

贾明升, 王晓君, 陈少华, 等. 简易生活垃圾填埋场温室气体的排放研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(3): 136-141. Jia Mingsheng, Wang Xiaojun, Chen Shaohua, et al. Greenhouse gas emissions from an open dump of municipal solid waste[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(3): 136-141.

简易生活垃圾填埋场温室气体的排放研究

贾明升, 王晓君, 陈少华*, 林向宇, 徐颖

(中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘 要 采用静态箱/气相色谱法对一座典型简易生活垃圾填埋场的 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 释放通量进行了为期 1 a 的监测, 讨论了相关影响因素和通量的季节变化。研究发现: 该填埋场 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 年平均释放通量分别为 $(43.93 \pm 129.99) \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $(622.68 \pm 1215.54) \text{ }\mu\text{gN}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $(132.57 \pm 158.90) \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 即 $19.64 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。 CH_4 和 N_2O 占温室气体年排放总量的比例分别为 65.31% 和 13.01%, 而在夏季和秋季 N_2O 可占到当季温室气体排放量的 20.23% 和 27.30%。统计分析显示 CO_2 释放通量与 CH_4 ($p < 0.01$) 和 N_2O 释放通量 ($p < 0.05$) 显著正相关, N_2O 释放通量与气温显著正相关 ($p < 0.05$), CH_4 和 CO_2 释放通量呈现一定的季节差异, 而 N_2O 释放通量四季无显著差异。

关键词 简易填埋场; 温室气体; 释放通量; 环境因素; 季节变化

中图分类号 X511 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2015.03.026 文章编号 1003-6504(2015)03-0136-06

Greenhouse Gas Emissions from an Open Dump of Municipal Solid Waste

JIA Mingsheng, WANG Xiaojun, CHEN Shaohua*, LIN Xiangyu, XU Ying

(Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract Fluxes of methane (CH_4), nitrous oxide (N_2O) and carbon dioxide (CO_2) from an open dump of municipal solid waste were measured using static chamber and gas chromatography (GC) based techniques in 2012–2013. Influencing factors on greenhouse gases (GHGs) emissions and seasonal variability of GHGs emissions were discussed as well. The results showed that annual average fluxes of CH_4 , N_2O and CO_2 from this open dump were $(43.93 \pm 129.99) \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $(622.68 \pm 1215.54) \text{ }\mu\text{gN}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and $(132.57 \pm 158.90) \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, respectively, i.e. $19.64 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ in total. CH_4 was the dominate GHG which accounted for 65.31% of the total annual GHGs emissions, while the figure for N_2O was 13.01%. In terms of seasonal GHGs emissions, N_2O constituted a higher proportion up to 20.23% and 27.30% in summer and autumn respectively. Statistical analysis illustrated that CO_2 fluxes were significantly and positively relevant to that of CH_4 ($p < 0.01$) and N_2O ($p < 0.05$). As for environmental factors, only N_2O fluxes had a positive and significant correlations with air temperature ($p < 0.05$). In addition, N_2O fluxes had no significant difference among seasons, whereas both CH_4 fluxes and CO_2 fluxes presented somewhat considerable difference among seasons.

Keywords open dump; greenhouse gas; flux; influencing factors; seasonal variability

CH_4 和 N_2O 是重要的温室气体, 其 100 年尺度上的全球增温潜势 (GWP₁₀₀) 分别为 CO_2 的 25 和 298 倍, 贡献了全球人为温室气体年排放总量的 14.3% 和 7.9%, 是仅次于 CO_2 的两大温室气体^[1]。 N_2O 也被认为

是当今最主要的臭氧层破坏物质^[2]。垃圾填埋场是温室气体排放的一个重要人为源, 数据显示填埋场排放的 CH_4 约占全球人为 CH_4 排放量的 11.1%^[3]。此外, 已有研究表明, 生活垃圾填埋场 N_2O 排放通量可比同区

《环境科学与技术》编辑部 (网址) <http://fjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjksyjs@vip.126.com

收稿日期 2014-05-20, 修回 2014-08-10

基金项目 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05020603)

作者简介 贾明升 (1988-) 男, 硕士研究生, 主要从事废弃物处理温室气体排放与控制研究 (电子信箱) msjia@iue.ac.cn; * 通讯作者, 研究员 (电话) 0592-6190995 (电子信箱) shchen@iue.ac.cn。

域农业土壤和森林土壤的 N_2O 最高排放通量高 1~2 个数量级^[4]。

在未来很长一段时间内,填埋仍将是生活垃圾处理处置的主要方式之一,而简易填埋目前在发展中国家仍占有较大比重。据统计,2006 年我国有高达 40% 的城市生活垃圾经由未管理的简易填埋场处置^[5];在泰国,生活垃圾有 65% 最终填入简易填埋场^[6];而在印度,这一比例更是高达 70%~90%^[7]。但有关简易填埋场温室气体释放的研究却相对较少,尤其是对其 N_2O 释放的研究。由于实测数据的严重不足,在进行相关温室气体排放清单的计算时通常仅以 IPCC 推荐的缺省值计算其 CH_4 排放量而忽略其 N_2O 排放量^[8]。此外,利用低频率采样或者短期监测的结果估算填埋场温室气体的释放量往往带有很大的不确定性^[9-10]。

本研究选取典型的简易生活垃圾填埋场,对其 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 3 种温室气体的释放通量及相关环境因素影响进行了为期 1 a 的监测和研究,以期对简易填埋场温室气体排放量、排放规律及排放控制措施

的确定提供依据。

1 材料和方法

1.1 填埋场概况

本研究选取的朱坑简易生活垃圾填埋场位于厦门市翔安区(24°37'42" N, 118°16'20"E),为应急性生活垃圾堆放场。该场填埋区面积约为 1.7 万 m^2 ,库容为 7.5 万 m^3 ,于 2007 年 1 月投入使用,于 2010 年 12 月封场。该填埋场运行期间主要接纳厦门市翔安区农村生活垃圾(80 t/d)和厦门市主城区一小部分的城市生活垃圾(2009-2010 年)。填埋期间厦门市总体生活垃圾组成如表 1 所示。该垃圾填埋场底部铺设 HDPE 膜防渗,终场覆土厚度为 1 m,覆土土质为砂粉土。覆土中总氮和总碳的质量百分比(干重)分别为(0.028±0.006)%和(0.74±0.29)%。朱坑简易生活垃圾填埋模式是目前我国城乡、村镇普遍采取的垃圾处置方式,未采取任何渗滤液导排和填埋气收集措施,具有较为广泛的代表性。

表 1 填埋期间厦门市生活垃圾组成
Table 1 Properties of municipal solid waste in Xiamen

年份	组分/(w/w)									
	厨余	灰土	砖瓦陶瓷	纸类	橡塑类	金属	玻璃	纺织物	木竹	其他
2007	39.31	35.69	1.26	1.67	19.33	0.78	0.87	0.48	0.61	0.00
2008	49.3	20.01	1.50	5.10	20.14	0.61	1.12	1.35	0.78	0.09
2009	56.33	11.00	1.83	5.14	21.03	0.63	1.30	1.76	0.98	0.00
2010	41.12	39.77	1.63	1.89	11.75	0.77	1.57	0.45	1.06	0.00

1.2 温室气体监测

填埋场 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 气体采用静态箱法采样,气相色谱测定。所用静态箱为圆柱形,覆盖面积 0.126 m^2 ,体积 38 L,箱顶部设有气体取样口、温度传感器接口和气压平衡管,箱体包有保温棉和反光锡箔纸以防止箱内温度急剧变化。在填埋场区内呈“日”字型布设 6 个平行采样点,相邻两点间距为 10 m。预先将采样箱底座固定于各采样点位,底座入土深度为 0.05 m。采样时,先将水注入底座水封槽中,而后将静态箱插入水封槽内。以 10 min 为间隔在 40 min 内抽取 5 管气体,同时记录箱内温度变化,以校正气体浓度。采样时间固定为当日 8:00-11:00,约 2 周采集 1 次样品,从 2012 年 4 月-2013 年 4 月进行为期 1 a 的研究工作。

所有气体样品在采集后 24 h 内完成测定。 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 气体经气相色谱(GC, Agilent 7890A, Palo Alto, CA)同步测定,其中 CH_4 和 CO_2 经火焰离子化检测器(FID)检测, N_2O 经电子捕获检测器(ECD)检测。仪器参数设置详见文献[11],气体通量按式(1)计算^[12]:

$$F = \frac{V}{A} \frac{\Delta c}{\Delta t} \frac{273}{T+273} \quad (1)$$

式(1)中, F 为 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 的释放通量($mgC/(m^2 \cdot h)$ 或 $\mu gN/(m^2 \cdot h)$); V 为静态箱顶与固定部分形成的空间体积(m^3); A 为静态箱与固定部分覆盖的面积(m^2); $\Delta c/\Delta t$ 为单位时间内箱内气体质量浓度变化($mg/(m^3 \cdot h)$ 或 $\mu g/(m^3 \cdot h)$); T 为采样时箱内气体温度。

1.3 环境因素测定

静态箱采样的同时测定点位表层土壤(0~6 cm)的含水率(MP-406,北京中天仪器有限公司)、箱内气体温度(JM20,天津今明仪器有限公司)和表层土壤(0~5 cm)温度(JM10,天津今明仪器有限公司)。

1.4 统计分析方法

环境因素与 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 气体释放的关系进行 Pearson 相关性分析。不同季节气体释放的差异进行单因素方差分析(one-way ANOVA), $p < 0.05$ 差异显著, $p > 0.05$ 则视为无显著差异。文中所示偏差均为标准偏差(SD)。统计分析所用软件为 IBM SPSS 20.0 (IBM Corp., USA)。

2 结果和讨论

2.1 3 种温室气体的释放量

朱坑简易生活垃圾填埋场的 CH₄、N₂O 和 CO₂ 的释放通量变化如图 1 所示。3 种温室气体释放通量皆有较高的时空变异性,同其他文献测定结果一致^[4,13-14]。该场 CH₄ 释放通量的变化范围为-0.51~1 051.88 mgC/(m²·h),平均值为(43.93±129.99) mgC/(m²·h)(n=105)。个别点位可监测到一定比例的负通量(n=9),表明填埋场局部地区在某些时候可氧化空气中的 CH₄ 成为临时的汇,但其净 CH₄ 氧化作用较弱,测定期间最高值仅为-0.513 mgC/(m²·h)。

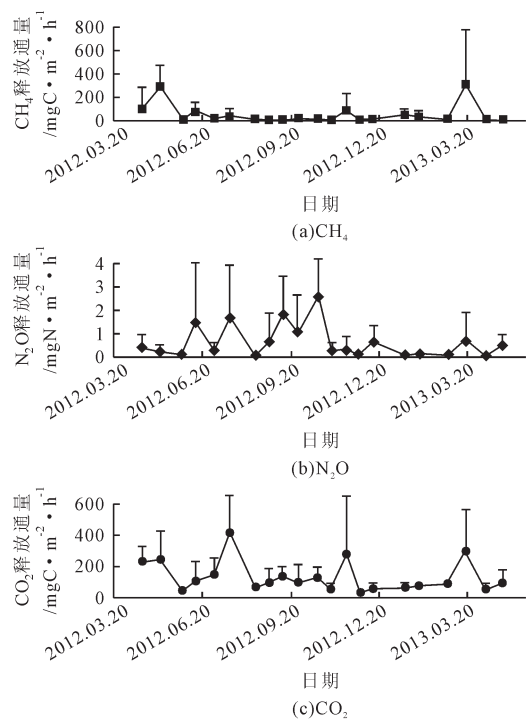


图1 CH₄、N₂O和CO₂释放通量变化
Fig.1 Fluxes of CH₄, N₂O and CO₂ during measurement period

研究结果显示该填埋场有持续的 N₂O 释放,其释放通量的变化范围为-15.41~5 947.09 μgN/(m²·h),平均值为(622.68±1215.54) μgN/(m²·h)(n=83)。研究过程中同样发现该填埋场覆土层可监测到一定比例的负的 N₂O 释放通量(n=8),表明覆土层有时可消耗空气中的部分 N₂O 进行源汇转换。张后虎等^[13]在对杭州市天子岭废弃物处理总场的研究中也发现覆土一周和覆土 5 a 的填埋堆体可监测到负的 N₂O 释放通量,而源于其他生态系统的土壤 N₂O 释放通量也普遍具有这一现象^[15]。但该简易填埋场 N₂O 的最高负通量值仅为-15 μgN/(m²·h),整体上仍表现为较强的 N₂O 释放。

研究期间该填埋场 CO₂ 释放通量的变化范围为

5.05~1 014.86 mgC/(m²·h),平均值为(132.57±158.90) mgC/(m²·h)(n=115),且其通量变化趋势与 CH₄ 释放通量的变化趋势具有较好的一致性,说明垃圾堆体处于厌氧分解阶段,这一点在随后的相关性分析中也得到了证实。

为比较 3 种气体对该填埋场总温室气体释放量的贡献,将其释放通量换算为相应的 CO₂ 当量(CO₂-eq),进而乘以填埋区域的面积计算出 3 种气体的年排放量(表 2)。该简易填埋场年温室气体释放总量为 333.86 t CO₂-eq,CH₄ 为其释放的主要温室气体(65.31%),CO₂ 占 21.68%,而 N₂O 占年释放量 13.01%。由于填埋场垃圾堆体所释放的 CO₂ 属于生物成因,并不计入其温室气体排放清单中^[8],因而若扣除 CO₂ 的排放量,N₂O 对该填埋场温室气体排放量的贡献可达到 16.61%。

表 2 CH₄、N₂O 和 CO₂ 的排放贡献
Table 2 Contribution of CH₄, N₂O and CO₂ to total GHGs emission as CO₂-eq

温室气体	释放通量	CO ₂ -eq /mgC·m ⁻² ·h ⁻¹	CO ₂ -eq /t·a ⁻¹	百分比 /%
CH ₄ /mgC·m ⁻² ·h ⁻¹	43.93	399.33	218.05	65.31
N ₂ O/μgN·m ⁻² ·h ⁻¹	622.68	79.53	43.42	13.01
CO ₂ /mgC·m ⁻² ·h ⁻¹	132.57	132.57	72.39	21.68
合计	—	611.43	333.86	100.00

一般认为填埋场 N₂O 排放量相对于 CH₄ 排放量可忽略不计,因此联合国气候变化专门委员会(IPCC)并未提供相应的排放量计算方法,导致 N₂O 排放实际上并未计入填埋场温室气体排放清单^[8]。Rinne 等^[4]对芬兰某卫生填埋场的测定结果表明 N₂O 仅占到该填埋场温室气体排放量的 3%,Zhang 等^[12]对一卫生填埋场 3 种气体同步测定结果显示这一比例为 1.5%。因此,对于规范的生活垃圾卫生填埋场,这一计算方法基本是合理的。但是,对于简易填埋场,情况并非如此。不同于有覆盖的卫生填埋场,露天堆放的简易填埋场的表层垃圾通常直接暴露于空气中,直至被新的垃圾覆盖或者封场,而已有研究表明未覆盖的新鲜垃圾的 N₂O 释放通量均值可达到 1.67 mgN/(m²·h),占其 3 种温室气体释放总量的 12.10%,甚至高于 CH₄ 所占比例^[16]。考虑到朱坑简易填埋场已覆土封场,但未设置渗滤液和填埋气导排及收集系统,推测其高 N₂O 释放通量的可能原因为:一方面,填埋气由于压力作用透过覆土层释放,而填埋气中 CH₄ 和 NH₃ 均可影响覆土硝化、反硝化作用^[4];另一方面滞留在垃圾堆体内的垃圾渗滤液可能通过土壤毛细作用等进入覆土层进而强化覆土层的相关微生物作用^[13]。Jha 等^[7]对印度 2 个类似简易填埋场测定结果也显示 N₂O 可以分别占其温室气体年释放量的 4.54%和 13.06%。

2.2 环境因素影响

填埋场 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 的释放与环境因素密切相关,因此在测定 3 种气体的释放通量的同时测定了点位的气温、土壤含水率(0~6 cm)和土壤温度(5 cm),统计分析结果如表 3 所示。对 CH_4 而言,其释放通量与 CO_2 的释放通量呈显著正相关($p<0.01$),但与所测

3 种环境因素均未呈现出显著的相关性($p>0.05$)。 N_2O 释放通量除与 CO_2 的释放通量呈显著正相关($p<0.05$)外,还受到采样时空气温度的显著影响($p<0.05$)。对 CO_2 而言,其释放通量与其余 2 种气体的释放通量均显著相关,同时又受气温和表层土壤温度的显著影响($p<0.05$)。

表 3 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放与环境因素相关性
Table 3 Pearson correlation analysis between CH_4 , N_2O and CO_2 fluxes and environmental factors

	CH_4	N_2O	CO_2	湿度	土壤温度	气温
CH_4	1	-0.032	0.560**	-0.081	0.274	-0.017
N_2O		1	0.224*	-0.03	0.278	0.240*
CO_2			1	-0.156	0.446*	0.203*
湿度				1	-0.106	-0.329**
土壤温度					1	0.891**
气温						1

注 $n=21\sim115$, * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

土壤含水率和温度影响调节土壤中各物质传输的物理化学参数和参与硝化、反硝化及甲烷氧化等过程的相关微生物的活动,进而影响 CH_4 和 N_2O 等气体释放^[17-18]。实验室研究表明,填埋场覆土的含水率和温度以及气温的变化都会影响温室气体排放。Mandernack 等^[19]进行填埋场覆土的培养实验表明含水率对其 N_2O 释放有着强烈影响,当覆土含水率由 -2.0 MPa 升至 -0.6 MPa 时, N_2O 释放量提高了 20 倍。Zhang 等^[12]在填埋场短期原位测量研究也发现在没有覆盖 HDPE 膜的填埋场覆土层,其 CH_4 和 N_2O 释放通量均与土壤含水率呈显著相关($p<0.05$)。McBain 等^[20]发现填埋场 CH_4 释放与空气温度有显著的相关性($R=0.245$, $p<0.001$)。然而,由于填埋现场受众多因素影响,环境因素对不同填埋场温室气体释放的影响程度差别很大。例如 Rinne 等^[4]监测结果显示填埋场 N_2O 释放通量与土壤含水率和土壤温度无显著相关;Zhang 等^[9]研究也发现填埋场 CH_4 释放与土壤含水率、土壤温度和气温均无显著相关性。由于现有研究均基于实验室研究或现场短期监测,尚难以系统性分析环境因素对填埋场温室气体排放的影响,本研究基于为期一年的监测所得研究结果有利于为简易填埋场温室气体释放的研究提供有益参考。

2.3 3 种温室气体释放的季节变化

温度和降雨等环境因素影响填埋场 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 的产生和释放,而这些环境因素又随季节发生变化,因此有理由推测填埋场温室气体的释放也随季节变化。为期 1 a 的测定为进一步考察朱坑简易填埋场 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 释放通量的季节变化提供了条件(图 2)。对 CH_4 而言,其春季($100.57 \text{ mgC}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$)和秋季($22.45 \text{ mgC}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$)的释放通量呈现出显著的差异($p<0.05$),而与夏季和冬季的释放通量均无显著差异

($p<0.05$)。对 N_2O 而言,统计分析结果表明其 4 个季节的释放通量无显著差异。对 CO_2 而言,则表现为其冬季的释放通量显著低于春季和夏季的释放通量($p<0.05$),而与秋季的释放通量没有显著的差异。

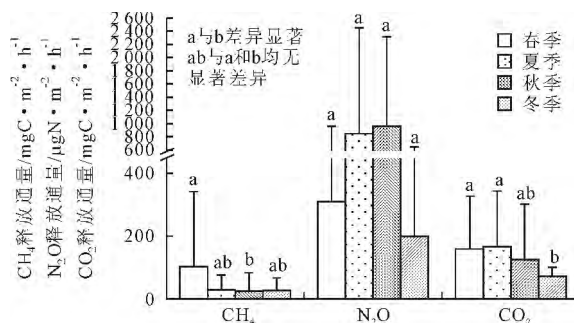


图2 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放的季节变化
Fig.2 Seasonal variability of CH_4 , N_2O and CO_2 fluxes

将采样所得 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 释放通量均换算为 $\text{CO}_2\text{-eq}$,进一步考察 4 个季节中 3 种气体排放所占比例的变化(图 3)。以 N_2O 为例,其在春季所占比例较低,仅为当季温室气体排放量的 3.56%,而在夏季和秋季,这一比例明显升高,分别达到 20.23%和 27.30%;但随后又在冬季回落至 7.59%。纵观 4 个季节,该简易填埋场释放的温室气体均以 CH_4 为主。

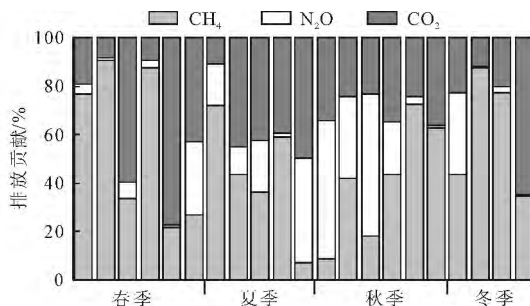


图3 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放所占比例变化
Fig.3 Variability of CH_4 , N_2O and CO_2 fluxes by $\text{CO}_2\text{-eq}$

2.4 不同场地 CH₄ 和 N₂O 释放通量比较

为更为准确地认识简易填埋场的温室气体排放强度,将朱坑简易填埋场的 CH₄ 和 N₂O 释放通量与其他场地进行比较,如表 4 和表 5 所示。就 CH₄ 而言,朱坑简易填埋场的 CH₄ 释放通量高于中国草原和南方红树林的 CH₄ 释放通量,但不足杭州市天子岭垃圾卫

生填埋场和意大利 Palermo 卫生填埋场的 1/5 和 1/25。这主要是由于简易填埋场堆体垃圾通常会进行一定程度的好氧分解,甲烷产生量要低于同等条件下的厌氧卫生填埋场^[9,21]。与同类型填埋场相比,朱坑简易填埋场的 CH₄ 释放通量与印度 Perungudi 简易填埋场相当。

表 4 朱坑简易填埋场 CH₄ 释放通量与文献数据比较
Table 4 CH₄ fluxes from Zhukeng open dump and comparison with published literatures data

场地类型	采样时间	释放通量/mg·C·m ⁻² ·h ⁻¹		参考文献
		均值	范围	
中国草原	1997-2007	-0.041	NG	[22]
中国南方红树林	2008.06 及 2008.08	NG	0.121~62.023	[23]
杭州天子岭垃圾卫生填埋场	2006.11-2007.06	233.25	NG	[9]
意大利 Palermo 卫生填埋场	2009.05	1 107	0.72~21 735	[24]
印度 Perungudi 简易填埋场	2003.10、2004.09	43.49 ^a	0.675~324.75	[7]
厦门朱坑简易填埋场	2012.04-2013.04	43.93	-0.51~1 051.88	本研究

注 a 据年释放量计算,NG 未给出。

表 5 朱坑简易填埋场 N₂O 释放通量与文献数据比较
Table 5 N₂O fluxes from Zhukeng open dump and comparison with published literatures data

场地类型	采样时间	释放通量/mg·N·m ⁻² ·h ⁻¹		参考文献
		均值	范围	
中国草原	1997-2007	0.003	NG	[22]
中国南方红树林	2008.06 及 2008.08	NG	-0.004~0.667	[23]
杭州天子岭垃圾卫生填埋场	2006 年 7 月	0.018	0.008~0.047	[13]
瑞典 Högbyttrop 卫生填埋场	1991.11-1992.07	3.460	-0.011~16.7	[25]
印度 Perungudi 简易填埋场	2003.10 及 2004.09	0.254 ^a	0.002~0.764	[7]
厦门朱坑简易填埋场	2012.04-2013.04	0.62	-0.015~5.95	本研究

注 a 据年释放量计算,NG 未给出。

就 N₂O 而言,朱坑简易填埋场的 N₂O 释放通量高于同处中国南方的红树林的 N₂O 释放通量,且远高于中国草原的 N₂O 释放通量。与杭州天子岭卫生填埋场相比,朱坑简易填埋场的 N₂O 释放通量要高出一个数量级,但仍低于与以污泥混合物作为覆盖材料的瑞典 Högbyttrop 卫生填埋场。与 CH₄ 类似,朱坑简易填埋场的 N₂O 释放通量与同为简易填埋场的印度 Perungudi 相当。

3 结论

(1)已封场 2~3 a 的简易填埋场的 CH₄、N₂O 和 CO₂ 年平均释放通量分别为(43.93 ±129.99) mgC/(m²·h)、(622.68±1 215.54) μgN/(m²·h)和(132.57±158.90) mgC/(m²·h),以 CO₂ 当量计即19.64 kgCO₂-eq/(m²·a)。

(2)为期 1 a 的监测显示,简易填埋场的 CH₄ 释放通量与覆土含水率、覆土温度及气温均无显著相关性,但 N₂O 释放通量与气温呈现显著的相关性($p<0.05$)。统计分析也表明该简易填埋场的 CH₄ 和 CO₂ 释放通量呈现一定的季节差异,但 N₂O 释放通量在四季无显著差异。

(3)N₂O 在该简易填埋场的年温室气体释放总量中的比例为 13.01%,而在夏季和秋季更是可以占到当季温室气体排放量的 20.23%和 27.30%,这一比例远高于已报道的卫生填埋场,因此在计算简易填埋场的温室气体排放量时,应给予 N₂O 充分的重视和进一步的研究。

[参考文献]

[1] IPCC. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.

[2] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N₂O) the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. Science, 2009, 326(5949): 123-125.

[3] Nazaries L, Murrell J C, Millard P, et al. Methane, microbes and models: fundamental understanding of the soil methane cycle for future predictions[J]. Environmental Microbiology, 2013, 15(9): 2395-2417.

[4] Rinne J, Pihlatie M, Lohila A, et al. Nitrous oxide emissions from a municipal landfill[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(20): 7790-7793.

- [5] Zhang D Q , Tan S K , Gersberg R M. Municipal solid waste management in China :status , problems and challenges [J]. *Journal of Environmental Management* ,2010 ,91(8) :1623–1633.
- [6] Chiemchaisri C , Visvanathan C. Greenhouse gas emission potential of the municipal solid waste disposal sites in Thailand[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association* ,2008 ,58(5) :629–635.
- [7] Jha A K , Sharma C , Singh N , et al. Greenhouse gas emissions from municipal solid waste management in Indian mega –cities :a case study of Chennai landfill sites [J]. *Chemosphere* ,2008 ,71(4) :750–758.
- [8] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme , Eggleston HS , Buendia L , Miwa K , et al. Published IGES , Japan ,2006.
- [9] Zhang H H , He P J , Shao L M. Methane emissions from msw landfill with sandy soil covers under leachate recirculation and subsurface irrigation[J]. *Atmospheric Environment* ,2008 ,42(22) :5579–5588.
- [10] 何品晶,陈森,张后虎,等. 垃圾填埋场渗滤液灌溉及覆土土质对填埋场氧化亚氮释放的影响[J]. *应用生态学报* ,2008 ,19(7) :1591–1596.
- He Pinjing , Chen Miao , Zhang Houhu , et al. Effects of leachate irrigation and cover soil type on N_2O emission from municipal solid waste landfill [J]. *Journal of Applied Ecology* ,2008 ,19(7) :1591–1596.(in Chinese)
- [11] Wang Y S , Wang Y H. Quick measurement of N_2O , CO_2 and CH_4 emissions from a short-plant ecosystem[J]. *Advances in Atmospheric Sciences* ,2003 ,20(5) :842–844.
- [12] Zhang H H , Yan X F , Cai Z C , et al. 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* ,2013 ,442(2013) :73–76.
- [13] 张后虎,何品晶,瞿贤,等. 卫生和生物反应器填埋场夏季 N_2O 释放的研究[J]. *环境科学研究* ,2007 ,20(3) :108–112.
- Zhang Houhu , He Pinjing , Qu Xian , et al. N_2O fluxes from sanitary and bioreactor MSW landfill in the summer [J]. *Research of Environmental Science* ,2007 ,20(3) :108–112. (in Chinese)
- [14] Zhang H H , He P J , Shao L M. N_2O emissions from municipal solid waste landfills with selected infertile cover soils and leachate subsurface irrigation [J]. *Environmental Pollution* ,2008 ,156(3) :959–965.
- [15] Chapuis-Lardy L , Wragg N , Metay A , et al. Soils , a sink for N_2O A review[J]. *Global Change Biology* ,2007 ,13(1) :1–17.
- [16] Bogner J E , Spokas K A , Chanton R P. Seasonal greenhouse gas emissions (methane , carbon dioxide , nitrous oxide) from engineered landfills :daily , intermediate and final california cover soils[J]. *Journal of Environmental Quality* ,2011 ,40(3) :1010–1020.
- [17] 郑循华,王明星,王跃思,等. 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响[J]. *环境科学* ,1997 ,18(5) :1–5.
- Zheng Xunhua , Wang Mingxing , Wang Yuesi , et al. Impacts of temperature on N_2O production and emission [J]. *Environmental Science* ,1997 ,18(5) :1–5.(in Chinese)
- [18] Shukla P N , Pandey K D , Mishra V K. Environmental determinants of soil methane oxidation and methanotrophs[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* ,2013 ,43(18) :1945–2011.
- [19] Mandernack K W , Kinney C A , Coleman D , et al. The biogeochemical controls of N_2O production and emission in landfill cover soils :the role of methanotrophs in the nitrogen cycle[J]. *Environmental Microbiology* ,2000 ,2(3) :298–309.
- [20] McBain M C , Warland J S , McBride R A , et al. Micrometeorological measurements of N_2O and CH_4 emissions from a municipal solid waste landfill [J]. *Waste Management & Research* ,2005 ,23(5) :409–419.
- [21] Yang N , Zhang H , Shao L M , et al. Greenhouse gas emissions during msw landfilling in China :influence of waste characteristics and LFG treatment measures [J]. *Journal of Environmental Management* ,2013 ,129 :510–521.
- [22] Cai Z C. Greenhouse gas budget for terrestrial ecosystems in China[J]. *Science China–Earth Sciences* ,2012 ,55(2) :173–182.
- [23] Chen G C , Tam N F , Ye Y. Summer fluxes of atmospheric greenhouse gases N_2O , CH_4 and CO_2 from mangrove soil in south China[J]. *Science of the Total Environment* ,2010 ,408(13) :2761–2767.
- [24] Di Bella G , Di Trapani D , Viviani G. Evaluation of methane emissions from palermo municipal landfill :comparison between field measurements and models[J]. *Waste Management* ,2011 ,31(8) :1820–1826.
- [25] Borjesson G , Svensson B H. Nitrous oxide emissions from landfill cover soils in Sweden[J]. *Tellus Series B–Chemical and Physical Meteorology* ,1997 ,49(4) :357–363.