中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

黑土区农田氮磷淋溶消减措施

张伟，王睿，李思琪，鲁彩艳，解宏图，隋跃宇，张秀芝

引用本文:
张伟, 王睿, 李思琪, 等. 黑土区农田氮磷淋溶消减措施[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 113–118.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200496

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国北方农田氮磷淋溶损失污染与防控机制

Mitigation of nitrogen and phosphorus leaching from cropland in northern China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 1–10 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200910

中国北方主要农区农田氮磷淋溶特征与时空规律

Nitrogen and phosphorus leaching characteristics and temporal and spatial distribution patterns in northern China farmlands

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 11–18 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200572

降雨对吉林省黑土区雨养春玉米农田氮磷淋溶的影响

Effects of rainfall on nitrogen and phosphorus leaching in rainfed spring maize black soil farmland in Jilin Province, China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 19–28 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200571

褐土区农田土壤氮磷淋溶特征及其管理措施

Effects of field management practices on nitrogen and phosphate leaching in the cinnamon soil area of China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 163–175 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200576

冻融交替对农田氮磷淋溶影响的研究进展

A review of the freeze–thaw cycling effect on arable soil nitrogen and phosphorus leaching

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 128–140 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200494

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 1 月 第 29 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2021, 29(1): 113−118

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200496

张伟, 王睿, 李思琪, 鲁彩艳, 解宏图, 隋跃宇, 张秀芝. 黑土区农田氮磷淋溶消减措施[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 113−118
ZHANG W, WANG R, LI S Q, LU C Y, XIE H T, SUI Y Y, ZHANG X Z. Mitigation of nitrogen and phosphorus leaching from black soil croplands in Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(1): 113−118

黑土区农田氮磷淋溶消减措施*

张 伟[1], 王 睿[1**], 李思琪[1], 鲁彩艳[2], 解宏图[2], 隋跃宇[3], 张秀芝[4]

(1. 大气边界层物理与大气化学国家重点实验室/中国科学院大气物理研究所 北京 100029; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所 沈阳 110016; 3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所 哈尔滨 150081; 4. 吉林省农业科学院 长春 130033)

摘 要: 黑土是我国重要的土壤资源, 承载了全国 50%以上的玉米产量。但过量的化肥施入和不合理的农业管理造成黑土土壤氮磷大量残留, 氮磷淋溶风险增强。相关研究表明, 尽管黑土区旱地农田氮磷淋溶损失相对较低, 肥料残留效应仍致使其潜在淋溶风险增强。因此, 本研究综合分析了环境因子和农业管理措施对黑土区农田氮磷淋溶特征的影响规律, 明确了黑土氮磷淋溶消减措施, 并针对玉米农田和蔬菜地提出消减策略。具体结果如下: 施肥和降水是影响黑土农田氮磷淋溶的重要因素, 灌溉是影响蔬菜地氮磷淋溶的关键农田管理措施; 按需施肥、有机无机配施、避免雨热同期追肥、节水灌溉、免耕秸秆覆盖、不同作物轮作和添加生物炭等均是适合于当地气候和土壤条件的氮磷淋溶阻控措施。建议玉米农田采用一次性基肥施入, 有机肥占比 50%~70%, 采用免耕秸秆覆盖技术; 蔬菜地在常规施肥和灌溉频次下分别降低 20%的施肥量和灌溉量, 推荐蔬菜秋季收获后秸秆粉碎深埋等管理措施。本研究明确了黑土区农田氮磷淋溶消减策略, 有助于实现黑土区农业绿色可持续发展和绿色生态环境的构建。

关键词: 氮磷淋溶; 黑土; 阻控措施; 玉米农田; 蔬菜地

中图分类号: X592 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Mitigation of nitrogen and phosphorus leaching from black soil croplands in Northeast China*

ZHANG Wei[1], WANG Rui[1**], LI Siqi[1], LU Caiyan[2], XIE Hongtu[2], SUI Yueyu[3], ZHANG Xiuzhi[4]

(1. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry / Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 4. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Black soil (Mollisol) is a fertile and productive soil type found in Northeast China and is important for China's maize production. Large amounts of synthetic fertilizers are applied to meet the increasing cereal production demands but have low efficiency, leaving excessive nitrogen and phosphorus in the soil. This excess increases the risk of agricultural nonpoint pollution, black soil degradation, and surface/underground water pollution, threatening drinking water security. Studies conducted in the black soil region indicate that nitrogen and phosphorus leaching intensities are lower in the cereal croplands than in the other regions, especially those in the North China Plain. However, residual nitrogen and phosphorus remaining in soils

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0800103)和国家自然科学基金青年项目(41603075)资助
** 通信作者: 王睿, 主要从事土壤氮循环研究。E-mail: wangrui@mail.iap.ac.cn
张伟, 主要从事土壤生物地球化学循环模拟研究。E-mail: zhangwei87@mail.iap.ac.cn
收稿日期: 2020-06-24 接受日期: 2020-08-20

* This study was supported by the National Key R&D Program of China (2016YFD0800103), and the National Natural Science Foundation of China (41603075).
** Corresponding author, E-mail: wangrui@mail.iap.ac.cn
Received Jun. 24, 2020; accepted Aug. 20, 2020

owing to high fertilizer application levels increase the leaching potential, especially with intense precipitation. Environmental factors and field management practices were analyzed to identify effective control measures for nitrogen and phosphorus leaching and propose leaching reduction strategies for rain-fed maize and vegetation fields in the black soil region. Fertilization and precipitation are the primary drivers of nitrogen and phosphorus leaching in cultivated black soils, and irrigation is correlated to leaching intensity in vegetation fields. New strategies should be adopted to mitigate leaching, such as setting maximum fertilizer thresholds based on crop demands, adjusting fertilization timing to avoid high precipitation seasons, and using water-saving irrigation. Replacing synthetic fertilizer with manure, combining inorganic and organic fertilizers, and using no-tillage with maize stover mulching, crop rotations, and biochar are other field management practices to reduce the nitrogen and phosphorus pollution risk. In the maize croplands, only basal fertilizer should be applied during the growing season, an organic and synthetic fertilizer combination (50%−70% organic) should be used, and no-tillage with maize stover mulching should be considered to control the nitrogen and phosphorus leaching intensities. Reducing fertilizer amounts and irrigation water use by 20% and deeply burying the crushed straw after the autumn harvest are also recommended for vegetation fields. Practical strategies for nitrogen and phosphorus pollution prevention are important for sustainable agricultural development and maintenance in the black soil region.

Keywords: Leaching of nitrogen and phosphorus; Black soil; Mitigation measures; Maize cropland; Vegetable field

黑土是最肥沃的土壤。我国的黑土区位于东北松辽流域，主要分布在黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古4省(区)[1-2]，是我国第二大粮食作物——玉米(*Zea mays*)的重要生产基地[3-4]。20 世纪 80 年代以来，为了保障粮食安全和提高作物单产，过量化肥投入的现象十分普遍，远超世界先进国家的肥料投入水平，但其利用率却很低[5-6]。尽管黑土区较高的土壤肥力使得东北春玉米氮肥利用效率达到 32%，明显高于我国其他地区，但仅为发达国家氮肥利用效率的一半[6-7]。因此，大量的化肥施入和不合理的农业管理措施共同导致氮磷残留在土壤，或进入大气和水体，造成黑土退化，肥力降低，并引起一系列的大气和水体污染等问题。氮磷从土体中淋失是氮磷损失的主要途径，农田生态系统氮磷的迁移转化是造成农业面源污染的重要根源[6]。目前农田氮磷淋溶损失造成的地下水污染问题在农区日益严重，我国 80%以上的水井监测点地下水“三氮”(氨氮、亚硝态氮和硝态氮)超标，为Ⅳ和Ⅴ类，严重威胁饮水安全和人体健康[5,8]。研究显示，1990—2012 年，粮食生产造成我国氮磷损失热点面积分别扩大 3 倍和 24 倍[9]。因此，针对我国不同农业生产区域的气候、土壤和种植特点，建立相应的氮磷淋溶消减草案，对于控制农业面源污染具有重要意义。所以，本研究通过明确黑土区农田氮磷淋溶现状及影响因素，进而探讨氮磷淋溶的消减策略并形成草案，最终为黑土区精准实施氮磷淋溶阻控措施，有效控制氮磷淋溶潜在风险提供科学参考。

1 黑土区农田氮磷淋溶现状

黑土区是典型的雨养农业区，地势平坦，地下水埋深 5~20 m。年平均气温和降水分别为 0.5~6.0 ℃和 500~600 mm，雨热同期，80%的降水集中在 4—9 月的作物生长季，属于温带大陆性季风气候[2]。土壤成土母质以第四纪黄土状沉积物为主。春玉米连作是黑土区典型的种植模式之一。公主岭站点的春玉米农田观测研究表明，黑土区的氮素淋溶以硝态氮为主，铵态氮的淋失是一个缓慢的过程，且存在一个导致铵态氮淋失的氮肥施用临界阈值[6]。黑土区不同旱地农田观测站点的硝酸盐淋失主要发生在雨季，1.2 m 土体的硝酸盐淋失强度为 4.5~7.2 $kg(N)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$，约占施氮量的 1%~12%[6,10-13]。随着玉米种植年限的增加，黑土区春玉米种植区土壤全磷和有效磷(Olsen-P)含量不断增加，当 Olsen-P 含量大于磷素淋失临界值(79 $mg\cdot kg^{-1}$)时，41%的黑土存在磷素淋失风险[14]。基于不同方法对全国县级尺度氮淋溶强度的模拟结果表明，无论是质量平衡模型、经验模型还是生物地球化学过程模型，黑土区旱地农田氮淋溶强度为 0~5 $kg(N)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$，只有少数排放热点大于 10 $kg(N)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$[6,13,15-16](图 1)。质量平衡模型 NUFER 的模拟结果表明，磷淋溶强度的特征与氮淋溶一致；与 1990 年相比，2012 年黑土区磷淋溶热点面积显著增加，且大部分位于吉林省南部[9]。尽管黑土区旱地农田氮磷淋溶损失相对较低，但当遇到强降水时，肥料的残留效应仍会导致较大的潜在淋溶风险[6,10]。

土壤氮磷淋溶的发生主要取决于土壤中的氮磷含量和土壤水分的运动情况[10](图 1)。为了追求高产，过量的氮磷肥料施入土壤，但氮肥的利用效率仅为 30%左右；磷肥因为易被土壤固定，当季利用率一般仅为 10%~25%[7,17]，导致土壤中残留大量的氮磷。研究表明，土壤中氮磷的残留量与氮磷淋溶强度存

在显著正相关关系，进而造成潜在的淋失风险[18]。而且，长期施肥导致黑土农田土壤氮素大量残留，农田本底氮淋失占总淋失量的 70%[10]。所以，过量的化肥施用是黑土农田氮磷淋溶发生的驱动力。此外，土体内水分的垂直迁移是氮磷淋溶发生的重要条件。黑土区农田以雨养农业为主，因此降水是土壤水分运动的主要贡献者，所以旱地农田的氮磷淋溶主要集中在 6—8 月，占全年淋溶频次的 2/3[6,10-11]。对于以高水高肥为管理特点的蔬菜地而言，土壤氮磷淋溶同时还与灌溉事件密切相关[19]。再者，黑土主要分布在我国中高纬度地区，秋冬季节和初春存在明显的冻融交替过程。研究表明，冻融交替次数是导致土壤氮磷浓度变化的主要原因，频繁的冻融交替破坏土壤团聚体，增强土壤释水性和水分渗透性，同时促进微生物细胞溶解释放养分元素，再者融化阶段氮素的矿化和硝化使得溶解性有机氮向硝态氮转化，造成土壤中氮磷养分浓度增加，进而影响黑土农田的氮磷淋溶过程[20-21]。因此，冻融交替是黑土区特有且对氮磷淋溶产生重要影响的物理过程。

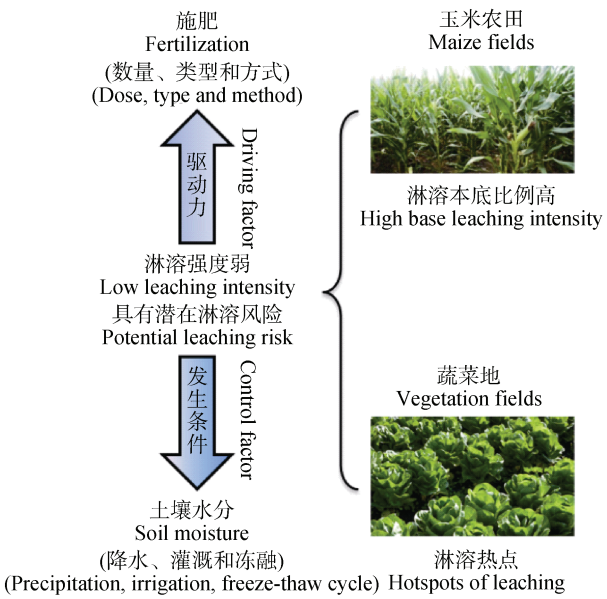

图 1　黑土区氮磷淋溶特征和影响因素示意图

Fig. 1　Characteristics of nitrogen and phosphorus leaching in the black soil region and related regulating factors

2　黑土区农田氮磷淋溶消减阻控措施

2.1　施肥量和施肥时间

过量施肥和较低的肥料利用效率共同导致土壤中氮磷元素的累积，是土壤氮磷淋溶的根本驱动。研究表明，黑土玉米农田氮淋溶强度随施肥量的增加表现出“平台加线性”的相关关系。当施肥量小于 180 kg(N)·hm^{-2}·a^{-1}，氮淋溶强度变化不显著，但当施肥量高于 180 kg(N)·hm^{-2}·a^{-1}，氮淋溶强度与施肥量呈显著正相关关系，即施肥量每增加 100 kg(N)·hm^{-2}，氮淋失强度增加 2.4 kg(N)·hm^{-2}[10]。蔬菜生长周期短，养分需求大，为保证产量，施入大量化肥。田雨等[19]在黑土区露天菜地的研究结果表明，减肥 20%没有显著降低蔬菜产量和硝酸盐淋溶，说明黑土露天菜地仍有一定的减肥空间。龚蓉[22]对玉米-小白菜(*Brassica rapa*)轮作农田的研究发现，磷肥减施 10%~30%可以分别减少 18%~32%和 33%~47%总磷和可溶性磷的淋失量。此外，施肥方式和施肥时间也会影响土壤氮磷的动态变化特征。孙宏德等[11]在黑土区旱地玉米农田的研究发现，尽管一次性基肥施入和基肥追肥配施的不同施肥方式会造成硝态氮动态移动特征不同，但硝态氮移动总量并没有显著性差异。降水引起的土壤水分运移是雨养农田氮磷淋溶的重要条件，所以在雨热同季时期应严格控制肥料施用且避免雨前施肥[10]。因此，根据作物的养分需求科学施肥，设定作物最大施肥限量，实行测土配方施肥，有效利用土壤耕层残留氮磷养分，同时合理安排施肥时间，有效规避连续或较强降雨，是降低农田土壤氮磷淋溶风险的有效措施。

2.2　肥料种类

无机肥养分含量高，释放快，是保证产量的关键因子，但养分易随淋溶进入地下水，特别是在连续降雨或雨量较大时期[6,23]。与无机肥相比，有机肥易被微生物利用，更多的氮磷被固定在微生物体内，增强土壤肥力，宜作基肥，具有缓释性，从而避免前期土壤无机氮磷过剩而流失[17,24]。此外，有机肥孔隙小，有利于土壤保墒，不易形成优先流，因此氮磷垂直迁移量呈减少趋势[12]。再者，有机肥矿化分解过程中微生物消耗了土壤部分氮素，使得矿质氮被固持，土壤中硝态氮累积降低[23,25]。如果有机肥完全替代无机肥，由于有机肥的长效性，当季利用率较低，不能充分满足作物前期正常生长的需要，因此有机无机配施更有利于作物生长[6,23]。高洪军等[4]在公主岭玉米农田的研究结果表明，在适宜用氮量下，粪肥替代 70%或秸秆替代 30%化肥氮素，既减少化肥氮投入，又增加土壤供氮能力，降低淋失风险。此外，同位素研究表明，高碳氮比的玉米秸秆可以加快肥料氮向土壤有机氮和黏土矿物固定态铵的转化，减少土壤氮残留，提高肥料利用效率，降低肥料氮从作物根层淋失的风险[26]。习斌等[23]在华北地区玉米季的研究结果表明，有机肥替代 50%的

化肥用量，可以增产 10%，降低氮淋溶，但因有机肥带入大量磷素，导致土壤中磷的大量累积，引起磷淋溶的环境风险。因此，为了实现同时保证作物产量和减少土壤氮磷残留及淋溶风险，应调整化肥施用结构，有机肥替代化肥，采用有机无机合理搭配的方式，充分发挥其供肥和改土的双重效应[5-6,11-12,24]。

缓释肥和控释肥是从肥料学的角度调节肥料施入土壤后的释放速率，使得养分供应规律与作物的生长需求一致，满足作物不同生长阶段对养分的需求。焉莉等[3]在黑土玉米农田的研究结果表明，控释肥可以在保证作物产量的前提下显著降低氮损失，但在降水量低的条件下残留较高，应适当降低施肥量。王曰鑫等[27]研究发现，缓释磷肥的释放规律与作物生长需求一致，既不烧苗，还能满足作物需求，保证稳产和高产，降低土壤磷残留。然而，由于生产成本较高，包膜材料的环保性等因素，缓控肥还未得到大范围的普及[24]。

2.3 灌溉

在黑土区，与广泛分布的雨养春玉米不同，蔬菜除了养分需求大，还耐旱性弱，需要充足的土壤水分，所以灌溉是蔬菜地常规的管理措施。当大量的水肥施入土壤却不能被蔬菜完全吸收，不仅造成水肥资源浪费，还显著降低水肥增产效果[28]。田雨等[19]在黑土区露天菜地的研究结果表明，减水 20%灌溉既减少了土壤铵态氮和硝态氮的淋溶，又未影响白菜的产量，是经济收益最大和环境影响风险最小的可行水分管理措施。此外，相对于大水漫灌，采用节水灌溉技术也可以有效控制氮磷随水分的淋失。骆晓声等[29]研究发现，适当减量施肥配合畦灌可显著降低硝态氮和总磷的淋溶。因此，通过采用节水灌溉技术，有效提高水分利用效率是控制蔬菜地氮磷淋溶的重要阻控措施。

2.4 耕作制度和种植方式

耕作对于土壤的扰动会改变土壤的结构和通气性以及养分状况，进而影响氮磷的累积特征和淋溶过程。国际上广泛推广和应用的免耕技术，对于保障粮食安全和维护农业生态系统的可持续性具有重要意义。滕珍珍等[30]研究结果表明，与常规垄作相比，免耕秸秆覆盖促进耕作层的肥料氮转化为有机氮和黏土矿物固定态铵，增强耕层土壤的供氮能力，提高土壤肥力，减少硝态氮在深层土壤剖面的残留，进而降低肥料氮的淋溶损失风险。此外，秸秆作为有机肥还田，其还田方式也会影响淋溶过程。黑土区露天菜地的研究发现，与常规处理相比，减水减肥配施秸秆深埋显著降低淋溶液中硝态氮和铵态氮的含量，但会造成蔬菜产量的降低[18]。连作农田系统不仅不利于土壤肥力的保持，还会影响养分的淋失。赵伟等[12]在黑土旱地农田的研究发现，玉米与大豆轮作可以明显降低玉米连作的土壤氮素淋溶。此外，间作和套种也可以降低氮淋溶。因此，合理的农田耕作和秸秆处理方式以及种植模式均有利于阻控黑土区农田的氮磷淋溶。

2.5 生物炭

生物炭是生物质原料在无氧或低氧条件下，经高温裂解形成的炭[31]。生物炭呈多孔结构，阳离子交换量高，吸水性和吸附能力强，施入土壤后可以改变土壤孔隙的大小分配，增强土壤的氮磷固定能力[32]。研究表明，生物炭的吸水性和保水性可以有效阻控硝酸盐随水分的垂直迁移，同时对硝酸盐和有效磷具有吸附保蓄作用，增强土壤提供氮磷养分的能力，进而降低硝态氮和有效磷的淋失风险[21,31-33]。因此，通过添加生物炭改善土壤理化性质，提高土壤养分固持能力，已经成为目前极具潜力的黑土区农田氮磷消减阻控措施。

3 黑土区农田氮磷淋溶消减草案

3.1 玉米农田

根据公主岭和梨树试验站的长期研究结果[4,10,23,30]，建议黑土区雨养玉米农田采用一次性基肥施入，避免在雨热同期追肥，施肥量控制在 180~240 $kg(N)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$；有机无机配施，有机肥占比 50%~70%；采用免耕秸秆覆盖技术，玉米秋季收获后留茬 30 cm，其他整株秸秆沿与垄垂直方向均匀覆盖地表，覆盖量为 5000~7500 $kg\cdot hm^{-2}$，春季不整地直接播种，免耕播种机将整株秸秆切断，播种深度 7~10 cm，肥料条施，施肥深度为 15 cm。

3.2 蔬菜地

根据黑龙江五常市典型蔬菜地研究结果[18,28]，建议黑土区露天蔬菜地在常规施肥频次下降低施肥量 20%；常规灌溉频次下降低灌溉量 20%；推荐蔬菜秋季收获后秸秆粉碎深埋，秸秆用量 15 000 $kg\cdot hm^{-2}$ 左右。

4 结论和展望

近些年黑土区农田氮磷淋溶相关研究表明，黑土区旱地农田氮磷淋溶量相对较低，施肥和降水是影响淋溶的重要因素，灌溉是影响黑土区蔬菜地氮磷淋溶的关键农田管理措施。冻融交替作为黑土区

特有的物理过程，其对农田土壤氮磷淋溶的影响有待进一步深入研究。针对黑土区农田氮磷淋溶现状，根据作物的养分需求科学施肥，设定作物最大施肥限量，合理安排施肥时间，有效规避连续或较强降雨，对蔬菜地采用节水灌溉技术，提高水分利用效率，是从根源上降低黑土区农田土壤氮磷淋溶风险的有效措施。此外，调整化肥施用结构，有机肥替代化肥，有机无机配施，免耕秸秆覆盖，不同作物轮作和添加生物炭等管理措施均是黑土区农田多年来探索，并实施推广的适宜当地气候和土壤环境条件的氮磷淋溶消减措施。今后一方面要将行之有效的阻控措施进一步推广应用，另一方面需要进一步明确多种阻控措施的综合效应，进而完善本文基于黑土区典型玉米农田和蔬菜地研究结果而初步提出的黑土区农田氮磷淋溶消减草案。

参考文献 References

[1] 王宁娟. 不同开垦年限对农田黑土磷素形态及有效性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014: 1−2
WANG N J. Effect of different reclamation year on phosphorus characteristics and availability in black soil[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014: 1−2

[2] LIANG A Z, ZHANG X P, YANG X M, et al. Estimation of total erosion in cultivated black soils in northeast China from vertical profiles of soil organic carbon[J]. European Journal of Soil Science, 2009, 60(2): 223–229

[3] 焉莉, 王寅, 冯国忠, 等. 不同施肥管理对东北黑土区氮损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1816−1823
YAN L, WANG Y, FENG G Z, et al. Effect of different fertilization management on nitrogen loss in black soils in Northeast China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(9): 1816−1823

[4] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 长期秸秆还田对黑土碳氮及玉米产量变化的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(6): 105−107
GAO H J, PENG C, ZHANG X Z, et al. Effect of long-term straw returning field on the carbon and nitrogen in black soil and maize yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(6): 105−107

[5] 马林, 卢洁, 赵浩, 等. 中国硝酸盐脆弱区划分与面源污染阻控[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2387−2391
MA L, LU J, ZHAO H, et al. Nitrate vulnerable zones and strategies of non-point pollution mitigation in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(11): 2387−2391

[6] 王立春, 赵兰坡, 朱平, 等. 不同施肥方式对黑土春玉米田硝态氮和铵态氮的影响[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(12): 85−87
WANG L C, ZHAO L P, ZHU P, et al. Effects of different fertilizer application regimes on NO_3^--N and NH_4^+-N in black soil during spring maize growing season[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(12): 85−87

[7] 王桂良. 中国三大粮食作物农田活性氮损失与氮肥利用率的定量分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014: 80−88
WANG G L. Quantitative analysis of reactive nitrogen losses and nitrogen use efficiency of three major grain crops in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014: 80−88

[8] LU J, BAI Z H, CHADWICK D, et al. Mitigation options to reduce nitrogen losses to water from crop and livestock production in China[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2019, 40: 95–107

[9] WANG M R, MA L, STROKAL M, et al. Hotspots for nitrogen and phosphorus losses from food production in China: A county-scale analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(10): 5782–5791

[10] 彭畅, 朱平, 张秀芝, 等. 基于渗漏池法研究施肥对东北中部雨养区玉米氮素地下淋溶的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(6): 125−130
PENG C, ZHU P, ZHANG X Z, et al. Study of the influence of fertilization on nitrogen leaching underground in northeast central raining area by percolating pools[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(6): 125−130

[11] 孙宏德, 李军, 尚惠贤, 等. 黑土硝态氮移动规律及提高氮肥利用率的研究[J]. 吉林农业科学, 1995, (4): 61−66
SUN H D, LI J, SHANG H X, et al. The research of moving regularity on NO_3-N of black soil and increasing utilization ratio of nitrogen fertilizer[J]. Jilin Agricultural Sciences, 1995, (4): 61−66

[12] 赵伟, 王宏燕, 陈雅君, 等. 农肥和化肥对黑土氮素淋溶的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(11): 47−52
ZHAO W, WANG H Y, CHEN Y J, et al. Effects of manure and chemical fertilizers application on nitrogen leaching in black soil[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(11): 47−52

[13] GAO S S, XU P, ZHOU F, et al. Quantifying nitrogen leaching response to fertilizer additions in China's cropland[J]. Environmental Pollution, 2016, 211: 241−251

[14] 别婧雅, 杜伟, 孙本华, 等. 吉林省春玉米种植区土壤磷库特征及磷素淋失风险评价[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2020, 48(7): 123−130
BIE J Y, DU W, SUN B H, et al. Characteristics of soil phosphorus pool and risk assessment of phosphorus leaching in spring maize planting area of Jilin[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2020, 48(7): 123−130

[15] GU B J, GE Y, CHANG S X, et al. Nitrate in groundwater of China: Sources and driving forces[J]. Global Environmental Change, 2013, 23(5): 1112–1121

[16] QIU J J, LI H, WANG L G, et al. GIS-model based estimation of nitrogen leaching from croplands of China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 90(2): 243–252

[17] 邹慧芳, 李丽君, 刘平, 等. 土壤磷素淋溶研究进展[J]. 山西农业科学, 2018, 46(10): 1747−1750
ZOU H F, LI L J, LIU P, et al. Research advances on soil phosphorus leaching[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(10): 1747−1750

[18] LU J, BAI Z H, VELTHOF G L, et al. Accumulation and leaching of nitrate in soils in wheat-maize production in China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 407–415

[19] 田雨, 李振宇, 徐欣, 等. 减水减肥对露天菜田黑土氮淋溶特征的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(21): 50−55
TIAN Y, LI Z Y, XU X, et al. The effects of reducing irrigation and chemical fertilizers on nitrogen leaching in open-air black soil vegetable field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(21): 50−55

[20] 胡钰, 香宝, 刘玉萍, 等. 交替冻融对东北地区典型土壤氮磷浓度的影响[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(4): 333−338
HU Y, XIANG B, LIU Y P, et al. Freeze-thaw cycle effects on nitrogen and phosphorus content in typical soils of Northeast China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2012, 2(4): 333−338

[21] 封保根, 李美璇, 李悦铭, 等. 冻融作用对含有黑炭土壤中硝态氮淋失的影响[J]. 林产工业, 2017, 44(8): 34−38
FENG B G, LI M X, LI Y M, et al. Effect of freezing and thawing on the nitrate nitrogen leaching of soil contained black carbon[J]. China Forest Products Industry, 2017, 44(8): 34−38

[22] 龚蓉. 磷肥减量施用对玉米和小白菜生长、养分吸收利用及养分淋失的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015: 23−24
GONG R. Effects of phosphorus reduction on corn and cabbage growth, nutrition uptake, utilization and nutrition leaching in the embankment upland[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015: 23−24

[23] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 326−335
XI B, ZHAI L M, LIU S, et al. Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 326−335

[24] 高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 318−325
GAO H J, ZHU P, PENG C, et al. Effects of partially replacement of inorganic N with organic materials on nitrogen efficiency of spring maize and soil inorganic nitrogen content under the same N input[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 318−325

[25] 孟繁华. 长期有机无机配施黑土氮素转化特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014: 28−29
MENG F H. Nitrogen transformation characteristics of black soil under long-term organic & inorganic fertilizer application[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014: 28−29

[26] LU C Y, WANG H Y, CHEN H H, et al. Effects of N fertilization and maize straw on the transformation and fate of labeled $(^{15}NH_4)_2SO_4$ among three continuous crop cultivations[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208: 275–283

[27] 王曰鑫, 程刚. 腐植酸缓释磷肥的试验研究[J]. 腐植酸, 2006, (2): 33−38
WANG Y X, CHENG G. Study on slow-released phosphate fertilizer containing humic acid[J]. Humic Acid, 2006, (2): 33−38

[28] 张锦源, 徐欣, 陈一民, 等. 减水和减施化肥对设施黑土菜田茄子产量及水分利用率的影响[J]. 土壤与作物, 2018, 7(4): 374−379
ZHANG J Y, XU X, CHEN Y M, et al. Effects of reducing irrigation and chemical fertilizers on eggplant yield and water utilization efficiency in a facility vegetable field in black soil region[J]. Soils and Crops, 2018, 7(4): 374−379

[29] 骆晓声, 李艳芬, 寇长林, 等. 减量施肥对河南省典型设施菜田硝态氮和总磷淋溶量的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(11): 61−65
LUO X S, LI Y F, KOU C L, et al. Effects of reducing fertilizer application on leaching of nitrate nitrogen and total phosphorus in typical greenhouse field of Henan Province[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2018, 47(11): 61−65

[30] 滕珍珍, 袁磊, 王鸿雁, 等. 免耕秸秆覆盖条件下尿素来源铵态氮和硝态氮的累积与垂直运移过程[J]. 土壤通报, 2018, 49(4): 919−928
TENG Z Z, YUAN L, WANG H Y, et al. Vertical migration characteristics of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen derived from urea nitrogen affected by corn Stover mulching quantity in no-tillage system[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(4): 919−928

[31] 李际会, 吕国华, 白文波, 等. 改性生物炭的吸附作用及其对土壤硝态氮和有效磷淋失的影响[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 220−225
LI J H, LYU G H, BAI W B, et al. Effect of modified biochar on soil nitrate nitrogen and available phosphorus leaching[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(2): 220−225

[32] 张千丰, 元野, 刘居东, 等. 室内模拟: 生物炭对白浆土和黑土中氮素淋溶的影响[J]. 土壤与作物, 2013, 2(2): 88−96
ZHANG Q F, YUAN Y, LIU J D, et al. Effects of a biochar on nitrogen leaching in an albic soil and black soil — a simulating lab experiment[J]. Soil and Crop, 2013, 2(2): 88−96

[33] 宋彬, 孙茹茹, 梁宏旭, 等. 添加木质素和生物炭对土壤氮、磷养分及水分损失的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 227−232
SONG B, SUN R R, LIANG H X, et al. Effects of lignin and biochar addition on soil nitrogen and phosphorus nutrients and water loss[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 227−232