

陈忠婷,夏品华,卫晓松,等. 草海湿地不同植被区沉积物中孔隙水 CH_4 浓度分布与 CH_4 、 CO_2 排放通量研究[J]. 江苏农业科学,2017,45(11):230-235.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.11.061

草海湿地不同植被区沉积物中孔隙水 CH_4 浓度分布与 CH_4 、 CO_2 排放通量研究

陈忠婷¹, 夏品华², 卫晓松², 葛 皓¹, 郭光霞³

(1. 贵州师范大学生命科学学院, 贵州贵阳 550001; 2. 贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵州贵阳 550001;

3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏南京 210008)

摘要:利用静态暗箱-气相色谱法和顶空法测定了草海湿地 CH_4 、 CO_2 排放通量及沉积物孔隙水 CH_4 浓度。结果表明:草海湿地 CH_4 排放通量为 $0.50 \sim 8.57 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 浅水区轮藻(Chlorophyceae) + 水葱(*Scirpus validus* Vahl)群落最大, 落干区灯芯草(*Juncus effusus* L.)群落最低; CO_2 排放通量为 $-59.62 \sim 547.33 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 干湿过渡区蘆草(*Scirpus triquetus* L.)群落最大, 沉水区光叶眼子菜(*Potamogeton lucens* L.)群落最低; 沉积物孔隙水 CH_4 浓度剖面均值为 $2.07 \sim 3.81 \mu\text{mol/L}$, 与 CH_4 排放通量变化规律基本一致, 即轮藻 + 水葱群落 > 蘆草群落 > 灯芯草群落 > 光叶眼子菜群落, 垂直剖面上从表层至底层逐渐降低, 不同区域沉积物孔隙水 CH_4 浓度剖面变化规律并不一致。Pearson 相关性分析表明, 沉积物 DOC、SOC 含量是影响草海湿地 CH_4 排放的重要因子, 水位、生物量、沉积物 pH 值是影响 CO_2 排放的重要因子。沉积物 DOC、容重、土壤 pH 值、 CO_2 通量、水位、土壤含水率、生物量、株高对沉积物孔隙水 CH_4 浓度分布有显著影响。

关键词:草海湿地; CH_4 通量; CO_2 通量; 孔隙水; CH_4 浓度

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)11-0230-06

湿地是介于水生生态系统和陆地生态系统之间的过渡性生态系统类型, 由于其具有很高的生产率及氧化还原能力而

收稿日期: 2016-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41401287); 湖泊与环境国家重点实验室开放基金(编号: 2014SKL010)。

作者简介: 陈忠婷(1991—), 女, 贵州黔南人, 硕士研究生, 主要从事退化湿地生态修复研究。E-mail: cz911002@163.com。

通信作者: 夏品华, 博士, 研究员, 主要从事湿地生态与环境研究。E-mail: pinhuayy@163.com。

成为极其重要的生物地球化学活跃的场所以^[1]。大多数湿地是碳汇^[2], 通过湿地生态系统的物质交换作用, 可将大气中大量的 CO_2 固定形成碳汇; 同时, 由于其低温和厌氧环境, 湿地生境又是全球大气 CH_4 主要的自然来源^[3-4], 天然湿地每年向大气排放的 CH_4 达到全球 CH_4 排放量的 15% ~ 40%^[5]。中国有着丰富的湿地资源, 但由于自然环境不同, CH_4 、 CO_2 的排放通量有强烈的时空异质性^[6-7]。虽然国内学者开展了大量研究, 但多数集中在三江平原沼泽湿地^[8-9]、闽江河口地^[10-12]、若尔盖高原湿地^[13-15]等地, 关于贵州省高原湖泊湿

[16] 王卫华, 李建波, 王 铎, 等. 土壤热特性参数空间变异性与拟合方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 120-125.

[17] Gan L, Peng X H, Peth S, et al. Effects of grazing intensity on soil water regime and flux in Inner Mongolia grassland, China [J]. Pedosphere, 2012, 22(2): 165-177.

[18] Gan L, Peng X, Peth S, et al. Effects of grazing intensity on soil thermal properties and heat flux under *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* vegetation in Inner Mongolia, China [J]. Soil and Tillage Research, 2012, 118(5): 147-158.

[19] 赵 君, 张立峰, 刘景辉, 等. 几种保护性耕作对土壤含水量和风蚀量的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(9): 4720, 4728.

[20] O'Donnell J A, Romanovsky V E, Harden J W, et al. The effect of moisture content on the thermal conductivity of moss and organic soil horizons from black spruce ecosystems in interior Alaska [J]. Soil Science, 2009, 174(12): 646-651.

[21] 王 铎, 王全九, 樊 军, 等. 土壤导热率测定及其计算模型的

对比分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 78-84.

[22] Abuhamdeh N H, Reeder R C. Soil thermal conductivity: effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(4): 1285-1290.

[23] Abuhamdeh N H. Effect of tillage treatments on soil thermal conductivity for some Jordanian clay loam and loam soils [J]. Soil & Tillage Research, 2000, 56(3/4): 145-151.

[24] 张仁陟, 李小刚, 李焕峰. 土壤水分变异规律的研究——I. 土壤水分空间变异的研究[J]. 西北农业学报, 1993(1): 21-26.

[25] 甘 磊, 马 蕊, 彭扬建, 等. 不同放牧强度下羊草和大针茅草原土壤含水量的空间变化[J]. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1274-1279.

[26] 韦本辉, 甘秀芹, 申章佑, 等. 粉垄栽培甘蔗试验增产效果[J]. 中国农业科学, 2011, 44(21): 4544-4550.

[27] 张法升, 刘作新, 曲 威, 等. 长期耕作条件下小尺度农田土壤有机质空间变异性[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 167-171.

地温室气体排放的研究尚未见报道,其变化趋势以及受控制机制尚不明确。大量研究表明,植物与温室气体的排放密切相关。在有植被覆盖的湿地生态系统内,Koh 等研究发现,植被对 CH₄、CO₂ 排放有重要影响^[16];Sun 等研究发现,滨河湿地 CH₄、CO₂ 排放与植被等因素显著相关^[17]。Maltais – Landry 等研究发现,植物种类的不同会对温室气体的排放有不同的潜在影响^[18]。湿地土壤中产生的 CH₄,有很大一部分通过植物传输、液相扩散、气泡传输等方式排放到大气中,也有相当一部分溶解在孔隙水中,但是这部分 CH₄ 往往被忽略。人为或气候变化等原因可将溶解在土壤孔隙水中的 CH₄ 碳库释放到大气中,从而会对湿地 CH₄ 排放通量估测产生潜在影响^[19–20]。本研究选取贵州省草海湿地为对象,研究不同植被区土壤 CH₄、CO₂ 的排放通量特征、沉积物孔隙水不同剖面 CH₄ 浓度的空间分布特征,探讨高原湖泊草海湿地植被在 CH₄、CO₂ 排放过程中的作用和土壤孔隙水 CH₄ 浓度差异性分布关键影响因子,旨在为深入了解高原湖泊湿地碳循环提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

草海湿地(26°49′~26°53′N,104°12′~104°17′E)位于云贵高原中部,海拔 2 173 m,水域面积 20.98 km²,平均水深 2~3 m,是我国“三大高原湖泊”之一,为国家一级重要湿地,是以天然淡水湖为主的湿地生态系统保护区^[21]。草海属亚

热带高原季风冬干夏湿气候,1 月多年平均气温 -1.9℃,7 月多年平均气温 17.7℃,年均气温 10.5℃,年均降水量 960 mm,无霜期 208.6 d。草海地区代表性植物有光叶眼子菜(*Potamogeton lucens* L.)、轮藻(Chlorophyceae)、水葱(*Scirpus validus* Vahl)、蘆草(*Scirpus triqueter* L.)、灯芯草(*Juncus effusus* L.)等。

1.2 样品采集

选取草海湿地核心保护区为研究对象,沿上游至下游走向,根据植被群落不同,选取 A 区(灯芯草群落)、B 区(蘆草群落)、C 区(轮藻+水葱群落)、D 区(光叶眼子菜群落)4 个区域。样点分布见图 1。

利用静态暗箱-气相色谱法测定 CH₄、CO₂ 通量,采样箱为不锈钢材质的静态暗箱(50 cm×50 cm×50 cm)。采样时间为 08:00—11:30。采气时,将静态箱倒扣在采样点上,30 min 内每隔 10 min 用 100 mL 医用注射器抽取 1 次,气体储存在铝复合膜气体采样袋中,气体样品运回实验室后 1 周内完成测定。

利用柱状采样器采集各样点 0~50 cm 的沉积物,按 10 cm 分层,共 5 层,每层用去头的注射器从采样管两侧分别取出 5 mL 用于孔隙水 CH₄ 浓度测定,其余样品装入聚乙烯袋内避光保存,运回实验室测定 DOC、SOC、pH 值等理化指标。同时采集地上生物量,并现场同步记录气温、气压、土壤温度、土壤氧化还原电位(Eh)等参数。土壤理化性质见表 1。

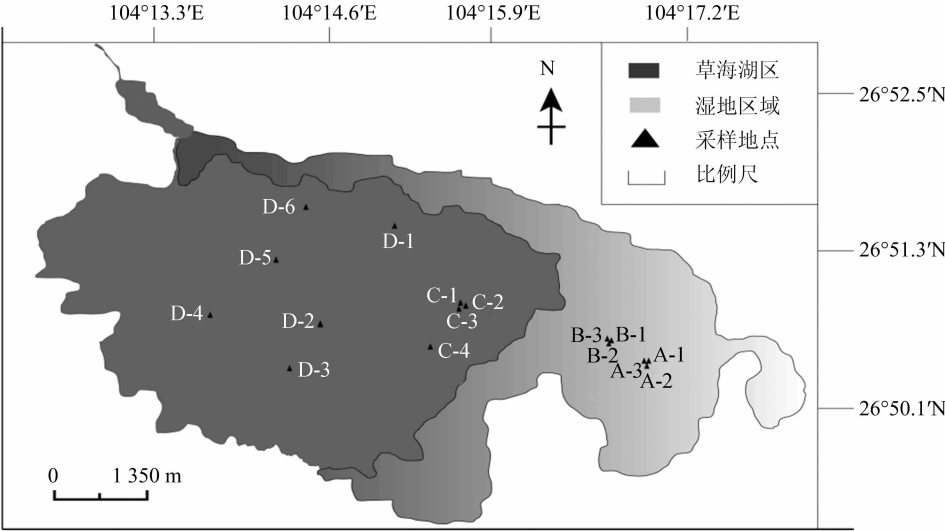


图1 研究区域位置及样点分布示意

表 1 采样点土壤基本理化性质

区域	容重 (g/cm ³)	土壤温度 (℃)	土壤氧化还原电位 (mV)	土壤 pH 值	鲜土含水率 (%)	土壤有机碳含量 (g/kg)	溶解有机碳含量 (mg/kg)
A1~A3	1.2±0.0a	16.6±0.6c	42.9±6.1a	7.7±0.0a	0.5±0.03c	78.1±6.4b	185.1±10.5b
B1~B3	1.1±0.0a	17.9±0.1b	-111.8±13.9b	7.7±0.1a	0.6±0.05c	108.5±9.4b	179.5±10.5b
C1~C4	0.2±0.0c	19.1±0.2a	-117.9±5.7bc	5.3±0.1b	5.6±0.8a	287.8±29.1a	509.4±126.8a
D1~D6	0.5±0.0b	18.9±0.2a	-138.8±6.9c	5.5±0.1b	2.2±0.3b	93.2±10.8b	407.0±64.7a

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

1.3 样品测定

CH₄、CO₂ 浓度用岛津 GC-2014 型气相色谱仪测定,FID 检测器,分离柱为 13-01-003 型碳分子筛(1 m×3 mm)。

CH₄ 测试条件:进样口温度为 250℃,检测器温度 280℃,柱温 120℃,载气(高纯氮气)流速为 30 mL/min。CO₂ 测试条件:CO₂ 通过转化炉,在高纯氢气和镍催化剂条件下转化为

CH₄,转化炉温度 380 ℃,进样口温度为 50 ℃,检测器温度 105 ℃,柱温 85 ℃,载气(高纯氢气)流速为 40 mL/min。测定沉积物孔隙水 CH₄ 浓度的样品处理方法参照文献[22],测试条件同上。沉积物 DOC 测定参照文献[23],SOC 测定采用高温外热重铬酸钾氧化容量法,土壤 pH 值用 pH 计测定。

1.4 数据处理

CH₄、CO₂ 排放通量计算参照文献[24],公式如下:

$$F = \frac{M}{V_0} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} H \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

式中:*F* 为气体通量[$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$];*M* 为被测气体的摩尔质量(g/mol);*P* 为采样时气压(Pa);*T* 为采样时温度(K);*V*₀、*P*₀、*T*₀ 为标准状态下的气体摩尔体积、空气绝对气压、温度;*H* 为静态箱在水面以上的高度(m);*dC/dt* 为采样时气体浓度随时间变化的斜率。

土壤孔隙水 CH₄ 浓度(*C*)的计算式为^[25]:

$$C = \frac{C_h \times V_h \times T_0}{22.4 \times V_p \times T^\circ} \quad (2)$$

式中:*C* 单位为 $\mu\text{mol}/\text{L}$; *C_h* 为顶空瓶上部空气中 CH₄ 含量($\mu\text{mol}/\text{mol}$);*V_h* 为顶空瓶内空气体积(mL);*V_p* 为顶空瓶里孔隙水体积(mL);*T*₀、*T* 分别为标准温度和室温(℃)。

利用 Excel 2010 软件对数据进行统计,SPSS 18.0 软件进行单因素方差(One - Way ANOVA)、一元线性回归和相关性分析,绘图使用 Origin 8.5 软件完成。

2 结果与分析

2.1 沉积物孔隙水 CH₄ 浓度空间分布特征

草海湿地不同植被区域沉积物孔隙水 CH₄ 浓度分布特征如图 2 所示。A 区、D 区沉积物孔隙水 CH₄ 剖面平均值分别为 2.17、2.07 $\mu\text{mol}/\text{L}$,差异不显著(*P* > 0.05)。C 区孔隙水 CH₄ 剖面平均值最高,为 3.81 $\mu\text{mol}/\text{L}$,与 A 区、D 区差异达到极显著(*P* < 0.001)。B 区孔隙水 CH₄ 剖面平均值为 3.38 $\mu\text{mol}/\text{L}$,略低于 C 区(*P* > 0.05),与 A 区、D 区差异达到极显著(*P* < 0.01)。沉积物孔隙水 CH₄ 浓度变化特征随着植被干湿过渡区植被 - 浅水区植被 - 沉水区植被的演替,表现出先增后减的规律。从沉积物剖面来看,不同区域孔隙水 CH₄ 浓度表现出不同趋势,A 区、D 区从表层向下层表现出先增加后减少的规律,B 区呈现出先减少后增加的特征,C 区则表现为一直减少。

Pearson 相关性分析(表2)显示,沉积物孔隙水CH₄ 浓度

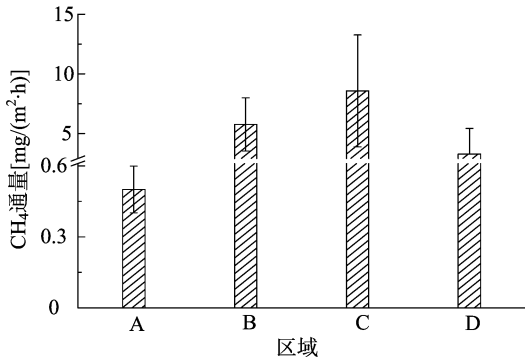


图2 不同区域孔隙水 CH₄ 浓度

与土温、土壤 Eh 无相关性,土壤表层(0 ~ 20 cm)孔隙水 CH₄ 浓度与土壤理化性质均无相关性。30 ~ 40 cm 孔隙水 CH₄ 浓度与容重、pH 值呈显著正相关,与鲜土含水率、株高呈显著负相关,与水位呈极显著负相关。40 ~ 50 cm 孔隙水 CH₄ 浓度与 CO₂ 通量、生物量呈极显著正相关。

表2 孔隙水 CH₄ 浓度与各指标间的关系

指标	相关系数		
	P - CH ₄ 30	P - CH ₄ 40	P - CH ₄ 50
容重 10	—	0.564 *	—
容重 20	—	0.584 *	—
容重 40	—	0.534 *	—
pH 10	—	0.555 *	—
pH 20	—	0.617 *	—
pH 30	—	0.612 *	—
pH 40	—	0.586 *	—
鲜土含水率 10	—	-0.590 *	—
鲜土含水率 30	—	-0.575 *	-0.648 **
鲜土含水率 40	—	-0.551 *	—
CO ₂ 通量	—	0.679 **	0.662 **
水位	—	-0.677 **	—
生物量	0.528 *	0.657 **	0.664 **
株高	—	-0.539 *	—

注:P - CH₄ 表示沉积物孔隙水 CH₄ 浓度;各指标后的数字(10、20、30、40) 分别代表 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 的土层;“**”“*” 分别表示在 0.01、0.05 水平上显著相关。下同。

一元线性回归分析表明,DOC 对 0 ~ 40 cm 沉积物孔隙水 CH₄ 浓度的影响较为显著,SOC 对表层沉积物孔隙水 CH₄ 浓度影响较大,10 ~ 20 cm 沉积物孔隙水 CH₄ 浓度能够解释 CH₄ 排放通量的 29.5%,DOC、SOC 不是 50 cm 沉积物 CH₄ 浓度的影响因素(表 3)。

2.2 草海湿地 CH₄、CO₂ 排放通量特征

草海湿地不同植被区温室气体通量表现出明显的空间异质性(图 3)。草海湿地不同植被区 CH₄ 排放通量均为正值(图 3 - a),表现为 CH₄ “源”,排放通量值为 0.50 ~ 8.57 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,其中 A 区 CH₄ 排放通量最低,C 区 CH₄ 排放通量最高,是 A 区的 17 倍,B 区排放通量略大于 D 区。方差分析显示,A 区与 B 区的排放通量间差异显著(*P* < 0.05),A 区与 C 区、D 区与 C 区差异达到极显著(*P* < 0.01)。

由图 3 - b 可见,草海湿地不同植被区 CO₂ 排放通量的变化范围为 -59.62 ~ 547.33 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,表明草海湿地既存在 CO₂ 的排放,又存在 CO₂ 的吸收,表现出强烈的空间异质性。随着植被由挺水植被向沉水植被过渡,CO₂ 排放通量呈现先增加后减少的规律,与 CH₄ 排放特征相似。CO₂ 排放通量最高点出现在 B 区,为 533.3 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,D 区表现为 CO₂ 吸收,吸收值为 -54.2 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。方差分析显示,C 区与 D 区之间差异不显著(*P* > 0.05),其余各区之间差异均达到极显著水平(*P* < 0.01)。

将草海湿地 CH₄、CO₂ 排放通量与沉积物 DOC、SOC 含量、水位、生物量、pH 进行 Pearson 相关性分析,结果显示,草海湿地 CH₄ 排放通量与沉积物 DOC、SOC 含量呈极显著正相关(表 4)。对于 CO₂ 排放通量,与水位呈极显著负相关,与生物量和 0 ~ 50 cm 沉积物 pH 值呈极显著正相关(表 4)。

表 3 土壤孔隙水 CH₄ 浓度与 DOC、SOC 的关系

因素	回归方程				
	P-CH ₄ 10	P-CH ₄ 20	P-CH ₄ 30	P-CH ₄ 40	P-CH ₄ 50
DOC ₁₀	$P=0.12$	$y=0.002x+2.100$ ($r^2=0.25, P=0.05$)	$P=0.17$	$P=0.28$	$P=0.24$
DOC 20	$y=0.001x+2.508$ ($r^2=0.27, P=0.04$)	$y=0.001x+2.288$ ($r^2=0.35, P=0.02$)	$P=0.09$	$P=0.14$	$P=0.13$
DOC 30	$y=0.001x+2.199$ ($r^2=0.67, P<0.001$)	$y=0.001x+2.289$ ($r^2=0.43, P=0.006$)	$y=0.0004x+2.229$ ($r^2=0.34, P=0.02$)	$y=0.0004x+2.167$ ($r^2=0.26, P=0.05$)	$P=0.13$
DOC 40	$P=0.06$	$P=0.18$	$P=0.16$	$P=0.76$	$P=0.70$
DOC 50	$y=0.002x+1.995$ ($r^2=0.31, P=0.02$)	$P=0.11$	$y=0.001x+2.010$ ($r^2=0.25, P=0.05$)	$P=0.52$	$P=0.63$
SOC 10	$P=0.06$	$P=0.31$	$P=0.41$	$P=0.56$	$P=0.62$
SOC 20	$y=0.009x+1.736$ ($r^2=0.25, P=0.05$)	$P=0.37$	$P=0.49$	$P=0.45$	$P=0.49$
SOC 30	$y=0.013x+1.312$ ($r^2=0.37, P=0.01$)	$P=0.26$	$P=0.35$	$P=0.27$	$P=0.52$
SOC 40	$y=0.013x+1.396$ ($r^2=0.55, P=0.001$)	$y=0.006x+1.996$ ($r^2=0.27, P=0.04$)	$P=0.10$	$P=0.11$	$P=0.29$
SOC 50	$y=0.012x+1.692$ ($r^2=0.46, P=0.004$)	$P=0.06$	$P=0.23$	$P=0.12$	$P=0.13$
CH ₄ 通量	$P=0.69$	$y=0.181x+2.001$ ($r^2=0.295, P=0.02$)	$P=0.08$	$P=0.19$	$P=0.05$

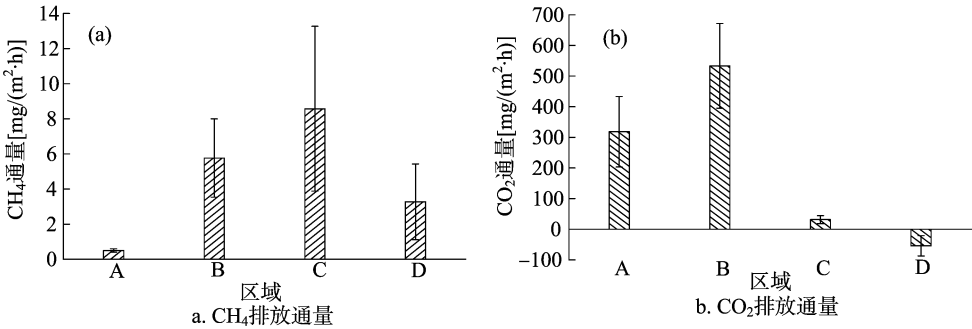


图3 草海湿地CH₄、CO₂排放通量

表 4 CH₄、CO₂ 通量与各指标间的关系

指标	相关系数	
	CH ₄ 通量	CO ₂ 通量
水位	—	-0.806 **
生物量	—	0.753 **
pH 10	—	0.757 **
pH 20	—	0.777 **
pH 30	—	0.788 **
pH 40	—	0.855 **
pH 50	—	0.812 **
DOC 10	0.808 **	—
DOC 20	0.772 **	—
DOC 30	0.637 **	—
DOC 40	0.595 *	—
DOC 50	—	-0.504 *
SOC 10	0.630 **	—
SOC 20	—	—
SOC 30	—	—
SOC 40	0.596 *	—
SOC 50	0.641 **	—

3 结论与讨论

3.1 讨论

3.1.1 CH₄ 排放通量及影响因素 CH₄ 的排放是 CH₄ 产生、氧化及运输过程的综合结果,植被一般是通过影响这 3 个过程来实现对 CH₄ 排放的影响。Galand 等认为,植被类型的不同会导致产甲烷菌群落的差异,而产甲烷菌的数量和类型直接影响了 CH₄ 的产生^[26]。Koelbener 等认为,植被将根际部位产生的 CH₄ 通过植物体传输至大气,避免了 CH₄ 的氧化,从而增加了 CH₄ 的排放^[27]。Strand 认为,不同类型植被对 CH₄ 传输能力不同^[28]。段晓男等对乌梁素海湖泊湿地的甲烷排放研究发现,芦苇样方的甲烷排放速率远大于龙须眼子菜样方^[29]。

本研究中,随着植被群落的演替,CH₄ 的排放通量呈先增加后减少的规律,具体表现为 C 区 > B 区 > D 区 > A 区。光叶眼子菜群落 CH₄ 排放通量仅为蘆草群落的 56.8%。光叶眼子菜为沉水植被,仅能将 CH₄ 传输至水体,而蘆草则可以将沉积物中的 CH₄ 通过体内传输直接排放至大气,从而避免

了 CH_4 的氧化。水葱群落 CH_4 排放通量最高,水葱生活型为挺水植物,植株水面以上的部分可以充分进行光合作用,通气组织发达,因此传输 CH_4 的能力增强。另外,C 区不仅较 A 区、B 区水位高,而且积水时间更长,植株水面以下的部分长期处于淹水厌氧状态,为甲烷菌的活动创造了条件。

3.1.2 CO_2 排放通量及影响因素 不同植被覆盖下 CO_2 排放通量有明显差异,当植被由挺水植物过渡到沉水植物时,草海湿地也发生由 CO_2 “源”向“汇”的转变。卢妍等认为,植物在生态系统 CO_2 排放中占有重要地位^[30]。植被根系的分泌物刺激微生物的活性,加速微生物的代谢活动,同时植物生命活动产生的 CO_2 也是大气中 CO_2 的重要来源。

本研究中,以 D 区为代表的光叶眼子菜群落表现为 CO_2 的“汇”,在高水位环境中,植物呼吸作用和微生物活动受到抑制,不利于 CO_2 的产生和排放,但此环境状态下有利于沉水植物的光合作用,大量 CO_2 通过水-气界面进入水体参与植物的代谢活动。此外应当注意的是,在观测期间内,草海水质整体表现出一定的碱性,游离的 CO_2 转化为碳酸盐储存在水体中,水体中 CO_2 浓度的降低与大气中的 CO_2 形成压差,促使大气中的 CO_2 进入水体,使水体表现为 CO_2 的“汇”,这与 Therrien 等观测水库 CO_2 通量时结论^[31]一致。草海湿地 CO_2 通量与水位呈显著负相关,与 pH 值呈显著正相关,这进一步解释了这一现象。这些特征综合反映了湖泊湿地中水位不仅决定植被的类型及分布,还影响到 CO_2 排放^[32-33],另外由于有机质的不完全分解,导致大多数湿地中碳和营养物质的积累直接影响氧的可利用率、气体的扩散率及微生物的活性^[34]。

3.1.3 沉积物孔隙水 CH_4 浓度垂直空间差异 本研究中,孔隙水 CH_4 浓度剖面均值随着植被的演替呈先增加后减少的规律,具体表现为 C 区 > B 区 > A 区 > D 区,与 CH_4 、 CO_2 排放通量变化规律相似。从沉积物剖面来看,不同区域有不同规律,A 区、B 区、D 区土壤表层(0~30 cm)与底层(30~50 cm) CH_4 浓度相差不大,而 C 区表层 CH_4 浓度明显大于底层,这可能是由于表层土壤产甲烷菌所需底物以及温度高于深层土壤,因此表层孔隙水具有较高的 CH_4 浓度。朱晓艳等对三江平原泥炭沼泽孔隙水 CH_4 浓度变化动态研究中指出,表层沉积物中的 CH_4 浓度要高于深层沉积物,温度是其决定因素^[9]。杨文燕等在研究三江平原湿地孔隙水 CH_4 浓度时发现,随着沉积物深度增加,孔隙水 CH_4 浓度出现增加—减少—增加—减少的趋势,并指出 DOC 对孔隙水 CH_4 浓度有重要影响。DOC 作为沉积物中的活性物质,易于在剖面中迁移和分解^[32]。因此可以认为,DOC 在湿地 CH_4 的产生发挥着重要的作用。本研究结果与之一致。

此外,郭莹莹等在对九龙江河口的研究中得出孔隙水 CH_4 浓度随沉积物深度的增加而增加的结论,硫酸盐控制着沉积物中 CH_4 的产生速率^[22]。因此,草海湿地不同区域沉积物剖面中孔隙水 CH_4 浓度分布可能是各种因素综合作用的结果,其成因还需进一步研究。

3.1.4 沉积物孔隙水 CH_4 浓度与各因子的关系 研究表明,不同深度土壤孔隙水 CH_4 浓度受到不同因子的影响。土壤孔隙水 CH_4 浓度与 CH_4 排放通量之间具有显著的相关性。Ding 等研究三江平原毛苔草潜育沼泽发现,土壤表层孔隙水

中 CH_4 浓度能够解释甲烷排放通量的 91%^[35]。本研究中,20 cm 沉积物孔隙水 CH_4 浓度能够解释 CH_4 排放通量的 29.5%,而深层土壤与甲烷排放通量无显著相关,这可能是由于甲烷排放是甲烷产生、氧化、传输的复杂过程,表层土壤甲烷传输更为频繁,因此表层土壤孔隙水 CH_4 浓度与 CH_4 排放表现出较好的相关性^[9]。

孔隙水 CH_4 浓度与水位呈极显著负相关,与 CH_4 排放通量一致;底层孔隙水 CH_4 浓度与生物量呈极显著正相关,其原因可能是较多的植物体被埋藏在底层,加上底层厌氧环境不利于有机质分解,给甲烷菌提供了充足底物和良好环境,因此底层沉积物孔隙 CH_4 浓度与生物量呈极显著正相关。除上述因子外,土壤容重、pH 值、鲜土含水率、 CO_2 排放通量、株高对底层孔隙水中 CH_4 浓度也有影响,说明影响孔隙水 CH_4 浓度的环境因子具有复杂多样性。由于采样次数的局限性以及草海特殊的水文环境,具体原因和机制需要进一步研究。

3.2 结论

CH_4 通量范围为 0.50~8.57 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,草海湿地不同植被区均表现为 CH_4 排放的“源”,随着植被由挺水植被向沉水植被的更替, CH_4 排放通量呈先增后减的规律,其中 A 区最低,C 区最高,最高值出现在土壤剖面 0~10 cm;土壤 DOC、SOC 含量对 CH_4 排放通量有重要影响。

CO_2 排放通量变化规律与 CH_4 排放通量规律类似,通量范围为 -59.62~547.33 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,也呈先增后减的规律,B 区排放最高,D 区最低,即表现为 CO_2 的“汇”。水位、生物量、沉积物 pH 值是导致 CO_2 排放通量差异的主要环境因子,反映高原湖泊草海的特殊水文环境对温室气体排放的重要影响。

草海湿地沉积物孔隙水 CH_4 浓度剖面均值随着植被从挺水到沉水的演替,表现出先增加后减少的规律,剖面垂直变化规律并不一致,DOC 对孔隙水 CH_4 浓度有重要影响。

参考文献:

- [1]王振芬.三江平原沼泽湿地不同水肥条件的 CH_4 、 N_2O 排放试验研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2012:15-26.
- [2]Franzen L C. The earth afford t o lose the wetlands in the battle against the increasing greenhouse effect [C]//International Peat Society Proceedings of International Peat Congress,1992:1-18.
- [3]牟长城,刘霞,孙晓新,等.小兴安岭阔叶林沼泽土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放规律及其影响因子[J].生态学报,2010,30(17):4598-4608.
- [4]万斯昂,徐辉,全川.闽江口潮汐沼泽甲烷排放通量和土壤甲烷产生潜力的月动态[J].湿地科学,2015,13(4):417-423.
- [5]Bridgman S D, Magonigal J P, Keller J K, et al. The carbon balance of North American wetlands[J]. Wetlands,2006,26(4):889-916.
- [6]Morin T H, Bohrer G, Naor - Azrieli L, et al. The seasonal and diurnal dynamics of methane flux at a created urban wetland[J]. Ecological Engineering,2014,72:74-83.
- [7]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.
- [8]王振芬,张忠学,郭亚芬,等.三江平原沼泽湿地不同水层下 CH_4 、 N_2O 的排放及影响因子[J].东北林业大学学报,2012,40

- (5):102–106.
- [9]朱晓艳,宋长春,郭跃东,等. 三江平原泥炭沼泽孔隙水甲烷浓度变化动态及其影响因素[J]. 环境科学学报,2015,35(7):2233–2239.
- [10]牟晓杰,刘兴土,全川,等. 闽江河口短叶茳芩湿地 CH_4 和 N_2O 排放对氮输入的短期响应[J]. 环境科学,2012,33(7):2482–2489.
- [11]全川,黄佳芳,王维奇,等. 闽江口半咸水芦苇潮汐沼泽湿地甲烷动态[J]. 地理学报,2012,67(9):1165–1180.
- [12]杨平,全川,何清华,等. 闽江口鱼虾混养塘水–气界面温室气体通量及主要影响因素[J]. 环境科学学报,2013,33(5):1493–1503.
- [13]王德宣. 若尔盖高原泥炭沼泽二氧化碳、甲烷和氧化亚氮排放通量研究[J]. 湿地科学,2010,8(3):220–224.
- [14]李丽. 若尔盖自然湿地 CH_4 排放及不同利用方式下温室气体通量估算[D]. 北京:北京林业大学,2011:21–37.
- [15]翟生强,史长光,杜乐山,等. 若尔盖泥炭地地下水位和土壤温度对二氧化碳排放通量的影响[J]. 湿地科学,2015,13(3):327–332.
- [16]Koh H S, Ochs C A, Yu K W. Hydrologic gradient and vegetation controls on CH_4 and CO_2 fluxes in a spring–fed forested wetland[J]. *Hydrobiologia*,2009,630(1):271–286.
- [17]Sun Q Q, Shi K, Damerell P, et al. Carbon dioxide and methane fluxes; seasonal dynamics from inland riparian ecosystems, Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*,2013,465(6):48–55.
- [18]Maltais–Landry G, Maranger R, Brisson J, et al. Greenhouse gas production and efficiency of planted and artificially aerated constructed wetlands[J]. *Environmental Pollution*,2009,157(3):748–754.
- [19]宋长春,杨文燕,徐小锋,等. 沼泽湿地生态系统土壤 CO_2 和 CH_4 排放动态及影响因素[J]. 环境科学,2004,25(4):1–6.
- [20]王维奇. 闽江河口芦苇湿地甲烷排放及其主要环境影响因子分析[D]. 福州:福建师范大学,2008:23–32.
- [21]张华海,李明晶,姚松林. 草海研究[M]. 贵阳:贵州科技出版社,2007:25–28.
- [22]郭莹莹,陈坚,尹希杰,等. 九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究[J]. 环境科学,2012,33(2):558–564.
- [23]李岩,方晰,项文化,等. 湘中丘陵区4种森林土壤水溶性有机碳含量及其与土壤养分的关系[J]. 土壤通报,2014,45(6):1483–1490.
- [24]万忠梅. 水位对小叶章湿地 CO_2 、 CH_4 排放及土壤微生物活性的影响[J]. 生态环境学报,2013,22(3):465–468.
- [25]Ding W X, Cai Z C, Tsuruta H, et al. Plant species effects on methane emissions from freshwater marshes[J]. *Atmospheric Environment*,2005,39(18):3199–3207.
- [26]Galand P E, Fritze H, Conrad R, et al. Pathways for methanogenesis and diversity of methanogenic archaea in three boreal peatland ecosystems[J]. *Applied and Environmental Microbiology*,2005,71(4):2195–2198.
- [27]Koelbener A, Ström 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(1/2):147–158.
- [28]Strand V V. The influence of ventilation systems on water depth penetration of emergent macrophytes[J]. *Freshwater Biology*,2002,47(6):1097–1105.
- [29]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.
- [30]卢妍,宋长春,王毅勇,等. 植物对沼泽湿地生态系统 CO_2 和 CH_4 排放的影响[J]. 西北植物学报,2007,27(11):2306–2313.
- [31]Therrien J, Tremblay A, Jacques R B. CO_2 Emissions from semi–arid reservoirs and natural aquatic ecosystems[M]. Berlin:Springer Heidelberg,2005.
- [32]杨文燕,宋长春,栾兆擎,等. 干旱年份三江平原沼泽甲烷(CH_4)排放及影响因素[J]. 生态学杂志,2006,25(4):423–427.
- [33]McLaughlin J W, Lewin J C, Reed D D, et al. Soil factors related to dissolved organic–carbon concentrations in a black spruce swamp, Michigan[J]. *Soil Science*,1994,158(6):454–464.
- [34]Moore T R, Roulet N T, Waddington J M, et al. Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of Canadian peat lands[J]. *Climatic Change*,1998,40(2):229–245.
- [35]Ding W X, Cai Z C, Tsuruta H, et al. Factors affecting seasonal variation of methane concentration in water in a freshwater marsh vegetated with *Carex lasiocarpa* [J]. *Biology and Fertility of Soils*,2005,41(1):1–8.