

土壤矿质氮及其测定方法研究进展

苏涵, 王维, 张巧凤, 侯会, 耿晓月, 董韦, 徐振*

(江苏徐淮地区徐州农业科学研究所, 江苏徐州 221131)

摘要 土壤矿质氮是土壤氮素的重要组成部分, 在土壤氮素的转化中起重要作用, 是反映土壤肥力的一大指标, 主要包括硝态氮和铵态氮。土壤矿质氮的累积与土壤微生物、施肥、温度、水分、耕作方式和土地利用方式密切相关。土壤矿质氮的流失可能会造成土壤肥力下降、地表水体富营养化, 释放的氧化亚氮会引发温室效应, 最终影响人类的生存发展。从土壤矿质氮的组成与来源、影响氮素矿化的因素、矿质氮的提取与测试以及对环境的影响 4 个方面进行综述, 并对各种测试方法进行比较, 以期土壤矿质氮的研究提供依据。

关键词 土壤硝态氮; 土壤铵态氮; 氮素矿化; 提取与测试; 环境效应

中图分类号 S 153 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)24-0024-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.24.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress of Soil Mineral Nitrogen and Its Determination Methods

SU Han, WANG Wei, ZHANG Qiao-feng et al (Xuzhou Institute of Agricultural Sciences in Xuhuai District in Jiangsu Province, Xuzhou, Jiangsu 221131)

Abstract Soil mineral nitrogen is an important component of soil nitrogen, plays an important role in the transformation of soil nitrogen, and is a major indicator reflecting soil fertility, mainly including nitrate nitrogen and ammonium nitrogen. The accumulation of soil mineral nitrogen is closely related to soil microorganisms, fertilization, temperature, water, tillage and land use. The loss of soil mineral nitrogen may cause the decline of soil fertility, the eutrophication of surface water and the release of nitrous oxide, which will lead to the greenhouse effect and ultimately affect the survival and development of human beings. This paper summarized the composition and source of soil mineral nitrogen, the factors affecting nitrogen mineralization, the extraction and testing of mineral nitrogen, and the impact on the environment, and compared various testing methods in order to provide a basis for the study of soil mineral nitrogen.

Key words Soil nitrate nitrogen; Soil ammonium nitrogen; Nitrogen mineralization; Extraction and testing; Environmental effect

土壤氮素是植物生长的大量元素之一, 缺氮会导致作物产量下降、品质降低。土壤矿质氮占土壤氮素的 1%~5%^[1], 是土壤氮素的重要组成部分。土壤矿质氮能够溶于水, 可以被大多数植物直接吸收利用, 是土壤重要的养分指标, 也是反映土壤肥力的一个相对指标^[2]。土壤矿质氮的流失会引发一系列的环境问题。因此, 一直是国内外科学家的研究重点^[3-6]。该研究从土壤矿质氮的组成与来源、影响氮素矿化的因素、矿质氮的提取与测试以及对环境的影响 4 个方面进行综述, 并对各种测试方法进行比较, 以期土壤矿质氮的研究提供依据。

1 土壤矿质氮的组成与来源

土壤矿质氮也称土壤无机态氮, 主要包括土壤硝态氮、亚硝态氮和铵态氮, 其中亚硝态氮被视为土壤氮素转化的中间产物, 很容易转化成有机态氮、一氧化氮、氧化亚氮、硝态氮等, 在土壤生态系统中很难累积^[7], 所以在土壤矿质氮的研究中经常被忽略^[8-11], 因此, 该研究主要针对硝态氮和铵态氮进行讨论。

有机氮占土壤氮素的 95% 以上, 但是绝大部分的有机氮并不能直接被植物吸收利用, 只有矿化为硝态氮和铵态氮, 才能保障土壤氮素的有效性^[12]。因此, 有机氮的矿化是土壤矿质氮的一大来源。除此之外, 在农田生态系统中, 氮肥的施入是土壤矿质氮的又一重要来源。研究发现, 当施氮量远超过作物生长所需要的氮量时, 土壤矿质氮会在农田生态系统中累积, 引发一系列环境问题^[13]。

2 影响土壤氮素矿化的因素

土壤氮素的矿化问题是解决农田污染、提高作物产量的瓶颈, 对土壤矿质氮的含量变化有重要影响。影响土壤氮素矿化的因素包括生物因素和非生物因素。

2.1 生物因素 土壤微生物是土壤生态系统中的重要组成部分, 是土壤氮素转化的媒介和驱动力。氮循环的 4 个主要过程: 固氮作用、氨化作用、硝化作用和反硝化作用均受其驱动^[14]。微生物的活性决定氮的矿化速率。氮肥的大量使用, 导致土壤微生物的矿化作用在农田生态系统的作用常被忽略, 但是在养分贫瘠的自然土壤上, 土壤微生物的矿化作用显得至关重要。土壤微生物是养分固定和有机氮矿化分解的核心动力, 推动土壤氮循环的整个过程^[15-18]。

2.2 非生物因素 土壤氮素的矿化不仅受生物因素的影响, 也受非生物因素的影响。影响土壤氮素矿化的非生物因素有很多, 如温度、水分、施肥、耕作方式、土地利用方式等。温度对土壤矿化的影响比较复杂, 一方面, 适当的增温会使微生物的活性增加, 从而促进土壤氮素的矿化; 另一方面, 增温使得土壤水分蒸发, 可能会使草原生态系统土壤湿度降低, 从而抵消了增温对土壤氮矿化的正面效应^[19]。王连峰等^[20]为了探究水分、温度对硝化细菌与反硝化细菌的影响, 采集亚热带季风气候的红黏土和红砂土在不同条件下进行研究。结果表明, 低温抑制这 2 种细菌的活力, 不利于氮素的转化; 淹水不利于这 2 种细菌的生存, 但有利于保持反硝化细菌的活力。但小倩等^[21]采用¹⁵N 成对标记技术, 对亚热带季风气候的江西红壤进行研究, 发现红壤中的铵态氮主要是由易分解的有机氮矿化产生的, 土壤含水量越大, 铵态氮产生越多, 该研究结果或许与该区域优势植被的凋落物有关。郎漫

作者简介 苏涵(1994—), 女, 江苏邳州人, 研究实习员, 硕士, 从事农产品营养品质分析及营养强化技术研究。*通信作者, 副研究员, 博士, 从事植物养分管理研究。

收稿日期 2023-01-12

等^[22]对黑龙江半干旱地区的砂壤土氮素转化进行研究,发现淹水可以抑制土壤硝化,从而降低土壤氮素淋溶损失的风险,与此同时有机氮的固定速率跟矿化速率都明显的提高,该结果对砂壤土农田的管理具有一定的指导意义。武丹丹等^[23]研究了温度和降水量对青藏高原地区高寒草甸土壤无机氮的影响,发现增温导致土壤无机氮含量下降,降水量增加则会显著增加土壤无机氮的含量。氮肥的施用种类和施用量对土壤矿质氮的含量和矿质氮的转化也有很大影响^[24]。潘飞飞等^[25]通过添加外源氮的方式,对不同年限的设施土壤中的矿质氮进行研究,发现种植年限越久,土壤矿质氮含量越高;在同一种植年限下,施氮量越高,土壤矿质氮的含量越高;同一施氮处理条件下,施用无机肥效果强于有机肥,但是随着种植年限的增加,施加氮肥对土壤矿质氮含量的增加效果减弱。不同的耕作方式对土壤硝态氮有一定的影响。地膜覆盖不仅可以改善水热状况,对土壤氮素的矿化也有促进作用,同时减缓土壤硝态氮向下迁移的速度,减小淋溶,对增加作物产量,提高氮肥使用率有重要意义^[26]。免耕可以提高土壤水分的利用效率和土壤肥力,但是长期的免耕,可能导致土壤表层养分富集,对作物的生长不利^[27]。秸秆覆盖能够有效保温,降低土壤容重,促进土壤肥力的发酵^[28]。胡锦涛等^[29]通过对旱地春玉米长期定位试验,研究6种耕作措施对土壤水分和硝态氮淋溶的影响,发现不同的耕作方式可以通过对水分的调节减少硝态氮的淋溶,从而提高氮素的利用率。唐江华等^[30]研究了秸秆全量还田的情况下北疆地区不同耕作措施对土壤氮素的影响,发现翻耕覆膜和翻耕均能提高土壤氮素的利用效率,更利于大豆的生长,但是覆膜也可能导致残膜滞留土壤,造成新的污染。同一地区,不同土地利用方式氮的收支差异较大,刘明庆等^[31]以浙江建德一村为研究对象,分析不同土地利用方式下土壤肥力情况,结果表明旱地土壤氮处于缺乏水平。韩轶才等^[32]研究了千岛湖流域的氮的收支特征,采取各种方式评估不同土地利用方式下氮素的收支平衡与差异,结果表明,氮输入量较高的是园地和耕地,输出量最高的是菜地,自然林地氮素的输入、输出量均比较少。

3 矿质氮的提取测定

3.1 土壤矿质氮的提取 土壤矿质氮可以用氯化钠、氯化钾、氯化钙等溶液浸提,也可以用电超滤法(EUF)提取。电超滤法的工作原理是电超滤仪的正负极在与直流电源相连时,土壤悬浊液中的正负离子会在电场的作用下,向两极迁移,收集两极的滤液,即可以测定不同形态的氮离子。但是EUF提取氮素费时、费力、重复性不好^[33],因此逐渐被化学提取法取代。化学提取法比EUF法更加方便、快速、准确,国内外学者开发了各种土壤矿质氮的浸提剂。大量试验表明,使用氯化钾、氯化钙等温和的浸提剂不会引起土壤性质的巨大改变,能较真实地反映土壤的情况,因此被广泛应用。李生秀等^[34]用几种不同的测氮方法比较旱地土壤供氮能力,发现不同浸提剂对土壤铵态氮的浸提能力不同,1.000 mol/L氯化钾的浸提效果最佳,0.001 mol/L氯化钙次之,水浸提的

效果最差。刘育红等^[35]对浙江嘉兴的稻田土壤氮素矿化进行研究,结合盆栽试验,用KCl加热煮沸法和2种不同的淹水密闭培养法进行比较,结果表明,氯化钾煮沸法能更好地测定土壤供氮能力。王海妹等^[36]为了提高浸提土壤硝酸盐的效率,采用超声法对浸提液氯化钾的浓度、提取时间、料液比和样品取样量进行探究,发现称取20 g土壤样品,加入100 mL 1.0 mol/L的氯化钾溶液,超声提取15 min提取效果最好,超声提取法的加标回收率也高于常用的震荡提取法,满足检测需求。潘艳等^[37]用氯化钙浸提土壤中的硝酸盐氮,通过单因素试验法,研究氯化钙浓度、浸提时间对硝态氮浸提效果的影响,结果表明氯化钙的浓度对土壤硝态氮的浸提有显著影响,而浸提时间对浸提的影响不明显。我国国家标准《HJ 634—2012 土壤 氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的测定》也是用1.0 mol/L氯化钾进行浸提,表明可溶性盐作为土壤矿质氮的浸提剂已经得到普遍认可。土壤样品的预处理方式对土壤矿质氮的测定结果也有很大的影响。孟盈等^[38]研究烘干、风干对不同热带森林土壤矿质氮测定的影响,结果表明烘干和风干对森林土壤的铵态氮有显著影响,含量显著高于新鲜土,而烘干则会导致土壤的硝态氮含量显著下降。赵瑞芬等^[39]研究了大棚土壤处理方式对矿质氮的影响,发现土壤预处理方式对硝态氮、铵态氮均有显著性影响,铵态氮的含量为烘干土>风干土>新鲜土,硝态氮的含量为烘干土>风干土>新鲜土。有研究者认为,升温 and 干燥会影响土壤有机质的结构,从而释放铵态氮和二氧化碳气体。铵态氮的含量随着温度升高,明显增加,这与已有的报道结论一致^[40]。而干燥对硝态氮含量的影响,尚无一致的定论。因此,土壤矿质氮的测定最好采用新鲜土样,然而在现实中,采回来的样品会受到各种客观条件的限制,无法立即浸提、上机测定,土样则需要暂时保存,我国环境标准HJ 634—2012也对土壤矿质氮的保存条件进行了明确的规定,以减小测试误差。综上所述,在土壤样品的处理过程中,不同的浸提液、土壤预处理方式对土壤矿质氮的浸提有影响,使得测定结果相差较大,因此,应综合考虑土壤有机质的含量、土壤质地,参照标准的保存办法,选用合适的方法对土壤样品进行处理。

3.2 土壤矿质氮的测定

3.2.1 土壤浸提液中硝态氮的测定。土壤浸提液中硝态氮的测定主要有酚二磺酸法、还原蒸馏法、电极法、紫外分光光度法、离子色谱法、气相分子吸收光谱法等。前2种是测定土壤硝态氮的经典方法^[41]。酚二磺酸法具有显色稳定、测定范围宽、灵敏度高的优点,但是操作复杂,易受其他离子的干扰,不适合样品的批量测定。还原蒸馏法不易受其他离子干扰,结果准确可靠但是滴定终点的判定容易出现误差,不适合对颜色不敏感的实验人员和新手,也不适合大量样品的测定。离子选择电极法作为一种快速、低成本检测硝态氮的方法应时而生,但电极本身的干扰和背景噪音无法避免,易引起误差,影响检测结果的准确性。因此,精确度高、适用于大批量样品测定的仪器逐渐被开发利用,如紫外分光光度

法、离子色谱法、气相分子吸收光谱法、连续流动分析法等。紫外分光光度法操作简单、测定速度快,但是对于有机质含量高的土壤样品校正因数不好确认。离子色谱法、气相分子吸收光谱法、连续流动分析法均可以测定多种形态的氮素,操作简单、分析速度快、精确度高、重复性好、自动化程度高,但是仪器价格昂贵。同时,连续流动分析法是《LY/T 1228—2015 森林土壤氮的测定》中硝态氮测定的经典方法。

3.2.2 土壤浸提液中铵态氮的测定。土壤浸提液中铵态氮的测定方法主要有离子色谱法、气相分子吸收光谱法、连续流动仪法、靛酚蓝分光光度法、纳氏试剂比色法等。离子色谱法、气相分子吸收光谱法、连续流动仪法自动化程度高、分析速度快、检测准确,但成本相对较高;靛酚蓝分光光度法的检测成本相对较低,但是检测结果易受外界因素的影响,如试剂、温度、显色剂等。纳氏试剂比色法易受土壤中金属离子的影响、操作相对复杂且用到的试剂毒性较大,不利于检测人员的身体健康,逐渐被其他方法取代。靛酚蓝比色法和连续流动分析仪法是林业标准中森林土壤铵态氮测定的经典方法。

4 土壤矿质氮的环境影响

土壤矿质氮的流失主要有淋溶损失和温室气体的释放2种方式。淋溶导致土壤肥力下降,水体富营养化。土壤中矿质氮淋溶损失需满足2个基本条件:①土壤中有易移动的氮源的累积(主要是硝态氮);②土壤中有水分运动的存在,土壤水分运动是土壤矿质氮淋溶的发动机。土壤矿质氮的淋溶损失受这2个因素影响^[42]。大量研究表明,硝态氮难以被土壤颗粒吸附,在降水或灌溉水的作用下容易向下迁移,到达一定深度后,植物难以吸收利用,最终进入水体环境,对水体环境造成污染。因此,科学家们对降低土壤氮素的损失,减少水土气的污染进行了不断研究和各种探索^[43-45]。李宗新等^[46]研究了山东地区棕壤土在不同施肥条件下的养分淋溶规律,证实了硝态氮淋溶是土壤氮素淋溶的主要形式,与任丽萍等^[47]、王少平等^[48]的研究是一致的。研究发现,华北平原地区地下水的硝酸盐含量超标19.3%,有些地区甚至更高^[49],直接影响人类的健康,过量的硝酸盐在人体内积存,会转化成亚硝酸盐,亚硝酸盐不仅会引发高铁血红蛋白症,还能生成致癌物质——亚硝胺。研究表明,硝化过程跟反硝化过程均会产生氧化亚氮。在对全球温室气体排放源的调查中发现,农业生产排放的温室气体占全球温室气体排放总量的1/4^[50],其中1/2来自耕地土壤氮肥脱氮产生的氧化亚氮,因此作物施肥是温室气体氧化亚氮排放的重要来源^[51]。氧化亚氮对温室效应的贡献率虽仅为二氧化碳的1/12,甲烷的1/3,但是其增温效应却是二氧化碳的296~310倍^[52-54],对臭氧层也有很强的破坏性^[55]。综上所述,应该加强土壤矿质氮的研究,减少矿质氮的淋溶损失,同时加强矿质氮转化的机理研究,为氧化亚氮排放量的估算提供更准确、更全面、更有价值的支撑。

5 结语

土壤矿质氮作为土壤氮素的重要组成部分,在生态系统

的氮循环过程中起着重要作用。因此,研究土壤矿质氮对生态系统的平衡、化肥的使用、作物的生长发育、生态环境等有重要意义。应当更深一步地探索土壤矿质氮化学属性和生物学属性,加强土壤微生物的机理研究,进一步明确土壤矿质氮的转化机制,开发检测土壤矿质氮的新方法,揭示土壤矿质氮在土壤氮循环中的角色,在促进农业经济发展的同时,减少其带来的生态环境问题。

参考文献

- [1] 寇恒.土壤氮素及其研究方法综述[J].亚热带水土保持,2018,30(2):64-67,70.
- [2] 范磊,李永红,徐斌.黄土高原沟壑区种植植物和施肥对土壤矿质氮的影响[J].水土保持通报,2018,38(2):115-121.
- [3] 巨晓棠,张肿.论合理施氮的原则和指标[J].土壤学报,2021,58(1):1-13.
- [4] 朱兆良.中国土壤氮素研究[J].土壤学报,2008,45(5):778-783.
- [5] GEISELER D, HORWATH W R, JOERGENSEN R G, et al. Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms—A review[J]. Soil biology & biochemistry, 2010, 42(12): 2058-2067.
- [6] BOUCHET A S, LAPERCHE A, BISSUEL-BELAYGUE C, et al. Nitrogen use efficiency in rapeseed. A review[J]. Agronomy for sustainable development, 2016, 36(2): 38-47.
- [7] 朱兆良.土壤氮素[J].土壤,1982(3):116-119.
- [8] YU Q G, CHEN Y X, YE X Z, et al. Evaluation of nitrification inhibitor 3, 4-dimethyl pyrazole phosphate on nitrogen leaching in undisturbed soil columns[J]. Chemosphere, 2007, 67(5): 872-878.
- [9] 余光辉,张杨珠,王大娟.几种硝化抑制剂对土壤和小白菜硝酸盐含量及产量的影响[J].应用生态学报,2006,17(2):247-250.
- [10] 朱靖蓉,马磊,康露,等.降低样品采集制备过程中土壤硝态氮和铵态氮测定误差的方法[J].新疆农业科学,2020,57(3):553-561.
- [11] 朱强,马丽,马强,等.不同浸提剂以及保存方法对土壤矿质氮测定的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(2):138-143.
- [12] 沈仁芳,赵学强.土壤微生物在植物获得养分中的作用[J].生态学报,2015,35(20):6584-6591.
- [13] SUTTON M A, HOWARD C M, ERISMAN J W, et al. The European nitrogen assessment[M]. New York: Cambridge University Press, 2011: 32-61.
- [14] 贺纪正,张丽梅.氮氧化微生物生态学与氮循环研究进展[J].生态学报,2009,29(1):406-415.
- [15] VAN DER HEIJDEN M G A, BARDGETT R D, VAN STRAALLEN N M. The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems[J]. Ecology letters, 2008, 11(3): 296-310.
- [16] SCHIMMEL J P, BENNETT J. Nitrogen mineralization: Challenges of a changing paradigm[J]. Ecology, 2004, 85(3): 591-602.
- [17] 陈文新,李阜棣,闫章才.我国土壤微生物学和生物固氮研究的回顾与展望[J].世界科技研究与发展,2002,24(4):6-12.
- [18] KUZYAKOV Y, FRIEDEL J K, STAHR K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. Soil biology and biochemistry, 2000, 32(11/12): 1485-1498.
- [19] BAI E, LI S L, XU W H, et al. A meta-analysis of experimental warming effects on terrestrial nitrogen pools and dynamics[J]. The new phytologist, 2013, 199(2): 441-451.
- [20] 王连峰,蔡祖聪.水分和温度对旱地红壤硝化活力和反硝化活力的影响[J].土壤,2004,36(5):543-546,560.
- [21] 但小倩,陈招兄,程谊,等.红壤氮化对土壤水分变化的响应[J].浙江农林大学学报,2021,38(5):896-905.
- [22] 郎漫,魏玮,李平.不同水分对砂壤土初级氮转化速率的影响[J].农业环境科学学报,2022,41(1):107-114.
- [23] 武丹丹,井新,林笠,等.青藏高原高寒草甸土壤无机氮对增温和降水改变的响应[J].北京大学学报(自然科学版),2016,52(5):959-966.
- [24] 胡明芳,田长彦,王林霞.氮肥用量与施用时期对棉花生长发育及土壤矿质氮含量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(11):103-109.
- [25] 潘飞飞,张伟豪,孙壮,等.添加外源氮对不同年限设施土壤矿质氮含量的影响[J].北方园艺,2022(3):79-86.
- [26] 刘世平,张洪程,戴其根,等.免耕套种与秸秆还田对农田生态环境及小麦生长的影响[J].应用生态学报,2005,16(2):393-396.

响植株拔节伸长,导致整体株高变化。不同品种间主茎高、穗长差异极显著说明对照品种与高矮异株突变体间主茎高、穗长、生育期、分蘖间存在明显差异,并稳定表达,说明高矮异株突变体可作为稳定的研究材料加以利用。地点×品种间互作在主茎高上差异极显著,说明环境对不同品种的主茎高有显著的影响作用。王晓宇等^[11-14]在分子水平上对影响株高的基因进行了研究,表明在 1、2、7、9 号染色体上存在控制株高的基因,7 号染色体上存在控制分蘖的基因,该高矮异株突变体可作为进一步探索株高与分蘖关系的新材料加以利用。

谷子是光温反应敏感作物^[15],作物种间的遗传多样性是基因型、环境以及基因型与环境互作效应的综合表现,光温等环境因素对抽穗期、株高、分蘖有明显的影响,随着光温环境条件的改变作物对抽穗期、株高、穗长、分蘖做出适当调整,从而实现对该生态区的适应^[16-17]。分蘖与株高之间存在一定的关系,会影响整个植株的株型,也可以产生不定根导致植株的开花,最终使产量发生改变^[18-19],该高矮异株突变体分蘖数量稳定,成株单株间差异极显著,不受环境影响,是研究株高、生育期、分蘖原理的优良材料。

参考文献

- [1] 刁现民. 谷子种质资源的深度分析和研究利用 [C] // 中国作物学会. 2017 年中国作物学会学术年会摘要集. 北京: 中国作物学会, 2017: 13.
- [2] 李顺国, 刘斐, 刘猛, 等. 新时期中国谷子产业发展技术需求与展望 [J]. 农学学报, 2018, 8(6): 96-100.
- [3] KEBROM T H, SPIELMEYER W, FINNEGAN E J. Grasses provide new insights into regulation of shoot branching [J]. Trends in plant science, 2013, 18(1): 41-48.

(上接第 26 页)

- [27] 杨彩虹, 耿艳香, 伏星舟, 等. 免耕轮作对西北荒漠绿洲小麦、玉米产量和光合特性的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 11-19.
- [28] 陈素英, 张喜英, 胡春胜, 等. 秸秆覆盖对夏玉米生长过程及水分利用的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 55-57, 66.
- [29] 胡锦昇, 樊军, 付威, 等. 保护性耕作措施对旱地春玉米土壤水分和硝态氮溶累积的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1188-1198.
- [30] 唐江华, 杜孝敬, 徐文修, 等. 秸秆全量还田下土壤氮素特征对耕作措施的响应 [J]. 作物杂志, 2022(5): 135-140.
- [31] 刘明庆, 韩笑, 杨育文, 等. 不同土地利用方式下土壤肥力的调查与评价: 以浙江省建德市葛塘村为例 [J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(3): 394-401.
- [32] 韩殊才, 李恒鹏, 刘明亮, 等. 千岛湖流域主要土地利用方式氮收支平衡特征 [J]. 环境污染与防治, 2022, 44(5): 682-686.
- [33] 邵孝侯, HOUBA V J G. 土壤有效氮测定方法的研究进展 [J]. 国外农业环境保护, 1991(3): 17-20.
- [34] 李生秀, 付会芳, 肖俊璋, 等. 几种测氮方法在反映旱地土壤供氮能力方面的效果 [J]. 干旱地区农业研究, 1992, 10(2): 72-81.
- [35] 刘育红, 吕军. 稻田土壤氮素矿化的几种方法比较 [J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 675-678.
- [36] 王海妹, 莫孙伟, 张鸣珊, 等. 超声提取-气相分子吸收光谱法测定土壤中硝态氮 [J]. 广州化工, 2020, 48(16): 94-96, 119.
- [37] 潘艳, 吕保玉, 蓝月存, 等. 氯化钙浸提法测定土壤中的硝态氮 [J]. 化学工程师, 2019, 33(6): 37-39.
- [38] 孟盈, 沙丽清. 风干、烘干对不同热带森林土壤样品 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 测定结果的影响 [J]. 农业环境保护, 2001, 20(5): 366-367, 369.
- [39] 赵瑞芬, 于志勇, 程滨, 等. 不同前处理条件对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量影响的研究 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(10): 174-177.
- [40] НИКИФОРЕНКО ЛИ, 张道勇, 摘译. 土壤分析样本的干燥、贮存和制备对土壤理化性质的影响 [J]. 土壤学进展, 1989, 17(2): 45-52.
- [41] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 49-50.
- [42] 袁新民, 王周琼. 硝态氮的淋洗及其影响因素 [J]. 干旱区研究, 2000, 17

- [4] 杨慧卿, 王军, 王智兰, 等. 分蘖型谷子资源的表型和遗传多样性分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4): 685-695.
 - [5] 河北省农林科学院旱作农业研究所. “矮秆、极早熟谷子新品种衡谷 12 号”通过鉴定 [J]. 现代农村科技, 2013(24): 2.
 - [6] 郝洪波, 崔海英, 李明哲, 等. 衡谷 12 号早熟性以及最晚播期和适宜留苗密度研究 [J]. 河北农业科学, 2017, 21(1): 1-5.
 - [7] 王春芳, 胡世宝, 张温典, 等. 衡谷 12 号在承德地区生长情况调查 [J]. 河北旅游职业学院学报, 2015, 20(4): 102-105.
 - [8] 曹丹, 易秀, 陈小兵, 等. 基于气候变化的黄河三角洲非主粮作物需水规律研究 [J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 795-804.
 - [9] 刘朋程, 郝洪波, 郭安强, 等. 河北省低平原旱作谷子产量影响因素及发展规模分析 [J]. 河北农业科学, 2022, 26(2): 9-15.
 - [10] 刘朋程, 王占彪, 郝洪波, 等. 近 59 年保定市谷子生育期需水变化特征和影响因素分析 [J]. 山西农业大学学报 (自然科学版), 2019, 39(4): 32-39.
 - [11] 王晓宇, 刁现民, 王节之, 等. 谷子 SSR 分子图谱构建及主要农艺性状 QTL 定位 [J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(5): 871-878.
 - [12] 赵美丞. 谷子半显性矮秆基因 *SiDw1* 的图位克隆及形成机制分析 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
 - [13] WANG J, WANG Z L, DU X F, et al. A high-density genetic map and QTL analysis of agronomic traits in foxtail millet [*Setaria italica* (L.) P. Beauv.] using RAD-seq [J]. PLoS One, 2017, 12(6): 1-15.
 - [14] ZHANG K, FAN G Y, ZHANG X X, et al. Identification of QTLs for 14 agronomically important traits in *Setaria italica* based on SNPs generated from high-throughput sequencing [J]. G3, 2017, 7(5): 1587-1594.
 - [15] 贾小平, 袁玺垒, 李剑峰, 等. 不同光温条件谷子资源主要农艺性状的综合评价 [J]. 中国农业科学, 2018, 51(13): 2429-2441.
 - [16] 贾小平, 张博, 全建章, 等. 不同光周期条件下谷子株高的全基因组关联分析 [J]. 华北农学报, 2019, 34(4): 16-23.
 - [17] 贾小平, 李剑峰, 赵渊, 等. 谷子抽穗期与农艺性状的相关与回归分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(3): 634-645.
 - [18] KURAPARTHY V, SOOD S, DHALIWAL H S, et al. Identification and mapping of a tiller inhibition gene (*tin3*) in wheat [J]. Theoretical and applied genetics, 2007, 114(2): 285-294.
 - [19] MAURO-HERRERA M, DOUST A N. Development and genetic control of plant architecture and biomass in the panicoid grass, *Setaria* [J]. PLoS One, 2016, 11(3): 1-27.
- (4): 46-52.
- [43] 周丽萍, 戚瑞生. 不合理施肥对土壤性质的影响及其防治措施探讨 [J]. 甘肃农业科技, 2017(1): 74-78.
 - [44] 左海军, 张奇, 徐力刚. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究 [J]. 环境污染与防治, 2008, 30(12): 83-89.
 - [45] 马心灵, 朱启林, 赵胜利, 等. 不同种植模式粮田土壤氮素淋失的研究进展 [J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1529-1536.
 - [46] 李宗新, 董树亭, 王空军, 等. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 65-70.
 - [47] 任丽萍, 宋玉芳, 许华夏, 等. 旱田养分淋溶规律及对地下水影响的研究 [J]. 农业环境保护, 2001, 20(3): 133-136.
 - [48] 王少平, 高效江, 胡雪峰, 等. 上海西郊麦期氮素淋溶定位研究 [J]. 环境污染与防治, 2002, 24(2): 68-70.
 - [49] ZHANG W L, TIAN Z X, ZHANG N, et al. Nitrate pollution of groundwater in Northern China [J]. Agriculture, ecosystems & environment, 1996, 59(3): 223-231.
 - [50] LABORDE D, MAMUN A, MARTIN W, et al. Agricultural subsidies and global greenhouse gas emissions [J]. Nat Commun, 2021, 12(1): 1-9.
 - [51] MAGRINI M B, ANTON M, CHOLEZ C, et al. Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits? Analyzing lock-in in the French agrifood system [J]. Ecological economics, 2016, 126: 152-162.
 - [52] IPCC. Special report on emissions scenarios, working group III, intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
 - [53] HANSEN J E, LACIS A A. Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change [J]. Nature, 1990, 346(6286): 713-719.
 - [54] IPCC. Climate change: The physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
 - [55] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 (CO_2 、 CH_4 、 N_2O) 的源/汇强度及其温室效应研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.