

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2019.02.022

沼泽湿地生态系统氮素循环研究综述

杨蕾, 邹玉和, 杨靖宇*, 余凌帆, 陈德朝, 鄢武先
(四川省林业科学研究院, 四川 成都 610081)

摘要:沼泽湿地是湿地生态系统的重要组成部分,在我国天然湿地面积中占有很大比重,作为氮素的源、汇和转换器,其结构和功能对生态系统氮素循环具有显著影响。本文从沼泽湿地氮素的存在形式、输入与固定、迁移转化及影响因素等方面综述了沼泽湿地氮素循环的过程,并对氮素循环过程造成的生态环境效应进行了分析,最后对沼泽湿地氮循环的进一步深化研究进行了展望。

关键词:沼泽湿地;氮素循环;生态效益

中图分类号:S718.5 文献标识码:A 文章编号:1003-5508(2019)02-0099-06

A Review of Nitrogen Recycling in Marsh Wetland Ecosystems

YANG Lei ZOU Yu-he YANG Jing-yu* YU Ling-fan CHEN De-chao YAN Wu-xian
(Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China)

Abstract: The marsh wetland is an important part of wetland ecosystems, which occupied a large proportion of the natural wetland area in China. As the source, sink and converter of nitrogen, its structure and function significantly affected the nitrogen cycle. The process of nitrogen circulation in marsh wetlands was summarized in different respects, including existence forms, input, immobilization, transformation and influence factor of nitrogen in marsh wetlands, and analysis was made of the ecological environmental effect caused by the nitrogen cycle. At last, a further research was prospected on the nitrogen cycle in marsh wetlands in the future.

Key words: Marsh wetlands, Nitrogen cycle, Ecological benefits

湿地是水陆彼此作用构成的特殊自然综合体,是地球上继海洋、森林之后的重要生态系统之一,因其具有涵养水源、蓄洪防旱、减缓环境污染等重要作用,享有“地球之肾”的美誉。2013年第二次全国湿地资源调查结果显示,我国湿地总面积5 360.26万 hm^2 ,占国土面积的5.58%。其中,自然湿地4 667.67万 hm^2 ,占全国湿地的87.08%。自然湿地中近一半的湿地为沼泽湿地,面积达2 173.29万 hm^2 ,占46.56%^[1,2]。沼泽湿地凭借独特的地貌类

型,不仅能够调节水的自然循环,达到蓄水防洪的作用,还可以减缓湿地系统水的流速,促进毒物、杂质等的沉淀或排除,是生态系统中不可或缺的重要组成部分。

湿地物质循环研究一直是湿地科学研究的热点,而氮素作为天然湿地系统中最主要的限制性元素之一,是湿地营养水平的重要指示剂,湿地生态系统的生产力受其形态及含量特征的直接影响。湿地通常被认为是氮素的源、汇或转换器,具有促进、延

收稿日期:2018-11-28

基金项目:四川省基本科研经费项目(2019JBKY06);森林与湿地恢复与保育四川省重点实验室资助项目
作者简介:杨蕾(1993-),女,硕士研究生,主要从事湿地生态系统研究,e-mail:583103150@qq.com。

*通讯作者:杨靖宇(1986-),男,助理研究员,博士研究生,主要从事高寒湿地生态研究,e-mail:330286931@qq.com。

缓或遏制全球环境恶化趋势的作用。湿地生态系统氮素的重要供给途径主要包括生物固氮、径流输入和大气氮沉降,湿地系统自身的营养状况决定着氮素循环过程,同时湿地氮的传输过程与土壤、植物的发生、生长紧密联系,显著影响着湿地生态系统的结构和功能^[3]。因此,湿地在氮储存和氮循环等方面有不可替代的作用。

早期对湿地氮素循环研究多集中于河口湿地^[4~6]、滨海湿地^[7]及人工湿地^[8],近年来才逐渐开始对沼泽湿地氮素循环的研究有较多的关注,研究沼泽湿地氮素循环对于生态系统的平衡以及全球气候变化问题都有重要意义。

1 沼泽湿地氮素的主要存在形式

沼泽湿地中,氮素以有机态、无机态和颗粒态等几种形式存在其中。可溶性的有机态氮主要包括氨基酸、腐植酸和棕黄酸等;无机形态的氮素主要包括硝酸氮(NO_3^-)、亚硝酸氮(NO_2^-)、氨氮(NH_4^+);颗粒态氮主要由藻类和植物等的有机残体形成。对于沼泽湿地而言,氮素存在的不同形式间接影响了沼泽湿地环境对其吸收利用效果,从而对湿地生态系统造成影响。

植物、土壤、水是沼泽湿地环境的三大要素。氮素是沼泽湿地植物和微生物生长的必需元素,而湿地土壤中可被植物直接吸收利用的氮素含量极低,是最主要的限制性养分^[9]。沼泽湿地生态系统的结构和功能稳定性依赖于土壤中氮素的含量及其运输转化过程,同时也是影响水体质量的重要因子之一。对于沼泽湿地而言,三者密不可分又相互关联。

1.1 土壤

沼泽湿地土壤氮素的主要形态是有机态氮,占湿地土壤全氮的95%以上^[10]。土壤中矿质态氮(NH_4^+ 、 NO_3^-)是可以直接被植物吸收和利用的存在形式,通常被认为是湿地生态系统总氮的过渡库,但其含量很低,仅占土壤全氮不到2%的比例,因此土壤中的有机氮必须要通过土壤微生物的矿化作用,才能转变为可被植物吸收的有效形式,最终被植物利用^[9]。湿地土壤有机氮的矿化受环境温度、植物生长、微生物种类及数量等土壤性质和环境条件的显著影响,当湿地土壤处于淹水状态下时,矿化氮主要以 NH_4^+ 的形式存在。

泥炭作为部分沼泽湿地中氮的载体,对氮素具有很强的滞留能力,泥炭的层次特征能够反映氮素在沼泽湿地生态系统中的自然沉积过程。刘景双等^[11]对三江平原沼泽湿地泥炭沉积中氮素分布进行了研究,揭示了淡水沼泽湿地中氮素的沉积过程及生态效应。有研究表明,排放污水和大量施用氮肥会导致泥炭沼泽中的氮素积累,其含量还与泥炭粘粒含量、水位波动等因素有关^[12]。

1.2 植物

与其他湿地系统相同,沼泽湿地系统中,植物吸收利用的绝大部分是无机氮,沼泽湿地植物在其生长周期内吸收的土壤氮素的主要来源包括两个方面,即土壤中原有的无机氮和活性有机氮通过矿化作用形成的无机氮。因此,植物可吸收利用的有效氮含量受湿地生态系统氮素的转化过程与效率的显著影响,氮素的有效性与植物养分的吸收利用、群落演替等存在着一种反馈关系,间接决定了植物的生产力^[13]。

植物对氮素的吸收能力取决于氮素的形态,Martin等^[14]研究结果表明,相比于硝态氮而言,湿地中的大型水生植物对铵态氮的吸收能力更强。湿地植物类型差异也影响着对氮素的吸收力。浮游植物吸收的氮素占全部氮素的53%;芦苇湿地对N的吸收能力平均达到 $2.16 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{hm}^2$,且吸收能力随着密度的增加而增强^[15]。张子清等^[16]对湿地中的挺水植物对氮磷的吸收进行研究,发现芦苇吸收 NH_4^+ 和 NO_3^- 的速率随着时间增加而上升,对 NH_4^+ 的吸收效率是 NO_3^- 的8.32倍,认为芦苇对氮素有较强的吸收能力。

1.3 水分

沼泽湿地通常与河流湖泊相联系,并与他们进行水量和物质交换。水源流入是湿地氮素产生的重要路径之一,主要以径流流入湿地系统,降水是硝酸根离子和氨根离子的重要补给方式,因此湿地系统中转化后的有机氮通过水流进行输送,使得具有湿地区域水流输送的有机物明显高于没有湿地的区域^[17]。

淡水沼泽湿地和盐沼湿地中氮等养分输送具有季节性变化,在夏季,沼泽湿地是氮素养分的汇,而在春季则是氮素养分的源,主要由于植物凋落后很大一部分养分物质随凋落物和淋滤作用散失到水体中,所以氮素等营养物质在秋季和早春经常发生净

输出。水分作为氮素淋失的载体,沼泽湿地氮素的淋失量会受水位制约,干湿交替则会促进硝态氮的淋失^[18]。

2 沼泽湿地氮的迁移转化及主要影响因素

2.1 氮的迁移及影响因素

湿地氮素的迁移本质是氮以水为载体在土壤中的迁徙过程,包括水平和垂直两个方向的迁移,因而氮素的迁移会受到土壤水分、有机质、温度、植被水平等条件的影响和控制。

土壤水分和有机质是影响氮素垂直迁移及分布的主要因素。白军红^[19]等对向海沼泽湿地研究结果表明,湿地中氮素的含量多少与有机质含量成正比,造成此结果的原因是大量的氮输入与湿地的过滤作用;同时还发现向海沼泽湿地中,不同形态氮素含量明显不同,相同的是都随着土壤深度的增加而减少。黑河沼泽湿地土壤中,速效氮含量与有机质含量变动趋向相同,与土壤深度的关系,也以深度土壤的含量高于表层的土壤^[20]。湿地水位显著影响着水平和垂直分异的氮素分布,Chen 等^[21]认为在滨河湿地中,硝酸根离子的输入量在水位上升时会受到河边植物等影响。

2.2 氮的转化及影响因素

2.2.1 硝化过程及影响因素

沼泽湿地土壤中 NH_3 或 NH_4^+ 在好氧条件下发生硝化作用而被转化为 NO_2^- 和 NO_3^- 的过程称之为硝化过程,其中硝态氮被认为是硝化过程中的主要产物,而氧化亚氮则需要氧气胁迫等特殊条件的作用而形成。

土壤的理化性质显著影响铵态氮的硝化过程,Zhu 等^[22]在对美国尖叶扁柏湿地氮素研究中发现,氮素硝化速率与土壤 pH 值呈正相关;同时他还发现湿地植物可以促进硝化作用,植物根系部分的生物量与其发生硝化作用的机会呈正比。Jensen 等^[23]研究认为,当淹水土壤沉积物 NH_4^+ 浓度不在限制硝化细菌活性的浓度范围时,随着淹水层溶解氧浓度的增加,土壤硝化作用会随着增强,由此可见湿地水位在一定条件下也会对硝化作用造成影响。此外,人类社会经济活动会显著影响周围湿地的硝化作用,林贤彪^[24]的研究结果表明,温度过高或过低都会抑制硝化作用,适宜的温度为 $25^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 。

2.2.2 反硝化过程及影响因素

反硝化过程是指微生物将硝酸盐中的氮通过一系列中间产物 (NO_2^- 、 NO 、 N_2O) 还原为氮气的生物化学过程,也被称为脱氮作用。作为硝态氮的一个重要汇,反硝化作用是湿地脱硝酸盐的重要途径,它可以减轻地表或地下水中的氮负荷从而净化水质^[25]。

土壤质地可以通过影响硝酸根离子的通气环境和渗透性而影响反硝化作用。Groffman 等^[26]的研究结果显示,土壤在处于排水不良状态下,反硝化作用会增强;在森林沼泽湿地中,营养丰富的肥沃湿地土壤中反硝化作用强于贫瘠的湿地土壤。Hooda 等^[27]发现,相比于黏土,砂质土的反硝化速率要低很多。反硝化作用可以进行的温度范围在 $-5^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$,但其最适宜的温度为 $10^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$,温度过高或过低都会抑制反硝化作用。pH 值也是影响反硝化作用的重要因子之一,其速率随着 pH 值的下降而减慢,碱性环境 (pH 值为 $7 \sim 8.5$) 较适宜进行硝化作用,氮氧化物还原酶会在 pH 值小于 6 时被抑制,而当其小于 5 时,就会使硝化作用终止。

2.2.3 矿化过程及影响因素

在沼泽湿地中,通过微生物作用,土壤中的有机氮转化为铵态氮或硝态氮等无机态氮的过程就是氮的矿化作用。

许多环境因子都会影响沼泽湿地土壤氮矿化作用,主要包括温度、湿度、土壤孔隙度等。周旺明等^[28]在对沼泽湿地的研究中发现,冻结温度和冻融循环会促成土壤的氮矿化过程加快从而使有机氮积聚,足够的氮素可以供给春季植物生长所需。土壤氮矿化在 $-4^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 的范围内,其矿化速率会随着温度的升高而升高;在适宜的土壤含水量条件下, $20^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 是矿化过程发生的最佳温度。除此之外,有研究表明,放牧也会影响沼泽化草甸湿地的氮素矿化作用,牛羊等践踏活动增加了沼泽化湿地土壤容重和 pH 值,从而促进了土壤的矿化作用^[29]。

3 沼泽湿地氮循环和氮平衡及主要影响因素

3.1 氮输入

3.1.1 大气氮沉降

大气氮沉降是指大气中氮化合物经过湿沉降和

干沉降的方式降落到陆地和水体的过程。在天然湿地系统中,两种沉降形式是系统中输入氮素的重要途径。研究河口沼泽湿地结果表明,氮沉降会抑制沼泽湿地中二氧化碳与甲烷的排放量,并且随温度的降低而减少^[30]。邓昭衡等^[31]对高寒湿地研究也表明,氮沉降的输入量会影响二氧化碳的排放,适量的时候起促进作用,而输入量过高时则抑制二氧化碳的排放。

大气氮沉降除了会影响湿地生态系统中温室气体的通量以外,还会对湿地植被造成影响,减少湿地低等植物如藓类的减少,而增加维管植物这类高等植物数量,但同时氮沉降对于植被生产力的正向影响也是有界限的,一般临界点为 $25\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,超过时将对生产力的作用将饱和^[32]。

3.1.2 其他输入途径

除大气氮沉降以外,生物固氮、径流氮和人为氮也是湿地系统氮素输入的主要来源。其中生物固氮分为自身固氮、联合固氮、共生固氮以及内生固氮 4 种类型,部分湿地植物如木麻黄属植物的氮素大部分来源于生物固氮^[33]。沼泽湿地将人类活动以及冲刷溶解的含氮物质等产生的氮源通过毗邻的河流湖泊传输进入湿地系统。近些年,由于氮肥的大量施用,也使得大量的外源氮素随着大气沉降、地表径流等方式进入湿地系统,这对湿地植物以至于湿地生态系统的稳定性都会产生影响,造成的水体富营养化、水体污染等问题也引起专家学者的极大关注。

3.2 氮输出

3.2.1 N_2O 排放

沼泽湿地处于淹水状态而形成的特殊环境条件,为 N_2O 的形成提供了基础, NO_3^- 会被还原为 N_2O 或 N_2 。依据 Jukka 等^[34]的研究结果,泥炭沼泽在开垦状态下,其冬季 N_2O 排放通量较大,而未经开垦的天然泥炭沼泽地在冬季则不会排放 N_2O 。氮沉降的输入量也会显著影响 N_2O 的排放过程,张艺等^[35]对若尔盖高寒泥炭沼泽湿地的研究结果显示,湿地中 N_2O 排放量随着氮沉降输入量的增加而增加。刘景双等^[11]通过对三江平原沼泽湿地 N_2O 排放的研究发现,地表积水加深、土壤含水量增加都能显著减少 N_2O 的排放量,这不仅对今后进一步研究沼泽湿地氮输出奠定了基础,也为控制减少温室气体排放做出贡献。

3.2.2 氨挥发

在一定的条件下,沼泽湿地土壤中的硝酸根离子会转变为氨气而从中挥发,造成湿地土壤中的氮素损失,Martin 等^[14]认为湿地水分中 pH 值会调控 $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 - \text{N}$ 的转化过程。氨挥发通过大气氮沉降进入湿地生态系统会严重影响水质,而目前我国对于氨挥发的研究主要集中在农田生态系统。

4 生态环境效应

沼泽湿地作为氮素的贮存库,也因自身对氮素持留所具有的承受限度,在氮素循环转化的过程中,会对湿地生态环境直接或间接地产生不同尺度上的影响。

4.1 对土壤和水环境的局部影响

沼泽湿地土壤的矿化作用是湿地土壤氮素的输入源之一,有机氮的矿化作用受到土壤质地、深度、团聚体特征等的因子的影响。在砂土、壤土和黏土中,以砂土的氮矿化速率最大;土壤的碳氮比与土壤有机质矿化程度成反比。影响沼泽湿地土壤或泥炭中氮素损失的主要因素是可溶态氮的淋失过程,此外,硝态氮的淋溶会导致地下水污染及土壤酸化。由此可见土壤理化性质与有机氮库的大小密不可分,因此矿化作用就与湿地土壤的供氮能力相辅相成。

当沼泽湿地中硝化作用速率大时,会生成较多含量的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,对应的加强 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的趋势,产生的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,淋失后进入水体,会破坏水质造成污染。沼泽湿地要与毗邻的河流湖泊进行营养物质交换,因此是呈开放状态,而这种开放性就使得近年来大量的氮肥使用以及含氮废水等当中的氮源,随湿地生态系统进入地表径流、地下水中,这就造成氮负荷的增加,从而致使水体发生富营养化。

4.2 对全球气候变化的影响

沼泽湿地中氨挥发产生的温室气体氨气会进入大气,据报道每年大约约有 $6 \times 10^6 \text{t}$ 的 NO_x

是由大气中 NH_3 通过氧化产生的,同时挥发到大气中的氨又会通过消耗羟基从而影响另一种温室气体 CH_4 的转化。 NH_3 是沉降氮的重要成分,Wolf 等^[36]研究认为沉降 N 总量的 30% 为 NH_3 ,沉降到土壤中的 NH_3 会形成 NO_2 的二次源,增加其排放。

反硝化与硝化过程是产生 N_2O 的两个重要途径,其中反硝化过程使得沼泽湿地中 $NO_3^- - N$ 经其作用而产生 N_2O 和 NO ,也是温室气体的主要成分。氮输入会显著促进土壤有机碳的矿化作用,促进 CO_2 排放,在未来氮沉降增加条件下,沼泽草甸 CO_2 排放通量将有可能明显增加,从而对气候变化产生重要的反馈作用^[37];研究表明,氮输入显著增加湿地温室气体全球增温潜势,短期氮添加可通过影响土壤有效氮含量和微生物生物量,增强沼泽湿地土壤温室气体的排放,导致温室效应加剧^[38]。

5 展望

综上所述,目前国内外学者对湿地中氮素的存在形式、输入固定、迁移转化等领域取得了一系列重大研究成果。随着氮输入对生态环境影响的加剧,氮素的生物地球化学循环过程研究就变得迫在眉睫,湿地氮素的循环包括其物理、化学、生物 3 个方面的循环过程,与湿地的功能特别是生态系统的功能紧密联系。目前对于天然湿地的氮素研究多集中在河口湿地、滨海湿地等,对于沼泽湿地的氮素循环研究还处于起步阶段,今后在加强对沼泽湿地氮素循环的研究时可以参考以下方面进行深入:

(1) 继续加强对现有的沼泽湿地氮素循环物理、化学、生物 3 个方面循环过程的系统研究,除对常规无机氮的存在形态进行研究外,还可以研究湿地土壤、水、微生物中的有机氮以及各种含氮化合物在不同植被群落类型沼泽湿地生态系统内的迁移转化规律及机理等。

(2) 微生物是湿地土壤有机质分解与转化的关键,是植物与土壤之间氮素循环过程的重要一环,今后应加强氮素输入对沼泽湿地土壤微生物形态特征的影响研究。

(3) 氮素作为硝化、反硝化及矿化过程的主体,对温室气体 CH_4 、 N_2O 和 NO 的排放具有重要影响,有效氮含量水平又对土壤有机碳矿化过程中 CO_2 的释放具有关键作用,研究沼泽湿地中氮素循环对全球气候变化的响应或反馈作用也应受到重视。

参考文献:

[1] 国家林业局,国家发展改革委,财政部. 关于印发《全国湿地保护“十三五”实施规划》的函[EB/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/main/218/content-984258.html>, 2017-04-20.

- [2] 罗玲,王宗明,毛德华,等. 沼泽湿地主要类型英文词汇内涵及辨析[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 834 ~ 842.
- [3] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, et al. Human Alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737 ~ 750.
- [4] 罗先香,闫琴,于晓莉,等. 河口湿地氮素生物地球化学循环研究[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(b12): 181 ~ 187.
- [5] 王维奇,王纯,曾从盛,等. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2012(13): 4087 ~ 4093.
- [6] 牟晓杰,孙志高,刘兴土. 黄河口滨海潮滩湿地土壤碳、氮的空间分异特征[J]. *地理科学*, 2012(12): 1551 ~ 1529.
- [7] 甘华阳,张顺之,梁开,等. 北部湾北部滨海湿地水体和表层沉积物中营养元素分布与污染评价[J]. *湿地科学*, 2012(3): 285 ~ 298.
- [8] 王霞,何成达,赵锦辉. 氮素在人工湿地基质中分布研究[J]. *江苏环境科技*, 2006(6): 20 ~ 21, 24.
- [9] 周旺明,秦胜金,刘景双,等. 沼泽湿地土壤氮矿化对温度变化及冻融的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2011(4): 806 ~ 811.
- [10] 曲向荣,贾宏宇,张海荣,等. 辽东湾芦苇湿地对陆源营养物质净化作用的初步研究[J]. *应用生态学报*, 2000(2): 270 ~ 272.
- [11] 刘景双,于君宝,王金达. 淡水沼泽湿地泥炭沉积中氮素分布特征[J]. *环境科学*, 2003(2): 41 ~ 45.
- [12] Hana Čížková, Pechar L, Štěpán Husák, et al. Chemical characteristics of soils and pore waters of three wetland sites dominated by *Phragmites australis*; relation to vegetation composition and reed performance[J]. *Aquatic Botany*, 2001, 69(2): 235 ~ 249.
- [13] 李贵才,韩兴国,黄建辉,等. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展[J]. *生态学报*, 2001(7): 1187 ~ 1195.
- [14] Martin J F, Reddy K R. Interaction and spatial distribution of wetland nitrogen process[J]. *Ecological Modeling*, 1997, 105(1): 1 ~ 21.
- [15] Kang S, Kang H, Ko D, et al. Nitrogen removal from a riverine wetland: a field survey and simulation study of *Phragmites japonica*[J]. *Ecological Engineering*, 2002(18): 467 ~ 475.
- [16] 张子清,王鹏,陈威名,等. 芦苇对氮磷营养盐的吸收特征[J]. *化学工程与装备*, 2017(1): 8 ~ 10.
- [17] 王洋,刘景双,孙志高,等. 湿地系统氮的生物地球化学研究概述[J]. *湿地科学*, 2006(4): 311 ~ 320.
- [18] Peng S Z, Yang S H, Xu J Z, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements[J]. *Paddy & Water Environment*, 2011, 9(3): 333 ~ 342.
- [19] 白军红,王庆改,余国营. 吉林省向海沼泽湿地土壤中氮素分布特征及生产效应研究[J]. *土壤通报*, 2002, 33(2): 113 ~ 116.
- [20] 白娜,王立,孔东升. 黑河自然保护区沼泽湿地土壤化学性质的空间分布特征研究[J]. *草业学报*, 2017, 26(5): 15 ~ 28.

- [21] Twilley R R, Chen R. Patterns of mangrove forest structure and soil nutrient dynamics along the Shark River estuary, Florida[J]. Estuaries, 1999, 22(4): 955 ~ 970.
- [22] Zhu W X, Ehrenfeld J G. Nitrogen mineralization and nitrification in suburban and undeveloped Atlantic White Cedar wetlands[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(2): 523 ~ 529.
- [23] Jensen K. Microscale distribution of nitrification activity in sediment determined with a shielded microsensor for nitrate[J]. Applied & Environmental Microbiology, 1993, 59(10): 3287 ~ 3296.
- [24] 林贤彪. 闽江口湿地沉积物硝化作用及其环境影响因子探讨[D]. 福建师范大学, 2014.
- [25] Howarth R W, Billen G, Swaney D, et al. Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences[J]. Biogeochemistry, 1996, 35(1): 75 ~ 139.
- [26] Groffman P M, Hanson G C. Wetland denitrification: influence of site quality and relationships with wetland delineation protocols[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 323 ~ 329.
- [27] Hooda A K, Weston C J, Chen D. Denitrification in effluent - irrigated clay soil under *Eucalyptus Globulus* plantation in South - Eastern Australia[J]. Forest Ecology & Management, 2003, 179(1): 547 ~ 558.
- [28] 周旺明, 秦胜金, 刘景双, 等. 沼泽湿地土壤氮矿化对温度变化及冻融的响应[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 806 ~ 811.
- [29] 王雪, 郭雪莲, 郑荣波, 等. 放牧对滇西北高原纳帕海沼泽化草甸湿地土壤氮转化的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2308 ~ 2314.
- [30] 李冬冬, 仝川, 黄佳芳. 河口感潮沼泽湿地 CO₂、CH₄ 排放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.
- [31] 邓昭衡, 高居娟, 周雨露, 等. 氮沉降对冻融培养期泥炭土二氧化碳排放的影响[J]. 土壤通报, 2015(4): 962 ~ 966.
- [32] 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(4): 48 ~ 52.
- [33] 胡敏杰, 仝川. 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.
- [34] Jukka A, Sanna S, Hannu N, et al. Winter CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands[J]. Biogeochemistry, 1999, 44(2): 163 ~ 186.
- [35] 张艺, 王春梅, 许可, 等. 若尔盖湿地土壤温室气体排放对模拟氮沉降增加的初期响应[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 54 ~ 63.
- [36] Wolf A H, Patz J N. Reactive nitrogen and human health: acute and long - term implications[J]. Ambio, 2002, 31(2): 120 ~ 125.
- [37] 梁艳, 于珠扎布, 曹旭娟, 等. 模拟氮沉降对藏北高寒草甸温室气体排放的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 485 ~ 494.
- [38] 张艺, 王春梅, 许可, 等. 若尔盖湿地土壤温室气体排放对模拟氮沉降增加的初期响应[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 58 ~ 67.

(上接第 93 页)

- [2] 杨瑶君, 刘超, 汪淑芳, 等. 一种新型的昆虫诱捕器及其对长足大竹象的诱捕作用[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 6174 ~ 6179.
- [3] 杨瑶君, 秦虹, 汪淑芳, 等. 长足大竹象的触角超微结构和对竹笋挥发物的触角电位反应[J]. 昆虫学报, 2010, 53(10): 1087 ~ 1096.
- [4] 陈兆奋, 林世珍. 蜘蛛网对经济仿生学的启示——供求理论中的蜘蛛网模型浅探[J]. 福建财会管理干部学院学报, 1995, (04): 17 ~ 21.
- [5] 尤德祥, 冯希筠, 张桦. 一种改进的蜘蛛网格建模方法[J]. 天津理工大学学报, 2008, (01): 76 ~ 78.
- [6] 赵越, 武洁, 张瑞. 蜘蛛网最佳结网模型探究[J]. 科协论坛(下半月), 2013, (03): 86 ~ 88.
- [7] 赵自强, 张二丽. 蜘蛛网的结构优化模型研究[J]. 河南教育学院学报(自然科学版), 2015, 24(03): 1 ~ 6.
- [8] 潘志娟, 盛家铺, 戴宏钦. 蜘蛛丝的结构与力学性能[J]. 南通工学院学报, 1999, (02): 6 ~ 8.
- [9] 潘志娟, 邱芯薇. 蜘蛛丝的物理性能研究[J]. 苏州大学学报(工科版), 2003, (01): 18 ~ 22.
- [10] 蒋平, 吴丽华, 江丽琴, 等. 蜘蛛丝的组成结构与生物学功能[J/OL]. 动物学杂志, 2014, 49(05): 778 ~ 791. (2014 - 09 - 23).
- [11] 宋大祥. 蜘蛛的网和它的捕食策略[J]. 生物学通报, 2000, (04): 1 ~ 3. [2017 - 10 - 07].
- [12] 刘家保, 陈中华, 余蔓. 蜘蛛结网结构的讨论与优化[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2013, 29(01): 11 ~ 15.
- [13] 钟平生, 李小舍, 邝灼芳, 等. 诱虫灯对蔬菜害虫的诱杀效果及对天敌的影响[J]. 长江蔬菜, 2009(01): 45 ~ 48.
- [14] 皖薇, 张上都. 太阳能多功能扇吸式智能捕虫器在蔬菜基地诱捕害虫的对比试验[J]. 四川农业科技, 2018(06): 33 ~ 34.
- [15] 边振兴, 龚玲春, 果晓玉, 等. 农业景观组成对玉米螟天敌数量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(01): 30 ~ 41.