

有机肥无机肥配施对农田土壤环境及温室气体排放的影响研究进展

张长征

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年1月3日; 录用日期: 2025年2月25日; 发布日期: 2025年3月5日

摘 要

无机肥与有机肥都可以影响土壤物理与化学性质和温室气体排放, 而以无机肥使用量过高的集约化生产, 给农田环境造成了严重的影响。在进行农业绿色转型的过程中, 评价有机肥与无机肥联合使用的农田环境效应具有重要价值。此文章利用大量文献分析农田肥的施用影响及效果, 研究其生态环境效应。结果表明过量化肥的使用易造成严重的环境问题; 一定比例的有机肥的使用有利于增强土壤健康和土壤养分稳定供应以及减少温室气体的排放。所以探寻出一种有机与无机肥的最佳配施方式, 有助于实现农业绿色转型。

关键词

无机肥, 有机肥, 配施比例, 土壤, 温室气体

Research Progress on Effects of Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizers on Farmland Soil Environment and Greenhouse Gas Emissions

Changzheng Zhang

College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Jan. 3rd, 2025; accepted: Feb. 25th, 2025; published: Mar. 5th, 2025

Abstract

Both inorganic and organic fertilizers can affect the physical and chemical properties of soil as well

文章引用: 张长征. 有机肥无机肥配施对农田土壤环境及温室气体排放的影响研究进展[J]. 自然科学, 2025, 13(2): 180-186. DOI: 10.12677/ojns.2025.132019

as greenhouse gas emissions. However, the excessive use of inorganic fertilizers in intensive agricultural production has caused severe impacts on farmland ecosystems. In the process of agricultural green transformation, it is of significant value to evaluate the environmental effects of combined organic and inorganic fertilizer applications. This article uses a large body of literature to analyze the impacts and effectiveness of fertilizer application in farmlands and to investigate its ecological and environmental effects. The results indicate that the excessive use of chemical fertilizers can lead to serious environmental issues. However, the application of a certain proportion of organic fertilizers is beneficial for enhancing soil health, stabilizing nutrient supply, and reducing greenhouse gas emissions. Therefore, identifying the optimal combination of organic and inorganic fertilizers will contribute to the realization of agricultural green transformation.

Keywords

Inorganic Fertilizer, Organic Fertilizer, Proportioning Ratio, Soil, Greenhouse Gases

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自从化学合成肥料诞生并且迅速发展以来,在农田中使用化肥来获取高产的做法已经得到了广泛应用。这一方式确实在很大程度上保障了粮食的产量,对全球粮食安全做出了不可磨灭的贡献[1]。然而大量使用无机肥对农业生产环境和农田生态系统造成了极其严重的危害。在土壤方面,长期大量使用化肥会引起土壤退化。例如,化肥的过度使用可能会破坏土壤结构,使土壤变得紧实,孔隙度减小,影响土壤的通气性和透水性[2]。另外,化肥的使用还会增加温室气体排放,这主要是因为化肥在土壤中的分解和转化时会排放温室气体,影响全球气候的变化[3]。当化肥进入水体时,由于化肥中含有大量的营养物质,尤其是氮和磷,这会造成水体的富营养化,促使水体中的藻类等浮游生物大面积繁殖,从而造成水体的透明度以及溶解氧的降低,严重损害了水环境的生态平衡。有机肥在农业生产中的地位越来越重要,它是调控农业集约化生产的关键措施之一[4]。与无机肥的短期效果不同,有机肥能够对土壤环境产生长时间的积极作用。有机肥包含大量的有机物质,当有机肥进入土壤后,大量的有机物质会被土壤中的微生物分解,在这个过程中,不仅可以为土壤补充养分,还能改善土壤结构,邓超等人通过大田实验发现,添加有机肥增加了土壤的大、中孔隙度,有机肥处理的大、中孔隙度分别是化肥处理和不施肥处理的1.45~1.68和1.22~1.43倍[5]。此外,有机肥中的有机物质也能够为土壤微生物供给丰富的营养和能源,加快土壤微生物的发育、生长以及繁殖,马宁宁等人研究发现长期施用有机肥的处理中土壤转化酶、脲酶和中性磷酸酶活性均显著高于化肥处理,土壤酶与土壤微生物关系密切,影响土壤酶活性必然影响土壤微生物的数量[6]。

鉴于无机肥和有机肥各自的特点,将它们联合施用能够有效改善化肥对环境的影响。通过这种配施方式,可以在保证农作物获得足够养分的同时,减轻化肥对环境的压力。同时,有机肥和无机肥配施还可以调节土壤的酸碱度,改善土壤的化学性质,并且在一定程度上减少温室气体的排放。本文通过查阅大量国内相关研究文献,系统地梳理了农田无机肥与有机肥配施对农田环境和温室气体排放的影响。这一研究的目的是为农业的绿色生产提供科学依据,同时也为有机肥和无机肥的施肥管理调控提供理论支持,以便更好地指导农业生产实践,促进我国农业朝着绿色、可持续发展的方向。

2. 集约化农业生产问题

集约化农业生产，是相较于农业粗放经营而言，通过投入更为丰富的生产资料，借助创新型的科学技术和先进的治理方法，促使实现更高的单位面积产量和更多的收入，集约化农业生产主要包括劳动集约型、资金集约型以及技术集约型这三种类型[7]。化肥的使用是集约化农业生产必不可少的手段。

2.1. 肥料使用现状及问题

肥料，作为一种物料，其用途体现在能够为植物营养的供给、维持或改善发挥作用，并且还有利于土壤的物理性能、生物活性和化学性能的改善，不仅能够提高农产品的产量，又能够使农产品的品质得以改进，还能强化植物的抗逆能力，它包括有机物料、无机物料、微生物物料以及它们相互混合而成的物料，通常含一种或若干作物生长必需营养元素[8]。恰当运用能够提升农作物的产出数量与质量，推动农副产品领域的进步，还能对粮食供应进行调控与补充。

2.1.1. 无机肥使用现状及存在的问题

无机肥生产高度依赖化石能源，这一特性致使化肥制造业成为典型的高耗能产业，若能大幅削减化肥的产量和施用量，在碳减排方面会取得显著成效。在 2015 年，国家发布《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》后，之前发展无序、产能过剩的化肥行业慢慢步入正轨，开始理性发展。我国作为农业大国，对肥料尤其是化肥需求大。2018 年全球化肥用量约为 188.16 亿吨，我国的化肥施用量居于首位，仅用占全球 9% 的农田耕地却消耗了约 25.0% 的化肥[9]。由于化肥的频繁施用，造成了许许多多的问题，比如土壤性质下降，农作物质量下降，农产品出现口感变差、营养成分受影响以及不易储存等情况，并且在集约化农业生产模式下，土壤酸化加剧，温室气体大量排放等，严重影响了农业生态平衡。当下急需探寻有效策略来优化和解决这些因化肥过量施用导致的棘手问题。

2.1.2. 有机肥使用现状及作用

生物有机肥是指以有机物料和城市污泥等为原料，加上多种有益微生物菌剂加工而成的具有特殊功效的肥料。2002 年，国家官方发布了有机无机复混肥料标准和有机肥料标准，从此以后，商品有机肥成功进入我国肥料的流通领域。自 2017 年起，我国土壤生态环境的安全状况备受各级政府部门与科研机构瞩目，农业农村部接连推出多项关键政策，通过推广有机肥的使用，逐步替换掉部分化肥，以此优化土壤环境，保障农产品质量，推动农业可持续发展。国家加强对有机肥生产和使用的支持补贴力度，使得有机肥生产厂商数量持续增加、生产规模持续扩张、市场需求不断稳定增加、创新产品持续出现[10]。有机肥得到广泛施用后，带来了诸多益处。一方面，为禽畜粪便找到了合理的利用途径，有效避免了大量碳氮元素毫无意义地排放到环境中；另一方面，它有力地削减了化肥的使用量，从农业生产的起始阶段就为降低碳排放做出了贡献。此外按照科学规范进行有机肥的使用可以提高土壤孔隙度、改善保水能力、优化土壤微生物群落结构，有利于提质增产和改善土壤环境[11]。褚长彬等发现添加有机肥可以增加土壤中微生物的数量和养分的含量，增加土壤肥力，提升农作物叶片中微量元素的含量[12]。侯海军等指出，利用有机肥来替代一部分无机氮肥，能够显著增加作物产量和改善作物品质[13]。不仅如此，有机肥还对土壤起到了显著的改良作用，使得土壤的固碳能力得到大幅度提升，进而减少了温室气体的排放，为应对气候变化、保护生态环境筑牢了根基。当把化肥的使用量减少 50%，同时配合施用猪粪时，土壤有机碳的固持量出现了显著变化，足足增加了 192% 之多[14]。而且，在双季稻田方面也取得了良好的减排成效，温室气体净排放减少了 52%，单位产量净排放也降低了 53% [15]。这充分表明合理调整化肥用量并搭配施用有机肥，对于提升土壤固碳能力以及减少稻田温室气体排放等方面有着十分积极的作用。

2.2. 施肥方式现状及问题

在我国农业使用肥料的现状中,有许多急需解决的问题。一方面是施肥不合理以及过度施肥现象非常常见。特别是在部分偏远地区,农民对肥料使用的认识存在很大局限。他们往往只注重施用无机化肥,而忽略有机肥的作用。此行为造成氮、磷、钾肥的搭配丧失科学性,导致氮肥在土壤中大量积聚[9]。另外,部分种植户在有机肥料施用方面 also 存在问题。有些农民忽视有机肥的腐熟,直接将未腐熟的肥料施用到农田中。未腐熟的有机肥料在土壤中会继续发酵,在这个过程中形成的热量和有害物质,不仅会造成土壤微生物的生活环境的严重破坏,导致生态环境恶化,还会对土壤肥力产生负面影响[16]。虽然国家持续推广“测土配方施肥”和“减肥增效”政策,但是和国外的技术相比差距依然较大。在我国当前农业生产中,无机肥和有机肥的施入比例约为 8:2,这种比例失衡的情况对农作物生长产生了不良影响。这是因为无机肥中缺少部分营养成分,这直接影响了农作物的生长[17]。因此,为了保证农作物健康生长,探索有机无机肥的联合使用方法非常必要的。

3. 有机肥与无机化肥配施的环境效应

3.1. 有机肥与无机化肥配施对农田土壤环境的影响

在农业生产中,施用无机肥后会给土壤环境带来诸多负面变化,造成土壤酸化,会直接削弱土壤的养分循环以及供给能力,使得土壤难以持续稳定地为农作物提供生长所需的各类养分。而且,长期施用氮肥还会对土壤的物理结构产生破坏,同时也会使土壤有机质含量降低,进一步影响土壤的肥力和质量。现在,有机肥在农业领域备受瞩目,它已成为维持土壤养分、保障土地肥力重要手段和策略[17]。诸多试验也都表明了有机肥的积极影响,例如存在研究证明在农田中使用一定量的有机肥,使得表土容重明显降低,而且土壤的总孔隙度也得到了明显的增加。很多研究证实在施肥时将无机肥与有机肥配施能够对农田土壤环境产生很好的收益[18]。侯红乾等在江西双季稻区进行连续 25 年的田间定位试验发现有机无机肥配施比单施化肥培肥土壤的作用更明显,各养分指标均有不同程度的提高:有机质 22.5%~45.1%、全氮 3.7%~15.4%、全磷 80.7%~168.4%、碱解氮 21.7%~47.8%、有效磷 57.8%~91.7%、速效钾 20.3%~61.0%,只有缓效钾略有降低,高量有机肥配施无机肥培肥土壤的作用更加明显[19]。此外一些研究者也指出,将有机肥与无机肥按照合理比例配施时,土壤超微孔体积会变小,但是大、中、微孔体积明显变大,此变化很好地改善了土壤的保水性和通气性。刘明月等人的研究表明,在长江下游地区稻麦轮作体系中,使用有机肥等氮替代无机肥进行大田实验时,随着有机肥替代比例的增加,土壤团聚体的平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和>0.25 mm 水稳性团聚体的含量均有所提高。在有机氮替代 40%和 50%无机氮的处理下,>0.25 mm 粒径团聚体的含量分别达 74.3%和 78.8%,比单施无机肥处理高出 5.6%和 10.1%。此外,有机肥与无机肥不同比例的配施还提升了土壤有机质和全氮含量,并缓解了土壤酸化[20]。总而言之,与无机肥对土壤造成的许许多多的不良影响相对比,有机肥在改良土壤、培肥地力等方面有着诸多积极且重要的作用,合理配施有机无机肥对于农业生产的可持续发展有着重要意义[21]。

3.2. 有机肥与无机化肥配施对大气环境的影响

农田 CH_4 和 N_2O 排放的重要源头为稻田和栽培施肥,施用化肥会明显提高土壤温室气体的排放,而且不同的施肥措施的土壤气体排放速率也不同[22]。已有许多研究表明在农田中合理进行有机肥与化肥的配施,能够使得农田土壤温室气体排放量下降[23]。卜容燕等人开展了连续 3 年的田间试验,期间对温室气体排放情况进行监测,研究结果表明有机肥配施化肥处理早稻、晚稻和周年轮作 N_2O 排放量分别下降 31.4%、5.0%和 18.8%。2018 年和 2019 年有机肥配施化肥处理温室气体排放强度较单施化肥处理分别下降 6.8%和 8.5% [24]。有研究证实在氮养分相同的前提下使用有机肥替代一部分化肥发现,氧化亚氮

的累积排放量和有机肥添加比例呈负相关,但甲烷的累积排放量与其呈正相关。位于黄淮海区域的小麦-大豆复种模式将有机肥(牛粪或饼肥)与化肥联合配施具有既能稳定产量又可以降低净温室效应的效果[25]。马朋辉等人以冬小麦为研究对象探求冬小麦农田减排优产高效的施肥模式,发现在两个冬小麦生长期,各施肥处理中有机肥等氮替代 75%和 25%化肥处理 CO_2 平均累积排放量最低,分别比常规施肥减少 7.62%和 15.31%。有机无机肥配施处理随着有机肥配施比例的增加对 CH_4 的吸收呈减少趋势。有机肥等氮替代 75%和 100%化肥处理 N_2O 累积排放量最低,两年平均累积排放量分别比常规施肥减少 92.94%和 159.47%。有机肥等氮替代 75%化肥处理全球综合增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)均为最低,分别比常规施肥降低 27.19%和 41.38% [26]。综合上述研究因此有机肥与无机肥在减少温室气体排放及降低全球增温潜势方面具有积极有效的作用。

3.3. 有机肥与无机化肥配施对水环境的影响

在农田生产中,引起水体富营养化的主要原因就是无机化肥的不合理使用。有研究者证明,当氮肥不合理使用时,氮素会以硝酸盐的形式进入水域,这进而会诱发一连串严峻的水体环境问题,诸如造成水体富营养化,引发赤潮现象等,给生态环境造成极大破坏[27]。很多研究发现当将有机肥部分代替化肥混合配施时,能够对水环境产生积极的影响。程明琨等人在降雨频繁、径流发生量高的太湖地区,开展降雨强度及有机无机肥配施对菜地氮磷流失过程影响的研究,最后发现纯施化肥和纯施有机肥处理的总氮流失量最高而且纯施化肥总磷流失量也最高,与其相比,有机无机肥配施能减少 21.9%~44.7%的总氮流失和减少 65.4%~69.0%的总磷流失[28]。另研究者经过实验指出,通过 60%氮素与混合有机肥混合使用的方法,可以各减少径流水 66.5%的总氮含量、66.2%的铵态氮含量以及 67.2%的硝态氮含量,并且总磷含量也会下降 52.5% [29]。魏静等人的盆栽试验结果表明,在施用一定量有机肥的基础上,不同无机氮肥用量对水稻产量、氮素利用率和氮流失风险有显著影响。与单施有机肥相比,增施 0.4 倍、0.6 倍和 0.8 倍无机氮肥时,稻田田面水氮素浓度分别降低了 17.5%、11.9%和 9.3%。与单施无机氮肥相比,0.8 倍无机氮肥与有机肥联合施用的处理不仅提高了作物产量和氮肥利用率,而且田面水氮浓度降低了 30.2% [30]。这些都说明了有机肥与无机化肥合理配施在降低农田中养分随径流流失方面的优秀效果,有助于维持周边水体的生态环境质量。

4. 创新新型高效绿色施肥方法

不同比例的有机肥与无机肥配施是一种有效的施肥策略。但是还需要通过大量的田间试验,探索在有机肥还田的情况下,无机肥的减施比例。吕真真等人的研究表明,在江西省稻田的长期监测中,不同化肥与有机肥的配施比例显著影响了红壤性双季稻田的土壤性质。在相同氮投入量下,有机-无机肥配施能改善土壤质量,降低容重、增加孔隙度、提升有机质和养分含量、减缓酸化并促进微生物增长。整体来看,有机-无机肥配施效果优于单施化肥,且随着有机肥比例增大,土壤质量改善更加明显[31]。但不同研究者的研究结果也存在较大差异,目前并未得出能够推广使用的有机肥与无机肥的配施比例。而且种类不同的有机肥和无机肥联合使用的效果也有不同,此外有机肥的来源也会对施肥效果产生影响[32],李燕青等人的研究表明,在常规施氮量下,鸡粪和猪粪可少量或不配施化肥,而牛粪配施 75%化肥能显著提高冬小麦的品质。若有机肥充足且不增加总氮施用量,鸡粪和猪粪的氮比例可提高至 75%,牛粪则应控制在 25%,以获得优质的小麦籽粒[33]。因此有必要从原材料的性质出发,进一步深入研究有机肥替代化肥的比例,以更好地发挥有机肥和无机肥配施的优势。另有研究表明长期无机肥配施有机肥及秸秆还田,土壤有机质呈显著上升趋势,30 年平均上升幅度西北和华北高达 51%和 68%,南方旱地和长江流域水田平均为 24% [34],因此不同土壤类型下,有机肥无机肥的配施效果也有很大差异。

5. 结论

化肥过量施用引发了一系列严峻问题,包括土壤性质恶化、作物品质降低、土壤酸化加剧、温室气体大量排放等,而且我国当前施肥方式存在诸多弊端,如施肥不合理、忽视有机肥腐熟、无机肥和有机肥配施比例失衡等,这些严重都威胁了农业生态平衡。与之相反,有机肥的合理施用具有诸多积极意义。当有机无机肥配施时:对土壤环境而言,可维持 pH 值稳定,改善土壤物理结构;对大气环境,能在一定程度上减少温室气体排放;对水环境,有助于降低水体富营养化风险。目前关于有机肥还田时无机肥减施比例、不同种有机肥料使用效果、不同土壤类型之间的效果差异研究不足,仍需通过大量田间试验深入研究,以创新高效绿色施肥方法,推动农业生产朝着绿色、高产、高效方向发展,实现农业可持续发展目标。

参考文献

- [1] 吴得峰. 基于不同农业区划的有机-无机肥配施对玉米产量及土壤质量研究文献综述[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2019, 4(8): 71-76.
- [2] 肖阳. 农业绿色发展背景下我国化肥减量增效研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [3] 杨帆, 孟远夺, 姜义, 等. 2013 年我国种植业化肥施用状况分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 217-225.
- [4] 熊正琴, 张晓旭. 氮肥高效施用在低碳农业中的关键作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1433-1440.
- [5] 邓超, 毕利东, 秦江涛, 等. 长期施肥下土壤性质变化及其对微生物生物量的影响[J]. 土壤, 2013, 45(5): 888-893.
- [6] 马宁宁, 李天来, 武春成, 等. 长期施肥对设施菜田土壤酶活性及土壤理化性状的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1766-1771.
- [7] 王金良, 黄文峰, 温世君, 等. 集约化农业退化土壤快速生物修复技术[J]. 浙江农业科学, 2014, (12): 1913-1917.
- [8] 魏宗辉, 胡钧铭, 刘顺翔, 等. 有机资源等氮替代化肥对免耕稻田 N_2O 排放及水稻产量的影响[J]. 中国农业气象, 2021, 42(7): 561-571.
- [9] 尚杰, 尹晓宇. 中国化肥面源污染现状及其减量化研究[J]. 生态经济, 2016, 32(5): 196-199.
- [10] 陆钰凤. 中国化肥减量政策变迁及其内在逻辑[J]. 农业经济问题, 2022(9): 74-85.
- [11] Yang, Z.C., Zhao, N., Huang, F. and Lv, Y.Z. (2015) Long-Term Effects of Different Organic and Inorganic Fertilizer Treatments on Soil Organic Carbon Sequestration and Crop Yields on the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 146, 47-52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.06.011>
- [12] 褚长彬, 吴淑杭, 张学英, 等. 有机肥与微生物肥配施对柑橘土壤肥力及叶片养分的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(22): 201-205.
- [13] 侯海军, 韩健, 黄继桃, 等. 配施有机肥和稻草对湘西北椪柑产量及品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2020(6): 38-41.
- [14] 杨娟, 王昌全, 蔡艳, 等. 猪粪农田施用下的水稻生产生命周期碳排放[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1131-1141.
- [15] 汪勇, 吕茹洁, 黎星, 等. 生物炭与氮肥施用对双季稻田温室气体排放的影响[J]. 中国稻米, 2021, 27(1): 20-26.
- [16] 叶洪岭, 邢婷婷. 河北省中小农户科学施肥的普及与调查[J]. 河北农业科学, 2021, 25(4): 71-75.
- [17] 郭兵. 我国城市化与粮食安全关系问题研究[J]. 经济体制改革, 2011(1): 32-35.
- [18] 刘小粉, 刘春增, 贾萌萌, 等. 化肥减施条件下紫云英翻压量对土壤物理特性和水稻产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(16): 67-73.
- [19] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 516-523.
- [20] 刘明月, 张凯鸣, 毛伟, 等. 有机肥长期等氮替代无机肥对稻麦产量及土壤肥力的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(3): 133-141.
- [21] 蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 等. 长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 810-819.
- [22] 李诗, 李婷婷, 胡钧铭, 等. 有机无机氮农田环境效应与减肥增效途径综述[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(14): 43-

49.

- [23] 马俊永, 李科江, 曹彩云, 等. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2007(2): 236-241.
- [24] 卜容燕, 李敏, 韩上, 等. 有机无机肥配施对双季稻轮作系统产量、温室气体排放和土壤养分的综合效应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 145-153.
- [25] 张鑫, 郑成岩, 李升明, 等. 长期有机无机肥配施降低黄淮海区域小麦-大豆复种系统净温室效应[J]. 植物营养与肥科学报, 2020, 26(12): 2204-2215.
- [26] 马朋辉, 宋常吉, 宋静茹, 等. 有机无机肥配施对冬小麦农田温室气体排放与氮肥利用效率的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2025: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.s.20241213.1444.004.html>, 2025-01-16.
- [27] 刘有华, 王思婷, 杨乔乔, 等. 国内外水体富营养化现状及聚磷菌研究进展[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(9): 26-35.
- [28] 程明琨, 闵炬, 张艳颖, 等. 降雨强度及有机无机肥配施对太湖地区典型菜地氮磷动态流失过程的影响[J]. 中国生态农业学报(中文), 2025: 1-13.
- [29] 韩笑, 席运官, 田伟, 等. 有机肥施用模式对环水有机蔬菜种植氮磷径流的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(3): 465-473.
- [30] 魏静, 郭树芳, 翟丽梅, 等. 有机无机肥配施对水稻氮素利用率与氮流失风险的影响[J]. 土壤, 2018, 50(5): 874-880.
- [31] 吕真真, 吴向东, 侯红乾, 等. 有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2017, 23(4): 904-913.
- [32] Dai, X., Song, D., Zhou, W., Liu, G., Liang, G., He, P., *et al.* (2021) Partial Substitution of Chemical Nitrogen with Organic Nitrogen Improves Rice Yield, Soil Biochemical Indicators and Microbial Composition in a Double Rice Cropping System in South China. *Soil and Tillage Research*, **205**, Article ID: 104753. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104753>
- [33] 李燕青, 林治安, 温延臣, 等. 不同类型有机肥与化肥配施对小麦品质的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2016, 22(6): 1513-1522.
- [34] 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]. 植物营养与肥科学报, 2015, 21(6): 1389-1393.