



白军红◎著

内陆盐沼湿地土壤氮素

生物地球化学过程

NEILU YANZHAOSHIDI TURANG DANSU
SHENGWU DIQIU HUAXUE GUOCHENG



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社



白军红◎著

内陆盐沼湿地土壤氮素

生物地球化学过程

NEILU YANZHAOSHIDI TURANG DANSU
SHENGWU DIQIU HUAXUE GUOCHENG



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

内陆盐沼湿地土壤氮素生物地球化学过程/白军红著.
—北京:北京师范大学出版社, 2016.1
ISBN 978-7-303-19301-1

I. ①内… II. ①白… III. ①盐沼泽—土壤氮素—
生物地球化学—研究 IV. ①P941.78 ②P593

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 173198 号

营 销 中 心 电 话 010-58805072 58807651
北师大出版社学术著作与大众读物分社 <http://xueda.bnup.com>

出版发行:北京师范大学出版社 www.bnup.com
北京市海淀区新街口外大街 19 号
邮政编码: 100875

印 刷: 保定市中华美凯印刷有限公司
经 销: 全国新华书店
开 本: 787 mm×1092 mm 1/16
印 张: 17
字 数: 388 千字
版 次: 2016 年 1 月第 1 版
印 次: 2016 年 1 月第 1 次印刷
定 价: 58.00 元

策划编辑: 胡廷兰 关雪菁	责任编辑: 宋淑玉
美术编辑: 王齐云	装帧设计: 王齐云
责任校对: 陈 民	责任印制: 马 洁

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58805079

前 言

湿地是缓冲地球表生环境变化的天然屏障，是氮的储集库，对氮素具有巨大的持留能力，发挥着拦截陆源污染、净化水体、改善水质等生态服务功能。同时，氮素也是湿地营养水平的指示剂之一，是天然湿地或人工湿地(水稻田)土壤肥力的主要限制性因子，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因素之一，其含量变化对湿地的结构和功能具有显著影响。湿地生物地球化学过程不仅影响着区域的物质输移、能量流动和湿地生产过程，而且在较大程度上影响着全球气候变化。湿地作为氮素的源、汇或转化器，可促进、延缓或遏制环境恶化趋势。但长期以来，国内湿地研究主要集中在宏观湿地(沼泽)调查和资源利用方面，对湿地过程与效应的研究亟待加强。

湿地氮素的传输过程是指氮素在湿地土壤和植物之间进行的各种迁移转化和能量交换过程，其过程可划分为系统内和系统外两种，主要包括物理过程、化学过程及生物过程。湿地氮素的传输过程与土壤、植物的发生、发展紧密联系在一起，并形成了空气—水—土—生命系统中物质和能量的复杂动力流动网络，显著影响着湿地生态系统的结构和功能。湿地土壤氮素的迁移过程及转化产物直接关系到浅层地下水和地表水的水质安全。湿地中氮的矿化速率决定了湿地土壤中用于植物生长的氮素的可利用性。而氮的可利用性又限制了植物对土壤氮素的利用效率，直接影响着湿地生态系统的净初级生产力和群落组成。因此，开展湿地土壤氮素的传输过程研究可为全球氮循环研究提供科学依据，也可为湿地土壤质量演变和水体富营养化防治提供有效保障措施。

松嫩平原西部属于半干旱区域，为我国广大农牧交错带与生态脆弱带的典型代表，是目前国家关注的重点治理区。由于西部地区沙化、盐碱化和退



化面积仍在扩展,水资源危机日益突出,松嫩平原西部的整体生态环境不断恶化。但该区是内陆盐沼湿地的集中分布区之一,分布有9块国家重要湿地,其中向海湿地和扎龙湿地为国际重要湿地,所以湿地的气候调节功能以及蓄水功能显得尤为重要。向海湿地已成为维持该区生态平衡的关键因素,也是东部生态环境保护的天然屏障之一,但随着人类对资源环境开发力度的加强,人类活动已经成为影响湿地中元素迁移、转化和循环的强大动力。湿地氮素的传输过程对湿地植物、土壤、水体等环境因子也产生了显著的影响。氮沉降、径流侵蚀、沉积作用、生物吸收和脱氮作用等方式是影响湿地地表水体水质的主要自然途径。盲目开垦、超载放牧、修建水利工程、芦苇收割等人类活动显著影响着向海湿地氮素的转换过程及反应途径,给生态环境带来了潜在威胁。尽管向海湿地已被列为国际重要湿地,但对其开展的研究工作尤其在微观研究上极为匮乏。在向海湿地日益受到关注的背景下,对其开展系统性研究工作,无疑会对人类深入认识及定量化研究向海湿地生态服务功能提供有价值的参考,同时可以为半干旱区内陆湿地的合理利用和管理以及国家湿地公约履约提供科学依据。

本书的核心内容是作者的博士学位论文,后期对其进行了完善和扩充。该书的出版得到了北京师范大学“京师青年教师出版资助基金”和北京师范大学出版社的资助。本书共分八章,第一章阐明了研究的目的和意义,综合分析了湿地氮素的生物地球化学过程的内涵、国内外研究现状、存在的不足及亟待深化研究的问题;第二章介绍了向海湿地的自然环境特征;第三章深入研究了内陆盐沼湿地氮素的时空动态分布特征;第四章通过示踪研究、培养试验、野外观测和室内分析等手段定量研究了内陆盐沼湿地氮素的传输过程和通量;第五章探寻了内陆盐沼湿地氮素迁移转化过程的主要机理;第六章论述了内陆盐沼湿地氮素生物地球化学过程的主要影响因素;第七章分析了湿地氮素生物地球化学过程的生态效应;第八章为研究的结论和展望。

在本书出版之际,我谨向我的导师邓伟研究员致以崇高的敬意和衷心的感谢!恩师渊博的学识、严谨求实的学风、开拓创新的思维方式以及待人接物的处世哲学将使我受益终生;恩师授业解惑,替我拨开思想的迷雾,给予我无限的关爱,用生命的火炬照亮我前进的航程。同时,我对蔡祖聪教授在实验过程中给予的无私指导和帮助也表达诚挚的感谢!我也向所有在研究工



作中给予我诸多帮助和指导的各位老师、同学和朋友致以深深的谢意！在此，对北京师范大学出版社的胡廷兰、宋淑玉等编辑的帮助和支持也一并致谢！

由于作者水平有限，以及湿地氮素生物地球化学过程的复杂性，书中难免有疏漏或错误，不当之处敬请批评指正。

白军红

2015年6月21日

目 录

前言

第一章 绪 论	1
第一节 湿地生物地球化学过程概述	1
第二节 湿地氮素生物地球化学国内外研究进展	4
第三节 国内外研究中存在的问题及亟待深化的重点	22
第四节 湿地氮素生物地球化学研究的意义	24
第二章 向海湿地的自然环境特征	28
第一节 地质条件	28
第二节 地貌特征	29
第三节 水文状况	30
第四节 气候特征	32
第五节 植被和动物	35
第六节 向海湿地土地利用/覆被类型现状及其土壤特征	36
第七节 向海湿地面临的环境问题	39
第八节 样地选择	40
第九节 小 结	40
第三章 内陆盐沼湿地氮素的时空分布	42
第一节 内陆盐沼湿地氮素的空间分布格局	43
第二节 内陆盐沼湿地土壤氮素的季节动态特征	69
第三节 小 结	86



第四章 内陆盐沼湿地氮素的传输过程及通量	88
第一节 物理过程	88
第二节 化学过程	116
第三节 生物过程	142
第四节 小 结	156
第五章 内陆盐沼湿地氮素生物地球化学过程模式与内在机理探析	158
第一节 内陆盐沼湿地系统氮素迁移转化过程模式概化	158
第二节 内陆盐沼湿地氮素传输过程内在机理探析	159
第三节 小 结	167
第六章 内陆盐沼湿地氮素传输过程的关键影响因素	168
第一节 湿地土壤理化性质	168
第二节 湿地生物	183
第三节 气象因子	190
第四节 湿地水文条件	195
第五节 人类活动	215
第六节 小 结	217
第七章 湿地氮素生物地球化学过程的生态效应	218
第一节 湿地 N_2O 排放和氨挥发的生态效应	218
第二节 湿地氮素的迁移转化过程对水环境的影响	221
第三节 湿地氮素的迁移转化过程对土壤环境的影响	223
第四节 湿地氮素生物地球化学过程对生物的影响	225
第五节 小 结	228
第八章 结论与展望	229
第一节 结 论	229
第二节 展 望	232
参考文献	233

第一章 绪 论

第一节 湿地生物地球化学过程概述

地球是一个复杂的巨系统,自从地球上出现生命以来,自然界中就一直在进行着各种生物地球化学过程,使地球成为一个有别于其他星球的生物与环境之间相互作用的代谢系统。伴随着生物演化过程,自然界中的生物地球化学过程也得以快速发展。在几十年至几百年的时间尺度上,地球演变过程主要取决于物理气候系统和生物地球化学循环过程,而在这种过程中,人类活动正逐渐成为影响生物地球化学过程的新的强大动力(王将克,1999)。湿地作为地球表层的一个界面,是岩石圈、生物圈、水圈、大气圈和人类圈相互联系的重要纽带和多种运动形态物质体系的交汇场所,也是地球上能量交换、物质迁移运动最活跃的一个圈层(Mitsch and Gosselink, 2000)。由于水陆环境的差异,物质、能量必然通过各种物理、化学和生物过程进行跨介质迁移(叶常明,1995),而湿地作为水陆两个环境介质之间的重叠部分,物质、能量、信息、物种通过湿地界面的传输转化具有明显的非线性和类生命体特征。在水陆过渡带上,水、土、生物之间的相互作用形成的水文过程、生物地球化学过程和湿地生物的适应,使其具有独特的物理、化学、生物学的结构和功能,产生湿地特有的环境功能和生态效益,提供多种生态服务和自然资源(Mitsch and Gosselink, 2007)。湿地的水陆相互作用过程和湿地的资源环境效应是包括人文圈在内的各圈层耦合作用的具体表现,并始终贯穿于水—生物、水—土、土—生物各界面的能量交换和物质传输和转化的过程之中。因此湿地生态系统的主要功能体现在:调控区域内的水分循环;调节区域乃至全球碳、氮等元素的生物地球化学循环;提供生物生产力;分解进入湿地的各种物质及作为生物的栖息地(Middleton, 1999)。



1 湿地生物地球化学过程的概念

生物地球化学(biogeochemistry)以研究地球表面化学过程为主(韩兴国, 1999), 尤其是生物圈中的生物有机体及其产物(动、植物有机体, 生命活动产物以及死亡后分解产物——有机质、生物常量元素和微量元素)与其周围无机环境之间的地球化学作用、物质循环、能量交换和演化规律(王将克, 1999), 涉及地球科学与生命科学诸多分支学科, 是一门具有高度综合性的交叉学科, 强调生态系统不同组分间的物理、化学和生物过程的相互作用。营养物质在生态系统之间的输入和输出以及在生物各圈层之间进行的物质和能量交换称为生物地球化学循环(biogeochemical circulation)(谢炳庚等, 1997), 它实质上是指生物有机体及其产物与无机环境之间进行的物质传输和能量交换过程(Reddy and DeLaune, 2008)。湿地生物地球化学包含元素或化合物在湿地内的气态—液态—固态的转化, 因此更广义的生物系统生物地球化学的定义对于湿地生物地球化学也适用(Reddy and DeLaune, 2008)。

湿地生物地球化学过程是指碳、氮、磷、硫以及各种生命必需元素在湿地土壤和植物之间进行的各种迁移转化和能量交换过程(Reddy and DeLaune, 2008), 其过程可划分为系统内和系统外两种过程, 主要包括物理过程、化学过程及生物过程(白军红等, 2002a)。系统内过程是指湿地中各种淤积物以及湿地内生物呼吸时进行的物质交换以及化学物质转化过程, 包括废物生产、再矿化和各种化学转化途径(Mitsch and Gosselink, 2000)。而系统外过程则是指湿地与毗邻生态系统之间进行的化学物质交换过程, 包括入流(inflows)以及出流(outflows), 主要通过气象、水文地质和生物三条途径来实现(Mitsch and Gosselink, 2000)。湿地生物地球化学过程可以简单地描述为物质从水体(或大气)到土壤, 再到植物和动物; 植物枯枝落叶、动物经食物链, 一部分最终进入人体, 一部分死亡后分解, 再回到水体和土壤(或大气)(姚志刚等, 2006)。湿地是介于陆地生态系统和水生生态系统之间的过渡地带, 它是一种特殊的生态系统, 其独特多样的生物条件和水文过程显著影响着生物地球化学过程。这些过程不仅改变了物质的化学组成, 而且使它们在湿地内发生空间位移以及生物地球化学转化(Mitsch and Gosselink, 2007)。湿地土壤以淹水(至少在洪水期)为特征, 永久积水或间歇淹水使得湿地生态系统一些生物地球化学过程不同于陆生或水生生态系统。生物地球化学循环并不是封闭的, 而是一种复式、螺旋式的循环(王将克, 1999)。同样, 湿地生物地球化学循环也不例外。湿地生态系统与其周围环境进行着剧烈的物质和能量交换, 所以从生物地球化学意义上讲, 湿地生态系统是一个开放系统。



营养物质在生态系统之间的输入和输出以及在各圈层之间进行的物质和能量交换过程实质上是指生物有机体及其产物与无机环境之间进行的物质传输和能量交换过程(白军红等, 2002a)。这一过程主要包括几个方面: 所有的生命有机体都能从其周围环境中吸收营养物质——生命必不可少的各种元素和无机化合物, 同时又通过排泄或呼吸作用把废物排到体外周围环境中; 当生命有机体死亡后, 其残体通过微生物降解成为简单化合物返回到自然环境中(王将克, 1998)。

2 湿地生物地球化学过程的基本特征

2.1 湿地发挥着化学物质的源、汇和转化器的功能

湿地可作为养分、化学污染物的源或汇, 因此湿地对水质和生态系统的生产力具有重要的影响(Reddy and DeLaune, 2008)。如果湿地对某种元素或污染物有净持留量, 则认为此湿地是该元素或污染物的汇, 在该系统中元素被转化为生物无效态。如果湿地向下游或毗邻生态系统中输送的某种元素或污染物质多于其输入量, 则认为此湿地是该元素或污染物的源。如果湿地对某种化学物质只改变其存在形式如从溶解态转化到粒子态而不改变其输移量, 则认为此湿地为该物质的转化器(Mistch and Gosselink; 2007)。湿地的化学质量平衡决定着湿地作为化学物质的源、汇和转化器的功能(Mistch and Gosselink, 2007); 而且外部环境因子如湿地水位和湿地淹水频率的变化会显著影响湿地源、汇或转化器功能的转化(Bai et al., 2005; 白军红等, 2005)。

2.2 湿地与毗邻生态系统之间进行物质交换

湿地生态过程的主要驱动力就是生态系统生物地球化学(Reddy and DeLaune, 2008), 基于生态水文过程湿地生态系统与毗邻生态系统进行着密切的化学物质交换。这种交换过程主要发生在湿地生态系统与毗邻的河流湿地、湖泊湿地、草地、林地或农田生态系统之间(Bai et al., 2007)。滨海盐沼湿地与其毗邻河口连续进行着水体交换。河口湿地在咸淡水交汇时也会发生一系列化学反应, 包括粒子物质的溶解、絮凝、化学沉淀以及粘土、有机物和污泥粒子对化学物质的吸附和吸收(Mistch and Gosselink, 2000)。湿地土壤中的化学物质常由无机态转变为有机态或由有机态转化为无机态, 并被输送到湿地下游的生态系统。

2.3 化学物质的固定和释放具有明显的季节性特征

湿地植物吸收直接影响着土壤中元素含量的季节动态变化。在植物的不同生长发育阶段, 土壤中元素含量表现出显著差异。已有研究表明湿地土壤中的氮素含量依植被的生长发育节律, 随着物候期的变化而不断变化(白军红



等, 2005; 何池全, 2003)。湿地植物在生长季节能够吸收大量的养分, 如氮、磷等。植物枯死后, 植物地上部分养分被转移到植物的地下部分, 或通过凋落物累积到湿地土壤表层, 但同时也有相当一部分养分因淋滤作用而进入水体。湿地中养分输移呈季节性变化, 使湿地作为养分的源汇功能发生转变。通常湿地生态系统在生长季为 CO_2 的汇, 在非生长季为 CO_2 的源 (Lund et al., 2007)。淡水沼泽湿地在冬季表现为 N_2O 的弱汇, 而在冻融期则转变为 N_2O 的源 (Zhang et al., 2005; 宋长春等, 2005)。但是湿地生态系统作为物质的源汇功能转变受土壤理化性质、生物群落、水文条件、气温等环境因子的制约 (孙志高等, 2008; 董成仁等, 2015)。

2.4 物质循环过程不同于陆生和水生生态系统

与陆生生态系统不同, 湿地能够通过生物累积和沉积过程把元素贮存于湿地土壤/沉积物中, 并通过物质循环过程进行生物地球化学传输; 而且湿地中的物质通量大且循环速度较快。由于水文过程的周期性变化, 湿地土壤/沉积物中的有机物质会发生生物分解和化学转化, 导致存留时间比深水生态系统沉积物中的物质存留时间短 (Mitsch and Gosselink, 2007)。而且许多湿地植物能够从湿地土壤/沉积物中吸收化学元素, 通过凋落物分解归还过程使其累积到湿地土壤表层 (邓伟等, 2012); 而水生生态系统中的浮游植物则主要从水体中获得可溶性的有效元素, 并通过生物促淤不断累积到还原性沉积物表层。

第二节 湿地氮素生物地球化学国内外研究进展

1 湿地研究进展概述

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, 对维持自然界生态过程和平衡起着十分重要的作用。而沼泽是湿地的基本组分、主要类型或核心部分。与其他类型的湿地相比, 沼泽湿地更具代表性和典型性。沼泽湿地的研究至今也经历了漫长的发展历程: 萌芽时期 (20 世纪以前)——发展初期 (20 世纪初至中叶)——发展中期 (20 世纪中叶至 1982 年)——成熟时期 (1982 年至今) (王宪礼等, 1997; 吕宪国等, 1998; 余国营, 2000)。1986 年 Mitsch and Gosselink 编著的《湿地》被誉为第一部系统介绍湿地科学的理论著作、最综合的湿地学教科书, 填补了湿地科学的空白, 至 2015 年已发行至第五版 (Mitsch and Gosselink, 2015)。



我国自 1992 年加入《湿地公约》以来也掀起了沼泽湿地的研究热潮。1998 年问世的《中国沼泽志》是我国沼泽湿地研究成果的结晶。近年来国内学者与国际前沿领域相接轨,开始着手进行湿地滤过作用的研究,主要体现在以下三个方面:一是水文调节过程;二是营养物质和污染物的生物地球化学过程;三是水和盐调节的生态环境效应研究。中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地过程与环境开放实验室和北京师范大学均建立了湿地过程模拟实验室,重点开展了以湿地营养元素生物地球化学过程为主要内容的研究,并取得了丰富的研究成果。

2 湿地氮素生物地球化学研究进展

2.1 湿地氮素贮量研究

从地域尺度上看,氮素主要贮存在地壳、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氮素贮存量做了大量研究(Vitousek et al., 1997; 张驰等, 1995; 袁可能, 1983),但对湿地氮素贮量的研究主要集中在区域尺度上(Downing et al., 1999),有待于从局地尺度上做进一步精细研究以减弱在区域或全球尺度上估算的不确定性(王世岩, 2000; Bai et al., 2007)。

从氮素形态上看,有机氮是湿地土壤氮素的主要形态,约占湿地土壤总氮含量的 95% 以上(白军红等, 2009)。Downing 等(1999)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 DON, 约为 TN 的 35%。土壤中的矿质氮是湿地生态系统中总氮库的过渡库,主要包括铵态氮和硝态氮;该形态的氮素可被植物直接吸收利用,但其含量较低,不足土壤全氮的 2%(白军红等, 2005)。

从影响因子看,气候条件显著影响着有机质的合成和分解,从而制约着土壤氮素的累积和损失,所以土壤氮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(袁可能, 1983)。McKinney 等(2001)利用蛤贝¹⁵N 同位素示踪研究了滨海盐沼湿地中氮的来源,发现其主要氮源为污水排放和氮肥的施用。Jacobson 等(2000)研究发现干旱区湿地氮含量与粘粒的含量相关。水位波动、湿地植被类型和植物根系显著影响着湿地的全氮含量(Tanner et al., 1999; 石福臣等, 2007; 谢文霞等, 2014)。湿地土壤中的氮素含量还与土壤孔隙水中的铵态氮的含量密切相关(Hana et al., 2001)。人类活动如土地利用变化,特别是湿地开垦及退耕还湿,显著影响着湿地土壤氮含量(Bai et al., 2014b)。



在时空分布研究方面,许多学者对湿地氮素的垂直分布(Rao et al., 1984; Huang et al., 2015)和水平分布(Newman et al., 1997, Bai et al., 2012)进行了研究。Martin 和 Reddy(1997)运用模型模拟研究了湿地氮素的空间分布。许多研究表明湿地土壤氮素含量大都随土壤深度增加而呈下降的变化趋势(Huang et al., 2015; 谢文霞等, 2014)。Bai 等(2012b)分析了黄河三角洲湿地土壤氮素含量的时空分布特征,发现在土壤剖面中间层出现氮的累积峰。

2.2 湿地氮素生物地球化学过程研究

氮素的生物地球化学循环是整个生物圈物质循环的重要组成部分(曾巾等, 2007)。国内外对陆地生态系统尤其是农田生态系统中的氮循环过程研究较多(Vitousek et al., 1997; Mosier et al., 2004; Smill, 2011; 朱兆良和文启孝, 1992),但对湿地生态系统中氮素的生物地球化学过程研究还不成熟,尤其在国内对湿地生态系统中氮的生物地球化学过程研究还存在许多空白点。20 世纪 70 年代以来全球性氮污染的加剧以及人类对全球变化的日益关注,全球氮素的生物地球化学循环研究开始提上日程,湿地研究热点化为湿地氮素的生物地球化学过程研究提供了契机。Odum 等(1977)开创了湿地对养分(包括氮素)净化研究的先河,随后许多学者在湿地氮素的净化研究方面开展了更为广泛的研究(Wolaver et al., 1983; Spieles et al., 2000; McIsaac et al., 2001; Conley et al., 2009; Hill et al., 2014)。

湿地具有很高的氮持留能力,持留量因气候条件以及湿地类型不同而异(Stefan et al., 1994; Price et al., 2000; Hill et al., 2014)。在温带生态系统中,湖泊和自然湿地对氮的持留量依水体的水力学和生物学特征而异,在 10% ~ 90% 范围内变化(包括生物吸收、沉积和反硝化)。当氮负荷大于 $0.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时其氮持留量反而趋于下降(见图 1-1)(Downing et al., 1999)。Moustafa 等(1996)则发现湿地氮负荷与其持留量之间不存在显著相关关系。Luederitz 等(2001)报道了水平流和垂直流人工湿地对总氮的去除率都高达 90% 以上。Hoewyk 等(2000)发现滨河湿地对硝态氮的持留率达 37% ~ 40%。Wolaver 等(1983)的研究表明湿地对来自表层水的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、溶解 OR-N 和颗粒 N 有净吸收。水位、水压负载、有机碳以及植被等都显著影响着湿地对氮素的持留能力。Williams 等(1999)发现沼泽湿地 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量受水位的显著影响,并随水位增加而增加。Ingersoll 和 Baker(1998)提出湿地对氮的持留能力与水压负载率以及有机碳的输入(植物残体的输入)密切相关,随水压负载率的增加而下降,随有机碳的增加而增加。Stefan 等(1994)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

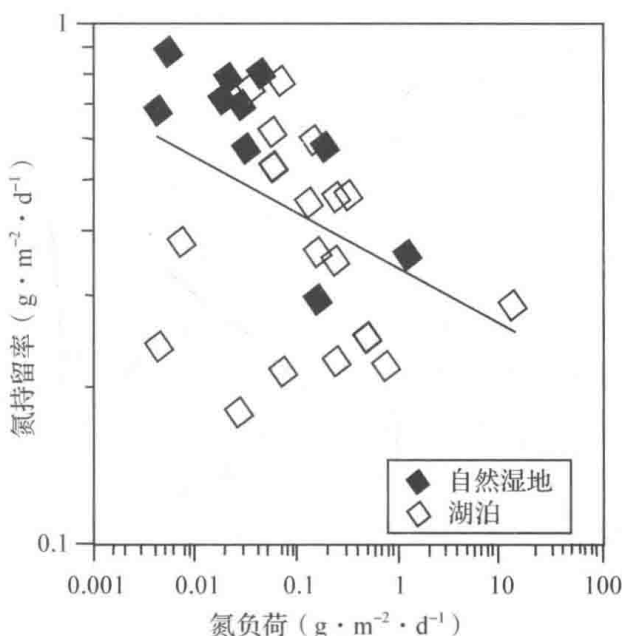


图 1-1 自然湿地和湖泊氮负荷与滞留率之间的关系(Downing et al., 1999)

Fig. 1-1 Relationship of retention rate and load ratio of nitrogen for natural wetlands and lakes(Downing et al., 1999)

湿地对养分的持留。国内在湿地对氮的持留能力方面也做了大量研究工作。尹澄清等(1995)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 TN 的截留率可达 42%。张甲耀(1998)在研究不同植物覆盖的潜流型人工湿地的净化能力时发现植被覆盖的人工湿地对全氮的平均去除率(45.09%)比无植被覆盖的人工湿地的平均去除率(38.69%)高出 6.4%。湿地对氮的净化能力与植被类型有关。曲向荣等(2000)报道了辽东湾芦苇湿地对陆源氮素的净化率在 60% 以上。徐宏伟等(2005)发现三江平原小叶章湿地生态系统对氮的总净化率可高达 97%。刘加珍等(2014)指出东平湖湿地中的菹草对氮的去除率为 85%。

自然沼泽湿地中氮素输入的主要途径包括动植物残体、大气干湿沉降、生物固氮及河水泛滥;输出途径主要有植物吸收、固定、淋滤、氨挥发以及硝化、反硝化等过程。这些过程实质上是物理的、化学的和生物过程的综合,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,不能截然分开。但为了研究的方便,本文将它们划分为物理过程、化学过程和生物过程。

2.2.1 物理过程研究

氮素的物理过程主要指 NH_4^+ 和 NO_3^- 的运移过程、氮沉降、氨挥发和 N_2O



排放。

(1) 土壤氮素运移

土壤氮素运移主要是指 NO_3^- 和 NH_4^+ 的运移行为, 尤其是 NO_3^- 的迁移。由于 NO_3^- 比 NH_4^+ 活跃得多, 主要以溶质的形式存在于土壤溶液中, 很少被土壤吸附, 极易发生淋失。硝态氮的运移行为可分为垂直淋移和水平扩散两种形式。国外对土壤硝态氮的淋洗研究较早且较深入。Warrington (1905) 很早就指出土壤中硝态氮的淋失是导致土壤肥力降低的重要因子, 发展至今不仅对影响硝态氮淋洗的因素已有了全面了解, 且能够建立数学模型, 运用计算机模拟硝态氮的淋洗过程。许多研究还表明 NO_3^- —N 的淋溶特性有可能对地下水造成污染(Addiscott et al., 1991), 并且还有可能导致土壤酸化(Binkley, 1986)。近 20 多年来, 由于氮肥用量剧增, 致使许多湖泊、水库以及湿地中的氮负荷急速上升, 富营养化、硝态氮对地表水和地下水的污染等环境问题日益严重并引起了人们的极大关注, 因此, 氮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(Chang, 1996)。Reddy and DeLaune(2008)详细描述了湿地中氮的迁移转化过程, 认为对铵态氮从还原层向氧化层的扩散和硝态氮自氧化层向还原层的垂向扩散, 都是影响湿地淹水土壤或沉积物中氮损失的重要过程。但 Williams(1999)研究表明与耕作土地相比湿地中的硝态氮的淋失量非常少, 而且 Reilly 等(2000)发现 Prado 湿地地下水中的硝态氮浓度少于 $1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 损失到地下水中的硝态氮可以忽略不计。Snow(1995)研究发现氮素淋失量随着地表覆被物总量的增加而减少, 而且氮素在不同土壤质地类型中的淋失量差异显著, 氮在砂土和砂/泥炭混合土中的淋失量较大(图 1-2), 这表明氮素淋失受土壤质地与结构的影响显

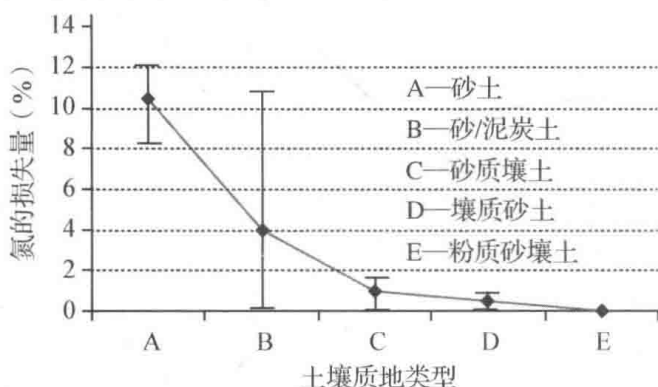


图 1-2 土壤质地类型对氮素淋失的影响(Snow, 1995)

Fig. 1-2 Effects of soil types on nitrogen loss(Snow, 1995)



著,砂含量越高越易淋失。Vasslis(1993)的数值计算研究表明硝态氮在土壤中的迁移转化过程与土壤特性关系密切,且氮素在细砂土中的迁移速率要比沙壤土快得多。在沼泽湿地中氮素的淋失受水位的制约也十分显著(Williams et al., 1999; Chen and Twilley, 1999a)。Wagenet 等(1994)认为控制反硝化作用及生物吸收条件的空间变异及其与水文特征的相关性对于估计田间硝酸盐向地下水淋滤是非常重要的,而且对于流量、生物化学转化而言,异质性可能比详细数据更为重要。

国外一些学者对硝态氮水平运移也做过一些相关研究。Chen and Twilley (1999a)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。Downing 等(1999)的研究发现在热带及温带地区,硝酸盐通量与流域中的植被种群密度相关。若河岸带植被受人为干扰较轻,那么在滞水、富含有机质、厌氧的湿地土壤中,硝酸盐含量会因反硝化作用而下降。若河岸带植被遭受砍伐,滨河湿地缓冲能力下降,高浓度的溶解态氮会经地下径流输入到河流中,所以河流中粒子态氮随侵蚀作用而输入的 N 量主要取决于河岸带湿地的缓冲能力。Groffman 等(2001)指出温带地区的滨河森林湿地可阻碍来自高地的硝态氮向河流的运移。

我国对硝态氮的淋失及其对地下水的污染研究始于 20 世纪 80 年代初(中国土壤学会土壤农业化学专业委员会,土壤生物和生物化学专业委员会,1986),90 年代初开始着眼于大田条件下氮素淋失的研究工作(朱兆良和文启孝,1992)。王超等(1997)的连续淹水垂直土柱模拟试验研究也表明硝态氮在土壤中的迁移转化过程与土壤特性关系密切,且氮素在细砂土中的迁移速率要比沙壤土快得多。陈效民等(2001)模拟研究了水稻土中硝态氮的垂直运移。白军红等(2002c)报道了向海湿地硝态氮在根层土壤中得以累积,根层以下硝态氮的淋失量随土壤深度的增加而减少。有关湿地中硝态氮水平运移的研究直到目前还不多见,但已有所涉及。陈效民等(2001)和孙志高等(2006a)分别模拟研究了人工湿地——水稻田乌栅土和小叶章湿地土壤中硝态氮的水平运移规律,发现硝态氮的浓度随着示踪源剂的距离的增加而逐渐减小,随土壤含水量的增加而增加,且硝态氮的运移速率与运移距离呈幂函数或指数函数关系。Bai 等(2012c)模拟研究了黄河三角洲湿地土壤硝态氮的水平运移,发现了与以往学者相一致的运移规律。

土壤中铵根离子迁移的主要机理是扩散,在特定的土壤条件下(如土壤水分接近饱和)也可能存在质流基或在土壤剖面中随水下渗而迁移,但又因无机氮的有机化、硝化和反硝化作用以及交换反应的进行,使土壤中的铵态氮难