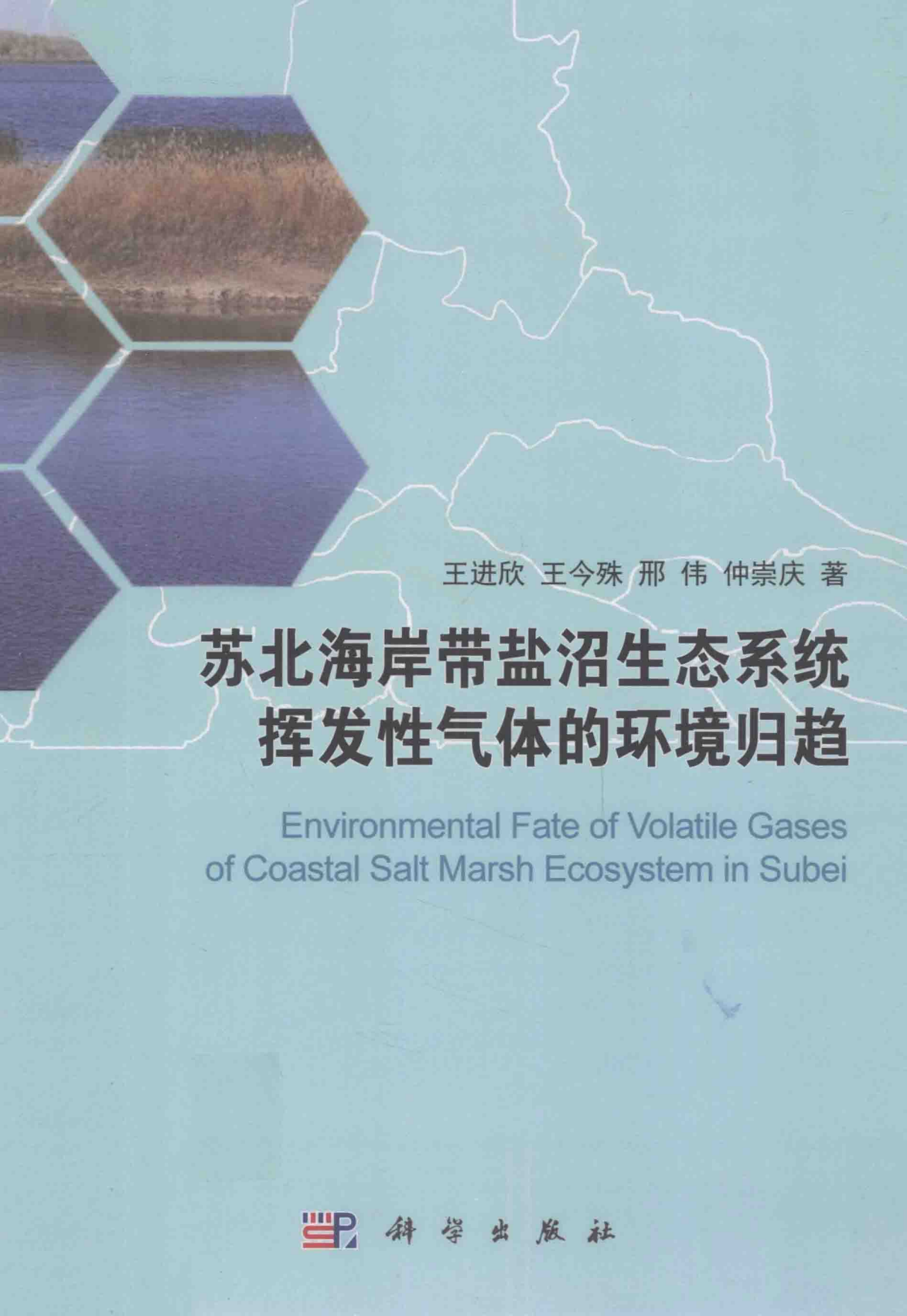




王进欣 王今殊 邢伟 仲崇庆 著

苏北海岸带盐沼生态系统 挥发性气体的环境归趋

Environmental Fate of Volatile Gases
of Coastal Salt Marsh Ecosystem in Subei



科学出版社

苏北海岸带盐沼生态系统 挥发性气体的环境归趋

王进欣 王今殊 邢 伟 仲崇庆 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者对近 10 年参加和主持的国家自然科学基金资助项目研究成果的系统总结,对与 C、N、S 和 Cl 等元素生物地球化学循环相关的挥发性气体的环境归趋以及与之相关的关键科学问题进行了较为系统的研究。核心内容包括:提炼挥发性气体排放的潮周期动态研究中的关键科学问题和不确定性;影响海岸带盐沼土壤营养物质含量时空变化的关键因子的甄别;潮水和植被交互作用梯度上盐沼土壤理化性质变化特征研究,不同植被和水文条件下苏北盐沼土壤 TN、TP 和 OM 剖面规律的揭示;潮水和植被交互作用空间梯度上挥发性气体通量变化特征研究;挥发性气体地气交换通量的相互关系定量化研究;硫酸盐对生源硫气体的促排作用和对甲烷的抑排作用浓度的最佳阈值初步研究;盐城海岸带土地覆盖变化及其环境效应分析。

本书可供湿地生态学、环境科学、自然地理学、生物地球化学、生态水文学、植物生态学、湿地保护和流域管理等领域的科研技术人员以及高等院校师生和政府部门相关人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

苏北海岸带盐沼生态系统挥发性气体的环境归趋 / 王进欣, 王今殊, 邢伟, 仲崇庆著. —北京: 科学出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-03-041184-6

I. ①苏… II. ①王…②王…③邢…④仲… III. ①海岸带-盐沼-生态系统-研究-苏北地区 IV. ①P737.11②P942.530.78

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 129198 号

责任编辑: 周 丹 曾佳佳/责任校对: 韩 杨

责任印制: 徐晓震/封面设计: 许 瑞

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术咨询服务公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2014 年 6 月第一次印刷 印张: 14

字数: 280 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着对全球变化关注度的提升,与全球变化有直接关系的挥发性有机气体(volatile organic compound, VOC)研究越来越受到关注,然而遗憾的是,以往挥发性气体研究多集中于农田、森林、草地和海洋等生态系统。对于地表重要的自然综合体——海岸带盐沼却少有报道。盐沼生态系统具有特殊的生态条件:地表处于长期积水或常湿状态,地表覆以沼生植被,形成特殊的氧化还原环境,决定了盐沼生态系统 C、N、Cl 和 S 等元素的迁移转化过程明显有别于海洋、内陆淡水和陆地生态系统。这种生境条件下的温室气体、氯代烷烃、苯系物以及还原性硫等挥发性气体环境归趋具有一定的特殊性。了解这一特殊性和规律对估测海岸挥发性气体通量变化具有重要的理论意义。再则海岸带盐沼因处于典型的海陆作用的生态交错带,一方面具有较高的生产力,大量的有机物生产;另一方面,海水中含有大量营养盐离子被潮流带入盐沼,这为挥发性气体生产提供了必要条件。另外,潮汐是潮间带盐沼生态系统的经常性干扰因素,潮汐作用引起的水盐同步入侵是海岸带盐沼典型的特征之一,潮汐和潮流循环过程与其他环境因子(如盐度、有机质含量、土壤含水量、氧的可利用率、气体的扩散率、土壤酸碱度、氧化还原电位以及生源气体初始浓度等)和生物因子(如植物初级生产和微生物的活性等)共同作用于盐沼的生物地球化学循环过程,影响着海岸带盐沼元素的循环与转化。因此,充分探讨和研究潮水和植被交互作用条件下海岸带盐沼挥发性气体的环境归趋具有重要的理论意义和实践价值。

本书是作者对近 10 年来主要研究工作的回顾,是国家自然科学基金资助项目“海岸带盐沼卤代甲烷释放通量及其调控”(90211008)结题成果和“周期性潮水对海岸带盐沼生源二甲基硫气体自然释放的影响”(31100361)以及“海岸带盐沼潮水和植被交互作用梯度上生源硫气体和甲烷通量变化特征及相互关系研究”(41271122)前期研究成果的系统总结。研究工作以探索海岸带盐沼挥发性气体排放规律及机制为目的,从江苏盐城盐沼生态系统环境特征及其挥发性气体通量变化特征入手,通过对潮水和植被交互作用梯度上盐沼环境特征研究和挥发性气体地气交换的野外原位、实验测定和室内控制实验,确定挥发性气体的主要生产者及其通量贡献,确定挥发性气体通量间的相互关系,并预测全球变化情景下气体通量的变化趋势,为合理估算不同生态系统挥发性气体排放量和有效控制提供依据。重点研究了苏北海岸带盐沼生态系统与元素 C、N、S 和 Cl 生物地球化学循环相关的挥发性气体的环境归趋问题。

本书由课题组主要负责人王进欣完成统稿,编写人员包括:王进欣、王今殊、邢伟、仲崇庆等。本书第1章、第2章、第4章、第5章、第6章由王进欣编写;第3章由仲崇庆编写;第7章由王今殊编写;第8章由邢伟编写。

本书得到了国家自然科学基金资助项目(31100361;41271122)的资助。本书涉及的研究工作得到了南京大学孙书存教授和钦佩教授的指导和帮助,得到了实验室相关同事、同学以及盐城保护区相关人员的热心支持,实验室研究生张维康、张威、李超和王猛等参加了野外试验工作。在此一并表示衷心的感谢。

本书涉及的研究工作及撰写完成参阅了很多前人的研究成果,在此向他们表示诚挚的敬意与感谢。同时,由于作者水平和研究条件有限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2014年4月9日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 海岸带盐沼排放 (吸收) 挥发性气体种类及其环境效应	1
1.2 挥发性气体排放的潮周期动态研究中的关键科学问题	5
1.3 挥发性气体排放的潮周期动态研究中的不确定性	10
参考文献	13
第 2 章 研究区概述及研究方法	18
2.1 研究区概述	18
2.2 研究方案	21
参考文献	28
第 3 章 潮水和植被交互作用梯度上盐沼土壤理化性质变化	29
3.1 影响海岸带盐沼土壤营养物质含量时空变化的关键因子: 潮水和植被交互作用	29
3.2 不同植被和水文条件下苏北盐沼土壤 TN、TP 和 OM 剖面特征	41
参考文献	51
第 4 章 海岸带盐沼生态系统 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 自然排放特征	54
4.1 盐沼生态系统 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 等温室气体变化动态	55
4.2 植物和土壤对温室气体通量的贡献	60
4.3 环境因子对盐沼温室气体通量的影响	62
4.4 温室气体通量变化模式讨论	64
4.5 环境因子对温室气体通量的影响	66
4.6 高等植物对温室气体通量贡献	67
4.7 小结	67
参考文献	68
第 5 章 海岸带盐沼生态系统挥发性氯代烷烃的环境归趋	72
5.1 氯甲烷、氯仿、四氯化碳和甲基氯仿等氯代烷烃环境归趋	74
5.2 二氯甲烷和 1,2-二氯乙烷通量沿高程梯度的变化特征	94
5.3 海岸带盐沼氯代烷烃单体成分通量变化及相互关系	100
5.4 小结	101

参考文献·····	102
第 6 章 海岸带盐沼生态系统挥发性苯系物的环境归趋·····	113
6.1 苏北海岸带不同盐沼湿地生态系统致癌物质外源苯的环境归趋: 自然移除·····	113
6.2 盐沼高程梯度上甲苯通量特征·····	122
6.3 互花米草入侵盐沼自然移除外源恶臭污染物苯乙烯特征·····	126
6.4 苏北海岸带盐沼生态系统对二氯苯的自然吸收通量特征·····	134
参考文献·····	142
第 7 章 潮水和植被交互作用空间梯度上生源硫气体和甲烷通量变化特征及 相互关系·····	147
7.1 引言·····	147
7.2 海岸带盐沼还原性硫气体和甲烷自然释放研究若干科学问题述评 ·····	153
7.3 苏北盐沼 DMS、CS ₂ 和 CH ₄ 排放通量沿高程梯度上的变化特征 ·····	157
参考文献·····	162
第 8 章 盐城海岸带土地覆盖变化及其环境效应分析·····	167
8.1 研究方法·····	169
8.2 盐城海岸带湿地土地覆盖时空动态变化·····	174
8.3 土地覆盖变化对盐城海岸带湿地生物过程的影响·····	183
8.4 土地覆盖变化对盐城海岸带湿地痕量气体排放的影响·····	193
8.5 土地覆盖变化对盐城海岸带湿地生态系统服务价值的影响·····	202
参考文献·····	209

第1章 绪 论

随着对全球变化关注度的提升，与全球变化有直接关系的挥发性有机气体（volatile organic compound, VOC）研究越来越受到关注，然而遗憾的是，以往挥发性气体研究多集中于农田、森林和草地以及海洋等生态系统。对于地表重要的自然综合体——海岸带盐沼却少有报道。盐沼生态系统具有特殊的生态条件：地表处于长期积水或常湿状态，地表覆以沼生植被，形成特殊的氧化还原环境，决定了盐沼生态系统 C、N、Cl 和 S 等元素的迁移转化过程明显有别于海洋和内陆淡水和陆地生态系统。这种生境条件下的温室气体、氯代烷烃、苯系物以及还原性硫等挥发性气体环境归趋具有一定的特殊性。了解这一特殊性和规律对估测海岸挥发性气体通量变化具有重要的理论意义。再则海岸带盐沼因处于典型的海陆作用的生态交错带，一方面具有较高的生产力，大量的有机物生产；另一方面，海水中含有大量营养盐离子被潮流带入盐沼，这为挥发性气体生产提供了必要条件。另外，潮汐是潮间带盐沼系统的经常性干扰因素，潮汐作用引起的水盐同步入侵是海岸带盐沼典型的特征之一，潮汐和潮流循环过程与其他环境因子（如盐度、有机质含量、土壤含水量、氧的可利用率、气体的扩散率、土壤酸碱度、氧化还原电位以及生源气体初始浓度等）和生物因子（如植物初级生产和微生物的活性等）共同作用于盐沼的生物地球化学循环过程，影响着海岸带盐沼元素的循环与转化。因此，充分探讨和研究潮水和植被交互作用条件下海岸带盐沼挥发性气体的环境归趋具有重要的理论意义和实践价值。

1.1 海岸带盐沼排放（吸收）挥发性气体种类及其环境效应

全球挥发性气体收支研究已成为全球变化研究的热点（Ivanov et al., 1989; Harper, 2000; Xiao et al., 2010），海岸带盐沼在与挥发性气体相关元素（主要包括 C、N、S 和卤族元素）的全球循环中扮演着重要的角色。目前，广为关注的挥发性气体主要包括温室气体（greenhouse gases, GHGs）、还原性硫气体（reduced sulfur gases）、氯代烷烃（chloralkanes）和苯系物（BTEX）4 类（图 1.1）。

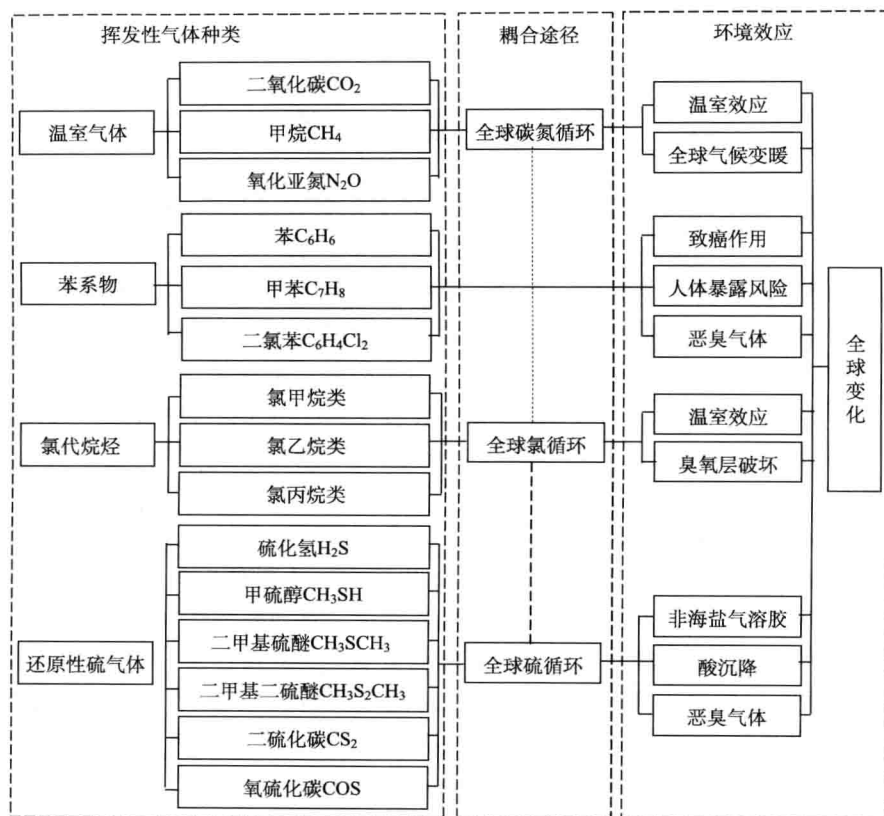


图 1.1 海岸带盐沼排放的挥发性气体种类及其环境效应

1.1.1 温室气体

CO_2 、 CH_4 、 N_2O 以及卤烃等温室气体在大气组成和热结构方面扮演着重要角色，与大气温室效应和全球气候变暖等全球变化现象紧密相关（IPCC, 2007）。当前，温室效应与全球气候变暖已经越来越强烈地影响着人们的日常生活，受到世人的普遍关注。 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 以及卤烃等温室气体中具有较高的增温潜力（IPCC, 2001），其中 CH_4 和 N_2O 增温潜力分别是 CO_2 的 180 倍和 3.7 倍（Lashof and Ahuja, 1990），以及近年来 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 在大气中较大的年增长率、较长的大气存留时间和它们在大气层中重要的光化学作用（IPCC, 2007），使其成为研究温室效应的焦点。 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的 30%、70% 和 90% 分别来自于生物源（Kumaraswamy et al., 2000）。湿地是大气 CH_4

和 N_2O 最重要的生物源, 占全球 CH_4 和 N_2O 源的 40%~50% (IPCC, 1994)。目前, 国内外学者研究主要涉及: ①典型湿地生态系统温室气体通量日变化和季节变化规律 (王德宣等, 2002; Zhang et al., 2005; 宋长春等, 2006; 于君宝等, 2009); ②土地利用方式变化对温室气体通量的影响 (Houghton et al., 1999); ③土壤温室气体生产、传输、氧化和排放机理研究 (Mer and Roger, 2001); ④温室气体排放总量估算 (Cao et al., 1996; 闫敏华和华润葵, 2000); ⑤温室气体源汇辨识及其贡献比率研究 (Whalen and Yoshinari, 1985); ⑥温室气体排放生态和生物学控制研究 (蔡祖聪, 1999; 曾从盛等, 2008)。

1.1.2 还原性硫气体

DMS 和 CS_2 等还原性硫成分通过化学和光化学氧化形成非海盐硫酸盐 (non-sea salt sulfate, NSS-SO_4^{2-})、甲基磺酸盐 (methanesulfonate, MSA) 和二甲基亚砜 (dimethylsulfone, DMSO) 等稳定的终端产物, 最终会增加大气酸度和影响辐射平衡。DMS 和 CS_2 等还原性硫成分通过海气交换由海洋环境进入海洋边界层, 在大气污染、云的形成、酸沉降的形成、全球气候变化以及全球硫循环中扮演着重要的角色 (Lovelock et al., 1972; WMO, 2003), 其自然生产和循环越来越受到人们的重视。就通量而言, 生源 DMS 是大气还原性硫成分最主要的来源, 其中, 由海洋 DMS 排放量占进入大气的总硫量的 10%~40% (Lee et al., 2004)。还原性硫气体自然生产的研究发展非常迅速, 研究范围包括陆地生态系统 (Stets et al., 2004; 王进欣等, 2004) 和海洋生态系统 (Yang et al., 2005)。目前研究表明, 海岸带碱水盐沼、沼泽和潮间带也是生源 DMS 成分的主要自然源 (DeLaune et al., 2002), 其中, 互花米草 (*Spartina alterniflora*) 盐沼具有很高的 DMS 排放率, 原因是互花米草植物组织中含有丰富的 DMS 底物二甲基硫丙酸 (dimethylsulfoniopropionate, DMSP), DMSP 通过酶裂解可以产生 DMS (DeLaune et al., 2002)。中国作为海岸带陆-海相互作用 (LOICZ) 的参加国, 已把 DMS 作为 LOICZ 的中心内容之一, 已在中国东海等海区展开有关还原性硫气体初步研究 (Yang et al., 2005)。

1.1.3 挥发性氯代烷烃

CH_3Cl 等氯代烷烃是具有重要环境意义的挥发性气体, 研究发现它们是主要的自然源臭氧层破坏物质 (Laturnus et al., 2002)。氯代烷烃自然生产是一个崭新的研究课题。人们在探索氯代烷烃新源 (汇) 方面作出了不懈的努力, 尤其是来自海洋地区的研究最为突出, 对大气氯代烷烃全球预算作出了重要的贡献。

主要进展体现在以下几个方面：①典型湿地生态系统氯代烷烃通量与生态调控 (Rhew et al., 2000; Wang et al., 2006a, 2006b, 2007); ②氯代烷烃生产 (吸收) 机理, 生产过程主要涉及生物学和非生物学过程 (Rhew, 2001); ③典型湿地生态系统氯代烷烃生产者确定及其贡献比率研究。通过稳定同位素比率来确定生产者贡献比率逐渐成为一个非常重要的研究方向 (Thompson et al., 2002); ④海 (陆) - 大气氯代烷烃气体交换模型研究 (Khalil and Rasmussen, 1999)。氯代烷烃的生产和消耗过程既需要从宏观上把握, 也需要从分子水平上理解和模拟。未来研究应该充分考虑各个不同层次的研究结果, 通过尺度上的转换和综合, 建立数值模拟模型, 预测和调控其通量。

1.1.4 挥发性苯系物

本研究区大气中可检测到的苯系物组分主要包括苯、甲苯、苯乙烯和 1,3-二氯苯。

挥发性苯 (benzene, C_6H_6) 在环境中长期暴露具有致癌和致其他疾病的风险 (Fishbein, 1984), 已被美国环保局 (USEPA)、美国工业卫生联合会 (ACGIH) 和世界卫生组织的国际癌症研究中心 (IARC) 列入致癌物质清单 (Infantea, 1992; IARC, 2000; USEPA, 2007)。中国《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996) 也规定大气中苯的最大允许浓度为 $17\text{mg}/\text{m}^3$ 。大气中挥发性苯主要来自工业和汽车排放 (Cross, 1979; Fishbein, 1984), 随着工业和汽车对石油消费量的快速增加, 苯在大气、水体和土壤中存在的范围和浓度迅速上升, 造成环境中严重的苯浓度超标, 给人群、动物和植物带来了巨大的暴露风险 (Treesubsuntorn and Thiravetgan, 2012), 严重地威胁着人的身体健康。

甲苯 (methyl benzene, C_7H_8) 是一种对环境和健康具有重要影响的挥发性有机成分, 与其他碳氢化合物相比, 具有相对较高的水溶性 (water solubility) 和遗传毒性 (genotoxicity), 甲苯属于 USEPA 和中国环境优先控制污染物 (周文敏等, 1991; USEPA, 2008)。汽油生产、加工和使用过程中, 甲苯可能被释放到地表水体和土壤中; 石油和煤的开采以及汽车尾气的排放也可导致甲苯进入大气环境。已有研究表明在反硝化过程 (Schocher et al., 1991)、铁离子 (Lovley and Lonergan, 1990) 和硫酸盐 (Edwards and Grbic-Galic, 1994) 还原过程以及甲烷生产 (Beller et al., 1996) 过程中甲苯可被厌氧分解。海岸带盐沼含有丰富的有机质和硫酸盐, 理论上海岸带盐沼可能是大气甲苯的重要的汇, 然而, 甲苯源汇的辨识和量化仍然存在很大的不确定性。因此, 甲苯自然源汇辨识和量化的研究对更好地理解大气-植被-土壤连续体中甲苯的归趋行为是非常重要的和必要的。

挥发性有机污染物苯乙烯 (styrene, C_8H_8) 是国家严格控制的恶臭气体之一, 同时也是低毒化学品污染物, 苯乙烯在环境中长期暴露可致人体产生黏膜和眼睛刺激和肠胃功能紊乱, 甚至产生疼痛、疲劳、乏力、抑郁和神经病变, 严重地危害着人体的健康, 已被美国 1990 年“清洁空气修正案”认定为有毒气体 (USEPA, 1999)。同时也是中国《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993) 认定的八种恶臭物质之一, 并规定大气中苯乙烯的排放限值为 $3.0\text{mg}/\text{m}^3$ 。大气中恶臭气体苯乙烯主要来自化学和石化工业在聚苯乙烯、苯乙烯-丁二烯橡胶、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物和树脂的生产、应用、运输和储藏过程中的大量排放 (王树坤等, 2007; 袁青彬等, 2012), 其自然来源来自微生物和真菌代谢 (USEPA, 1999)。

二氯苯 (dichlorobenzene, DCB, $C_6H_4Cl_2$) 作为合成农药和杀虫剂等的化学中间体或溶剂被广泛地应用于农业和工业, 对动物和人类的健康具有不利影响, 因此它在环境中的赋存、行为和归趋备受公众关注 (Rehfuss and Urban, 2005; Ziagova and Liakopoulou-Kyriakides, 2007; San Miguel et al., 2013), 已有一系列的研究集中在二氯苯的赋存状态、环境危害评估以及去除机制等方面 (Ganesan et al., 2013; Liu et al., 2013; San Miguel et al., 2014), 但是, 目前对大气、水体和土壤环境中二氯苯的去除机制的研究多限于物种个体水平的吸收或实验材料吸附机理的研究 (Rehfuss and Urban, 2005; Ziagova and Liakopoulou-Kyriakides, 2007; San Miguel et al., 2013; Zohre and Jim, 2013; Ma et al., 2014), 在生态系统水平上大气二氯苯自然吸收能力的研究明显不足。这对更好地理解盐沼含氯污染物的行为和去向造成了很大的障碍, 不利于在生态系统水平上对大气二氯苯自然吸收特征深入了解, 不利于二氯苯全球预算的准确评估, 不利于盐沼生态系统途径的管理。

1.2 挥发性气体排放的潮周期动态研究中的关键科学问题

海岸带潮汐循环对挥发性气体生产、吸收和传输等各个过程均具有深刻的影响, 因此, 对潮汐循环影响挥发性气体生产、吸收和传输过程中所涉及的关键科学问题进行深入的研究, 非常有助于对挥发性气体排放的潮周期动态的理解。综合国内外有关挥发性气体排放的潮周期动态研究进展, 未来挥发性气体排放的潮周期动态研究中的 5 个关键科学问题值得关注 (王进欣等, 2011) (图 1.2), 图中: Q_1 表示潮汐循环对植物枯落物分解和土壤生源要素生态化学计量学特征的影响; Q_2 表示潮汐循环影响下电子受体和盐分输入特征及其对挥发性气体排放的影响; Q_3 表示潮汐循环影响下挥发性气体生产者生态生理特征和生产者贡献比率变化特征; Q_4 表示潮汐循环影响下海岸带盐沼高等植物根际生理生态过程;

图 1.2 生源气体排放的潮周期动态研究中的关键科学问题与不确定性

1.2.1 潮汐循环对植物枯落物分解和土壤生源要素生态化学计量学特征的影响

枯落物分解是海岸带盐沼生态系统的重要过程，它对海岸带盐沼挥发性气体的排放具有重要影响。一方面，盐沼生态系统枯落物的分解本身就是挥发性气体产生的重要途径，比如，有研究表明植物枯落物在腐解过程中伴随着还原性硫气体的产生 (Haines et al., 1989)；另一方面，通过对土壤呼吸以及碳、氮、硫和氯等元素输入与归还过程的影响，在生源要素的生物地球化学循环中发挥着重要作用。因此，枯落物对挥发性气体排放的贡献是一个非常复杂的生物学过程，忽略其复杂的贡献机理及周期性潮水等环境影响因素，将难以正确评价枯落物对挥发性气体排放的贡献。

海岸带盐沼枯落物分解同时受到生物因素和非生物因素的制约, 周期性潮水往往通过作用于影响枯落物分解的生物因素 (如枯落物性质、植物类型、底栖动

物和微生物活性及功能群)和非生物因素(如水分、酸碱度和氧化还原电位等)来影响枯落物的分解,进而影响挥发性气体的排放(图1.2)。周期性潮水对枯落物分解的影响是十分复杂的,目前研究结果存在很大的分歧,主要表现为:①长期淹水抑制枯落物分解(McKee and Seneca, 1982);②周期性潮水对枯落物分解无影响,但却促进了枯落物N、P元素的损失(全川和刘白贵, 2009);③盐沼淹水促进了枯落物的分解(Montagna and Ruber, 1980);④具体影响与潮水涨落阶段以及淹水时间和分解时间比值有关(Day, 1983)。

潮汐作用通过各种物理、生物和化学作用影响着湿地土壤的生源要素的循环过程及其相应的生态化学计量学特征(王维奇等, 2010)。生态系统生源要素的循环是全球变化研究的热点之一,而且碳与氮、硫、氯等元素的循环过程是相互耦合的,因此,研究潮汐作用对碳、氮、硫和氯的平衡的影响对于认识全球碳、氮、硫和氯生物地球化学循环具有重要意义。生态化学计量学是近年来新兴的一个生态学研究领域,是生态学、生物化学和土壤化学研究领域的新方向,也是研究土壤-植物相互作用与生源要素循环的新思路。为了阐明盐沼土壤-植物生源要素生态化学计量学特征对淹水频率差异的响应,需要采用多种生态控制试验,开展实地观测,收集不同季节潮周期内植物、枯落物和土壤样品,对比分析处于不同潮水作用频率和演替阶段的生态系统碳、氮、硫和氯的生态化学计量学特征。

1.2.2 潮汐循环影响下电子受体和盐分输入特征及其对挥发性气体排放的影响

潮汐作用引起的水盐同步入侵是海岸带湿地典型特征之一,在潮水输入的同时,对挥发性气体排放具有重要影响的电子受体和盐分也同步输入。潮水周期性入侵和浸没,使得盐沼界面成为一个沉积物-水-气周期性交互作用的界面,各种电子受体、盐分以及生源要素的界面交互作用深刻地影响着生源要素的生物地球化学循环(图1.2)。关于电子受体输入对甲烷等挥发性气体产生的影响研究,主要集中在稻田等人工湿地的研究(Chidthaisong and Conrad, 2000),天然湿地的研究相对较少(Roden and Wetzel, 2003),在国内对红树林和闽江河口等湿地展开过研究(曾从盛等, 2008; 卢昌义等, 1998)。

依照热力学原理,在土壤不同电子受体的还原序列中, NO_3^- 首先被还原,其次为 Mn^{4+} 、 Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} ,最后才是甲烷的生产。当盐沼环境中存在 NO_3^- 、 Mn^{4+} 、 Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} 存在时,甲烷生产将受到抑制,这也正是盐沼生态系统相对于稻田等人工湿地甲烷排放量相对较低的原因。因此, NO_3^- 、 Mn^{4+} 、 Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} 等电子受体和盐分的输入,将会增加电子受体与甲烷产生对电子的竞争,增强对甲烷生产的抑制作用,由此可能会产生甲烷的减排效应。但是由此造成的

甲烷减排效应的量化研究是明显不足的,大大限制了对减排效应贡献的正确评价。已有研究表明, Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} 等电子受体和盐分的输入对氯代烷烃和还原性硫气体的生产也具有重要的影响。同步输入的盐分中含有丰富的卤离子(它们是氯代烷烃产生的重要底物)和甲基供体(如 S-腺苷甲硫氨酸 SAM 和二甲基硫丙酸 DMSP), SAM 和 DMSP 对卤离子的甲基化过程可以形成氯代烷烃,这已被证明是盐沼氯代烷烃自然生产的重要过程之一(Harper et al., 1996; Hu and Moore, 1996)。另外, Keppler 等(2000)发现在有机质降解过程中,通过三价铁作为电子受体,卤离子可被烷基化,生成卤代甲烷,这是一个无需生物酶催化的非生物过程。Hamilton 等(2003)研究认为陆地环境中氯向氯甲烷的有机转换过程通过普通机制即可发生,植物木质素及胶质成分往往成为甲基提供者。另外, DMSP 也是 DMS 的主要生化前体物, DMSP 向 DMS 的转化在全球 S 的生物地化循环中扮演着重要的角色。

随潮水同步输入盐沼的电子受体、盐分和甲基供体的种类和数量对挥发性气体的生产具有非常重要的影响,因此,潮汐循环影响下电子受体和盐分输入的量化研究对深入探讨潮周期内挥发性气体排放动态具有重要的意义。但是,目前缺乏对潮汐循环影响下电子受体和盐分输入特征的深入了解,缺乏对潮汐对不同电子受体还原反应速率及程度的影响的了解,对不同电子受体还原的生物化学和微生物生态学研究明显不足,尤其是缺乏分子水平上细菌微生物还原机理的研究。今后研究中应加强野外原位的观测、室内培养与野外原位实验的结合,开展潮汐循环过程中电子受体和盐分输入的量化研究和潮汐对不同电子受体还原反应速率及程度的影响研究。

1.2.3 潮汐循环影响下挥发性气体生产者生态生理特征和生产者贡献比率变化特征

湿地是陆地生物 C 库的重要组成部分,在全球 C 循环中扮演着重要的角色。一方面,以大气 CO_2 为 C 源吸收 CO_2 ; 另一方面释放大量的 CH_4 (Choi and Wang, 2004)。海岸带盐沼土壤化学和 C 循环模式与泥沼和淡水湿地明显不同。以前研究认为有机质周转速率较低的盐沼等潮间带湿地是 C 和 N 的重要陆地汇(Moore, 2000),然而随着人类活动对湿地干扰的增加,使得 C 和 N 矿化速率增加,湿地由汇向源转变(Choi and Wang, 2004)。盐沼和红树林等潮间带湿地有很高的初级生产力和 C 积累,周期性潮水淹没的盐沼形成有利于甲烷生产的还原环境,如果温室气体能够通过植物进入大气环境,可以推断海岸带盐沼将有较高的温室气体排放,这一推断已经被证实。尽管其面积不足全球面积的 0.1%,其释放量还是非常可观的(Rhew et al., 2000)。中国东北淡水盐沼研究结果表

明冬季淡水盐沼是 CO_2 和 CH_4 的重要的源和 N_2O 的潜在的汇,但是解冻后 CO_2 和 CH_4 排放增加了 4.5~6 倍,同时盐沼也变成了 N_2O 的源 (Zhang et al., 2005)。然而遗憾的是,全球 C 预算多集中在内陆生态系统,红树林和海岸带盐沼 C 源和汇却研究不多。

海水中大量卤离子和甲基供体被潮流带入盐沼,这为氯代烷烃和还原性硫气体生产提供了必要条件。另外,潮汐是潮间带盐沼系统的经常性干扰因素,一方面,潮水通过对盐沼物理、化学和生物等因子的作用间接影响 CH_3Cl 和 DMS 等挥发性气体释放通量,但还没有研究能证明这一点;另一方面,潮水本身可能就是一个 CH_3Cl 和 DMS 等挥发性气体的源,有研究发现沿太平洋的海岸带有很高的 CH_3Cl 、DMS 和 CS_2 释放 (Yang et al., 2005; Wang et al., 2006a, 2006b, 2007),盐沼 CH_3Cl 和 DMS 等挥发性气体释放通量应该有来自于潮水的贡献。海岸带盐沼生态系统内的高等植物、植物菌根、海洋藻类、微生物等都可能是挥发性气体的贡献者 (图 1.2),这些可能生产者的种类、分布和生理生态特性均不同程度地受潮汐作用的影响。目前,通过一些去除实验或移植实验等实验手段可以定性确定气体排放贡献者,但是生产者贡献比率的定量研究需要通过可能生产者去除、移植实验、微生物功能群分离鉴定等实验、酶动力学实验以及稳定同位素技术的结合和综合应用,并且在实验设计上要充分考虑潮汐作用对不同生产者的影响和作用。

1.2.4 潮汐循环影响下海岸带盐沼高等植物根际生理生态过程

根际是土壤微生物活动特别旺盛的区域,根际微生物与根系组成一个特殊的生态系统。植物根际生理生态过程是推动植物与土壤环境物质和能量交换的主要动力。根系的生理学过程特别是根对水分养分的吸收和根际动态的影响,是根际环境研究的一个重要方面。根际动态对根际酸碱性、氧化还原条件、根分泌物以及根际微生物功能群类型和活性等动态变化的影响决定着挥发性气体排放的种类和强度 (图 1.2)。当土壤 (沉积物) 被潮水周期性地淹没时,在盐沼植物根系周围形成非常丰富的氧化还原界面,这些界面的形成会对 C、N、S 和 Cl 等生源要素的地球化学过程产生重要的影响。挥发性气体生产、传递和分解过程中,隶属于不同功能群的微生物发挥着重要的作用,周期性潮水的作用也将对不同功能群的微生物的生理生态活动产生重要的影响。另外,土壤动物和底栖动物的活动也是一个非常重要的因子,它们的生理生态特征也将不同程度地受到周期性潮水的影响,并通过土壤动物的代谢活动以及潮水和土壤动物 (底栖动物) 的交互作用,对土壤 (沉积物) 和上覆水的氧气和溶氧含量和土壤过程产生扰动作用,最终对挥发性气体产生、传递和消耗过程产生影响。

1.2.5 海岸带盐沼潮周期内挥发性气体通量特征及其相互关系

海岸带盐沼生态系统 C、N、S 和 Cl 元素地球化学过程既具有自己独立的特征,但更重要的是不同生源要素生物地球化学过程间存在着重要的耦合作用。以前研究更多的是对某一种元素的环境化学过程进行孤立的研究,对 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 等气体通量的空间分布和时间动态的特征进行了较为深入的研究,但是孤立地研究某一种气体的生产和消耗过程对更好地理解这些元素的行为和去向是明显不够的,也不利于对这些气体排放的调控研究。因为与这些挥发性气体相关的生物地球化学过程本身是相互联系和互相影响的,人为地割裂这种过程间的联系和耦合,非常不利于揭示和理解它们的行为和去向,更难以解释与之相关污染物的源汇特点和归趋行为。

1.3 挥发性气体排放的潮周期动态研究中的不确定性

1.3.1 认识问题的局限性

潮汐作用的影响涉及挥发性气体的生产、传递和转化等各个环节(图 1.2),但是人类对挥发性气体的认识和研究方法是在对其生产、传递和转化规律的认识过程中形成的,并不断地发展、充实和完善,这种认识方法在各个历史阶段和空间尺度上都存在着不可避免的局限性,在有限的时空范围内,因受到种种客观条件的制约,不可能全面地认识潮汐作用对挥发性气体生产、传递和转化过程的影响。

1.3.2 时空差异性导致的不确定性

已有研究表明,全球不同生态系统挥发性气体排放通量空间差异很大,单就稻田甲烷排放而言,不同区域空间差异就非常大,造成这种状况的原因可能与环境条件和耕作措施有关,比如日本多间歇性灌溉,而中国多施有机肥等。不同气候带的湿地具有不同的甲烷产生和排放能力,即使相似的生物地理环境,温室气体的产生和排放能力也会因湿地水分、温度、底物以及盐生植物的不同而呈现差异。卤代甲烷的空间分布表现为热带浓度最高,极地最低。海-气交换过程具有区域性和时间变异性,不同季节与不同区域海-气交换源汇效应是不同的。低纬热水表现为源,而高纬冷水则表现为汇,整体净源为 300Gg/a ($200\sim 400\text{Gg/a}$) (Moore, 2000)。盐沼植被卤代甲烷排放量呈现明显的季节变化特征,生长季排