

文章编号: 1005-0523(2014)05-0086-07

垃圾填埋场覆盖土CH₄氧化影响因素的研究进展

张卫风¹, 彭 禹^{1,2}, 张后虎², 吴世东¹

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 温室气体CH₄是导致气候变化、引起全球变暖的因素之一。垃圾填埋场是CH₄重要的人为释放源, 而填埋场覆盖土CH₄氧化能有效削减CH₄排放。本文对近年来国内外在影响覆盖土CH₄氧化的主要因素方面取得的研究成果进行了总结, 提出影响覆盖土CH₄氧化的主要因素有: 土壤含水率、土壤pH、土壤温度、土壤碳氮含量、土壤粒径、气象条件、CH₄及O₂浓度、重金属及覆盖土材料。最后, 对其后的研究方向进行了展望, 指出通过优选覆盖土材料以及控制环境状态, 可以有效提高覆盖土CH₄氧化速率, 减小垃圾填埋场CH₄释放。

关键词: 垃圾填埋场; 覆盖土; CH₄氧化; 温室气体

中图分类号: X705

文献标志码: A

全球变暖已成为世界关注的重大环境问题。CH₄、CO₂、N₂O是3种最重要的温室气体(green house gases, GHGs)^[1]。虽然CO₂是气候变暖的主要贡献者, 但随着相关研究的深入, CH₄产生的温室效应开始逐渐受到重视^[2]。根据政府间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on the climate change, IPCC)的报告, 以100年影响尺度为计, CH₄的全球变暖潜能(global warming potential, GWP)是CO₂的25倍^[3]。此外, CH₄在大气中的停留时间在10年左右, 而CO₂和N₂O的停留时间为120年左右, 故而减少CH₄的排放能更快更为有效地缓解气候变暖^[4]。

垃圾填埋场是CH₄重要的人为释放源, 目前年释放量为 $9 \times 10^6 \sim 70 \times 10^6$ t, 约占全球CH₄年释放总量的1.5%~15.0%, 而该比例在美国、荷兰等国甚至高达20%以上^[5-6]。诸多研究表明, 填埋场覆盖土可以有效地削减填埋场CH₄的排放, IPCC第三工作组评估报告也已将覆盖土层CH₄氧化作为填埋场减排的一种重要技术和方法^[7-8]。

覆盖土CH₄氧化过程是由CH₄氧化菌主导的, 以CH₄作为能源和碳源, O₂为电子受体, 通过甲烷单氧酶、甲醇脱氢酶、甲醛脱氢酶和甲酸脱氢酶4种酶的催化作用, 最终将垃圾填埋气中的CH₄氧化为H₂O和CO₂^[9-10], 该过程对CH₄的削减量最高约占CH₄生物产量的60%^[11]。影响填埋场覆盖土CH₄氧化的主要因素有: 土壤含水率^[7, 11]、土壤pH^[12]、土壤温度^[13]、土壤碳氮含量^[14-15]、土壤粒径^[16]、气象条件^[17]、CH₄及O₂浓度^[18]、重金属^[19]及覆盖土材料^[8, 13, 20]。

1 土壤含水率

含水率在填埋场覆盖土CH₄氧化中起着重要的作用。一般认为含水率过高, 进入土壤内部的O₂量会减少, 不利于氧化菌氧化CH₄, 而含水率过低会降低CH₄氧化菌的活性^[7, 11]。何品晶等^[21]的研究显示在含水率低于5%的情况下基本无CH₄氧化行为, 费平安等^[22]的实验表明含水率低于8%时无氧化行为。覆盖土的CH₄氧化作用存在最佳含水率, 在该含水率条件下, 气体易扩散, 氧化菌活性较高。何品晶等^[12]认为最佳含

收稿日期: 2014-06-22

基金项目: 江西省青年科学基金项目(20122BAB213020)

作者简介: 张卫风(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为大气污染控制。

水率为15%,而Charlotte等^[23]的研究则认为在25%左右,Bender等^[24]的研究认为该值介于20%~35%之间。除此之外,Börjesson等^[25]认为含水率增加可能导致NH₄⁺积累,从而降低CH₄氧化能力。Watzinger等^[26]研究显示含水率的影响比氨氮的影响更为显著。Boeckx等^[27]的试验表明含水率对CH₄氧化行为的影响比温度更大。

2 土壤pH

微生物通常可以在一个较宽pH范围内生长,但其对pH变化的耐受性也有一定限度,每种微生物都有其最适pH,该pH下酶的活性最高^[28]。研究表明覆盖土CH₄氧化的最适pH在7左右,土壤pH过低或者过高都可能使得土壤丧失CH₄氧化能力^[12,29]。Charlotte等^[16]认为6.5~7.5之间为CH₄氧化菌的最适pH范围;Bender等^[14]则研究认为是6.7~8.1。

3 土壤温度

土壤温度主要通过影响CH₄氧化菌的微生物活性来影响覆盖土CH₄氧化^[30~31]。覆盖土CH₄氧化的最佳温度是在25~35℃,2℃时仍存在CH₄氧化作用,因此冬季CH₄氧化菌仍可通过氧化CH₄有效降低覆盖土CH₄释放通量,但冬季覆盖土CH₄氧化速率明显低于夏季^[13,32]。此外,温度也会对CH₄氧化菌的种群结构也会产生影响,CH₄氧化菌根据形态、代谢途径、膜结构等系列特征可分为两种:I型和II型,I型CH₄氧化菌适宜在低温(3~10℃)下生长,而II型CH₄氧化菌则适宜在较高的温度(20℃左右)下生长^[7,25]。

4 土壤碳氮含量

4.1 有机质

已有的研究显示,微生物活性及种群结构均与有机质含量有着密切的联系,有机质含量高的覆盖土材料其CH₄氧化能力更强,减小有机质含量会限制微生物代谢作用^[33~34]。Kightley等^[14]采用模拟柱研究显示,CH₄氧化速率高的土层其有机质含量较其它深度的土层高。刘景龙等^[35]研究显示,在培养温度介于5~45℃之间时,有机质含量高的矿化垃圾的平均CH₄氧化速率分别约为粘性土和砂性土的2.35和4.71倍。

4.2 无机氮

无机氮对土壤CH₄氧化作用的影响既有刺激作用,又有抑制作用^[15,36]。一定浓度的氨氮和硝态氮可作为微生物的营养物质,在一定范围内,增加氨氮和硝态氮的浓度有利于土壤CH₄氧化^[37]。Wang等^[38]研究表明,当土壤NH₄⁺的投加量从20 mg·kg⁻¹逐渐增加到300 mg·kg⁻¹时,CH₄氧化速率由5.0 μmol CH₄·g⁻¹·h⁻¹增加到6.0 μmol CH₄·g⁻¹·h⁻¹,当浓度继续增加到600 mg·kg⁻¹时,CH₄氧化速率开始下降,但此时的氧化速率仍高于未投加NH₄⁺的土壤;而对于硝态氮,当投加量介于10~600 mg·kg⁻¹之间时,增加投加量均可以提高CH₄氧化速率。除此之外,NH₄⁺作为氨氧化菌的间接底物,浓度的增加可以直接导致氨氧化菌数量增加,而氨氧化菌能协同氧化CH₄^[39~40]。Novikov等^[41]对黑钙土和泥炭土进行研究后发现土壤中氨氧化菌对CH₄氧化的贡献率在5%~16%之间。

NH₄⁺的抑制主要存在酶竞争、代谢产物抑制和盐效应等作用机理。酶竞争将抑制作用归结为NH₄⁺与CH₄对CH₄单加氧酶(methane monooxygenase,MMO)的活性位点的竞争^[8];有关代谢产物抑制的研究认为氨氧化菌氧化NH₄⁺生成NO₂⁻,会对CH₄氧化菌的活性产生短暂抑制,从而抑制CH₄氧化^[42];盐效应作用机理则主要基于相同剂量的NH₄Cl和NaCl对CH₄氧化有基本相同的抑制效应^[43~44]。

5 土壤粒径

CH₄氧化菌是专性好氧菌,O₂含量对CH₄氧化影响很大,合适的土壤粒径可以为土壤创造良好的O₂分布和交换条件,从而提升土壤的CH₄氧化能力^[45],且土壤比表面积与CH₄氧化菌的菌群数量均随土壤粒径

的增大而减小^[16]。Bender^[32]等对包括森林淋溶土和水稻田土壤在内的10余种土壤进行了研究,发现当土壤颗粒介于0.5~2.0 mm之间时,CH₄氧化速率出现最大值。

6 气象条件

气象条件对覆盖土CH₄氧化的影响表现在大气压、地表温度及降雨等方面^[17,46]。大气压和地表温度会直接影响覆盖土CH₄的释放,从而间接影响CH₄氧化,已有的研究认为大气压强与垃圾填埋场CH₄释放呈显负相关关系^[47]。填埋场内部的压强一般高于大气压强,由此而形成的压差是形成CH₄气体传质的主要推动力之一,填埋场内部的气体压强相对稳定,因而大气压强变化而带来的场内外压差会改变CH₄气体的传质动力^[48]。CH₄释放通量密度(E)与地面温度(T)存在一定的指数关系: $E=\alpha\times 10^{-\beta}\times \exp(\gamma\times T)$,其中夏季 α 为4.14, β 为19, γ 为1.615;秋季 α 为4.50, β 为9, γ 为0.970;冬季 α 为5.12, β 为4, γ 为0.782^[49]。降雨会增加覆盖土的含水率,减小土壤的孔隙,从而减小CH₄的传质效率,阻碍CH₄的释放^[50]。

7 CH₄和O₂浓度

初始CH₄浓度及O₂含量是影响CH₄氧化最重要的因素之一。CH₄氧化菌作为一种严格的好氧菌,只有在O₂存在的条件下才能以CH₄作为唯一的碳源和能源进行代谢活动^[51],O₂浓度大于3%时,浓度变化对CH₄氧化的影响并不明显,覆盖土CH₄氧化能力与CH₄浓度成正线性相关,土壤CH₄氧化能力随CH₄浓度增加而增加,O₂浓度低于3%时则会抑止CH₄的氧化作用^[18,52]。已有研究显示在一定深度范围内,CH₄和O₂二者的比例相适,土壤获得较大的CH₄氧化速率^[21,35,53]。何晶晶等^[21]通过实验室土壤模拟柱试验显示最佳的CH₄氧化区域在距离覆盖土表面0~30 cm,该区域CH₄和O₂的比例分别介于10%~30%,0%~10%,土壤的CH₄氧化速率介于3.33~8.33 mol·m⁻²·d⁻¹,而30 cm以下区域基本没有CH₄氧化活动。

8 重金属

垃圾填埋场的重金属主要来源于电子垃圾^[54],Mn,Zn,Pb,Cd,Cr和Ni是最常见的重金属。重金属对于生物系统是有毒的,它主要通过抑制CH₄氧化菌的细胞蛋白质的表达来影响CH₄氧化作用,其毒性主要来自于可溶的重金属部分^[19,55-56]。Zhang等^[6]研究了重金属Pb对CH₄氧化的影响,与没有投加重金属的实验土样相比,驯化矿化垃圾和原生矿化垃圾CH₄氧化率的下降少于20%,而黏土急剧下降了约2.5倍。Tsien等^[57]认为即使铜离子浓度很低也会对降解速率产生很大的影响。Bender等^[24]研究表明铜离子浓度大于275.2 mg·L⁻¹会抑制CH₄氧化行为,而Charlotte等^[23]通过研究认为铜离子浓度大于268.8 mg·L⁻¹即会对CH₄氧化行为产生抑制。

9 覆盖土材料

黏土和砂土是两种常规覆盖土材料。黏土C,N含量较高,持水能力弱,故土壤含水量较低,易结块,从而影响到CH₄氧化菌的生长^[32,34]。何若等^[58]通过土柱试验发现黏土的CH₄氧化速率介于0.55~1.08 μmol CH₄·g⁻¹·h⁻¹,刘景龙等^[35]的研究结果为1.30 μmol CH₄·g⁻¹·h⁻¹。砂土的气体扩散性好,但土壤贫瘠,有机质含量低、微生物种群数量少^[59]。彭禹等^[60]通过批式试验发现砂土的CH₄氧化速率为0.34 μmol CH₄·g⁻¹·h⁻¹。有关填埋场覆盖土材料的研究已开展了大量的研究工作,新型覆盖土如矿化垃圾、污泥和堆肥物等在填埋场温室气体CH₄减排方面的效果已被广泛认同,实现了废物的资源化利用^[8,13,20,61]。

9.1 矿化垃圾

矿化垃圾是指在填埋场中填埋多年,基本达到稳定化,已可进行开采利用的垃圾。其主要特征是:有机质含量介于9%~15%、离子交换容量介于120~140 mmol·(100 g)⁻¹、细菌数介于1~9×10⁶个·g⁻¹、pH值近中性、饱和水力渗透系数介于1~1.3 cm·min⁻¹、吸附比表面积介于5~6 m²·g⁻¹、总氮为0.5%左右、总磷和总钾均为1%左右^[62]。矿化垃圾具有较好的组织结构,同时还具有较好的多孔性以及含有丰富CH₄氧化菌,这些因

素都有利于微生物的CH₄氧化^[61]。Zhang等^[63]发现矿化垃圾的CH₄氧化率为一般土壤的3.81倍;冯凯等^[64]研究显示,原生矿化垃圾的CH₄氧化速率是黏土的2.10倍,经畜禽废水驯化后,矿化垃圾CH₄氧化率高达15.48 μmol CH₄·g⁻¹·h⁻¹,是原生矿化垃圾的1.82倍。

9.2 污泥

污泥来源于城市污水处理厂,是污水处理过程中产生的固态、半固态废物,含有微生物生长所必需的有机质和营养物质^[65]。陈爱朝等^[66]研究认为经深度脱水的污泥,通过控制含水率和臭气强度可作为垃圾填埋场中间层覆盖土使用;Kim等^[67]研究认为污水污泥通过转渣凝固技术(CSS)回收后可作为良好的填埋场覆盖材料。Lou等^[8]研究发现,陈垃圾和陈污泥的质量比为7:3和6:4时,CH₄分别减少了78.7%和66.9%。

9.3 堆肥物

堆肥物作为生物覆盖层材料,具有多空气、微生物丰富、有机质含量高和持水力大等特点^[68]。Abichou等^[69]在填埋场表面增加堆肥物后,CH₄的平均释放量由4.00 g·m⁻²·d⁻¹降低到0.04 g·m⁻²·d⁻¹;Mor等^[13]对堆肥物的研究所获得的最大CH₄氧化速率为6.05 mol CH₄·g⁻¹·h⁻¹;腐熟周期和通气性能是影响其CH₄氧化能力的关键因素。张相锋等^[70]发现纯堆肥物基质的CH₄氧化能力较弱,而通过增加一定比例的陶粒改性后,改善了覆盖土内部的通气性能,为CH₄氧化细菌营造了良好的环境,如由堆肥物和陶粒组合而成的复合基质其CH₄氧化效率高达100%,杨文静等^[71]采用该种类型的复合基质作为覆盖土材料获得的最大CH₄氧化速率为9.10 μmol CH₄·g⁻¹·h⁻¹。除此之外,堆肥物来源(如生活垃圾、污泥及庭院修剪物等)、温度及含水率也会影响堆肥物CH₄氧化能力,相比于其他生物覆盖材料,堆肥的周期长、成本高且产量少,制约了其应用^[71-73]。

10 展望

垃圾填埋场是CH₄重要的人为释放源,而垃圾填埋场覆盖土CH₄氧化是填埋场温室气体减排的有效途径,同时也存在一些有待解决的问题:①相较于砂土和黏土,矿化垃圾、污泥和堆肥物作为新型覆盖土材料具有更强的CH₄氧化能力,但有关该类材料的研究还处于初级阶段,亟待进一步完善,且其实际应用价值尚不确定;②氨氧化菌能协同氧化CH₄,如何提高氨氧化菌的CH₄氧化能力,从而增加覆盖土的CH₄氧化能力尚待进一步研究;③如何有效控制填埋场内氨氮、硝态氮以及重金属含量,减小其对覆盖土CH₄氧化的影响。解决这些问题将有助于有效提高覆盖土CH₄氧化速率,从而减小垃圾填埋场CH₄释放。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007-mitigation of climate change: working group III contribution to the fourth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] CHUN S K. The influence of air inflow on CH₄ composition ratio in landfill gas[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2014, 16(1): 172-177.
- [3] TOWNSEND A R, HOWARTH R W. Fixing the global nitrogen problem[J]. Scientific American, 2010, 302(2): 64-71.
- [4] IPCC. Climate change 2007-the physical science basis: working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [5] IPCC. Climate change 2001-impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [6] ZHANG H, LI W, CAI Z, et al. Landfill CH₄ oxidation and N₂O emissions by aged refuse: effects of wastewater NH₄⁺-N incubation, heavy metals and pH[J]. Ecological Engineering, 2013, 53: 243-249.
- [7] SCHEUTZ C, MOSBÆK H, KJELDSEN P. Attenuation of methane and volatile organic compounds in landfill soil covers[J]. Jour-

- nal of Environmental Quality, 2004,33(1):61-71.
- [8] LOU Z, WANG L, ZHAO Y. Consuming un-captured methane from landfill using aged refuse bio-cover[J]. Bioresource Technology, 2011,102(3):2328-2332.
- [9] 罗钰翔, 王伟, 高兴保. 生活垃圾填埋气体产量的现场测试及 IPCC 推荐模型的校验[J]. 环境科学, 2009,30(11):3427-3431.
- [10] 赵玉杰, 王伟. 垃圾填埋场甲烷气的排放及减排措施[J]. 环境卫生工程, 2004,12(4):217-219.
- [11] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对土壤氧化大气 CH_4 的影响[J]. 生态学杂志, 2003,22(3):54-58.
- [12] BISSETT A, ABELL G C J, BODROSSY L, et al. Methanotrophic communities in Australian woodland soils of varying salinity[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2012,80(3):685-695.
- [13] MOR S, DE VISSCHER A, RAVINDRA K, et al. Induction of enhanced methane oxidation in compost: temperature and moisture response[J]. Waste Management, 2006,26(4):381-388.
- [14] KIGHTLEY D, NEDWELL D B, COOPER M. Capacity for methane oxidation in landfill cover soils measured in laboratory-scale soil microcosms[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995,61(2):592-601.
- [15] 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.
- [16] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对甲烷产生和氧化的影响[J]. 应用生态学报, 2003,14(4): 604-608.
- [17] 张相锋, 肖学智, 何毅, 等. 垃圾填埋场的甲烷释放及其减排[J]. 中国沼气, 2006,24(1):3-5.
- [18] 韩冰, 苏涛, 李信, 等. 甲烷氧化菌及甲烷单加氧酶的研究进展[J]. 生物工程学报, 2008,24(9):1511-1519.
- [19] MOHANTY S R, RAJPUT P, KOLLAH B, et al. Methane oxidation and abundance of methane oxidizers in tropical agricultural soil (vertisol) in response to CuO and ZnO nanoparticles contamination[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014,186(6): 3743-3753.
- [20] 岳波, 林晔, 王琪, 等. 填埋场覆盖材料的甲烷氧化能力及其影响因素研究[J]. 环境工程技术学报, 2011,1(1):57-62.
- [21] 何品晶, 瞿贤, 杨琦, 等. 土壤因素对填埋场终场覆盖层甲烷氧化的影响[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2007,35(6):755.
- [22] 费平安, 王琦. 填埋场覆盖层甲烷氧化机理及影响因素分析[J]. 可再生能源, 2008(1):97-101.
- [23] SCHEUTZ C, KJELDSEN P. Environmental factors influencing attenuation of methane and hydrochlorofluorocarbons in landfill cover soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2004,33(1):72-79.
- [24] BENDER M, CONRAD R. Effect of CH_4 concentrations and soil conditions on the induction of CH_4 oxidation activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995,27(12):1517-1527.
- [25] BÖRJESSON G, SUNDH I, SVENSSON B. Microbial oxidation of CH_4 at different temperatures in landfill cover soils[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2004,48(3):305-312.
- [26] WATZINGER A, REICHENAUER T G, BLUM W E H, et al. The effect of landfill leachate irrigation on soil gas composition: methane oxidation and nitrous oxide formation[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2005,164(1/4):295-313.
- [27] BOECKX P, CLEEMPUT O, VILLARALVO I D A. Methane emission from a landfill and the methane oxidising capacity of its covering soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996,28(10):1397-1405.
- [28] 陈燕飞. pH 对微生物的影响[J]. 太原师范学院学报: 自然科学版, 2009(3):121-124.
- [29] KIZILOVA A K, SUKHACHEVA M V, PIMENOV N V, et al. Methane oxidation activity and diversity of aerobic methanotrophs in pH-neutral and semi-neutral thermal springs of the Kunashir Island, Russian Far East[J]. Extremophiles, 2014,18(2):207-218.
- [30] MBADINGA S M, LI K P, ZHOU L, et al. Analysis of alkane-dependent methanogenic community derived from production water of a high-temperature petroleum reservoir[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012,96(2):531-542.
- [31] ALBANNA M, FERNANDES L. Effects of temperature, moisture content, and fertilizer addition on biological methane oxidation in landfill cover soils[J]. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2009,13(3):187-195.
- [32] SCHEUTZ C, KJELDSEN P, BOGNER J, et al. Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions[J]. Waste Management & Research, 2009,27:409-455.
- [33] 韩丹, 石峰, 柴晓利, 等. 生活垃圾填埋场甲烷自然减排的新途径: 厌氧与好氧的共氧化作用[J]. 环境科学学报, 2011,31(4):791-797.
- [34] 钟庄敏, 龙焰, 尹华, 等. 矿化垃圾中的甲烷氧化-反硝化耦合特性研究[J]. 环境科学学报, 2013,33(3):787-795.

- [35] 刘景龙, 张毅, 张后虎, 等. 矿化垃圾生物覆盖层减少垃圾填埋场 CH₄, N₂O 和 CO₂ 释放的效应研究[J]. 生态与农村环境学报, 2014,30(1):15-20.
- [36] 王智平, 胡春胜, 杨居荣. 无机氮对土壤甲烷氧化作用的影响[J]. 应用生态学报, 2003,14(2):305-309.
- [37] 闵航, 陈中云, 吴伟祥, 等. 碳、氮物质对水稻田土壤甲烷氧化活性影响的研究[J]. 环境科学学报, 2002,22(1):70-75.
- [38] WANG J, XIA F F, BAI Y, et al. Methane oxidation in landfill waste biocover soil: Kinetics and sensitivity to ambient conditions [J]. Waste Management, 2011,31(5):864-870.
- [39] MANDERNACK K W, KINNEY C A, COLEMAN D, et al. The biogeochemical controls of N₂O production and emission in landfill cover soils: the role of methanotrophs in the nitrogen cycle[J]. Environmental Microbiology, 2000,2(3):298-309.
- [40] 贾仲君, 蔡祖聪. 稻田甲烷氧化与铵氧化关系研究进展[J]. 农村生态环境, 2003,19(4):40-44.
- [41] NOVIKOV V V, STEPANOV A L. Coupling of microbial processes of methane and ammonium oxidation in soils[J]. Microbiology, 2002,71(2):234-237.
- [42] WHALEN S C. Influence of N and non-N salts on atmospheric methane oxidation by upland boreal forest and tundra soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000,31(3/4):279-287.
- [43] 周叶锋, 廖晓兰, 黄璜, 等. 甲烷氧化细菌氧化活性影响因素的研究[J]. 微生物学杂志, 2008,28(3):77-80.
- [44] RAGHOEBARSING A A, POL A, VAN DE PAS-SCHOONEN K T, et al. A microbial consortium couples anaerobic methane oxidation to denitrification[J]. Nature, 2006,440(7086):918-921.
- [45] WHALEN S C, REEBURGH W S. Consumption of atmospheric methane by tundra soils[J]. Nature, 1990,346:160-162.
- [46] 张天娇, 汤佳, 庄莉, 等. 干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响[J]. 环境科学, 2014,35(3):901-907.
- [47] 朱勇, 牟子申, 陆文静, 等. 呼吸型填埋场覆盖层技术研究 II: 呼吸型覆盖层的甲烷氧化性能研究[J]. 环境科学学报, 2011,31(12):2785-2791.
- [48] 刘玉强, 黄启飞, 王琪, 等. 生活垃圾填埋场不同填埋方式填埋气特性研究[J]. 环境污染与防治, 2005,27(5):333-337.
- [49] ISHIGAKI T, YAMADA M, NAGAMORI M, et al. Estimation of methane emission from whole waste landfill site using correlation between flux and ground temperature[J]. Environmental Geology, 2005,48(7):845-853.
- [50] 李伟, 白娥, 李善龙, 等. 施氮和降水格局改变对土壤 CH₄ 和 CO₂ 通量的影响[J]. 生态学杂志, 2013,32(8):1947-1958.
- [51] 梁战备, 史奕, 岳进. 甲烷氧化菌研究进展[J]. 生态学杂志, 2004,23(5):198-205.
- [52] 李俊, 同小娟, 于强. 不饱和土壤 CH₄ 的吸收与氧化[J]. 生态学报, 2012,25(1):141-147.
- [53] DE VISSCHER A, THOMAS D, BOECKX P, et al. Methane oxidation in simulated landfill cover soil environments[J]. Environmental Science & Technology, 1999,33(11):1854-1859.
- [54] MOHANTY S R, BHARATI K, DEEPA N, et al. Influence of heavy metals on methane oxidation in tropical rice soils[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2000,47(3):277-284.
- [55] 郑勇, 郑袁明, 贺纪正. 水稻土甲烷氧化菌对镉胁迫的响应[J]. 生态环境学报, 2012,21(4):737-743.
- [56] HEMME C L, DENG Y, GENTRY T J, et al. Metagenomic insights into evolution of a heavy metal-contaminated groundwater microbial community[J]. The ISME Journal, 2010,4(5):660-672.
- [57] TSIEH H C, BRUSSEAU G A, HANSON R S, et al. Biodegradation of trichloroethylene by Methylosinus trichosporium OB3b[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1989,55(12):3155-3161.
- [58] 何若, 姜晨竞, 王静, 等. 甲烷胁迫下不同填埋场覆盖土的氧化活性及其菌群结构[J]. 环境科学, 2009,29(12):3574-3579.
- [59] 何晶晶, 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.
- [60] 彭禹, 张卫风, 朱琳, 等. 氨氧化菌对填埋场 CH₄ 协同氧化及铵抑制作用的研究[J]. 环境科学研究, 2014,27(2):172-177.
- [61] 赵天涛, 张云茹, 张丽杰, 等. 矿化垃圾中兼性营养菌原位强化甲烷氧化[J]. 化工学报, 2012,63(1):266-271.
- [62] 赵由才, 柴晓利, 牛冬杰. 矿化垃圾基本特性研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006,34(10):1360-1364.
- [63] ZHANG Y, ZHANG H, JIA B, et al. Landfill CH₄ oxidation by mineralized refuse: Effects of NH₄⁺-N incubation, water content and temperature[J]. Science of the Total Environment, 2012,426:406-413.
- [64] 冯凯, 黄天寅, 张后虎, 等. 驯化矿化垃圾 CH₄ 氧化速率和 N₂O 释放研究[J]. 环境科学学报, 2013,33(9):2539-2545.
- [65] 阮辰旻. 污水处理厂污泥“三化”处理处置的关键问题[J]. 净水技术, 2011,30(5):76-79.

- [66] 陈爱朝, 徐禹华, 郑学娟, 等. 深度脱水污泥作为填埋场中间层覆盖土的研究[J]. 中国给水排水, 2011,27(19):85-87.
- [67] KIM E H, CHO J K, YIM S. Digested sewage sludge solidification by converter slag for landfill cover[J]. Chemosphere, 2005,59(3):387-395.
- [68] 刘永德, 何品晶, 邵立明, 等. 太湖地区农村生活垃圾管理模式与处理技术方式探讨[J]. 农业环境科学学报, 2005,24(6):1221-1225.
- [69] ABICHO T, MAHIEU K, YUAN L, et al. Effects of compost biocovers on gas flow and methane oxidation in a landfill cover[J]. Waste Management, 2009,29(5):1595-1601.
- [70] 张相锋, 杨文静, 董世魁, 等. 生物覆盖层基质对垃圾填埋场甲烷氧化的影响[J]. 生态环境学报, 2010,19(1):72-76.
- [71] 杨文静, 张相锋, 董世魁, 等. 一种新型垃圾填埋场生物覆盖层基质的甲烷氧化动力学研究[J]. 中国沼气, 2010,28(3):11-14.
- [72] 王春铭, 卢建文, 雷恒毅, 等. 城市污泥堆肥过程中微生物研究[J]. 生态环境, 2007,16(2):462-466.
- [73] 熊国华, 周勇. 我国城市生活垃圾处理的前瞻[J]. 华东交通大学学报, 2001,18(3):101-103.

Research on Main Factors for CH₄ Oxidation in Landfill Cover Soil

Zhang Weifeng¹, Peng Yu^{1,2}, Zhang Houhu², Wu Shidong¹

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

2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, the Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: CH₄, as a serious greenhouse gas, is one of the reasons for climate change and global warming. Municipal solid waste (MSW) landfill is a significant source of anthropogenic CH₄, but the use of landfill cover soil (LCS) is seen as a key technology for the mitigation of CH₄ emissions from landfill. In this paper, research progress about the main factors affecting CH₄ oxidation in LCS were reviewed, and the major factors influencing CH₄ oxidation potential in LCS included soil water content, soil pH, soil temperature, soil carbon and nitrogen content, soil particle, weather condition, CH₄ and O₂ concentrations, metal content and landfill final cover material. Finally, the future research directions of MOP in LCS were discussed, and through optimizing cover material and controlling environment condition, MOP can be effectively improved and mitigation of CH₄ emissions from MSW landfills can be decreased.

Key words: landfill; cover soil; CH₄ oxidation; greenhouse gas