



“十二五”国家重点出版物出版规划项目
中国科学技术研究领域高端学术成果出版工程

湿地生态系统 碳、氮、硫、磷生物地球化学过程

刘景双 等 著



中国科学技术大学出版社



“十二五”国家重点出版物出版规划项目
中国科学技术研究领域高端学术成果出版工程

湿地生态系统 碳、氮、硫、磷生物地球化学过程

刘景双 等 著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书系统地研究了湿地生态系统碳、氮、硫、磷的生物地球化学过程,从各生源要素的生物累积,非生物环境因子影响,碳、氮、硫、磷的释放特征,非生物环境因子与各生源要素的耦合关系,以及生物库、大气库、土壤库和水环境中生源要素的平衡状况等方面,系统地揭示了三江平原湿地生态系统物质循环过程及其影响因素,建立了碳、氮、硫、磷的循环模式。在研究方法上大量采用野外现场模拟试验方法,集成创新了多种采样方法、观测方法、生物过程控制方法、同位素标记法等野外试验技术,所获数据均为第一手观测数据,更接近自然实际,其结果更具代表性和指导性。

本书可供地理科学、湿地科学、生态学、环境科学与工程、土壤学、资源科学等专业的科技工作者与管理人员学习、参考,也可作为上述专业本科生、研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

湿地生态系统碳、氮、硫、磷生物地球化学过程/刘景双等著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2013.12

“十二五”国家重点出版物出版规划项目:中国科学技术研究领域高端学术成果出版工程

ISBN 978-7-312-03159-5

I. 湿… II. 刘… III. 沼泽化地—生态系统—生物地球化学—研究 IV. ①P941.78 ②P593

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 309445 号

出版 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026

<http://press.ustc.edu.cn>

印刷 合肥晓星印刷有限责任公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 787 mm×1092 mm 1/16

印张 36

字数 705 千

版次 2013 年 12 月第 1 版

印次 2013 年 12 月第 1 次印刷

定价 98.00 元

前 言

湿地是地球表面重要的生态系统,具有独特的功能而不可替代,与森林、草地、农田、海洋等生态系统共同维系着地球表层的生态平衡,是生物多样性最丰富和高生产力的生态系统,是大气圈、水圈、土壤圈、生物圈能量和物质交换的最敏感地带,是处于水陆交错地区的独特生态系统,并有其独特的形成、发育、演化规律和特殊的结构与功能。湿地类型较多,系统内所发生的物理过程、化学过程和生物过程,以及结构与功能差异较大,其中沼泽湿地是最具代表性的一类,它不仅具备典型湿地的形成特点,即具有湿生植物、水成土壤和水的特点,而且系统内所进行的生物地球化学过程复杂,特别是维持生态系统平衡与稳定的生源要素碳、氢(水)、氧、氮、硫和磷,以及各种生命必需元素在土壤、水、植物,以及大气间进行的迁移、转化和能量交换过程更具特殊性。因此研究沼泽湿地生态系统碳、氮、硫和磷的生物地球化学过程是认知湿地形成演化规律和服务功能的理论基础,是制定湿地保护措施、维持湿地系统稳定和恢复受损湿地技术的需求,对湿地学科体系的建设具有重要理论意义。

本书系统地阐述了典型沼泽湿地系统水通量与水平衡的基本规律,揭示了区域水文变化驱动下植被的生态过程、优势群落变化与水文条件变化的关系,物种密度和植物多样性指数与水文条件的关系,建立了湿地系统的水平衡模型。

通过野外试验,揭示了植物残体与根系的分解规律及其与主要环境因子的关系,明确了分解过程中碳、氮、硫和磷的释放规律及其与主要影响因素的耦合机理,查明了植物 C/N、C/S 和 C/P 在诸元素归还过程中的重要作用,界定了沼泽湿地枯落物分解释放碳、氮、硫和磷的阈值。

依据研究区域的气候特点,对比研究了生长季和非生长季温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)和 H_2S 、 COS 的排放规律,证明了非生长季沼泽湿地排放温室气体的事实,并估算了非生长季 CO_2 和 CH_4 的排放量,以及在年度中所占的排放比例。

计算了沼泽湿地系统中植物不同器官、土壤和水体中碳、氮、硫和磷的储量;分析了典型区域沼泽湿地系统碳、氮、硫和磷的累积状态;明确了沼泽湿地系统碳、氮、硫和磷的迁移过程,以及环境要素与人为因素对碳、氮、硫和磷迁移的影响强度与机理;通过定量外源氮、硫、磷输入模拟试验,验证了不同量的氮、硫、磷与湿地植物生物量的关系;利用同位素 ^{15}N 示踪技术明确了氮在植物、土壤、水体中的赋存比例和向大气释放的特征;阐明了湿地系统生源要素碳、氮、硫和磷的生物地球化学过程与气温、水文、植被、土壤、生物等环境要素的关系;构建了沼泽湿地系统碳、氮、硫和磷的循环模式,揭示了物质的循环过程与规律。

由此认为,湿地生物地球化学过程将成为湿地环境功能和服务功能评价、湿地系统健康与稳定诊断、退化湿地系统生态修复的重要基础理论。

本书总结的研究成果是在我所带历届博士研究生以及合作伙伴的共同努力下完成的。他们的部分博士论文和研究成果是本书写作的基础。本书由刘景双策划、统稿与定稿。第一章、第二章、第十二章由刘景双撰写,第三章由栾兆擎、王金达、胡金明撰写,第四章由杨继松、王洋撰写,第五章由孙志高、赵光影、刘景双撰写,第六章由李新华、于君宝撰写,第七章由秦胜金、王洋、刘景双撰写,第八章由于君宝、宋长春、窦金鑫撰写,第九章由王洋、王国平、王金达撰写,第十章由周旺明、王国平撰写,第十一章由宋长春、刘景双撰写。

本书的研究得到中国科学院知识创新工程重要方向项目“三江平原典型沼泽湿地系统物质循环研究”(KZCX3-SW-332)和“典型湿地物质循环过程及其环境效应研究”(KZCX3-SW-309)、国家自然科学基金重大项目“非生长季三江平原沼泽湿地系统温室气体排放研究”(90211003)的支持,特此感谢!在此还要感谢中国科学院东北地理与农业生态研究所分析测试中心、中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站的同志在设备保障、样品分析和野外采样等工作上给予的大力支持。

由于本书涉及的湿地系统比较复杂,研究内容和要素较多,可借鉴的湿地系统生物地球化学过程研究成果不多,又由于作者水平有限,书中存在不当之处在所难免,诚恳希望读者予以指正,以便进一步完善和补充。

刘景双

2012年12月

目 录

前言	(i)
第一章 绪论	(1)
第一节 问题提出	(1)
第二节 湿地系统碳、氮、硫、磷生物地球化学过程研究现状综述	(4)
一、湿地中的碳、氮、硫、磷与全球变化	(4)
二、湿地碳、氮、硫、磷的自然生态平衡	(6)
三、人类活动对湿地环境碳、氮、硫、磷的影响	(8)
四、当前湿地科学领域研究的主要科学问题	(12)
第三节 研究内容和研究方法	(15)
一、研究内容	(15)
二、研究方法	(16)
参考文献	(21)
第二章 三江平原自然与社会环境概况	(25)
第一节 地理位置及分布范围	(25)
第二节 气候特征	(26)
一、太阳辐射量	(26)
二、气温	(26)
三、降水	(26)
四、日照时数	(27)
五、风	(27)
六、主要气候灾害	(27)
第三节 水环境	(29)
一、地表水资源特征	(29)

二、地下水环境·····	(32)
第四节 湿地土壤环境·····	(34)
一、土壤理化性质·····	(34)
二、湿地开垦前后土壤养分变化·····	(39)
三、主要湿地的土壤质量变化趋势·····	(40)
第五节 湿地生物环境·····	(43)
一、沼泽植被·····	(43)
二、水生生物·····	(47)
三、湿地野生动物·····	(52)
第六节 社会经济概况·····	(53)
一、区域开发概况·····	(53)
二、农业开发对湿地环境的影响·····	(54)
参考文献·····	(60)
第三章 湿地水文过程及其水环境中碳、氮、硫、磷的时空分布·····	(62)
第一节 典型沼泽湿地水文过程·····	(62)
一、降水·····	(62)
二、蒸散发·····	(63)
三、沼泽湿地植被蒸腾·····	(71)
四、沼泽湿地水面蒸发·····	(75)
五、沼泽湿地凝结水过程·····	(77)
六、沼泽湿地地下水过程分析·····	(82)
七、典型沼泽湿地水平衡研究·····	(84)
八、沼泽湿地水位/水量模拟·····	(87)
第二节 湿地水环境中碳、氮、磷的时空分布·····	(88)
一、沼泽湿地水体中碳、氮、磷的分布变化·····	(88)
二、河流水体中碳、氮、磷分布变化·····	(94)
第三节 沼泽湿地水环境中氮、硫、磷的输入途径·····	(99)
一、沼泽湿地氮沉降·····	(99)
二、沼泽湿地磷沉降·····	(106)
三、沼泽湿地硫沉降·····	(109)
第四节 沼泽湿地水环境中氮、磷的输出途径·····	(110)
一、沼泽湿地对氮的净化吸收·····	(111)
二、沼泽湿地对磷的净化吸收·····	(112)
参考文献·····	(113)

第四章 湿地土壤中碳、氮、硫、磷的时空分布与累积过程	(115)
第一节 湿地土壤有机碳的时空分布与累积	(115)
一、湿地土壤有机碳的空间分布	(115)
二、土壤有机碳及其活性组分的季节变化特征	(125)
三、微生物量碳、溶解性有机碳与氮、磷含量的关系	(130)
第二节 湿地土壤氮的分布与累积过程	(132)
一、湿地土壤氮的空间分布格局	(132)
二、湿地土壤各形态氮的季节变化特征	(151)
第三节 湿地土壤硫的分布与累积过程	(163)
一、不同流域湿地土壤中各形态硫的分布特征	(163)
二、典型碟形洼地土壤中各形态硫的分布状况	(163)
三、小叶章湿地土壤各形态硫的空间分布特征	(166)
第四节 湿地土壤磷的分布与累积过程	(170)
一、湿地土壤磷的空间分布	(170)
二、湿地土壤磷的季节变化及影响因素分析	(173)
三、沼泽湿地土壤各形态磷的变化	(176)
四、湿地垦为农田后的土壤各形态磷梯度变化	(179)
参考文献	(180)
第五章 湿地土壤碳、氮、硫、磷的迁移与转化过程及其影响因素	(181)
第一节 沼泽湿地土壤有机碳的矿化过程及其影响因素	(181)
一、湿地土壤有机碳的矿化	(181)
二、湿地土壤 DOC 释放动态及其影响因素	(190)
第二节 湿地土壤中氮的迁移和转化过程	(194)
一、无机氮素的水平运移	(194)
二、无机氮素的垂直运移	(205)
三、土壤氮素的净矿化与硝化作用过程	(210)
四、土壤氮素的反硝化作用过程	(215)
第三节 湿地土壤硫的迁移和转化过程	(222)
一、湿地土壤 SO_4^{2-} 的吸附/解吸特征	(222)
二、沼泽湿地土壤有机硫矿化特征及矿化量估算	(225)
第四节 湿地土壤磷的迁移和转化过程	(228)
一、湿地土壤磷的吸附/解吸特征	(228)
二、冻融条件下湿地土壤磷的吸附/解吸特征	(243)
参考文献	(265)

第六章 湿地植物中碳、氮、硫、磷的累积过程	(267)
第一节 不同水文条件下湿地植物群落的生态特征	(267)
一、湿地植物群落的组成与分布	(267)
二、模拟试验研究	(268)
第二节 沼泽湿地植物生物量及其分配特征	(284)
一、毛果苔草与漂筏苔草群落的生物量	(285)
二、小叶章群落的生物量	(286)
第三节 沼泽湿地植物碳、氮、硫、磷的累积过程	(300)
一、沼泽湿地植物碳的累积过程	(300)
二、沼泽湿地植物氮的累积过程	(305)
三、沼泽湿地植物硫的累积过程	(310)
四、沼泽湿地植物磷的累积过程	(312)
第四节 立枯物及其氮、硫、磷的变化特征	(318)
一、立枯物的季节变化特征	(318)
二、氮、硫、磷的变化特征	(318)
第五节 沼泽湿地植物残体分解与碳、氮、硫、磷的转化过程	(322)
一、典型湿地枯落物的分解特征	(322)
二、分解过程中枯落物元素含量的变化	(327)
三、不同水分梯度带沼泽湿地枯落物和根系的分解及其元素释放	(333)
四、沼泽湿地系统植物残体碳、氮、硫、磷现存量的计算	(339)
参考文献	(341)
第七章 湿地土壤-植物系统中碳、氮、硫、磷的释放过程	(343)
第一节 湿地土壤-植物系统土壤碳的释放过程	(343)
一、沼泽湿地系统 CO_2 、 CH_4 的释放	(343)
二、沼泽湿地系统各碳库对碳释放的贡献	(355)
第二节 湿地土壤-植物系统氮的释放过程	(360)
一、湿地 NH_3 挥发特征及影响因素	(360)
二、沼泽湿地系统 N_2O 释放过程	(366)
第三节 湿地土壤-植物系统硫的释放过程	(379)
一、湿地系统 H_2S 、 COS 释放通量的季节变化	(379)
二、湿地系统 H_2S 、 COS 释放的日变化规律	(380)
三、影响因素分析	(381)
第四节 湿地土壤-植物系统磷的分解与释放	(383)
一、植物中磷的累积	(383)

二、湿地植物-土壤系统中磷的分解和释放	(384)
第五节 不同水分梯度带沼泽湿地枯落物及根系的分解及其元素释放	(385)
一、枯落物和根系的残留率(W_t/W_0)动态	(385)
二、枯落物和根系的分解速率	(387)
三、残体营养元素含量变化特征	(387)
四、影响因素分析	(389)
五、沼泽湿地系统植物残体碳、氮、硫、磷现存量的计算	(392)
参考文献	(393)
第八章 人类活动对湿地系统碳、氮、硫、磷迁移转化的影响	(395)
第一节 人类活动对沼泽湿地植物生态特征的影响	(395)
一、氮、磷输入对沼泽湿地植物物种丰富度的影响	(395)
二、氮、磷输入对优势种——毛果苔草相对多度的影响	(398)
三、氮、磷输入对湿生植物密度和多样性指数的影响	(399)
四、氮、磷输入对沼泽湿地植物生物量的影响	(401)
第二节 人类活动对沼泽湿地系统碳过程和碳平衡的影响	(404)
一、水位和氮输入对碳过程和碳平衡的影响	(404)
二、垦殖对湿地碳过程的影响	(423)
第三节 人类活动对沼泽湿地系统氮迁移转化的影响	(431)
一、外源氮输入对沼泽湿地系统氮过程的影响	(431)
二、湿地开垦对土壤氮过程的影响	(445)
第四节 人类活动对沼泽湿地系统硫迁移转化的影响	(449)
一、外源硫输入对小叶章植物地上、地下生物量的影响	(449)
二、湿地开垦对土壤各形态硫含量的影响	(451)
第五节 人类活动对沼泽湿地系统磷迁移转化的影响	(454)
一、磷输入对小叶章湿地磷植物累积的影响	(454)
二、湿地开垦对土壤磷含量的影响	(456)
参考文献	(457)
第九章 湿地环境中碳、氮、硫、磷的循环模式	(459)
第一节 湿地生物地球化学循环的基本特征	(459)
一、水的生物地球化学循环	(460)
二、湿地生态系统碳、氮、硫、磷的生物地球化学特征	(461)
第二节 毛果苔草湿地和漂筏苔草湿地系统碳、氮、硫、磷循环模式	(466)
第三节 小叶章湿地系统碳、氮、硫、磷循环模式	(468)
一、小叶章湿地系统碳的循环模式	(468)

二、小叶章湿地系统氮循环模式·····	(474)
三、沼泽湿地系统硫的循环模式·····	(476)
四、沼泽湿地系统磷的循环模式·····	(478)
参考文献·····	(481)
第十章 湿地环境中碳、氮、硫、磷的源与汇转换的趋势预测 ·····	(484)
第一节 湿地环境中碳、氮、硫、磷的源与汇转换的环境条件 ·····	(484)
一、湿地水文条件·····	(484)
二、湿地热力条件·····	(487)
三、湿地养分条件·····	(490)
四、pH 与盐分条件·····	(491)
五、湿地土壤 O ₂ 与 CO ₂ 的状况·····	(492)
六、湿地植物枯落物的性质·····	(493)
七、微生物区系·····	(494)
第二节 湿地环境中碳、氮、硫、磷的源与汇的转换过程 ·····	(494)
一、碳的源/汇转换过程·····	(494)
二、氮的源/汇转换过程·····	(500)
第三节 湿地环境中碳、氮、硫、磷的源与汇转换趋势模型 ·····	(503)
一、模型研究·····	(503)
二、模型验证·····	(509)
参考文献·····	(514)
第十一章 湿地环境氮、硫、磷浓度变化的生态效应 ·····	(518)
第一节 外源性氮、硫、磷的输入对植物生物量的影响 ·····	(518)
一、氮、磷输入对沼泽湿地植物生物量的影响·····	(518)
二、水位和氮输入对湿地植物生物量的影响·····	(523)
三、磷输入对湿地植物地上生物量的影响·····	(525)
四、外源性硫输入对小叶章植物地上、地下生物量的影响·····	(526)
第二节 外源性氮、磷的输入对植物物种丰富度的影响 ·····	(528)
一、氮输入对沼泽湿地植物物种丰富度的影响·····	(528)
二、磷输入对沼泽湿地植物物种丰富度的影响·····	(528)
三、氮、磷交互作用对沼泽湿地植物物种丰富度的影响·····	(529)
四、植物 N/P 值与物种丰富度的关系·····	(529)
五、植物 N/P 值与 TN、TP 之间的关系·····	(530)
第三节 外源性氮、磷的输入对植物密度和多样性的影响 ·····	(531)
一、氮、磷输入对优势种——毛果苔草相对多度的影响·····	(531)

二、氮、磷输入对湿生植物密度和多样性指数的影响	(532)
第四节 湿地生态景观的演变过程	(534)
一、不同时期的湿地景观格局变化分析	(534)
二、沼泽湿地异质景观动态转化分析	(538)
第五节 湿地植物生态位与生态系统稳定性分析	(540)
一、湿地植物生态位	(540)
二、湿地生态系统稳定性分析	(543)
参考文献	(544)
第十二章 湿地生态与环境的风险管理	(546)
第一节 三江平原湿地环境中碳、氮、硫、磷的暴露分布	(546)
一、三江平原湿地土壤中碳、氮等的暴露分布	(546)
二、三江平原湿地植物中碳、氮等的暴露分布	(548)
第二节 三江平原湿地退化及其对碳、氮、硫、磷暴露的影响	(551)
一、天然湿地的退化	(551)
二、人类活动进一步促使湿地退化	(552)
三、三江平原湿地碳、氮、硫、磷浓度对湿地退化的响应	(553)
第三节 湿地保护与风险管理	(560)
参考文献	(563)

第一章 绪 论

第一节 问题提出

随着社会经济的发展,人类对其周围环境的作用和影响越来越大,到 20 世纪下半叶,全球环境问题不断突显,以气候变暖为标志的全球变化及其对人类生存环境的严重影响引起了国际社会和科学界的广泛关注。20 世纪 80 年代以来,国际地圈生物圈计划(IGBP)以及其他许多的国际全球科研计划针对人类活动引起的一系列全球变化,例如温室效应、臭氧层破坏、土地退化、海平面升高等进行了研究(叶笃正等, 2003)。陆地生态系统特别是“全球变化与陆地生态系统”“生物圈的水循环”“土地利用/覆盖变化”等研究内容,是国际全球变化的重要研究领域,这不仅因为陆地生态系统(含湿地生态系统)是人类赖以生存与发展的基础,而且陆地生态系统还与引起全球变化的气体,主要是 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体密切相关。以生产力为标志的陆地生态系统包括湿地生态系统已经并将继续受到全球变化(气候、大气成分的变化)的影响,而陆地生态系统包括湿地生态系统又通过其结构和功能的变化反作用于气候系统。因此,陆地生态系统不仅是评价生态系统结构和功能协调性及其与环境相互作用的重要部分,而且直接与全球变化的关键科学问题——碳循环、水循环、食物安全密切相关,这些问题已经成为全球变化与陆地生态系统包括湿地生态系统关系研究的核心问题。

边缘效应普遍存在于自然界和人类社会发展中的各个领域。在自然界,这些边缘效应发生的地区,往往是全球变化响应的敏感地区。在区域尺度上,这些边缘地区同时也是最脆弱、最敏感地区(王如松、马世骏,1985)。湿地是典型的水陆交互作用的过渡地带,也属于全球变化响应的敏感地区。湿地生态系统是地球陆地生态系统

的重要组成部分,在维护区域生态平衡和保护生物多样性等方面具有重要作用。一方面,湿地生态系统作为地球生物圈中的一个关键环节,积极参与全球生态系统的物质流动和能量交换过程,湿地生态系统的破坏将影响或干扰区域生态平衡,形成恶性循环,加快全球变化的脚步;另一方面,以全球变暖为先驱的全球变化对于湿地这一水陆交互生态系统的影响也是明显的,使得许多湿地类型(如红树林、珊瑚礁、泥炭冻层湿地等)成为全球气候变暖的敏感指标。

湿地是具有多层次、多功能的复杂生态系统。湿地功能能否正常发挥,主要取决于湿地的稳定性,只有稳定的湿地生态系统才能彰显出其综合功能。稳定的湿地生态系统首先表现在结构上的稳定,在生物与生物之间,生物与环境之间,环境各组分之间保持相对稳定的合理结构;其次是系统功能的稳定,表现为系统不断与外部环境进行物质和能量交换过程中保持物质输入与输出的平衡等。在所有影响湿地生态系统结构、功能和过程的因素中,水分和营养物质是关键控制因素。水文过程和营养物质如碳、氮、硫、磷等的循环作为湿地生态系统物质流动的重要组成部分,对湿地生态系统内水环境、土壤环境、生物环境产生明显影响,对湿地生态系统的演化和健康起着决定性作用,影响着湿地生态系统的稳定性和生态功能效应。因此,深入研究湿地生态系统水文过程和碳、氮、硫、磷等物质的循环规律、驱动力及生态环境效应机理,对湿地保护及其风险管理具有重要的科学意义。

湿地作为介于陆地与水体间过渡的一种生态类型,有其独特的形成、发育和演化规律,既具有水生态系统属性,又具有陆地生态系统属性,它在诸多方面依赖于相邻生态系统与其发生物质和能量交换,为此也影响邻近生态系统的组成和功能(Mitsch W. J., Gosselink J. G., 2000)。湿地与相邻生态系统之间进行物质交换主要通过气象、水文和生物等过程来实现,而这些过程又经常处于激烈的变动之中,在人类活动及全球变化的影响下,湿地生态系统的变化更为强烈和复杂。首先,湿地生态系统对气候变化更为敏感,气候变化影响着湿地水文、生物地球化学过程、植物群落演替及生态功能等。气候变暖引起湿地水温和土温升高,影响湿地的能量平衡;气候变暖导致降水分布不均,湿地退化、面积萎缩。其次,人类活动干扰了湿地生态系统正常的水分循环与物质循环过程,从而对湿地生态系统产生重大影响(Raiesi F., 2006)。同时,湿地开垦为农田后,其土壤水文和氧化-还原条件发生较大变化,植物残体及沉积泥炭的分解速率提高,CO₂、CH₄、N₂O等温室气体的释放量增加,改变了湿地生态系统碳、氮、硫、磷及水循环模式,进而影响湿地生态系统的稳定性和生态效应(Mitsch W. J., 1994)。

湿地中的物质循环过程制约和控制着湿地生态系统多项界面之间的物质和能量交换,以及不同营养元素储存库间物质的流动。不仅影响区域物质的输移、能量流

动,而且影响湿地的生产过程。湿地作为主要营养元素(碳、氮、硫、磷)的源/汇或调节器,可以延缓或遏制环境恶化趋势。研究湿地环境中碳、氮、硫、磷等营养物质的生物地球化学循环过程驱动机制及其生态效应,对于研究全球变化,应对全球变暖,确保湿地生态系统稳定性,保护人类生存环境,促进社会经济可持续发展,具有重要的理论和实践意义。

中国湿地类型多样,分布广泛,面积各异,从内陆到沿海,从农村到城镇都有分布。湿地是重要的国土资源和自然资源,是一种多功能的生态系统,是陆地生态系统的重要组成部分,湿地与人类的生存、繁衍、发展息息相关。湿地问题是关系我国乃至世界各国社会经济发展的重大资源环境问题之一。同时,陆地生态系统包括湿地生态系统在内的碳、氮、硫、磷循环研究是预测未来大气中二氧化碳和其他温室气体含量,认识大气圈与生物圈相互作用等科学问题的关键,也是认识地球表层生态系统的水循环、养分循环和生物多样性变化的基础。进一步研究和认识土地利用/管理方式变化如何影响土壤有机碳组分动态(张金波,2006),土壤有机碳组分变化对土壤总有机碳动态的贡献,以及何种有机碳组分对评价土壤碳库的动态最有效,这对认识和评价不同土地利用/管理方式的土壤有机碳动态和固碳潜力,揭示土壤有机碳源/汇转化动态过程及机理,以及预测土壤质量的变化趋势都有重要理论意义。另外,提出合理土地利用/管理方式,对减少农业土壤碳排放,恢复和提高土壤碳储量,大大降低CO₂等温室气体的排放速率,延缓全球气候变暖,实现土地的可持续利用也具有重要实践意义。

中国是世界上湿地分布最广的国家之一,并且有独特的青藏高原湿地。从寒温带到热带,从沿海到内陆,从平原到高原,都有广泛分布的湿地,人工湿地和自然湿地的总面积约为6600万hm²,居世界第四位。人工湿地以稻田为主,总面积约3800万hm²。自然湿地主要包括沼泽、泥炭地、浅水湖泊、河流河滩地、海岸滩涂和盐沼等,总面积2500万hm²,其中沼泽湿地面积约为940万hm²,占自然湿地总面积的38%(赵魁义,1999)。位于黑龙江、松花江和乌苏里江下游地区的三江平原是我国最大的淡水沼泽湿地分布区,占全国湿地总面积的9.55%,在我国湿地中具有很强的典型性和代表性。由于自然湿地是全球大气中碳、氮、硫、磷最主要的自然源/汇,沼泽湿地又是自然湿地中最重要类型之一,为此,选择三江平原湿地作为研究区域,研究三江平原沼泽湿地碳、氮、硫、磷的生物地球化学过程和特征以及主要环境影响因子,对于认识沼泽湿地碳、氮、硫、磷地理分异和探讨我国湿地生态系统碳、氮、硫、磷的源/汇转化规律及对全球变化的响应和贡献具有重要的科学价值。

总之,全球变化研究水平在某种程度上已成为一个国家整体科学水平的重要标志之一。在我国开展全球变化及其区域响应研究也是国家“十一五”规划中“坚持实

施可持续发展战略,使人口增长、资源开发、生态建设、环境保护与经济增长相协调”重要原则的体现。区域研究是了解全球环境变化的重要途径,只有通过结合自身特点的区域环境变化的集成研究,才能更好地、较为透彻地解决全球变化的实际应用问题(李家洋等,2006)。我国的全球变化研究应充分发挥已有的学术优势,针对湿地这一独特的地域特征,选择能够带动区域整体环境研究的核心科学问题,围绕全球变化及其区域响应,揭示我国对全球变化的响应与影响,剖析湿地环境变化的自然和人文因素。三江平原是我国典型的沼泽湿地,面积大,范围广,且开发年限较短,其环境中碳、氮、硫、磷等生源要素的生物地球化学循环及对全球变化的响应和环境影响,将为我国研究湿地区域在全球变化背景下的合理发展提供对策和决策依据,有望在湿地生物地球化学研究方面在国际上取得创新成果。

第二节 湿地系统碳、氮、硫、磷生物地球化学过程研究现状综述

一、湿地中的碳、氮、硫、磷与全球变化

湿地环境中碳、氮、硫、磷等生源要素的生物地球化学循环是地球表层系统的主要构成部分,它涉及地表环境中物质的交换、运移和转化的过程,是地球表层运动和生命过程的主要营力。各种迹象表明,人类社会活动正在干扰或改变这一循环系统,导致了地球环境自然生态平衡的破坏,产生一系列严重的生态和环境问题。系统深入地研究碳、氮、硫、磷等的生物地球化学过程和全球/区域 CO_2 、 N_2O 等温室气体以及人类活动对其的影响,可以揭示引起全球变化的一些根本原因,认识区域尺度环境要素的相互作用以及对全球变化的可能响应。全球变化研究的本质在于预测全球变化及其对人类生存环境的影响,提出适应与减缓全球变化的对策,其中湿地环境中碳、氮、硫、磷浓度的变化与全球变化的关系密不可分。湿地作为四大陆地生态系统之一,在过去 5000~10000 年内一直被认为是大气中 CO_2 的重要碳“汇”(Frolking, et al. Modeling northern peatland decomposition and peat accumulation [J]. Ecosystem, 2001(4):479-498),在陆地及全球碳循环中起着重要作用,并表现出较高的敏感性。湿地是陆地生态系统中最重要碳库之一,有机质不完全分解导致湿地环境中碳和营养物质的累积。众所周知,“温室效应”导致地球变暖(包括湿地在内),

气候变暖加速湿地生物地球化学反应,这将促进湿地环境中碳的释放,进一步提高大气中 CO_2 的浓度。由于人类活动干扰和破坏湿地生态系统的稳定性,特别是湿地开垦成农田后,使湿地水文特征发生显著变化,湿地排水变为旱田,土壤有机质加速矿化,同时也加速碳、氮、硫、磷的释放,使湿地由温室气体的汇转为源,成为温室气体重要的释放源,温室气体浓度的增加引起全球气候变暖,反过来又对湿地产生重要影响。气候变化可以改变地区降水量和蒸发的类型,特别是气温和降水量变化的速率影响着与湿地相关联的气候带和生物物种变化。据估算结果,其变化速率将超过生态系统构成种群的适应能力,因此将使湿地变为不稳定,存在种群毁灭的可能性(崔保山,杨志峰.湿地学[M].北京:北京师范大学出版社,2006)。许多事实已表明,湿地中有很多种群已经灭绝或者濒临灭绝,破坏了湿地碳、氮、硫、磷等的生物地球化学平衡,进而促进了湿地由温室气体的汇转为源,成为温室气体重要的释放源,加速了全球变暖的速度。

湿地中碳、氮、硫、磷是湿地生态系统植物光合作用和初级生产力形成过程中最受限制的营养元素,特别是氮、磷等营养元素作为湿地生态系统营养水平的指示剂之一,常常是湿地生态系统最主要的限制性营养成分,其含量高低直接影响着湿地系统的生产力(Mistch, et al., 2000)。仅就湿地小循环而言,植物通过从土壤中吸收大量的氮营养以维持自身生长的需要,在此过程中又会有相当数量的 NPP(植被净初级生产力)以枯落物的形式归还地表,形成以有机碳/氮等为主体的土壤碳/氮库,再经过矿化作用变为植物可利用的营养成分(氮、硫、磷等),支持植物生长。同时,湿地常年积水或季节干湿交替的环境条件还为硝化与反硝化提供了良好的反应环境。而硝化与反硝化作用又是导致氮气体(N_2 、 N_2O)损失的重要机制(韩兴国等,1999),其作用的强度直接影响着 N_2O 的释放量。 N_2O 作为温室气体重要组成成分有着巨大的环境效应(IPCC, 2001),其在过去 100 年中对全球温室效应的“贡献”达 4%~7%(Bouwman A. F., 1990)。据文献报道, N_2O 的 GWP(全球变暖潜势)是 CO_2 的 250 倍, N_2O 的寿命是已知温室气体中最长的,其寿命长达 150 年,所以它对全球环境的影响也是长期的和潜在的(Prinn R., Cunnold D., Rasmussen R., 1990)。 N_2O 在进入平流层后最后被光解为 N_2 和 NO , 而 NO 又是导致酸雨发生和臭氧层破坏的直接原因(王少彬,1994)。据研究, N_2O 增加一倍将导致全球气温升高 0.44 $^\circ\text{C}$, 臭氧量减少 10%,从而使紫外线向地球的辐射增加 20%(Crutzen P. J., et al., 1997)。由此可见, N_2O 与全球三大大气环境问题——全球变暖、臭氧层破坏和酸沉降息息相关。20 世纪 80 年代以来,由于 CO_2 等温室气体浓度的增加而引起的全球气温升高,主要是人类活动的强度不断加大而致。Hansen(1999)认为有 99% 的证据表明,现今全球变暖是人类活动导致温室气体浓度持续增加而造成的。其中 CO_2 和 CH_4 等是碳