

复合陶粒基质甲烷氧化能力评价*

盛美玲¹ 张相锋^{1#} 董世魁¹ 王 峰¹ 陆文静² 王洪涛²

(1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875;

2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要 以陶粒为载体, 利用甲烷、氧气和养分制备出新型甲烷氧化基质——复合陶粒基质。以水分、孔隙度、碳氮比、 NO_3^- 浓度为影响因素, 以复合陶粒基质的最大甲烷氧化速率($V_{\max}$)为目标函数, 进行 $L_{16}(4^5)$ 正交试验。以正交试验单因子方差分析结果(F 值)为权重分配依据, 应用层次分析法建立复合陶粒基质的甲烷氧化能力评分机制。评价结果表明, 不同因素水平的复合陶粒基质评价分值与试验结果($V_{\max}$)呈线性相关关系。在 16 组试验中最好的基质条件为: 碳氮比 1: 1(摩尔比)、水分(以与最大持水力比率计) 50%、孔隙度 30%、 NO_3^- 0.61 g/L。以 100 分为基准, 该条件下所得基质的评价分值为 99.043, 相应的 $V_{\max}$ 为 2.845 6 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

关键词 甲烷氧化 复合陶粒 正交试验 层次分析法 持水力 碳氮比 孔隙度 NO_3^- 浓度

Evaluation the methane oxidation capacity of composite ceramsite SHENG Meiling¹, ZHANG Xiangfeng¹, DONG Shikui¹, WANG Feng¹, LU Wenjing², WANG Hongtao². (1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: A novel composite matrix of methane oxidation was produced with ceramsite as carriers under favorable condition of methane, oxygen and nutrients. The $L_{16}(4^5)$ orthogonal experiments were designed considering moisture, porosity, carbon nitrogen ratio and NO_3^- concentration as the impact factors and maximal methane oxidation rate ($V_{\max}$) of composite ceramsite as the response function. Based on Variance Analysis (F ratio) of orthogonal experiments, Analytic Hierarchy Process (AHP) method was used to assign weights for four different impact factors and establish the scoring mechanism. The statistical analysis results showed the scores was linear correlated with $V_{\max}$ ($R^2 = 0.885$) in different factors and levels of orthogonal experiments. The optimum conditions for ceramsite composition were obtained as follow: carbon nitrogen ratio of 1: 1, ratio of water content to maximum water retention capacity was 50%; porosity of 30% and KNO_3 concentration of 0.61 g/L. Evaluation results showed the composite ceramsite prepared under these optimum conditions had the highest score of 99.043 (100 scores as the perfect matrix), its methane oxidation capacity was 2.845 6 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$.

Keywords: methane oxidation; composite ceramsite; orthogonal experiment; analytic hierarchy process; holding capacity; carbon nitrogen ratio; porosity; NO_3^- concentration

随着全球变暖对人类的影响日益加深, 温室气体减排已成为全球关注的焦点。甲烷是大气中浓度仅次于二氧化碳的温室气体, 其温室效应是等量二氧化碳的 20~30 倍, 水稻田、生活垃圾填埋场是大气甲烷的主要人为排放源^[1,2]。土壤中的甲烷氧化细菌能将甲烷氧化为二氧化碳和水, 从而降低温室气体排放强度。由于天然土壤基质的甲烷氧化能力有限, 近年来人们开始致力于研究高效甲烷氧化基质(如玻璃碎片、堆肥物、陶粒)的筛选与制备、环境因素对甲烷氧化效率的影响及甲烷氧化菌的氧化机制等^[3,6]。但迄今为止, 甲烷氧化基质材料性能的定量

评价研究仍少见报道。笔者以复合陶粒基质的制备及其最大甲烷氧化速率($V_{\max}$, $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$)的正交试验研究为基础, 结合数学建模、权重赋值和判定分析, 应用层次分析法建立复合陶粒基质甲烷氧化能力的评分机制, 旨在为甲烷氧化基质性能评价提供参考, 以解决甲烷氧化基质有效遴选的实际问题。

1 材料和方法

1.1 复合陶粒基质制备

试验所用陶粒为粘土陶粒, 平均直径为 7 mm, 松密度为 356 kg/m^3 , 孔隙度为 46.90%, 最大持水

第一作者: 盛美玲, 女, 1988 年生, 本科, 研究方向为固体废物处理与固体废物资源化。# 通讯作者。

* 国家高技术研究发展计划(“863 计划”)项目(No. 2007AA06Z350); 国家自然科学基金资助项目(No. 50808017)。

力为 0.305 2 g (以每克基质计)。甲烷纯度为 99.9%。将 40 g 陶粒和 100 mL 培养基放入 250 mL 锥形瓶内,通入甲烷和空气的混合气体(甲烷体积分数为 5%、氧气体积分数为 20%),在 30 ℃、150 r/min 下的 SPX-150B 型生化培养箱中培养 3 d,形成富含甲烷氧化细菌的复合陶粒。培养基组分: 1 g/L KNO₃, 0.717 g/L Na₂HPO₄, 0.272 g/L KH₂PO₄, 0.25 g/L NH₄Cl, 0.03 g/L CuSO₄, 0.2 g/L FeSO₄^[7]。沙子用 0.9 mm 孔径标准筛筛分,取筛下物清洗、烘干后作为调节基质孔隙度和水分的辅助材料。

1.2 试验设计

考虑到不同营养条件对基质甲烷氧化能力的影响(KNO₃> NH₄Cl> KH₂PO₄> CaCl₂·6H₂O> Na₂HPO₄)和填埋场覆盖层的多孔介质环境^[8-10],设定水分(以与最大持水力比率计)、孔隙度、碳氮比、NO₃⁻浓度为评价因素,基质 V_{max} 为目标函数,设计 L₁₆(4⁵) 正交试验。每个因素设 4 个水平,碳氮比分别为 1:1(摩尔比,下同)、5:1、15:1、30:1; NO₃⁻质量浓度分别为 0.15、0.31、0.61、1.23 g/L; 孔隙度分别为 10%、20%、30%、40%; 水分分别为 100%、75%、50%、25%。正交试验设计见表 1。

表 1 复合陶粒基质甲烷氧化正交试验设计
Table 1 The orthogonal experiments of ceramsite methane oxidation

试验编号	碳氮比	水分/%	孔隙度/%	NO ₃ ⁻ /(g·L ⁻¹)
1	1:1	100	10	0.15
2	1:1	75	20	0.31
3	1:1	50	30	0.61
4	1:1	25	40	1.23
5	5:1	100	20	0.61
6	5:1	75	10	1.23
7	5:1	50	40	0.15
8	5:1	25	30	0.31
9	15:1	100	30	1.23
10	15:1	75	40	0.61
11	15:1	50	10	0.31
12	15:1	25	20	0.15
13	30:1	100	40	0.31
14	30:1	75	30	0.15
15	30:1	50	20	1.23
16	30:1	25	10	0.61

1.3 试验方法与数据处理

所有复合陶粒基质甲烷氧化试验均在 30 ℃恒温条件下,于自制的微反应器内进行。微反应器由

有机玻璃制成,有效容积为 1 L,顶部设有 A、B 2 个竖管分别作为取样口和换气口(见图 1)。

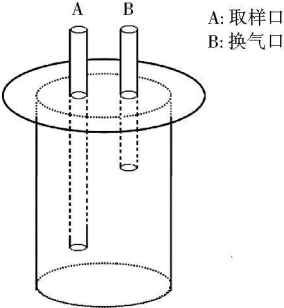


图 1 微反应器装置示意图
Fig. 1 The schematic diagram of micro-reactor facility

复合陶粒中添加适量的沙子可以调节孔隙度,添加适量溶液(KNO₃和葡萄糖)可调节水分、碳氮比和 NO₃⁻浓度,以模拟不同基质状态。试验开始前,首先在微反应器中加入 71.2 g 的复合陶粒,然后根据正交试验设计对各因素水平的要求,依次加入沙子以及 KNO₃和葡萄糖溶液,充入甲烷(体积分数约 5%)和空气混合气体,在室温下培养 6 h。随后,每隔 2 h 用气密采样针从微反应器中缓慢抽取 2.5 mL 气体,用 GC-9A 气相色谱仪(日本岛津)迅速测定气体中的甲烷浓度。得到 16 组试验不同时间甲烷的浓度。

与多数微生物降解行为类似,甲烷生物氧化过程可以用一级反应动力学方程描述^[11,12]:

$$V = \frac{V_{\max} \times S}{S + K_s} \tag{1}$$

式中: V 为甲烷氧化速率,μmol/(g·h); S 为甲烷摩尔浓度,μmol/L; K_s 为半反应速率常数,μmol/L。

将测试数据按照式(1)基于最小二乘法原理用 Origin7.0 软件进行拟合得 V_{max}和 K_s^[13]。以 V_{max}为正交试验的目标函数(见表 2),用 SPSS 统计软件对此正交试验进行单因子方差分析^[14]。

1.4 评价体系构建

在对正交试验进行单因子方差分析的基础上,运用多指标综合评价方法中的层次分析法构建复合陶粒评价体系^[15]。首先,对正交试验的 16 个试验结果(V_{max})进行标准化处理,将其转换为各因素不同水平所对应的 k_{ij}(i=1、2、3、4,代表不同水平;j=1、2、

表 2 正交试验结果
Table 2 The results of orthogonal experiments

试验编号	1	2	3	4	5	6	7	8
V _{max} /(μmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.960 5	0.893 1	2.845 6	0.456 1	0.964 3	0.265 2	2.858 1	0.751 4
试验编号	9	10	11	12	13	14	15	16
V _{max} /(μmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.249 4	0.186 5	1.667 8	0.290 5	0.158 4	0.272 4	0.108 8	0.094 0

3、4, 代表不同因素; 单位 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$)。据此按因素分类将不同水平的 k_{ij} 按式(2) 进行数据标准化:

$$k_{ij}' = k_{ij} / \max\{k_{ij}\} \tag{2}$$

式中: k_{ij}' 为各因素不同水平的标准化数据; $\max\{k_{ij}\}$ 为 j 因素下 k_{ij} 的最大值, $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

根据该结果和正交试验中 16 组试验对应的条件, 得到水平标准化矩阵 $K(k_{ij}')$ 。将复合陶粒基质的潜在 $V_{\max}$ 作为模型分析的目标 Z 。将正交试验方差分析 F 检验所得各因素的 F 值作为各因素对目标 Z 的影响 F_j , 采用将各因素影响 F_j 两两成对比较(相除)的方法构建因素判断矩阵 $A(a_{ij})$, 通过求解矩阵 $A(a_{ij})$ 的最大模特征值 λ 确定其相应的特征向量 $W(w_j)$ 。 $W(w_j)$ 即为不同因素的归一化权重特征向量。将 $K(k_{ij}')$ 与 $W(w_j)$ 进行矩阵运算即可获得各因素不同水平下综合得分向量 $S(s_{ij})$, 如式(3)所示:

$$S(s_{ij}) = K(k_{ij}') \times W(w_j) \times 100 \tag{3}$$

1.5 分析方法

甲烷采用气相色谱法测定, 具体测试方法参照文献[16]。色谱谱图数据处理采用浙江大学 N2000 色谱工作站软件。陶粒最大持水力用称重法测定^[17]: 称取 50 g 的干陶粒浸泡于水中, 用石块压住陶粒使之高出水面 1~ 2 cm, 饱和一昼夜后取出, 用纱布包裹, 沥干多余的水分, 用天平称量饱和含水的陶粒质量(M_1 , g); 然后将饱和含水的陶粒置于 105℃烘箱内 20 h, 冷却后称量干陶粒的质量(M_2 , g), 最大持水力(WHC) 计算采用式(4):

$$WHC = (M_1 - M_2) / M_2 \tag{4}$$

孔隙度参照土壤孔隙度测定方法^[18], 其计算公式为:

$$P = \left[1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right] \times 100\% \tag{5}$$

式中: P 为孔隙度, %; ρ_1 为陶粒比重, g/mL ; ρ_2 为陶粒容重, g/mL 。

2 结果与讨论

2.1 基质甲烷氧化正交试验的方差分析

从正交试验的方差分析结果可以看出, 各因素对复合陶粒基质的 $V_{\max}$ 的影响各不相同(见表 3)。各因素方差分析中水分因素的偏差平方和最大, 其次是碳氮比, NO_3^- 浓度和孔隙度的偏差平方和较小, 其中孔隙度的偏差平方和和自由度的偏差平方和比较接近。这说明在本研究的因素水平范围内,

水分的变化对正交试验结果的影响最大, 其次是碳氮比, NO_3^- 浓度和孔隙度的影响较小, 孔隙度的影响甚至可以忽略。可见, 本研究采用的复合陶粒基质孔隙发达, 透气性好, 有利于氧气的顺利输送、保证氧气和甲烷的充分混合^[19, 20]。

表 3 正交试验的方差分析结果
 Table 3 The result of valiance analysis of orthogonal experiment

项目	自由度	偏差平方和	F 值	Sig.
碳氮比	3	3. 433	5. 809	0. 091
水分	3	6. 038	10. 217	0. 044
孔隙度	3	0. 494	0. 836	0. 557
NO_3^- 浓度	3	1. 687	2. 854	0. 206
自由度	3	0. 591	1. 000	

方差分析 F 检验中的 Sig. 可以表征各因素对研究目标的统计学显著性水平。从表 3 所示的各因素 Sig. 可以发现, 只有水分因素的 Sig. 小于 0. 05, 这说明水分因素在 95% 的置信度条件下对基质甲烷氧化能力在统计学上有显著性影响, 其他因素在此条件下对基质甲烷氧化能力的影响不显著; 碳氮比的 Sig. 小于 0. 1, 说明在 90% 置信度条件下, 水分和碳氮比对基质甲烷氧化能力的影响在统计学上比较显著, NO_3^- 浓度和孔隙度对基质甲烷氧化能力的影响不显著。就统计学意义而言, 各因素对甲烷氧化速率影响依次为: 水分> 碳氮比> NO_3^- 浓度> 孔隙度。

2.2 基质甲烷氧化能力评价

复合陶粒基质的甲烷氧化能力评价按照 1. 4 所述方法进行。首先, 对正交试验确定的各因素水平下基质的 $V_{\max}$ 进行标准化处理, 形成水平标准化矩阵 $K(k_{ij}')$:

$$K = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.312 & 0.725 & 1.000 \\ 1.000 & 0.216 & 0.548 & 0.792 \\ 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.934 \\ 1.000 & 0.213 & 0.888 & 0.246 \\ 0.949 & 0.312 & 0.548 & 0.934 \\ 0.949 & 0.216 & 0.725 & 0.246 \\ 0.949 & 1.000 & 0.888 & 1.000 \\ 0.949 & 0.213 & 1.000 & 0.792 \\ 0.464 & 0.312 & 1.000 & 0.246 \\ 0.464 & 0.216 & 0.888 & 0.934 \\ 0.464 & 1.000 & 0.725 & 0.792 \\ 0.464 & 0.213 & 0.548 & 1.000 \\ 0.123 & 0.312 & 0.888 & 0.792 \\ 0.123 & 0.216 & 1.000 & 1.000 \\ 0.123 & 1.000 & 0.548 & 0.246 \\ 0.123 & 0.213 & 0.725 & 0.934 \end{bmatrix}$$

然后,利用表 3 所列的各因素的 F 值,按层次分析法求出包含 4 个因素的因素判断矩阵 $A(a_{ij})$:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{29}{51} & 7 & \frac{57}{28} \\ \frac{51}{29} & 1 & \frac{49}{4} & \frac{43}{12} \\ \frac{1}{7} & \frac{4}{49} & 1 & \frac{7}{24} \\ \frac{28}{57} & \frac{12}{43} & \frac{24}{7} & 1 \end{bmatrix}$$

其中: $51/29 \approx 10.217/5.809$, $1/7 \approx 0.836/5.809$, $28/57 \approx 2.854/5.809$, $4/49 \approx 0.836/10.217$, $12/43 \approx 2.854/10.217$, $24/7 \approx 2.854/0.836$ 。

表 4 16 组试验的评价分值

Table 4 The evaluation result of 16 different experiments

试验编号	1	2	3	4	5	6	7	8
评价分值	63.133	54.394	99.043	47.740	59.938	45.716	98.033	54.625
试验编号	9	10	11	12	13	14	15	16
评价分值	37.584	42.109	80.073	41.492	35.006	33.506	61.389	31.245

各正交试验评价分值与其相应的试验结果 ($V_{\max}$) 进行的线性回归统计分析表明,评价分值与试验结果 ($V_{\max}$) 存在明显的线性关系(见图 2)。但是,该线性回归模型的 R^2 为 0.885,其线性相关的显著性稍不足。考虑到试验 15 对应的因素水平为碳氮比 30:1,水分 50%,孔隙度 20%, NO_3^- 质量浓度 1.23 g/L,其中权重最大的 2 个因素水分和碳氮比在试验 15 中分别为极端情况,其相应的标准化分值分别为最大值(1.000)和最小值(0.123)。如果忽略试验 15,评价分值与 $V_{\max}$ 线性回归模型的 R^2 为 0.962,其线性相关的显著性明显提高。这说明在权重较大的因素中,不利因素和有利因素同时出现极端情况时(如试验 15),评价分值可能偏离基质真实甲烷氧化能力。总体而言,本研究的甲烷氧化能力评价方法具有一定的统计学可靠性,可以用于该方法所涵盖的因素水平内陶粒基质的甲烷氧化能力定量化分析。

在陶粒基质甲烷氧化能力未知的情况下,采用

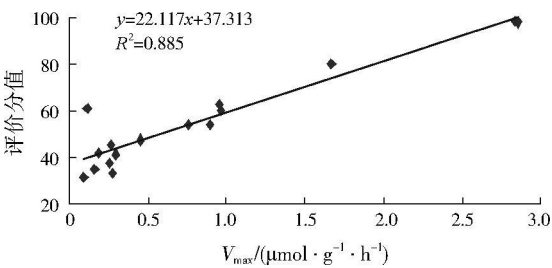


图 2 试验结果 ($V_{\max}$) 与评价分值的线性拟合
Fig. 2 The linear fitting between experimental results ($V_{\max}$) and evaluation scores

求解得出判断矩阵 $A(a_{ij})$ 的最大模特征值 λ 为 3.995 2, 以及归一化权重特征向量 $W = (0.294\ 1, 0.519\ 2, 0.041\ 7, 0.145\ 0)'$ 。从归一化权重特征向量的数值可以看出,各因素的权重顺序为:水分>碳氮比> NO_3^- 浓度>孔隙度,与正交试验的方差分析结果一致。在此基础上,按式(3)计算出 16 组试验的评价分值(见表 4)。由表 2 和表 4 可得,在 16 组试验中最好的基质条件为试验 3,即碳氮比为 1:1,水分为 50%,孔隙度为 30%, NO_3^- 为 0.61 g/L;以 100 分为基准,该条件下所得基质的评价分值为 99.043,相应的 $V_{\max}$ 为 2.845 6 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

该方法能够快速评价其甲烷氧化能力,从而大幅降低试验工作量,提高对陶粒基质甲烷氧化能力的评价效率。具体方法如下:测定未知陶粒基质的水分(折算为与最大持水力的比率)、碳氮比、孔隙度、 NO_3^- 浓度,采用线性插值法获得各因素的标准化赋值向量,按式(3)计算得到该陶粒基质甲烷氧化能力的综合评分。通过分析基质材料的各因素得分情况,还可以提出强化基质甲烷氧化性能的科学建议。按照该方法也能够进行其他甲烷氧化基质(如堆肥物、土壤)的质量评价,但是需要重新建立相应的水平标准化矩阵和因素判断矩阵。

3 结 语

复合陶粒基质对甲烷氧化速率影响依次为:水分>碳氮比> NO_3^- 浓度>孔隙度。其中,水分和碳氮比对复合陶粒基质甲烷氧化能力的影响更为显著。综合考虑了复合陶粒基质的物理性质(水分、孔隙度)和化学性质(碳氮比、氮源),基于不同因素水平的基质 $V_{\max}$ 正交试验分析结果,应用层次分析法构建的复合陶粒基质甲烷氧化能力评价方法实现了基质材料的定量化分析,有助于客观、快速地评价复合陶粒基质甲烷氧化能力,进而为改进基质的甲烷氧化性能提供建议。

参考文献:

[1] 吴兑. 温室气体与温室效应[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 38 84.

(下转第 48 页)

外,其他 3 点底泥和间隙水中 TN 的相关系数较高,表明其相关性较好。A、B 点底泥中 TP 与间隙水中 TDP 的相关系数低,这可能是由于这 2 点底泥中 TP 浓度低且上覆水扰动作用较大。而 C、D 点的 r^2 都达到了 0.9 以上,表明水库底泥中赋存氮、磷物质的多少,在一定程度上能够影响间隙水中氮、磷的浓度。

3 结 论

(1) 产芝水库底泥含水率和有机质都是表层较高。反映出表层底泥有机质含量较高且疏松,具有不稳定性,容易受风浪等外力扰动而发生再悬浮,这对上覆水水质有一定的影响。

(2) 底泥氮、磷浓度自深度为 10 cm 处向表层大多表现出增加的趋势,说明近年来水库周围人类活动加强,内源氮、磷负荷增加。间隙水中 TN 的浓度也是随深度增加而减小,但 NH_4^+-N 浓度却随深度增加而增大,一方面由于水库水面开阔,间隙水中的分子态 NH_3 在底部水流运动及再悬浮作用下,更易进入上覆水;另一方面是因为下层沉积物缺氧程度较高,适宜于厌氧微生物活动、反硝化和氨化作用,比表层沉积物更有利于 NH_4^+-N 的保存。

(3) 通过相关性比较看出,大部分采样点的底泥 TN、TP 和其间隙水中 TN、TDP 的相关性较显著,有的点 r^2 达 0.9 以上,因此水库底泥中赋存氮、磷物质的多少,在一定程度上能够影响间隙水中氮、磷的浓度。

参考文献:

[1] 陈椽,张明时,杨加文,等.红枫湖水库底泥的氮磷蓄积量及分布特征[J].安徽农业科学,2008,36(35):15650-15652.
[2] LEE H K, EUI SO C, KYUNG IK G, et al. Phosphorus release rates from sediments and pollutant characteristics in Han River, Seoul, Korea[J]. Science of the Total Environment, 2004, 321(3): 115-125.
[3] 金辉,温琰茂,袁野.珠江三角洲基塘系统水体中氮的形态分布及其水化学指标关系研究[J].生态经济,2008(5):115-117.
[4] 赵星.淮南龙湖底泥中磷的垂直分布[J].淮南师范学院学报,2006,8(3):50-52.
[5] 李宝,丁士明,范成新,等.滇池福保湾间隙水氮磷分布及其与底泥微生物和磷酸酶相互关系[J].湖泊科学,2008,20(4):420-427.
[6] 桑稳蛟,程建军,姜应和.武汉墨水湖底泥中总氮、总磷污染特征分析[J].中国给排水,2008,24(5):45-47.
[7] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002:243-255.
[8] 北京林业大学.土壤理化分析实验指导书[M].北京:北京林业大学出版社,2002:38-49.
[9] 朱广伟,高光,秦伯强,等.浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征[J].水科学进展,2003,14(6):714-719.

[10] 徐骏.杭州西湖底泥磷分级分布[J].湖泊科学,2001,13(3):247-254.
[11] 范成新,杨龙元,张路.太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J].湖泊科学,2000,12(4):359-366.
[12] 李剑超,王培英,谭远友,等.污染底泥及其间隙水分层特性的模拟实验研究[J].环境污染与防治,2004,26(5):323-325.
[13] 柴蓓蓓.水体沉积物中污染物释放及其多相界面过程研究[D].西安:西安建筑科技大学,2008.

编辑:贺锋萍 (修改稿收到日期:2010-05-26)

(上接第 43 页)

[2] JENNIFER C S, JEFF C, TAREK A, et al. Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation[J]. Waste Management, 2007, 27(9): 1248-1258.
[3] 朱磊,张相锋,董世魁,等.垃圾填埋场新型覆盖层材料厚度对甲烷氧化行为的影响[J].生态环境学报,2009,18(6):2122-2126.
[4] SCHEUTZ C, KJELDSEN P, BOGNER J E, et al. Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions[J]. Waste Management & Research, 2009, 27(5): 409-455.
[5] POWELSON D K, CHANTON J, ABICHOU T, et al. Methane oxidation in waterspreading and compost biofilters[J]. Waste Management & Research, 2006, 24(6): 528-536.
[6] GEBERT J, GROENGROEFT A, MIEHLICH G. Kinetics of microbial landfill methane oxidation in biofilters[J]. Waste Management, 2003, 23(7): 609-619.
[7] 罗明芳,吴昊,王磊,等.含有甲烷氧化菌的混合菌群特征研究[J].微生物学报,2007,47(1):103-109.
[8] 余海霞.利用微生物技术治理煤矿瓦斯的研究[D].杭州:浙江大学,2007:42-45.
[9] 邱秩兵.试验设计与数据处理[M].北京:中国科学技术大学出版社,2008:101-165.
[11] 王鹏,张忠义,吴惠勤.超临界 CO_2 萃取连翘挥发油的正交试验和 GC-MS 分析[J].分析测试学报,2002,21(4):34-36.
[12] KIGHTLEY D, NEDWELL D B, COOPER M. Capacity for methane oxidation in landfill cover soils measured in laboratory-scale soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61(2): 592-601.
[13] ALEX D V, OSWALD V C. Simulation model for gas diffusion and methane oxidation in landfill cover soil[J]. Waste Management, 2003, 23(7): 581-591.
[14] 叶卫平,方安平,于本方.Origin 7.0 科技绘图及数据分析[M].北京:机械工业出版社,2004:144-153.
[15] 张文彤.SPSS11 统计分析教程 高级篇[M].北京:希望电子出版社,2002.
[16] 刘来福,曾文艺.数学模型与数学建模[M].北京:北京大学出版社,1997:60-71.
[17] 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.
[18] 南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978:496-499.
[19] 张辉.土壤环境学实验教程[M].上海:上海交通大学出版社,2009:49-52.
[20] KETTUNEN R H, EIDOLA J K M, RINTALA J A. Landfill methane oxidation in engineered soil columns at low temperature[J]. Water Air and Soil Pollution, 2006, 177(1/2/3/4): 313-334.

编辑:陈泽军 (修改稿收到日期:2010-08-25)