

湿地土壤氮素研究概述^①

白军红^{1,2}, 李晓文¹, 崔保山¹, 王庆改²

(1 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2 国家环境保护总局环境工程评估中心, 北京 100012)

摘要: 湿地是自然界最富生物多样性的生态景观和人类最重要的生存环境之一, 具有巨大的环境调节功能和效益。湿地发挥着 N 素的源、汇和转换器的功能, 而湿地土壤中 N 素含量及其迁移转化过程也显著影响着湿地生态系统的结构和功能, 所以湿地土壤 N 素过程研究成为当前研究热点之一。本文对湿地土壤 N 素贮量, 湿地对 N 素的截留能力以及湿地 N 素的迁移转化过程等方面进行了综述。

关键词: 湿地土壤; 氮素; 截留; 迁移; 转化

中图分类号: S153.6⁺1; S15

湿地是自然界最富生物多样性的生态景观和人类最重要的生存环境之一, 具有巨大的环境调节功能和效益, 对维持自然界自然生态过程和平衡起着十分重要的作用。N 素作为一种湿地营养水平指示剂, 常常是天然湿地或人工湿地 (水稻田) 土壤中的主要限制性养分^[1]; 同时也是江河、湖泊等永久性淹水湿地发生富营养化的主要诱因之一。20 世纪 80 年代以来, 人类活动引起的生态系统生产力下降、土地退化、水体富营养化、酸沉降、温室效应和臭氧层破坏等一系列与 N 过程有关的全球性问题日趋严重。因此, 湿地作为 N 素的源、汇或转化器的功能在生态学和环境科学领域日渐受到重视。湿地能够截留和滤过大量陆源 N 污染物, 被誉为“自然之肾”, 在水质保护方面发挥着重要的作用^[2]。湿地土壤中 N 素含量及其迁移转化过程也显著影响着湿地生态系统的结构和功能以及湿地生产力^[3-4]。湿地中 N₂O 等温室气体排放量的增加会加剧全球变暖趋势以及对臭氧层的破坏, 进而会给湿地物种的分布、生物多样性以及植物的生长带来极为深刻的影响。所以湿地 N 循环研究逐渐成为国际社会关注的热点研究领域之一。就目前而言, 国内外对湿地生态系统的 N 过程研究还不成熟, 尤其国内对该领域的研究还存在许多空白点。本文就湿地土壤 N 素储量、持留能力、迁移转化过程和模型等几个方面进行了综述。

1 湿地土壤 N 素研究进展

1.1 湿地土壤 N 素贮量研究

从 N 储量看, N 素主要贮存在地壳、陆地、海洋、湿地和大气圈中。国内外学者已对岩石、陆地和海洋以及大气圈中的 N 素贮存量做了大量研究^[5-6], 但对湿地 N 素贮量的研究还仅仅局限在局地尺度上^[2,7], 有待于从区域或全球尺度上作进一步研究。

从 N 素形态上看, 有机 N 是湿地土壤 N 素的主要形态, 约占湿地土壤全 N 含量的 95% 以上^[7]。Downing 等^[1]发现温带生态系统中的河流湿地在尚未受到严重干扰的情况下常富含可溶性有机 N (DON), 约为全 N 的 35%。土壤中的矿质态 N 是湿地生态系统中总 N 库的过渡库, 主要包括 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N, 该形态 N 素可被植物直接吸收和利用, 但其含量较低, 不足土壤全 N 的 2%^[8]。

从影响因子看, 环境因子强烈制约着土壤 N 素的累积和损失。土壤 N 素含量具有一定的生物气候地带性, 一般呈随温度和降水量的增加而增加的变化趋势, 但温度的增加又易导致有机质分解加速^[6]。Jacobson 等^[9]研究发现干旱区湿地土壤 N 含量与土壤有机质、黏粒含量相关。Hana 等^[10]研究表明湿地土壤中的 N 素含量与土壤孔隙水中的 NH₄⁺-N 的含量密切相关。此外, 人类活动也是重要影响因子之

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (30100020) 和北京师范大学青年教师科学基金项目资助。

作者简介: 白军红 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事湿地生态过程和景观格局变化的研究。E-mail: junhongbai@163.com

一。Mckinney 等^[11]发现排放污水和施用 N 肥是滨海盐沼湿地的主要 N 源。在空间分布研究方面,国内外许多学者对湿地 N 素的垂直分布和水平分布进行了研究,结果显示 N 素多集中分布在土壤剖面的上部土层,由表层向下呈下降趋势;湿地土壤 N 素在水平分布上具有高度的异质性^[12-13]。Martin 等^[14]运用 N 过程模型模拟研究了湿地 N 素的空间分布规律。

1.2 湿地对 N 素的截留能力研究

20 世纪 70 年代,Odum 等^[15]开创了湿地对养分(包括 N 素)净化研究的先河,随后许多学者在湿地 N 素的净化研究方面开展了更为广泛的研究。

湿地具有很高的 N 持留能力,持留量因气候条件以及湿地类型不同而异^[16]。在温带生态系统中,湖泊和天然沼泽湿地对 N 的持留量依水体的水力学和生物学特征在 10% ~ 90% 范围内变化(包括生物吸收、沉积和反硝化)。当 N 负载 $>0.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时其 N 持留量反而趋于下降^[1]。但 Moustafa 等^[17]则发现湿地 N 负载与其持留量之间不存在显著相关关系。Hoewyk 等^[18]发现滨河湿地对 NO_3^- -N 的持留率达 37% ~ 40%。Wolaver 等^[19]的研究表明湿地对来自表层水的 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、溶解态有机 N (OR-N) 和颗粒 N 有净吸收。水位、水压负荷、有机 C 以及植被等都显著影响着湿地对 N 素的持留能力。Williams 等^[20]发现沼泽湿地 NH_4^+ -N 含量受水位的显著影响,并随水位增加而增加。Ingersoll 等^[21]指出湿地对 N 的持留能力与水压负荷以及有机 C 的输入(植物残体的输入)密切相关,随水压负载率的增加而下降,随有机 C 的增加而增加。Stefan 等^[22]在研究大型湿地植物对硝酸盐的持留作用时还发现大型植被更有助于湿地对养分的持留。国内在湿地对 N 的持留能力研究方面也已做了不少工作。尹澄清等^[23]对白洋淀湿地的研究表明,水陆交错带群落之间的小沟能有效地截留陆源营养物质,对地表径流总 N 的截流率可达 42%。曲向荣等^[24]报道了辽东湾芦苇湿地对陆源 N 素的净化率在 60% 以上。

1.3 湿地 N 素迁移转化过程研究

近 20 多年来,由于 N 肥用量剧增,致使许多湖泊、水库以及湿地等生态系统的 N 负荷急速上升,富营养化、 NO_3^- -N 对地表水和地下水的污染^[25]等环境问题日益严重并引起了人们的极大关注,因此,它在土壤中的运移行为已经成为环境科学和土壤学

研究中的热点问题^[26]。Reddy 等^[27]和 Patrick 等^[28]研究表明 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的垂向扩散都是影响湿地淹水土壤或沉积物中 N 损失的重要过程。Chen 等^[29]报道了湿地水位上升时,硝酸盐向滨河湿地输移量受河边植被和土壤的影响。Groffman 等^[30]指出温带地区的滨河森林湿地可抑制 NO_3^- -N 由高地向河流运移。国内外涉及自然湿地土壤 NH_4^+ 运移的研究都还不多见。干湿沉降是天然生态系统中 N 素的一个重要输入源,它显著影响着群落的组成和生态系统过程^[6]。国外自 20 世纪 50 年代就已经开始了对 N 沉降的研究^[31],而国内对干湿沉降的研究自 20 世纪 80 年代才开始对降雨进行系统监测。 N_2O 排放是土壤 N 素向大气输送的一个主要途径;大气中的 N_2O 也主要来源于陆地土壤。Byrnes^[32]认为有 90% 的 N_2O 可能来自陆地土壤硝化和反硝化过程。湿地是温室气体 N_2O 的源、汇或转换器。全球变暖趋势的增强,使湿地温室气体排放研究倍受关注。近些年来国内对湿地土壤 N_2O 的排放通量及其影响因素等方面的研究主要集中在人工湿地—水稻田上^[33]。刘景双等^[34]对三江平原沼泽湿地 N_2O 浓度和排放特征进行了开创性的研究,填补了国内对天然沼泽湿地 N_2O 排放研究领域的空白。氨挥发也是湿地土壤 N 损失的途径之一,主要受水体 pH 值的调控^[4]。

土壤有机质的矿化分解也是土壤 N 素的一个输入源,但它也可能被土壤微生物所利用。国内外对湿地土壤有机 N 的矿化过程研究主要集中在矿化速率和矿化势^[35-36]及其影响因素方面。土壤有机质和 N 含量是影响矿化过程的重要影响因子。Liu 等^[37]研究表明植被通过凋落物质量和养分利用效率来直接影响 N 素的“矿化-固化”过程。Wilson 等^[38]指出土壤水分状况和温度通过影响微生物区系和活性,显著影响着有机 N 的矿化和生物固定。Stevens 等^[39]认为 NO_3^- -N 是硝化过程的主要产物,而 N_2O 的形成则是特殊情况,它需要特殊的条件,如 O_2 胁迫和低 pH 值。Brix 等^[40]研究表明硝化过程是潜流型芦苇湿地去除 NH_4^+ -N 的主要途径之一。Hosomi 等^[41]指出冬季湿地土壤 N 素因硝化作用抑制导致较低的转移率。反硝化过程是在厌氧条件下微生物把 NO_3^- -N 还原为气态 N (N_2O 或 N_2) 的过程^[42-43]。大量研究表明土壤在渍水条件下,贴水层 0 ~ 1 cm 的土壤属于氧化层,而其下层为还原层主要进行反硝化过程^[44];该转化过程在湿地生物地球化学和湿地水质净化功能维持方面都发挥着重要的作用。Whitney

等^[45]的研究也发现反硝化过程是盐沼湿地脱硝酸盐的重要途径。但国内对湿地土壤 N 素的化学过程研究主要集中在人工湿地(水稻田)上^[33, 35-36]。

20 世纪 60~80 年代期间, 国外许多研究就已经证实了盐沼湿地中 N 素对植物生长的限制作用^[46]。近年来美国和法国对盐沼湿地植物尤其是在海岸盐沼植物生长、分解、积累过程和种群动态研究以及法国对自然及人类活动对盐沼植被的干扰及其响应研究方面分别做了大量的长期定位监测^[47-48]。我国对湿地 N 素的生物过程已有一些研究, 主要集中在禾本科植物对 N 素的积累和分配等方面^[49]。

湿地 N 素的迁移转化过程可划分为系统内和系统外两种过程^[1]。系统外过程包括系统输入和输出过程, 其中系统的输入涉及生物固 N、径流输入和 N 沉降等过程; 系统的输出涉及径流输出、氨挥发、反硝化气态损失、淋失、植物收获等过程; 系统内部过程包括矿化-固定、硝化-反硝化、吸附与解析、植物吸收等过程。这些过程主要发生在大气内部、土壤内部、水体内部的物理、化学和生物学过程的综合, 其中有些过程是交叉进行的, 它们之间存在着密切的耦合关系, 相互制约、相互作用。

2 小结

综上所述, 国外对湿地土壤 N 素的研究主要集中在滨海盐沼湿地和泥炭湿地上, 且缺乏系统性和连续性研究, 而对内陆潜育沼泽天然湿地的 N 素的迁移转化作为一个连续过程进行研究的还不多见, 对 N 的生物地球化学过程进行系统综合研究更是鲜有报道。与国外相比, 国内对湿地 N 素生物地球化学过程研究相差甚远。国内对湿地 N 过程的研究不仅起步较晚, 且其以往的研究主要集中在人工湿地尤其是水稻田方面和沼泽湿地土壤-植物系统中 N 素的空间分布和季节动态变化上, 在湿地土壤 N 素时空变化研究过程中以少数剖面点来代表面的研究居多, 而忽略了土壤本身的异质性。

全球环境问题的加剧、人类对环境质量的日益关注, 以及“3S”(GIS, RS 和 GPS) 技术的广泛应用为沼泽湿地 N 素过程研究提供了新的契机, 使湿地 N 循环研究进入一个新的发展阶段。未来的湿地土壤 N 素研究应侧重于以下两个方面: ①研究方法上应注重多学科交叉, 以地球系统科学为指导, 从可持续发展的角度, 充分运用土壤学、水文学、生

态学、环境科学、生物地球化学等理论与方法, 在“3S”技术的支持下, 进行综合定性分析和量化模拟预测, 采用野外调研与室内实验分析相结合、定位观测与室内模拟相结合、宏观论证与微观分析相结合的研究方法。②研究重点应转向在 GIS 技术平台的支持下, 运用其强大的空间分析功能, 重点研究人类活动强烈干预背景下(尤其是土地利用/土地覆被变化)对湿地生态系统的 N 素生物地球化学过程的影响及其与环境质量的相互关系。

参考文献:

- [1] Mitsch WJ, Gosselin JG. Wetlands. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 2000: 89-125
- [2] Downing JA, McClain M, Twilley R, Melack JM, Elser J, Rabalais NN, Lewis WM, Turner RE, Corredor J, Soto D, Yanez-Arancibia A, Kopaska JA, Howarth RW. The impact of accelerating land-use change on the N-Cycle of tropical aquatic ecosystems: Current conditions and projected changes. *Biogeochemistry*, 1999, 46: 109-148
- [3] Dörge J. Modelling nitrogen transformations in freshwater wetlands-estimating nitrogen-retention and removal in natural wetlands in relation to their hydrology and nutrient loadings. *Ecological Model*, 1994, 75: 409-420
- [4] Martin JF, Reddy KR. Interaction and spatial distribution of wetland nitrogen processes. *Ecological Modelling*, 1997, 105: 1-21
- [5] 张驰, 李生秀, 王长春. 氮素在地球生物中的分布及循环. *西北农业大学学报*, 1995, 23 (1): 93-97
- [6] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学. 北京: 科学出版社. 1983
- [7] 白军红, 邓伟, 朱颜明, 张玉霞, 栾兆擎. 水陆交错带土壤氮素空间分异规律研究—以月亮泡水陆交错带为例. *环境科学学报*, 2002, 22 (3): 343-348
- [8] 白军红, 王庆改. 向海沼泽湿地土壤氮素分布特征及生产效应研究. *土壤通报*, 2002, 33 (2): 113-116
- [9] Jacobson PJ, Jacobson KM, Angermeier PL, Cherry DS. Hydrologic influences on soil properties along ephemeral rivers in the Namib Desert. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45 (1): 21-34
- [10] Hana íková. Chemical characteristics of soils and pore waters of three wetland sites dominated by *Phragmites australis*: Relation to vegetation composition and reed performance. *Aquatic Botany*, 2001, 69 (2/4): 235-249

- [11] McKinney RA, Nelson WG, Charpentier MA, Wigand C. Ribbed mussel nitrogen isotope signatures reflect nitrogen sources in coastal salt marshes. *Ecological Applications*, 2001, 11 (1): 203–214
- [12] Chapelle A. A preliminary model of nutrient cycling in sediments of a Mediterranean lagoon. *Ecological Model*, 1995, 80: 131–147
- [13] 白军红, 邓伟, 张玉霞, 王国平, 徐小锋. 洪泛区天然湿地有机质及氮素的空间分布特征. *环境科学*, 2002, 23 (2): 77–81
- [14] Martin JF, Reddy KR. Interaction and spatial distribution of wetland nitrogen processes. *Ecological Modelling*, 1997, 105: 1–21
- [15] Odum HT, Ewel KC, Mitsch WJ. Recycling treated sewage through Cypress wetlands in Florida// D'Itri FM. *Wastewater Renovation and Reuse*. New York: Marcel Decker, 1997: 35–67
- [16] Price JS, Waddington JM. Advances in Canadian wetland hydrology and biogeochemistry. *Hydrological Processes*, 2000, 14: 1579–1589
- [17] Moustafa MZ, Chimney MJ, Fontaine TD. The response of a freshwater wetland to long-term "low level" nutrient loads-marsh efficiency. *Ecological Engineering*, 1996, 7: 15–33
- [18] Hoewyk DV, Groffman PM, Erik Kiviat. Soil nitrogen dynamics in organic and mineral soil calcareous wetlands in eastern New York. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 2168–2173
- [19] Wolaver TG. Tidal exchange of nitrogen and phosphorus between a mesohaline vegetated marsh and the surrounding estuary in the lower Chesapeake Bay. *Estuarine and Coastal Shelf Science*, 1983, 16: 321–332
- [20] Williams BL, Buttler A, Grosvernier P, Francez AJ, Gilbert D, Ilomets M, Jauhiainen J, Matthey Y, Silcock DJ, Vasander H. The fate of NH_4NO_3 added to *Sphagnum magellanicum* carpets at five European mire sites. *Biogeochemistry*, 1999, 45: 73–93
- [21] Ingersoll TL and Baker LA Nitrate removal in wetland microcosms. *Water Research*, 1998, 32 (3): 677–684
- [22] Weisner SEB, Eriksson PG, Granéli W, Leonardson L. 大型植物对湿地中硝酸盐的持留作用. *人类环境杂志 (AMBIO)*, 1994, 23 (6): 363–366
- [23] 尹澄清. 内陆水-陆地交错带的生态功能及其保护与开发前景. *生态学报*, 1995, 15 (3): 331–335
- [24] 曲向荣, 贾宏宇, 张海荣, 李秀珍, 李培军. 辽东湾芦苇湿地对陆源营养物质净化作用的初步研究. *应用生态学报*, 2000, 11 (2): 270–272
- [25] 王家玉, 王胜佳, 陈义, 郑纪慈, 李超英, 计小江. 稻田土壤中氮素淋失的研究. *土壤学报*, 1996, 33 (1): 28–36
- [26] Chang C, Entz TJ. Nitrate leaching losses under repeated cattle feedlot manure application in Southern Alberta. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25 (1): 145–153
- [27] Reddy KR, Patrick WHJr, Phillips RE. Evaluation of selected processes controlling nitrogen loss in a flooded soil. *Soil Science Society of American Journal*, 1980, 44: 1241–1246
- [28] Patrick WHJr, Reddy KR. Nitrification-denitrification reactions in flooded soils and sediments: Dependence on oxygen supply and ammonium diffusion. *Journal of Environmental Quality*, 1976, 5: 469–472
- [29] Chen R, Twilley RR. Patterns of mangrove forest structure and soil nutrient dynamics along the Shark river estuary, Florida. *Estuaries*, 1999, 22 (4): 955–970
- [30] Groffman PM, McDowell WH, Myers JC, Merriam JL. Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forests. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33: 1339–1348
- [31] 李玉中, 祝廷成, 姜世成. 羊草草地生态系统干湿沉降氮输入量的动态变化. *中国草地*, 2000, (2): 24–27
- [32] Byrnes BH. Environmental effects of N fertilizer use—A review. *Fertilizer Research*, 1990, 26: 209–215
- [33] Gao XJ, Hu XF, Wang SP, He BG, Xu SY. Nitrogen losses from flooded rice field. *Pedosphere*, 2002, 12 (2): 151–156
- [34] 刘景双, 王金达, 李仲根, 于君宝, 张学林, 王春梅, 王艳. 三江平原沼泽湿地 N_2O 浓度与排放特征初步研究. *环境科学*, 2003, 24 (1): 33–39
- [35] 李慧琳, 韩勇, 蔡祖聪. 上海地区水稻土氮素矿化及其模拟. *土壤学报*, 2004, 41 (4): 503–510
- [36] Li HL, Han Y, Cai ZC. Modeling nitrogen mineralization in paddy soils of Shanghai region. *Pedosphere*, 2003, 13 (4): 331–336
- [37] Liu SG, Reins WA, Michael K, Schimel DS. Simulation of nitrous oxide and nitric oxide emissions from tropical primary forests in the Costa Rican Atlantic zone.

- Environmental Modeling & Software, 2000, 15: 727-743
- [38] Wilson DJ, Jefferies RL. Nitrogen mineralization, plant growth and goose herbivory in an Arctic coastal ecosystem. *Journal of Ecology*, 1996, 84: 841-851
- [39] Stevens RJ, Laughlin RJ, Malone JP. Soil pH affects the process reducing nitrate to nitrous oxide and di-nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30 (8/9): 1119-1126
- [40] Brix H, Schierup H. Soil oxygenation in constructed reed beds: The role of macrophyte and soil-atmosphere interface oxygen transport//Cooper PF, Findlater BC. *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*. Oxford: Pergamon, 1990: 53-66
- [41] Hosomi M, Murakami A, Sudo R. Four-year mass balance for a natural wetland system receiving domestic wastewater. *Water Science and Technology*, 1994, 30 (8): 235-244
- [42] 李振高, 俞慎. 土壤硝化-反硝化作用研究进展. *土壤*, 1997, 29 (6): 281-286
- [43] 金雪霞, 范晓晖, 蔡贵信, 贺发云, 李辉信, 黄耀. 菜地土壤氮素矿化和硝化作用的特征. *土壤*, 2004, 36 (4): 382-386
- [44] Groffman PM, Hanson GC. Wetland denitrification: Influence of site quality and relationships with wetland delineation protocols. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61 (1): 323-329
- [45] Whitney DM. The cycles of nitrogen and phosphorus // Pomeroy LR, Wiegert RG. *The Ecology of a Salt Marsh*. New York: Springer-Verlag press, 1981: 163-181
- [46] Lee JA, Mcneill S, Rorison IH. Nitrogen as an Ecological Factor. London: Blackwell Scientific Publication, 1981: 98-100
- [47] Allan Crow, Quebec. Millennium Wetland Event Program with Abstracts. Quebec, Canada: Elizabeth, MacKay, 2000: 1-256
- [48] Sundareshwar PV, Morris JT. Phosphorus sorption characteristics of intertidal marsh sediments along an estuarine salinity gradient. *Limnol. Oceanogr.*, 1999, 44 (7): 1693-1702
- [49] 孙雪利, 刘景双, 于君宝. 三江平原小叶章、毛果苔草中氮素营养动态分析. *应用生态学报*, 2000, 11 (6): 893-897

Nitrogen in Wetland Soils: A Review

BAI Jun-hong¹, LI Xiao-wen¹, CUI Bao-shan¹, WANG Qing-gai²

(¹ Environmental College, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

² Appraisal Center for Environment and Engineering, State Environmental Protection Administration, Beijing 100012, China)

Abstract: Wetland, with important ecological functions and values, is an ecological landscape rich in biodiversities and one of the most important habitats for man. Wetlands serve as source, sink or transfer of nitrogen, and concentrations, movement and transformation of nitrogen in wetland soils will significantly influence the structures and functions of wetland ecosystems. Hence study on nitrogen in wetland soils has become one of the hot spots at present. Nitrogen is one of the indicators of nutrient level in wetlands. Studies on nitrogen contents in wetland soils, nitrogen retention in wetlands and processes of nitrogen movement and transformation were reviewed in this paper.

Key words: Wetland soils, Nitrogen, Retention, Movement, Transformation