土壤机械组成,但是对不同粒径土粒影响不同(图1)。不同施肥处理主要影响土壤黏粒(<0.002 mm)、沙粒(2.00~0.02 mm)含量,对粉粒(0.02~0.002 mm)含量无显著影响。与CK相比,NPK处理有提高土壤黏粒含量和降低土壤沙粒含量的趋势,但处理间差异不显著;M、MNPK处理黏粒含量无显著差异,分别比CK降低7.5%、10.7%,沙粒含量分别提高17.5%、37.2%,MNPK处理沙粒含量显著高于M处理;GNPK处理黏粒含量与CK、NPK处理间差异不显著,均显著低于M、MNPK处理,但沙粒含量比CK提高12.7%。根据国际制土壤质地分级标准,连续施肥18年后,CK、NPK、GNPK处理土壤质地为黏土,M、MNPK处理对土壤质地有明显改善,土壤质地为壤质黏土。

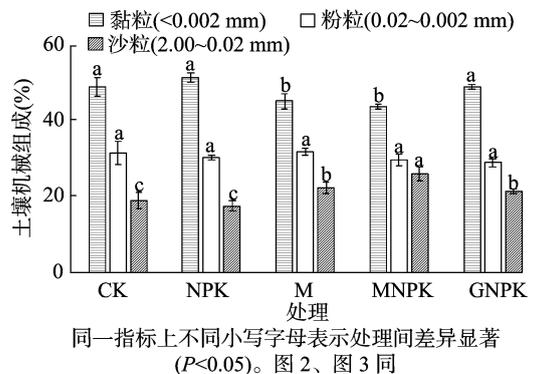


图1 不同施肥处理土壤机械组成

2.2 不同施肥处理土壤容重和总孔隙度

土壤紧实,容重大,孔隙度低,微生物活性差,土壤养分有效化程度低,不利于作物栽培,土壤容重和土壤孔隙度是衡量土壤质量的重要指标^[9]。从图2可以看出,经过18年连续施肥土壤容重和土壤孔隙度发生了明显变化,且不同施肥处理间差异显著。与试验初始容重1.17 g/cm³和孔隙度55.8%相比,第18年CK处理无明显变化,NPK处理土壤容重增加5.1%,土壤孔隙度降低2.1个百分点,M、MNPK、GNPK 3个处理土壤容重平均下降12.0%,土壤孔隙度平均提高5.2个百分点。与CK、NPK处理相比,施用有机肥和绿肥的处理可显著降低土壤容重,M、MNPK、GNPK处理降低幅度分别为10.0%、12.4%、8.2%和15.9%、18.1%、14.2%。与土壤容

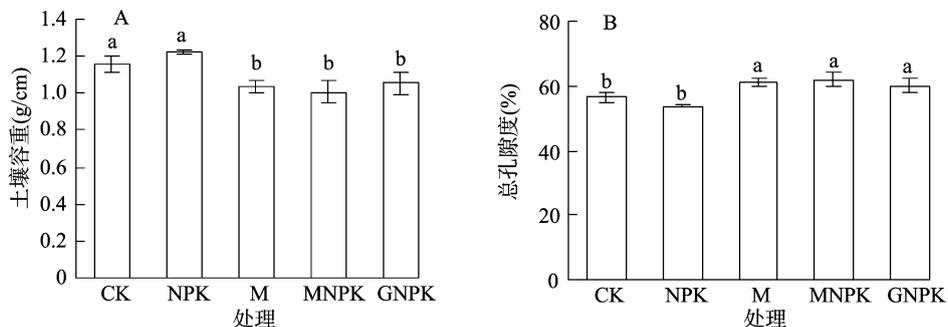


图2 不同施肥处理土壤容重和总孔隙度比较

重相反, M、MNPK、GNPK 3 个处理土壤孔隙度比 CK、NPK 处理显著提高 4.5、5.5、3.7 个百分点和 7.3、8.3、6.5 百分点。

2.3 不同施肥处理土壤阳离子交换量

阳离子交换量直接反映了土壤的保肥、供肥性能和缓冲能力, 其值越大, 说明土壤的保肥能力越强。不同施肥处理对阳离子交换量 (CEC) 有显著影响, 从图 3 可以看出, CK 与 NPK、GNPK 处理 CEC 差异不显著, M 与 MNPK 处理间 CEC 差异不显著, 但二者分别比 NPK、GNPK 处理 CEC 显著提高 14.3%、11.7% 和 19.2%、16.5%。与初始阳离子交换量 17.7 cmol/kg 相比, 连续施肥 18 年后, M、MNPK 处理 CEC 提高 12.4%、9.9%, 其他处理则无明显变化。

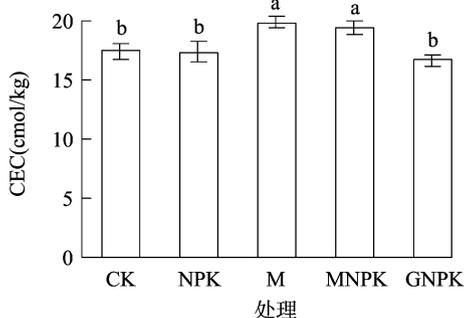


图3 不同施肥处理土壤阳离子交换量比较

2.4 不同施肥处理土壤 pH 值

从图 4 可以看出, 不同施肥处理土壤 pH 值有显著差异, 表现为 M > MNPK、CK > GNPK > NPK, 与单施化肥相比, 施用有机肥和绿肥可显著提高土壤 pH 值。与 pH 值初始值 6.75 相比, 连续施肥 18 年后, 除 NPK 处理土壤 pH 值无明显变化外, CK、M、MNPK、GNPK 处理比初始 pH 值分别提高 5.5%、7.8%、5.0%、2.9%。

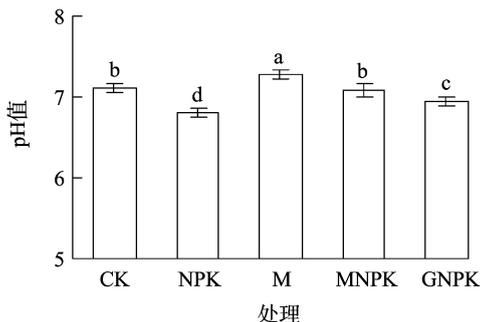


图4 不同施肥处理土壤 pH 值比较

2.5 不同施肥处理土壤养分比较

从表 2 可以看出, 不同施肥处理对土壤养分有不同影响。CK 与 NPK 处理间有机质、全氮含量差异不显著, 但 2 者均显著低于施用有机肥和绿肥的处理; M、MNPK 处理有机质含量差异不显著, 但均显著高于 GNPK 处理; MNPK 处理土壤有机质和全氮含量分别比 NPK、GNPK 处理提高 53.6%、42.6% 和 41.7%、29.3%。与试验初始值相比, 连续施肥 18 年后 CK、NPK、GNPK 处理有机质含量比初始含量分别下降 15.8%、16.5%、10.0%, M、MNPK 处理有机质含量分别提高 28.1%、29.6%, CK、NPK 处理全氮含量差异不显著, M 和 MNPK 处理全氮含量比初始含量分别提高 32.1% 和 35.2%。

不施肥处理土壤全磷含量显著低于各施磷处理, 分别比 NPK、M、MNPK 和 GNPK 处理低 13.9%、18.4%、35.9% 和 19.8%。施磷处理中, NPK、M 和 GNPK 处理间土壤全磷含量差异不显著, 但均分别显著低于 MNPK 处理 25.5%、21.4% 和 20.0%。与试验初始值相比, 经过连续 18 年施肥, 除 CK 处理略微下降外, 其他各施磷处理土壤全磷含量都有大幅提高, 提高幅度为 13.7% ~ 52.6%。除 GNPK 处理外, 各施肥处理间土壤全钾含量差异不明显, 其中以 M 处理最高, GNPK 处理最低。与试验初始值相比, 各处理土壤全钾含量均有所下降, 下降幅度为 9.1% ~ 19.5%。

不同施肥处理对土壤速效养分有明显影响。除 CK 土壤处理土壤有效磷显著低于其他各处理外, 土壤碱解氮、有效磷和速效钾均表现为 CK、NPK 和 GNPK 处理较低, M 和 MNPK 处理较高; 与 NPK 处理相比, M 和 MNPK 处理土壤碱解氮、有效磷、速效钾分别提高 42.9%、33.4%、74.2% 和 40.2%、119.5%、138.3%; 与 GNPK 处理相比, MNPK 处理土壤碱解氮、有效磷、速效钾分别提高 28.9%、159.2%、130.7%。与试验初始值相比, 经过连续 18 年施肥: M 和 MNPK 处理土壤碱解氮无明显变化, CK、NPK 和 GNPK 处理下降幅度为 26.3% ~ 32.9%; 除 CK 处理土壤有效磷下降 35.1% 外, 其他各处理土壤有效磷均呈现出提高趋势, 增幅为 11.0% ~ 188.3%; CK、NPK 和 GNPK 处理土壤速效钾比初始值下降 14.9% ~ 27.4%, M 和 MNPK 处理土壤速效钾则提高 26.6% 和 73.1%。

2.6 土壤有机质与其他养分及土壤物理性质相关性分析

土壤有机质含量是衡量土壤肥力高低的重要指标, 它能促使土壤形成团粒结构, 改善土壤物理、化学及生物学过程, 提高土壤的吸收性能和缓冲性能。从表 3 可以看出, 土壤有机质含量与土壤容重和黏粒含量呈极显著负相关, 与土壤孔

表2 不同施肥处理土壤养分含量比较

处理	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
CK	37.8c	1.87c	0.93c	14.8a	106.6b	8.7d	250.0c
NPK	37.5c	1.87c	1.08b	14.1ab	107.6b	17.6c	213.3c
M	56.9a	2.59a	1.14b	14.9a	153.7a	23.5b	371.7b
MNPK	57.6a	2.65a	1.45a	14.8a	150.9a	38.6a	508.3a
GNPK	40.4b	2.05b	1.16b	13.2b	117.1b	14.9c	220.3c
1994年	44.9	1.96	0.95	16.4	158.9	13.4	293.7

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

隙度和沙粒含量呈极显著正相关,说明在黏重的黄壤上土壤有机质含量的提高能显著改善土壤物理状况,降低土壤黏粒含量和增加沙粒含量,改善土壤质地,降低土壤容重,增加土壤孔隙度,进而增加土壤透气性,改善土壤水、肥、气、热状况,促进作物生长。土壤有机质与阳离子交换量、pH值及氮磷钾养分含量均呈现出显著相关性,说明土壤有机质的提升,有利于土壤其他养分的提高。因此,在西南黄壤性水稻土地区土壤有机培肥对土壤理化性质都有非常重要的意义。

表3 土壤有机质与其他养分及物理性质相关性分析

指标	与土壤有机质的相关系数
容重	-0.722**
孔隙度	0.723**
黏粒	-0.865**
粉粒	0.094
沙粒	0.787**
阳离子交换量	0.883**
pH值	0.584*
全氮	0.986**
全磷	0.689**
全钾	0.453
碱解氮	0.953**
有效磷	0.837**
速效钾	0.896**

注:“*”表示在0.05水平(双侧)上显著相关,“**”表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

3 讨论与结论

3.1 不同施肥处理对土壤物理性质的影响

经过18年连续施用有机肥,M和MNPK处理土壤黏粒含量分别比CK显著降低7.5%和10.7%,沙粒含量分别显著提高17.5%和37.2%,土壤质地向壤质黏土转变。土壤质地的改善,也可改善其他土壤物理指标,本研究结果,连续施用有机肥18年后,土壤容重比初始值降低11.6%~13.8%,孔隙度增加5.2~6.2个百分点,本结果与其他人的研究结果^[3,10-11]相一致,原因除与土壤中有有机物料增大土粒间孔隙外,还可能与有机质可促进土壤微生物活性提高^[12-14]及团聚性增强^[15-16]有关。众多研究^[17-18]表明,施用绿肥可以有效降低土壤容重,本研究结果表明,西南黄壤性水稻土上长期施用绿肥处理虽比单施化肥处理对土壤物理性质有一定的改善作用,但作用不明显,表明在西南黄壤性水稻土上施用畜禽有机肥对土壤物理性质的改善效果优于施用绿肥的处理,不同

地区应根据具体情况选择相应的有机肥类型。

3.2 不同施肥处理对土壤阳离子交换量和pH值的影响

施用有机肥可显著提高西南黄壤性水稻土阳离子交换量,比NPK和GNPK处理显著提高11.7%~19.2%。与CK相比,长期施用有机肥处理可显著提高土壤pH值,但长期单施化肥土壤酸化趋势明显,这与前人研究结果^[19-21]相一致。其主要原因是增施有机肥能够提高土壤缓冲容量^[22],增强水稻土的酸缓冲能力,长期有机肥的投入可补充作物收获而带走的土壤盐基离子,从而避免土壤碱性物质的过度消耗^[23]。

3.3 不同施肥处理对土壤养分的影响

本研究通过对土壤不同养分含量分析发现,与不施肥相比,单施化肥除能明显提高土壤磷素养分外,对其他土壤养分均无明显增加作用,其原因是植物生长所需的养分,除来自于化肥外,还有部分来自于有机质的分解,长期单施化肥且缺乏有机质的输入,很容易导致土壤有机质分解加快以满足作物的生长需求,从而使土壤养分比试验前水平有所下降^[24],而土壤对磷素有较强的吸附作用,施入土壤的磷素大多被土壤吸附固定^[25],因而土壤磷素养分比不施肥和试验前都有明显提高。与NPK处理相比,施用有机肥可显著提高土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷和有效磷含量。说明长期施用有机肥可增加土壤氮、磷养分容量和强度,尤其是有机肥配施化肥提高作用最明显。本结论与相关研究结果^[26-28]一致,原因是有机物料的施用增加了土壤有机碳库,增强了微生物的活动,从而促进了土壤有机质含量及氮、磷养分含量的提高^[29-30]。施入绿肥也可明显提高土壤有机质、全氮和全磷含量,但提升效果小于施用有机肥的处理,原因可能是施入的绿肥与有机肥养分含量及物理性状不一致,绿肥施入土壤后其土壤物理性质及微生物对不同有机物料的反应不同。此外,研究结果显示,虽然施用有机肥处理能显著提高土壤速效钾含量,但所有处理全钾含量与试验前相比下降9.1%~19.5%,说明土壤钾素养分在不断消耗,其原因是大多数作物钾肥的当季回收利用率往往高于100%^[31-32],很容易造成土壤钾素耗竭,因此生产中应注意补充钾肥。

3.4 结论

长期单施化肥除能提高土壤磷素养分外,对土壤物理性质和其他养分无改善作用,甚至土壤物理性质有变黏重的趋势,土壤养分比试验开始前明显下降,土壤pH值明显低于其他施肥处理。长期不施肥处理与单施化肥相比,除土壤磷素显著降低外,其他养分含量并无明显差异,但土壤物理性质却有所改善,如土壤容重明显高于单施化肥处理。

长期施用有机肥可显著降低土壤黏粒含量并提高土壤沙

粒含量,使黄壤性水稻土由黏土向壤质黏土转变,土壤质地明显改善,土壤容重显著降低,土壤总孔隙度显著增加。土壤物理性质的改善,有利于形成良好的水、肥、气、热状况,土壤养分也随之得到改善,长期施用有机肥可显著提高西南黄壤性水稻土 CEC、pH 值及土壤各种养分含量,尤其以 MNPK 处理效果最佳。长期施用绿肥土壤 pH 值、有机质及全氮、全磷含量也可明显提高,但是对土壤物理性质及速效养分无明显提高作用。

土壤有机质含量与土壤其他养分含量及其物理性质大多都呈极显著正相关关系,表明西南黄壤性水稻土有机培肥对改善土壤理化性质具有重要意义。综合考虑土壤物理和化学性质,在西南黄壤性水稻土上增施有机物料尤其是畜禽有机肥培肥土壤效果最佳。

参考文献:

- [1] 张北赢,陈天林,王兵. 长期施用化肥对土壤质量的影响[J]. 中国农学通报,2010,26(11):182-187.
- [2] 吕家珑,张一平,王旭东,等. 长期单施化肥对土壤性状及作物产量的影响[J]. 应用生态学报,2001,12(4):569-572.
- [3] 李强,许明祥,齐治军,等. 长期施用化肥对黄土丘陵区坡地土壤物理性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(1):103-109.
- [4] 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.
- [5] 张风华,贾可,刘建玲,等. 土壤磷的动态积累及土壤有效磷的产量效应[J]. 华北农学报,2008,23(1):168-172.
- [6] 陶磊,褚贵新,刘涛,等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报,2014,34(21):6137-6146.
- [7] 孙建,刘苗,李立军,等. 不同施肥处理对土壤理化性质的影响[J]. 华北农学报,2010,25(4):221-225.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [9] 李成亮,孔宏敏,何园球. 施肥结构对旱地红壤有机质和物理性质的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(6):116-119.
- [10] 李文军,彭保发,周诗彪,等. 长期施肥对洞庭湖区水稻土物理性状及团聚体中有机碳积累的影响[J]. 农业环境科学学报,2015,34(4):761-768.
- [11] 李军营,邓小鹏,杨坤,等. 施用有机肥对植烟土壤理化性质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2012(3):12-16,34.
- [12] 陈晓芬,李忠佩,刘明,等. 长期施肥处理对红壤水稻土微生物群落结构和功能多样性的影响[J]. 生态学杂志,2015,34(7):1815-1822.
- [13] 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.
- [14] 徐一兰,唐海明,肖小平,等. 长期施肥对双季稻田土壤微生物

学特性的影响[J]. 生态学报,2016,36(18):5847-5855.

- [15] 霍琳,武天云,蔺海明,等. 长期施肥对黄土高原旱地黑垆土水稳性团聚体的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(3):545-550.
- [16] 毛霞丽,陆扣萍,何丽芝,等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 土壤学报,2015,52(4):828-838.
- [17] 朱娜,王富华,王琳,等. 绿肥对土壤的改良作用研究进展[J]. 农村经济与科技,2014,25(7):13-14,63.
- [18] 李宏图,罗建新,彭德元,等. 绿肥翻压还土的生态效应及其对土壤主要物理性状的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(5):172-175.
- [19] 周晓阳,周世伟,徐明岗,等. 中国南方水稻土酸化演变特征及影响因素[J]. 中国农业科学,2015,48(23):4811-4817.
- [20] 柳开楼,李大明,黄庆海,等. 红壤稻田长期施用猪粪的生态效益及承载力评估[J]. 中国农业科学,2014,47(2):303-313.
- [21] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, et al. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China[J]. Journal of Soils & Sediments,2015,15(2):260-270.
- [22] 张永春,汪吉东,沈明星,等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J]. 土壤学报,2010,47(3):465-472.
- [23] 孟红旗,吕家珑,徐明岗,等. 有机肥的碱度及其减缓土壤酸化的机制[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(5):1153-1160.
- [24] 焦晓光,隋跃宇,魏丹. 长期施肥对薄层黑土酶活性及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料,2011(1):6-9.
- [25] Wang B, Li J, Ren Y, et al. Validation of a soil phosphorus accumulation model in the wheat-maize rotation production areas of China[J]. Field Crops Research,2015,178:42-48.
- [26] 徐阳春,沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C、N、P 含量与分配的影响[J]. 中国农业科学,2000,33(5):65-71.
- [27] 隋跃宇,张兴义,焦晓光,等. 长期不同施肥制度对农田黑土有机质和氮素的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(6):190-192,200.
- [28] 王改兰,段建南,贾宁凤,等. 长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报,2006,20(4):82-85,89.
- [29] 王长军,王肇陟,王世荣. 生物有机肥、腐殖酸对水稻产量和土壤化学性质的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(1):93-95.
- [30] 聂俊,邱俊荣,史亮亮,等. 有机肥和化肥配施对抛秧水稻产量、品质及钾吸收转运的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(2):122-125.
- [31] Wang Y C, Wang E L, Wang D L, et al. Crop productivity and nutrient use efficiency as affected by long-term fertilisation in North China Plain[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2010,86(1):105-119.
- [32] 葛玮健,常艳丽,刘俊梅,等. 垆土区长期施肥对小麦-玉米轮作体系钾素平衡与钾库容量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(3):629-636.