

李彦, 孙翠平, 井永苹, 等. 长期施用有机肥对潮土土壤肥力及硝态氮运移规律的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1386–1394.

LI Yan, SUN Cui-ping, JING Yong-ping, et al. Effects of long-term application of organic manure on soil fertility and nitrate-N transport in fluvo-aquic soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1386–1394.

长期施用有机肥对潮土土壤肥力及硝态氮运移规律的影响

李彦^{1,2,3}, 孙翠平¹, 井永苹^{1,2,3}, 罗加法^{1,5}, 张英鹏^{1,2,3}, 仲子文^{1,2,3}, 孙明^{1,2,3}, 薄录吉^{1,2,3}, 刘兆辉^{2,3,4*}

(1.山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100; 2.农业部黄淮海重点实验室, 济南 250100; 3.山东省农业面源污染防治重点实验室, 济南 250100; 4.山东省农业科学院, 济南 250100; 5.新西兰农业科学院鲁亚库拉研究中心, 新西兰 哈密尔顿 3240)

摘要:以连续不同年限定位施用有机肥的小麦-玉米轮作农田为研究对象, 设置4个处理: 连续施用化肥(长期施用化肥, 未施用有机肥); 3年连续施用有机肥(不施化肥); 5年连续施用有机肥(不施化肥); 20年连续施用有机肥(不施化肥), 探索不同年限连续有机施肥下土壤肥力、小麦产量和土体硝态氮累积量分布的变化。结果表明, 连续施用有机肥可显著降低土壤容重、增加土壤中速效养分含量, 且年限越长, 效果越明显。化肥处理的小麦产量显著高于有机肥处理, 有机肥处理中小麦产量随施肥年限的增加而降低, 但无显著性差异。不同土壤深度硝态氮累积量表现为有机肥处理大于无机肥处理, 小麦季大于玉米季; 随着土壤深度增加土壤硝态氮累积量呈现先降低后增加的趋势, 且各土层硝态氮累积量随施用有机肥年限增加而增加; 通过分析 80~100 cm 土层硝态氮累积量发现, 20年连续施用有机肥处理在此层的累积量最大达 240 kg·hm⁻²。由此可见, 连续施用有机肥可降低小麦产量, 连续20年施用有机肥土壤硝态氮总累积量和土体下层累积量均达到最大, 具有一定的硝态氮淋失风险。因此, 需采取一定的措施来增加作物产量, 减少硝态氮累积, 防止地下水硝态氮污染。

关键词: 有机肥; 小麦-玉米轮作; 有机质; 速效养分; 硝态氮淋失

中图分类号: X592 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2017)07-1386-09 doi:10.11654/jaes.2017-0316

Effects of long-term application of organic manure on soil fertility and nitrate-N transport in fluvo-aquic soil

LI Yan^{1,2,3}, SUN Cui-ping¹, JING Yong-ping^{1,2,3}, LUO Jia-fa^{1,5}, ZHANG Ying-peng^{1,2,3}, ZHONG Zi-wen^{1,2,3}, SUN Ming^{1,2,3}, BO Lu-ji^{1,2,3}, LIU Zhao-hui^{2,3,4*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment in Huang-Huai-Hai Plain, Ministry of Agriculture, Ji'nan 250100, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Agricultural Non-Point Source Pollution Control, Ji'nan 250100, China; 4. Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100, China; 5. AgResearch, Ruakura Research Centre, Hamilton 3240, New Zealand)

收稿日期: 2017-03-09

作者简介: 李彦(1970—), 女, 黑龙江肇源县人, 研究员, 主要从事农业面源污染防治研究。E-mail: nkyliyan@126.com

*** 通信作者:** 刘兆辉 E-mail: liuzhaohuinky@163.com

基金项目: 公益性农业行业科研专项(201503106); 山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2016B09); “海外泰山学者”建设工程专项; 山东省自然科学基金项目(ZR2016DB28); 山东省农业科学院青年科研基金项目(2016YQN40)

Project supported: Special Scientific Research Fund of Agricultural Public Welfare Profession of China(201503106); Agricultural Science and Technology Innovation Project of Shandong Academy of Agricultural Sciences(CXGC2016B09); Special Construction Project of “Overseas Taishan Scholar”; The Natural Science Foundation of Shandong Province, China(ZR2016DB28); The Young Scientists Fund Project of Shandong Academy of Agricultural Sciences(2016YQN40)

Abstract: The environmental problems caused by long-term fertilization, especially groundwater pollution resulting from leaching of nitrate nitrogen($\text{NO}_3\text{-N}$), have received increasing attention. A long-term field experiment was established in an intensively cultivated alluvial soil in the North China Plain, where a wheat-maize rotation was practiced. Treatments included continuous application of mineral fertilizer (no organic manure application) and three durations of organic manure application with no mineral fertilizer (3, 5, and 20 years). Changes in soil fertility, crop yield, and soil nitrate accumulation were explored. The results showed that the longer the period of continuous organic manure application, the more significantly the soil bulk density decreased and the soil nutrient content increased. The crop yield from the mineral fertilizer treatment was significantly higher than that from the organic manure treatments. The yield decreased as the number of organic manure application years increased, but there was no significant difference among the three organic manure treatments. In the soil profiles, it was shown that the $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation in the organic manure treatment was greater than that in the mineral fertilizer treatment. The $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation firstly decreased and then increased with increasing soil depth, and there was a positive relationship between $\text{NO}_3\text{-N}$ content and the number of organic manure application years. The amount of accumulated $\text{NO}_3\text{-N}$ in the 80~100 cm soil layer was up to $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ after 20 years of continuous organic manure application. Therefore, continuous application of organic manure could reduce crop yield and there is a definite risk of nitrate leaching after 20 years of organic manure application. More research is required to develop measures to increase crop yield, alleviate the accumulation of $\text{NO}_3\text{-N}$, and prevent nitrate pollution of groundwater when continuously applying organic manure.

Keywords: organic manure; wheat-maize rotation; organic matter; available nutrients; nitrate leaching

土壤肥力是影响作物产量至关重要的因素,尤其以氮肥的增产效果最为显著,因此,为提高作物产量农民向农田投入大量氮肥,导致土壤养分失衡及硝态氮累积,硝酸盐的淋失风险增强,这不仅会造成土体中氮素的损失,影响其有效性,还会恶化环境^[1]。由于各地重化肥、轻有机肥,有机肥用量逐年减少,导致肥料经济效益总体下降,农业生产成本升高。另外,随着养殖业的规模化发展,畜禽粪便的随意堆放成为面源污染加剧的另一重要因素,其对农业环境构成的威胁不容忽视,而有机肥在农业生产中具有改土培肥、净化废物、提高作物产量和改善作物品质的功效,但也有研究表明有机肥的不合理使用会给农业环境带来污染^[2-3]。关于长期定位施用有机肥对土壤肥力、作物产量和环境的影响研究较少,还需要进一步研究。因此,为合理使用畜禽粪便有机肥、保证作物产量和防控农业面源污染,探索长期单独施用有机肥对土壤肥力及硝态氮运移规律的影响具有重要意义。长远来看,种养结合模式,是符合物质守恒定律的有机肥最佳消纳途径,有机肥的长期定位试验为有机肥的合理施用提供了必要的理论依据。

长达 26 年的定位试验结果显示,与单施化肥相比,单施有机肥和有机无机肥配施能调节土壤养分平衡,从土壤物理、化学、生物方面综合提升土壤肥力水平,提高土壤养分供应能力^[4]。有机废物和残余物管理可以通过提高有机碳稳定性来增加土壤有机质,土壤有机碳的储存在改善土壤性质、保持作物生产力和环境质量方面具有重要作用^[5-6]。有机肥在提升土壤肥力的同时,过量和长期的施用也会造成一定

的氮磷污染。硝态氮不易被土壤胶体所吸附,迁移性强,容易引起地下水的污染^[2]。杨林章等^[7]提到施肥和降雨是影响农田养分流失的关键因素,施肥后降雨将会使径流水中养分浓度迅速增大。地下淋溶是华北地区农田土壤氮素的主要损失途径,过量施用有机肥会导致设施土壤中硝态氮的累积^[3,8]。而有研究表明,施用有机肥可增加土壤粒径及团聚体含量,提高 CEC 代换量,增加对硝态氮的固持,减缓硝态氮向下迁移^[9]。施用有机肥对土壤硝态氮累积影响的结论存在矛盾,这从一个侧面说明该领域研究相对薄弱。

目前,大多研究主要集中在有机无机肥配施以及减少化肥施用量对土壤肥力、作物产量、氮素吸收的影响方面^[10],对于长期单独施用有机肥条件下土壤肥力和氮素淋失的研究鲜有报道。本文对不同年限下连续施用有机肥对土壤理化性状、土壤硝态氮累积和作物产量的影响进行了研究,以期了解土壤肥力变化及硝态氮运移的规律,揭示有机肥施用与土壤培肥和氮素流失环境风险之间的相关性,为有机肥的合理利用提供科学依据,进而达到增加作物产量、减少环境污染的目的。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地位于山东省菏泽市曹县曹城镇五里墩村银香伟业集团的科技示范园内($115^{\circ}34'55''\text{E}$, $34^{\circ}50'38''\text{N}$)。该试验地位于典型的华北平原地区,地势平坦,属北亚热带季风气候地区,年均气温 $13\sim 14^{\circ}\text{C}$,年均日照 2147 h ,年均降雨量 $610\sim 710 \text{ mm}$,无霜期

205~230 d。供试土壤类型为潮土,为黄河沉积物。供试前 0~20 cm 土层土壤有机质 $13.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $93.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $17.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $129.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 8.56。供试作物冬小麦、夏玉米轮作,一年两熟。

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理,分别为①CF(连续施用化肥,1995—2015 年);②CM3(3 年连续施用有机肥,2012—2015 年);③CM5(5 年连续施用有机肥,2010—2015 年);④CM20(20 年连续施用有机肥,1995—2015 年),各个处理试验前均按农民习惯施肥与管理,每个处理 3 次重复,随机排列,试验小区面积 64 m^2 ,每年的施肥量保持不变。

供试有机肥为牛粪。氮、磷、钾化肥分别选用尿素、重过磷酸钙、硫酸钾,化肥年施用量: $\text{N } 420 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{P}_2\text{O}_5 75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{K}_2\text{O } 105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。牛粪养分含量见表 1,每年牛粪施用量根据养分含量以等氮量为依据计算。小麦季和玉米季各施一半,且均为播种前基施,后期不再追肥。氮、磷、钾肥总用量分别在小麦、玉米季各施一半。磷、钾肥和一半量的氮肥在小麦、玉米播种前基施,剩余的氮肥分别在小麦拔节期和玉米大喇叭口期追施。

表 1 牛粪有机肥养分含量

Table 1 Nutrients content in the cow manure

N/%	$\text{P}_2\text{O}_5/\%$	$\text{K}_2\text{O}/\%$	有机质/%	水分/%
1.68~2.10	1.25~1.46	1.23~1.48	45.2~80.6	29.7~65.2

供试小麦品种为济麦 22,采用机械 25 cm 等行距播种,每公顷播种量为 187.5 kg ;玉米品种为郑丹 958,播种方式为点种,60 cm 等行距播种,株距 25 cm,品种均为当地主要栽培品种。化肥和牛粪有机肥于 10 月播种小麦前和 6 月播种玉米前撒施,机械旋耕,水、管理等措施参考当地传统种植习惯,采用常规栽培模式。冬小麦和玉米分别于 6 月和 9 月收获。试验期作物不同生育阶段的平均降水量见图 1。玉米茬口内总降水 468.1 mm:播种~拔节期 85.3 mm,拔节~喇叭口期 144.4 mm,喇叭口~开花期 67.5 mm,开花~乳熟期 107.2 mm,乳熟~完熟期 63.7 mm。小麦茬口内总降水 178.7 mm:播种~入冬期 32.6 mm,入冬期~返青期 35.4 mm,返青~拔节期 16.2 mm,拔节~扬花期 35.8 mm,扬花~成熟期 58.7 mm。

1.3 样品采集

土样于小麦季的入冬期、返青期、拔节期、成熟

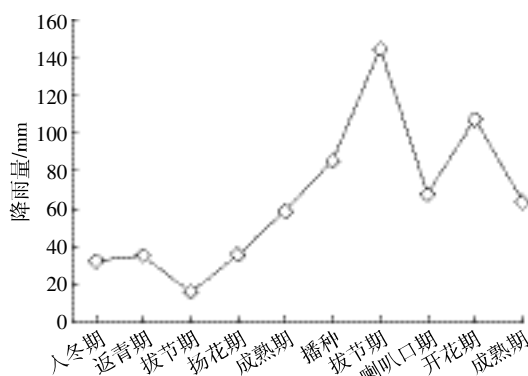


图 1 降雨量随发育期变化

Figure 1 Rainfall during crop growth period

期,玉米季的幼苗期、拔节期、开花期和收获期进行采集,测量土壤硝态氮含量。土样分 5 层采集(0~20、20~40、40~60、60~80 cm 和 80~100 cm),相同土层每个小区内随机取 3 个点混合作为 1 个重复,置于冰柜中冷冻保存或立时测定。小麦季成熟期和玉米季收获期 0~20 cm 土样经晾干、磨碎,分别过 20 目和 100 目筛,用于测量土壤速效养分含量和有机质含量。

1.4 土壤分析

土壤样品分析均采用常规方法^[11]。有机质采用丘林法,碱解氮采用碱解扩散法,有效磷采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法(Olsen 法),速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度法。土壤硝态氮测定:鲜土用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提,滤液通过流动注射分析仪测定土壤硝态氮含量。植株全氮、全磷和全钾含量测定:均采用浓硫酸-双氧水消煮,全氮利用半微量凯氏定氮法测定,全磷采用钒钼黄比色法测定,全钾测定采用火焰光度法。

1.5 计算与统计方法

根据所测定的各土层硝态氮含量和土壤容重计算每一土层(20 cm)的硝态氮累积量,土壤剖面各个土层的硝态氮累积量相加,即为一定深度土壤剖面硝态氮累积总量^[12]。

土壤剖面硝态氮累积量的计算:

$$R_i = C \times D \times H \times A \times 10^{-3}$$

式中: R_i 为每一土层的硝态氮累积量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; C 为该土层土壤硝态氮含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; D 为土层土壤容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; H 为土层厚度, m; A 为每公顷土地的面积, $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 。

土壤容重采用环刀法测定,计算公式:

$$\text{土壤容重} (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}) = \text{干土质量} / \text{容积}。$$

应用 SPSS 16.0 分析数据,利用单因素分析进行差异性分析($P < 0.05$),文中所列数据均为 3 次重复平

均值。

2 结果与分析

2.1 土壤容重变化趋势

土壤容重是土壤最基本的物理性状之一,能够影响植物赖以生存的土壤环境中水、肥、气、热的状况,进而影响植物的生长^[13]。

试验对 4 个处理的 0~20、20~40、40~60 cm 的土层进行了土壤容重分析(图 2)。从图中可以看出,随着年限的增加,土壤容重呈现下降趋势;对于耕作层和犁底层,化肥处理和 3 年有机肥处理明显高于 20 年有机肥处理,而 5 年有机肥处理与其他 3 个处理差异不显著;对于 40~60 cm 土层,20 年有机肥处理土壤容重明显低于其他 3 个处理。对于不同土层,耕作层以下土壤容重大于耕作层,原因可能是耕作层含有大量植物根系,能增加土壤空隙;而 20~40 cm 土层的土壤容重大于 40~60 cm 土层的,明显是由于 20~40 cm 存在犁底层。

2.2 耕层土壤有机质含量变化趋势

土壤有机质含量是土壤肥力的重要表征之一,而施用肥料时间的长短和肥料种类会对有机质含量产生明显影响。

从图 3 可以看出,4 个处理中土壤有机质含量在小麦收获期和玉米收获期的变化趋势相同且含量相差不大,有机肥处理比化肥处理更能增加土壤中有机质含量,且随有机肥施用年限的增加而增大。与供试前土壤相比,化肥处理土壤有机质含量略有下降,可能是作物对有机质的吸收量大于施用量。而经过 3、

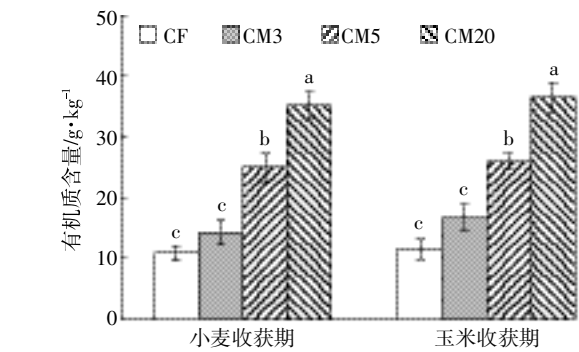


图 3 收获期化肥及不同年限有机肥处理土壤有机质含量变化
Figure 3 Change in soil organic matter for fertilizer and different durations of organic manure application at harvest stages

5、20 年连续有机肥施用后,土壤有机质含量年递增率平均分别为 0.775、2.442、1.130 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,可见随着年限的增加土壤有机质含量增加速率呈现先增大后减小的趋势。

2.3 耕层土壤速效养分含量变化趋势

对于土壤碱解氮含量的变化,与供试前土壤相比,化肥处理土壤碱解氮含量明显降低(表 2),在相同施氮量下有机肥处理碱解氮含量显著增加,连续施用 3、5、20 年有机肥后碱解氮含量分别增加了 32%、36.81%、18.04%,原因可能是化肥氮的径流损失量较多,而施用有机肥可增加土壤中有机氮的来源。

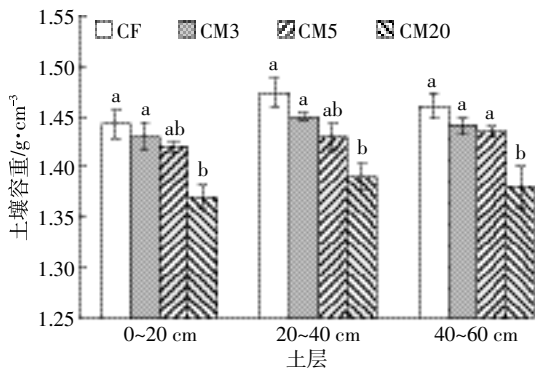
对于土壤有效磷含量的变化,与供试前土壤相比,施用化肥和有机肥均明显增加了土壤有效磷含量(表 2)。与供试前土壤相比,3、5、20 年有机肥处理有效磷年递增量分别为 12.84、12.16、12.09 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,由此可见,土壤中有效磷含量与施入有机肥的年限有较高相关性。

与供试前土壤相比,化肥处理和连续 3、5 年有机肥处理的土壤速效钾含量变化不大,连续施用 20 年有机肥能明显增加土壤中速效钾含量(表 2)。3、5、20 年有机肥处理的年递增量分别为 17.28、17.83、33.88 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可见施用有机肥的年限越长,土壤速效钾含量增加速度越快。

表 2 长期施肥对土壤速效养分的影响

Table 2 Effect of long-term fertilization on available nutrients

处理	碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
供试前土壤	93.54±5.12bc	17.76±2.58c	129.17±7.15b
CF	78.29±6.34c	42.72±8.02bc	134.78±6.05b
CM3	123.47±18.87ab	56.27±15.92bc	181.00±12.37b
CM5	127.97±2.81a	90.73±12.84b	218.33±2.59b
CM20	110.41±16.29abc	259.58±19.72a	806.67±44.67a



图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。以下图表相同
Different lowercase letters indicate significant differences($P<0.05$) among different treatments. The same in subsequent figures and tables

图 2 化肥及不同年限有机肥处理对土壤容重的影响

Figure 2 Effect of fertilizer and different durations of organic manure application on soil bulk density

2.4 小麦产量及养分吸收的变化

不同处理对小麦产量的影响见图4。4个处理中化肥处理小麦产量最高,为 $5\,889.95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,明显高于其他3个处理($P<0.05$);有机肥处理中,小麦产量随施用有机肥年限的增加而降低,但差异不显著($P>0.05$)。

不同处理对小麦(籽粒和秸秆)养分累积的影响见图5。对于氮素养分累积,由于化肥处理小麦产量较高,氮累积量最高;随着有机肥施用年限增加,氮元素累积量逐渐增加,3年有机肥连续处理小麦氮累积量最少,显著低于20年有机肥处理,化肥和20年有机肥处理两者无显著性差异。对于磷素养分累积,4个处理差异不显著。对于钾素养分累积,随施用有机肥年限的增加,钾累积量增大,20年有机肥处理显著高于化肥和3年有机肥处理,与5年有机肥处理无显著性差异。

2.5 土体硝态氮累积运移规律

2.5.1 土体硝态氮累积随时间和土壤深度变化

不同深度土壤硝态氮累积现状是土壤各层硝态

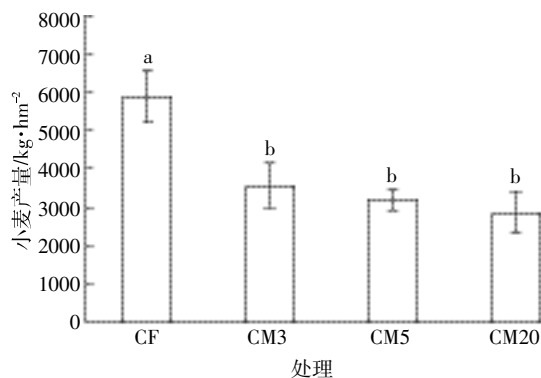


图4 不同处理对小麦产量的影响

Figure 4 Effect of different treatments on wheat yield

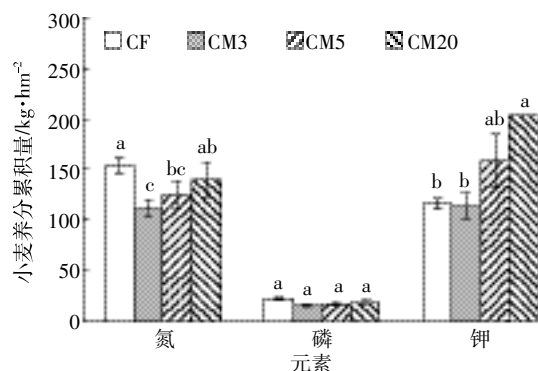


图5 不同处理对小麦养分累积量的影响

Figure 5 Effect of different treatments on nutrient accumulation in wheat

氮的本底累积量、作物吸收和灌溉降水引起的施入肥料运移等共同作用的结果^[14]。

从图6中可以看出,随土层深度的增加,土体剖面中硝态氮累积量及其空间分布明显不同,对于化肥处理,土壤硝态氮累积量随土壤深度增加变化不大;对于3年和5年连续有机肥处理,土壤硝态氮随土壤深度呈先下降后缓慢上升趋势;而20年连续有机肥处理,不同土壤深度硝态氮累积量均较高,平均为 $151.39\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。由此可以看出,随着施用有机肥年限的增加,土壤硝态氮已逐渐淋溶至下层。

随着发育期的变化,降水、温度、植物生长情况等因素不断发生变化,导致不同处理在不同深度土壤中硝态氮累积量随发育期呈先升高后降低的趋势。化肥处理在各层土体中硝态氮累积量均小于连续有机肥处理,且化肥处理硝态氮累积量在小麦苗期时最大,有机肥处理硝态氮累积量于小麦收获期和玉米苗期时达到最大,这可能与有机肥分解相对较慢、氮素释放滞后等因素有关。对于连续施用有机肥处理,从图6A和图6B两图可看出,在0~40 cm土体中,小麦季时,土壤硝态氮累积量随年限增加呈现下降趋势;玉米季时,呈现上升趋势;这种区别与温度、湿度和两种作物的吸收利用不同有关。在40~100 cm土体,随施用有机肥年限增加土层中硝态氮累积量均呈升高趋势,连续20年有机肥处理的土壤硝态氮累积量显著高于3年和5年有机肥处理,在雨热同期的小麦收获期和玉米幼苗期,连续20年有机肥处理土壤硝态氮累积量存在较大的淋失风险。

2.5.2 土体硝态氮累积淋溶风险分析

土体剖面硝态氮累积量及其空间分布特征是硝态氮淋失风险的重要指标^[15]。土层80~100 cm位于作物根区以下,其氮素很难被作物根系吸收,具有淋失的风险。分析此层土壤硝态氮累积量对评估硝态氮淋失风险具有重要意义。

农田土壤中一般将80~100 cm的土层称为淋溶层,从图7中可以看出,随着发育期的变化,此淋溶层中化肥处理和3、5年连续有机肥处理的土壤硝态氮累积量呈现总体下降的趋势,而20年有机肥处理呈现先增大后减小趋势,这可能与作物的吸收利用和硝态氮的累积有关。化肥处理淋溶层硝态氮累积量最低,在 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以下;随着有机肥施用年限的增加,淋溶层硝态氮的累积量增大,20年有机肥处理在雨热同期时淋溶层硝态氮累积量最大达到 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。可见,20年连续有机肥处理中淋溶层土壤硝态

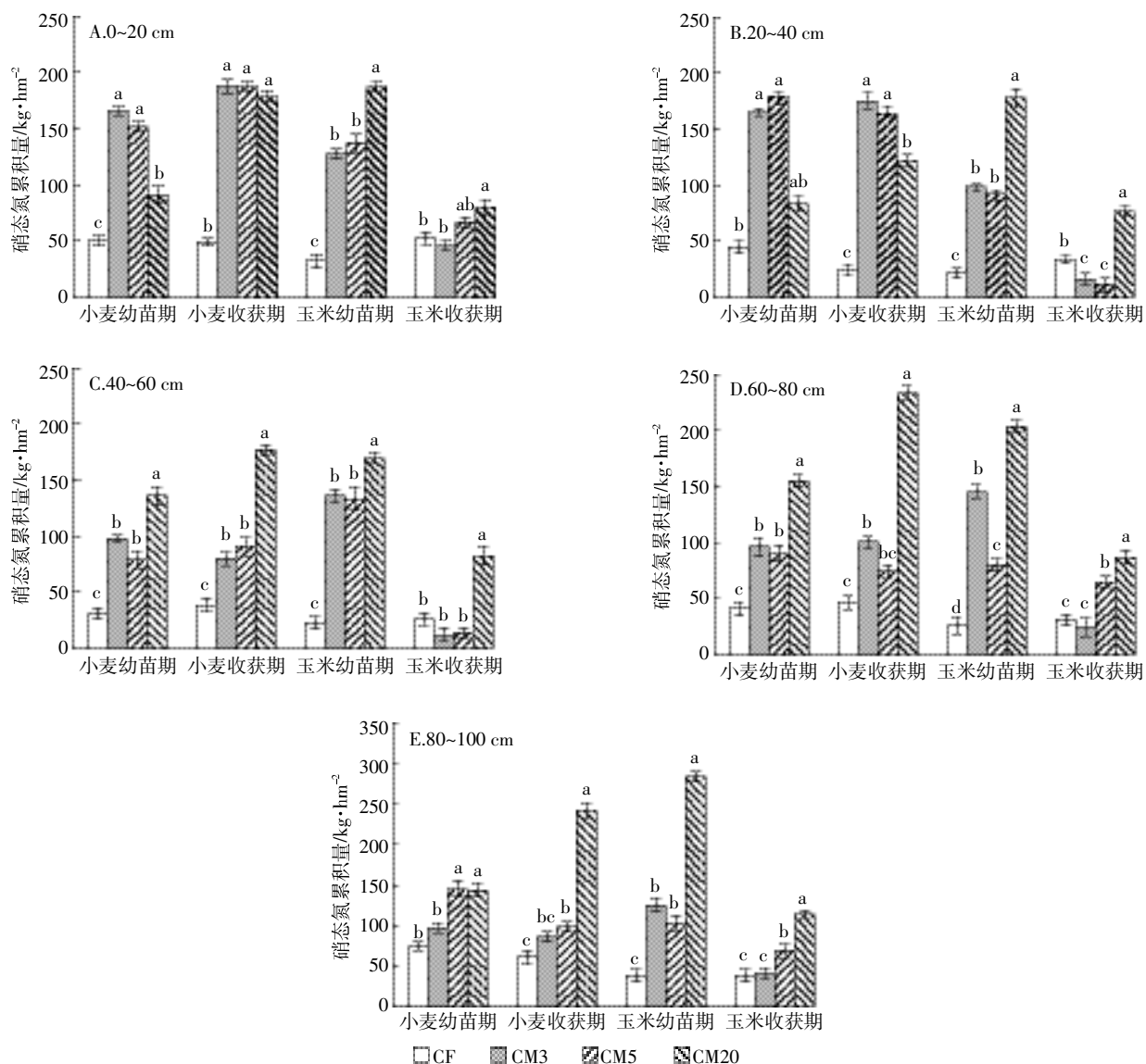


图6 不同深度土壤硝态氮积累量随发育期变化

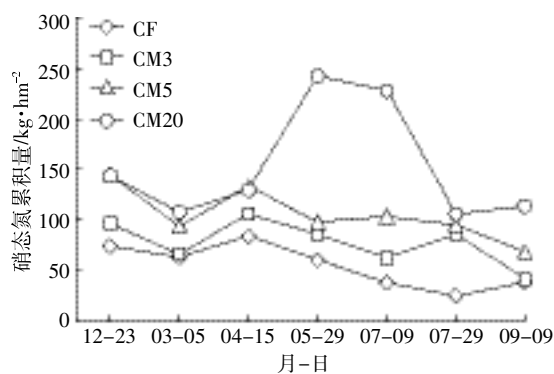
Figure 6 Change in soil $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation with change in crop maturity at different depths

图7 80~100 cm 土层硝态氮积累量随发育期的变化

Figure 7 Change in soil nitrate nitrogen accumulation in soil at 80~100 cm depth over the crop growth period

氮积累量大,且空间分布也呈现下层比例较大的特征,存在较强的淋失风险。

3 讨论

3.1 长期施肥对土壤容重和有机质的影响

与化肥处理相比,长期施用有机肥可降低土壤容重,且施用有机肥的年限越长,土壤容重降低幅度越大,这种差别是由不同施肥处理对作物生长和土壤根系的影响造成的^[16]。高慧等^[17]研究表明,设施菜地土壤耕作层中不同深度土壤容重随着种植年限的增加呈现下降趋势,与本研究结果一致。

与供试前土壤相比,长期使用有机肥能够显著提

高土壤有机质含量,而长期使用化肥降低了土壤有机质含量,此研究结果与其他研究结论一致。王磊等^[18]通过定位试验发现长期施用有机肥能明显提高土壤有机质含量,乌鲁木齐连续12年施用有机肥于灰漠土后,土壤有机质增加了38.3%,且有机质的增加量和年限之间具有良好的正相关性。每年以 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的量连续20年施用农家肥(平均碳含量为 $0.31\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$)能显著增加有机质的含量^[19]。在华北潮土中经过20年化肥处理,土壤有机质含量平均每10年下降 $0.855\sim 1.195\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,同样在连续30年单施化肥后,东北黑土有机质每10年下降 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右^[20]。可见土壤有机质含量的变化及变化量的大小与肥料类型、施用量和土壤性质有关。

3.2 长期施肥对耕层速效养分的影响

对于碱解氮的变化,有机肥处理中土壤碱解氮含量增加,而相同施氮量下化肥处理反而略微降低。有研究表明,施入有机肥后土壤中碱解氮占全氮的比例增大^[18]。随施肥年限的增加,碱解氮含量呈现先增加后减小的趋势,原因可能是20年有机肥处理土壤硝态氮迁移至下层的含量明显增加(通过硝态氮淋溶数据可以看出)。对于土壤中有效磷含量的变化,长期连续施用有机肥能明显增加有效磷含量且与施入有机肥的年限呈正相关,一方面与有机肥的施入累积量有关,另一方面,有机质和有机肥中胡敏酸和富里酸及其他有机小分子占据了土壤磷吸附位点,进而减少无机磷的固定,增加有效磷的溶解^[21]。连续施用有机肥可增加土壤中速效钾含量,年限越长增加量越多。当前农田常规施肥方式下的钾亏缺正在逐步加大,通过补充钾肥或配合施用有机肥来增加土壤中钾含量的方式应当被重视。有研究表明,配施有机肥或秸秆均可显著提高灰漠土钾肥利用率^[22]。

3.3 长期施肥对小麦产量的影响

长期施用有机肥虽增加土壤养分含量,但降低了小麦产量,且施用有机肥年限越长,小麦产量降低越多,其原因与大量使用化肥对作物带来的危害一样。过量施用有机肥造成土壤中缺水、供养不平衡,使土壤中硝酸离子成份聚积,硝酸盐含量超标,从而使作物发生肥害,表现为根部吸水困难,易发生烧根黄叶、僵苗不长、叶片畸形等病状,严重可导致作物逐渐萎缩而枯死,因此小麦产量随施用有机肥年限增加而降低。

为避免长期施用有机肥带来的肥害,需要根据土壤状况、栽种作物与有机肥的肥性状况合理施用,对土壤进行适时深耕;对腐熟程度高的有机肥,通过改

变施肥方式,如可在定植穴内施用或挖沟施用,将其集中施在作物根系部位,充分发挥肥效,从而减小肥害,增加作物产量。

3.4 土壤硝态氮累积及淋溶风险评价

掌握长期施用有机肥处理下土壤硝态氮累积量的运移规律对有机肥的科学合理利用及有效控制氮素淋失等具有重要意义。从不同年限连续施用有机肥的研究结果来看,随着施有机肥年限的增加,不同深度、不同发育期土壤硝态氮累积量均增加。通过分析不同深度土层硝态氮累积量随发育期的变化发现,硝态氮的累积与降水和温度等外界环境及作物的吸收利用有很大关系。在华北地区冬小麦-夏玉米轮作种植制度下,小麦季土壤硝态氮累积量大于玉米季。小麦生长后期,土体硝态氮累积量达到最大,迁移速度加快,这与作物利用氮素下降以及在较高温度下其他形式氮的转化有关。而乔俊等^[23]提到根圈土壤溶液矿质态氮含量于苗期达到最高值,这与化肥溶解较快有关。随着土层深度的增加,土壤硝态氮累积量呈现增加趋势,可能是硝态氮淋失及原始积累不同造成的^[14]。总体来看,对于化肥处理,土壤硝态氮累积量随土壤深度的增加变化不大,而有机肥处理变化明显,可见土壤硝态氮累积量运移规律与肥料种类和施肥年限有关。

近年来,地下水硝态氮污染已成为全球关注的热点问题。长期施用有机肥会提高土壤氮素水平,容易造成硝态氮在土壤中的累积,引发氮素向深层土壤迁移从而增加淋溶风险^[24]。长期定位试验是评价施肥环境效应的重要手段^[15]。综合分析得出,5年之内连续有机肥处理淋溶层土壤硝态氮累积量相对较小,而20年连续施用有机肥淋溶层土体硝态氮累积量较大,具有一定的淋溶风险。因此,应控制有机肥用量、合理灌溉,对土壤进行适时深耕,必要时进行适当的撂荒,以降低土壤中硝态氮累积量。

4 结论

(1)随施肥年限的增加,土壤容重逐渐降低;由于犁底层存在于 $20\sim 40\text{ cm}$,所以该层土壤容重大于 $40\sim 60\text{ cm}$ 层的土壤容重。

(2)与供试前土壤相比,化肥处理能显著增加土壤中有效磷含量,而有机质、碱解氮和速效钾含量基本保持平衡;连续施用有机肥处理均能提高土壤有机质及速效养分含量,且随施肥年限增加而增多。

(3)对于小麦产量的影响,化肥处理明显高于有

机肥处理,但3个不同年限有机肥处理中小麦产量无显著性差异。建议在定植穴内或挖沟施用有机肥,将其集中施在作物根系部位,充分发挥肥效,改善土壤结构,提高作物产量。

(4)对于硝态氮运移规律,土壤硝态氮累积量随着土壤深度增加呈现先降低后增加的趋势,有机肥处理大于无机肥处理,且硝态氮累积量随施用有机肥年限增加而增加,尤其在雨热同期时土壤硝态氮下移现象显著。

(5)通过具体分析80~100 cm土层硝态氮累积量发现,20年连续有机肥处理硝态氮累积量最大达240 kg·hm⁻²,具有较强的淋溶风险。

参考文献:

- [1] 李辉,姚丽萍. 南水北调东线工程济宁段农业面源污染现状及控制对策[J]. 山东水利, 2007, 10(13): 35-37.
LI Hui, YAO Li-ping. Situation and control countermeasures of agricultural non-point source pollution in Jining Section of Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. *Shandong Water Resources*, 2007, 10(13): 35-37.
- [2] 郭胜利,余存祖,戴鸣钧. 有机肥对土壤剖面硝态氮淋失影响的模拟研究[J]. 水土保持研究, 2000, 7(4): 123-126.
GUO Sheng-li, YU Cun-zu, DAI Ming-jun. Simulated test of effects of organic manure on leaching of NO₃-N in soil profile[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(4): 123-126.
- [3] 袁新民,同延安,杨学云,等. 有机肥对土壤 NO₃-N 累积的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 197-200.
YUAN Xin-min, TONG Yan-an, YANG Xue-yun, et al. Effect of organic manure on soil nitrate nitrogen accumulation[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(3): 197-200.
- [4] 温延臣,李燕青,袁亮,等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 91-99.
WEN Yan-chen, LI Yan-qing, YUAN Liang, et al. Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7): 91-99.
- [5] Liang B, Yang X Y, He X H, et al. Effects of 17-year fertilization on soil microbial biomass C and N and soluble organic C and N in loessial soil during maize growth[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(2): 121-128.
- [6] Banger K, Kukal S S, Toor G, et al. Impact of long-term additions of chemical fertilizers and farm yard manure on carbon and nitrogen sequestration under rice-cowpea cropping system in semi-arid tropics[J]. *Plant and Soil*, 2009, 318(1): 27-35.
- [7] 杨林章,王德建,夏立忠. 太湖地区农业面源污染特征及控制途径[J]. 中国水利, 2004(20): 29-30.
YANG Lin-zhang, WANG De-jian, XIA Li-zhong. Characteristics and control of agricultural non-point source pollution in Taihu Lake region[J]. *China Water Resources*, 2004(20): 29-30.
- [8] 郭颖,赵牧秋,吴蕊,等. 有机肥对设施菜地土壤-植物系统硝酸盐迁移累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1831-1835.
GUO Ying, ZHAO Mu-qiu, WU Rui, et al. Effects of organic manure on nitrate accumulation in soil-cucumber system under protected cultivation condition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 1831-1835.
- [9] 黄东风,王果,李卫华,等. 不同施肥模式对蔬菜生长、氮肥利用及菜地氮流失的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 631-638.
HUANG Dong-feng, WANG Guo, LI Wei-hua, et al. Effects of different fertilization modes on vegetable growth, fertilizer nitrogen utilization, and nitrogen loss from vegetable field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 631-638.
- [10] 张爱平,杨世琦,易军,等. 宁夏引黄灌区水体污染现状及污染源解析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1295-1301.
ZHANG Ai-ping, YANG Shi-qi, YI Jun, et al. Analysis on current situation of water pollution and pollutant sources in Ningxia Yellow River irrigation region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(6): 1295-1301.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [12] 王春阳,周建斌,郑险峰,等. 不同栽培模式及施氮量对半旱地冬小麦氮素累积及分配的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 101-108.
WANG Chun-yang, ZHOU Jian-bin, ZHENG Xian-feng, et al. Effects of different cultivation methods and nitrogen fertilizer application on nitrogen accumulation and distribution in winter wheat on semi-dryland farming[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2008, 36(1): 101-108.
- [13] 张宝峰,曾路生,李俊良,等. 优化施肥处理下设施菜地土壤容重与孔隙度的变化[J]. 中国农学通报, 2013, 29(32): 309-314.
ZHANG Bao-feng, ZENG Lu-sheng, LI Jun-liang, et al. Soil bulk density and porosity in greenhouse vegetables field under the optimized fertilization treatment[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(32): 309-314.
- [14] 刘微. 小麦-玉米两熟制下土壤硝态氮运移淋失规律及灌水施氮量推荐[D]. 保定: 河北农业大学, 2005.
LIU Wei. Leaching loss and movement of nitrate in the soil of wheat-corn double cropping system and nitrogen fertilizer and irrigation recommendation[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2005.
- [15] 张云贵,刘宏斌,李志宏,等. 长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 711-716.
ZHANG Yun-gui, LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, et al. Study of nitrate leaching potential from agricultural land in Northern China under long-term fertilization conditions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 711-716.
- [16] 马俊永,曹彩云,郑春莲,等. 长期施用化肥和有机肥对土壤有机碳和容重的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 38-42.
MA Jun-yong, CAO Cai-yun, ZHENG Chun-lian, et al. Effect of long-term application of chemical fertilizer and organic manure on soil organic carbon and bulk density[J]. *Soil and Fertilizer in China*, 2010

- (6):38-42.
- [17] 高 慧, 冯佳萍, 刘 奕. 不同种植年限设施土壤容重与孔性分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(26):14399-14400.
- GAO Hui, FENG Jia-ping, LIU Yi. Analysis about the volume-weight and porosity of the facilities soil with different period of planting[J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2010, 38(26):14399-14400.
- [18] 王 磊. 长期施用有机肥和秸秆还田对土壤有机质含量与土壤养分作物有效率的影响[J]. 科学之友, 2011, 6(4):162-163.
- WANG Lei. Long-term employment organic fertilizer and straw stalk also field to soil ulmin content and soil nutrient crops effectiveness influence[J]. *Friend of Science Amateurs*, 2011, 6(4):162-163.
- [19] Bidisha M, Joerg R, Yakov K. Effects of aggregation processes on distribution of aggregate size fractions and organic C content of a long-term fertilized soil[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(6):365-370.
- [20] 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 等. 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6):1389-1393.
- ZHANG Shu-xiang, ZHANG Wen-ju, SHEN Ren-fang, et al. Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6):1389-1393.
- [21] 史吉平, 张夫道, 林 葆. 长期施用氮磷钾化肥和有机肥对土壤氮磷钾养分的影响[J]. 中国土壤与肥料, 1998(1):7-10.
- SHI Ji-ping, ZHANG Fu-dao, LIN Bao. Effect of long-term application of NPK fertilizer and organic manure on soil NPK nutrient[J]. *Soil and Fertilizer in China*, 1998(1):7-10.
- [22] 王西和, 吕金岭, 刘 骅. 灰漠土小麦-玉米-棉花轮作体系钾平衡与钾肥利用率[J]. 土壤学报, 2016, 53(1):213-223.
- WANG Xi-he, LÜ Jin-ling, LIU Hua. Gray desert soil potassium balance and potassium utilization in maize-cotton rotation system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1):213-223.
- [23] 乔 俊, 汤 芳, 朱励军, 等. 太湖地区水稻产量、根圈土壤矿质态氮及氮素径流损失对氮肥的响应[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11):2140-2145.
- QIAO Jun, TANG Fang, ZHU Li-jun, et al. Responses of rice yield, rhizospheric soil mineral N and N runoff loss to fertilizer N in the Tai Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11):2140-2145.
- [24] 刘汝亮, 张爱平, 李友宏, 等. 长期配施有机肥对宁夏引黄灌区水稻产量和稻田氮素淋失及平衡特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5):947-954.
- LIU Ru-liang, ZHANG Ai-ping, LI You-hong, et al. Rice yield, nitrogen use efficiency(NUE) and nitrogen leaching losses as affected by long-term combined applications of manure and chemical fertilizers in Yellow River irrigated region of Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5):947-954.