

网络出版时间:2014-07-30 16:13

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.09.009

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.09.009.html>

影响湿地甲烷产生、传输与氧化因素的研究进展

刘意立¹, 李竺霖², 何云峰¹

(1 浙江大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 310058; 2 三星(中国)半导体有限公司, 陕西 西安 710000)

[摘要] 湿地甲烷排放对温室效应的贡献十分明显。湿地甲烷排放是有机物(底物)输入、分解、厌氧产甲烷以及甲烷传输、氧化等环节综合作用的结果。文章对影响湿地甲烷生成、传输与氧化的温度、水位、土壤有机物、土壤 pH 和氧化还原电位、植物类型以及土壤离子、土质等主要因素进行了阐述, 对未来湿地甲烷排放变化趋势进行了探讨, 并对此方面的研究方向进行了分析, 旨在为全球气候变化以及人类活动影响导致大气甲烷浓度变化预测提供依据。

[关键词] 湿地; 甲烷; 影响因素; 变化趋势

[中图分类号] X17

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)09-0157-06

The factors influencing generation, transmission and oxidation of methane in wetlands: A review

LIU Yi-li¹, LI Zhu-lin², HE Yun-feng¹

(1 College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

2 Samsung China Semiconductor CO. LTD, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: Methane emitted from wetlands contributes significantly to greenhouse effect. Methane emission is resulted from the combined actions of input and decomposition of organic matter and production, transmission and oxidation of CH₄. The most important variables controlling CH₄ flux including temperature, water level, vegetation, and organic matter content, pH, redox potential and properties of soil are discussed. The change in future trend of wetland methane emissions is discussed as well. Future research directions are then analyzed. This review provides the basis for prediction of atmospheric methane concentration with the consideration of global climate change and human activities.

Key words: wetlands; methane; influencing factors; changing trend

据政府间气候变化专门委员会(IPCC, 2007)报道, 由于甲烷分子具有很强的红外线吸收能力, 其单分子的增温潜势是 CO₂ 的 15~30 倍, 甲烷对全球变暖的贡献达到了 25%, 大气甲烷含量已经从前工业化时期的 715 nmol/mol, 增加到 2008 年的 1 787 nmol/mol^[1]。甲烷的排放源主要包括天然湿地、稻田、渗出天然气、废渣填埋场、反刍动物以及燃烧的

生物物质^[2]。由于湿地生态系统的持续淹水和厌氧环境, 使得湿地生态系统甲烷排放量占全球甲烷排放量的 25%^[3], 成为大气最重要的甲烷来源。研究发现, 湿地每年向大气排放 145 Tg 的甲烷, 其中天然湿地排放 92 Tg, 稻田排放 53 Tg^[4]。Bloom 等^[5](2010)研究发现, 在 2003—2007 年, 由于中高纬度地区气温升高, 湿地向大气排放的甲烷量增加了

[收稿日期] 2013-06-25

[基金项目] 国家自然科学基金项目“亚热带季风气候区湿地生态系统碳循环机理研究”(31170458)

[作者简介] 刘意立(1988—), 男, 陕西西安人, 硕士, 主要从事湿地碳循环机理研究。

[通信作者] 何云峰(1965—), 男, 浙江海宁人, 副教授, 博士, 从事农业面源污染控制与治理和湿地碳循环机理研究。

7%。

甲烷被认为是继二氧化碳之后最重要的温室气体之一,其产生与消耗机制引起了广泛关注。湿地甲烷排放是甲烷产生、传输和氧化过程综合作用的结果。大部分甲烷在土壤氧化层及根际受到甲烷氧化菌的氧化而转变为其他含碳物质。湿地甲烷释放机理复杂,受诸多因素影响。目前国内外已有许多研究结论^[6-7],但对其产生机理和释放过程尚不明确。同时,讨论全球气候变化背景下气温升高或水文条件改变,对湿地甲烷形成或氧化具有怎样的影响,关系到湿地碳汇大小的估算甚至碳汇角色的认定。本文对影响湿地甲烷的因素进行了分析,旨在为全球温室效应的估算和预测提供一定的参考。

1 甲烷排放及影响因素

湿地甲烷的产生主要源于厌氧条件下土壤微生物,如纤维分解菌、果胶分解菌和甲烷产生菌等协同作用,将土壤有机碳逐步分解为单糖,单糖再分解成简单有机酸,最后生成甲烷^[8]。在甲烷产生过程中影响因素很多,包括有机底物、温度、氧化还原电位(E_h)、pH、电子供体等。然而并非所有产甲烷菌(Methanogens)产生的甲烷都排放到大气中去^[2,9]。由于湿地表层的氧化性,产甲烷菌产生的甲烷 90% 以上会被甲烷氧化菌氧化利用^[10]。因此,湿地甲烷排放是有机物(底物)输入、分解、厌氧产甲烷、甲烷传输、氧化等环节综合作用的结果。

1.1 温度

甲烷的生产和氧化速率都受到温度的显著影响。湿地土壤中甲烷的产生和排放速率随温度的增加而上升^[11]。研究发现,泥炭地甲烷生成的最适温度为 25 ℃。温度每升高 2 ℃,湿地土壤中的碳储量将减少 10%~25%,向大气排放的甲烷量将会增加 10%~20%^[9]。温度对甲烷释放量的影响可以用 Q_{10} 值(温度上升 10 ℃时反应速率变化熵)来描述。产甲烷菌的 Q_{10} 为 1.3~28,甲烷氧化菌的 Q_{10} 较小,为 1.4~2.1^[2],而厌氧矿化菌的 Q_{10} 值则为 1~4^[12],这表明甲烷的产生过程对温度更为敏感。

低温会导致甲烷通量降低,目前的研究对此现象主要有 3 种解释:1)低温抑制产甲烷菌活性,从而导致甲烷产生量减少。2)甲烷氧化菌对温度的敏感性较产甲烷菌低,受低温环境影响较小,其在 10 ℃ 时仍相当活跃。因此低温环境下活性依然较高的甲烷氧化菌的氧化作用加剧了甲烷通量的下降。3)参与甲烷产生过程中的其他微生物(产 H_2 微生物)比

产甲烷菌对温度更为敏感,因温度降低,产 H_2 微生物活性下降, H_2 (甲烷生成底物)生成量减少,导致甲烷通量下降。

1.2 水位

水位主要决定土壤的通气性和氧化还原电位,甲烷排放通量随水位升高而增加。一般认为,高水位创造出的还原环境有利于产甲烷菌的生存,因此高水位条件下土壤甲烷通量也较高^[13-14]。相反,当水位低于地表土层时,土壤为好氧环境,有利于甲烷氧化菌的生存,甲烷被大量消耗,甲烷通量减少。关于水位与湿地甲烷的源、汇定量变化关系尚未形成定论。Sun 等^[15]研究发现,水位在地表下 20~30 cm 时,湿地是大气甲烷的汇;但其他一些研究却认为,只有当水位下降到地表下 50 cm 时土壤才会吸收甲烷^[16]。对潮汐河岸湿地的研究发现,当水位接近土壤表面时甲烷的排放量最高,水位过高反而会使甲烷的排放量减少,这是因为土壤中已产生的甲烷以气泡或扩散形式穿越水层时,被氧化的甲烷量增加^[17]。由此可见,地表水位对甲烷产生和氧化的影响是多方面的。此外,Altor 等^[18]研究发现,干湿变化频繁的湿地甲烷排放量低于水文条件稳定的湿地。同时,不同类型的湿地对于水位变化的敏感程度不同,其中平坦苔原型湿地 77% 的甲烷排放变化源于水位变化,而泥泞沼泽中只有 33% 的甲烷排放变化归因于水位改变^[19]。

1.3 土壤有机物

湿地土壤中甲烷的生成源于多种类型微生物对有机物质的分解,甲烷的潜在产量与有机物种类、数量关系紧密^[20]。研究显示,一块连续种植 13 年的稻田因积累了大量的有机碳,故其甲烷排放量远高于种植了 1.2 年的稻田^[21]。Vann 等^[22]研究发现,泥炭地中只有表层下 30 cm 之内有机物会影响温室气体的排放,使用荧光底物法测定泥炭地酶活性发现,当土层深度小于 10 cm 时土壤酶活性最高。有机物的分解潜力及其对温度的敏感性随土壤深度增加而显著下降,这是因为在深层土壤中稳定性有机碳的比例更高^[23-24]。土壤中的活性有机碳大部分存在于土壤表层,通常会在几个月内分解完毕^[10]。湿地生态系统中,活性有机碳含量的高低直接影响着甲烷排放通量。湿地中含有大量的可溶性有机物(其是活性有机碳的重要组成部分),可溶性有机物在传递底物至微生物的过程中起着重要作用,能显著提高微生物活性^[25]。植物凋落物也会影响湿地甲烷通量。因植物凋落物增加会促进土壤微生物的

生长,进而提高了甲烷的产量。源于植物凋落物的甲烷产量最高能达到甲烷总产量的 40%。虽然泥炭中超过 90%的成分是有机碳,但由于含有较少的新鲜植物生成物,所以泥炭湿地甲烷的排放量相对较低。Sorrel 等^[26]研究表明,芦苇出现大量死亡并凋落的湿地与芦苇旺盛生长的湿地的甲烷产生率分别为 160~400 和 16~112 mg/(m²·d)。

1.4 pH 值及土壤氧化还原电位(*E_h*)

pH 值是影响微生物代谢过程的主要因子之一,通过影响产甲烷菌的活性从而影响甲烷产生率^[27]。大多数产甲烷菌生长代谢的 pH 为 6~8,最适 pH 值在 7 左右。产甲烷菌较甲烷氧化菌对土壤 pH 更敏感。有研究表明,酸性环境最多可减少湿地生态系统 15%的甲烷排放量^[28]。土壤氧化还原电位(*E_h*)也是影响湿地甲烷产生、氧化的重要因素^[29-30]。因甲烷生成作用位于呼吸链的最末端,通常要求 *E_h* 非常低。甲烷量产随土壤 *E_h* 降低而增加。一般认为临界土壤 *E_h* 起始值大约为 -140 mV。当土壤 *E_h* 从 -200 mV 降低到 -300 mV 时,甲烷产量增加 10 倍,排放量增加 17 倍。

1.5 植物类型

植物在湿地甲烷排放过程中的作用主要包括充当甲烷传输的气体通道,为产甲烷菌提供基质,传输氧气到植物根系使甲烷氧化等^[31]。植物排放的甲烷通量及其季节性变化规律,是由植物根系分泌有机物能力、释放氧气能力和传输甲烷能力综合决定的。总体而言,植物生物量越大,甲烷产量越多,甲烷排放通道也越多。

植物根系一方面向土壤中分泌有机酸、糖类、氨基酸等有机物质,为产甲烷菌提供底物,促进甲烷的产生;另一方面,植物根系释放的氧气会在根际形成高 *E_h* 氧化区,为甲烷氧化菌提供有利条件,增加了甲烷的消耗,不同植物类群产生的 10%~90%的甲烷会在根际周边被氧化。Hendrikus^[32]研究指出,由于蘆草属根和根际具有较强的氧化能力,所以该类植物甲烷排放量比其他类型植物少。

研究表明,湿地中大型挺水植物(导管植物)成为甲烷从产生部位传输到大气的主要途径,植物甲烷传输量占甲烷总传输量的 90%以上,当甲烷通过植物维管束组织传输时可以避免经过氧化层,减少了甲烷消耗,进而提高湿地甲烷通量^[33]。例如龙须眼子菜群落(沉水植物)甲烷平均排放速率为 (3.44±1.60) mg/(m²·d),仅为芦苇群落(挺水植物)平均排放速率的 21.94%^[34]。

2006 年初,Keppeler 等^[35]研究发现,许多植物在有氧状态下也会能释放大量甲烷,并估算出这部分甲烷排放量占全球甲烷总排放量的 10%~40% (62~236 Tg)。这部分甲烷可能是在紫外线(UV)照射下植物中果胶的甲氧基转化形成的,其产生机理尚不明确;此外,不同植物的甲烷释放量也没有明显的规律。但后续有研究者发现,长期小剂量 UV-B 辐射对北极和亚北极地区苔藓植物、被子植物的甲烷排放量影响很小^[36-37]。

1.6 土壤离子与土质

土壤中某些离子的存在会影响 *E_h*、改变底物降解途径,进而减少甲烷产生量。厌氧环境中,有机物的微生物降解主要是通过无机电子受体,如 Mn⁶⁺、Fe³⁺、SO₄²⁻ 和二氧化碳的还原作用来完成的。Fe³⁺ 的还原是影响甲烷排放的重要因素之一^[38]。Fe³⁺ 含量高时不利于形成低 *E_h* 环境,会抑制产甲烷菌生长。Lai^[39]认为,随着土壤中痕量金属元素(铁、镍)和钠含量的增加,北美地区以泥炭藓为主导植被的湿地甲烷产生率上升。一般在含硫酸盐较多的土壤中,甲烷排放量很低,这是由于 SO₄²⁻ 存在时硫酸盐还原细菌对于产甲烷细菌有明显的抑制效应,二者会同时争夺醋酸盐和电子;同时土壤中一定量的 SO₄²⁻ 及其还原产物 S 对产甲烷细菌有毒害作用^[40]。当硫化物浓度为 0.1 mmol/L 时,对甲烷的形成具有抑制作用;当硫化物浓度为 0.001 mmol/L 时,其对甲烷的形成并不具有抑制作用^[12]。土壤和水体盐离子浓度增加可抑制产甲烷菌的活性进而减少甲烷生成。在咸水生态系统中,微生物主要的作用是还原硫,而不是产生甲烷,故甲烷排放量很低;而淡水生态系统中,产甲烷菌活性很高,故甲烷排放量较高^[25]。

不同质地湿地的土壤甲烷生成速率有明显差异,一般排序为沙土<砂砾土<黏质粉土<黏土^[41]。这是由于土壤颗粒相互结合,形成局部厌氧区域,使产甲烷菌能够在表观有氧条件下存活。例如在稻田中每公顷添加 10 Mg 的硅酸盐废料时会使土壤孔隙度增加,使甲烷排放量相对减少 28%^[42]。

2 未来湿地甲烷排放的变化趋势

预计 21 世纪的后半段,大气中的二氧化碳含量将会加倍^[43]。随着大气中二氧化碳含量的升高,土壤中的有机物分解速率会上升,同时植物的生产效率也会提高,这将导致土壤中可溶性有机碳含量升

高,从而促进甲烷排放量也升高^[44-45]。全球气温每升高 1℃,则湿地每年排放甲烷的量增加 20~25 Tg^[2]。全球变暖主要发生在高纬度地区^[46]。不过,对高纬度地区进行的预测认为,如果夏季变得更加温暖和干燥,土壤氧化甲烷的能力将提升,泥炭地温室气体的平衡可能会在未来发生改变,即甲烷排放量将减少,而二氧化碳和一氧化二氮的排放量将增加。

另外,由于人类活动的影响,天然湿地遭到严重破坏,例如将湿地排水改造为农田或开采泥炭地能源等^[47]。泥炭地向农业用地转换时,由于甲烷产生和排放所需的厌氧环境及维管植物减少,甲烷排放量将下降^[47-48]。同时,酸沉降后大气中所含的 SO_4^{2-} 会使湿地中硫酸盐还原菌变得活跃,并与产甲烷菌竞争基质,从而抑制湿地甲烷的产生和排放,起到抑制温室效应的作用^[49]。Gauci 等^[50]通过模拟试验认为,目前酸雨中的硫化物可以使全球湿地甲烷释放量减少 8%,到 2030 年将达到 15%。同时,当某一地区温度与水蒸气密度增加时,甲烷消耗率也随之增加,以目前气候变化的趋势预测,2030 年甲烷的生命周期将会比 2000 年减少 4%左右^[51]。

3 结 语

国内外研究结果表明,湿地甲烷的排放是有机物(底物)输入、分解、厌氧产甲烷、甲烷传输、氧化等环节综合作用的结果。土壤微生物将易分解的有机物逐步降解最终在厌氧条件下生成甲烷。生成的一部分甲烷通过扩散、冒泡和植物维管束运输等方式释放到大气当中,另一部甲烷分会被土壤、植物根际、水体中的甲烷氧化菌氧化形成二氧化碳,整个分解过程受到温度、水位、 E_h 、pH 值等因素不同程度的影响。

今后对湿地甲烷排放研究的方向应该包括以下几个方面:1)利用同位素和底物标记的方法,了解维管束植物与土壤中微生物之间相互作用形成甲烷的过程;2)加强对土壤微环境包括植物根际对 Fe^{3+} 的还原以及碳、氮耦合循环作用的机理研究;3)在甲烷生成过程中,溶解性有机物的结构会发生改变,今后可利用液质联用仪对其结构特征进行分析;4)植物在有氧状态下甲烷的产生机理尚需进一步明确;5)确立统一的湿地甲烷研究方法,建立广泛的湿地甲烷排放数据库,使得不同时间、不同地点、不同研究者测得的数据具有可比性;6)采取典型地区重点研究和大区域常规观测相结合的方式,从宏观上探明

各种因素对甲烷排放的影响,建立大尺度湿地甲烷通量的估算模型,并加以验证。

[参考文献]

- [1] Dlugokencky E J, Bruhwiler L, White J W C, et al. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH_4 burden [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L18803.
- [2] 陈 槐,周 舜,吴 宁,等.湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(5): 726-733. Chen H, Zhou S, Wu N, et al. Advance in studies on production, oxidation and emission flux of methane from wetlands [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2006, 12(5): 726-733. (in Chinese)
- [3] Nahlik A M, Mitsch W J. Methane emissions from tropical freshwater wetlands located in different climatic zones of Costa Rica [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(3): 1321-1334.
- [4] O'Connor F M, Boucher O, Gedney N, et al. Possible role of wetlands, permafrost, and methane hydrates in the methane cycle under future climate change: A review [J]. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48: RG4050.
- [5] Bloom A A, Palmer P I, Fraser A, et al. Largescale controls of methane of genesis inferred from methane and gravity space borne data [J]. *Science*, 2010, 327: 322-325.
- [6] Kayranli B, Scholz M, Mustafa A, et al. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: A critical review [J]. *Wetlands*, 2010, 30: 111-124.
- [7] Preuss I, Knoblauch C, Gebert J, et al. Improved quantification of microbial CH_4 oxidation efficiency in arctic wetland soils using carbon isotope fractionation [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(4): 2539-2552.
- [8] 丁维新,蔡祖聪.土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响 [J]. *生态学报*, 2002, 22(10): 1672-1679. Ding W X, Cai Z C. Effects of soil organic matter and exogenous organic materials on methane production in and emission from wetlands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10): 1672-1679. (in Chinese)
- [9] 孟伟庆,吴旋蕾,王中良,等.湿地生态系统碳汇与碳源过程的控制因子和临界条件 [J]. *生态环境学报*, 2001, 20(8): 1359-1366. Meng W Q, Wu Z L, Wang Z L, et al. Control factors and critical conditions between carbon sinking and sourcing of wetland ecosystem [J]. *Ecology and Environment*, 2001, 20(8): 1359-1366. (in Chinese)
- [10] 冯虎元,程国栋,安黎哲.微生物介导的土壤甲烷循环及全球变化研究 [J]. *冰川冻土*, 2004, 26(4): 411-418. Feng H Y, Cheng G D, An L Z. Microbial-mediated methane cycle in soils and global change: A review [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(4): 411-418. (in Chinese)
- [11] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, et al. Impact of elevated CO_2 and temperature on soil C and N dynamics in relation to CH_4 and N_2O emissions from tropical flooded rice [J]. *Sci Total Environ*, 2013, 461: 601-611.

- [12] 王维奇,曾从盛,全川. 湿地甲烷生成的主要控制因子研究综述 [C]. 第二届全国农业环境科学学术研讨会论文集. 昆明: 中国农业生态环境保护协会, 2007: 822-827.
- Wang W Q, Zeng C S, Tong C. Reviews on some controlling factors influencing methane production in wetlands [C]. Second National Agro-Environmental Science Symposium. Kunming: Chinese Society of Agro-Ecological Environment Protection, 2007: 822-827. (in Chinese)
- [13] Dijkstra F A, Morgan J A, Follett R F, et al. Climate change reduces the net sink of CH_4 and N_2O in a semiarid grassland [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(6): 1816-1826.
- [14] van Huissteden J, Maximov T C, Dolman A J. High methane flux from an arctic floodplain (Indigirka lowlands, eastern Siberia) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: G02018.
- [15] Sun X, Mu C, Song C. Seasonal and spatial variations of methane emissions from mountain wetlands in Northeast China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 1809-1816.
- [16] Blodau C, Roulet N T, Heitmann T, et al. Belowground carbon turnover in a temperate ombrotrophic bog [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21: GB1021.
- [17] Kelley C A, Martens C S, Ussler W. Methane dynamics across a tidally flooded riverbank margin [J]. *Limnology and Oceanography* 40: 1112-1129.
- [18] Altor A E, Mitsch W J. Pulsing hydrology, methane emissions, and carbon dioxide fluxes in created marshes: A 2-year ecosystem study [J]. *Wetlands*, 2008, 28: 423-438.
- [19] White J R, Shannon R D, Weltzin J F, et al. Effects of soil warming and drying on methane cycling in a northern peatland mesocosm study [J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2008, 113: G00A06.
- [20] Li D M, Liu M Q, Cheng Y H, et al. Methane emissions from double-rice cropping system under conventional and no tillage in southeast China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 113 (2): 77-81.
- [21] Moniruzzaman K, Eusufzai, Takeshi T, et al. Methane emission from rice fields as affected by land use change [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2010, 139: 742-748.
- [22] Vann C D, Megonigal J P. Elevated CO_2 and water depth regulation of methane emissions: Comparison of woody and non-woody wetland plant species [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 63 (2): 117-134.
- [23] Rosenqvist A, Forsberg B R, Pimentel T, et al. The use of spaceborne radar data to model inundation patterns and trace gas emissions in the central Amazon floodplain [J]. *International journal of remote sensing*, 2002, 23: 1303-1328.
- [24] 周艳翔,吕茂奎,谢锦升,等. 深层土壤有机碳的来源、特征与稳定性 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2013(1): 48-55.
- Zhou Y X, Lu M K, Xie J S, et al. Sources, characteristics and stability of organic carbon in deep soil [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2013(1): 48-55. (in Chinese)
- [25] Fenner N, Freeman C. Carbon preservation in humic lakes: A hierarchical regulatory pathway [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 775-784.
- [26] Sorrel B, Brix H, Schierup H, et al. Die-back of *Phragmites australis*: influence on the distribution and rate of sediment methanogenesis [J]. *Biogeochemistry*, 1997, 36: 173-188.
- [27] 刘泽雄,朱瑞琴,姚顺,等. 闽江河口咸草湿地冬季甲烷和二氧化碳通量及影响因子分析 [J]. 湿地科学与管理, 2010(9): 46-49.
- Liu Z X, Zhu R Q, Yao S, et al. Winter fluxes of methane and carbon dioxide from *cyperus malaccensis* var. *brevifolius* in the estuary wetland of min river and their influencing factors [J]. *Wetland Science & Management*, 2010(9): 46-49. (in Chinese)
- [28] Gauci V, Matthews E, Dise N, et al. Sulfur pollution suppression of the wetland methane source in the 20th and 21st centuries [J]. *Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America*, 2004, 101(34): 12583-12587.
- [29] 鄂焱,全川,王维奇. 米草属植物盐沼湿地甲烷排放研究综述 [J]. 湿地科学与管理, 2009(3): 56-59.
- E Y, Tong C, Wang W Q. A review of methane emission from *Spartina* plants in salt marshes [J]. *Wetland Science & Management*, 2009(3): 56-59. (in Chinese)
- [30] 姚顺. 闽江河口咸草湿地甲烷与二氧化碳排放及主要环境因子分析 [D]. 福州: 福建师范大学, 2010.
- Yao S. Estuarine wetlands salty grass methane with carbon dioxide emissions and the major environmental factor analysis [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2010. (in Chinese)
- [31] 姚守平,罗鹏,王艳芬,等. 湿地甲烷排放研究进展 [J]. 世界科技研究与发展, 2007(4): 58-63.
- Yao S P, Luo P, Wang Y F, et al. Advances in the research on methane emissions from wetlands [J]. *World Sci-Tech R&D*, 2007(4): 58-63. (in Chinese)
- [32] Hendrikus J L. Methane emission from natural wetlands: interplay between emergent macrophytes and soil microbial processes: A mini-review [J]. *Annals of Botany*, 2010, 105 (1): 141-153.
- [33] Koelbener A, Strom L, Edwards P J, et al. Plant species from mesotrophic wetlands cause relatively high methane emissions from peat soil [J]. *Plant and Soil*, 2010, 326: 147-158.
- [34] 段晓男,王效科,陈琳,等. 乌梁素海湖泊湿地植物区甲烷排放规律 [J]. 环境科学, 2007, 28(3): 455-459.
- Duan X N, Wang X K, Chen L, et al. Methane emission from aquatic vegetation zones of Wuliangsu Lake, Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2007, 28(3): 455-459. (in Chinese)
- [35] Keppler F, Hamilton J T G, Brass M, et al. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions [J]. *Nature*, 2006, 439(7073): 187-191.
- [36] Newsham K K, Robinson S A. Responses of plants in polar regions to UVB exposure: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(11): 2574-2589.

- [37] Mörsky S K, Haapala J K, Rinnan R, et al. Minor long-term effects of ultraviolet-B radiation on methane dynamics of a subarctic fen in Northern Finland [J]. *Biogeochemistry*, 2012, 108: 233-243.
- [38] Huang B, Yu K, Gambrell R P. Effects of ferric iron reduction and regeneration on nitrous oxide and methane emissions in a rice soil [J]. *Chemosphere*, 2009, 74: 481-486.
- [39] Lai D Y F. Methane dynamics in northern peatlands: A review [J]. *Pedosphere*, 2009, 19(4): 409-421.
- [40] 傅志强, 黄 璜. 湿地稻田甲烷排放估算模型及减排模式研究进展 [J]. *作物研究*, 2006(3): 266-271.
Fu Z Q, Huang H. The research advancement of marshy paddyfield methane emission-estimating model and emission-reduction model [J]. *Crop Research*, 2006(3): 266-271. (in Chinese)
- [41] Mer J L, Roger P. Production oxidation emission and consumption of methane by soils: A review [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(1): 25-50.
- [42] Aslam A M, Lee C H, Kim P J. Effect of silicate fertilizer on reducing methane emission during rice cultivation [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44(4): 597-604.
- [43] Guo J, Zhang M, Zhang L, et al. Responses of dissolved organic carbon and dissolved nitrogen in surface water and soil to CO₂ enrichment in paddy field [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 140: 273-279.
- [44] Wolf A A, Drake B G, Erickson J E, et al. An oxygen-mediated positive feedback between elevated carbon dioxide and soil organic matter decomposition in a simulated anaerobic wetland [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(9): 2036-2044.
- [45] Fenner N, Freeman C, Lock M. A, et al. Interactions between elevated CO₂ and warming could amplify DOC exports from peatland catchments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(9): 3146-3152.
- [46] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. The physical science basis-contribution of working group I to the fourth assessment report of the inter-governmental panel on climate change [M]. United Kingdom and New York: Cambridge Univ Press, 2007: 747-845.
- [47] 孙晓新, 牟长城, 冯登军, 等. 排水造林对小兴安岭沼泽甲烷排放的影响 [J]. *生态学报*, 2009, 29(8): 4251-4259.
Sun X X, Mo C C, Feng D J, et al. Effects of wetland draining for forestation on methane emissions in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4251-4259. (in Chinese)
- [48] Dias A T C, Hoorens B, Richard S P, et al. Plant species composition can be used as a proxy to predict methane emissions in peatland ecosystems after land-use changes [J]. *Ecosystems*, 2010, 13(4): 526-538.
- [49] 柳铮铮. 酸沉降对闽江河口湿地 CH₄ 产生排放和碳输出的影响 [D]. 福州: 福建师范大学, 2009.
Liu Z Z. Effects of acid deposition on methane emission and carbon cycling in peatland [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2009. (in Chinese)
- [50] Gauci V, Fowle D, Chapman S J, et al. Sulfate deposition and temperature controls on methane emission and sulfur forms in peat [J]. *Biogeochemistry*, 2004, 71(2): 141-162.
- [51] Stevenson D S, Dentener F J, Schultz M G, et al. Multimodel ensemble simulations of present-day and near-future tropospheric ozone [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2006, 111(D8): D08301.