

DOI: 10.11779/CJGE20230025

好氧修复下填埋场稳定化综合评价方法及其应用

郑奇腾^{1,2}, 吴少杰¹, 冯世进^{1,2}, 陈宏信^{1,2}, 赵勇¹

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 好氧修复技术具有加速填埋堆体稳定化的优势, 正确评估其稳定化进程对好氧修复系统的设计和运营具有重要的意义, 但是现有指标数量众多且差异化大。考虑稳定化指标的敏感性和工程监测的难易程度, 从稳定化机理出发, 分别从气相、液相、固相和沉降 4 个层面筛选氧气利用率、归一化有机溶质指标、脱氮效率、生物降解度和相对沉降速率为评价指标, 并将其统一划分为具有不同稳定化特征的 3 个阶段(好氧转化、半稳定化和后稳定化), 提出指标权重和阶段划分标准。然后, 构建了不同阶段中不同指标的隶属度函数, 结合模糊综合评价理论实现对填埋场稳定化进程的综合性评价, 并将其应用于某好氧修复工程案例。

关键词: 好氧修复; 填埋场; 稳定化阶段; 评价指标; 综合评价

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)04-0890-08

作者简介: 郑奇腾(1991—), 男, 博士, 助理教授, 主要从事填埋场、污染土壤等环境岩土工程的教学与科研工作。

E-mail: 08qitengzheng@tongji.edu.cn。

A comprehensive evaluation method for landfill stabilization under aeration and its application

ZHENG Qiteng^{1,2}, WU Shaojie¹, FENG Shijin^{1,2}, CHEN Hongxin^{1,2}, ZHAO Yong¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key

Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

Abstract: The in-situ aeration technology has advantages in accelerating landfill stabilization. A clear understanding of the evaluation of landfill stabilization under aeration is significant to the design and operation of an aeration system. However, the existing indices are numerous and varied. Considering the sensitivity to reflect the stabilization process and the accessibility to be monitored, five indices, oxygen utilization rate, normalized BOD/COD, nitrogen removal efficiency, biodegradation degree, and relative settlement rate, are selected to indicate the landfill stabilization from the perspective of gas, liquid and solid phases, respectively. Given the results of numerical simulations, the stabilization process of landfill under aeration can be divided into three phases: aerobic transformation, semi-stabilization and post-stabilization. After obtaining the corresponding weights of five indices, the membership functions of five indices in three stabilization phases are developed. Using the fuzzy theory, the evaluation method for landfill stabilization is established and applied to an in-situ landfill aeration case.

Key words: aerobic remediation; landfill; stabilization; index; comprehensive evaluation

0 引言

传统填埋场稳定化进程缓慢, 导致大量土地资源被占用且无法二次利用, 因此亟需开展各类填埋堆场的治理与修复。其中, 好氧修复技术具有加速稳定化、降低碳排放、提高渗滤液治理且成本适中等优势, 在我国填埋场治理方面具有重要的应用价值^[1]。正确评价填埋场的稳定化程度是科学设计和运营好氧修复工程的基础。

近年来, 国内外学者对于填埋场稳定化评价的研究主要集中在 3 个方面: 评价指标的选取、稳定化程度的划分和评价模型的构建。首先, 关于评价指标的

研究仍主要围绕传统厌氧填埋场展开, 涉及好氧条件下的垃圾稳定化评价的研究较少^[2-3, 6], 且不同学者的评价指标选取仍未统一, 具有指标数量众多、差异化大等特点。在已有的关于好氧填埋场内垃圾稳定化指标中, 温度、COD 浓度、氨氮浓度等指标较常见。这是由于好氧条件有利于垃圾降解、温度升高以及渗滤液提质, 因此这些指标成为众多学者的选择。其次, 填埋场稳定化程度的划分也没有统一标准。Tchobanoglous

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41931289); 国家杰出青年基金项目(41725012); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41572265)
收稿日期: 2023-01-08

等^[4]和 Kim 等^[5]根据垃圾厌氧降解的产物特点, 最早将厌氧填埋场的稳定化程度划分为 5 个阶段。唐平^[2]参照传统填埋场稳定化过程的特征, 从渗滤液特征、垃圾降解特性、填埋场地沉降 3 个方面将准好氧填埋场的稳定化规律划分为 4 个阶段。最后, 现有的填埋场稳定化评价方法主要是基于指数分析法^[7]、模糊综合评价法^[6]和神经网络法等^[8]。Jiang 等^[7]提出了传统填埋场的稳定化进程评价公式。该方法具有可量化的优点, 但公式依赖于传统填埋场的数据分析, 且并未考虑对好氧修复十分重要的部分参数, 如沉降指标。李红^[6]利用模糊理论建立了一套准好氧填埋场综合评价体系, 包括指标权重确定、阶段划分标准和隶属函数确定等。由于填埋垃圾气、液、固三相涉及的评价指标众多, 不同指标对稳定化进程的敏感程度不同, 故难以将统一选取不同指标的分界值。因此, 采用模糊数学理论进行填埋场稳定化程度评估更为科学和可靠^[6]。

本文基于前期开展的填埋场好氧修复多场耦合仿真^[9], 选取了氧气利用率、归一化有机溶质指标(BOD/COD)、脱氮效率、生物降解度和相对沉降速率为好氧填埋场的核心稳定化评价指标。然后, 根据指标随时间的变化特征, 将好氧修复稳定化进程划分为好氧转化、半稳定化和后稳定化 3 个阶段, 并提出划分标准。最后, 采用模糊数学理论建立填埋场好氧修复稳定化评价方法, 形成评价体系并应用于某好氧修复工程案例。

1 好氧修复稳定化评价指标体系

1.1 稳定化评价指标的选取

研究团队已开展了好氧修复多场耦合仿真^[9]。模拟单元采用填埋场好氧修复工程典型的布置型式(图 1)。相邻注气井或抽气井的水平间距为 20 m, 填埋场高度为 15 m, 故模拟单元尺寸为 10 m×10 m×15 m。边界条件的设定如图 1 所示, 具体描述参考相关文献。

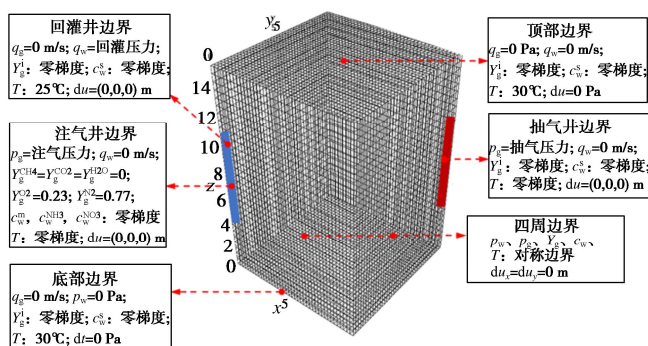


图 1 模拟单元的网格划分与边界条件设定

Fig. 1 Mesh and boundary setting of simulation

不同研究采用的稳定化评价指标主要可以分为四类: 气相指标、液相指标、固相指标和沉降指标。考

虑评价指标反映稳定化进程的敏感性(随时间单调性变化)和工程监测的可行性, 结合研究团队的好氧修复单元模拟结果, 本文选取如下指标:

(1) 氧气利用效率(OUR, oxygen utilization rate)

氧气利用效率的计算公式为

$$\text{OUR} = \frac{X_{\text{g,in}}^{\text{O}_2} - X_{\text{g,out}}^{\text{O}_2}}{X_{\text{g,in}}^{\text{O}_2}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $X_{\text{g,in}}^{\text{O}_2}$ 和 $X_{\text{g,out}}^{\text{O}_2}$ 分别为注气井和抽气井处的氧气体积分数, 易于工程监测。OUR 随时间的变化呈显著的单调性和阶段性(图 2), 具有较强的指示性, 可用于评估填埋场内氧气的赋存状况和消耗程度, 故将其选为填埋场好氧修复稳定化的气相评价指标。

(2) 归一化有机溶质指标(NBC, normalized B/C)

归一化有机溶质指标定义为

$$\text{NBC} = \frac{B/C}{(B/C)_0} = \frac{\text{BOD}/\text{COD}}{\text{BOD}_0/\text{COD}_0} \quad (2)$$

式中: BOD_0 和 COD_0 分别为初始时刻的渗滤液 BOD 和 COD 浓度($\text{mg O}_2/\text{L}$)。B/C 是反映渗滤液生物降解程度的指标^[3], 其随时间的变化具有单调性和阶段性(图 2), 指示性强。BOD 和 COD 虽然也多用于评价渗滤液稳定化程度, 但不同填埋场的数值通常跨越多个数量级, 缺乏统一性和普适性, 因此采用无量纲量 B/C 进行统一。同时, 为进一步提高指标的抗干扰性, 降低初始差异的影响, 将 B/C 除以初始值作为液相中碳元素的评价指标。

(3) 脱氮效率(NRE, nitrogen removal efficiency)

脱氮效率定义为

$$\text{NRE} = \frac{c_{\text{w},0}^{\text{NH}_3} - c_{\text{w}}^{\text{NH}_3}}{c_{\text{w},0}^{\text{NH}_3}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $c_{\text{w},0}^{\text{NH}_3}$ 和 $c_{\text{w}}^{\text{NH}_3}$ 为某一时刻和初始时刻的氨氮浓度(mg N/L)。NRE 是评价渗滤液中氨氮水平和去除效果的重要指标, 其随时间变化的阶段性明显(图 4), 可用以区分不同治理阶段。此外, 好氧修复的主要特征就是降低氨氮水平、提高渗滤液质量, 因此 NRE 可以作为液相中氮元素的评价指标。

(4) 生物降解度(BD, biodegradation degree)

生物降解度定义为

$$\text{BD} = \frac{m_{\text{d},0} - m_{\text{d}}}{m_{\text{d},0}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: m_{d} 和 $m_{\text{d},0}$ 为某一时刻和初始时刻单位体积垃圾的可降解有机物含量(kg/m^3)。BD 是评价固相中可降解有机物消耗程度的归一化指标, 具有明显的单调性与阶段性(图 5), 指示性强。在实际工程中可通过现场取样测试获取, 同时采用归一化参数可减少初始阶段垃圾特性差异化的影响。综上, 选取生物降解度

BD 作为固相稳定化评价指标。

(5) 相对沉降速率（或相对不均匀沉降速率）

好氧修复下填埋场具有沉降大且不均匀的特征，但不同案例的沉降量差异大，即便是相对沉降量（沉降量与初始高度的比值）也处于较大范围内^[9]，故难以直接用其评价填埋场稳定化程度。大量文献选取受初始状态影响小且易监测的沉降速率作为评价指标，包括年沉降速率或年相对沉降速率。考虑到填埋场高度的差异化，后者更合理，因此本文的沉降评价指标综合考虑了相对沉降速率与相对不均匀沉降速率。

1.2 各类指标权重的确定

采用层次分析法确定填埋场气、液、固和沉降四类指标的权重^[6]。通过统计当前国内外文献（68 篇好氧或准好氧型填埋场的现场测试与室内试验）中 4 类指标的使用频次，获取相应的判断矩阵 A ：

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 11/9 & 11/12 & 5/6 \\ 9/11 & 1 & 3/4 & 15/22 \\ 12/11 & 4/3 & 1 & 10/11 \\ 6/5 & 22/15 & 11/10 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

该判断矩阵 A 的按模最大特征值为 $\lambda_{\max} = 4$ ，对应的特征向量为 $\omega = (0.8182 \ 1 \ 0.75 \ 0.6818)$ ，且判断矩阵满足一致性条件。将 ω 归一化可得稳定化进程评价中四类指标的权重为 $W = (0.25 \ 0.31 \ 0.23 \ 0.21)$ 。

2 稳定化阶段的划分与判断方法

本节将根据上述稳定化评价指标（即氧气利用效率、归一化渗滤液质量指标、脱氮效率、生物降解度和相对沉降速率）随好氧修复时间的变化特征，将稳定化进程划分为好氧转化阶段、半稳定化阶段和后稳定化阶段，并阐述各指标的阶段划分标准。

2.1 基于气相指标的三阶段划分标准

以 6000 Pa 注气压力为例，氧气利用效率 OUR 在 1000 d 内随时间单调下降（图 2）。在初始阶段，OUR=100%，即氧气尚未扩散至抽气井附近；在第 60 天时，好氧区到达抽气井附近，导致 OUR 急剧下降至 50% 左右；在第 100 天~第 250 天内，OUR 开始缓慢地从 50% 下降至 40%，此时好氧区向整个空间扩展，故可选取该时期的中间值（OUR=45%）作为好氧转化阶段与半稳定化阶段的分界点。在第 300 天~第 500 天内，随着有机质的逐渐消耗，大部分区域存在高浓度氧气，此时 OUR 进一步下降，继续注气效果有限。可见，OUR 的降低意味着填埋垃圾的逐步稳定，但是过低值意味着不必要的能源浪费。因此，本文选取 OUR=5% 作为半稳定化和后稳定化阶段的分界点。

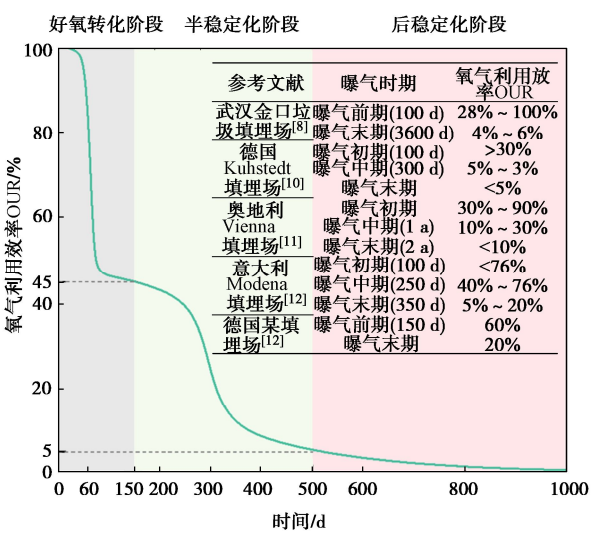


图 2 好氧修复下氧气利用效率随时间变化与阶段划分

Fig. 2 Variation of OUR with time under aeration and division of corresponding stages

图 2 中表格提供了不同好氧修复项目^[8, 10-13]不同阶段的 OUR 值。本文提出的 OUR=45% 分界点介于各项目中期阶段的 OUR 范围之间，证明了该分界标准的工程合理性。对于各项目的后期阶段，OUR 普遍小于 10%，部分案例甚至以 1% 作为修复终点，虽然保证了修复效果，但过于严格且不经济。因此本文选取 5%，既满足稳定化要求，又避免过于保守。

2.2 基于液相指标的三阶段划分标准

(1) 归一化有机溶质指标

以 6000 Pa 注气压力为例，归一化有机溶质指标 NBC（取模拟单元平均值）随时间呈指数衰减趋势（图 3），故根据指数衰减的相关规律确定阶段划分标准。在初始时刻，NBC 的衰减速率 k_{NBC} 最大，约为 0.008 d^{-1} ，之后开始减小。以初始衰减速率为基础，选取其 1/2 和 1/8 值对应的 NBC 作为 3 个阶段的参考分界点。衰减速率为 0.004 d^{-1} （初始时刻的 1/2）对应的时间点约为 100 d，此时 BOD、COD 和 NBC 分别为 1000，3000 mg/L 和 0.4；衰减速率为 0.001 d^{-1} （初始时刻的 1/8）对应的时间点约为 240 d，此时 BOD、COD 和 NBC 分别为 100 mg/L（达到表 1 规范要求的排放标准）、1800 mg/L 和 0.08。故将 NBC=0.4 和 0.08 作为阶段分界点。

为了验证 NBC 评价标准的合理性，表 1 汇总了不同好氧修复工程的渗滤液监测数据。可以发现，对于早期的渗滤液，NBC 基本大于 0.3，渗滤液质量不稳定；在治理后期，渗滤液 NBC 大幅度降低，质量趋于稳定，稳定终点介于 0.01~0.1。可见，本文确定的 $NBC \geq 0.4$ 处于各修复案例的早中期阶段， $NBC \leq 0.08$ 与各案例的后期阶段或修复终止标准吻

合。此外,刘娟^[3]采用 $B/C=0.1$ 和 0.4 将好氧填埋场的稳定化进程划分为不稳定、半稳定、稳定 3 个阶段,对应的 NBC 分界点分别为 0.15 和 0.6 。综上,本文提出的 NBC 判定标准具有较好的工程适用性。

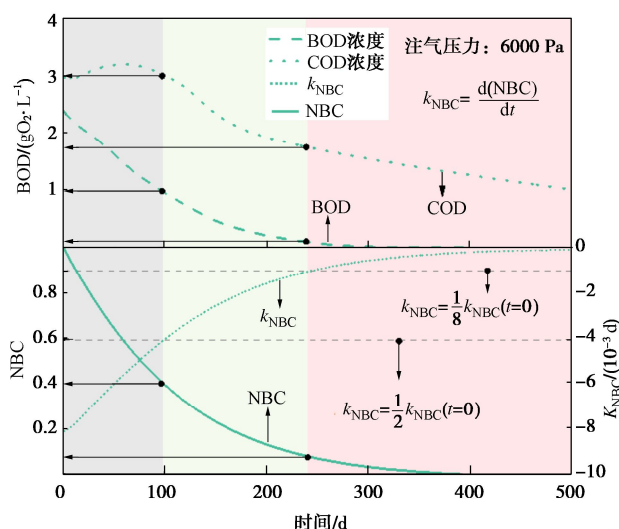


图3 好氧修复下归一化有机溶质指标随时间变化与阶段划分
Fig. 3 Variation of NBC with time under aeration and division of corresponding stages

表 1 不同填埋场好氧修复工程中的渗滤液有机质指标
Table 1 Values of NBC in different in-situ aeration programs

参考文献	曝气时期	NBC
GB 16889—2008 ^[14]	排放标准	COD < 100 mg/L
北京某老旧填埋场 ^[15]	1 a	0.25 ~ 0.75
	2 a	< 0.25
武汉金口填埋场 ^[8]	100 d	0.3 ~ 1
	350 d	0.04 ~ 0.3
奥地利Vienna填埋场 ^[11]	2 a	< 0.08
	修复终点	< 0.01
意大利Modena填埋场 ^[12]	100 d	0.2
	180 d	0.09
德国某填埋场 ^[13]	修复终点	< 0.1
巴基斯坦某填埋场 ^[16]	1 a	0.01 ~ 0.05
美国某填埋场 ^[17]	修复终点	< 0.1

(2) 脱氮效率

脱氮效率 NRE (取模拟单元平均值) 随时间单调增大 (图 4)。在初始阶段, 好氧降解使得大量含氮化合物被氨化, 渗滤液中氨氮浓度迅速上升, 在第 50 天达到峰值 570 mg N/L。之后, 随着硝化反应消耗氨氮的速率超过了氨化速率, 氨氮浓度开始下降。低浓度的氨氮会减缓硝化速率, 导致第 120 天左右氨氮下降速率变缓, 此时 NRE 为 50%, 氨氮浓度为 260 mg N/L。该时间点与前文 OUR 和 NBC 的阶段分界点相近, 因此选取 50% 的 NRE 作为好氧转化与半稳定化阶段的分界点。随着好氧修复的进行, 氨氮浓度进一步降低, 在 260 d 左右达到 20 mg N/L, 此时 NRE 高达 95%。此后, 渗滤液中氨氮一直处于较低的水平,

其质量逐渐稳定, 故将 95% 的 NRE 作为半稳定化与后稳定化阶段的分界点。

图 4 中的表格汇总了不同好氧修复工程的渗滤液氨氮浓度和脱氮效率。在治理早期, 渗滤液质量不稳定, NRE 处于 8%~35%; 在治理后期, 部分案例的 NRE 高达 95%。可见, 本文确定的 $NRE \leq 50\%$ 对应曝气早中期阶段, 而 $NRE \geq 95\%$ 对应各案例的曝气后期阶段或修复终点, 且本方案案例终止的氨氮浓度为 20 mg N/L, 不仅符合《生活垃圾填埋场污染控制标准: GB 16889—2008》的排放要求, 也与大部分修复案例的终点目标相近。综上, 本文提出的脱氮效率判定标准具有较好的工程适应性和推广性, 是合理可行的。

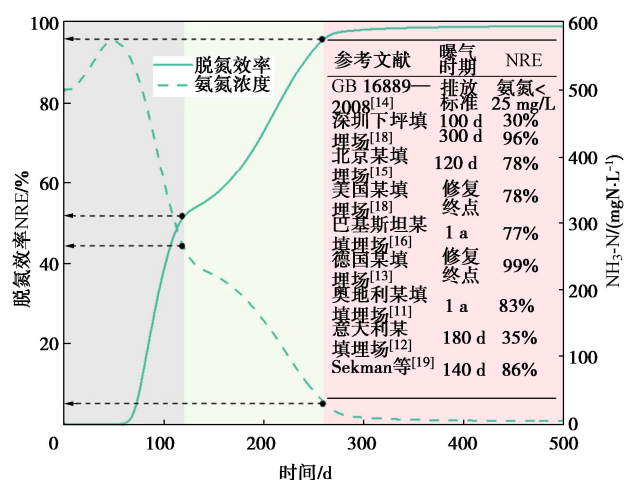


图 4 好氧修复下脱氮效率随时间变化与阶段划分

Fig. 4 Variation of NRE with time under aeration and division of corresponding stages

2.3 基于固相指标的三阶段划分标准

生物降解度 BD （取模拟单元平均值）随时间单调下降（图 5），类似指数衰减，故可根据其规律确定阶段的划分标准。初始时刻 BD 的衰减速率 k_{BD} 最大，约为 $0.56\%/d$ ，之后开始减慢。选取衰减速率为初始时刻 $1/2$ 和 $1/8$ 为 3 个阶段的分界点，即衰减速率 k_{BD} 为 $0.28\%/d$ （初始衰减速率 $k_{BD,0}$ 的 $1/2$ ）对应的时间点约为 125 d ，此时 $BD = 52\%$ ；衰减速率 k_{BD} 为 $0.07\%/d$ （初始衰减速率 $k_{BD,0}$ 的 $1/8$ ）对应的时间点约为 370 d ，此时 $BD = 90\%$ 。故取 $BD = 50\%$ 和 90% 为三阶段的分界点。

图 5 中表格列出了不同好氧修复项目中的生物降解度 BD 阶段。可以发现,本文提出的 50%分界点(好氧转化阶段与半稳定化阶段)介于各项目曝气 60~360 d 的 BD 范围之间(15%~72%),即仍然处于不稳定状态;而大多数项目基本选取 90%作为修复终止标准,部分采用更严格的 95%。从图 5 可以看出,当生物降解度达到 90%后,有机物降解非常缓慢,达到

95%需要非常漫长的时间。因此，以 95%的生物降解度作为修复终点虽可保证工程安全性，但却过于苛刻，本文选取更普适经济的 90%。

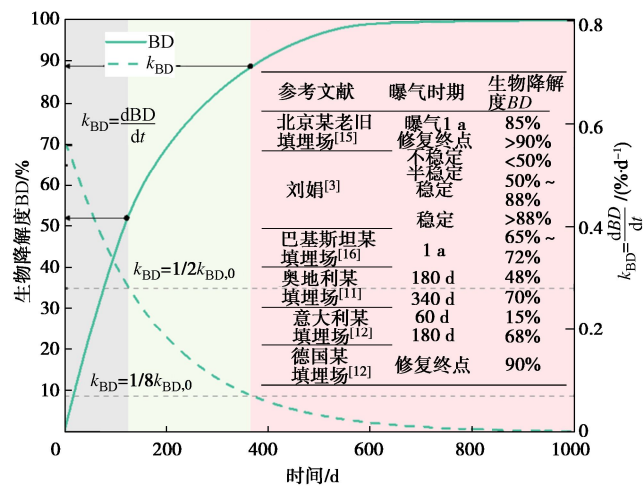


图5 好氧修复下生物降解度随时间变化与阶段划分

Fig. 5 Variation of BD with time under aeration and division of corresponding stages

2.4 基于沉降指标的三阶段划分标准

图6为地表沉降速率随时间的变化曲线，其中 s'_A 和 s'_B 分别为注气井和抽气井处的相对沉降速率（位置见图1）， s'_u 为不均匀沉降速率，即 $s'_A - s'_B$ 。在初始阶段，由于注气井周围氧气浓度高，垃圾降解速率快，导致沉降速率快（16%/a）且沉降量大；抽气井区域沉降速率相对较慢（3%/a），造成不均匀沉降不断增大。随着好氧修复的进行，抽气井附近的氧气浓度开始上升，降解速率逐渐增大，此时注气井附近的垃圾降解程度高，沉降速率反而开始下降。在第200天左右，抽气井处的沉降速率反超注气井处（约为5%/a），不均匀沉降速率转为负值并开始收敛。因此，选取200 d作为好氧转化阶段和半稳定化阶段的转折点。200 d后伴随有机质的消耗，各点的沉降速率趋于稳定，此时以沉降速率较大的抽气井端数据为依据，选取0.2%/a的沉降速率作为半稳定化阶段和后稳定化阶段的分界点，此时累计沉降量超过了最终沉降量的95%。

表2列出了不同好氧修复项目中不同阶段的沉降速率与沉降量。案例中相对不均匀沉降速率由正值转负值（即好氧转化阶段与半稳定化阶段的分界点）对应的沉降速率均为5%/a（即75 cm/a），沉降量占填埋高度的2.3%~7%（即34.5~105 cm），完成了50%~87%的沉降，处在《生活垃圾填埋场稳定化场地利用技术要求：GB/T 25179—2010》规定的低度利用范围，与部分好氧修复工程的中期沉降量数据相近（5%~6%）。对于半稳定化和后稳定化的分界点，本文选取的沉降速率为0.2%/a（3 cm/a），此时沉降量占填埋高

度的4%~8%（60~120 cm），完成的沉降超过了最大沉降的95%。根据规范要求，3 cm/a沉降速率已低于高度利用标准，且不同工程中修复终点的沉降速率均处介于0.025%~0.3%/a，总沉降量超过最终沉降量的90%。因此，从多个角度证明本文提出的分界标准符合大部分工程实际的需求。

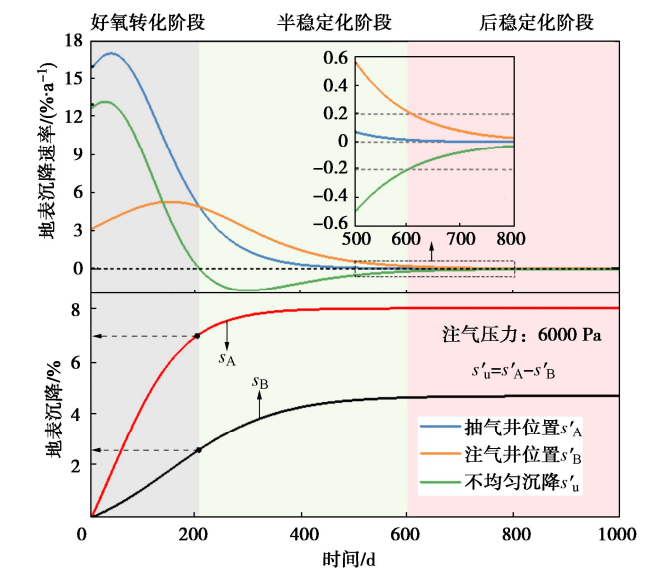


图6 好氧修复下沉降速率随时间变化与阶段划分

Fig. 6 Variation of settlement rate with time under aeration and division of corresponding stages

表2 不同填埋场好氧修复工程中的沉降指标

Table 2 Values of settlement and settlement rate in different in-situ aeration programs			
参考文献	曝气时期	沉降量	沉降速率
GB/T 25179—2010 ^[20]	高度利用	—	1~5 cm/a
北京某老填埋场 ^[15]	1 a	5.5%	11 %/a
	2 a	6%	6 %/a
深圳下坪填埋场 ^[18]	100 d	23%	28 %/a
	350 d	26%	1 %/a
奥地利Vienna填埋场 ^[11]	1 a	—	0.25 %/a
意大利Modena填埋场 ^[12]	360 d	3%~5%	0.3~5 %/a
德国某填埋场 ^[13]	修复终点	—	0.2 %/a
Stegmann等 ^[19]	修复终点	90%	—

3 稳定化进程评估方法与应用

3.1 稳定化阶段划分标准汇总

本文将好氧修复稳定化进程划分为3个阶段（表3）：好氧转化阶段、半稳定化阶段和后稳定化阶段。在好氧转化阶段（持续100~200 d），好氧区逐渐增大，垃圾降解模式向好氧转化，50%的可降解有机质被快速消耗，50%的氨氮被去除，渗滤液质量被显著改善，

且沉降迅速发展, 不均匀沉降达到最大。在半稳定化阶段(持续 300~900 d), 好氧区基本稳定, 氧气利用效率开始显著下降, 90%的可降解有机物将被降解, 基本完成 90%的沉降, 不均匀沉降开始收敛, 渗滤液中氨氮和有机质浓度将显著降低, 其质量趋于稳定, 此时可选择降低注气压力来减少能耗。在后稳定化阶段, 有机质几乎被完全降解, 表面沉降速率可忽略不计, 场地可进行再利用, 可以选择停止曝气。

表 3 好氧修复稳定化进程阶段划分标准
Table 3 Classification standards for landfill stabilization evaluation under aeration

阶段划分	好氧转化阶段	半稳定化阶段	后稳定化阶段
氧气利用率 OUR/%	≥ 45	5~45	≤ 5
归一化有机溶质 指标NBC	≥ 0.4	0.08~0.4	≤ 0.08
脱氮效率NRE/%	≤ 50	50~95	≥ 95
生物降解度 BD/%	≤ 50	50~90	≥ 90
相对沉降速率/ (%·a ⁻¹)	$s_u' \geq 0$	$s_u' < 0$ 且 $s_B' \geq 0.2$	$s_u' < 0$ 且 $s_B' < 0.2$

3.2 基于模糊理论的稳定化评价方法

采用模糊理论建立稳定化评价方法的基本思路如下: 首先, 根据评价标准确定隶属度函数, 再结合指标取值构建评价矩阵, 最后与指标的权重向量进行模糊运算, 并进行归一化处理得到最终的评价结果。各指标的隶属度是一个介于[0, 1]的数值, 为 0 时表示完全不属于该阶段, 为 1 时表示完全属于该阶段。本文将建立正态分布型的隶属函数(液相指标取归一化有机溶质指标 NBC 和脱氮效率 NRE 的平均值):

(1) 气相指标(氧气利用效率)

$$f_I = \begin{cases} 1 - \exp\left\{-\left[(OUR - 34)/13.2\right]^2\right\} & OUR > 34 \\ 0 & OUR \leq 34 \end{cases}, \quad (6)$$

$$f_{II} = \begin{cases} \exp\left\{-\left[(OUR - 6)/1.2\right]^2\right\} & OUR < 6 \\ 1 & 6 \leq OUR \leq 34 \\ \exp\left\{-\left[(OUR - 34)/13.2\right]^2\right\} & OUR > 34 \end{cases}, \quad (7)$$

$$f_{III} = \begin{cases} 1 - \exp\left\{-\left[(OUR - 6)/1.2\right]^2\right\} & OUR < 6 \\ 0 & OUR \geq 6 \end{cases}. \quad (8)$$

(2) 液相指标(归一化有机溶质指标)

$$f_I = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{NBC - 0.28}{0.144}\right)^2\right] & NBC > 0.28 \\ 0 & NBC \leq 0.28 \end{cases}, \quad (9)$$

$$f_{II} = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{NBC - 0.1}{0.024}\right)^2\right] & NBC < 0.1 \\ 1 & 0.1 \leq NBC \leq 0.28, \\ \exp\left[-\left(\frac{NBC - 0.28}{0.144}\right)^2\right] & NBC > 0.28 \end{cases} \quad (10)$$

$$f_{III} = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{NBC - 0.1}{0.024}\right)^2\right] & NBC < 0.1 \\ 0 & NBC \geq 0.1 \end{cases}. \quad (11)$$

(3) 液相指标(脱氮效率)

$$f_I = \begin{cases} 1 - \exp\left\{-\left[(NRE - 60)/12\right]^2\right\} & NRE < 60 \\ 0 & NRE \geq 60 \end{cases}, \quad (12)$$

$$f_{II} = \begin{cases} \exp\left\{-\left[(NRE - 60)/12\right]^2\right\} & NRE < 60 \\ 1 & 60 \leq NRE \leq 94, \\ \exp\left\{-\left[(NRE - 94)/1.2\right]^2\right\} & NRE > 94 \end{cases} \quad (13)$$

$$f_{III} = \begin{cases} 1 - \exp\left\{-\left[(NRE - 94)/1.2\right]^2\right\} & NRE > 94 \\ 0 & NRE \leq 94 \end{cases}. \quad (14)$$

(4) 固相指标(生物降解度)

$$f_I = \begin{cases} 1 - \exp\left\{-\left[(BD - 60)/12\right]^2\right\} & BD < 60 \\ 0 & BD \geq 60 \end{cases}, \quad (15)$$

$$f_{II} = \begin{cases} \exp\left\{-\left[(BD - 60)/12\right]^2\right\} & BD < 60 \\ 1 & 60 \leq BD \leq 88, \\ \exp\left\{-\left[(BD - 88)/2.4\right]^2\right\} & BD > 88 \end{cases} \quad (16)$$

$$f_{III} = \begin{cases} 1 - \exp\left\{-\left[(BD - 88)/2.4\right]^2\right\} & BD > 88 \\ 0 & BD \leq 88 \end{cases}. \quad (17)$$

(5) 沉降指标(相对沉降速率)

$$f_I(s'_u, s'_B) = \begin{cases} 1 & s'_u \geq 0 \\ 0 & s'_u < 0 \end{cases}, \quad (18)$$

$$f_{II} = \begin{cases} 1 - \exp\left\{-\left[(s'_B - 0.1)/0.12\right]^2\right\} & s'_B > 0.1 \\ 0 & s'_B \leq 0.1 \text{ 或 } s'_u \geq 0 \end{cases}, \quad (19)$$

$$f_{III} = \begin{cases} 1 & s'_B \leq 0.1 \\ \exp\left\{-\left[(s'_B - 0.1)/0.12\right]^2\right\} & s'_B > 0.1 \\ 0 & s'_u \geq 0 \end{cases}. \quad (20)$$

3.3 工程案例应用分析

本节将上述的填埋场稳定化进程评估方法应用于北京某非正规垃圾填埋场的原位好氧修复工程中, 相

关参数如表 4 所示^[21]。

表 4 北京某非正规填埋场原位好氧修复指标
Table 4 Values of stabilization indicators of an in-situ landfill
aeration program in Beijing

指标		取值	
		修复前	修复360 d
气相	抽气井氧气浓度 X_{O_2}	8%	16%
	OUR	62%	24%
液相	COD浓度	1900 mg O ₂ /L	1000 mg O ₂ /L
	BOD浓度	1100 mg O ₂ /L	400 mg O ₂ /L
	B/C	0.58	0.4
	NBC	1	0.69
	氨氮浓度 C_{NH4-N}	870 mg N/L	300 mg N/L
	NRE	0%	66%
固相	可降解成分含量	20%	12%
	BD	0%	40%
沉降	最小沉降速率	—	0.1 m/a (0.5 %/a)
	最大沉降速率	—	0.17 m/a (0.8 %/a)
	不均匀沉降速率	—	-0.3 %/a

根据表 4 的数据,对应 3.2 节建立的隶属度函数,可以获得好氧修复一年后该项目各项指标对应不同阶段的隶属度如表 5 所示。

表 5 各个评价指标对应不同阶段的隶属度
Table 5 Degrees of membership function of stabilization indices
corresponding to different stages

指标	I 好氧转化 阶段	II 半稳定化 阶段	III 后稳定化阶段
气相指标	0	1	0
液相指标1	0	0.0004	0.9996
液相指标2	0	1	0
液相均值	0	0.5002	0.4998
固相指标	0.94	0.06	0
沉降指标	0	0.288	0.712

液相指标的最终隶属度取 NBC 与 NRE 的均值,则可得该工程在修复 360 d 后的评价矩阵为

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5002 & 0.4998 \\ 0.94 & 0.06 & 0 \\ 0 & 0.288 & 0.712 \end{pmatrix} \quad (21)$$

根据 1.2 节获取的权重向量 $W = (0.25 \ 0.31 \ 0.23 \ 0.21)$ (依次为气相、液相、固相和沉降指标),进行模糊综合运算可得

$$W \cdot R = (0.2162 \ 0.4794 \ 0.3044) \quad (22)$$

故根据最大隶属度原则,可以认为经过一年的好氧修复,该非正规填埋场所属的稳定化阶段为半稳定化阶段,此时可以通过降低注气压力等措施来减少能源损耗。

4 结 论

本文基于团队研究的填埋场好氧修复稳定化规律,提出了以氧气利用率、渗滤液归一化有机溶质指标和脱氮效率、生物降解度及相对沉降速率为核心指标的填埋场稳定化进程阶段划分标准,并基于模糊综合评价理论,建立了填埋场稳定化程度评价方法,形成好氧修复稳定化进程评价体系,最后以一个好氧修复工程项目为例,阐述该体系的工程实用性和推广性。主要得到以下 3 点结论。

(1)考虑好氧修复过程中稳定化指标的敏感性和工程监测难易度,选取氧气利用率(OUR)、渗滤液归一化有机溶质指标(NBC)和脱氮效率(NRE)、生物降解度(BD)及相对沉降速率(s')作为稳定化核心评价指标,并采用层次分析法分为气相、液相、固相和沉降指标 4 类,获得相应的权重向量为 $W = (0.25 \ 0.31 \ 0.23 \ 0.21)$ 。

(2)根据评价指标的稳定化特征,将好氧修复下填埋场稳定化进程划分为好氧转化、半稳定化和后稳定化 3 个阶段。在好氧转化阶段,填埋垃圾的降解模式由厌氧向好氧转化,有机质降解迅速,渗滤液质量得到显著改善,不均匀沉降达到最大。在半稳定化阶段,好氧反应区基本稳定,90%的可降解有机物被消耗,基本完成 90%的沉降,渗滤液质量趋于稳定。在后稳定化阶段,垃圾有机质几乎被完全降解,表面沉降可忽略不计,场地可进行再利用,建议停止曝气。

(3)根据确定的稳定化阶段划分标准,构建了 5 个评价指标在 3 个阶段的隶属度函数,并结合模糊综合评价理论对填埋场进行稳定化评价。最后,将该稳定化评价方法应用于北京某非正规垃圾填埋场的原位好氧修复工程,阐述了稳定化进程评价体系的计算步骤并验证了其工程实用性。

参考文献:

[1] 李 蕾, 彭 垚, 谭涵月, 等. 填埋场原位好氧稳定化技术的应用现状及研究进展[J]. 中国环境科学, 2021, 41(6): 2725-2736. (LI Lei, PENG Yao, TAN Hanyue, et al. Application status and research progress of in situ landfill aeration[J]. China Environmental Science, 2021, 41(6): 2725-2736. (in Chinese))

[2] 唐 平. 模拟准好氧填埋场的稳定化进程研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005. (TANG Ping. Research on Stabilization Process in Laboratory Simulating Semi-Aerobic Landfill[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese))

[3] 刘 娟. 垃圾填埋场稳定化进程核心表征指标研究[D]. 北

- 京: 清华大学, 2011. (LIU Juan. Key Indicators for Municipal Solid Waste Landfill Stabilization Process[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese))
- [4] TCHOBANOGLOUS G, ELIASSEN R, THEISEN H. Integrated Solid Waste Management—Engineering Principles & Management Issues[M]. Michigan: McGraw-Hill, 1993.
- [5] KIM J, POHLAND F G. Process enhancement in anaerobic bioreactor landfills[J]. *Water Sci Technol*, 2003, **48**(4): 29-36.
- [6] 李 红. 农村生活垃圾厌氧准好氧生物反应器填埋场稳定化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. (LI Hong. A study on the Stabilization During Rural Household Solid Wastes in Anaerobic-Semi-Aerobic Bioreactor Landfill[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [7] JIANG J, CHANG Z, LI C, HUANG Y. A new method applied for the evaluation of municipal solid waste landfill stabilization[J]. *Environmental Engineering Science*, 2009, **26**(6): 1123-1130.
- [8] LIU L, MA J, XUE Q, et al. The in situ aeration in an old landfill in China: multi-wells optimization method and application[J]. *Waste Manag*, 2018, **76**: 614-620.
- [9] WU S J, FENG S J, ZHENG Q T, et al. Stabilization behavior of the three-phase and multi-component system of landfilled waste under aeration: numerical modeling[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, **156**: 105318.
- [10] RITZKOWSKI M, HEYER K U, STEGMANN R. Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills[J]. *Waste Management*, 2006, **26**: 356-372.
- [11] HRAD M, HUBER-HUMER M. Performance and completion assessment of an in situ aerated municipal solid waste landfill-Final scientific documentation of an Austrian case study[J]. *Waste Manag*, 2017, **63**: 397-409.
- [12] RAGA R, COSSU R, HEERENKLAGE J, et al. Landfill aeration for emission control before and during landfill mining[J]. *Waste Manag*, 2015, **46**: 420-429.
- [13] RITZKOWSKI M, STEGMANN R. Landfill aeration within the scope of post-closure care and its completion[J]. *Waste Manag*, 2013, **33**(10): 2074-2082.
- [14] 生活垃圾填埋场污染控制标准: GB 16889—2008[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008. (Standard for Pollution Control on the Landfill Site of Municipal Solid Waste: GB 16889—2008[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008. (in Chinese))
- [15] 唐 嵘. 封场非正规垃圾填埋场好氧降解快速稳定技术及应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012. (TANG Rong. Research of Technology and Application of Aerobic Degradation on the Accelerating Stabilization Process of Closed Non-Regular Landfills[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012. (in Chinese))
- [16] SOHOO I, RITZKOWSKI M, KUCHTA K. Influence of moisture content and leachate recirculation on oxygen consumption and waste stabilization in post aeration phase of landfill operation[J]. *Sci Total Environ*, 2021, **773**: 145584.
- [17] O'DONNELL S T, CALDWELL M D, BARLAZ M A, et al. Case study comparison of functional vs. organic stability approaches for assessing threat potential at closed landfills in the USA[J]. *Waste Manag*, 2018, **75**: 415-426.
- [18] KO J H, MA Z, JIN X, et al. Effects of aeration frequency on leachate quality and waste in simulated hybrid bioreactor landfills[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2016, **66**(12): 1245-1256.
- [19] STEGMANN R. Development of waste management in the last 30 years[C]// *Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics*, Hangzhou, 2019: 172-185.
- [20] 生活垃圾填埋场稳定化场地利用技术要求: GB/T 25179—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011. (Technical Requirements for Site Utilization After Stabilization in Municipal Solid Waste Landfill: GB/T 25179—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese))
- [21] 田立斌, 王海东, 杨 勇, 等. 原位好氧稳定化技术在非正规垃圾填埋场修复治理中的应用[J]. *环境工程*, 2019, **37**: 940-945. (TIAN Libin, WANG Haidong, YANG Yong, et al. Remediation of an informal landfill site by in situ aeration[J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**: 940-945. (in Chinese))