

外源氮输入对湿地碳汇功能的影响效应

朱圆黎¹,肖国良^{1,2,3*}

(1. 盐城师范学院城市与规划学院,江苏 盐城 224007; 2. 江苏省盐土生物资源研究重点实验室,江苏 盐城 224007;
3. 江苏省海岸带资源环境演变与智能调控重点实验室,江苏 盐城 224007)

摘要:湿地生态系统在全球碳循环中发挥着至关重要的作用,其对外源氮输入响应及碳汇功能变化是当前研究的热点。尽管外源氮输入对湿地生态系统的影响已有研究,但侧重于特定条件下的案例分析,缺乏对整体效应的全面评估。该文系统分析了外源氮输入途径、形态、沉降量及其对湿地土壤、植物和水体等关键生态要素的作用,深入探讨了外源氮输入与湿地碳汇功能之间的相互作用。外源氮输入通过改变土壤理化特性、调节植物生长和水体生物化学过程,进而影响湿地碳氮循环和温室气体排放。氮素形态和沉降量是影响湿地碳汇功能的关键因素,不同氮形态和沉降量通过改变植物生长和土壤生物化学过程,影响湿地的碳储存和释放。适量的氮沉降可增强土壤碳循环,而过量氮沉降则可能导致土壤酸化和养分流失,降低土壤碳库稳定性。该研究为湿地生态系统碳循环的持续稳定发展提供了科学依据,对于制定合理的氮管理策略具有重要意义。

关键词:湿地生态系统;外源氮输入;氮沉降;碳汇功能;碳循环

中图分类号:F062.2;Q948;X142;X171;X37 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2024.06.007

Effects of exogenous nitrogen input on wetland carbon sequestration function

Zhu Yuanli¹, Xiao Guoliang^{1,2,3*}

(1. School of City and Regional Planning, Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, China;
2. Jiangsu Key Laboratory for Bioresources of Saline Soils, Yancheng 224007, China; 3. Jiangsu Provincial Key Laboratory for Resources Environment Evolution and Intelligent Regulation of Coastal Zone, Yancheng 224007, China)

Abstract: Wetland ecosystems play a crucial role in the global carbon cycle, and their response to external nitrogen input and changes in carbon sequestration function are currently hot research topics. Although studies have explored the impact of exogenous nitrogen input on wetland ecosystems, they focus on the cases under specific conditions and lack a comprehensive assessment of the overall effects. This study systematically analyzed the pathways, forms, and deposition of exogenous nitrogen input, as well as its effects on key ecological elements such as wetland soil, plants, and water bodies. It delved into the interaction between exogenous nitrogen input and wetland carbon sequestration function. Exogenous nitrogen input affects wetland carbon and nitrogen cycling and greenhouse gas emissions by altering soil physicochemical properties, regulating plant growth, and water biochemical processes. Nitrogen forms and deposition are key factors affecting wetland carbon sequestration function. Different nitrogen forms and deposition affect wetland carbon storage and release by altering plant growth and soil biochemical processes. Moderate nitrogen deposition can enhance soil carbon cycling while excessive nitrogen deposition may lead to soil acidification and nutrient loss, reducing soil carbon pool stability. This study provides a scientific basis for the sustainable and stable development of carbon cycling in wetland ecosystems, which is of great significance for formulating reasonable nitrogen management strategies.

收稿日期:2024-08-04;修回日期:2024-08-25

基金项目:江苏高校哲学社会科学一般项目“碳中和目标下海岸带围垦湿地碳汇效应及减排增汇策略研究”(2024SJYB1484);江苏省盐土生物资源研究重点实验室开放课题“滩涂土壤微生物呼吸对模拟氮沉降的生态响应”(JKLBS2019007);盐城市重点研发计划(社会发展)项目“基于微生物调控的盐城滩涂湿地固碳增汇关键技术研究”(YCBE202242)

作者简介:朱圆黎(2000-),女,云南红河人,大学本科生。主要研究方向为地理科学。E-mail:13921062030@163.com

* **通信作者:**肖国良(1984-),男,山东临清人,博士,讲师。主要研究方向为全球变化与生态过程。E-mail:xiaogl@yctu.edu.cn

Key words: Wetland ecosystem; Exogenous nitrogen input; Nitrogen deposition; Carbon sequestration function; Carbon cycle

全球气候变化正以前所未有的速度影响着地球生态系统平衡^[1],这促使各国政府和国际组织将碳达峰与碳中和作为长期发展目标,并将这些目标纳入国家战略规划^[2]。在众多应对气候变化的策略中,生态系统扮演的碳汇角色尤为重要,特别是森林、草地、农业和湿地等形态的碳汇,因其在减少大气中温室气体浓度方面的潜力而受到重视^[3]。处于水域与陆地交界区域的湿地生态系统^[4],其特征表现为具备较缓慢的有机质分解速率和较高的生产水平^[5],在碳循环中发挥着关键作用,并在调节温室气体方面具有显著的碳汇功能^[6]。因此,深入研究湿地生态系统碳汇功能及其驱动因素,对于制定有效的生态保护策略及减缓气候变化具有深远意义。

人类活动,如农业扩张、城市化发展和工业排放,导致湿地生态系统面临外源氮输入的挑战。外源氮,包括氮肥使用、大气沉降和地表径流等来源,对湿地碳循环产生了深刻影响。外源氮输入已被证实对湿地植物生长有显著影响^[7],并可能引起植物群落形态结构的演变^[8]。此外,外源氮输入会导致湿地土壤中的有机碳分解速率加快,碳储存能力下降^[8-9],同时还会改变土壤微生物种群的物种和功能多样性,进而影响湿地的碳汇功能^[10]。陶宝先等^[11]研究发现,氮输入不仅可以提高植被固碳的潜势,还能促进深层土壤中有机碳的分解。外源氮输入对湿地生态系统的影响并非孤立存在,而是与环境因素如温度、水分和光照等存在交互作用^[12]。这些交互作用可能会进一步增强或减弱外源氮的作用效应,从而对湿地碳汇功能产生深远影响。为了全面理解湿地生态系统如何响应外源氮输入,需要进行系统性的研究和评估。虽然目前有关湿地系统对外源氮输入的研究已取得显著进展,但往往侧重于特定实验条件下的案例报道,而缺乏系统性评估,这就限制了人们对湿地碳汇如何响应外源氮的全面理解。本研究旨在结合近年来的相关研究成果,通过分析外源氮输入途径、形态和沉降量及其对湿地土壤、微生物、植物和水体等关键要素的影响,系统探讨外源氮输入与湿地碳汇功能之间的关系,以期深入理解湿地生态系统碳循环的持续稳定发展提供科学依据。

1 湿地碳循环与碳汇功能

湿地碳循环涉及碳素在湿地生态系统中的固定、分解、沉积和转化等环节^[13],其核心是植物通过光合作用吸收大气 CO₂,凋落物经过腐殖化和泥炭化形成土壤有机质,最终经过微生物分解作用生成 CO₂,部分有机质在厌氧环境下转化为 CH₄,再释放到大气中^[14]。湿地生态系统主要依赖于植被光合作用进行碳吸收^[15]。不同类型湿地由于植物种类、密度和生长速率的差异,其光合效率和碳输入量存在差异^[12]。此外,湿地还通过河流、降水等途径接收并溶解有机碳和溶解无机碳,相比之下,沼泽湿地和人工湿地则更依赖于内部生物过程和土壤中有机物的分解^[16]。就碳输出而言,湿地生态系统有机碳通过生物残骸和植物根系分泌物的形式返还至土壤中^[17]。淹水区湿地通过潮汐、径流和渗漏等自然过程,将溶解有机碳和颗粒有机碳输送到其他生态系统^[18]。同时,土壤微生物通过碳分解、CH₄代谢、硝化—反硝化等生物化学过程进一步促进湿地碳循环^[19]。

根据《湿地公约》的规定,我国对湿地进行了分类,将其划分为沼泽湿地、湖泊湿地、河流湿地、滨海湿地和人工湿地 5 大类^[20]。这些湿地因其显著的碳吸收与固定能力,对维持全球碳平衡至关重要^[21]。尽管全球湿地面积占比仅有 5%—8%^[22],但其碳储存量占陆地总碳库的 12%—24%^[23]。湿地碳储存主要包括植被储存和土壤储存 2 部分^[24]。在植被储存方面,植物在生长过程中积累有机碳,并通过死亡或凋落将部分碳转移至湿地土壤碳库^[25]。就土壤储存而言,湿地土壤中碳素主要来源可归结为植物凋落物、根系分泌物以及有机物的微生物分解^[26]。此外,泥炭湿地具有深厚的泥炭层,除了植物通过生物量积累将碳储存在体内,表层土壤还通过吸附和固定作用将碳储存在土壤中。泥炭层由于其独特的环境条件,导致有机物分解速率缓慢,能够长期储存大量的有机碳,成为泥炭湿地碳储存的主要形式^[27]。沼泽湿地在植物遗骸长期分解不完全的情况下也会形成泥炭地,使得泥炭成为沼泽湿地储碳的重要形式^[28]。

2 外源氮输入的途径

2.1 大气氮沉降

氮素以 NH_x 和 NO_x 的形式从大气中沉降到陆地和水体的过程被称为氮沉降^[29]。这一过程根据沉降的物理状态可分为大气干沉降和湿沉降两大类。干沉降的发生主要依赖于颗粒物的沉积作用,而湿沉降则涉及降水过程,涵盖雨、雪、雾等形式,将氮素输送到地表^[30]。在氮沉降中,硝态氮和铵态氮是2种最主要的化学形态,其中铵态氮在沉降通量中占比超过60%^[31]。近几十年来,随着工业化进程中化石燃料的大量燃烧、农业领域化肥的广泛使用以及畜牧业的快速发展,人类活动导致的含氮化合物排放量急剧上升,增加并拓宽了大气氮沉降的速率和范围^[32],进而对湿地生态系统结构和功能产生深刻影响,包括改变植物群落组成、影响土壤碳汇能力以及调节温室气体排放等^[23]。

2.2 其他途径

湿地生态系统的外源氮输入途径不仅包括大气氮沉降,还涵盖生物固氮、人为活动导致的外源氮输入以及地表径流。生物固氮,即微生物在固氮酶的催化下将大气氮转化为氨的过程^[33],进一步可细分为自生固氮、共生固氮和联合固氮3种形式^[34]。这些过程使得湿地生态系统能够吸收并储存大量氮源,为其他植物提供必要的营养以支持其生长和代谢活动^[35]。随着农业活动的扩张,过度使用的农业化肥中的氮素在雨水冲刷和灌溉等过程易于流失,进而渗入湿地生态系统^[36]。工业生产和城市、农村生活污水排放中含有的大量氮素,若未经有效处理直接排放,也会成为湿地外源氮的重要来源,导致湿地氮负荷的显著增加^[11]。

3 外源氮输入对湿地碳循环的影响

3.1 湿地土壤对外源氮输入响应

外源氮输入会引起湿地土壤理化特性的改变,增加土壤中氮素的含量,继而对植物生长与微生物活动产生影响^[37]。有研究指出,外源氮输入对湿地土壤 CO_2 和 CH_4 排放具有显著的调节作用^[15]。具体而言,外源氮在低浓度时能够促进土壤呼吸作用,加速有机碳的分解;而在高浓度时可能抑制这一过程,降低土壤碳的有效性^[38]。且在高浓度氮输入的情况下,氮转化过程会产生酸性物质导致土壤酸化,抑制土壤 CO_2 排放,使其排放量趋于饱和^[8]。

土壤中 CH_4 的产生源自于有机物质在厌氧条件下的分解过程^[39]。葛瑞娟等^[40]通过研究指出,适量添加外源氮能够刺激土壤 CH_4 生成,外源氮输入对土壤有机碳矿化的影响较为复杂,可能会通过增强微生物活性来加速矿化,或通过改变微生物群落的结构和组成来影响矿化过程。湿地土壤中的微生物,主要能量供应源自可溶性有机碳,其通过分解和利用有机物质,驱动土壤中的生物化学过程^[41]。在湿地生态系统内,氮素作为一种关键性营养元素^[42],其含量直接影响土壤微生物的活性及相关酶的运作,进而调节土壤有机质的分解和积累进程^[43]。外源氮输入对土壤有机碳矿化作用的影响还与氧气条件有关,在氧气充足的环境下,外源氮添加能够加速土壤有机碳的分解过程;而在缺氧的条件下,外源氮的输入则会抑制土壤有机碳矿化,导致土壤有机质含量增加^[40]。

3.2 湿地植物对外源氮输入的响应

湿地土壤中的氮包括有机氮和无机氮2种形式,且以有机氮为主,无机氮含量较低^[44]。由于无机氮是植物生长的关键营养素,且湿地植物主要吸收无机氮^[45],因此植物生长受到氮可用性的限制,氮含量的变化会显著影响湿地植物的生长和生产力^[41]。在氮充足的环境中,湿地植物生物量增加,从而增强碳的固定能力^[11]。刘德燕等^[7]研究表明,外源氮输入的增加促进了小叶章草产量的增长,但其分蘖能力却随着氮输入量的增加先上升后下降,这意味着适量的外源氮输入对于湿地植物的生长与分蘖具有积极的影响。崔丽娟等^[46]研究发现,不同种类的湿地植物对土壤氮含量的响应各异,如黄花鸢尾和芦苇的生物量受土壤氮含量影响不明显,而杞柳和睡莲的生物量受土壤氮含量影响明显,且在氮含量达到饱和后,生物量随外源氮输入的增加而减少,这暗示了外源氮输入在超过植物吸收阈值后可能对湿地植物产生不利影响。外源氮输入改变了湿地植物的营养环境,对湿地植物系统产生影响,如改变植物的生长和物种的多样性,增加地上植被产量和地下根系生长发育^[47],有助于提升湿地生态系统总初级生产力和生物量等^[48]。研究发现,在氮限制条件下,外源氮输入能够通过增强植物光合作用,影响植物根系生长和土壤自养呼吸,从而影响植物固碳能力和土壤碳循环^[11]。根系呼吸是土壤碳循环的重要环节,对土壤微生物的活性和肥力产生深远影响,适量的外源氮输入可以促进植物

根系的发育,增加细根数量和生物量,并提升根系的代谢能力,进而增强根系的自养呼吸,为土壤微生物提供能量,从而促进土壤中的碳循环^[27]。而当外源氮输入量超过植物可吸收的界限值后,可能会导致植物生长和生产力受到不利影响^[48],植物的固碳能力也将下降^[11]。

3.3 湿地水体对外源氮输入响应

水文情势与生物多样性构成了湿地的生态水文特征^[49]。外源氮通过径流、渗透等方式进入湿地水体,从而影响湿地生态系统的生产力、有机质的积累和物质循环^[50]。例如,当滨海湿地被潮水淹没时,呼吸作用产生的大部分 CO_2 溶解为溶解性无机碳,与植物光合作用产生或从植物生物量中浸出的溶解性有机碳同时进行横向输出,此时外源氮的添加能通过增强湿地系统的代谢来增加碳向相邻水体的横向输出^[51]。同时,湿地水体的厌氧环境为产甲烷菌等微生物提供了生长条件,从而增加 CH_4 的排放量。宋长春等^[52]还发现,在相同的水分条件下,适量的外源氮输入能够显著提高 CH_4 的排放通量。氮素是藻类生长的重要限制因子之一^[53]。适量的外源氮输入会增加湿地水体中的氮负荷,促进藻类及其他浮游生物的繁殖,但过量的外源氮输入会导致水体富营养化,降低水体含氧量^[54],影响水质,继而影响水生植物的光合作用以及水生动植物的生存^[55]。

4 氮沉降特征对湿地碳汇功能的影响

4.1 氮素形态对湿地碳汇功能的影响

在湿地生态系统中,植物对氮素的吸收效率受其输入形态等的影响^[56],且湿地的固碳潜能可能也会受到影响^[11]。湿地土壤中的硝化—反硝化过程对于氮循环至关重要,其不仅驱动氮素的转化,还通过影响土壤呼吸作用,进而对湿地碳循环和能量流动产生影响^[40]。添加不同形态的氮素会影响土壤理化性质和微生物特性,例如,硝态氮和铵态氮改变了土壤 pH,同时对微生物群落的功能产生显著影响,影响土壤呼吸^[11]。此外,氮素形态也会影响湿地 CH_4 产生。外源氮输入能够促进湿地植物地上、地下生物量的增加,进而增加 CH_4 产生底物的供给,且硝态氮输入对湿地 CH_4 产生具有抑制作用^[57]。硝态氮输入能够激发湿地土壤硝酸盐异化还原^[58],与 CH_4 的生产竞争有机碳底物,降低底物浓度,进而降低产甲烷菌对底物的利用率,最终限

制 CH_4 产生^[59]。全川等^[57]研究发现,不同形态氮的输入对湿地 CH_4 产生的影响具有不确定性,铵态氮输入对湿地 CH_4 产生具有抑制作用或无影响,硝酸铵输入能促进湿地 CH_4 产生或无明显影响,尿素输入既能促进又能抑制湿地 CH_4 产生,比如尿素输入水稻田能促进表层土壤 CH_4 的排放,却抑制深层土壤的 CH_4 排放。

4.2 氮沉降量对湿地碳汇功能的影响

氮沉降能够补充湿地土壤所需的铵态氮和硝态氮,对湿地系统碳储存和碳循环过程产生多方面影响^[60]。氮沉降不仅作为营养源促进植物生长,还可能因其酸性特性导致湿地植物衰亡和土壤酸化,进而引发土壤养分流失^[32]。有机质分解是湿地碳循环的关键环节,适量的氮沉降可加速这一过程,进而促进有机质的分解和释放^[11]。而高水平的氮沉降往往会降低土壤酶的数量和活性,减缓有机质分解^[61]。隋心等^[62]研究显示,氮沉降量的增加可能会提升土壤微生物活性,从而改变土壤营养物质的有效分布及微生物的养分摄取方式。同时,氮沉降对湿地 CO_2 和 CH_4 的通量具有深刻影响。适量氮沉降促进了 CO_2 排放,且其排放量与土壤 pH 成正相关,而对 CH_4 释放的影响则与植物种类相关^[63]。研究表明,高水平氮沉降可能会抑制湿地植物的生长和碳汇能力,改变植被的生产力,进而降低 CO_2 排放^[64]。在氮作为限制因素条件下,适量的氮沉降可以为植物提供能源物质,促进地上生物量增长,且这种增长与氮沉降量呈正相关^[65]。李里等^[63]的研究表明,当土壤氮含量低于临界值时,适量施氮能显著提升湿地植物的生长量。余玉蓉等^[66]发现,不同浓度氮输入对泥炭藓的生长有显著影响,其株高、分枝数、单株质量和叶细胞面积均随氮浓度的增加先上升后下降,且在氮浓度为 $3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 时达到峰值,表明适量氮沉降可优化植物的生物量和叶面积指数,提高其固碳能力,而过量的氮沉降会导致土壤氮素富集,对湿地植物生长产生不利影响。

5 结论与展望

外源氮输入会影响湿地土壤氮碳储量、植物的生长状况和水体氮碳含量,进而影响湿地生态系统的碳汇功能,影响情况可归纳为:外源氮输入通过改变土壤理化特性、调节植物生长和水体生物化学过程,进而影响湿地碳氮循环和温室气体排放。氮

素形态和沉降量是影响湿地碳汇功能的关键因素,不同氮形态和沉降量通过改变植物生长和土壤生物化学过程,影响湿地的碳储存和释放。适量的氮沉降可增强土壤碳循环,而过量氮沉降则可能导致土壤酸化和养分流失,降低土壤碳库稳定性。

未来研究应聚焦于湿地生态系统碳循环对外源氮输入的长期响应机制,通过长期动态监测与试验研究,弥补现有研究集中于短期或中期观测的不足,并深化研究外源氮输入对不同类型湿地的影响,考虑到不同湿地对外源氮的承受能力及其碳汇功能响应机制的差异性,同时加强外源氮输入与气候变化等其他影响因素的交互作用研究,以全面揭示湿地碳氮循环的影响因素。鉴于湿地碳汇功能研究的跨学科特性,需加强生态学、环境科学、地理学和气候学等多学科合作,综合分析外源氮输入对湿地碳汇功能的综合影响。此外,湿地生态系统碳汇功能的监测和评估工作亟待加强,需明确监测和评估的具体指标如碳储量、碳汇速率和碳汇潜能等,并完善监测系统,提升数据分析能力,确保结果的准确性和科学性。最终,基于研究成果,优化湿地管理措施,科学恢复和保护湿地生态环境,提高其碳汇功能的稳定性和可持续性,以最大化湿地生态系统的碳汇潜力,为减少温室气体排放和应对全球气候变化做出更大贡献。

参考文献:

- [1] 邢鸿飞,庄 潇.“双碳”目标下滨海湿地碳汇的法治保障[J].湿地科学与管理,2024,20(3):92-96.
- [2] 张雅芹,齐 俊,吴 闯,等.“双碳”目标背景下黄河滩区生态综合整治研究——以济南市黄河滩区为例[J/OL].中国国土资源报[2024-09-06]. <https://doi.org/10.19676/j.cnki.1672-6995.001090>.
- [3] 何 柳,李学山,高 佳,等.我国生态系统碳汇发展形势与建议[J].南方能源建设,2024,11(5):1-11.
- [4] 高润红.认知“地球之肾”——湿地[J].内蒙古林业,2023(2):44-47.
- [5] 刘赵文.湿地生态系统的碳循环研究进展[J].安徽农学通报,2017,23(6):121-124,138.
- [6] 李金帅,郝天象,杨 萌,等.中国自然湿地生态系统碳循环关键过程及增汇途径[J].中国科学:地球科学,2024,54(8):2478-2495.
- [7] 刘德燕,宋长春,孙 丽.外源氮输入对湿地植物生长及光合特征的影响[J].中国环境科学,2007,27(4):513-517.
- [8] 韩广轩,李隽永,屈文笛.氮输入对滨海盐沼湿地碳循环关键过程的影响及机制[J].植物生态学报,2021,45(4):321-333.
- [9] 李英臣.外源氮输入对东北不同类型冻土区沼泽湿地土壤碳蓄积的影响[D].哈尔滨:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2012.
- [10] 李孟婷,宋艳宇,宫 超,等.湿地土壤微生物功能多样性及碳氮组分对长期氮输入响应[J].生态学报,2023,43(20):8544-8555.
- [11] 陶宝先,陈永金.不同形态氮输入对湿地生态系统碳循环影响的研究进展[J].生态环境学报,2016,25(1):162-167.
- [12] 郝 婧,李洪远.氮输入与环境因子交互对滨海湿地影响的研究进展[J].安全与环境学报,2019,19(5):1824-1831.
- [13] 卜晓燕.银川平原不同类型湿地碳汇评估研究[D].银川:宁夏大学,2016.
- [14] 于洪贤,黄璞祎.湿地碳汇功能探讨:以泥炭地和芦苇湿地为例[J].生态环境,2008,17(5):2103-2106.
- [15] 贾国栋,张龙齐,余新晓.生态修复的固碳机制、实现途径及碳中和对策[J].水土保持通报,2022,42(5):393-397.
- [16] 张 娜,王继纲,高敏学,等.福建漳江口红树林湿地溶解无机碳横向输送的研究[J].海洋科学进展,2023,41(4):737-752.
- [17] 丁 娜,林 华,张学洪,等.植物根系分泌物与根际微生物交互作用机制研究进展[J].土壤通报,2022,53(5):1212-1219.
- [18] 费莉莉,解丽娜,李诗华,等.长江口滨海湿地植物群落沟水体有机碳动态及其影响因素[J].华东师范大学学报(自然科学版),2019(1):156-165.
- [19] 李孟婷,宋艳宇,宫 超,等.湿地土壤微生物功能多样性及碳氮组分对长期氮输入响应[J].生态学报,2023,43(20):8544-8555.
- [20] 陈世丹.金寨红石嘴河湾生态湿地修复的思考[J].江淮水利科技,2014(2):34-35,40.
- [21] 李静泰,闫丹丹,么秀颖,等.中国滨海湿地碳储量估算[J].土壤学报,2023,60(3):800-814.
- [22] MATTEWS E, FUNG I. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1987.
- [23] 刘子刚.湿地生态系统碳储存和温室气体排放研究[J].地理科学,2004,24(5):634-639.
- [24] 翟夏杰,崔丽娟,李 伟,等.中国典型湿地生态系统的固碳价值研究[J/OL].水生态学杂志:1-8[2024-09-12]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202208110321>.
- [25] 余涵霞,王家宜,万方浩,等.植物凋落物影响土壤有机质分解的研究进展[J].生物安全学报,2018,27(2):88-94.
- [26] 李 玲,仇少君,刘京涛,等.土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用[J].应用生态学报,2012,23(5):1407-1414.
- [27] 何良康,陈中义,史玉虎,等.泥炭沼泽湿地碳循环及其影响因素研究进展[J].湖北林业科技,2023,52(6):44-50.
- [28] 叶思源,赵广明.滨海盐沼生态系统与碳汇[J].地球,2021(4):12-17.
- [29] 张世虎,张 悦,马晓玉,等.大气氮沉降影响草地植物物种多样性机制研究综述[J].生态学报,2022,42(4):1252-1261.
- [30] 谢迎新,张淑利,冯 伟,等.大气氮素沉降研究进展[J].中国生态农业学报,2010,18(4):897-904.
- [31] SIROIS A, BARRIE L A. An estimate of the importance of dry dep-

- osition as a pathway of acidic substances from the atmosphere to the biosphere in eastern Canada[J]. *Chemical and Physical Meteorology*, 2017, 40(1): 59-80.
- [32] 谢迎新, 张淑利, 冯 伟, 等. 大气氮素沉降研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 897-904.
- [33] 焦 健, 田长富. 根瘤菌共生固氮能力的进化模式[J]. *微生物学通报*, 2019, 46(2): 388-397.
- [34] 张苏艳, 刘园园, 李慧敏, 等. 生物固氮细菌的应用[J]. *畜牧兽医杂志*, 2010, 29(4): 40-41.
- [35] 胡敏杰, 全 川. 氮输入对天然湿地温室气体通量的影响及机制[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1969-1976.
- [36] 谢红梅, 朱 波. 农业生态系统中 N 素在土水界面的迁移转化研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(4): 128-131.
- [37] 张青松, 李佳秀, 陈有超, 等. 冻融与氮输入对草地土壤氮转化和氧化亚氮排放的影响[J]. *草业科学*, 2023, 40(6): 1472-1486.
- [38] JIAN S Y, LI J W, CHEN J, et al. Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: A meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016(101): 32-43.
- [39] 王维奇, 曾从盛, 全 川. 湿地甲烷产生的测定方法及主要控制因子研究综述[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2007, 2(2): 48-56.
- [40] 葛瑞娟, 宋长春, 杨桂生, 等. 外源氮输入对小叶章湿地土壤微生物活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 253-257.
- [41] 刘德燕, 宋长春, 王 丽, 等. 外源氮输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29(12): 3525-3530.
- [42] 李英臣, 宋长春. 氮磷输入对湿地生态系统碳蓄积的影响[J]. *土壤通报*, 2012, 43(1): 224-229.
- [43] JIANG L, WANG S, ZHE P, et al. Effects of grazing on the acquisition of nitrogen by plants and microorganisms in an alpine grassland on the Tibetan Plateau[J]. *Plant and Soil*, 2017(416): 297-308.
- [44] 王玲玲, 孙志高, 牟晓杰, 等. 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮素分布特征[J]. *土壤通报*, 2011, 42(6): 1439-1445.
- [45] 武姣娜, 魏晓东, 李 霞, 等. 植物氮素利用效率的研究进展[J]. *植物生理学报*, 2018, 54(9): 1401-1408.
- [46] 崔丽娟, 李胜男, 李 伟, 等. 不同湿地植物对外源氮输入的响应[J]. *林业科学研究*, 2013, 26(5): 643-648.
- [47] 张丽华, 宋长春, 王德宣. 氮输入对沼泽湿地碳平衡的影响[J]. *环境科学*, 2006, 27(7): 1257-1263.
- [48] 曹丰丰, 刘瑞雪, 黄国柱, 等. 短期氮添加对祁连山亚高山草地生产力及植物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(12): 5034-5044.
- [49] 吴燕锋, 章光新. 湿地生态水文模型研究综述[J]. *生态学报*, 2018, 38(7): 2588-2598.
- [50] 黎 明, 李 伟. 湿地碳循环研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2009, 28(1): 116-123.
- [51] 陈雅文, 韩广轩, 蔡延江. 氮输入影响滨海湿地碳循环过程的模拟研究: 进展与展望[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(5): 883-895.
- [52] 宋长春, 张丽华, 王毅勇, 等. 淡水沼泽湿地 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量年际变化及其对氮输入响应[J]. *环境科学*, 2006, 27(12): 2369-2375.
- [53] 孙志高, 刘景双. 湿地土壤的硝化-反硝化作用及影响因素[J]. *土壤通报*, 2008(6): 1462-1467.
- [54] 倪婉敏, 黄 艺. 不同外源氮素对西洞庭湖区藻类生长的影响[J]. *环境化学*, 2014, 33(4): 693-694.
- [55] 王夏童, 房 平, 赵学敏, 等. 水体中氮素污染危害及其治理的研究综述[J]. *广东化工*, 2021, 48(5): 92-93.
- [56] BRIX H, KONNERUP D. Nitrogen nutrition of *Canna indica*: Effects of ammonium versus nitrate on growth, biomass allocation, photosynthesis, nitrate reductase activity and N uptake rates [J]. *Aquatic Botany*, 2010, 92(2): 142-148.
- [57] 全 川, 罗 敏, 谭 季. 湿地甲烷代谢对氮输入响应的复杂性及其机制分析[J]. *生态学报*, 2024, 44(4): 1324-1335.
- [58] 李小飞, 侯立军, 刘 敏. 崇明东滩湿地土壤硝酸盐异化还原成铵过程及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(4): 1284-1294.
- [59] 顾 航, 肖凡书, 贺志理, 等. 湿地微生物介导的甲烷排放机制[J]. *微生物学报*, 2018, 58(4): 618-632.
- [60] 徐润宏, 谭 梅, 朱锦福, 等. 氮沉降对湿地生态系统的影响研究[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(3): 10-13, 18.
- [61] 陈美颖, 陈 浩, 毛庆功, 等. 氮沉降对森林土壤磷循环的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 4965-4976.
- [62] 隋 心, 张荣涛, 刘赢男, 等. 模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物功能多样性的影响[J]. *草地学报*, 2016, 24(6): 1226-1233.
- [63] 李 里, 刘 伟. 氮沉降和水位下降对湿地生态系统的影响[J]. *湿地科学与管理*, 2011, 7(4): 48-52.
- [64] 李冬冬, 全 川, 黄佳芳. 河口感潮沼泽湿地 CO₂、CH₄ 排放通量对氮沉降的短期响应[J]. *实验室研究与探索*, 2018, 37(2): 19-22, 44.
- [65] 朱 敏, 张振华, 于君宝, 等. 氮沉降对黄河三角洲芦苇湿地土壤呼吸的影响[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(6): 517-529.
- [66] 余玉蓉, 吴 浩, 高娅菲, 等. 模拟氮沉降对鄂西南湿地泥炭藓生理及形态特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(11): 1493-1506.