

不同施肥模式下西藏农田土壤质量的变化

李 猛^{1,2}, 何永涛^{1,3}, 孙 维¹, 李少伟¹, 钟志明¹, 余成群¹, 张扬建^{1,3}, 张宪洲^{1,3}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所/生态网络观测与模拟重点实验室 拉萨高原生态试验站 北京 100101;

2.中国科学院大学 北京 100049;3.中国科学院大学资源与环境学院 北京 100190)

摘 要:依据中国科学院拉萨高原生态试验站农田长期施肥试验的监测数据,分析了不同施肥模式(空白、羊粪、羊粪+化肥(羊+化)、化肥)8年后(2008~2015)对高原农田土壤质量部分指标(机械组成、土壤容重、有机质、pH和微生物量碳)的影响。结果显示,与单纯施用化肥的样地相比,施加了有机肥的羊粪和羊+化样地的农田土壤质量表现出了显著的变化:(1)增加了0~20 cm土层中的砂粒含量,降低了粉砂粒和粘粒含量;(2)0~10cm表层土壤容重分别降低10.1%和10.0%;(3)表层土壤中的有机质含量分别增加了72.8%和65.6%,同时土壤的pH保持在一个稳定的状态;(4)显著增加了农田土壤中的微生物量,在青稞的生长期以及收获后,农田土壤微生物量碳均表现为羊粪>羊粪+化肥>空白>化肥。因此表明有机肥可以显著改善高原农田的土壤质量,在西藏地区应加大畜禽粪便等的归田。

关键词:施肥模式;土壤质量;农田;西藏

中图分类号:S147.3 **文献标志码:**A

Soil quality change under different fertilization patterns on the Tibetan Plateau farmland

LI Meng^{1,2}, HE Yong-tao^{1,3}, SUN Wei¹, LI Shao-wei¹, ZHONG Zhi-ming¹, YU Cheng-qun¹,
ZHANG Yang-jian^{1,3}, ZHANG Xian-zhou^{1,3}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences/Lhasa Plateau Ecological Research Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

Abstract: Based on monitoring data from an 8-year long-term fertilization experiment on the Tibetan Plateau farmland by Lhasa Plateau Ecological Research Station, Chinese Academy of Sciences, effects of different fertilization treatments on part of indicators of soil quality (soil mechanical composition, soil bulk density, organic matters, pH, microbial biomass C) were studied. Compared with the chemical fertilizer plot, soil quality of farmland applying sheep manure merely and sheep manure and chemical fertilizer simultaneously showed significant difference: (1) The gravel particle content increased but silt and clay particle content decreased in 0~20 cm soil layer; (2) Top soil bulk density decreased by 10.1% and 10.0%, respectively; (3) Soil organic content increased by 72.8% and 65.6%, and the soil pH was stabilized; (4) The soil microbial biomass increased significantly in farmland. Soil microbial biomass carbon average in farmland after fertilization ranked as following: Manure > Manure + Chemical Fertilizer > CK > Chemical Fertilizer during highland barley growth season and post-harvest season. Above results suggested that application of manure can significantly improve the soil quality in plateau farmland, therefore more organic fertilizer should be returned to the farmland in Tibet.

Keywords: fertilization pattern; soil quality; farmland; Tibetan Plateau

收稿日期:2017-02-17

修回日期:2018-04-09

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA20010201, XDA19050502);西藏自治区重大科技专项(Z2016C01G01/02);中国生态系统研究网络(CERN)/国家生态系统观测研究网络(CNERN)长期监测项目

作者简介:李猛(1991-),男,硕士,研究方向为全球变化与高寒生态系统。E-mail: limeng.14s@igsrr.ac.cn。

通信作者:何永涛(1975-),男,高级工程师,从事高原生态学研究。E-mail: heyt@igsrr.ac.cn。

土壤质量是土壤在生态系统范围内,维持生物的生产力、保护环境质量以及促进植物健康的能力^[1],综合反映了土壤的物理、化学和生物学性质,以及形成这些性质的一些重要过程^[2]。土壤质量的变化不仅可以反映土壤管理模式的变化^[1],同时也能反映土壤环境的变化趋势以及人类活动的影响^[3]。土壤质量评价通常采用可定量计算的物理、化学和生物学指标,其中土壤容重及机械组成是重要的物理指标,其变化决定着土壤紧实度,不仅影响水分和氧气的供应,同时还会影响其它土壤性质和过程^[4];pH 和有机质是评价土壤质量的重要化学指标,影响着多种土壤生物学与化学性质及其之间的关系^[4-5];土壤微生物量碳是指土壤中微生物的总碳量,尽管在土壤总碳中占据很小的比例,但却是土壤有机质中最活跃的部分^[6],其周转速率快,可以及时反映农田生态系统中培肥措施、种植体系以及土地利用方式的变化,被广泛应用在土壤质量评价中^[7-8]。

一江两河流域(雅鲁藏布江、拉萨河、年楚河)是西藏高原农业生产的核心区域,水热条件较好,河谷多垦殖为耕地,种植以小麦、青稞、油菜为主的喜凉作物,同时也是西藏人口集中分布的区域,其农业生产对于西藏地区社会经济的发展具有重要的意义。但由于西藏高原河谷农田多为河谷冲、洪积物发育而来的砂质土壤,土层浅薄、质量较差,加之大部分农田一直处于连年耕作的状态,近年来出现了全面的退化。首先是土壤物理结构的变化,如 1990~2001 年 10 年期间,西藏中部地区的农田土壤容重增加了 7.1%~14.3%、孔隙度则降低了 5.9%~17.3%,土壤硬化、养分贫瘠化趋势明显^[9]。其次是有机质的下降,自 20 世纪 60 年代至今已有超过一半耕地的土壤有机质降至 2.0%,其中仅 1990~2001 年间,西藏主要农田土壤有机质含量平均下降了 26.7%~52.0%^[10-11]。农田土壤退化已经成了限制当地农业发展的一个重要因素,如何有效改善土壤

质量是西藏农田生态系统面临的突出问题。

中国科学院拉萨农业生态试验站(以下简称拉萨站)是中国生态系统研究网络(CERN)和国家生态系统研究网络(CNERN)台站之一,位于拉萨河下游宽谷地段,是西藏河谷农区的典型代表,同时也是世界海拔最高的农业生态试验站。2008 年开始,拉萨站设置了长期施肥试验,目的是监测不同施肥模式下高原农田土壤质量的长期演变趋势,为该地区农田生态系统的优化管理提供理论依据。本文对 2015 年获取的土壤监测数据进行了统计分析,以探讨经过 8a 施肥试验后,不同施肥模式对高原农田土壤质量的影响。

1 试验设计与研究方法

1.1 样地概况与试验设计

试验样地位于拉萨农业生态试验站农田试验区内,距西藏自治区首府拉萨市 25 km,东经 91°20'37",北纬 29°40'40",海拔 3688 m,原为拉萨河谷的河漫滩地,1993 年建站后改造为农田,土壤质地为砂壤。该区域属高原温带半干旱季风气候,年均气温 7.9℃,≥10℃积温 2200℃,年均降水量 497.7 mm,年蒸发量 2190.4 mm,年太阳总辐射达 7700 MJ·m⁻²。

试验设计为长期等氮施肥试验,开始于 2008 年,共有 4 个处理,每个处理 3 个重复,小区面积为 10 m×10 m。试验处理包括空白对照、羊粪、化肥以及羊粪+化肥(以下简称羊+化),施肥量为当地平均水平纯氮 150 kg·hm⁻²,各处理的具体施肥情况见表 1。通过分别施用有机肥料、无机肥料、有机无机肥混施以及空白对照处理,对比观测长期不同施肥模式对高原农田土壤质量的影响。种植当地主要作物冬小麦和春青稞,2015 年种植作物为春青稞。播种前施羊粪或化肥为基肥,化肥处理和羊+化处理在青稞抽穗期施用 1 次尿素作为追肥。引拉萨河水采用畦灌方式灌溉,2015 年分播种、出苗期、分蘖期、拔节期、蜡熟期 5 次灌溉。

表 1 不同施肥模式的施肥情况

Table 1 Treatments in different fertilization patterns				
处理 Treatment	肥料名称 Fertilizer	施用时间(年-月-日) Time/(y-m-d)	施肥量/(kg·hm ⁻²) Fertilizer amount	纯氮量/(kg·hm ⁻²) Nitrogen
空白 Control	空白 Control	—	—	—
羊粪 Manure	羊粪 Sheep manure	2015-05-04	19185.0 ^a	150.0
化肥 Chemical fertilizer	磷酸二铵 Diammonium phosphate	2015-05-04	210.0	33.6
	尿素 Urea	2015-05-04	105.0	48.3
	尿素 Urea	2015-06-23	150.0	69.0
	尿素 Urea	2015-06-23	150.0	69.0
羊+化 Manure+Chemical fertilizer	羊粪 Sheep manure	2015-05-04	4999.5	39.1
	磷酸二铵 Diammonium phosphate	2015-05-04	112.5	18.0
	尿素 Urea	2015-05-04	56.2	25.8
	尿素 Urea	2015-06-23	150.0	69.0

2015 年春青稞生长季,按照中国生态系统研究网络(CERN)的规范,对土壤微生物量碳进行了动态取样和分析;并在作物收获后,测定了该长期试验样地的土壤 pH、有机质、容重、机械组成等理化指标。

1.2 样品采集与测定方法

1.2.1 样品采集 土壤微生物量碳样品采集分别在 2015 年青稞种植前(3 月 8 日)、拔节期(4 月 23 日)、抽穗期(7 月 23 日)、收获后(10 月 18 日)进行。每个试验小区内分别用直径 3.5 cm 的土钻随机取 5 个表层(0~20cm)土壤混合为一个样品,每个处理取 3 个混合样品。样品带回实验室后去除植物残体与砾石等,一部分用于测定土壤含水量,一部分土样冷冻保存在冰柜中用于测定土壤微生物量碳。

2015 年 9 月 15 日青稞收获后,在每个试验小区内按对角线随机布点(3 点)挖取土壤剖面,并按 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层采用环刀法分别测定土壤容重,并在各层分别取土样、混匀,带回室内用于分析土壤机械组成。同时,在每个试验小区内用土钻随机取 5 个表层(0~20 cm)土壤混合为一个样品,每个处理取 3 个混合样品,用于测定土壤有机质、pH。

1.2.2 室内分析 土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸浸提法测定。测定时,称取相当于 10.0 g 烘干土重的湿润土壤,在 25℃ 的黑暗条件下熏蒸 24 h。用反复抽真空方法除去残存氯仿后,加入 40 mL 0.5 mol L⁻¹ K₂SO₄ 溶液(土液比 1:4),振荡浸提 30 min。振荡结束后立即用滤膜过滤浸提液,滤出的浸提液用 TOC 自动分析仪(Liqui TOC II)测定,通过计算氯仿熏蒸和未熏蒸样品中的有机碳之差确定微生物量碳。土壤 pH 用水浸法以 pH 计测定(水土比 2.5:1);有机质用重铬酸钾容量法测定;土壤机械组成采用 MASTERSIZER 2000 激光粒度仪测定。

1.2.3 数据处理 采用 SPSS 21 进行数据统计分析,以 LSD 和 Duncan 法进行多重比较检验不同取样时间、不同施肥模式下土壤理化指标差异的显著性(α=0.05)。绘图采用 Origin 9.1 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对土壤物理指标的影响

2.1.1 机械组成 根据我国土粒分级标准将试验区土壤的机械组成进行分级(表 2)。结果表明,试验区农田的土壤机械组成以砂粒(2~0.05mm)为主,比例达到了 2/3 左右;而粘粒含量普遍较小,不足 3%。尽管差异未达到显著的检验水平,但与空

白对照和化肥处理相比,羊粪和羊+化处理明显增加了 0~20 cm 土层中的砂粒含量,降低了粉砂粒和粘粒含量,从而使土壤更为疏松。

表 2 不同施肥模式农田土壤各级土粒含量
Table 2 Soil particle content in different fertilization treatments (Mean ± SD)/%

试验处理 Treatment	土层 Soil layers/cm	砂粒 Gravel (2~0.05mm)	粉砂粒 Silt (0.05~0.002mm)	粘粒 Clay (<0.002mm)
空白 Control	0~10	66.19±0.65	31.08±0.66	2.72±0.03
	10~20	66.36±0.68	30.91±0.69	2.73±0.08
	20~40	67.15±3.77	29.92±3.32	2.93±0.46
	40~60	66.77±0.44	30.33±0.38	2.90±0.17
羊粪 Manure	0~10	69.90±3.70	27.97±3.45	2.13±0.26
	10~20	69.09±1.44	28.68±1.36	2.22±0.13
	20~40	67.20±3.24	30.03±2.94	2.77±0.33
	40~60	66.29±7.16	30.76±6.54	2.95±0.62
化肥 Chemical fertilizer	0~10	64.73±1.30	32.52±1.15	2.75±0.17
	10~20	65.20±1.10	31.97±1.32	2.80±0.22
	20~40	65.12±1.41	32.07±1.35	2.82±0.07
	40~60	64.23±1.97	32.84±1.73	2.93±0.24
羊+化 Manure+ Chemical fertilizer	0~10	67.72±1.03	30.05±0.87	2.23±0.16
	10~20	67.74±0.41	29.89±0.33	2.36±0.08
	20~40	65.16±5.21	31.95±4.62	2.89±0.61
	40~60	67.33±4.31	30.03±4.10	2.64±0.24

2.1.2 容重 不同施肥模式对表层土壤容重有着显著的影响(图 1)。0~10 cm 土层容重为空白>化肥>羊+化>羊粪,其中空白处理容重最大,为 1.37 g·cm⁻³,羊粪处理容重最小为 1.18 g·cm⁻³,与单纯施用化肥的样地相比,施加了有机肥的羊粪和羊+化样地的 0~10cm 表层土壤容重分别降低 10.1%和 10.0%,羊粪、羊+化与空白对照之间的差异显著(P<0.05),而化肥与空白对照之间的差异并未达到显著水平(P>0.05)。10~20 cm 土层的容重也表现出相同的趋势,即空白>化肥>羊+化>羊粪,分别为 1.46 g·cm⁻³、1.40 g·cm⁻³、1.38 g·cm⁻³、1.27 g·cm⁻³,羊粪处理对降低该层容重的作用最为显著(P<0.05)。而随着土壤深度的增加,不同施肥模式对土壤容重的影响未表现出明显的差异(P>0.05)。

2.2 不同施肥模式对土壤有机质和 pH 的影响

由图 2 可以看出,不同施肥模式之间土壤有机质差异明显,其中羊粪处理最高,为 31.1 g·kg⁻¹,空白对照最小,仅为 16.2 g·kg⁻¹。与单纯施用化肥样地相比,羊粪和羊+化处理均显著提高了土壤的有机质含量,提高幅度分别为 92.0% 和 83.9%(P<0.05);而单纯施用化肥则对土壤有机质的影响较小,相对于空白仅提高了 11.1%(P>0.05)。不同施肥处理之间土壤 pH 的大小为羊粪>空白>化肥>羊+化,分别为 7.05、6.97、6.73 和 6.63,羊粪有提高土壤

pH、而化肥则有降低土壤 pH 的趋势。

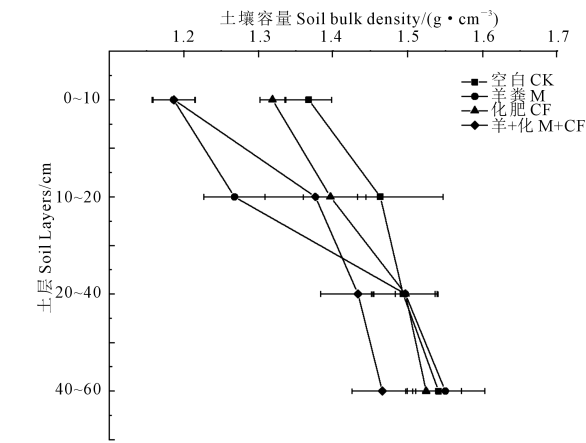


图 1 不同施肥模式对土壤容重的影响

Fig.1 Effects of different fertilization treatments on soil bulk density

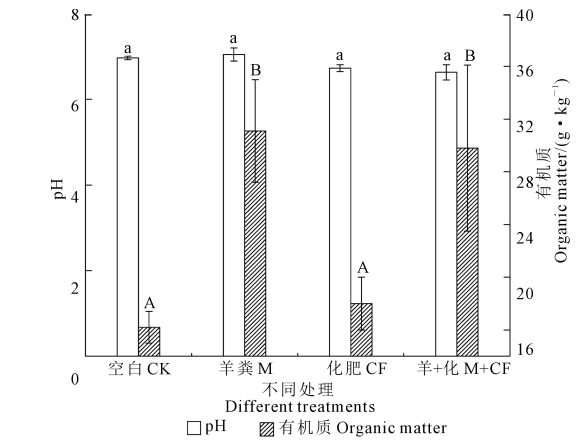


图 2 不同施肥模式对土壤有机质及 pH 值的影响

Fig.2 Effects of different fertilization treatments on soil organic matter and pH value

2.3 不同施肥模式对土壤微生物量碳的影响

不同施肥模式对土壤微生物量碳有明显的影响(图 4)。除 3 月初青稞尚未种植,不同施肥处理之间的土壤微生物量碳无明显差异外,在青稞的生长期间以及收获后,土壤微生物量碳均表现为羊粪>羊+化>空白>化肥。4 月份青稞处于出苗期,羊粪和羊+化处理的微生物量碳显著大于空白对照和化肥处理,羊粪最高可达到 218.2 mg·kg⁻¹,而化肥最低仅为 68.4 mg·kg⁻¹。羊粪和羊+化处理较空白对照分别提高了 156.3%和 132.1%,而化肥处理较空白对照则降低了 19.7%。7 月份青稞处于抽穗期,羊粪处理微生物量碳最高,达到了 132.0 mg·kg⁻¹,羊粪和羊+化处理微生物量碳较空白对照分别提高了 98.5%和 48.8%,化肥处理较空白对照则降低了 18.5%;10 月份青稞收获之后,农田的土壤微生物量碳同样表现为羊粪和羊+化处理显著大于空白与化

肥处理。以上结果表明,与空白对照相比,施加有机肥会显著增加土壤微生物量碳($P<0.05$),而单纯的施加化肥并未改变土壤微生物量碳。

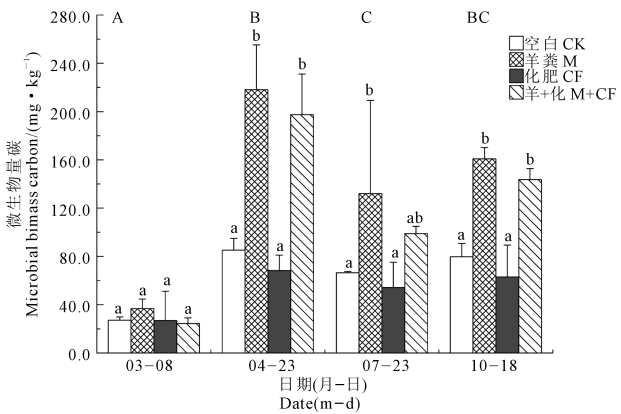


图 3 不同施肥模式对土壤微生物量碳的影响

Fig.3 Effects of different fertilization treatments on soil microbial biomass Carbon

3 讨 论

土壤容重、机械组成等物理性质直接影响农田农作物的生长发育,而长期的不同施肥模式会对其产生显著的影响。国内许多研究表明:施用有机肥会显著降低表层土壤容重,增大土壤孔隙度和通透性,有利于农作物的生长发育及土壤养分的吸收^[12-13]。长期施用化肥则会破坏土壤的结构稳定性和土壤水稳性结构,降低孔隙度,增大土壤微团聚体分散系数,从而使耕作层土壤变硬,不利于农作物根系的生长^[14]。本试验结果很好地验证了这一点,与化肥样地相比,施加羊粪显著降低了高原农田表层土壤容重,增加了砂粒组成,从而使土壤颗粒较粗、孔隙较大,因此土壤通气性、透水性好,有利于作物的生长。

土壤有机质是土壤质量的核心,既是氮素的供给源,也影响着土壤的结构,而长期的不同施肥模式会对农田土壤有机质产生显著的影响。在本研究中羊粪和羊+化处理的土壤有机质含量远远大于空白对照和化肥处理。其它研究也表明,长期不同施肥处理会使土壤有机质含量产生较大差异,单施化肥对土壤有机质含量无明显影响^[15-16],施加有机肥则可以提高土壤的有机质含量^[17-18]。究其原因主要是由于长期施加化肥可保持土壤养分,增加作物产量,根茬残留增加,维持土壤有机质基本保持不变^[16],而农田施加未经腐解的有机肥有利于活化和更新土壤有机质,增加农田土壤有机质^[19]。农业耕作对土壤 pH 的影响也很大^[20],本研究中长期施用化肥样地的土壤 pH 低于羊粪处理,其它研究也发现长期使用化肥会降低农田土壤 pH,施加有机肥

则会保持土壤 pH 稳定^[21]。因此,施加有机肥不仅可以增加西藏农田土壤中的有机质含量,同时还可以维持土壤的酸碱度从而有利于作物的生长。

土壤微生物是土壤中物质转化和养分循环的驱动者,调节着陆地生态系统营养物质循环,参与土壤中有机的分解、腐殖质的形成、土壤养分转化和循环等过程,对土壤中的养分供应起着重要作用^[22]。施肥是调节土壤微生物数量及多样性的重要措施^[23]。本试验结果表明,与空白对照相比,单纯施用化肥并未改变土壤微生物量碳,而施加羊粪对于高原农田土壤微生物量的增加起到了促进作用。其它研究也表明,长期只施用化肥与不施肥相比,并未增加土壤微生物数量^[24-25],效果远不及化肥和有机肥的配合使用^[26],而且随着有机肥用量的增加,土壤微生物量碳也随之提高^[27]。长期单纯施用化肥还会导致土壤 pH 下降和团聚体破坏,土壤微生物生命活动减弱^[28];而施加有机肥一方面不但可以增加土壤养分,为微生物提供了充足的碳源^[29],另一方面还有利于团聚体的形成,改善微生物的生存小环境。

4 结 论

综合以上分析,与单独施用化肥和不施肥相比,施加有机肥可以显著提高西藏高原农田土壤的质量,不仅能降低农田表层土壤容重,疏松土壤,还可以提高有机质的含量,稳定土壤 pH,并增加土壤中的微生物量碳。因此,在农田耕作过程中,加大有机肥料的投入,对于西藏地区农业的可持续发展意义重大。但目前由于能源缺乏,西藏大部分农村需要大量的作物秸秆和粪便作为燃料,从而导致在农田施肥中大量使用化肥,有机肥补充严重不足。因此,未来的西藏农村发展中,应加大沼气、太阳能等替代能源的发展力度,加强作物秸秆和牲畜厩粪的还田,改善西藏农田的土壤质量,稳定高原农业生产。

参 考 文 献:

[1] 赵其国,孙波. 土壤质量与持续环境 I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. 土壤,1997, 29(3):113-120.

[2] 熊东红,贺秀斌,周红艺. 土壤质量评价研究进展[J]. 世界科技研究与发展,2005,27(1):71-75.

[3] 张庆利,史学正,潘贤章,等. 江苏省金坛市土壤肥力的时空变化特征[J]. 土壤学报,2004,41(2):315-319.

[4] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报,2006,26(3):901-913.

[5] 刘世梁,傅伯杰,刘国华,等. 我国土壤质量及其评价研究的进展[J]. 土壤通报,2006,37(1):137-143.

[6] Paul E A, Clark F E. Soil Microbiology and Biochemistry[M]. New York: Academic Press, 1996.

[7] 贾伟,周怀平,解文艳,等. 长期有机无机肥配施对褐土微生物生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008, 14(4): 700-705.

[8] 张风华,王建军. 不同轮作模式对土壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4):113-116.

[9] 蔡晓布. 西藏中部草地及农田生态系统的退化及其机制[J]. 生态环境学报, 2003, 12(2):203-207.

[10] 刘国一,尼玛扎西,宋国英,等. 西藏农田土壤有机质现状及影响因素的相关性分析[J]. 西藏农业科技, 2014, 36(1):12-17.

[11] 马瑞萍,韦泽秀,卓玛. 西藏农田土壤有机质研究进展和展望[J]. 中国农学通报, 2015, 31(11):243-247.

[12] 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.

[13] 王慎强,李欣,徐富安,等. 长期施用化肥与有机肥对潮土土壤物理性质的影响[J]. 中国生态农业学报,2001,9(2):77-78.

[14] 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(11):182-187.

[15] 张爱君,张明普. 长期施用有机和无机肥料对黄潮土有机质含量及组成的影响[J]. 江苏农业研究,2001,22(3):30-33.

[16] 周卫军,王凯荣. 不同施肥制对红壤性水稻土有机质含量及品质的影响[J]. 土壤通报,1998,29(5):201-202.

[17] 韩志卿,张电学,陈洪斌,等. 长期定位施肥小麦-玉米轮作制度下土壤有机质质量演变规律[J]. 河北职业技术师范学院学报,2003, 17(4):10-14.

[18] Blake L, Goulding K W T, Mott C J B, et al. Changes in soil chemistry accompanying acidification over more than 100 years under woodland and grass at Roth Amsted Experimental Station UK [J]. European Journal of Soil Science, 1999, 50:401-412.

[19] 窦森,姜岩. 土壤施用有机物料后重组有机质变化规律的探讨Ⅱ. 对重组有机质中腐殖质组成和胡敏酸光学性质的影响[J]. 土壤学报, 1988(3):252-261.

[20] 陈银萍,罗永清,李玉强,等. 兰州地区农田土壤速效磷与速效钾含量的变化特征[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4):46-52.

[21] 蔡泽江,孙楠,王伯仁,等. 长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1):71-78.

[22] Kandeler E, Tschierko D, Spiegel H. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management[J]. Biology & Fertility of Soils, 1999, 28(4):343-351.

[23] 刘恩科,赵秉强,李秀英,等. 不同施肥制度土壤微生物量碳氮变化及细菌群落 16S rDNA V3 片段 PCR 产物的 DGGE 分析[J]. 生态学报,2007(3):1079-1085.

[24] 宇万太,姜子绍,柳敏,等. 不同土地利用方式对土壤微生物生物量碳的影响[J]. 土壤通报,2008,39(2):282-286.

[25] 范凯,何永涛,孙维,等. 不同管理措施对西藏河谷农田土壤微生物量碳的影响[J]. 中国土壤与肥料,2013(1):20-24.

[26] 徐阳春,沈其荣,冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报,2002,9(1):89-96.

[27] 杨劲峰,韩晓日,阴红彬,等. 不同施肥条件对玉米生长季耕层土壤微生物量碳的影响[J]. 中国农学通报,2006,22(1):173-175.

[28] 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义[J]. 土壤,1997,29(2):61-69.

[29] 朱丽霞,章家恩,刘文高. 根系分泌物与根际微生物相互作用研究综述[J]. 生态环境,2003,12(1):102-105.