

滨海湿地 生态修复理论与技术：

白洁 高会旺 主编

进展与展望

BINHAI SHIDI SHENGTAI XIUFU LILUN
YU JISHU JINZHAN YU ZHANWANG



海洋出版社

滨海湿地生态修复理论与技术： 进展与展望

白 洁 高会旺 主编

海洋出版社

2011·北京

图书在版编目(CIP)数据

滨海湿地生态修复理论与技术:进展与展望/白洁,高会旺主编. —北京:海洋出版社, 2011.2

ISBN 978 - 7 - 5027 - 7959 - 7

I. ①滨… II. ①白… ②高… III. ①海滨 - 沼泽化地 - 生态环境 - 环境治理 - 文集
IV. ①P941.78 - 53

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第024660号

责任编辑:盖泳铭 杨传霞

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路8号 邮编:100081

北京海洋印刷厂印刷 新华书店发行所经销

2011年2月第1版 2011年2月北京第1次印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:17.75

字数:418千字 定价:68.00元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

滨海湿地是指海陆交互作用下经常被静止或流动的水体所浸淹的沿海低地。作为连接陆地与海洋的过渡地带,滨海湿地生物多样性异常丰富,具有较高的生产力,是地球系统的重要组成部分,也是一个受海陆交互作用、独具特色的生态系统。滨海湿地具有调节气候、维持生物多样性、拦截陆源物质、护岸减灾等功能,并且能够通过生物地球化学过程促进氧、碳、氮、硫、磷等关键元素的循环,是最具服务价值的湿地生态系统之一,对保护海洋、维持地球良好的生态环境具有重要的意义。

滨海湿地受海陆共同作用,是脆弱的生态敏感区。近年来,在全球变化与人类活动的影响下,滨海湿地发生了巨大变化。20世纪50年代以来,由于围海造地、围海养殖、填滩造陆、港口建设等,我国已丧失滨海湿地面积约 2.19×10^6 hm^2 ,占滨海湿地总面积的50%;其中,天然红树林面积减少约73%,珊瑚礁约80%被破坏。滨海湿地是入海河流携带污染物和海水养殖产生污染物的承泻区。目前,我国各地区滨海湿地均不同程度地受到了污染,以无机氮和无机磷营养盐污染最为严重,发生赤潮的频度和规模有增大趋势,不仅影响海滨景观,也引起了湿地生物死亡,破坏了湿地原有的生态群落结构,造成了生境破坏和生物多样性丧失以及生态失衡,严重制约了湿地生态系统服务功能的发挥。

中国湿地研究起步较晚。自1992年加入《湿地公约》后,我国对典型的滨海湿地进行了多学科的交叉研究,取得了一些成果,但总体上在滨海湿地研究的各个方面与国际先进水平尚有不小差距。近年来,国内许多高校和研究单位纷纷设立了湿地专业,特别是2007年成立了国家高原湿地研究中心(归口国家林业局),2009年中国林业科学研究院成立了湿地研究所,国家林业局牵头组织了第二次全国湿地资源调查(2008年开始,计划2012年结束),这些都标志着湿地已逐渐成为我国环境变化研究的前沿课题之一。其中,滨海湿地以其生物多样性和生态服务价值也得到了应有的重视,不仅是全国湿地资源调查的重点,也成为“国家水体污染控制与治理科技重大专项”关注的区域之一。本书立足于国内外的研究成果,以多篇论文的形式综述了国内外在这一领域的研究进展与发展方向,共分为4个部分,即滨海湿地物质循环、滨海湿地生态修复技术与

方法、滨海湿地水文特征与植被监测、滨海湿地生态系统功能与价值评估。

希望本书能够使读者了解滨海湿地的研究动态及发展方向,并为相关领域的科学研究与教学提供有益的参考。由于编者水平所限,书中一定会有不少疏漏和不当之处,敬请提出宝贵意见。

本书得到了国家水体污染控制与治理科技重大专项河流主题《辽河流域水体污染综合治理技术集成与工程示范项目》第九课题“辽河河口区大型湿地生态修复关键技术与示范研究”的资助。本书是作者们齐心协力的结晶,在编写过程更是得到了国家水专项多位专家以及辽河流域水体污染综合治理项目的首席与专家组成员的大力支持,许多专家学者和同仁也为本书提出了宝贵意见,在此谨呈衷心的感谢!

编者

2009年12月

目 次

一、滨海湿地物质循环

- 湿地土壤中磷素的地球化学行为及影响因素 … 陈亚东,梁成华,王延松,李月瑶,郭宝东(3)
- 湿地氮素生物地球化学循环过程 …… 罗先香,闫 琴,张珊珊(9)
- 湿地中的氮磷转化及芦苇湿地在氮磷去除中的应用 …… 高 亮,邹 立(16)
- 河口湿地有机碳循环及其研究方法 …… 杜天君,邹 立(25)
- 氮输入对河口湿地可溶性有机碳释放的影响 …… 杨继松,侯永侠(36)
- 湿地硝化作用的研究方法及影响因素 …… 白 洁,陈春涛,董 晓,李佳霖(43)
- 湿地沉积物中重金属污染的评价方法 …… 李月瑶,梁成华,陈亚东(51)
- 湿地土壤重金属的形态及影响因素 …… 侯永侠,杨继松,陈红亮(58)
- 湿地环境的金属污染及迁移转化
…………… 潘进芬,单 婷,李正炎,李 瑾,张玉君,赵 帅,李宝洁(64)

二、滨海湿地生态修复技术与方法

- 滨海湿地退化机制与生态修复技术探讨 …… 廖书林,郎印海,王敏杰(77)
- 中国河口退化湿地的生态恢复技术研究 …… 吕宪国,宋晓林,陈志科(86)
- 湿地生态系统退化的影响因素及保护对策分析
…………… 陈红亮,侯永侠,杨继松,王 岩,李卉颖(95)
- 滨海湿地植被恢复技术现状与展望 …… 田伟君,白 洁,赵阳国(103)
- 湿地对持久性有机污染物的去除机理和净化能力 …… 李正炎,杨丽娜,边海燕(111)
- 湿地植物耐盐机理与耐盐品系的选育方法 …… 白 洁,张 健,赵阳国,陈春涛,张竹圆(121)
- 转基因对植物根际微生物群落结构的影响 …… 赵阳国,白 洁,田伟君(129)
- 石油降解菌的作用机理及影响因素 …… 白 洁,张竹圆,赵阳国,周 方,董 晓(138)
- 植物根际微生物群落的生态特征 …… 白 洁,尹宁宁,赵阳国,田伟君(145)
- 分子生物学技术在硝化菌群分析中的应用 …… 董 晓,白 洁,赵阳国,张竹圆(152)

三、滨海湿地水文特征与植被监测

- 湿地生态需水国内外研究现状与发展趋势 …… 郑西来,张 颖(161)
- 湿地生态水文过程与模型研究 …… 张 蕊,严登华,罗先香,邢子强(171)
- 辽河河口区潮汐潮流特征及数值模拟 …… 张学庆,郑西来(180)
- 双台子河口区水沙运动及河床演变研究 …… 林国庆,郑西来,伍成成(187)
- 平原感潮河网水动力学模型研究进展 …… 林国庆,郑西来,丁吉东,苗晓雨(194)

湿地植被覆盖度遥感分析方法	满 瀛(200)
湿地遥感动态监测中像素级影像融合方法	张永红(207)
滨海典型湿地植被演替特征及其驱动机制	胡 泓,白 洁,李正炎,马安青(214)
滨海湿地盐分分布特征及对湿地植物的影响	杨程程,依艳丽(222)

四、滨海湿地生态系统功能与价值评估

全球气候变暖背景下的我国滨海湿地退化	王 艳,刘汝海,刘艳玲,王 敏(229)
湿地生态系统服务功能及价值估算方法研究	郭宝东(236)
湿地净污功能及其价值估算研究	刘艳玲,高会旺,迟万清(245)
溢油对滨海湿地污染的生态损失评估研究	张秋艳,杨建强,罗先香(252)
土壤有机污染物生态风险评估方法研究	郎印海,周 红,廖书林(260)
基于 WebGIS 的湿地管理信息系统研究	姬光荣,王连波,郑海永,米铁柱(266)

一、滨海湿地物质循环

湿地土壤中磷素的地球化学行为及影响因素

陈亚东¹, 梁成华^{1*}, 王延松², 李月瑶¹, 郭宝东²

(1. 沈阳农业大学, 辽宁 沈阳 110161; 2. 辽宁省环境科学研究院, 辽宁 沈阳 110031)

摘要:湿地是地球上水陆相互作用形成的独特生态系统,孕育了明显区别于陆地的特殊的土壤类型。文中综述了湿地土壤中磷素的地球化学行为及其影响因素,包括磷在湿地土壤中的地球化学循环、存在形态及影响因素,湿地土壤中磷的迁移转化及其影响因素。同时提出当前湿地土壤磷素地球化学行为研究中存在的问题和不足。

关键词:湿地土壤;磷素形态;影响因素

湿地是分布于陆生生态系统和水生生态系统之间,具有独特的水文、土壤、植被与生物特征的生态系统,其独特的生境以及生物地球化学过程孕育了特殊的土壤类型。湿地土壤以有机质含量高和还原环境强烈为特征而明显区别于陆地土壤,既是许多生物地球化学转化发生的场所,又是许多湿地植物所需的有效化学物质元素的主要储存地^[1]。这些特点对于湿地生态系统平衡的维持和演替具有极其重要的作用。

磷素是湿地生态系统中极其重要的生态因子,其含量直接影响着湿地生态系统的结构和功能,同时磷也是导致江河、湖泊等永久性淹水湿地发生富营养化的主要因素之一。湿地土壤是磷素累积和转化的重要场所,它与水体之间存在着一种吸附和释放的动态平衡。Sakadevan 和 Bavor 的研究表明,湿地土壤通过吸附作用(主要是化学吸附)能够去除受污水体中的磷^[2],而在环境条件改变的情况下,磷可通过各种复杂的迁移转化过程释放到上覆水体中,从而造成二次污染^[3]。

因此,深入研究湿地土壤磷素的地球化学行为及其影响因素,对保护湿地生态环境、减少湿地上覆水体的污染及提高湿地土壤的生态价值都具有重要意义。

1 湿地土壤中磷的地球化学循环

湿地磷的地球化学循环,即磷在湿地生态系统中的传输和转化,包括大量相关的物理、化学和生物过程。总的来说,磷的地球化学循环是一个沉积性不完全的循环^[4]。湿地系统中由地壳母岩风化释放的磷、湿地土壤中有机物在微生物作用下分解的磷和随水源输入湿

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07208-009)。

* 通信作者:梁成华,教授,E-mail:liangl10161@163.com

地系统的磷,一部分被浮游植物吸收,通过食物链进行生物循环,一部分沉积于土壤表层,随着氧化还原等环境条件的变化,沉积磷相应发生一系列变化,通过有机质的分解及其与水体的相互作用以溶解态的磷进入水体,重新参加循环^[5]。

2 湿地土壤中磷的形态

湿地土壤中参与水-陆-生物界面交换过程及有效态磷含量的多少,取决于土壤中磷的存在形态^[6]。

磷在湿地中以多种形式存在,总体分为有机、无机两大类,其中每部分又分为可溶性和不溶性两种形态。有机磷包括磷酸肌醇、磷脂、核酸及少量的磷蛋白和磷酸糖及微生物态磷等。有机磷含量较低,且其含量变化较大。作为磷源,有机磷次于无机磷^[6],无机磷占磷总量的70%左右,难溶性磷和易溶性磷之间存在着缓慢的动态平衡。无机磷主要分为化合态磷和吸附态磷,化合态磷是指与铁、铝或钙结合的磷酸盐^[7],吸附态磷则是指被黏土矿物或有机物吸附的磷。在不同的湿地环境中,磷的存在形态不同^[8-9]。一般情况下,碱性湿地土壤的无机磷以钙结合态磷为主,而在酸性湿地土壤中铁结合态磷所占的比重较大。不同湿地土壤中各形态的磷随上覆水的盐度、pH值、沉积物的粒度及有机质含量等物理化学性质的不同,都会呈现一定的变化^[10]。其中铝、铁结合态磷、闭蓄态磷受pH值的影响显著,而吸附态磷与钙结合态磷含量则受pH值的影响甚微^[11]。此外各形态磷的空间分布与污水排放关系密切^[12]。

3 湿地土壤中磷的迁移转化及其影响因素

进入湿地土壤中的磷不只是简单的堆积,而是随着氧化还原等环境条件的改变,发生一系列迁移转化。磷素的迁移转化是磷的固定和释放的过程,即有效态磷与无效态磷之间的转化^[6],主要分为磷的化学沉淀和溶解、吸附和解吸^[13]。

3.1 湿地土壤中磷的沉淀和溶解

化学沉淀反应是水溶性磷和土壤中的金属离子发生化学反应产生难溶性磷酸盐沉淀物;一般发生在土壤溶液中磷浓度高的微域环境内,特别是在肥料颗粒周围^[13]。溶解是沉淀的逆反应,是难溶性磷酸盐沉淀物发生水解释放出水溶性磷的过程。磷在湿地土壤中的沉淀和溶解受pH、温度、阳离子交换含量及无机磷形态和有机质等多种因素的影响。pH值是最显著的影响因子之一,pH值对磷的影响是通过影响湿地土壤中金属离子的活性而产生的。在酸性条件中 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 是控制磷沉淀的主要因素,在中性和碱性条件中主要是沉积物中的 $CaCO_3$ 或 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与水溶性磷生成沉淀^[14]。温度也显著影响着湿地土壤中磷的沉淀和溶解。温度的改变,会影响土壤中微生物的活力和有机质的分解速度,导致土壤中氧化还原电位的改变,影响 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 间的转化,进而影响与铁结合的磷溶解和沉淀。此外,难溶性含磷化合物的溶解能力受土壤阳离子交换量和酸度影响显著,成正相关关系。无机磷形态通过影响溶液中磷的活度而影响难溶性含磷化合物的溶解。土壤有机质含量对难溶性磷化合物溶解的影响主要是通过与 Ca^{2+} 结合降低其活度,促进磷酸盐溶解,或在微生物作用下矿化释放磷而增加溶液中磷的活度抑制其溶解^[13]。

3.2 湿地土壤中磷的吸附和解吸及影响因素

3.2.1 湿地土壤中磷的吸附和解吸

湿地土壤对磷的吸附主要发生在表层,随深度增加吸附能力下降。磷的吸附包括阴离子交换吸附和配位吸附,其中阴离子交换吸附是以静电引力为基础的;配位吸附(专性吸附)是指磷酸根粒子作为配位体与土壤胶体表面的 $-OH$ 基或 $-H_2O$ 基发生的配位体交换,保持在胶体表面的过程。然而,要将阴离子交换吸附和配位吸附加以区分十分困难,因而通常将这两者合起来,称为磷的吸附^[15]。它主要发生在氧化物、黏土矿物和有机固相表面。湿地土壤中磷的解吸是吸附的逆过程。

3.2.2 湿地土壤中磷的吸附和解吸的主要影响因素

影响磷在湿地土壤上吸附与解吸过程的因素很多^[16-18],主要包括湿地土壤性质、磷赋存形态、环境条件,如温度、pH值、盐度等。

(1)湿地的土壤性质。一般来讲,吸附颗粒中黏粒含量高、比表面积大,则表面能强,对磷的吸附量就越大。湿地土壤中几乎所有的固体物质都能吸附磷,但不同物质吸附固定磷的能力存在很大差异。如在酸性土壤中,无定形铁铝氧化物和水化氧化物是磷的主要吸附基质^[15];而在有机质含量不高的碱性土壤中,黏粒和 $CaCO_3$ 是主要的固磷基质,且黏粒主要在快速吸附区起作用,而 $CaCO_3$ 的吸附作用则随时间的延长逐渐增强^[19]。同时 Lopez 等^[20]指出有机碳含量影响湿地土壤对磷的吸附效率。

(2)湿地中磷的赋存形态。磷的赋存形态决定着参与吸附与释放过程的有效磷的含量^[21]。王圣瑞等在研究长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征时发现有机磷、 $Fe/Al-P$ 与磷的最大吸附量呈显著的正相关关系^[22],庞燕等^[23]研究发现沉积物对磷的吸附/解吸平衡质量浓度与沉积物各形态磷含量均有较好的相关性,其中与 $Fe(Al)-P$ 的相关系数高达0.94。

(3)湿地中的其他环境因素。pH值、氧化还原条件、温度和盐度作为主要的环境因素对于磷吸附/释放的影响较大^[24-26]。

a. pH值的影响:pH值对土壤吸附磷的影响较为复杂,主要通过引起吸附固相表面的变化、引起磷酸根形态的变化和上述两种变化而引起的磷酸离子与吸附颗粒表面相互作用的变化。不同学者得出的结论不同,如刘敏等认为磷在沉积物上的吸附量 $Q-pH$ 曲线呈“U”形^[27],而王颖等发现磷在沉积物上的吸附量 $Q-pH$ 曲线呈“∩”形^[3]。

b. 氧化还原条件的影响。已有研究表明,氧化还原条件可以通过影响土壤中活性铁的含量并同时引起pH值的改变,而间接影响土壤对磷吸附解吸特性。但是当氧化还原条件改变时,活性铁含量的变化是否为影响天然湿地土壤对磷素的吸附解吸特性的主要因素,目前仍缺乏研究信息。Pant 等^[26]研究发现沉积物对磷的吸附容量在好氧条件下远远高于它在厌氧条件下对磷的吸附容量,而高超通过对水稻土研究发现,磷的最大吸附量在还原条件下明显高于氧化条件下^[28]。

c. 温度的影响。温度对磷的吸附解吸的影响也较大。Liikanen 实验证明,无论好氧与厌氧,磷的吸附量和解吸量均随温度升高而呈线性关系增加^[29],王圣瑞等的研究也表明温度的增加有助于磷的吸附^[30]。Jensen 和 Andersen^[31]研究发现,在铁含量相对较高的土壤

中,温度变化对此影响更为明显。

d. 盐度的影响。盐度对磷解吸量的影响程度大于吸附量,石晓勇等^[32]对黄河口研究发现磷最大吸附量和最小解吸量均出现在低盐度区。王爱萍等对长江河口沉积物的研究也发现在低盐度下,沉积物对磷的吸附量随盐度的增加而增大,而当盐度大于0.5%时沉积物对磷的吸附量反而随盐度的升高而降低^[25,27]。

4 结语

有关土壤中磷的地球化学过程的研究早有报道,但对沼泽、湿地土壤中磷素的地球化学过程,特别是对干-湿交替条件下天然湿地土壤中磷酸盐吸附特性、释放机制的研究相对较少。目前对湿地土壤中磷素的研究主要集中在单个环境因子变化对磷吸附行为的影响上,而多个环境因子的综合作用对湿地土壤吸附磷的影响则鲜有报道;且对无机磷在土壤中吸附后的形态转化还了解甚少,对影响吸附作用的主要环境因子的认识也比较模糊。这些方面的工作还有待于深入研究和探讨。解决以上问题对于深入研究湿地中磷的地球化学过程具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 白军红,邓伟,朱颜明. 湿地生物地球化学过程研究进展[J]. 生态学杂志, 2002, 21(1): 53—57.
- [2] SAKADEVAN K, BAVOR H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetlands systems[J]. Water Research, 1998, 32(2): 393—399.
- [3] 王颖,沈珍瑶,呼丽娟,等. 三峡水库主要支流沉积物的磷吸附/释放特性[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1654—1661.
- [4] 王国平,刘景双. 湿地生物地球化学研究概述[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 144—148.
- [5] 熊汉锋,王运华. 湿地碳氮磷的生物地球化学循环研究进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 240—243.
- [6] 王国平. 湿地磷的生物地球化学特性[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 193—195.
- [7] 陈刚才,甘露,王仕禄,等. 土壤中元素磷的地球化学. 地质地球化学, 2001, 29(2): 78—81.
- [8] 张路,范成新,池俏俏,等. 太湖及其主要入湖河流沉积磷形态分布研究[J]. 地球化学, 2004, 33(4): 423—432.
- [9] 熊汉锋,陈治平,黄世宽,等. 梁子湖水体P的季节变化与沉积物P释放初步研究[J]. 湿地科学, 2006, 4(3): 174—178.
- [10] 邓焕广,陈振楼,张兴正. 长江口潮滩表层样中分级磷的时空变化[J]. 国土与自然资源研究, 2004, 3: 56—58.
- [11] 白军红,余国营,张玉霞. 向海湿地土壤中无机磷酸盐的存在形态研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 98—101.
- [12] LIU M, YANG Y, HOU L, et al. Polychlorinated organic contaminants in surface sediments from the Yangtze estuary, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 46(5): 672—676.
- [13] 孙宏发,刘占波,谢安. 湿地磷的地球化学循环及影响因素[J]. 内蒙古农业大学学报, 2006, 27(1): 148—152.
- [14] RREDDY K R, D'ANGELO E M. Soil progress regulating water quality in wetlands. In Global wetlands: Old world and new. Amsterdam, Lausanne, N Y, 1994: 309—323.

- [15] 陆文龙,张福锁,曹一平. 磷土壤化学行为研究进展[J]. 天津农业科学, 1998, 4(4): 1—7.
- [16] WANG S R, JIN X C, ZHAO H C, et al. Effect of organic matter on the sorption of dissolved organic and inorganic phosphorus in lake sediments[J]. *Colloids and Surfaces (A: Physicochemical and Engineering Aspects)*, 2007, 297:154—162.
- [17] WANG S R, JIN X C, BU Q Y, et al. Effects of particle size, organic matter and ionic strength on the phosphate sorption in different trophic lake sediments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 128: 95—105.
- [18] 潘成荣,张之源,叶琳琳,等. 环境条件变化对瓦埠湖沉积物磷释放的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 148—152.
- [19] 晋艳,尉庆丰. 土壤基质组成与磷吸附动力学的关系[J]. 土壤通报, 1994, 25(2): 74—77.
- [20] LOPEZ P, LLUCH X, VIDAL M, et al. Adsorption of phosphorus on sediments of the Balearic is land (Spain) related to their composition[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 42: 185—198.
- [21] 黄清辉,王磊,王子健. 中国湖泊水域中磷形态转化及其潜在生态效应研究动态[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 199—206.
- [22] 王圣瑞,金相灿,赵海超,等. 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 38—43.
- [23] 庞燕,金相灿,王圣瑞,等. 长江中下游浅水湖沉积物对磷的吸附特征——吸附等温线和吸附 P 解吸平衡质量浓度[J]. 环境科学研究, 2004, 17(增刊): 18—23.
- [24] 张斌亮,张昱,杨敏,等. 长江中下游平原三个湖泊表层沉积物对磷的吸附特征[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 595—600.
- [25] 王爱萍,杨守业,周琪. 长江口崇明东滩湿地沉积物对磷的吸附特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 926—930.
- [26] PANT H K, REDDY K R. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions[J]. *Environmental Quality*, 2001, 30: 147—148.
- [27] 刘敏,侯立军,许世远. 长江河口潮滩表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[J]. 地理学报, 2002, 57(4): 397—407.
- [28] 高超,张桃林,吴蔚东. 氧化还原条件对土壤磷素固定与释放的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 542—549.
- [29] LIIKANEN A N U. Effects of temperature and oxygen availability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of an atrophic mid-boreal lake[J]. *Biogeochemistry*, 2002, 9(3): 269—286.
- [30] 王圣瑞,金相灿,庞燕. 湖泊沉积物对磷的吸附特征及其吸附热力学参数[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 19—26.
- [31] JENSEN H S, ANDERSEN F O. Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37: 577—589.
- [32] 石晓勇,史致丽,余恒,等. 黄河口磷酸盐缓冲机制的探讨:黄河口悬浮物对磷酸盐的吸附-解吸研究[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(2): 192—198.

Geochemical behavior of phosphorus in wetland soils

CHEN Ya-dong¹, LIANG Cheng-hua¹, WANG Yan-song², LI Yue-yao¹, GUO Bao-dong²

(1. Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China; 2. Liaoning Academy of Environmental Sciences, Shenyang 110031, China)

Abstract: Wetlands are unique ecosystems which are formed by interaction between water and land and have cultivated the special soil types which are different from terrestrial soil. This paper provides an integrated review of the geochemical behavior of phosphorus (P) in wetland soils and its affecting factors. Overview included P geochemical cycle in wetland soils, forms of P in soils, transport and transformation of P in soils and its affecting factors. The problems in the current application of the geochemical behavior of P in wetland soils are also pointed out.

Key words: wetland soil; forms of phosphorus; influence factor

湿地氮素生物地球化学循环过程

罗先香^{1*}, 闫 琴¹, 张珊珊¹

(1. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 湿地位于水陆地交错带, 是一种水文特征与生物群落类型独特的生态系统。氮素是湿地生态系统重要的生源要素, 是湿地生态系统物质地球化学循环研究的核心内容, 氮素循环对全球环境变化具有重要意义。本文阐述了湿地氮素生物地球化学循环的内涵及意义, 介绍了湿地氮素的主要生物地球化学循环过程, 分析了氮循环与碳循环之间的耦合关系, 并对未来的湿地氮素生物地球化学循环研究进行了展望。

关键词: 湿地氮循环; 生物地球化学过程; 碳氮耦合

湿地处于水体和陆地的交汇处, 是水陆相互作用而形成的自然综合体, 是地球上重要的生存环境和生态系统之一。氮素是湿地土壤中重要的限制性养分, 是植物生长发育的必需营养元素。近年来人类活动的加剧, 特别是大量氮肥的施用及含氮污染物的排放, 加重了湿地氮的负荷, 成为江河、湖泊和河口近海等永久性淹水湿地发生富营养化的主要原因。湿地环境中 N_2O 等温室气体排放量的增加加剧了全球气候变暖趋势, 给湿地物种的分布、生物多样性以及植物生长带来极为深刻的影响。由此可见, 湿地环境中氮素的生物地球化学循环与全球生态环境变化密切相关, 因此, 研究湿地氮素的生物地球化学循环对于正确认识湿地的生态服务功能及其环境生态效应具有重要意义。

湿地干湿交替的水文情势、独特多样的生物条件都显著影响着氮素的生物地球化学过程。其基本过程主要包括: 发生在厌氧土壤层中的脱氮作用(反硝化作用); 发生在水体和氧化土壤层中的硝化作用; 发生在土壤层中的 $NH_4 - N$ 的吸收存储、吸附作用和解吸附作用; 发生在厌氧土壤层中的有机氮存储过程; 水体中 NH_3 的挥发作用; 植物生长从各层吸收无机氮转化为有机氮存储起来, 植物的腐败过程又将有机氮分解为无机氮释放到环境中。

1 微生物在湿地氮转化中的作用

微生物是湿地氮素循环过程中最活跃的因素, 是土壤有机质的分解者和转化者, 湿地氮循环过程中的生物固氮、氨化、硝化及反硝化作用是特定微生物作用的结果, 微生物几乎参

基金项目: 国家“水专项”辽河河口区大型湿地生态修复关键技术与示范研究(2008ZX07208-009)。

* 通信作者: 罗先香(1972—), 女, 湖北麻城人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事湿地生态过程及环境效应、海洋生态与环境预警及评价研究。E-mail: lxx81875@ouc.edu.cn

与了氮循环的各个过程。各过程的反应速率受细菌数量和种群组成的影响^[1]。湿地环境条件通过影响微生物群落组成及活性来影响氮素的各转化过程。赵先丽等^[2]对盘锦芦苇湿地微生物的研究结果显示,土壤温度和气温对微生物的影响最大,土壤含水量对其影响较小。微生物的活性受到根际效应的影响,项学敏等^[3]对湿地植物根际效应的研究表明芦苇根际环境更有利于亚硝化细菌的生长,根际效应对土壤各种微生物类型的影响也不同,微生物类型受影响程度为细菌>真菌>放线菌。总之,各种参与氮转化的微生物在氮素形态的转变过程中发挥着极为关键的作用。湿地土壤由于长年淹水或间歇式的淹水,土壤中兼性厌氧和专性厌氧微生物占优势,其氮的转化过程与旱地土壤有明显的差别。

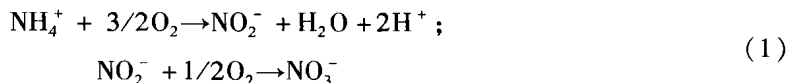
2 湿地有机氮的矿化过程及影响因素

土壤中的氮素主要以有机态的形式储存,却以无机态氮被植物吸收利用。这种通过微生物作用把不能被植物吸收利用的有机态氮转化为可被植物吸收利用的无机态氮(主要是铵态氮)的过程,称之为土壤氮素的矿化作用。湿地有机氮的矿化过程受温度、盐度、土壤pH值、土壤中氮的含量、有机质等诸多因素的影响。温度对有机氮矿化过程的影响较为显著,李慧林等^[4]使用淹水密闭恒温培养法对太湖地区土壤氮素的矿化进行测定,结果显示在一定的温度范围内,土壤氮素的矿化率和矿化量随温度的升高而增加,30℃矿化量达到最大值。刘培芳等^[5]在研究河口潮滩沉积物中 NH_4^+ 的释放时发现,随盐度的上升 NH_4^+ 的释放量增加。White等^[6]指出土壤中交换态铵的含量是土壤氮素在有氧条件下矿化最敏感的影响因素。有机氮的矿化源于有机氮向无机态氮的转化,有机氮的矿化与有机质有一定的相关性,McIntyre等^[7]对澳大利亚西北部地区氮素矿化的研究表明有机质对矿化作用的影响明显。另外,Raiesi^[8]研究植物残体对湿地氮素矿化的影响结果显示,植物残体可以加速有机氮的矿化速率。

3 河口湿地的硝化和反硝化过程

3.1 河口湿地的硝化过程

硝化过程是指 NH_3 或 NH_4^+ 通过亚硝酸细菌及硝酸细菌的作用被氧化为 NO_3^- 的过程。其反应式表示为:



很多物理化学及生物因素都会对氮素的硝化作用产生影响,包括温度、铵态氮含量、抑制剂化合物、 O_2 浓度、pH值、盐度、微生物等^[9]。Malhi和Mcgill^[10]对加拿大Alberta地区土壤硝化作用的研究表明,硝化作用的最适温度为20℃,30℃时硝化作用基本停止。氧气对硝化菌的活性有直接影响,因此影响湿地氮素的硝化过程。Jensen等^[11]报道当氧气浓度较低时硝化作用主要受氧气的限制,当氧气浓度较高时,硝化作用受铵态氮含量的限制,其试验结果表明当淹水土壤 NH_4^+ 浓度不限制硝化细菌活性时,土壤硝化作用强度随淹水层氧气浓度增加而显著增强。吕艳华等^[12]对黄河三角洲湿地硝化作用强度的影响因素研究结果