

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0326

聂发辉, 周永希, 张后虎, 等. 2017. 生活垃圾填埋场 CH_4 及 N_2O 释放规律及影响因素研究 [J]. 环境科学学报, 37(5): 1808–1813

Nie F H, Zhou Y X, Zhang H H, et al. 2017. Characteristics of CH_4 and N_2O emissions from municipal solid waste landfill and their influencing factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 37(5): 1808–1813

生活垃圾填埋场 CH_4 及 N_2O 释放规律及影响因素研究

聂发辉¹, 周永希^{1,2}, 张后虎^{2,*}, 焦少俊^{2,*}, 刘占孟¹, 喻清¹

1. 华东交通大学土木建筑学院, 南昌 330013

2. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042

收稿日期: 2016-07-07

修回日期: 2016-08-04

录用日期: 2016-08-04

摘要: 对生活垃圾填埋场 5 个操作平台开展了为期 1 年的 CH_4 和 N_2O 释放通量监测, 分析了填埋场 CH_4 和 N_2O 释放通量变化规律, 并对 CH_4 和 N_2O 释放通量与 CO_2 释放通量之间相关关系及其影响因素进行了探讨. 结果表明, 生活垃圾填埋场是 CH_4 和 N_2O 释放的源, CH_4 释放通量范围为 $(9.16 \pm 7.46) \sim (21287.03 \pm 128.70) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \text{ CH}_4\text{-C}$; N_2O 释放通量范围为 $(31.74 \pm 16.00) \sim (17089.31 \pm 7599.24) \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \text{ N}_2\text{O-N}$; 整个填埋场 5 个平台中 CH_4 和 N_2O 年释放总量分别约为 $86.17 \text{ Gg} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $0.81 \text{ Gg} \cdot \text{a}^{-1} \text{ CO}_2$ 当量. 填埋场温室气体的减排主要是控制 CH_4 释放. 生活垃圾填埋场是高度异质性体系, 不同平台释放通量变化规律并不统一, N_2O 与含水率呈显著负相关 ($p < 0.05$), 两种气体释放通量与土壤温度均呈显著正相关关系 ($p < 0.01$), 而与其他因素无明显相关关系.

关键词: 生活垃圾填埋场; CH_4 释放通量; N_2O 释放通量; 填埋龄; 影响因素

文章编号: 0253-2468(2017)05-1808-06

中图分类号: X705

文献标识码: A

Characteristics of CH_4 and N_2O emissions from municipal solid waste landfill and their influencing factors

NIE Fahui¹, ZHOU Yongxi^{1,2}, ZHANG Houhu^{2,*}, JIAO Shaojun^{2,*}, LIU Zhanmeng¹, YU Qing¹

1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013

2. Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042

Received 7 July 2016;

received in revised form 4 August 2016;

accepted 4 August 2016

Abstract: The emission fluxes of methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) from a municipal solid waste landfill (MSW) sites were investigated for the whole year around. The monthly variations of CH_4 and N_2O fluxes at MSW landfill sites were analyzed. The correlation of CH_4 and N_2O fluxes and its influencing mechanisms were explored. The result showed that landfill site of MSW was a large source of CH_4 and N_2O emissions. The range of CH_4 fluxes is $(9.16 \pm 7.46) \sim (21287.03 \pm 128.70) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \text{ CH}_4\text{-C}$, and N_2O fluxes is $(31.74 \pm 16.00) \sim (17089.31 \pm 7599.24) \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \text{ N}_2\text{O-N}$. The main way to reduce CH_4 emission is to control the release. CH_4 and N_2O fluxes were about $86.17 \text{ Gg CO}_2\text{-eq}$ and $0.81 \text{ Gg CO}_2\text{-eq}$ each year from the entire landfill site by 5 platforms. The landfill was a highly heterogeneous system, and the variations of CH_4 and N_2O fluxes in different platforms were not uniform. N_2O flux was negatively correlated with water content in cover soil ($p < 0.05$). CH_4 and N_2O fluxes were significantly positively correlated with soil temperature ($p < 0.01$), while the correlations with other environmental influencing factors were not significant.

Keywords: municipal solid waste landfill; methane flux; nitrous oxide flux; landfill age; influencing mechanism

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41375161); 江苏省自然科学基金(No.BK20151101); 中科院战略先导专项课题(No.XDA05020602)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.41375161), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(No.BK20151101) and the CAS Strategic Pilot Projects Subject(No.XDA05020602)

作者简介: 聂发辉(1977—), 男, 副教授(博士), E-mail: wyynfh@yahoo.com.cn; * 通讯作者(责任作者), E-mail: jsj@nies.org

Biography: NIE Fahui (1977—), male, associate professor (Ph.D.), E-mail: wyynfh@yahoo.com.cn; * **Corresponding author**, E-mail: jsj@nies.org

1 引言(Introduction)

生活垃圾填埋场是 CH₄重要的人为释放源,目前年释放量为 $9\times10^6\sim70\times10^6$ t,约占全球 CH₄年释放总量的 1.5%~15.0%,而该比例在美国、荷兰等国高达 20%以上(IPCC 2007).不同填埋场、同一填埋场不同区域的 CH₄释放通量可以有较大差异,相同填埋区域在不同检测时间的 CH₄释放通量也存在差异(Abushammala *et al.* 2013; 2012).目前垃圾填埋场 CH₄的释放因素及其动力学研究较多,但 N₂O 较少被提及.N₂O 是仅次于 CO₂和 CH₄的第 3 大温室气体,GWP(Global Warming Potential,温室效应潜能值)高达 CO₂的 296 倍,温室效应贡献率达 5%(IPCC 2007),是一种高效痕量的温室气体.填埋场 N₂O 主要形成于覆土微生物的硝化反硝化作用,是硝化过程的副产物和反硝化过程的中间产物,其释放规律受到多种因素共同影响(Ruser *et al.* , 2006; Inamori *et al.* , 2008),Arnold 等(2005) 研究表明瑞典南部落叶林地 N₂O 释放通量峰值出现在夏季,而 Rudaz 等(1999) 提出由于土壤冻融作用,瑞士阿尔卑斯山脚草地 N₂O 释放峰值出现在早春季节.而针对填埋场不同填埋龄和操作类型差异大的 CH₄和 N₂O 释放通量的研究报道较为匮乏.

为此,选取华东地区某生活垃圾填埋场 5 个填埋龄、覆土深度等参数不同的操作平台,采用静态箱法进行为期 1 年的 CH₄和 N₂O 释放通量现场监测.分析填埋场 CH₄和 N₂O 释放通量及变化规律,探讨温室气体释放通量及其相关关系、影响因素的机理,以期为国内生活垃圾填埋场 CH₄和 N₂O 排放控制提供数据和基础理论支持.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 研究场地概况

所选研究场地垃圾填埋场(31°59′42.5″N, 118°53′56.15″E) 为 3 个市级垃圾集中堆放地之一.于 1992 年建成启用,设计使用年限 15 年,设计容量 380×10^4 m³,填埋量为 $1500\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,填埋场所在区域年均降雨量 898.8 mm,2013 年年均温度 16.8 ℃.根据垃圾填埋时间将整个研究场地划分为 5 个区域,分别为平台 1~5,各平台分别设置操作平台(监测点),平台主要特征见表 1.

表 1 平台特征

Table 1 Characteristics of research platform

平台	主要特征						
	填埋龄/a	覆 HDPE 膜	垃圾填埋气收集系统	平台面积 A/m ²	填埋深度 H/m	植被	终场覆土
1	12~15	无	无	38998	4~5	杂草	砂土
2	5~8	有	无	57445	5~13	杂草	砂土
3	0.5~1	无	无	48704	10~13	无	无
4	3~5	无	有	35191	4~5	稀疏杂草	砂土
5	1~2	无	有	22640	4~5	稀疏杂草	砂土

注:平台 3 为新鲜垃圾.

2.2 样品采集和监测

气体释放通量采用静态箱测定,每一平台设置 5 台静态箱平行样.静态箱为圆柱体设计,底部半径 20 cm,高 20 cm,有效容积 25 L,箱体顶部设置取样口和温度测量接口.取样时,箱体下部固定于覆土层中,箱体上部通过水封槽密封,在密封后的第 0、5、10、15 和 20 min 用注射器通过三通阀在取样口进行取样操作,每次取样 50 mL.取样时间为 2014 年 1—12 月,频率为 1 次·月⁻¹,每月采样日的 9:00 和 14:00 进行取样,取样的同时记录大气的温度、湿度、压强及土壤温度等数据.

2.3 样品的检测与分析

气体样品采用 Agilent 7890A 型气相色谱仪进行分析,CH₄、CO₂ 浓度采用氢焰离子化检测器(Flame Ionization Detector, FID) 检测,N₂O 浓度采用电子俘获检测器(Electron Capture Detector, ECD) 检测,工作温度为色谱柱温 55 ℃,氢焰离子化检测器温度 200 ℃,电子俘获检测器温度 350 ℃(Yi *et al.* 2012; Zhang *et al.* 2012),载气样(高纯空气、高纯 N₂、高纯 H₂) 纯度均为 99.99% 以上.

土壤理化特性分析采用中科院南京土壤研究所编著《土壤农业化学分析方法》(鲁如坤, 2000): 含水率测定采用重量法,土样 105 ℃烘干 8 h,测定前后质量差; pH 测定采用电位法,取 10 g 土样风干, $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl₂ 浸提(水:土 = 2.5:1),使用 PHS-3C 型玻璃电极 pH 计测定; 有机质测定采用重铬酸钾容量法-外加热法; 土壤氮氮测定采用纳氏试剂分光光度法,取 50 mL KCl 溶液($2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$),浸提 10 g 土样,振荡沉淀过滤后,加入纳氏试剂,使用岛津 UV-2550 紫外/可见分光光度计测定; 土壤硝态氮测定前述步骤与铵态氮相同,过滤后加入 1:10 的盐酸,使用岛津 UV-2550 紫外/可见分光光度计测定; 土壤质地采用吸管法测定,依据中国科学院

南京土壤研究所制定的粒径分级方案.重金属浓度采用元素分析光谱仪测定 (ICP-MS X series I, Thermo Company) (郑勇等, 2012; Berder *et al.*, 1995).

2.4 释放通量计算

填埋气 CH_4 、 CO_2 或 N_2O 气体的释放通量计算方法参见文献 (高志文等, 2006):

$$f = (V/A) \cdot (\Delta C / \Delta t) \quad (1)$$

式中 f 为 CH_4 、 CO_2 或 N_2O 气体释放通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ CH_4 、 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ CO_2 或 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ N_2O -N); V 为静态箱封盖后形成的空间体积 (m^3); A 为静态箱的横截面积 (m^2); $\Delta C / \Delta t$ 为单位时间箱体内存 CH_4 、 CO_2 或 N_2O 浓度的变化 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$).

2.5 数据分析

采用 SPSS 软件 (SPSS, Inc. Chicago, IL) 对数据进行处理.统计分析各因子之间的相关性,以均值 $\pm$ 标准偏差表示数据. T-检验进行组间显著性检验. $p < 0.05$ 表示显著性差异, $p < 0.01$ 表示极显著性差异.

3 结果 (Results)

3.1 CH_4 和 N_2O 释放通量月变化规律

各平台 CH_4 和 N_2O 释放通量变化规律如图 1 所示.平台 1~5 均为 CH_4 释放的源, 5 个研究平台 CH_4 的释放通量峰值在 6—8 月, 谷值均在 2 月取得.其中, 平台 3 的 CH_4 释放通量峰值在 6 月取得, 为 $(21287.03 \pm 128.70) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (以 CH_4 -C 计, 下同); 对应的谷值在 2 月份 $(9.16 \pm 7.46) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. 各平台 CH_4 平均释放通量介于 $434.54 \sim 6516.97 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

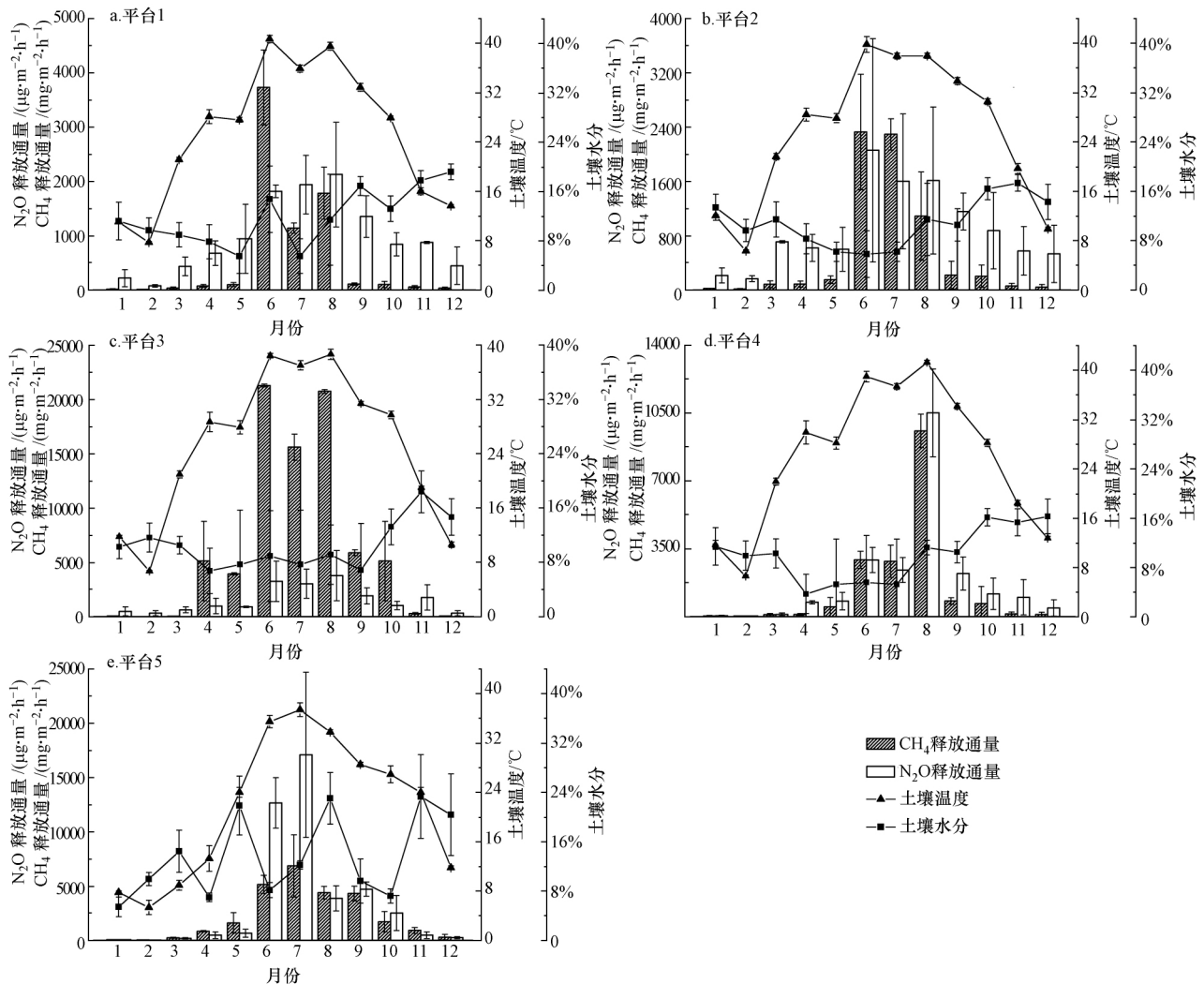


图 1 CH_4 和 N_2O 释放通量月变化规律

Fig.1 Monthly variation of CH_4 and N_2O emission fluxes

之间.平台 3 的 CH₄释放通量最高,平台 3、平台 4、平台 5 的平均释放通量比平台 1 和平台 2 高出一个数量级以上;结合表 1 中各平台垃圾填埋龄可知,垃圾填埋龄应是 CH₄释放通量高低的主导因素.

同样,平台 1~5 均为 N₂O 释放的源,5 个研究平台 N₂O 的释放通量峰值在 6—8 月取得,谷值均在 2 月取得.平台 5 的 N₂O 释放通量峰值在 7 月取得,为(17089.31±7599.24) μg·m⁻²·h⁻¹(以 N₂O-N 计,下同);谷值在 5 月取得,为(31.74±16.00) μg·m⁻²·h⁻¹.各平台 N₂O 平均释放通量介于 895.29~3582.84 μg·m⁻²·h⁻¹之间.结合各平台垃圾填埋龄,与 CH₄释放通量相类似,N₂O 释放通量在填埋 1~2 年后达到峰值,而后随着垃圾填埋龄增加呈下降趋势.

3.2 填埋场 CH₄和 N₂O 释放总量

将 CH₄、N₂O 释放通量均换算为 CO₂当量,根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)2007 年数据,单分子 CH₄和 N₂O 的百年增温潜势分别 CO₂ 的 25 倍和 296 倍,以下数据均按该比例换算.填埋场释放的 CO₂属于生物质分解排放,不计入排放清单,故未计入总量.如图 2 所示,平台 1~5 的 CH₄释放总量分别为(3.12±1.06)、(5.82±2.45)、(58.39±8.29)、(9.66±2.60)、(9.19±3.10) Gg·a⁻¹,占所在平台主要温室气体(CH₄、CO₂)释放总量的比例介于 96.91%~99.67%之间.整个填埋场 CH₄释放总量约为 86.17 Gg·a⁻¹,约占填埋场主要温室气体释放总量的 99.07%,由此可见,填埋场温室气体的减排主要是控制 CH₄释放.

各平台 N₂O 释放总量换算后介于 0.10~0.21 Gg 之间,对应占所在平台主要温室气体释放总量的比例介于 0.33%~3.09%之间.填埋场 N₂O 释放总量约为 0.81 Gg·a⁻¹,约占主要温室气体释放总量的 0.93%.

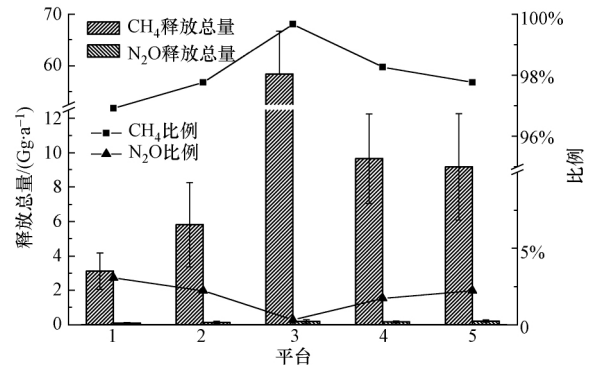


图 2 各平台温室气体释放总量

Fig.2 Total amount of GHGs emission flux in each platform

3.3 CH₄和 N₂O 释放通量与主要影响因子的相关性

生活垃圾填埋场 CH₄和 N₂O 释放通量受到自然环境条件变化的影响,数据统计分析结果列于表 2. CH₄释放通量与土壤温度呈显著正相关($p<0.01$); N₂O 释放通量与土壤温度呈显著正相关($p<0.01$),与含水率呈显著负相关($p<0.05$). CH₄、CO₂和 N₂O 释放通量之间也存在一定的影响,均呈显著正相关($p<0.01$).垃圾填埋龄也是影响填埋场 CH₄和 N₂O 释放量的一个因素(表 3),CH₄和 N₂O 年释放量与垃圾填埋龄均呈显著负相关($p<0.05$).

表 2 温室气体释放通量与主要影响因子的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between GHGs fluxes and environmental factors

	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	温度	含水率	pH	有机质	氨氮	硝态氮
CH ₄	1	0.447 **	0.610 **	0.499 **	-0.236	-0.084	0.043	0.187	-0.119
N ₂ O		1	0.353 **	0.526 **	-0.270 *	-0.058	-0.179	0.114	-0.175
CO ₂			1	0.551 **	-0.166	0.037	0.063	-0.014	-0.214
温度				1	-0.400 **	0.071	-0.140	-0.184	-0.222
含水率					1	-0.048	-0.328 *	-0.251	0.354 **
pH						1	0.034	0.120	0.058
有机质							1	0.314 *	-0.272 *
氨氮								1	-0.198
硝态氮									1

注: ** 相关性在 0.01 水平上显著(双尾); * 相关性在 0.05 水平上显著(双尾).

表 3 CH₄和 N₂O 年释放量与垃圾填埋龄的相关性分析Table 3 Correlation analysis between CH₄&N₂O fluxes and landfill age

	CH ₄ 释放通量	N ₂ O 释放通量	垃圾填埋龄
CH ₄ 释放通量	1	0.470	-0.589*
N ₂ O 释放通量		1	-0.927*
填埋龄			1

注: * 相关性在 0.05 水平上显著(双尾)。

4 讨论(Discussions)

4.1 CH₄释放通量及影响因素分析

整个填埋场 CH₄ 释放通量均值介于 9.16 ~ 21287.03 mg·m⁻²·h⁻¹, 峰值出现在 6—8 月, 谷值均出现在 2 月。CH₄ 释放通量的时间差异主要受到温度的影响。对影响因子的相关性分析得出, 填埋场 CH₄ 释放通量与土壤温度具有显著正相关关系, 而与含水率、pH 值、有机质含量、氨氮含量及硝态氮含量等因素无显著关系。CH₄ 和 CO₂ 释放通量受到覆盖层通透性和 CH₄ 氧化作用的影响(马占云等, 2014)。覆盖层中, 甲烷氧化菌可将 CH₄ 氧化最终生成 CO₂, 温度对甲烷氧化菌活性影响较大(Börjesson *et al.*, 1997), 导致不同监测时间的 CH₄ 和 CO₂ 释放通量相关性具有差异。

各平台 CH₄ 释放通量均值差异明显, 且平台 3 > 平台 5 > 平台 4 > 平台 2 > 平台 1。平台 3 的 CH₄ 释放通量分别为平台 1、平台 2、平台 4、平台 5 的 15、11.83、4.37、2.95 倍。平台 1(填埋龄 > 12 a) 的 CH₄ 最大释放通量达到了 (1785.79 ± 478.58) mg·m⁻²·h⁻¹, 表明该填埋场实际情况与填埋场 CH₄ 的产生可维持十几年甚至几十年的研究结论相符。众多研究表明, 垃圾填埋后的第 2 年 CH₄ 释放量达到峰值, 而本研究中, 平台 5 设置的 LFG 收集系统和终场覆土使平台 5(填埋龄 1~2 年) CH₄ 释放通量低于平台 3(填埋龄 < 1 年)。LFG 收集系统可有效收集填埋场产生的气体, 从而减少 CH₄ 通过填埋场覆盖层的释放量, Lohila 等(2007) 发现填埋气主动收集系统可降低覆盖层 79% 的 CH₄ 释放通量; 终场覆土也造成了部分 CH₄ 被氧化。随着填埋场覆土层深度的增加, CH₄ 氧化能力增强, CH₄ 的释放减少(Lohila *et al.*, 2007; Abichou *et al.*, 2006)。因此, 控制温室气体释放可以从设置 LFG 收集系统、终场覆土等措施着手。

4.2 N₂O 释放通量及影响因素分析

整个填埋场 N₂O 释放通量均值介于 21.74 ~ 17089.31 μg·m⁻²·h⁻¹ 之间, 峰值出现在 6—8 月, 谷值出现在 2 月。平台 5 的 N₂O 释放通量最高, 年平均

释放通量分别为平台 1、平台 2、平台 3、平台 4 的 3.65、4.00、2.33、1.92 倍。N₂O 释放通量的时间差异主要受到温度的影响。填埋场 N₂O 释放通量与土壤温度具有显著正相关关系, 与含水率呈显著负相关关系, 而与 pH 值、有机质含量、氨氮含量及硝态氮含量等因素无显著关系。温度会影响土壤中各种物质的物化参数以及硝化反硝化过程中相关微生物的活性, 从而影响 N₂O 气体的释放(郑循华等, 1997)。Jassal 等(2011) 提出, 一定范围内, 硝化和反硝化速率随温度升高而加快, 此时 N₂O 释放通量的主要控制因素是土壤温度。

4.3 CH₄与 N₂O 释放通量相关性分析

研究中 CH₄ 与 N₂O 释放通量具有显著正相关关系($p < 0.01$)。覆土及垃圾堆体中产甲烷菌和甲烷氧化微生物的数量和活性对 N₂O 释放具有重要影响。有研究发现, 经 CH₄ 处理过的覆土, N₂O 的释放速率和平均释放量有明显提高(Zhang *et al.*, 2009)。Ren 等(2000) 指出众多甲烷氧化菌能产生 N₂O。覆土中甲烷氧化菌氧化 CH₄ 的过程中伴着 N₂O 的产生(Rinne *et al.*, 2005), 其中甲烷氧化菌 T20 活性最大。CH₄ 释放量的增大, 提高了甲烷氧化菌对 CH₄ 的氧化量, 对 N₂O 释放起到了一定的促进作用。

5 结论(Conclusions)

1) 生活垃圾填埋场是 CH₄ 和 N₂O 释放的源。填埋场 CH₄ 和 N₂O 年释放总量约为 86.17、0.81 Gg·a⁻¹ (以 CO₂ 当量计), 分别占填埋场主要温室气体年释放总量的 99.07%、0.93%。填埋场 CH₄ 释放通量为 (9.16 ± 7.46) ~ (21287.03 ± 128.70) mg·m⁻²·h⁻¹; N₂O 释放通量为 (31.74 ± 16.00) ~ (17089.31 ± 7599.24) μg·m⁻²·h⁻¹。填埋场温室气体的减排主要是控制 CH₄ 释放。LFG 收集系统和终场覆土的设置可以明显降低温室气体的释放, 达到减排的目的。

2) 生活垃圾填埋场是高度异质性体系, CH₄ 和 N₂O 释放在时间与空间上均存在显著差异。5 个研究平台中夏季 CH₄ 和 N₂O 释放通量较冬季和春季均高出至少一个数量级; 不同平台释放通量变化规律并不统一, CH₄ 平均释放通量相差十几倍, N₂O 平均释放通量相差近 2 倍。垃圾填埋龄应是 CH₄ 和 N₂O 释放通量高低的主导因素。

3) 生活垃圾填埋场 CH₄、N₂O、CO₂ 释放具有关联性。CH₄ 释放通量随 CO₂ 释放通量变化规律波动, 表现为显著正相关($p < 0.05$); N₂O 释放通量与 CH₄

释放通量显著高度正相关 ($p < 0.01$)。填埋场土壤温度为影响 CH_4 、 N_2O 气体释放的主要因素, 所研究填埋场中 CH_4 和 N_2O 释放通量与土壤温度均呈显著正相关 ($p < 0.01$), N_2O 与含水率呈显著负相关 ($p < 0.05$)。两种气体与其他因素均无显著相关关系。

责任作者简介: 焦少俊 (1981—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事固体废弃物处理与处置。

参考文献 (References):

- Abichou T, Chanton J, Powelson D, *et al.* 2006. Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers [J]. *Waste Manage* 26(11): 1305-1312
- Abushammala M F M, Basri N E A, Basri H, *et al.* 2013. Empirical gas emission and oxidation measurement at cover soil of dumping site: example from Malaysia [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 185(6): 4919-4932
- Abushammala M F M, Basri N E A, Basri H, *et al.* 2012. Methane and carbon dioxide emissions from Sungai Sedu open dumping during wet season in Malaysia [J]. *Ecological Engineering*, 49(4): 254-263
- Arnold K V, Nilsson M, Hånell B, *et al.* 2005. Fluxes of CO_2 , CH_4 , and N_2O from drained organic soils in deciduous forests [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 37(6): 1059-1071
- Bender M, Conrad R. 1995. Effect of CH_4 , concentrations and soil conditions on the induction of CH_4 , oxidation activity [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 27(12): 1517-1527
- Börjesson G, Svensson B H. 1997. Seasonal and diurnal methane emissions from a landfill and their regulation by methane oxidation [J]. *Waste Management & Research*, 15(1): 33-54
- 高志文, 何品晶, 邵立明, 等. 2006. 生活垃圾填埋场填埋作业台阶甲烷排放研究 [J]. *环境科学学报*, 26(2): 236-240
- Inamori R, Wang Y, Yamamoto T, *et al.* 2008. Seasonal effect on N_2O formation in nitrification in constructed wetlands [J]. *Chemosphere*, 73(7): 1071-1077
- IPCC. 2007. Summary for Policymakers of Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press
- Jassal R S, Black T A, Roy R, *et al.* 2011. Effect of nitrogen fertilization on soil CH_4 and N_2O fluxes, and soil and bole respiration [J]. *Geoderma*, 162(1/2): 182-186
- Lohila A, Laurila T, Tuovinen J P, *et al.* 2007. Micrometeorological measurements of methane and carbon dioxide fluxes at a municipal landfill [J]. *Environmental Science & Technology*, 41 (8): 2717-2722
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社
- 马占云, 李海玲, 高庆先, 等. 2014. 生活垃圾填埋场覆盖层温室气体 CH_4 和 CO_2 释放规律及其相关性研究 [J]. *环境工程技术学报*, 4(5): 399-405
- Ren T, Roy R, Knowles R. 2000. Production and consumption of nitric oxide by three methanotrophic bacteria [J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 66(9): 3891-3897
- Rinne J, Pihlatie M, Lohila A, *et al.* 2005. Nitrous oxide emissions from a municipal landfill [J]. *Environmental Science Technology*, 39 (20): 7790-7793
- Rudaz A O, Wälti E, Kyburz G, *et al.* 1999. Temporal Variation in N_2O and N_2 fluxes from a permanent pasture in Switzerland in Relation to Management, Soil Water Content and Soil Temperature [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 73(1): 83-91
- Ruser R H, Flessa H, Russow R, *et al.* 2006. Emission of N_2O , N_2 and CO_2 from soil fertilized with nitrate [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 38(2): 263-274
- Yi Z, Zhang H, Bo J, *et al.* 2012. Landfill CH_4 oxidation by mineralized refuse: Effects of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ incubation, water content and temperature [J]. *Science of the Total Environment*, 426(2): 406-413
- Zhang H, He P, Shao L. 2009. N_2O emissions at municipal solid waste landfill sites: Effects of CH_4 , emissions and cover soil [J]. *Atmospheric Environment*, 43(16): 2623-2631
- Zhang H, Yan X, Cai Z, *et al.* 2012. Effect of rainfall on the diurnal variations of CH_4 , CO_2 , and N_2O fluxes from a municipal solid waste landfill [J]. *Science of the Total Environment*, 442(1): 73-76
- 郑循华, 王明星. 1997. 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响 [J]. *环境科学*, 18(5): 1-5
- 郑勇, 郑袁明, 贺纪正. 2012. 水稻土甲烷氧化菌对镉胁迫的响应 [J]. *生态环境学报*, 21(4): 737-743