

DOI: 10.3969/j.issn.2096-7047.2022.01.003

肥料与“碳中和”的生态策略*

江志阳, 李汝会, 陈欣

(中国科学院沈阳应用生态研究所 辽宁沈阳 110016)

摘要: 土壤中碳的排放、固定与气候变化之间的关系是当前环境问题研究的主要内容之一。化肥的施用改变了农业生态系统的生产力,合理施肥可以提高土壤储碳和控碳的能力。介绍了有机肥料、无机肥料、生物肥料的施用对土壤碳的固定、排放以及粮食产量的影响。建议减少无机肥料的生产、开发绿色有机肥料和微生物肥料,提高人们的环保意识,在2060年前实现“碳中和”的目标。

关键词: 碳中和; 肥料; 碳固定; 碳排放

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 2096-7047(2022)01-0006-05

Fertilizer and Ecological Strategy of "Carbon Neutrality"

JIANG Zhiyang, LI Ruhui, CHEN Xin

(Shenyang Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China)

Abstract: The relationship between carbon emission and sequestration in soil and climate change is one of the main contents of current environmental research. The application of chemical fertilizer has changed the productivity of agroecosystem and rational fertilization can improve the ability of soil carbon storage and control. The effects of organic fertilizer, inorganic fertilizer and biological fertilizer on soil carbon sequestration, emission and grain yield are introduced. It is suggested to reduce the production of inorganic fertilizer, develop green organic fertilizer and microbial fertilizer, improve people's awareness on environmental protection, and achieve the goal of "carbon neutrality" by 2060.

Keywords: carbon neutrality; fertilizer; carbon sequestration; carbon emission

0 前言

2021年是我国“十四五”规划的开局之年。习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话中指出“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和^[1]。”碳中和的基本内涵是通过减排措施减少人们生产、生活中所产生的温室气体排放量,通过碳补偿机制达到温室气体零排放的最终目的^[2]。这一目标是着力解决资源环境约束突出问题、实现中华民族永续发展的必然选择,其中

碳中和目标是一项更为艰巨的任务,是对当前我国经济社会发展方式的巨大挑战^[3]。

碳元素是作物生长发育必需的大量营养元素之一,植物的干质量中含碳质量分数约为49%,居植物必需营养元素之首;植物鲜样中含碳质量分数约为18%,仅次于氧^[4]。植物所需的碳元素主要来自于大气和土壤,而在农业生产中各种作物所需碳素主要由有机肥料、无机肥料、生物肥料等施入土壤中供给。在农业生产中,减少温室气体排放、增强碳固定,对农业生产可持续发展和减少温室效应、实现碳中和目标具有重要意义。

在全球范围内,通过土壤中碳的固定来保证

* 基金项目: 吉林省与中国科学院专项资金(2020SYHZ0044); 辽宁省科技重大专项(2020JH1/10300006); 国家重点研发计划(2019YFD1100504)

作者简介: 江志阳(1981—),男,硕士,高级工程师,从事农业资源利用与肥料研发工作; jiangzhiyang@iae.ac.cn

土壤有机碳的含量是缓解全球气候变化的一种措施^[5]。土壤有机碳作为陆地碳库,在生态系统生产力、农业生态系统功能和农田肥力中发挥着重要作用^[6-7]。保持令人满意的土壤有机碳含量对于土壤质量和维持农业生态系统的生产力尤为重要,因为它通过影响土壤的物理、化学和生物特性,在养分的循环和转化中发挥着决定性作用^[6,8-9]。

土壤碳储量是碳固定和碳排放动态平衡的结果。土壤碳固定在很大程度上取决于土壤生产力、凋落物、植物根系的分解速率以及肥料的施用量。碳排放则通过有机碳的矿化分解、土壤呼吸等方式完成^[10]。我国是世界上人口最多的国家,在第七次人口普查中,人口已经超过14亿,这意味着我国面临的最重大挑战之一是粮食生产。肥料作为农作物的营养来源,在促进粮食增产、保障粮食安全等方面有着重要的作用^[11-12]。长期以来,施肥为满足我国的粮食需求做出了突出贡献,但长期施肥对农田土壤有机碳的含量有着显著影响。

施肥对土壤有机碳含量的动态变化有两种相反的影响,即补充增加和分解挥发损失^[13]。土壤有机质含量随有机肥料、无机肥料、生物肥料施用量的增加而增加,与有机碳残留量和留茬量的增加呈正相关。此外,施用有机肥料、无机肥料、生物肥料有益于促进土壤微生物的繁殖和提高土壤酶的活性,增加可氧化腐殖质的含量,加快土壤有机质的矿化^[14]。土壤有机质的矿化分解有利于为作物提供碳营养和有机N、P、K等养分。但土壤有机质矿化率过高会降低土壤有机质含量,破坏土壤团聚结构,增加土壤排放至大气中的温室气体,影响大气环境质量。因此,要建设高产稳产农田,实现农业生产的可持续发展,完成碳中和目标,必须注意有机肥料、无机肥料、生物肥料的合理施用。

1 有机肥料对“碳中和”的影响

在农业生产中,有机肥料的供应量通常少于合成化学肥料,而在有机农业中不允许使用合成化学肥料^[15]。农家肥、污水污泥、绿肥、堆肥、作物秸秆或生物炭都是常用的改善土壤质量和肥力的有机肥料^[16-20]。有机肥料中的养分通常先在

土壤中矿化,然后才能被作物利用^[21]。农民依赖有机肥料是因为有机肥料可以改善土壤结构,从而促进水的渗透和储存,降低侵蚀风险,保持土壤有机质含量^[22],增强土壤碳固定的能力,进而保障粮食安全^[23]。

土壤有机质矿化对氮素的有效利用难以控制,这是农作物产量较低的原因之一;在作物需要的时候能够提供氮素可以提高作物产量^[24]。然而,氮素供应和有效性的改善可能会降低作物凋落物和残余物的碳氮比,提高分解速率^[25-26]。尽管如此,这种碳也有可能储存在土壤有机质中^[27]。涂利华等^[28]的研究表明,氮肥的施用显著增加了作物的细根生物量,从而增加了表层土中有机碳以及微生物生物量碳的含量。汪金松等^[29]的研究发现,施氮抑制了难分解有机物的分解,导致土壤中的有机碳含量下降21.8%~31.4%。也有研究表明,氮肥的添加对土壤有机碳或活性有机碳无显著影响^[30-31]。

豆科植物是农业系统中氮的主要来源之一,而绿色肥料(如三叶草麦芽)常用于有机耕作,为后续作物提供氮^[32-33]。2021年,Levin等^[34]种植三叶草麦芽后,将地上生物质作为有机肥料进行回收,不仅增加了作物产量,而且1 t/hm²的三叶草麦芽有机肥料使土壤有机碳储量在2年内分别显著增加了12.46%和1.50%,有机碳含量提高了0.017%,试验结果表明将三叶草与三叶草渣一起播种,对土壤有机碳含量有显著影响,这也使农民有机会控制施氮的时间和数量,从而提高土壤碳固定的能力。2015年,Börjesson等^[35]计算了不同作物沼气系统的负温室气体排放(即从大气中去除的CO₂、CH₄、N₂O),结果表明因为土壤有机碳含量增加,导致排放的温室气体减少。

许多研究表明,作物残渣直接返回农田可能会增加温室气体排放,原因是作物秸秆中碳源的增加以及硝化和反硝化微生物活动的增强^[36-38]。2015—2019年,中国农作物秸秆平均产量为970 Mt/a,计算出可用于生物甲烷生产的作物秸秆产量约为495 Mt/a^[39]。考虑到我国有大量的农作物秸秆,未利用的农作物秸秆可能会产生负面影响,因此在实现“碳中和”的过程中,作物残留物的利用可能需要重新考虑。

2 无机肥料对“碳中和”的影响

无机肥料即化学肥料,以无机物为主,主要包括氮肥、磷肥、钾肥等单质肥料和多种复合肥料,N、P、K是植物所需的大量元素。还有一些中量元素肥料和微量元素肥料,包括镁肥、钙肥、硅肥、铁肥、硼肥、钼肥等。

土壤被认为是陆地生态系统中有机碳的主要储存库,土壤呼吸速率微小的变化就可能显著改变大气中CO₂浓度和土壤中碳的固定^[40]。农田生态系统土壤呼吸随作物经营以及施肥方式的不同而有很大差异^[41],而无机肥料作为提高粮食产量的主要肥料,严重影响着土壤中碳的排放和固定。

Saikia等^[42]研究了无机肥料对土壤有机碳含量的影响,结果显示合理施用无机肥料对有效储存土壤碳和提高作物产量至关重要。李波等^[43]评价了不同施肥处理对稻田生态系统温室气体排放和对全球增温的影响,结果显示有机无机肥配施能有效促进稻田CH₄和CO₂的固定,但是对N₂O的排放没有产生显著影响。Liang等^[44]采用不同施肥方式在我国黄土高原上进行了18年的试验,结果显示长期施用氮、磷、钾肥降低了土壤对NH₄⁺的固定,却提高了土壤有机碳的稳定性,改变了土壤中的碳氮比。

3 生物肥料对“碳中和”的影响

生物肥料一般指微生物肥料,即菌肥。在广义上,生物肥料是指通过微生物的生命代谢活动,活化土壤中的养分,改善植物的营养环境;在狭义上,生物肥料是指通过活性微生物的生命活动,促使植物产生各种生物刺激素,改善植物根部环境生态群落结构,提高作物抗逆性,从而提高作物产量^[45]。

土壤是生态系统中的营养源^[46],是一种天然的混合物,营养成分十分复杂,含有多种大量、中量以及微量元素的难溶性离子。作物不能在土壤中直接汲取这些元素,而微生物肥料中含有很多活性菌群,在代谢过程中会产生大量的有机酸^[44],溶解土壤中难溶性离子并释放出来,有利于作物吸收,同时平衡了土壤中的营养元素,增大了利用率,提高了土壤有机碳的含量^[47]。

生物强化可以促进土壤有机质的生成和作物的生长,有效稳定作物产量。Zornoza等^[48]为了评估生物是否能提高土壤质量和肥力,设计了为期一年的大田试验,在含有大理石废料的尾矿库中分别添加2种有机材料(猪粪和污泥),后接种有效微生物。试验结果表明,以接种有效微生物为基础,添加粪肥的效果比添加污泥的好。这可能与有机肥提供的养分含量高、C/N比值较低有关。同时接种微生物有效提高了土壤无机和有机C、N、P、K含量,促进了土壤碳固存和土壤肥力的提高,这与土壤微生物生物量和活性的提高有关。这让植物在微生物生物量和活性较高的土地上被有效定植,进而减少温室气体的排放,实现土壤“碳中和”。

4 展望与建议

在过去的10年中,我国作为世界主要粮食生产国,无机肥料的使用量在不断增加。自1981年以来,我国已成为世界上最大的化肥消费国,占全球化肥使用量增长的90%^[49]。大量化肥、农药的不当施用,导致土壤的酸碱度被破坏、有机质含量降低、有机碳流失,使土壤生态系统不堪重负^[50]。

随着我国二胎政策的放开,中国人口必然会持续上涨^[45],为保证中国农业生产的可持续发展,提出如下建议:①缩减无机肥料的生产,在无害化基础上生产可再生肥料,防止土壤负载运作,随着科技的不断发展,诸多问题和不足将会逐步得到解决。②开发绿色有机肥料(如腐殖酸肥料)和微生物肥料。绿色肥料增加了土壤中碳的固定,也减少了碳的排放,为土壤碳循环做出了贡献,也保留住了土壤中的养分。③提高环保意识。肥料在我国已经历了几十年的发展,但不少农户未充分认识到绿色肥料在改善土壤碳固定和碳排放、促进作物生长、提高作物品质等方面的重要作用,加强绿色肥料相关知识的科普宣传教育,帮助他们掌握合理科学的施肥方法,争取在政务、地方与个人的共同努力下,在2060年前实现“碳中和”的目标。

参考文献

- [1] 庞明瑾,陈曦,周广瑞,等.碳达峰、碳中和战略目标下煤炭洗选技术的发展[J/OL].选煤技术,2022(1):1-6[2022-01-16].DOI:10.16447/j.cnki.ept.2022.01.001.

- [2] 邓明君,罗文兵,阴立娟.国外碳中和理论研究与实践发展述评[J].资源科学,2013,35(5):1084-1094.
- [3] 王坤岩.碳中和目标下构建绿色低碳循环产业体系的思考[J].中国国情国力,2021(11):8-11.
- [4] 邹德乙,隋小慧.有机肥和腐植酸类肥料对土壤碳循环及温室效应的影响[J].腐植酸,2009(2):45-46.
- [5] SMITH P, POWLSON D, GLENDINING M, et al. Potential for carbon sequestration in European soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments[J]. Water Research, 2015, 81: 216-222.
- [6] PAN G X, SMITH P, PAN W N. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009, 129(1/2/3): 344-348.
- [7] POST W M, PENG T H, EMANUEL W R, et al. The global carbon cycle[J]. American Scientist, 1990, 78(4): 310-326.
- [8] SU Y Z, WANG F, SUO D R, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil-carbon sequestration and soil fertility under the wheat-wheat-maize cropping system in northwest China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 75(1/2/3): 285-295.
- [9] ZHU L Q, HU N J, ZHANG Z W, et al. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system[J]. Catena, 2015, 135: 283-289.
- [10] 何姗,刘娟,姜培坤,等.经营管理对森林土壤有机碳库影响的研究进展[J].浙江农林大学学报,2019,36(4):818-827.
- [11] STEWART W M, ROBERTS T L. Food security and the role of fertilizer in supporting it[J]. Procedia Engineering, 2012, 46: 76-82.
- [12] 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,2008(8):65-68.
- [13] 范月君,畅喜云,邹华,等.人工施肥对草地生态系统碳循环过程影响机制的研究[J].安徽农业科学,2015,43(5):95-96.
- [14] 李正才,傅懋毅,杨校生.经营干扰对森林土壤有机碳的影响研究概述[J].浙江林学院学报,2005,22(4):469-474.
- [15] THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Council Regulation (EC) No 834/2007 of 28 June 2007 on Organic Production and Labelling of Organic Products and Repealing Regulation (EEC) No 2092/91 [EB/OL].(2007-07-20) [2022-01-16].<https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2007/834/oj>.
- [16] ARCO-LÁZARO E, AGUDO I, CLEMENTE R, et al. Arsenic (V) adsorption-desorption in agricultural and mine soils: effects of organic matter addition and phosphate competition [J]. Environmental Pollution, 2016, 216: 71-79.
- [17] BEESLEY L, INNEH O S, NORTON G J, et al. Assessing the influence of compost and biochar amendments on the mobility and toxicity of metals and arsenic in a naturally contaminated mine soil[J]. Environmental Pollution, 2014, 186: 195-202.
- [18] KELLY C N, PELTZ C D, STANTON M, et al. Biochar application to hardrock mine tailings: soil quality, microbial activity, and toxic element sorption[J]. Applied Geochemistry, 2014, 43: 35-48.
- [19] ZANUZZI A, AROCENA J M, van MOURIK J M, et al. Amendments with organic and industrial wastes stimulate soil formation in mine tailings as revealed by micromorphology [J]. Geoderma, 2009, 154(1/2): 69-75.
- [20] ZORNOZA R, FAZ A, CARMONA D M, et al. Carbon mineralization, microbial activity and metal dynamics in tailing ponds amended with pig slurry and marble waste [J]. Chemosphere, 2013, 90(10): 2606-2613.
- [21] DAHLIN S, KIRCHMANN H, KÄTTERER T, et al. Possibilities for improving nitrogen use from organic materials in agricultural cropping systems [J]. Ambio, 2005, 34(4): 288-295.
- [22] BERRY P M, STOCKDALE E A, SYLVESTER-BRADLEY R, et al. N, P and K budgets for crop rotations on nine organic farms in the UK [J]. Soil Use and Management, 2003, 19: 112-118.
- [23] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [24] KONG A Y Y, SIX J, BRYANT D C, et al. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69: 1078-1085.
- [25] ENRÍQUEZ S, DUARTE C M, SAND-JENSEN K. Patterns in decomposition rates among photosynthetic organisms: the importance of detritus C:N:P content [J]. Oecologia, 1993, 94: 457-471.
- [26] ZHANG D Q, HUI D F, LUO Y Q, et al. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors [J]. J Plant Ecol, 2008, 1(2): 85-93.
- [27] HATTON P J, CASTANHA C, TORN M S, et al. Litter type control on soil C and N stabilization dynamics in a temperate forest [J]. Global Change Biology, 2014, 21(3): 1358-1367.
- [28] 涂利华,胡庭兴,张健,等.模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林土壤有机碳和养分的影响[J].植物生态学报,2011,35(2):125-136.
- [29] 汪金松,赵秀海,张春雨,等.模拟氮沉降对油松林土壤有机碳和全氮的影响[J].北京林业大学学报,2016,38(10):88-94.
- [30] ALLISON S D, CZIMCZIK C I, TRESEDER K K. Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest [J]. Global Change Biology, 2008, 14(5): 1156-1168.
- [31] MAGILL A H, ABER J D, CURRIE W S, et al. Ecosystem response to 15 years of chronic nitrogen additions at the Harvard forest LTER, Massachusetts, USA [J]. Forest Ecology and

- Management 2004 ,196(1) : 7-28.
- [32] STOCKDALE E A , LAMPKIN N H , HOVI M , et al. Agronomic and environmental implications of organic farming systems[J]. *Advances in Agronomy* ,2001 ,70: 261-327.
- [33] BERRY P M , SYLVESTER-BRADLEY R , PHILIPPS L , et al. Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? [J]. *Soil Use and Management* ,2002 , 18: 248-255.
- [34] LEVIN K S , ANERSALD K , REENTS H J , et al. Effects of organic energy crop rotations and fertilisation with the liquid digestate phase on organic carbon in the topsoil[J]. *Agronomy* , 2021 ,11(7) : 1393.
- [35] BÖRJESSON P , PRADE T , LANTZ M , et al. Energy crop-based biogas as vehicle fuel-the impact of crop selection on energy efficiency and greenhouse gas performance [J]. *Energies* 2015 8(6) : 6033-6058.
- [36] ZHAO X , PU C , MA S T , et al. Management-induced greenhouse gases emission mitigation in global rice production [J]. *Science of the Total Environment* 2019 ,649: 1299-1306.
- [37] WANG X D , HE C , CHENG H Y , et al. Responses of greenhouse gas emissions to residue returning in China's croplands and influential factors: a meta-analysis [J]. *Journal of Environment Management* 2021 ,289: 112486.
- [38] LIU C , LU M , CUI J , et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology* 2014 20(5) : 1366-1381.
- [39] SUN J B , SUN H , WANG E Z , et al. Potential biomethane production from crop residues in China: contributions to carbon neutrality [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 2021 ,148: 111360.
- [40] IQBAL J , HU R G , LIN S , et al. CO₂ emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: a case study in Southern China [J]. *Agriculture , Ecosystems and Environment* ,2009 ,131(3/4) : 292-302.
- [41] ZHANG Q , LEI H M , YANG D W. Seasonal variations in soil respiration , heterotrophic respiration and autotrophic respiration of a wheat and maize rotation cropland in the North China Plain [J]. *Agriculture and Forest Meteorology* 2013 ,180: 34-43.
- [42] SAIKIA P , BHATTACHARYA S S , BARUAH K K. Organic substitution in fertilizer schedule: impacts on soil health , photosynthetic efficiency , yield and assimilation in wheat grown in alluvial soil [J]. *Agriculture , Ecosystems and Environment* , 2015 203: 102-109.
- [43] 李波 , 荣湘民 , 谢桂先 , 等. 有机无机肥配施条件下稻田系统温室气体交换及综合温室效应分析 [J]. *水土保持学报* , 2013 27(6) : 298-304.
- [44] LIANG B , YANG X Y , HE X H , et al. Long-term combined application of manure and NPK fertilizers influenced nitrogen retention and stabilization of organic C in Loess soil [J]. *Plant and Soil* , 2012 ,353: 249-260.
- [45] 邹锦丰 , 周传志. 微生物肥料研究进展及发展前景 [J]. *现代农业科技* 2021(22) : 142-144.
- [46] 贺美 , 王立刚 , 朱平 , 等. 长期定位施肥下黑土碳排放特征及其碳库组分与酶活性变化 [J]. *生态学报* , 2017 ,37(19) : 6379-6389.
- [47] 王粉莲 , 苏利民 , 王萍 , 等. 生物肥料在国内外的研究现状 [J]. *内蒙古农业科技* 2010(6) : 74-75.
- [48] ZORNOZA R , GÓMEZ-GARRIDO M , MARÍTNIZ-MARÍTNIZ S , et al. Bioaugmentation in Technosols created in abandoned pyritic tailings can contribute to enhance soil C sequestration and plant colonization [J]. *Science of the Total Environment* , 2017 , 593/594: 357-367.
- [49] LIU J G , DIAMOND J. China's environment in a globalizing world [J]. *Nature* 2005 435(7046) : 1179-1186.
- [50] 张清敏 , 刘曼 , 周湘婷. 微生物肥料在土壤生态修复中的作用 [J]. *农业环境科学学报* 2006 25(增刊 1) : 283-284.

(收到修改稿日期 2022-01-20)

欢迎订阅 2022 年《氮肥与合成气》

《氮肥与合成气》杂志是经原国家新闻出版广电总局批准 ,由上海化工研究院有限公司主办的全国性刊物 ,国内统一连续出版物号 CN 31-2137/TQ ,国际标准连续出版物号 ISSN 2096-3548。

办刊宗旨和定位: 交流推广国内外氮肥、合成氨、甲醇、现代煤化工、煤基新材料、合成气等行业的先进技术、节能减排新工艺、产业链延伸、生产、安全、管理经验的交流和推广等 ,以促进行业技术进步和管理水平提高。本刊内容可供全国从事氮肥、煤化工行业的工厂、设计院、科研院所、高等院校及各省市主管部门的工程技术人员和管理人员参考。

《氮肥与合成气》为月刊 ,大 16 开 48 页 ,封面彩印 ,国内外公开发行 ,每期定价 6.00 元 ,全年定价 72.00 元。全国各地邮政局已开始办理 2022 年《氮肥与合成气》期刊征订工作 ,邮发代号 4-933 ,请广大读者前往当地就近邮政局办理订阅手续 ,也可以直接向本刊编辑部订阅。

联系地址: 上海市云岭东路 345 号 邮政编码: 200062 联系电话: (021) 52559520×1117 52836886

《氮肥与合成气》编辑部