

菜地土壤氮素迁移转化研究进展

陈 淼^{1,2}, 李 玮^{1,2}, 陈 歆^{1,2}, 李 宁^{1,2}, 杨桂生^{1,2}, 彭黎旭^{1,2}

(1. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所 海南海口 571101;

2. 农业部儋州农业环境科学观测实验站 海南儋州 571737)

摘要: 农业面源污染已成为我国环境污染的重要组成部分,对我国农业生产和生态环境安全带来了较大风险。农田氮素随地表径流流失和地下淋溶是引起日益突出的农业面源污染的主要因素之一。氮素养分是影响蔬菜产量的重要因子,为追求经济效益,菜地氮肥投入量大,过量施肥造成的氮素污染问题日趋严重。笔者综述了菜地氮素迁移转化研究现状,探讨了菜地施肥、地表径流、地下淋溶、氨挥发等菜地土壤氮素迁移和转化途径,分析了土壤中氮素矿化、硝化和反硝化过程,并对今后研究方向进行了展望。

关键词: 菜地; 土壤; 氮素; 迁移转化

Research progress on transfer and transformation of soil nitrogen in vegetable field

CHEN Miao^{1,2}, LI Wei^{1,2}, CHEN Xin^{1,2}, LI Ning^{1,2}, YANG Guisheng^{1,2}, PENG Lixu^{1,2}

(1. Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, Hainan, China;

2. Danzhou Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Danzhou 571737, Hainan, China)

Abstract: Agricultural non-point source pollution has become an important part of environmental pollution in our country, and posing a major threat to agricultural production and ecological environment security. Nitrogen losses by surface runoff and leach from croplands have been one of the major sources of the agricultural non-point source pollution. Nitrogen was a critical limiting nutrient that increases vegetable production. The pursuit of economic efficiency, excessive nitrogen fertilizer caused nitrogen pollution becomes worse and worse. In this paper, the research status of transfer and transformation of soil nitrogen were summarized. We also discussed the processes of soil nitrogen transfer and transformation, including fertilization, runoff, leaching, NH₃ volatilization and so on. The process of mineralization, nitrification and denitrification in soil was analyzed. The research direction in the future was prospected.

Key words: Vegetable field; Soil; Nitrogen; Transfer and transformation

氮是植物需求量最大的矿质营养元素,在农业生产活动中,氮是影响农作物产量的重要因子,传统的施肥方法主要是通过增施氮肥来提高作物产量。据统计,中国已经是世界上氮肥生产和消费第一大国,氮肥生产量占世界总产量的 1/3,占世界 7%的耕地上消耗了全球 35%的氮肥,而氮肥的过量施用造成我国土壤酸化、水体富营养化等环境问题突出^[1]。而蔬菜种植业由于氮肥过量施用带来的环境污染问题越来越受到关注。近年来,我国蔬菜种植面积大幅度增加,2015 年达到 2 199.97 万 hm²,占农作物总种植面积的 13.2%。

蔬菜生长周期短、种植密度大、复种指数高且多为浅根系作物,因而蔬菜种植施肥量和灌溉量大且施用频繁,水肥条件优越,其养分含量尤其是土壤全 N 和 NO₃⁻-N 含量较高。生产中,菜田施氮量通常高出常规大田作物的几倍甚至 10 倍以上,超过实际需求量的数倍。相关研究表明^[2],在蔬菜种植中,全年 2~3 季每 hm² 共施氮肥 600~1 300 kg。更重要的是蔬菜生产上仍然沿用传统的“肥大水勤”、“肥随水走”等不科学的水肥管理模式。导致农业种植养分损失较大,化肥利用率仅有 30%~35%,远低于发达国家的 50%~60%,而蔬菜作物由

收稿日期: 2017-05-27; 修回日期: 2017-07-23

基金项目: 海南省自然科学基金(20164170); 中国热带农业科学院院本级基本科研业务费专项资金(1630042016004); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2016hzs1J006)

作者简介: 陈 淼,男,助理研究员,研究方向为土壤肥料与植物营养。E-mail: chenm200567@163.com

通信作者: 彭黎旭,男,研究员,研究方向为农业环境风险评价与污染阻控。E-mail: penglixu@hotmail.com

于施肥量高,氮肥利用率更是低于30%^[3-5]。长期过量的氮肥施用,不仅会影响蔬菜产量,还会造成土壤板结酸化、次生盐渍化、养分循环和供给能力降低、蔬菜和地下水硝酸盐污染及地表水富营养化等农业面源污染问题^[5-6]。氮素在菜地土壤中的迁移转化研究是土壤学和环境科学研究的热点。笔者总结了菜地土壤氮素迁移转化途径、影响因素及防控对策等方面的国内外研究进展,以期为菜地土壤氮素迁移转化规律研究、氮素高效利用和农业面源污染减排提供理论支持。

1 菜地氮素面源污染状况

氮素是蔬菜需求量最大的矿质营养元素,也是制约蔬菜产量的重要因子,传统的施肥方法主要是通过增施氮肥来提高作物的产量。然而过量氮肥施入并不会进一步提高蔬菜作物的产量,反而会导致肥料利用率低、土壤质量退化和地下水硝酸盐污染风险增加等问题日益突出^[5,7-10]。陆扣萍等^[11]研究表明,太湖地区设施菜地农民习惯施肥模式下,全年氮素淋失量达193.6 kg·hm⁻²。孙媛等^[12]研究表明,山东寿光设施大棚两茬设施黄瓜畦灌处理的氮素淋失范围为246~455 kg·hm⁻²,占施肥总量的比例高达40%以上。闵矩^[13]研究表明,南方设施菜地每茬黄瓜氮素淋失占到氮素总投入的20%以上。郑少文等^[14]研究表明,冬瓜菜地单季氮素流失量为54.27~55.17 kg·hm⁻²,占施肥总量比例的19.29%~22.92%。

长期大量施用化肥不仅会造成地下水硝酸盐污染,还会对植物体内有机化合物的代谢产生不利影响,进而导致植物体内积累过量的硝酸盐和亚硝酸盐。Babiker等^[15]利用GIS技术研究发现,日本蔬菜种植地区地下水样品中有30%的样品硝态氮质量分数超过10 mg·L⁻¹的饮用水控制水平,远高于其他作物种植时地下水硝态氮含量,蔬菜种植是引起地区硝酸盐升高的主要原因之一。崔敏等^[16]研究表明,武汉市城郊区集约化露天菜地附近井水中硝态氮质量分数为19.6~39.8 mg·L⁻¹,是饮用水安全标准的2~4倍。菜地土壤中硝态氮的高残留不仅对水环境构成威胁,还会影响蔬菜品质。张双灵等^[17]对青岛冬季大棚蔬菜中硝酸盐、亚硝酸盐含量的调查表明,叶菜类硝酸盐质量分数为1 676.92~3 512.38 mg·kg⁻¹。

2 菜地土壤氮素迁移途径与影响因素

蔬菜-土壤系统氮素的来源,主要包括肥料施用、灌溉水输入、大气干湿沉降输入等,但肥料施用是菜地土壤氮素的主要来源。进入到土壤中的氮素除植物吸收外,其损失途径主要有3种,一是随土壤渗漏水迁移进入地下水,即地下淋溶,称为土壤养分淋失;二是随地表径流和土壤侵蚀迁移输出到地表水体,称为土壤养分流失;三是通过扩散或气态释放进入大气。其循环过程见示意图^[18]。

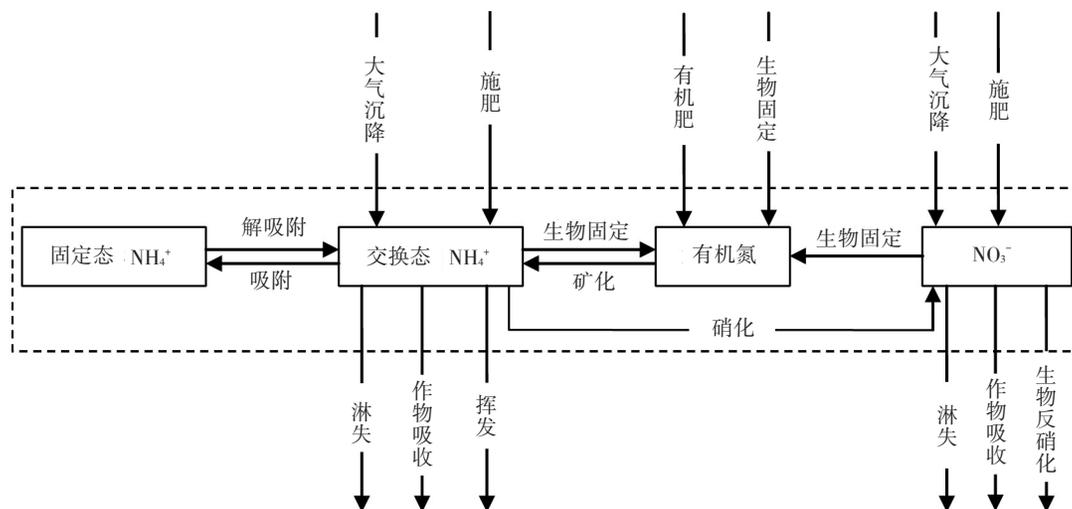


图1 农田生态系统中氮循环示意图

2.1 地下淋溶

土壤氮素淋失是菜地土壤氮素迁移的重要途径,由于菜地施肥量及灌溉强度较大,氮素淋失量高于一般农田的淋失量。氮素主要以硝态氮的形

式发生淋溶迁移^[19]。韦高玲等^[20]研究表明,习惯施肥下,苦瓜地总氮和硝态氮淋失质量浓度分别为92.9~113 mg·L⁻¹和84.0~105 mg·L⁻¹。Zhao等^[21]研究表明,设施菜田土壤硝态氮淋失量占到氮素总投入

的20%~30%。

过量施肥是引起菜地土壤中氮素淋失的直接原因。张白鸽等^[22]研究表明,华南露地苦瓜生产体系中,氮肥施用量与氮素淋失量呈显著正相关。集约化菜地氮肥施用量是粮田氮肥施用量的7倍,其土壤中残留硝酸盐含量是粮田的4~6倍^[23-24]。而过量施用有机粪肥也会导致氮素尤其是硝态氮的淋失^[25]。施肥时期对氮素淋失也有重要影响,由于蔬菜为浅根系作物,对土壤中养分的吸收能力弱,在蔬菜生育前期的氮素淋失量约占整个生长周期氮素损失总量的41%~52%,且蔬菜不同生长期的施氮量与硝态氮的淋失量呈线性极显著相关^[22,26-28]。降雨强度也是影响氮素淋失的重要原因,当降雨强度为3 d 75 mm或7 d 100 mm时,土壤氮素即发生淋溶迁移,且土壤硝态氮淋失量与降雨量呈二项式显著相关^[22,29]。灌溉也是影响硝态氮淋失的重要因素之一,灌溉强度、灌溉时间对硝态氮随地表径流迁移和地下淋溶迁移都有重要影响^[30-31]。当灌溉后发生自然排水时,氮素的淋失量与灌溉水量呈显著正相关^[32-33]。水是硝态氮在土壤中移动的重要载体,是硝态氮淋失的驱动力,而土壤的物理性质,如机械组成、孔隙度、田间持水量、凋萎系数等均会影响水分的迁移和淋失,进而影响硝态氮在土壤中的迁移^[34-35]。

2.2 地表径流和土壤侵蚀

氮素极易随地表径流和土壤侵蚀迁移,引起地表水环境恶化和地下水硝酸盐污染等环境问题。土壤氮素随地表径流迁移是菜地氮素迁移的主要途径。高杨等^[36]研究表明,土壤全氮随径流流失量占流失总量的77.27%~99.79%。曾招兵等^[37]研究表明,广州市郊菜地总氮年径流流失量高达321 kg·hm⁻²,占氮肥投入量的14%。菜地地表径流中氮素迁移主要以硝态氮和铵态氮为主。钱婧等^[38]研究表明,在降雨强度为120 mm·h⁻¹时,菜地径流中硝态氮和铵态氮流失总量占总氮流失量的54.16%~91.41%。由于氮素迁移主要以溶解态的形式随地表径流迁移和以结合态的形式随泥沙颗粒迁移,因此土壤侵蚀是氮素迁移的重要途径之一。据第二次全国土壤侵蚀遥感调查,我国水土流失面积占国土总面积的37.42%;土壤流失量为49.8×10⁸ t。赵明松等^[39]研究表明,安徽省2010年全省因土壤侵蚀导致土壤氮素大量流失,总氮流失量达4.93×10⁴ t。钱婧^[38]对红壤菜地坡面侵蚀产沙的研究结果表明,菜地泥沙中的氮流失主要是由泥沙中<20 μm泥沙

颗粒富集造成的,泥沙中全氮富集率和土壤侵蚀模数之间可呈良好的对数关系。

此外,影响菜地氮素迁移的主要因素包括降雨特征(强度、大小、降雨时间)、地形状况(坡度、坡长)、施肥种类和施肥方式、土壤理化性质、种植模式以及田间管理方式等,其中降雨和灌溉是氮素迁移的主要驱动力^[40]。秦华等^[41]研究表明,降雨强度越大,地表径流量、径流总量、泥沙流失量越大;降雨强度越大,氮素流失越严重。张海涛等^[42]研究表明,降雨强度在60~100 mm·h⁻¹之间、其他条件相同时,坡面动态径流量随降雨强度的增大而增大。王丽等^[43]研究表明,土壤前期含水量是影响土壤入渗、产流以及溶质迁移、淋失的重要因素之一,前期含水率为17%时,径流中水溶性磷、硝态氮、铵态氮浓度最大。王升等^[44]研究表明,径流量、泥沙量及Br⁻流失量随覆盖度的增加而减少,土壤植被覆盖度的增加使得地表平均糙率增大,从而减小了土壤侵蚀量与养分流失量。此外,相关研究还表明,土壤中氮素流失量随坡度的增大而增大,且坡度的主效应及坡度、坡长的交互效应对单宽产流速率有显著的影响^[45-46]。

2.3 氨挥发

化肥过量施用引起的氨挥发问题亦不容忽视,农田氨挥发造成的氮素损失占化肥氮量的7%~21%,是氮素进入环境的重要途径^[47]。据统计,2007年全球总氨挥发约为5600万t纯氮,其中由于化肥施用而产生的氨挥发约占总挥发量的17%^[48]。氨挥发主要与施用氮肥有关,且受到土壤性质、灌溉方式、通气状况、土壤环境等因素的影响^[49-52]。Martines A M等^[53]研究表明,氨挥发与环境中的氮素水平和形态、土壤特性等密切相关,在相同NH₄⁺-N水平下,土壤pH每升高1个单位,土壤氨挥发量增加10倍。龚巍巍等^[54]研究表明,菜地氮肥施用氨挥发主要发生在施肥后14~21 d内,氨挥发通量与施氮量、土壤温度和空气温度明显呈正相关。郝小雨等^[55]研究表明,土壤氨挥发损失的主要时期在基肥和前两次追肥阶段,氨挥发量占当季损失量的70%~80%;且有机肥、无机肥配合施用可显著降低土壤氨挥发损失量。

3 菜地土壤氮素转化途径与影响因素

氮素在菜地土壤中的转化过程主要包括矿化作用、生物固持作用、铵-氨平衡、铵的黏土矿物固

定-释放、硝化作用和反硝化作用等^[56]。其中,氮素的矿化作用、硝化作用和反硝化作用贯穿于土壤中氮素的各种化学形态的转变过程,对氮在土壤中的迁移、转化及损失有着重要的影响。

3.1 土壤有机氮矿化

土壤有机氮矿化是土壤氮素转化的主要途径之一,土壤中氮素主要以有机氮形式存在,有机氮约占土壤全氮的90%以上^[57]。植物所吸收的氮素主要是无机态氮,因此必须在微生物的作用下,将土壤有机氮转化为无机氮。土壤氮素矿化速率越高,则土壤中无机氮含量越高,土壤氮素利用率越高。过燕琴等^[58]研究表明,露天栽培条件下有机菜地土壤氮素在培养21 d时矿化量达最大值(11.86 mg·kg⁻¹);土壤硝化量和硝化率分别为10.27 mg·kg⁻¹·d⁻¹、98.99%。赵长盛等^[59]研究表明,两种菜地土壤(黄棕壤和潮土)的矿化以硝态氮为主,黄棕壤和潮土的矿化量分别为68.65 mg·kg⁻¹、109.37 mg·kg⁻¹,氮素的矿化势分别为74.63 mg·kg⁻¹、123.45 mg·kg⁻¹。

土壤有机质、全氮、水分、温度、质地、通透性、pH、土壤动物和微生物等土壤环境条件对有机氮的矿化过程具有重要影响。常晶晶^[60]研究表明,极高含量有机氮肥的情况下,土壤高脲酶活性和低C/N比会显著促进黄河三角洲滨海湿地土壤有机氮的矿化。Yang等^[61]研究表明,由于作物根系的破碎和腐烂,增加了可供矿化的新鲜有机质,促进了土壤氮素的矿化,进而增加了土壤中硝态氮的累积。此外,土壤水分对矿化作用有一定的影响,在一定区间内,土壤矿化作用与土壤含水量呈显著正相关,但当土壤含水量达到一定程度时,土壤矿化作用将不再增强^[62-64]。土壤温度和含水量是土壤氮素矿化最主要的影响因素,土壤温度会直接影响生物化学过程,进而影响微生物的耗氧量,而土壤含水量会直接影响微生物活性,同时土壤含水量还可以控制土壤氧气的扩散进而影响土壤氮素矿化和好氧微生物的活性。

3.2 土壤氮素硝化与反硝化

硝化作用和反硝化作用是土壤氮素转化的重要途径,硝化作用是指土壤中的氨(或铵)在硝化细菌作用下转化成硝酸盐的过程。反硝化作用是指硝酸盐等较复杂的含氮化合物转化为N₂、NO和NO₂的过程。土壤硝化和反硝化作用释放的N₂O是全球N₂O的主要来源,约占生物圈释放到大气中N₂O总量的90%。菜地土壤硝化与反硝化过程受土

壤类型、土壤肥力水平、水分含量、蔬菜品种等多种因素的影响。苏静等^[65]研究表明,pH对土壤硝化作用和硝化微生物具有显著的影响,其主要通过影响NH₃含量进而影响土壤的硝化速率。蔡祖聪等^[66]研究表明,无外加铵态氮时,土壤有机氮矿化速率与硝化速率呈显著线性关系,与土壤pH无关;外加铵态氮达到饱和时,硝化速率与土壤pH显著相关。但对于热带酸性土壤区,施用铵氮肥会导致土壤pH升高,却不会影响土壤的硝化作用^[67]。因此,土壤pH值对硝化作用的影响机制较为复杂。何飞飞等^[68]研究表明,有机肥无机肥配施显著影响土壤硝化作用以及硝化培养期间和田间N₂O的释放。胡晓霞^[69]等研究表明,红泥土、灰沙土和灰泥土3种菜地土壤之间的硝化活性具有极显著差异,其硝化率分别为96.1%、88.3%和70.4%。

土壤反硝化作用既包括生物反硝化作用,也包括化学反硝化作用,其中生物反硝化作用最为重要。土壤通气和水分状况、温度、碳源、氮源、土壤pH值、土壤质地、植物根系、耕作制度以及微生物对土壤反硝化过程具有重要影响^[70]。胡晓霞等^[69]研究表明,有机质含量较高和质地较黏重的菜地土壤其反硝化活性较高。徐玉裕等^[71]研究表明,五川流域内不同土地利用方式下反硝化差别较大,其中蔬菜地的反硝化作用较强,占施氮量的17%。反硝化作用具有平衡氮通量、导致土壤和肥料氮素损失以及氮氧化物污染环境的多重意义,已成为国内外土壤学和环境学的研究热点。如何在维持正常生态平衡的基础上减少氮素损失和温室气体排放,对于保护生态环境和社会经济发展具有重要意义。

4 展望

近年来,国内外在土壤氮素迁移转化途径、机制及影响因素等方面开展了大量的试验与研究,但相关研究方法主要是室内模拟和短期的定位试验,缺乏长期原位研究试验数据。土壤氮素的迁移转化过程受人为干扰(施肥方式、施肥时间、灌溉方式、覆膜等农业管理模式)、环境条件(降雨时间、降雨强度、土壤理化性质等)、氮素形态以及微生物等多种综合因素的影响。其迁移转化过程包括生物过程、化学过程和物理过程。因此,对于土壤氮素的迁移转化研究,应当开展长期定位试验研究,在探讨氮素迁移转化长期演变规律的基础上使得研究结论与客观规律相符。同时在此基础上,通过利用构建模型、同位素示踪等技术手段对土壤氮素

迁移转化途径进行定量研究。

全球气候变化与土壤氮素的生物地球化学循环密切相关。相关研究应当从不同尺度下探讨土壤氮素迁移转化的环境效应,以期揭示不同尺度下土壤氮素迁移转化与环境变化的内在关系。此外,土壤氮素迁移转化研究应同生产实际紧密结合,考虑多种因素对土壤氮素迁移转化过程的影响,以此寻求提高土壤氮素利用效率和降低土壤氮素环境污染的最优模式。

参考文献

- [1] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008-1010.
- [2] CAO Z H, HUANG J F, ZHANG C S. Soil quality evolution after land use change from paddy soil to vegetable land[J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2004, 26(2): 97-103.
- [3] 徐捷, 单立楠, 俞丹萍, 等. 不同施肥模式对甘蓝氮素利用与流失的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2013, 39(5): 556-564.
- [4] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(11): 200-205.
- [5] 周婕, 刘唯一, 刘继培, 等. 不同氮肥施用量对青花菜氮肥利用率、氮素含量及产量的影响[J]. *中国瓜菜*, 2014, 27(5): 38-39.
- [6] 张金锦, 段增强, 李汛. 基于黄瓜种植的设施菜地土壤硝酸盐型次生盐渍化的分级研究[J]. *土壤学报*, 2012, 49(4): 673-680.
- [7] SOTO F, GALLARDO M, THOMPSON R B, et al. Consideration of total available N supply reduces N fertilizer requirement and potential for nitrate leaching loss in tomato production[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2015, 200: 62-70.
- [8] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008-1010.
- [9] QIN H L, QUAN Z, YUAN H Z, et al. Response of Ammonium-Oxidizing (*amoA*) and Nitrate-Reducing (*narG*) gene abundances in groundwater to land use change[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2014, 225(5): 1908.
- [10] YUAN H M, BLACKWELL M, RAHN C, et al. Fertilization and catch crop strategies for improving tomato production in North China[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(3): 364-371.
- [11] 陆扣萍, 闵炬, 李蒙, 等. 施氮量对太湖地区设施菜地年氮素流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(4): 706-712.
- [12] 孙媛, 胡克林, 邱建军, 等. 不同水肥管理下设施黄瓜地氮素损失及水氮利用效率模拟分析[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(8): 1635-1645.
- [13] 闵炬. 太湖地区大棚蔬菜地化肥氮利用和损失及氮素优化管理研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [14] 郑少文, 郭智, 王子臣, 等. 太湖流域典型蔬菜地氮素径流流失特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 204-208.
- [15] BABIKER I S, MOHAMED M A A, TERAHO H, et al. Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system[J]. *Environment International*, 2004, 29: 1009-1017.
- [16] 崔敏, 胡承孝, DI H J, 等. 武汉市城郊区集约化露天菜地生产系统硝态氮淋溶迁移规律研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 8(3): 637-644.
- [17] 张双灵, 孙萍, 符方映. 青岛市售冬季大棚蔬菜中亚硝酸盐、硝酸盐含量的测定及安全性评价[J]. *现代食品科技*, 2012, 28(8): 1069-1072.
- [18] 张俊, 徐绍辉, 刘建立, 等. 农田生态系统中氮循环模型研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(3): 85-88.
- [19] 倪玉雪. 中国农田土壤硝态氮累积、淋洗与径流损失及 N₂O 排放[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2013.
- [20] 韦高玲, 卓慕宁, 廖义善, 等. 不同施肥水平下菜地耕层土壤中氮磷淋溶损失特征[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(6): 1023-1031.
- [21] ZHAO C S, HU C X, HUANG W, et al. A lysimeter study of nitrate leaching and optimum nitrogen application rates for intensively irrigated vegetable production systems in Central China[J]. *Soil Sediments Contamination*, 2010, 10(1): 9-17.
- [22] 张白鸽. 华南露地苦瓜生产体系的氮素调控[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [23] JU X T, KOU C L, ZHANG F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143: 117-125.
- [24] 叶灵, 巨晓棠, 刘楠, 等. 华北平原不同农田类型土壤硝态氮累积及其对地下水的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 165-178.
- [25] NIKIEMA P, BUCKLEY K E, ENNS J M, et al. Effects of liquid hog manure on soil available nitrogen status, nitrogen leaching losses and wheat yield on a sandy loam soil of Western Canada[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2013, 93(5): 573-584.
- [26] HOYLE F, MURPHY D. Influence of organic residues and soil incorporation on temporal measures of microbial biomass and plant available nitrogen[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347: 53-64.
- [27] VESNA ZUPANC, MARTINA ŠTURM, SONJA LOJEN, et al. Nitrate leaching under vegetable field above a shallow aquifer in Slovenia[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1): 167-174.
- [28] KLADIVKO E J, KASPAR T C, JAYNES D B, et al. Cover crops in the upper midwestern United States: Potential adoption and reduction of nitrate leaching in the Mississippi River Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 69(4): 279-291.
- [29] COCKX E M, SIMONNE E H. Reduction of the Impact of fertilization and irrigation on processes in the nitrogen cycle in vegetable fields with BMPs[J]. *Horticultural Sciences*, 2014, 128: 86-97.
- [30] WANG Q, LI F, ZHANG E, et al. The effects of irrigation and nitrogen application rates on yield of spring wheat (longfu-920), and water use efficiency and nitrate nitrogen accumulation in soil[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2012, 6(4): 662-672.
- [31] VÁZQUEZ N, PARDOA A, SUSOA M L, et al. Drainage and nitrate leaching under processing tomato growth with drip irrigation and plastic mulching[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112(4): 313-323.
- [32] POCH-MASSEGU R, JIMENEZ-MARTINEZ J, WALLIS K J, et al. Irrigation return flow and nitrate leaching under different crops

- and irrigation methods in Western Mediterranean weather conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 134(2): 1-13.
- [33] KONG D L, LÜ X T, JIANG L L, et al. Extreme rainfall events can alter inter-annual biomass responses to water and N enrichment[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10: 8129-8138.
- [34] BLICHER-MATHIESEN G, ANDERSEN H E, LARSEN S E. Nitrogen field balances and suction cup-measured N leaching in Danish catchments[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 196: 69-75.
- [35] ZHAO X, WANG S Q, XING G X. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: laboratory incubation and column leaching studies[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2014, 14(3): 471-482.
- [36] 高杨, 宋付鹏, 马富亮, 等. 模拟降雨条件下3种类型土壤氮磷钾养分流失量的比较[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 15-18.
- [37] 曾招兵, 李盟军, 姚建武, 等. 习惯施肥对菜地氮磷径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 34-43.
- [38] 钱婧, 张丽萍, 王文艳, 等. 施肥条件下坡面菜地径流携氮流失模拟降雨试验[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 248-253.
- [39] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 基于RUSLE模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J]. *土壤学报*, 2016, 53(1): 28-38.
- [40] ZOTARELLI L, DUKES M D, SCHOLBERG J M S, et al. Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(8): 1247-1258.
- [41] 秦华, 李晔, 李波, 等. 人工模拟降雨条件下石灰土养分流失规律[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 1-4.
- [42] 张海涛, 王永会, 张爱军. 模拟降雨下雨强对石灰岩坡地土壤径流及泥沙含量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(5): 287-289.
- [43] 王丽, 王力, 王全九. 前期含水量对坡耕地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2171-2178.
- [44] 王升, 王全九, 董文财, 等. 黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 23-27.
- [45] 孔刚, 王全九, 樊军. 坡度对黄土坡面养分流失的影响实验研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 14-18.
- [46] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 降雨强度、坡度及坡长对细沟侵蚀的交互效应分析[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(6): 8-13.
- [47] 顾海燕. 施氮量及时期对稻田氮素挥发、淋失和水稻利用的影响[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2012.
- [48] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007, contribution of working group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Metz B, Davidson O R, Bosch P R, et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [49] LIU C Y, WANG K, MENG S X. Effects of irrigation, fertilization and crop straw management on nitrous oxide and nitric oxide emissions from a wheat-maize rotation field in northern China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1/2): 226-233.
- [50] 张冉, 赵鑫, 濮超, 等. 中国农田秸秆还田土壤 N₂O 排放及其影响因素的 Meta 分析[J]. *农业工程学报*, 31(22): 1-6.
- [51] LAL R. Soil carbon management and climate change[J]. *Carbon Management*, 2013, 4(4): 439-462.
- [52] SICILIANO S D, MA W K, FERGUSON S, et al. Nitrifier dominance of Arctic soil nitrous oxide emissions arises due to fungal competition with denitrifiers for nitrate[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(6): 1104-1110.
- [53] MARTINES A M, NOGUEIRA M A, SANTOS C A, et al. Ammonia volatilization in soil treated with tannery sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(12): 4690-4696.
- [54] 龚巍巍, 张宜升, 何凌燕, 等. 菜地氨挥发损失及影响因素原位研究[J]. *环境科学*, 2012, 32(2): 345-350.
- [55] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对日光温室土壤氮挥发的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(21): 4403-4414.
- [56] 金雪霞, 范晓晖, 蔡贵信, 等. 菜地土氮素的主要转化过程及其损失[J]. *土壤*, 2005, 37(5): 492-499.
- [57] 查春梅, 颜丽, 郝长红, 等. 不同土地利用方式对棕壤有机氮组分及其剖面分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报* 2007, 13(1): 22-26.
- [58] 过燕琴, 高志亮, 张令, 等. 设施和露天栽培下有机菜地土壤氮素矿化和硝化作用的比较研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(12): 2436-2442.
- [59] 赵长盛, 胡承孝, 黄魏. 华中地区两种典型菜地土壤中氮素的矿化特征研究[J]. *土壤*, 2013, 45(1): 41-45.
- [60] 常晶晶. 生物炭、天然生物质和有机氮肥对黄河三角洲滨海湿地土壤有机氮矿化的影响[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [61] YANG X L, LU Y L, TONG Y A, et al. A 5-year lysimeter monitoring of nitrate leaching from wheat-maize rotation system: Comparison between optimum N fertilization and conventional farmer N fertilization [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 199: 34-42.
- [62] 刘颖慧, 李悦, 牛磊, 等. 温度和湿度对内蒙古草原土壤氮矿化的影响[J]. *草业科学*, 2014, 31(3): 349-354.
- [63] 解成杰, 郭雪莲, 余磊朝, 等. 滨西北高原纳帕海湿地土壤氮矿化特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7782-7787.
- [64] 陈书信. 苏北沿海不同土地利用方式土壤氮矿化动态[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [65] 苏静, 王智慧, 李仕伟, 等. pH 对酸性紫色土中硝化作用与硝化微生物的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(3): 142-148.
- [66] 蔡祖聪, 赵维. 土地利用方式对湿润亚热带土壤硝化作用的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5): 795-801.
- [67] ZHAO W, CAI Z C, XU Z H. Does ammonium-based N addition influence nitrification and acidification in humid subtropical soils of China[J]. *Plant Soil*, 2007, 297(1/2): 213-221.
- [68] 何飞飞, 梁运姗, 易珍玉, 等. 有机无机肥配施对酸性菜地土壤硝化作用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 534-540.
- [69] 胡晓霞, 丁洪, 张玉树, 等. 不同菜地土壤硝化与反硝化活性[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2657-2662.
- [70] 续勇波. 热带亚热带土壤氮素反硝化及其环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [71] 徐玉裕, 曹文志, 黄一山, 等. 五川流域农业土壤反硝化作用测定及其调控措施[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3): 1126-1131.