

氮沉降对湿地生态系统的影响研究

徐润宏, 谭梅, 朱锦福*, 刘泽华 (青海师范大学生命科学院, 青海西宁 810008)

摘要 大气氮沉降的急剧增加是近年来全球变化研究的焦点, 湿地生态系统的碳储量远高于其他生态系统, 是全球变化的敏感区域。主要介绍了湿地生态系统及其氮沉降的现状, 综述了国内外的相关研究结果, 阐明了氮沉降对湿地生态系统植物和土壤微生物的具体影响, 并对未来研究所面临的问题进行了展望, 可为更好地预测及评估氮沉降背景下湿地生态系统的稳定性提供参考。

关键词 湿地生态系统; 土壤微生物; 氮沉降; 群落结构

中图分类号 X 171.1 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)03-0010-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.03.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the Effects of Nitrogen Deposition on Wetland Ecosystem

XU Run-hong, TAN Mei, ZHU Jin-fu et al (College of Life Science, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008)

Abstract The rapid increase of atmospheric nitrogen deposition is the focus of global change research in recent years. The carbon storage of wetland ecosystem is much higher than other ecosystems, and it is a sensitive area of global change. We mainly introduced the present situation of wetland ecosystem and the nitrogen deposition, both at home and abroad, summarized the related research results, illuminated the nitrogen deposition of wetland ecosystem of plants and soil microorganisms specific impact, the future research problems were also prospected, so as to provide reference for better predicting and evaluating the stability of wetland ecological system under the background of nitrogen deposition.

Key words Wetland ecosystem; Soil microorganism; Nitrogen deposition; Community structure

大气氮沉降属于自然氮循环的一部分^[1], 近年来人类活动导致全球大气氮沉降的急剧增加^[2-8]。在过去的两个世纪里, 生态系统中的人为氮输入增加了将近 10 倍^[9], 到 2050 年预计会再增加一倍^[3], 自然氮循环失衡越来越严重。氮沉降的影响在全球范围内都存在, 对生态系统产生了深远的影响^[10-12], 尤其是在陆地生态系统中^[13-14]。同时, 氮沉降还影响着其他生态类型, 如海洋^[15]、森林^[16]、草地^[17]、湖泊^[18]和海口^[19]系统。氮沉降的急剧增加导致自然氮循环发生变化^[3, 20], 它对生态系统造成了不良的生态影响, 如导致生态系统富营养化和酸化^[21], 改变微生物群落, 植物多样性减少^[10, 22]等。

湿地是一个特殊的生态系统, 一般被认为是陆地向水体的过渡态, 具有陆生生态系统和湖泊生态系统的共同特征, 是具有多功能的生态系统^[23]。氮是生态系统中植物生长所必需的营养物质, 但当它的供应不能满足微生物和植物的需求时, 也可以被认为是限制元素^[24], 其在生态系统中的含量会直接影响湿地生态系统的生产力。湿地作为陆地生态系统的生态部分, 对氮沉降的响应更为敏感。目前欧洲、美国和东亚的大气氮沉降已经很严重^[25-26]。近几十年来, 快速工业化、城市化和农业发展使我国成为全球氮沉降的焦点, 导致人们越来越关注脆弱生态系统的威胁^[27-29]。笔者拟综述国内外研究中氮沉降对湿地生态系统的具体影响, 指出氮沉降这一环境问题的迫切性, 以期今后更好地保护和合理利用湿地提供参考。

1 氮沉降

近年来, 由于工农业的快速发展, 大气氮沉降已经成为

全球变化的重要现象之一, 大气氮沉降的增加给整个生态系统的结构、功能以及生物地球化学循环过程都造成了非常重要的影响^[3]。氮沉降主要存在 2 种形式, 分别为干沉降和湿沉降^[23]。干沉降是指含氮化合物吸附到其他粒子上并随着大气降落到地表, 如一些氮氧化物、硝酸盐、氨类物质等^[30]; 湿沉降是指可溶性含氮化合物随着降水落到地面。氮沉降主要以湿沉降的形式降落到地表, 对陆地生态系统造成影响。氮沉降来源主要有 2 种, 即自然来源和人为来源。自然来源包括生物固氮和雷电天气形成的含氮化合物; 人为来源主要包括工业化燃料燃烧和农业化肥使用等与人类发展生活有关的来源^[31]。近年来人类活动对自然环境的干扰越来越强烈, 致使人为来源已成为氮沉降升高的最主要因素之一, 我国也成为世界主要的氮沉降区域之一, 对我国的生态环境造成了非常不利的影响^[32]。

由上述可知, 大气氮沉降主要以湿沉降形式影响生态系统, 而湿地生态系统又是一种特殊的生态系统, 它的含水量较高, 氮含量对湿地的影响要比其他陆地生态系统更为明显, 湿地生态系统对大气氮沉降的响应也更加敏感。该研究从系统角度出发, 主要概述了氮沉降对湿地生态系统的具体影响, 指出湿地生态系统氮沉降研究的发展趋势。

2 氮沉降对湿地植被的影响

氮素是湿地生态系统中最主要的限制元素, 可以指示生态系统的营养水平, 对湿地生产力产生重要影响^[33]。在如今越来越频繁的人类活动背景下, 大气氮沉降速率逐步加快, 氮沉降的加剧也在直接或间接地影响着生态系统的结构与功能。当前氮沉降对于湿地植被的影响研究主要集中在植物生物量和生产力、植物多样性和物种丰富度等方面。

2.1 氮沉降对植物生物量和生产力的影响 在一定的氮沉降浓度下, 氮可以增加植物的生物量, 进而提高湿地的生产力, 也就是说氮对植物生物量的促进有阈值限制。李德军

基金项目 青海省科技厅项目(2019-ZJ-7068)。

作者简介 徐润宏(1995—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向: 湿地土壤微生物。* 通信作者, 副教授, 从事生态学研究。

收稿日期 2020-06-03

等^[34]在氮沉降对森林植物的影响研究中发现,在植物生长受氮限制的时候,氮沉降可以增加植物的生物量,但当植物生长不再受氮限制后,植物生产力会下降。张丽华等^[35]在沼泽湿地生态系统呼吸与温度、氮素及植物生长的相互关系的研究中得出结论,氮素增加促进了植物生长,植物叶面积、株高以及生物量都高于未施氮组。但氮沉降对于提高植物生物量有一定的范围,超过特定生态系统的氮沉降阈值之后,氮对植物生物量的提高就不能发挥作用了。窦晶鑫等^[36]在对三江平原典型湿地植物湿草甸小叶章的研究中发现,在2种水分条件(W1非淹水,W2淹水)及4个氮处理[0、1、3、5 g/(m²·a)]下,小叶章的生物量(总生物量、地上生物量、根生物量)均高于对照组,其中根生物量的增长程度最大,W1条件下根生物量平均增长54.5%,W2条件下小叶章根生物量平均增长124.7%;氮沉降处理明显增加了湿地植物小叶章的生物量。谢国平等^[37]在施氮量和收获时间对西藏野生垂穗披碱草种子产量影响的研究中得出结论,随着施氮量的增加,野生垂穗披碱草的种子产量均逐渐增加,当施氮量在250 kg/hm²时,野生垂穗披碱草种子产量达到最高。付晓玲等^[38]对样地进行了3个氮处理(分别为0、4、8 g),结果显示氮沉降对三江平原湿地小叶章的植株高度、分蘖数、叶长均有增加,且高氮处理还会增加植株节间数和分蘖数。氮沉降对植物生物量的影响主要体现在植株高度、叶长、分节数等方面,但氮对植被生物量的提升有一定的阈值,氮超过这一阈值浓度,对植物生物量的促进作用就会转为下降。氮是植物正常生长发育的营养元素和限制元素,在氮未饱和区域,施氮量的增加可以使植物生物量增加。

2.2 氮沉降对植物多样性和物种丰富度的影响 由于氮是生物体的基本元素之一,其对于生物体的正常生理代谢活动具有不可忽略的作用,对于植物的正常生长发育具有重要作用。目前来看,在湿地氮沉降背景下的研究中,其对湿地植物多样性的影响较为广泛。已有大量研究表明,氮沉降会对湿地植物的多样性和物种丰富度产生影响。氮素积累会使植被物种丰富度和生物多样性减少^[39],进而影响生态系统的稳定性。Tilman等^[40]认为氮沉降增加了营养物质的单一性,使物种竞争加剧,从而降低了植物的多样性。且他又在1994年发表的文章中,通过大量长期的对比研究,得出结论:氮添加使美国俄亥俄州弃耕地群落植物的多样性明显下降^[41]。Facelli等^[42]研究认为,氮沉降增加了植物凋落物积累,使地面覆盖度增加,阻碍了空气流通、减少了水分蒸发、遮挡了部分阳光,从而影响种子萌发和幼苗存活,导致植物多样性的减少。Ren等^[43]在添加营养物质(N、P、K等)对高寒草甸植物群落影响的研究中发现,随着添加的营养物质和不同组合数量的增多,植物丰富度呈下降的趋势,物种多样性减少。张秀娟^[44]在模拟氮沉降对图们湿地温室气体排放及植物多样性影响的研究中发现,湿地植物的组成并没有由于氮的添加而改变,但氮沉降改变了湿地植物的均匀度和丰富度,其研究表明,由于氮添加导致资源分配不均使植物多样性下降,并且植物的群落结构也变得越来越简单。这些研

究都表明单一氮素的添加使植物多样性减少,植物正常生长发育与多种营养元素有关,任一元素浓度的改变都有可能改变植物生长发育的方向,而单一氮素的添加使生态系统的营养结构失衡,植物的营养结构发生变化,加剧了植物之间养分竞争,从而使植物生长受到影响,物种多样性减少,持续的氮添加会导致生态系统植物群落变得越来越简单,生态系统稳定性遭到破坏。

3 氮沉降对湿地土壤微生物的影响

土壤微生物是湿地生态系统的重要组成部分^[45],它在物质循环、凋落物分解、维持湿地生态系统的稳定性等方面具有重要作用^[46-47]。探究氮沉降对土壤微生物的影响是非常有价值的,目前氮沉降对土壤微生物的影响研究主要集中在微生物生物量、群落结构和多样性以及微生物功能多样性等方面。

3.1 氮沉降对土壤微生物生物量的影响 目前国内外的相关研究中,氮沉降对土壤微生物生物量的影响还没有明确统一的说法,不同的生态系统中,土壤微生物对氮沉降的响应是不同的。大部分研究指出氮沉降降低了土壤微生物量^[48]。Wallenstein等^[49]在美国对3个样地长期施氮的试验中发现,有2个样地的土壤微生物量明显减少。Treseder等^[50]对田间施氮的试验和国内研究学者对科尔沁草原长期施氮试验的结果中均显示长期施氮显著降低了土壤微生物量。另有一些研究指出,氮沉降增加了土壤微生物量^[51]。刘彩霞等^[52]研究发现,氮沉降量会影响土壤微生物总量,低氮处理增加了微生物总量,高氮处理时微生物总量生长受到抑制。Frey等^[53]研究发现,氮沉降增加使真菌数量减少,但对细菌数量的影响不显著。还有许多研究指出,氮沉降通过影响土壤酶的活性进而引起土壤微生物的变化。王美溪等^[54]和Carreiro等^[55]研究都说明了这个结论的正确性。土壤酶活性是衡量土壤微生物活性的关键指标,由于过量的氮沉降影响了土壤酶活性从而导致土壤微生物活性下降。除此之外,王记明等^[56]在对小泊湖和依克乌兰2块高寒湿地生境下氮沉降对土壤微生物影响的研究中显示,施氮提高了小泊湖湿地土壤微生物的数量,该地区土壤中真菌、细菌、放线菌的数量均有提高,但是依克乌兰湿地的土壤微生物量降低。土壤微生物是土壤中最活跃的部分,它的活动与多种因素息息相关,它对外界因素的改变更为敏感。上述结果可能与生态系统的类型、海拔、土壤含水量、植被类型等因素有关。在不同的生态背景下,系统发展可能出现不同趋势,每个生态系统都具有自己的独特性,不同生态因素共同影响着系统的方向。

3.2 氮沉降对湿地土壤微生物群落结构和多样性的影响 在不同的氮沉降条件下,土壤微生物的群落结构和多样性会发生不同的响应。隋心等^[57]在对三江平原小叶章湿地土壤细菌多样性的影响研究中发现,氮沉降使细菌的多样性增加,且低氮时细菌多样性最多,高氮时促进效果略有下降,说明氮沉降对细菌多样性增加的影响有一定的浓度限制,当氮浓度增加到一定大时,细菌多样性由增加变为降低。杨杉

杉^[58]在模拟氮沉降对黄河三角洲滨海湿地土壤微生物结构及多样性的影响研究中发现,随着氮沉降梯度的变化,土壤细菌多样性降低,且在中浓度 KNO_3 沉降下多样性指数最低。细菌占土壤微生物群落的大部分,是土壤中最多的微生物类别,它的变化往往体现着土壤微生物的整体变化。在氮未饱和系统中氮是微生物代谢活性的限制元素,氮沉降解除了这一限制因素,使微生物的活性增强,从而改变了微生物的群落结构及发展方向。

氮添加还会引起土壤微生物不同菌门丰富度的改变。Fierer 等^[59]和 Ramirez 等^[60]研究发现,拟杆菌门和变形菌门在高氮条件下细菌群落丰度上升,而酸杆菌门和疣微菌门细菌群落丰度下降。Cederlund 等^[61]研究表明,氮添加使疣微菌门、酸杆菌门、芽单胞菌门的相对丰富度降低。张海芳^[62]在对土壤微生物的研究中发现,随着氮素的添加,菌群内占主导的不同菌门相对丰度发生了不同的变化。疣微菌门相对丰度在氮添加条件下显著降低,变形菌门、放线菌门、酸杆菌门和拟杆菌门相对丰度在高氮添加条件下均表现为升高,厚壁菌门相对丰度在单一氮添加条件下无显著变化,浮霉菌门相对丰度在氮添加条件下呈现出先升高后降低的趋势。氮沉降的增加使生态系统的营养结构和微生物群落结构发生改变,并使以氮素为主要营养元素的菌门增加,从而改变了菌群主导门类的丰富度。

3.3 氮沉降对土壤微生物功能多样性的影响 大量研究表明,氮沉降会改变土壤微生物的活性,进而影响微生物的功能多样性。郁培义等^[63]在樟树林红壤微生物的研究中发现,不同的氮处理水平对土壤微生物群落的代谢功能具有不同的影响,对土壤微生物细菌的代谢功能具有促进作用,而对真菌和酵母菌的活性具有抑制作用。吴松芹等^[64]在对滨海湿地土壤微生物的研究中发现,随着氮沉降浓度的增加微生物的代谢活性(AWCD)值逐渐上升,氮沉降增强了微生物的代谢功能活性。微生物是自然生态系统的重要成分,它的功能活性与生态系统密切相关。氮沉降的增加使土壤氮素持续增加,微生物拥有足够的氮源,进而使其代谢功能活性增强。

4 讨论

氮含量对植被生长促进具有一定的阈值,但与各自的生态系统有关。氮是植物重要的营养元素之一,植物生长要受到氮的限制,在氮未饱和的系统中,氮是植物生长的限制元素,这时氮沉降可以促进植物生长,进而提高生态系统的生产力。在氮已经饱和的系统中,氮含量的添加不会对植物有明显的促进作用,这是因为在这一区域,氮含量已经足够支持植物的正常生长发育,氮素已不是植物的限制元素。

氮沉降导致湿地植物多样性的减少,可能的原因有植物之间的竞争加剧导致植物多样性减少。氮含量增加促进了植物生长,对植物株高有明显促进作用,从而使较高的植物增强了对光的竞争,而较为低矮的植物则在竞争中处于劣势被淘汰,进而使植物多样性减少。这可以用植物竞争机制^[65-66]来解释。植物对养分的竞争存在地上和地下部分的

差异。植物地下部分对养分竞争是相等的,而地上部分则是不对等的,主要体现在对光的竞争^[67]。氮的添加使土壤中可利用的矿物元素增多,从而使植物地下部分对矿质元素的竞争转为地上部分的竞争。氮沉降使植物凋落物增多,地表盖度增大,减少了植物多样性。凋落物和盖度的增加使地表气体流通减少、水分蒸发减慢、光投射减少,影响了种子萌发和较矮小幼苗的存活^[42,68-69]。

在氮未饱和的生态系统中,氮沉降会增加土壤微生物量^[70-71]。但在高氮情况下,则会抑制微生物量增加。微生物是土壤中分布最为广泛的类群,其对环境变化敏感。氮沉降增加了土壤中可利用的营养元素,因此一定浓度的氮沉降可以提高土壤微生物数量。但在高氮情况下,氮沉降改变了土壤中的营养结构,使土壤氮素比例急剧增加,增加了土壤有机质的含量,使土壤 pH 降低,从而导致微生物数量减少。

5 展望

氮沉降对于湿地生态系统的影响是多方面的,氮沉降改变了植被的生物量及群落组成,对土壤微生物也产生了多重影响。综合目前国内外的研究,氮沉降对生态系统的影响研究多集中在林地和草甸生态系统,对于湖泊生态系统的研究比较少。我国学者的研究大多集中于滨海湿地,对于脆弱湿地生态系统的研究仍有局限,如高寒湿地,由于其特殊的地理位置和生态独特性,是全球变化的敏感脆弱区域,如我国的青藏高原地区。青藏高原约占我国陆地面积的 1/4^[72],对全球气候变化敏感^[73-74],气候变化和人类活动对青藏高原的影响与日俱增^[75]。现有研究已表明,模拟氮沉降会显著降低高寒湿地植物的丰富度,从而对当地的生物多样性产生影响^[76-78]。在现今越来越严重的大气氮沉降的背景下,希望更多关注以下研究问题:①利用多种研究技术手段,探究氮沉降对土壤微生物多样性的影响机制,使研究更为系统及全面;②重点关注脆弱敏感生态系统,以期揭示大气氮沉降背景下全球碳氮循环的影响机制;③针对不同土壤微生物的功能及群落结构多样性展开更加深入的研究,以便评价土壤质量及生态系统功能的变化。

参考文献

- [1] 苏成国,尹斌,朱兆良,等. 农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应[J]. 土壤,2005,37(2):113-120.
- [2] KAISER J. Environmental policy: The other global pollutant; Nitrogen proves tough to curb[J]. Science,2001,294(5545):1268-1269.
- [3] GALLOWAY J N, DENTENER F J, CAPONE D G, et al. Nitrogen cycles: Past, present, and future[J]. Biogeochemistry,2004,70:153-226.
- [4] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. Science,2008,320(5878):889-892.
- [5] LIU X J, DUAN L, MO J M, et al. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview[J]. Environmental pollution,2011,159(10):2251-2264.
- [6] LIU X J, ZHANG Y, HAN W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature,2013,494(7438):459-462.
- [7] GU B J, JU X T, CHANG J, et al. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China[J]. Proceedings of the national academy of sciences,2015,112(28):8792-8797.
- [8] SONG L, KUANG F H, SKIBA U, et al. Bulk deposition of organic and inorganic nitrogen in southwest China from 2008 to 2013[J]. Environmental pollution,2017,227:157-166.
- [9] SUTTON M A, BLEEKER A. Environmental science: The shape of nitrogen

- to come[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 435-437.
- [10] STEVENS C J, DISE N B, MOUNTFORD J O, et al. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands[J]. *Science*, 2004, 303(5665): 1876-1879.
- [11] CLARK C M, TILMAN D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands[J]. *Nature*, 2008, 451(7179): 712-715.
- [12] DISE N B, ASHMORE M, BELYAZID S, et al. Nitrogen as a threat to European terrestrial biodiversity[M]//SUTTON M A, HOWARD C M, ERISMAN J W, et al. *The European nitrogen assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [13] ASNER G P, TOWNSEND A R, RILEY W J, et al. Physical and biogeochemical controls over terrestrial ecosystem responses to nitrogen deposition[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 54(1): 1-39.
- [14] MATSON P, LOHSE K A, HALL S J. The globalization of nitrogen deposition; Consequences for terrestrial ecosystems[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 113-119.
- [15] ZHANG Y, YU Q, MA W C, et al. Atmospheric deposition of inorganic nitrogen to the eastern China seas and its implications to marine biogeochemistry[J]. *Journal of geophysical research atmospheres*, 2010, 115(D7): 1-10.
- [16] ZHANG W, CUI Y H, LU X K, et al. High nitrogen deposition decreases the contribution of fungal residues to soil carbon pools in a tropical forest ecosystem[J]. *Soil biology & biochemistry*, 2016, 97: 211-214.
- [17] GOMEZ-CASANOVA N, HUDIBURG T W, BERNACCHI C J, et al. Nitrogen deposition and greenhouse gas emissions from grasslands; Uncertainties and future directions[J]. *Global change biology*, 2016, 22(4): 1348-1360.
- [18] HOBBS W O, LAFRANCOIS B M, STOTTEMYER R, et al. Nitrogen deposition to lakes in national parks of the western Great Lakes region; Isotopic signatures, watershed retention, and algal shifts[J]. *Global biogeochemical cycles*, 2016, 30(3): 514-533.
- [19] PAKEMAN R J, ALEXANDER J, BROOKER R, et al. Long-term impacts of nitrogen deposition on coastal plant communities[J]. *Environmental pollution*, 2016, 212: 337-347.
- [20] FOWLER D, COYLE M, SKIBA U, et al. The global nitrogen cycle in the twenty-first century[J]. *Phil Trans R Soc B*, 2013, 368(1621): 1-13.
- [21] BOUWMAN A F, VAN VUUREN D P, DERWENT R G, et al. A global analysis of acidification and eutrophication of terrestrial ecosystems [J]. *Water, air, and soil pollution*, 2002, 141(1/2/3/4): 349-382.
- [22] BOWMAN W D, CLEVELAND C C, HALADA L, et al. Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity[J]. *Nature geoscience*, 2008, 1(11): 767-770.
- [23] 赵魁义, 刘兴土. 湿地研究的现状与展望[M]//陈宜瑜. *中国湿地研究*. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995: 1-7.
- [24] SONG L, KUANG F H, SKIBA U, et al. Bulk deposition of organic and inorganic nitrogen in southwest China from 2008 to 2013[J]. *Environmental pollution*, 2017, 227: 157-166.
- [25] JIA Y L, YU G R, GAO Y N, et al. Global inorganic nitrogen dry deposition inferred from ground-and space-based measurements[J]. *Scientific reports*, 2016, 6: 1-11.
- [26] ZHU J X, HE N P, WANG Q F, et al. The composition, spatial patterns, and influencing factors of atmospheric wet nitrogen deposition in Chinese terrestrial ecosystems[J]. *Science of the total environment*, 2015, 511: 777-785.
- [27] KIM T W, LEE K, NAJJAR R G, et al. Increasing N abundance in the northwestern Pacific Ocean due to atmospheric nitrogen deposition[J]. *Science*, 2011, 334(6055): 505-509.
- [28] LIU H Y, JACOB D J, BEY I, et al. Constraints from 210Pb and 7Be on wet deposition and transport in a global three-dimensional chemical tracer model driven by assimilated meteorological fields[J]. *Journal of geophysical research; Atmospheres*, 2001, 106(D11): 12109-12128.
- [29] LUO X S, TANG A H, SHI K, et al. Chinese coastal seas are facing heavy atmospheric nitrogen deposition[J]. *Environmental research letters*, 2014, 9(9): 1-10.
- [30] TAMARIT C, DIETRICH D, RUSS G. A new capability for fieldbus systems; Perceptive awareness [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2003, 36(13): 87-92.
- [31] VITOUSEK P M, CHAIR, ABER J, et al. Issues in ecology, issue 01: Human alteration of the global nitrogen cycle; Causes and consequences[J]. *Anhui architecture*, 2002, 42(5): 667-675.
- [32] DENTENER F, DREVET J, LAMARQUE J F, et al. Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: A multimodel evaluation [J]. *Global biogeochemical cycles*, 2006, 20(4): 1-21.
- [33] MISTCH W J, GOSSELIN J G. *Wetlands* [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 2000: 89-125.
- [34] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林植物的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(9): 1891-1900.
- [35] 张丽华, 宋长春, 王德宣, 等. 沼泽湿地生态系统呼吸与温度、氮素及植物生长的相互关系[J]. *环境科学*, 2007, 28(1): 1-8.
- [36] 窦晶鑫, 刘景双, 王洋, 等. 模拟氮沉降对湿地植物生物量与土壤活性碳库的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1714-1720.
- [37] 谢国平, 呼天明, 王俭珍, 等. 施 N 量和收获时间对西藏野生垂穗披碱草种子产量影响研究[J]. *草业学报*, 2010, 19(2): 89-96.
- [38] 付晓玲, 倪红伟, 王建波. 氮沉降对三江平原湿地小叶章构件结构和光合产物的影响[J]. *国土与自然资源研究*, 2017(3): 87-91.
- [39] BOBBINK R, HICKS K, GALLOWAY J, et al. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis[J]. *Ecological applications*, 2010, 20(1): 30-59.
- [40] TILMAN D. Secondary succession and the pattern of plant dominance along experimental nitrogen gradients[J]. *Ecological monographs*, 1987, 57(3): 189-214.
- [41] TILMAN D, DOWNING J A, et al. Biodiversity and stability in grasslands [J]. *Nature*, 1994, 367(6461): 363-365.
- [42] FACELLI J M, PICKETT S T A. Plant litter: Its dynamics and effects on plant community structure[J]. *The botanical review*, 1991, 57(1): 1-32.
- [43] REN Z, LI Q, CHU C, et al. Effects of resource additions on species richness and ANPP in an alpine meadow community[J]. *Journal of plant ecology*, 2010, 3(1): 25-31.
- [44] 张秀娟. 模拟氮沉降对图们湿地温室气体排放及植物多样性的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [45] 丁思一, 余济云, 杨庆刚, 等. 间伐和修枝对杉木人工林土壤微生物量碳和酶活性的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(6): 75-79.
- [46] KAZDA M. Indications of unbalanced nitrogen nutrition of Norway spruce stands[J]. *Plant and soil*, 1990, 128(1): 97-101.
- [47] LOVETT G M, REINERS W A, OLSON R K. Cloud droplet deposition in subalpine balsam fir forests; Hydrological and chemical inputs [J]. *Science*, 1982, 218(4579): 1303-1304.
- [48] TIAN D S, NIU S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition[J]. *Environmental research letters*, 2015, 10(2): 1-10.
- [49] WALLENSTEIN M D. Effects of increased nitrogen deposition on forest-soil nitrogen cycling and microbial community structure [D]. Durham: Duke University, 2004.
- [50] TRESEDER K K. Nitrogen additions and microbial biomass: A meta-analysis of ecosystem studies[J]. *Ecology letters*, 2008, 11(10): 1111-1120.
- [51] 倪壮, 聂彦霞, 欧阳胜男, 等. 氮添加对南亚热带常绿阔叶林土壤微生物群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(11): 3202-3209.
- [52] 刘彩霞, 焦如珍, 董玉红, 等. 杉木林土壤微生物区系对短期模拟氮沉降的响应[J]. *林业科学研究*, 2015, 28(2): 271-276.
- [53] FREY S D, KNORR M, PARRENT J L, et al. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests[J]. *Forest ecology and management*, 2004, 196(1): 159-171.
- [54] 王美溪, 刘珂艺, 邢亚娟. 气候变化背景下土壤微生物与植物物种多样性关联分析[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(20): 111-117.
- [55] CARREIRO M M, SINSABAUGH R L, REPERT D A, et al. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition [J]. *Ecology*, 2000, 81(9): 2359-2365.
- [56] 王记明, 孙苗苗, 陈克龙, 等. 模拟氮沉降对高寒湿地生境土壤微生物的影响[J]. *青海师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 30(4): 60-64, 69.
- [57] 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.
- [58] 杨杉杉. 模拟氮沉降对黄河三角洲滨海湿地土壤微生物群落结构及多样性的影响[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2018.
- [59] FIERER N, LAUBER C L, RAMIREZ K S, et al. Comparative metagenomic, phylogenetic and physiological analyses of soil microbial communities across nitrogen gradients[J]. *The ISME Journal*, 2012, 6(5): 1007-1017.
- [60] RAMIREZ K S, LAUBER C L, KNIGHT R, et al. Consistent effects of nitrogen fertilization on soil bacterial communities in contrasting systems [J]. *Ecology*, 2010, 91(12): 3463-3470.

- environmental sciences, 2017, 55(5): 294-302.
- [47] SHI R Y, LI J Y, XU R K, et al. Ameliorating effects of individual and combined application of biomass ash, bone meal and alkaline slag on acid soils[J]. Soil and tillage research, 2016, 162: 41-45.
- [48] 黄庆, 林小明, 柯玉诗, 等. 多元酸性土壤调理剂在辣椒上的施用效果研究[J]. 广东农业科学, 2007, 34(1): 42-44.
- [49] 蓝佩玲, 廖新荣, 李淑仪, 等. 燃煤烟气脱硫副产物在酸性土上的农用价值与利用原理[J]. 生态环境, 2007, 16(4): 1135-1138.
- [50] 矫威. 不同改良剂对作物生长发育及酸性土壤理化性状的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [51] 文星, 李明德, 吴海勇, 等. 土壤改良剂对酸性水稻土 pH 值、交换性钙镁及有效磷的影响[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(5): 618-623.
- [52] 敖俊华, 黄振瑞, 江永, 等. 石灰施用对酸性土壤养分状况和甘蔗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 266-269.
- [53] 储祥云, 黄昌勇, 何振立. 磷肥和石灰对酸性土壤上一年生黑麦草生长的影响[J]. 浙江农业大学学报, 1999, 25(1): 19-22.
- [54] 魏岚, 杨少海, 邹献中, 等. 不同土壤调理剂对酸性土壤的改良效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2010, 36(1): 77-81.
- [55] 张文玲, 李桂花, 高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 153-157.
- [56] 俞仁培, 陈德明. 我国盐渍土资源及其开发利用[J]. 土壤通报, 1999, 30(4): 158-159, 177.
- [57] 贾敬敦, 张富. 依靠科技创新推进我国盐碱地资源可持续利用[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(5): 1-7.
- [58] 刘瑞敏. 盐渍化土壤改良剂筛选和调控机理及水盐运移模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [59] 郝秀珍, 周东美. 沸石在土壤改良中的应用研究进展[J]. 土壤, 2003, 35(2): 103-106.
- [60] 左建, 孔庆瑞. 沸石改良碱化土壤作用的初步研究[J]. 河北农业大学学报, 1987, 10(3): 58-64.
- [61] 霍成立. 凹凸棒石基复合功能材料的应用基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [62] 王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 石膏和腐植酸配施对干旱盐碱区土壤改良及棉花生长的影响[J]. 土壤, 2020, 52(2): 327-332.
- [63] ZHAO W, ZHOU Q, TIAN Z Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain[J]. Science of the total environment, 2020, 722: 1-9.
- [64] WANG S J, CHEN Q, LI Y, et al. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum[J]. Resources, conservation and recycling, 2017, 121: 82-92.
- [65] ZHAO Y G, LI Y, WANG S J, et al. Combined application of a straw layer and flue gas desulphurization gypsum to reduce soil salinity and alkalinity[J]. Pedosphere, 2020, 30(2): 226-235.
- [66] 王学刚, 王光辉, 刘金生. 矿区重金属污染土壤的修复技术研究现状[J]. 工业安全与环保, 2010, 36(4): 29-31.
- [67] 朱雁鸣, 韦朝阳, 冯人伟, 等. 三种添加剂对矿区多种重金属污染土壤的修复效果评估——大豆苗期盆栽实验[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1277-1284.
- [68] 王凯荣, 张玉焯, 胡荣桂. 不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 476-481.
- [69] VINK J P M, HARMSSEN J, RIJNAARTS H. Delayed immobilization of heavy metals in soils and sediments under reducing and anaerobic conditions; consequences for flooding and storage[J]. Journal of soils and sediments, 2010, 10(8): 1633-1645.
- [70] 龚海军, 刘昭兵, 纪雄辉, 等. 新型土壤改良剂对水稻吸收累积 Cd、Pb 的影响初探[J]. 湖南农业科学, 2010(5): 50-53.
- [71] 王毅, 王艺, 王恩德. 改性蒙脱石吸附 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 的实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 565-567.
- [72] 王苏新. 麦饭石特性及作用分析[J]. 江苏陶瓷, 2003, 36(1): 1-2.
- [73] 于化泓, 李力桦. 麦饭石吸附除蜂胶中重金属铅的研究[J]. 食品工业科技, 2004, 25(12): 99-100.
- [74] ALAM M G M, TOKUNAGA S, STAGNITTI F. Removal of arsenic from contaminated soils using different salt extractants[J]. Journal of environmental science and health: Part A, 2007, 42(4): 447-451.
- [75] CHRYSOCHOOU M, DERMATAS D, GRUBB D G. Phosphate application to firing range soils for Pb immobilization; The unclear role of phosphate[J]. Journal of hazardous materials, 2007, 144(1/2): 1-14.
- [76] 李江遐, 吴林春, 张军, 等. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 2075-2081.
- [77] CAO X D, MA L N, LIANG Y, et al. Simultaneous immobilization of lead and atrazine in contaminated soils using dairy-manure biochar[J]. Environmental science & technology, 2011, 45(11): 4884-4889.
- [78] LIU J, REN J M, ZHOU Y C, et al. Effects and mechanisms of mineral amendment on thallium mobility in highly contaminated soils[J]. Journal of environmental management, 2020, 262: 1-8.

(上接第 13 页)

- [61] CEDERLUND H, WESSÉN E, ENWALL K, et al. Soil carbon quality and nitrogen fertilization structure bacterial communities with predictable responses of major bacterial phyla[J]. Applied soil ecology, 2014, 84: 62-68.
- [62] 张海芳. 贝加尔针茅草原植物与土壤微生物群落对氮素和水分添加的响应[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [63] 郁培义, 朱凡, 王志勇, 等. 氮添加对樟树林红壤微生物群落代谢功能的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(3): 70-74.
- [64] 吴松芹, 汪成忠, 李梦莎. 模拟氮沉降对滨海湿地土壤微生物功能多样性的影响[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1153-1158.
- [65] NEWMAN E I. Competition and diversity in herbaceous vegetation[J]. Nature, 1973, 244(5414): 310-311.
- [66] WEINER J. Asymmetric competition in plant populations[J]. Trends in ecology & evolution, 1990, 5(11): 360-364.
- [67] 张杰琦. 氮素添加对青藏高原高寒草甸植物群落结构的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [68] 李禄军, 曾德慧, 于占源, 等. 氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1838-1844.
- [69] HOLLAND E A, COLEMAN D C. Litter placement effects on microbial and organic matter dynamics in an agroecosystem[J]. Ecology, 1987, 68(2): 425-433.
- [70] 王晶晶, 樊伟, 崔琨, 等. 氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤微生物群落特征的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8361-8373.
- [71] 倪壮, 聂彦霞, 欧阳胜男, 等. 氮添加对东南亚热带常绿阔叶林土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3202-3209.
- [72] 张镡钲, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. 地理研究, 2002, 21(1): 1-8.
- [73] LIU X J, ZHANG Y, HAN W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494(7438): 459-462.
- [74] XU W, ZHENG K, LIU X J, et al. Atmospheric NH_3 dynamics at a typical pig farm in China and their implications[J]. Atmospheric pollution research, 2014, 5(3): 455-463.
- [75] YU C Q, ZHANG Y J, CLAUS H, et al. Ecological and environmental issues faced by a developing Tibet[J]. Environmental science & technology, 2012, 46(4): 1979-1980.
- [76] KLEIN J A, HARTE J, ZHAO X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau[J]. Ecology letters, 2004, 7(12): 1170-1179.
- [77] KLEIN J A, HARTE J, ZHAO X Q. Decline in medicinal and forage species with warming is mediated by plant traits on the Tibetan Plateau[J]. Ecosystems, 2008, 11(5): 775-789.
- [78] MA Z Y, LIU H Y, MI Z R, et al. Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production[J]. Nature communications, 2017, 8: 1-7.