

文章编号: 1003-8701(2015)01-0045-06

长期单施化肥对土壤有机质的影响

王 阳, 赵兰坡*, 朱孟龙, 刘胜男

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘 要: 化肥的施用对世界粮食安全起到了不可替代的保障作用。长期的定位试验, 深刻揭示了土壤肥力特征和养分平衡规律。本文结合大量长期定位试验研究资料, 综述了长期单施化肥对土壤有机质的消长以及各组分变异影响的研究进展, 为进一步解释化肥 N、P、K 单施或者配施对土壤肥力的影响提供依据, 为维持和提高农田生态系统土壤肥力提供参考, 为合理施肥提供理论支撑。

关键词: 长期; 化肥; 土壤; 有机质; 影响

中图分类号: S153.6²

文献标识码: A

DOI: 10.16423/j.cnki.1003-8701.2015.01.011

Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizer on Soil Organic Matter

WANG Yang, ZHAO Lan-po*, ZHU Meng-long, LIU Sheng-nan

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: The application of chemical fertilizer plays an important role in the guarantee of world food security. The long-term experiment reveals the characteristics of soil fertility and the law of nutrient balance. Combining with a large number of long-term research materials, progresses of researches on the growth and decline of soil organic matter and the influence of components' variation caused by long-term application of chemical fertilizer were summarized in the paper. The influence of applying N P K separately or together on soil fertility was further explained. This will provide reference to maintain and improve the soil fertility of farmland ecosystem, as well as theoretical support for rational application of fertilizer.

Keywords: Long-term; Chemical fertilizer; Soil; Organic matter; Effect

化肥作为一种极其重要的农业生产资料, 为农业增产发挥了巨大作用。根据联合国粮农组织资料显示(FAOSTAT, 2000), 过去40年中, 世界粮食产量增加了1倍, 在各项增产要素中, 西方以及日本学者一致认为, 粮食产量和化肥施用量呈现极显著的线性正相关关系, 起到了40%~50%的作用^[1]。

然而不当的化肥施用会导致土壤肥力的退化, 严重威胁着农业生产的可持续性^[2], 因此必须做到合理科学有效施肥, 提高肥料利用率的同时做到平衡施肥^[3]。有机质作为土壤质量和功能的核心, 能够提供作物所需的养分和改善土壤肥力的指标^[4], 决定着农田生态系统土壤生产力的高低和稳定性^[5], 同时, 土壤有机碳是陆地表层生态

系统中最大的碳库, 对大气碳库的源汇效应具有很大影响^[6]。土壤有机质具有胶体特性, 由于它能够吸附较多的阳离子, 从而使土壤具有保水保肥能力和缓冲性能^[7]。土壤有机质在土壤物理、化学以及生物学中发挥着至关重要的作用, 是评价土壤肥力的重要指标^[8]。

因此, 如何合理施肥, 维持和提高土壤肥力, 提高作物产量是目前需要研究的课题。长期的化肥投入对粮食生产和土壤肥力的影响程度也是人类一直关注的问题^[9]。而长期肥料定位试验具有时间上反复证明、信息量极为丰富、数据准确可靠、解释能力强、在生产上可提供决策性建议等优点, 能深刻揭示土壤肥力特征和养分平衡规律。本文结合大量长期定位试验研究资料, 综述了长期化肥单施对土壤有机质消长以及各组分变异影响的研究进展, 为维持和提高农田生态系统土壤肥力提供参考, 为合理施肥提供理论支撑。

收稿日期: 2014-07-06

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAC09B01)

作者简介: 王 阳(1989-), 女, 在读硕士, 研究方向: 土壤肥力调控。

通讯作者: 赵兰坡, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhaolanpo12@

163.com

1 施肥与土壤有机质消长

1.1 土壤有机质的来源及其含量

土壤有机质含量虽少,却是土壤中各种营养元素的重要来源,在土壤肥力上发挥着重要作用。随着生物的进化以及成土过程的发展,动植物就成为土壤有机质的基本来源。在通常的自然植被条件下,土壤中的有机物质绝大部分直接来源于植物残体和根系分泌物^[10]。在耕作土壤中,表层有机质的含量通常在5%以下,有机质的含量与气候、植被、地形、土壤类型、耕作措施等因素密切相关^[11]。森林植被下每年进入土壤的有机物质数量为4~5 t/hm²,农田植被为3~4 t/hm²^[12]。因此,施肥和耕作等是影响土壤有机质的重要因素。

1.2 单施化肥对土壤有机质含量的影响

单施化肥对土壤有机质含量的影响可谓众说纷纭。在有机质含量较低的土壤上,施用足量的化肥对提高有机质含量有明显作用。在英国洛桑试验站Broadbalk的小麦连作长期试验中,施用N、P、K肥144年后,土壤有机碳含量比对照提高了15%^[13]。但在有机质含量较高的土壤上,化肥的施用反而会降低土壤有机质的含量。在美国密苏里州的Sanborn field小麦连作长期试验中,施用N、P、K肥99年后,土壤有机碳含量比对照降低了4%^[14]。

国内有关长期单施化肥对土壤有机质含量的影响也有较多的报道。张爱君等^[15]对淮北黄潮土19年定位试验的结果表明,单施N肥可略微提高土壤有机质的含量,N肥与P、K肥配合,作物根茬残留量相应增多,土壤有机质含量均略高于N肥处理,表明施用化肥基本可以维持土壤有机质含量的稳定。陈修斌等^[16]在河西走廊旱塬灌漠土上进行11年肥料定位试验结果表明,施用N、P、NP的处理比CK处理有机质含量分别增加了15.1%、12.1%、16.1%。赵广帅等^[17]在黄淮海平原典型的轻度盐化潮土上,通过对20年不同施肥处理的研究表明,长期的N、P肥配施或N、P、K均衡施肥,可显著增加土壤有机碳储量,并且后者明显高于前者。单施化肥处理没有外源有机物进入土壤,土壤有机碳的来源主要包括作物根茬还田,单施化肥虽不能直接提高土壤中有有机物质含量,但能够增加作物生物学产量,促进农作物根系的生长,增加了土壤有机物的投入,从而提高根际土壤有机质含量^[18]。同时,作物向土壤输入有机碳主要是通过根系分泌物输入。Kuz'yakov等^[19]的研究发现,小麦同化产物的20%~30%分配进入地

下。因此,化肥对土壤有机质含量的影响与化肥对作物生长的作用密切相关。

詹其厚等^[20]对淮北变性土进行的8年定位施肥试验结果表明,有机质含量PK处理降低幅度最大为11.4%,NK降低了4.3%,N、NP、NPK处理有机质含量基本保持不变。李新爱等^[21]通过对湖南新化、宁乡、株洲、桃江、武冈五个国家级稻田肥力长期定位试验点进行的18年田间定位试验,各试验点的研究结果都是CK和化肥处理有机质含量都有不同程度的降低,降低幅度分别为5.1%~24.3%、3.0%~14.3%,表明单施化肥和不施肥只会促进土壤有机质的消耗。施肥土壤和不施用任何肥料相比有机质含量降低的原因可能是施用化肥影响了微生物的数量和活性,进而影响了有机质的降解过程,也和不同研究区土壤、气候、作物种类、农事管理及大气养分沉降差异有关。

有些研究表明,单施化肥对土壤有机质无明显增加趋势,但基本可以维持土壤有机质平衡,主要是由于连续施用增量N、P、K化肥,土壤养分供应充足,同时作物的根茬残留量较多,使土壤有机质能大体保持平衡。不同的研究结果可能与当地的气候条件、土壤状况、耕作制度及施肥量有一定关系。

张璐等^[22]对16年长期施肥条件下吉林黑土、祁阳红壤以及新疆灰漠土三种典型耕作土壤有机碳库研究表明,N肥单施和NP配施后,三种土壤的有机碳含量与对照基本保持不变,而NPK配施后,黑土有机碳含量基本保持不变,红壤有机碳含量显著增加,而灰漠土有机碳含量明显下降。N、P、K及其施用量上的差异也对土壤有机碳的累积产生不同的影响。三种土壤有如此区别主要是由于土壤自然地力的差别所引起的。张春霞等^[23]在黄土高原旱塬地黏质淋溶黑垆土上进行18年的长期肥料试验表明,耕作和长期单施化肥可以维持土壤有机质水平,化肥种类和不同施用量对其影响结果也有所不同。乔云发等^[24]通过15年定位试验研究表明,N和P对黑土有机碳含量的影响较大,而K对其影响较小。

2 施肥与土壤有机质组分

2.1 土壤有机质的分组方法

由于土壤有机质的结构和组成相对复杂,把具有高度异质性的土壤有机质作为一个整体进行研究会限制对陆地生态系统碳循环过程的认识^[25-27]。因此,只有从土壤有机质的组分研究入手才能够充

分认识土壤有机质的转化循环过程。

土壤有机质与不同粒级土粒的结合程度及其在团聚体的分布位置都会影响其分解能力与动态变化,物理分组方法是在尽量保持土壤有机质结构的前提下通过物理方法将不同有机质组分分离,这些分离出的有机质组分能够最大程度反映原状有机质的结构与功能。因此,物理分组方法受到越来越多的研究者的推崇^[28-29],物理分组方法主要包括密度分组、粒径分组和联合分组。密度分组主要分为轻组和重组,是按照土壤在一定比重溶液中的沉降特征进行分组。颗粒分组是按照一定的颗粒大小(常以0.053 mm为界限)将土壤有机质分为颗粒态有机质(POM)和矿质结合态有机质(MOM),是根据土壤有机质在土壤中分布位置的不同进行分组。团聚体对土壤有机质的物理保护和化学保护是影响生物与土壤有机质空间隔离的主要因素,从而维持土壤有机质的稳定。团聚体分组是将水稳性团聚体以0.25 mm为界进行分组,包括大团聚体与小团聚体,其中前者又可以分为两个粒级,>2 mm(A1)和0.25~2 mm(A2),后者又可分为0.25~0.053 mm(M1)和<0.053 mm(M2)。

土壤有机质按照化学方法可分为水溶性有机质(溶解性有机质)、易氧化物质、腐殖物质。水溶性有机质是用水或稀盐溶液提取的可以通过0.45 μm滤膜的土壤有机碳,其组分中只有小部分低分子量的物质(有机酸、糖类、氨基酸等)可以用化学方法鉴别^[30];大部分水溶性有机质是具有高分子量的络合物质(溶解性的腐殖质)^[31]。根据土壤有机质被氧化的数量和程度,又可将其分为活性有机质(即易氧化有机质)和非活性有机质,常用的氧化剂为KMnO₄。腐殖质是土壤有机质的主要组成,占土壤有机质的60%~90%。土壤腐殖质是除未分解和半分解动植物残体及微生物以外的有机物质的总称^[32]。土壤腐殖质一般多集中在细粒黏土矿物组分中,常与土壤的矿物质部分呈不同紧密程度的团聚状态,形成各种稳定的有机-矿质化合物或复合胶体³³。根据腐殖质类物质在酸、碱溶液中的不同的溶解度,可将其分为胡敏酸(HA)、富里酸(FA)、胡敏素(HU)。进一步根据提取剂的不同将其分作松结态、稳结态和紧结合态腐殖质类物质;根据褐色胡敏酸的光学性质将胡敏酸分为A、B、R_p型胡敏酸^[33]。作为土壤碳库中的稳定碳库,腐殖质的组成和数量对土壤碳储量的贡献及其稳定机制已经成为全球农业生态系统碳循环研究中的重要内容^[34]。

从20世纪70年代开始,人们对土壤微生物生物量就开展了大量的研究,至今,仍然是学者研究的热点问题。微生物可以转化进入土壤的有机物质,同时又是活性养分的源和库^[35]。微生物量能代表参与调控土壤中能量和养分循环及有机物质转化的微生物数量,反映微生物活性。微生物量碳、氮占土壤全碳量很小,却是土壤有机质中最为活跃的部分^[36]。可用于评价耕作、施肥等措施对土壤性质影响的有效指标,综合评价各种管理措施对土壤质量的影响^[37]。

土壤有机质的分解和转化不仅受到气候条件和土壤本身等自然因素的影响,同时也与农田管理措施密切相关,因此,针对不同的自然条件与管理措施选择适合的有机质分组方法。又由于各种分组方法都具有一定的局限性,所以应综合运用多种方法以及不同方法进行整合使用,以便多角度、多方面阐述土壤有机质的转化规律。

2.2 单施化肥对土壤有机质组分的影响

肥料施入土壤后不仅会改变土壤有机质的数量,同时将改变土壤有机质各组分的分配状况。有关长期施肥下有机质含量变化的研究表明,单施化肥能够显著增加轻组有机碳及其在土壤总有机碳的比例,且增加幅度的高低表现为:NPK≈NP>PK>NK,K肥对轻组有机碳的增加作用并不显著。

通过肥料长期定位试验,可以揭示土壤—作物体系中养分循环和平衡规律,寻求维持和提高土壤肥力的最佳施肥途径。施肥增加了作物的生产力,对颗粒有机质的累积具有积极的影响,但不同施肥方式对土壤颗粒有机质的影响有很大差异。Manna等^[38]研究了印度Indo-Gangetic平原水稻-小麦-黄麻轮作对颗粒有机质的影响,结果表明:NPK>NP>N>对照。龚伟等^[39]通过18年田间施肥试验研究表明,与不施肥处理相比,化肥NPK两者或三者之间配施均可提高红壤颗粒有机碳。不过也有研究发现,施肥对POM没有显著影响,主要原因在于C分解速率过快以及根生长受限,过量的N阻碍了土壤质量的提高。Malhi等^[40]研究指出,在薄层黑钙土种植雀麦草进行了27年长期施用N肥的试验,结果表明0~30 cm土层轻组有机碳的数量随着N肥比例增大而增加,呈显著的二次方程响应。N肥的施入能够增加黏壤土中颗粒有机质的含量,但却降低了砂质土中颗粒有机质的含量,李辉信等^[41]和佟小刚等^[42]研究表明长期施用化肥提高了游离态和闭蓄态颗粒有机碳的含量及其在土壤总有机碳的比例,且随着化肥施用量的增加而

不断升高。张春霞等^[23]在黄土高原旱塬地黏质淋溶黑垆土上进行18年的长期肥料试验表明,与基础土样相比,不施肥土壤松结合态碳含量下降了72.0%,紧结合态碳含量上升46.3%。施用N、P化肥对不同的结合态碳含量的影响差异不显著。张继光等^[43]对长期不同施肥制度下红壤微生物量的研究表明,长期单施化肥不同处理微生物量碳的含量为NPK>K>N。尹云峰等^[44]发现化肥处理的土壤轻组有机质与施肥年限呈线性相关。

土壤水溶性有机质的数量主要由输入到土壤中有有机质的数量和质量以及微生物的转化过程所决定^[45]。施用化肥对农田土壤中WSOM的影响并不一致,随着化肥的加入,水溶性有机质可能增加、降低或保持不变,变化趋势与土壤的内在属性,化肥的施用时间及施用量都有关联^[46]。

多年来,学者们关于不同施肥措施对土壤有机质组分的变化已开展了大量的研究,综合分析其研究结果主要呈以下特点:1. 由于研究目的、试验条件及分组方法的复杂多样性,导致土壤有机质分组的研究结果不一致;2. 由于活性组部分对环境因素比较敏感且其含量偏低,造成结果有很大差异;3. 以团聚体为尺度所进行的土壤有机质组分的研究逐渐成为学者关注的热点。

3 施肥与土壤有机质结构

近年来,学者们更加注重土壤有机质结构与其有机质功能的关系,认为对碳循环的研究不但要从数量上分析碳库,更需要探讨有机质质量和功能的变化^[47]。

3.1 土壤有机质的结构特征

农田土壤的抗性碳库中含有较多具有抗性的芳香结构,而烷氧碳组分的比例相对较少。Leifeld等^[48]运用CPMAS¹³C-NMR技术对不同利用方式下轻组有机质的化学结构进行了研究,表明轻组有机质主要来源于植物,其化学结构组成显示在轻组有机碳烷氧碳含量减少的原因是轻组有机质对木质素进行选择性的富集作用。

土壤类型、腐殖质的不同组分都会影响到土壤腐殖酸的组成。Ikeya等^[49]运用Pyr-GC/MS技术分析不同腐殖化度的土壤腐殖酸,在腐殖酸的腐殖化过程中,虽然脂肪族化合物占烷基碳的比例较小,但其总量随着烷基碳的减少而减少,源于木质素的苯酚衍生物随着腐殖化程度的提高而减少,而芳香碳的比例随着腐殖化程度的提高而增加。胡敏酸的结构性质也和其结合的牢固程度有

关,稳结态与松结态胡敏酸相比,前者芳构化程度高、缩合度大、分子颗粒大。分散度小、羧基含量多、活化度高^[50]。Keeler等^[51]通过¹³C-NMR测定了不同地点土壤样品中腐殖质,表明不同土壤中HA、FA、HU的结构特征相似,同时指出,HA和FA是两种类型的有机质,FA不是胡敏酸的降解产物。Spaccini等^[52]对比了农田和森林土壤中腐殖物质的结构特征指出,HA、FA及HU结构中疏水基团含量低于亲水基团,而耕作和开垦会使腐殖物质组分结构中烷基与疏水基团含量降低。在研究土壤有机质结构过程中使用现代仪器进行分析,使得研究取得了很大的进展,也使我们对它有了更进一步的了解。但是由于土壤有机质结构的复杂性和多样性,对其的研究仍有很多亟待解决的问题。

3.2 单施化肥对土壤有机质结构的影响

农田管理措施不仅影响土壤有机质的含量,同时也会对土壤有机质结构产生一定的影响。Zhou等^[53]采用CPMAS¹³C-NMR技术对长期不同施肥处理下红壤性水稻土和黄泥土本体土壤以及水稳性团聚体中颗粒有机质的化学结构特征进行了分析,结果表明不同施肥处理下本体土壤和不同粒径水稳性团聚体中颗粒有机质的结构组成相似,主要由烷氧碳、烷基碳和芳香碳组成。和化肥配施有机肥相比,单施化肥下烷氧碳量高,而烷基碳量、芳香度及颗粒有机质稳定性均低于前者。高忠霞等^[54]对长期不同培肥处理下水溶性有机质的结构进行研究表明,NPK配施的土壤中溶解性有机物结构相对复杂的芳香化合物所占比例明显大于CK。

土壤腐殖质的组成状况是衡量其品质的重要指标,龚伟等^[55]对华北平原小麦-玉米轮作农田生态系统进行了18年的田间施肥试验,结果表明,与不施肥处理相比,化肥N、P、K两者或以上配施均可提高黄潮土腐殖质及活性腐殖质组分碳的含量,其中NPK均衡施用效果最佳。张奇春等^[56]应用红外光谱和¹H-NMR波谱法对不同化肥施用对土壤腐殖质结构的影响进行研究,表明¹H-NMR波谱图在不同化肥处理下较为相似,施用化肥对HA结构的年轻化、简单化有益,NPK配施效果高于PK配施。张春霞等^[23]在黄土高原旱塬地黏质淋溶黑垆土上进行18年的长期肥料试验表明化肥单施与不施肥处理相比,土壤胡敏酸含量、腐殖化度、H/F值都低,且HA>FA,而NP配施处理为FA>HA,施P肥处理土壤H/F值比施N处理的高,

说明化肥种类影响土壤胡敏酸和富里酸相互转化和分配比例。

综上所述,长期施用化肥在促进粮食生产的同时,也对土壤有机质产生较大影响。国内外针对长期化肥单施对土壤有机质含量、组成及结构的影响众说纷纭,这是由于不同研究区土壤、气候、作物种类、农事管理及大气养分沉降差异有关。同时也表明,大量化肥的施用,也给予其可持续发展带来新的挑战。长期定位试验的研究结果将对未来土壤管理与肥力调控具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 王祖力,肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析[J]. 农业经济问题(月刊),2008(8):65-68.
- [2] 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.
- [3] 黄成敏. 化肥施用与土壤退化[J]. 资源开发与市场,2000,16(6):348-350.
- [4] 潘根兴,曹建华,周云超. 土壤碳及其在地表系统碳循环中的意义[J]. 第四纪研究,2000,20(4):325-334.
- [5] Powlson, D S, Oik D C, 2000 long-term soil organic matter dynamics In G.J.D Kirk and D.C. Oik(ed.) Carbon and nitrogen dynamics in flooded soils. Proc. Worksh. on Carbon and nitrogen Dynamics in Flooded Soils, Los Baiios, Philippines. 19-22 Apr. 1999. IRRI, Makati City, Philippines .
- [6] Post W M, Emanuel W P, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature,1982(298): 156-159 .
- [7] Carter M R. Analysis of soil organic matter storage in agroecosystems//Carter MR, Stewart BA. Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils. Boca Raton, FL: Lewis Publ. CRC Press, 1996 .
- [8] 程艳丽,邹德乙. 长期定位施肥残留养分对作物产量及土壤化学性质的影响[J]. 土壤通报,2007,38(1):64-67.
- [9] 郭胜利,周印东,张文菊,等. 长期施用化肥对粮食生产和土壤质量性状的影响[J]. 水土保持研究,2003,10(1):16-22.
- [10] 窦 森. 土壤有机质[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [11] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [12] 关连珠,李慧卓,窦 森. 普通土壤学[M]. 北京:中国农业大学出版社. 2007.
- [13] 吴金水. 土壤有机质及其周转动力学[M]. 北京:科学出版社,1994.
- [14] Mitchell C C, Weaterman R L, Brown J R. Overview of long-term agronomic research[J]. Agronomy Journal, 1991(83): 24-29 .
- [15] 张爱君,张明普. 黄潮土长期轮作施肥土壤有机质消长规律的研究[J]. 安徽农业大学学报,2002,29(1):60-63.
- [16] 陈修斌,邹志荣. 河西走廊旱塬长期定位施肥对土壤理化性质及春小麦增产效果的研究[J]. 土壤通报,2005,36(6):888-890.
- [17] 赵广帅,李发东,李运生,等. 长期施肥对土壤有机质积累的影响[J]. 生态环境,2012,21(5):840-847.
- [18] 潘根兴,周 萍,张旭辉,等. 不同施肥对水稻土作物碳同化与土壤碳固定的影响——以太湖地区黄泥土肥料长期试验为例[J]. 生态学报,2006,26(11):3704-3710.
- [19] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000(32):1485-1498 .
- [20] 詹其厚,陈 杰. 基于长期定位试验的变性土养分持续供给能力和作物响应研究[J]. 土壤学报,2006,43(1):124-132.
- [21] 李新爱,童成立,蒋 平,等. 长期不同施肥对稻田土壤有机质和全氮的影响[J]. 土壤,2006,38(3):298-303.
- [22] 张 璐,张文菊,徐明岗,等. 长期施肥对中国3种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(5):1646-1655.
- [23] 张春霞,郝明德,谢佰承. 不同化肥施用量对土壤碳库的影响[J]. 土壤通报,2006(10):862-864.
- [24] 乔云发,苗淑杰,韩晓增. 长期施肥条件下黑土有机碳和氮的动态变化[J]. 土壤通报,2008,39(3):545-548.
- [25] Gaius R, Shaver A E, Giblin K J, et al. Carbon turnover in Alaskan tundra soils: effects of organic matter quality, temperature, moisture and fertilizer[J]. Journal of Ecology, 2006, 94(4):740-753 .
- [26] Steinbeiss S, Bessler H, Engels C, et al. Plant diversity positively affects short-term soil carbon storage in experimental grasslands [J]. Global Change Biology, 2008(14): 2937-2949 .
- [27] 周 萍, Piccolo A, 潘根兴,等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究Ⅲ. 两种水稻土颗粒有机质结构特征的变化[J]. 土壤学报,2009,46(3):398-405.
- [28] Tamon Yamashita, Bettina John, Bernard Ludwig. Organic matter in density fractions of water-stable aggregates in silty soils: Effect of land use[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(11): 3222-3234 .
- [29] Llorente M, Glaser B, Turrinon M B. Storage of organic carbon and black carbon in density fractions of calcareous soils under different land use[J]. Geoderma, 2010(159): 31-38 .
- [30] Herbert B E, Bertsch P M. Characterization of dissolved and colloidal organic matter in soil solution: A review. In Carbon forms and functions in forest soils[J]. J. M. Kelly and W. W. McFee (eds.). SSSA, Madison, WI, 1995: 63-88 .
- [31] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review[J]. Soil Science, 2000(165): 277-304 .
- [32] 武天云, J J Schoenau, 李凤民,等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. 应用生态学报,2004,15(4):717-722.
- [33] 李云峰. 土壤腐殖质的研究[D]. 杭州:浙江大学,1996.
- [34] Lutzow M V, Kogel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions: a review[J]. European Journal of Soil Science, 2006(57): 426-445 .
- [35] Singh J S, Raghubanshi A S, Srivastava S C. Microbial biomass act as a source of plant nutrients in drytropical forest and savanna [J]. Nature, 1989(338): 499-500 .
- [36] Anderson T H, Domsch K H. Application of eco-physiological quotients(qCO₂ and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990(22): 251-255 .
- [37] Hargreaves P R, Brookes P C, Ross G J S, et al. Evaluating soil

- microbial biomass carbon as an indicator of long-term environment change[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003(35): 401-407.
- [38] Manna M C, Swarup A, Wanjarri R H, et al. Long-term effect of fertilizer application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustain ability under sub-humid and semi-arid tropical India[J]. *Field Crops Research*, 2005(93): 264-280.
- [39] Wander M M, Yun W, Goldstein W A. Organic N and particulate organic matter fraction in organic and conventional farming systems with a history of manure application[J]. *Plant and Soil*, 2007(291): 311-321.
- [40] Malhi S S, Harapiak J T, Noyborg M, et al. Total and light fraction organic C in a thick black Chernozemic grass and soil as affected by 27 annual applications of six rates of fertilizer[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003(66): 33-41.
- [41] 李辉信,袁颖红,黄欠如,等.长期施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳的影响[J]. *土壤学报*, 2008,45(2):259-266.
- [42] 佟小刚,徐明岗,张文菊,等.长期施肥对红壤和潮土颗粒有机碳含量与分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2008,41(11):3664-3671.
- [43] 张继光,秦江涛,要文倩,等.长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响[J]. *土壤*, 2010,43(3):364-371.
- [44] 尹云锋,蔡祖聪,钦绳武.长期施肥条件下潮土不同组有机质的动态研究[J]. *应用生态学报*, 2005,16(5):875-878.
- [45] Smolander A, Kitunen V. Soil microbial activities and characteristics of dissolved organic and Nin relation to tree species[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002(34): 651-660.
- [46] Marschner B, Kalbitz K. Controls of Bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soil[J]. *Geoderma*, 2003(113):211-235.
- [47] Janzen H H. Carbon cycling in earth system—a soil science perspective[J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2004(104): 399-417.
- [48] Leifeld, Kogel-Knabner. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use[J]. *Geoderma*, 2005(124): 143-155.
- [49] Ikeya K, Yamamoto S, Watanabe A. Semi-quantitative GC/MS analysis of thermo chemolysis products of soil humic acids with various degrees of humification[J]. *Organic Geochemistry*, 2004(35): 583-594.
- [50] 闫娥,孙文凤.土壤腐殖质的分析化学研究现状[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2000,18(5):17-18,22.
- [51] Keeler C, Kelly E F, Maciel G E. Chemical-structural information from solid-state ¹³C NMR studies of a suite of humic materials from a lower montane forest soil, Colorado, USA[J]. *Geoderma*, 2006(130): 124-140.
- [52] Spaccini R, Mbagwu J S C, Conte P, et al. Change of humic substances characteristics from forested to cultivated soils in Ethiopia[J]. *Geoderma*, 2006(132): 9-19.
- [53] Zhou P, Pan G X, Spaccini R, et al. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China[J]. *Biogeosciences*, 2010(7): 409-425.
- [54] 高忠霞,周建斌,王祥,等.不同培肥处理对土壤溶解性有机碳含量及特性的影响[J]. *土壤学报*, 2010,47(1):115-121.
- [55] 龚伟,颜晓元,王景燕,等.长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤腐殖质组分碳和氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009,15(6):1245-1252.
- [56] 张奇春,王光火.施用化肥对土壤腐殖质结构特征的影响[J]. *土壤学报*, 2006,43(4):617-623.

(上接第44页)对下季作物产量产生严重影响。从保护环境角度来说,也不能大量施用磷肥,一方面是浪费磷肥资源,增加种植成本;另一方面,易造成水体富营养等一系列的环境问题。

参考文献:

- [1] 孟佳佳,董树亭,张吉旺,等.玉米不同部位子粒灌浆特性与粒重的关系研究[J]. *玉米科学*, 2013,21(4):42-47,54.
- [2] 彭正萍,张家铜,袁硕,等.不同供磷水平对玉米干物质和磷动态积累及分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009(4):793-798.
- [3] 戴照福,王继增,程炯.土壤磷素非点源污染及其对环境影响的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006(S1):323-327.
- [4] Darilek J L, Huang B, Wang Z, et al. Changes in soil fertility parameters and the environmental effects in a rapidly developing region of China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009,129(1): 286-292.
- [5] 梁林洲,沈仁芳,伊晓云,等.高磷土壤施用磷肥对小白菜和苋菜产量及肥料利用率的影响[J]. *江苏农业学报*, 2010(1):70-74.
- [6] 李孝良,叶诗瑛.高磷土壤磷肥施用效果研究[J]. *安徽技术师范学院学报*, 2002(4):37-39.
- [7] 鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [8] 朱庆森,曹显祖,骆亦其.水稻子粒灌浆的生长分析[J]. *作物学报*, 1988,9(3):182-192.
- [9] 杨锦忠,张洪生,杜天庆,等.玉米果穗生长特征的量纲分析[J]. *玉米科学*, 2013,21(4):148-152.
- [10] 王育红,张园,王向阳,等.不同生态型夏玉米灌浆参数的模糊聚类分析[J]. *玉米科学*, 2010(1):77-81.
- [11] 刘明,齐华,张卫健,等.深松与施氮方式对春玉米子粒灌浆及产量和品质的影响[J]. *玉米科学*, 2013(3):115-119,130.
- [12] 邢月华,汪仁,包红静,等.不同磷肥用量对玉米产量·效益及养分吸收的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011(32):19834-19835,19923.
- [13] 李银水,鲁剑巍,廖星,等.磷肥用量对油菜产量及磷素利用效率的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2011(1):52-56.
- [14] 陈钢,吴礼树,李煜华,等.不同供磷水平对西瓜产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007(6):1189-1192.
- [15] 程明芳,何萍,金继运.我国主要作物磷肥利用率的研究进展[J]. *作物杂志*, 2010(1):12-14.
- [16] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.