



遗留工业地块土壤污染详细调查布点密度探讨

谭海剑, 黄祖照, 杨巧玲

Optimal grid sampling density of soil pollution survey in residual industrial sites —Based on principle of diminishing marginal benefits

TAN Haijian, HUANG Zuzhao, YANG Qiaoling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021.06.025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

遗留工业地块土壤污染详细调查布点密度探讨

——基于边际效益递减原理

谭海剑, 黄祖照, 杨巧玲

(广州市环境技术中心, 广东 广州 510180)

摘要: 该研究利用“边际效益递减”原理, 对不同布点密度的经费投入与污染土壤修复量减小所产生经济效益的关系进行分析比较, 并分别对 20 m×20 m、10 m×10 m、5 m×5 m、2 m×2 m、1 m×1 m 网格布点密度情景下无机污染、有机污染和复合污染的边际效益进行了研究。结果表明: 随着布点密度增加, 其经济效益变化规律符合边际效益递减原理; 当布点密度<10 m×10 m 时, 无机污染、有机污染和有机/无机复合污染等地块的边际效益值均为正值; 当布点密度>5 m×5 m 时, 边际效益值均为负值; 当 3 种污染类型地块布点密度分别为 5.91 m×5.91 m、8.85 m×8.85 m、8.85 m×8.85 m 时, 边际效益值为零。遗留工业地块土壤污染详细调查的布点密度以 10 m×10 m 网格为宜。该研究结果可为规范工业企业土壤环境管理提供科学支撑。

关键词: 工业地块; 土壤; 边际效益; 布点密度

中图分类号: X524

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021.06.025

Optimal grid sampling density of soil pollution survey in residual industrial sites —Based on principle of diminishing marginal benefits

TAN Haijian, HUANG Zuzhao, YANG Qiaoling

(Guangzhou Environmental Technology Assessment Center, Guangzhou 510180, China)

Abstract: In the study, the principle of "diminishing marginal benefits" was used to analyze and compare the relationship between the financial input of different sampling densities and the economic benefits generated by the reduction in the amount of contaminated soil remediation. The marginal benefits for the sampling densities of 20 m×20 m, 10 m×10 m, 5 m×5 m, and 2 m×2 m, 1 m×1 m were compared respectively with the case of inorganic-, organic-, and combined contaminations. Results showed that, with the increase of sampling densities, the change of economic benefits follows the principle of diminishing marginal benefits. With a sampling density less than 10 m×10 m, the marginal benefit value in inorganic-, organic-, and combined contaminated sites were positive. While this value became negative with a sampling density over 5 m×5 m. Furthermore, the marginal benefit value came to zero with the sampling density of 5.91 m×5.91 m, 8.85 m×8.85 m, and 8.85 m×8.85 m, respectively, in the case of inorganic, organic, and combined contaminations. The optimal sampling density of the detailed soil pollution survey in residual industrial sites was 10 m×10 m. Overall, this study could provide a scientific support for the soil environmental management of industrial enterprises.

Keywords: industrial site; soil; marginal benefit; sampling density

CLC number: X524

建设用地土壤环境质量直接关系到人居环境安全。土壤污染状况调查是获取土壤环境状况与污染分布最重要的手段, 采样调查结果的精度直接影响污染风险评价结果的准确性和风险管理决策的合理性^[1]。土壤本身具有较强的空间异质性, 仅提高检测分析与样品采集精度难以提高土壤污染

调查结果的精度^[2]。大量研究表明, 人类活动影响越大的区域, 局部变异程度越大^[3-7], 样点布设方案是影响调查结果准确性最主要因素之一。JENKINS et al^[8]对土壤中三硝基甲苯污染的调查结果表明, 至少 95% 的变异度是由采样位置导致, 而含量分析手段对变异度的贡献不超过 5%。

收稿日期: 2021-08-16

作者简介: 谭海剑(1982-), 男, 硕士、副高级工程师。研究方向: 土壤环境技术研究。E-mail: 13560048932@163.com

引用格式: 谭海剑, 黄祖照, 杨巧玲. 遗留工业地块土壤污染详细调查布点密度探讨——基于边际效益递减原理[J]. 环境保护科学, 2021, 47(6): 140-144.

GUSTAVSSON et al^[9] 在土壤污染调查误差研究中发现, 抽样误差是分析误差的 20 倍以上。其他类似研究也表明, 土壤采样位置所导致的不确定对污染物含量测定不确定性的贡献超过 50%^[10-12]。遗留工业地块因受到人类工业活动的深刻影响, 其土壤污染风险和污染特征与特定行业工业活动历史密切相关^[13], 科学设计布点方案对查明遗留工业地块土壤污染状况和精准确定污染土壤修复治理范围具有非常重要的作用。

为了获得准确的土壤中污染物空间分布信息, 土壤污染调查通常包括污染初步和详细调查等多个阶段^[1]。初步调查的主要目的是识别土壤主要污染物及潜在污染区域, 通常样本量较少。详细调查是在初步调查基础上, 在潜在的污染区域增加样点, 以确定污染区的范围及其污染程度^[1], 最终指导污染土壤风险管控和修复治理等工作。如何确定最优采样密度是土壤污染调查的重点和难点问题^[14-17]。

“边际效益递减”原理是指随着资源投入的增加, 单位资源投入所产生的效益是不断递减的^[18]。边际效益是经济决策中十分有效和重要的概念^[19]。边际效益分析常被用于城市土地利用效率评价^[20]、人力资源管理^[21]、水资源空间配置^[22] 和水安全评价^[18] 等方面。

本研究聚焦于不同布点密度的经济效益问题和方法优化, 以土壤污染详细调查工作的需求为导向, 采用“边际效益递减”原理, 对不同布点密度的经费投入与污染土壤修复量减小所产生经济效益的关系进行分析比较, 并对不同情景的布点密度边际效益进行了研究, 提出了布点密度的选取方法和适宜的布点密度, 为土壤污染详细调查的布点密度设置提出科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于粤港澳大湾区腹地, 地形地貌以平原和丘陵为主, 河流水系发达, 地带性土壤主要类型为赤红壤, 地下水埋深较浅。该区域工业化起步早, 工业行业类别多样且迭代频繁, 主要行业包括化工、金属冶炼、电镀、机械制造、医药制造和纺织等, 分布了大湾区大部分类型的污染地块。研究选取城市的生态环境主管部门自 2013 年起组织对辖区内再开发利用前的遗留工业地块进行环境调

查和风险评估报告评审和备案管理, 相关管理制度和技术要求已比较完善, 土壤污染状况调查和修复服务行业发展已基本成熟。已有研究表明, 该市污染地块占比为 36.6%^[13], 与《全国土壤污染状况调查公报》(环境保护部和国土资源部联合发布) 中工业废弃地污染比例为 34.9% 的调查结果^[23] 基本一致, 说明该市的遗留工业地块土壤污染情况在全国具有典型性。

1.2 数据来源

选取该市 2013 ~ 2018 年通过评审的 34 个污染地块, 对其详细调查的每个样品检测平均价格进行统计分析, 以获取样品单价。遗留工业地块土壤污染类型分为无机污染、有机污染和复合污染(即地块内同时存在有机、无机污染), 见表 1。

表 1 研究对象详细调查样品检测单价统计表 元·个⁻¹

	有机污染 (n=7)	无机污染 (n=13)	复合污染 (n=14)
最小值	275	148	867
最大值	2 200	592	1 819
平均值	1 139	254	1 178

同时, 选取 10 个土壤污染修复案例, 对其土壤修复单价进行统计计算, 以获取单位修复土方量的平均投入和平均污染深度, 见表 2。选取的土壤污染修复案例涵盖了国内主流的修复技术, 对单位土壤污染修复投入的计算具有较强代表性。

表 2 研究对象修复技术及修复单价表

编号	修复技术	污染深度/m	修复单价/元·m ⁻³
1	异位/固化稳定化、阻隔填埋	1.46	1 100
2	水泥窑协同处置	2.81	900
3	异位热脱附	3.29	1 100
4	异位化学氧化、异位热脱附、常温解析	7.32	1 080
5	异位化学氧化	3.22	1 200
6	原位化学氧化、异位化学氧化、水泥窑协同处置	2.77	800
7	原位固化/稳定化	5.35	500
8	异位/固化稳定化、阻隔填埋	2.30	1 300
9	原位热脱附	9.82	1 400
10	异位化学还原、水泥窑协同处置	3.49	1 200

1.3 研究方法

根据国家《建设用地土壤污染状况调查技术导

则: HJ 25.1—2019》和《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则: HJ 25.2—2019》, 工业遗留地块详细采样调查阶段单个工作单元原则上不应超过 1 600 m²(即 40 m×40 m 的网格)。因此, 本研究分别设为 20 m×20 m、10 m×10 m、5 m×5 m、2 m×2 m、1 m×1 m 的布点密度, 分别考察分析其边际效益递减情况。

为减小样本中极端值对样本平均值的影响, 对污染深度、修复单价和检测样品单价的各样品均采用几何平均值进行统计分析。几何平均值的计算方法, 见式(1)。

$$\bar{x} = \sqrt[n]{X_1 \times X_2 \times \dots \times X_i \times \dots \times X_n} \quad (1)$$

式(1)中: \bar{x} 为几何平均值; X_i 为获取的各样本数据; n 为样本总数。

使用公式(1)对污染深度、修复单价和检测样品单价数据进行处理, 可得平均污染深度、平均修复单价和样品平均检测单价, 见表 3。

表 3 研究地块的平均污染深度、修复单价和检测单价表

平均污染深度/m	平均修复单价/元·m ⁻³	样品平均检测单价/元·个 ⁻¹		
		有机污染	无机污染	复合污染
3.60	1 021	919	212	978

布点密度边际效应按照公式(2)进行计算。

$$E_n = (C_r - C_m) \quad (2)$$

式(2)中: E_n 为边际效益值, 万元; C_r 为减少的修复费用, 万元; C_m 为增加的检测费用, 万元。 $E_n > 0$ 时, 表示布点密度增加可以减少总费用; $E_n < 0$ 时, 表示布点密度增加反而会增加总费用。

C_m 计算方法: 在满足国家标准基本要求 40 m×40 m 网格的基础上开展进一步加密布设点位, 则增加的点位需在以该点位为中心、周边距离 40 m 点位所围成面积为 3 200 m² 的区域内进行布设, 所需要的检测费用即为 C_m , 见式(3)。

$$C_m = \left(\frac{3200}{i_n^2} - t \right) \times S \times P_1 \times 10^{-4} \quad (3)$$

式(3)中: i_n 为不同布点密度的网格步长, m; t 为详细调查区域内增加布点密度前的布点数量, 个; S 为每个布点的采样数量, 个; 查明 3.60 m 土壤的污染状况一般需在采样点垂向上布设 6~8 个样品, 本研究取 7 个样品进行讨论; P_1 为样品检测单价, 元/个, 无机污染、有机污染和复合污染分别取

919、212 和 978 元/个。

C_r 计算方法: 按照平均污染深度 3.60 m 估算, 污染范围(即修复范围)以该点位为中心与周边不超标点位连线围起来的区域面积为 3 200 m²; 从保守的角度考虑, 假设加密布点所增加点位中仅有 1 个达标, 则该点位可减少的修复土壤量所需的修复费用即为 C_r , 见式(4)。

$$C_r = i_n^2 \times D \times P_2 \times 10^{-4} \quad (4)$$

式(4)中: i_n 为不同布点密度的网格步长, m; D 为污染深度, m, 本研究取 3.60 m; P_2 为修复单价, 元/m³, 本研究取 1 021 元/m³。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 对所有数据进行统计分析, 并完成图形绘制。

2 结果与讨论

2.1 不同布点密度情景下边际效应

按照 1.3 所述方法对布点密度为 20 m×20 m、10 m×10 m、5 m×5 m、2 m×2 m 和 1 m×1 m 增加的检测费用 C_m 、减少的修复费用 C_r 和边际效益值 E_n 分别进行计算, 见图 1~3。其中, 为便于观察, 仅对 20 m×20 m、10 m×10 m、5 m×5 m 和 2 m×2 m 的 E_n 进行分析。

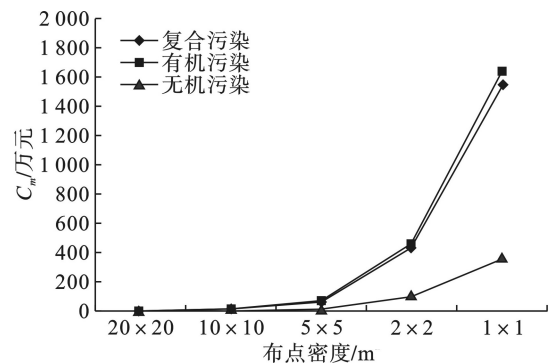


图 1 不同布点密度的检测费用

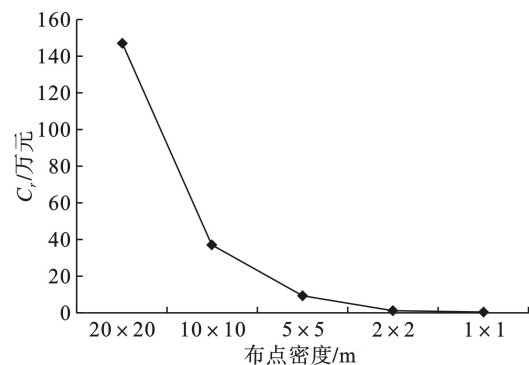


图 2 不同布点密度的修复费用

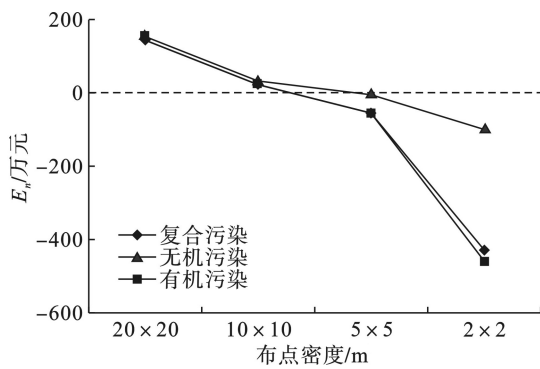


图3 不同布点密度的边际效益

图1可知,随着布点密度的提高, C_m 不断升高,特别是当布点密度 $>5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 时, C_m 出现了迅速升高。

图2可知,随着布点密度的提高, C_r 不断降低,特别是当布点密度 $>5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 时,减少的修复费用迅速降低,与 C_m 的变化几乎同步。

图3可知,随着布点密度的增加,其边际效益不断递减,其变化规律符合边际效益递减原理。

土壤污染调查方案的误差主要包括污染区被低估或被高估^[24-25],前者会导致地块的污染风险不能得到充分发现,增加地块再开发利用过程的人体健康风险;后者会导致不必要的修复经费的投入和修复时间的耗费,而且可能因高强度修复造成清洁土壤的部分土壤功能丧失。通过精细化调查可以获取准确的污染区信息,减少无效修复,节省修复经费,但通常需要增加调查样本量,而过大的布点密度会导致采样分析成本和分析时间的增加。本研究中,增加的检测费用即为投入的资源,减少的修复费用即为所产生的效益。

研究结果显示,当布点密度 $>10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 时,各类用地的边际效益值仍为正值,表明增加布点密度将提高该项工作的整体收益,从经济的角度考虑,增加布点密度是可行的;当布点密度为 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 时,各类用地的边际效益值变为负值,再增加布点密度将降低该项工作的整体收益,从经济的角度考虑,增加布点密度是不可行的。

2.2 基于边际效应递减原理的最优布点密度

工业遗留地块的土壤污染调查和修复是一项技术工作,同时也是一项需要考虑投入和产出的经济决策工作,现有调查布点密度优化研究主要从布点密度和调查结果精度的角度考虑,而将“边际效益递减”原理应用于土壤污染调查和修复过程,从经济角度考察和研究布点密度设置问题在国内外

尚未见报道。

本研究从经济角度,基于边际效益递减原理在土壤污染详细调查阶段确定最佳的调查密度,以获得整体工作效益最大化。假设布点密度 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 与 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 之间 E_n 为线性变化,采用内插法对边际效益值为0的布点密度进行计算,见式(5)。

$$i_0 = i_5 + \frac{(0 - E_5)}{(E_{10} - E_5)} (i_{10} - i_5) \quad (5)$$

式(5)中, i_0 为边际效益为0时的布点密度网格步长, m ; i_5 为布点密度 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 时的网格步长, m ; i_{10} 为布点密度 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 时的网格步长, m ; E_5 为布点密度 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 时的边际效益,元; E_{10} 为布点密度 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 时的边际效益,元。

使用公式(5)计算,边际效益值为零时,无机污染、有机污染和复合污染地块的布点密度网格步长分别为 $5.91\text{ m}\times 5.91\text{ m}$ 、 $8.85\text{ m}\times 8.85\text{ m}$ 和 $8.85\text{ m}\times 8.85\text{ m}$,均位于 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 网格与 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 网格之间。因此,从各污染类型来看,如果希望通过增加布点密度提高整体收益, $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 网格是土壤污染状况详细调查最适宜的布点密度。

本研究基于所增加布点密度中仅有1个点位达标的假设做出的分析,对于存在连续、大范围土壤污染的地块,由于在其连续污染区域内部加密布点不会出现达标点位,无法通过减少修复土壤量而形成效益,因此布点密度增加不一定能产生边际效应。所以,对污染状况难以判断的地块,可采取分阶段的方式开展详细调查工作,先加密至边际效应最优的 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$,以查明污染分布情况;然后,对于孤立的超标点位,则可以进一步增加布点密度至 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$,以精准刻画污染土壤的空间分布,同时降低土壤污染修复治理的投入,以取得良好的环境效益和经济效益。

3 结论

(1)随着遗留工业用地布点密度增加,加大检测费用投入对土壤污染调查工作整体收益的产出不断减少,其变化规律符合边际效益递减原理。

(2)边际效益值为零时,无机污染、有机污染和复合污染地块的布点密度网格步长分别为 $5.91\text{ m}\times 5.91\text{ m}$ 、 $8.85\text{ m}\times 8.85\text{ m}$ 、 $8.85\text{ m}\times 8.85\text{ m}$,均位于 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 网格与 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 网格之间。

(3)遗留工业用地土壤污染详细调查布点密度

可以在国家标准规定的基础上适当增加布点密度, 10 m×10 m 网格可作为详细调查适宜的布点密度。

参考文献

- [1] 谢云峰, 曹云者, 杜晓明, 等. 土壤污染调查加密布点优化方法构建及验证[J]. 环境科学学报, 2016, 36(3): 981–989.
- [2] 郝易成, 师华定, 白中科, 等. 土壤污染调查加密布点区域优化及效率研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1036–1042.
- [3] THOMPSON M. Sense and traceability[J]. *Analyst*, 1996, 121(3): 285–288.
- [4] 丛鑫, 朱书全, 薛南冬, 等. 有机氯农药企业搬迁遗留场地土壤中污染物的垂向分布特征[J]. 环境科学研究, 2009, 22(3): 351–355.
- [5] 杜平, 张跃进, 杜晓明, 等. 某锌厂周围表层土壤及典型剖面镉污染特征[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5): 113–117.
- [6] 张娟, 范书凯, 杜晓明, 等. 浑蒲灌区土壤中多环芳烃的分布及生态响应[J]. 环境科学研究, 2014, 27(5): 505–512.
- [7] 郑一, 王学军, 李本纲, 等. 天津地区表层土壤多环芳烃含量的中尺度空间结构特征[J]. 环境科学学报, 2003, 23(3): 311–316.
- [8] JENKINS T F, GRANT C L, BRAR G S, et al. Sampling error associated with collection and analysis of soil samples at TNT-contaminated sites[J]. *Field Analytical Chemistry and Technology*, 1997, 1(3): 151–163.
- [9] GUSTAVSSON B, LUTHBOM K, LAGERKVIST A. Comparison of analytical error and sampling error for contaminated soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 138(2): 252–260.
- [10] ARGYRAKI A, RAMSEY M H, POTTS P J. Evaluation of portable X-ray fluorescence instrumentation for in situ measurements of lead on contaminated land[J]. *The Analyst*, 1997, 122(8): 743–749.
- [11] THEOCHAROPOULOS S P, WAGNER G, SPRENGART J, et al. European soil sampling guidelines for soil pollution studies[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, 264(1/2): 51–62.
- [12] JENKINS T F, GRANT C L, WALSH M E, et al. Coping with spatial heterogeneity effects on sampling and analysis at an hmx-contaminated antitank firing range[J]. *Field Analytical Chemistry and Technology*, 1999, 3(1): 19–28.
- [13] 谭海剑, 黄祖照, 宋清梅, 等. 粤港澳大湾区典型城市遗留地块土壤污染特征研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(4): 976–986.
- [14] 杨奇勇, 杨劲松, 余世鹏. 禹城市耕地土壤盐分与有机质的指示克里格分析[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2196–2202.
- [15] MEIRVENNE M V, GOOVAERTS P. Evaluating the probability of exceeding a site-specific soil cadmium contamination threshold[J]. *Geoderma*, 2001, 102(1): 75–100.
- [16] CASTRIGNANÒ A, GOOVAERTS P, LULLI L, et al. A geostatistical approach to estimate probability of occurrence of *Tuber melanosporum* in relation to some soil properties[J]. *Geoderma*, 2000, 98(3/4): 95–113.
- [17] LIN Y P, CHANG T K, SHIH C W, et al. Factorial and indicator Kriging methods using a geographic information system to delineate spatial variation and pollution sources of soil heavy metals[J]. *Environmental Geology*, 2002, 42(8): 900–909.
- [18] 史正涛, 刘新有, 黄英, 等. 基于边际效益递减原理的城市水安全评价方法[J]. 水利学报, 2010, 41(5): 545–552.
- [19] 周惠中. 微观经济学[M]. 上海: 上海人民出版社, 1999: 110–120.
- [20] 胡少华. 基于边际效益递减规律的城市土地利用效率阶段评价[J]. 科技资讯, 2019, 17(12): 189–194.
- [21] 李阳, 王珏. 基于边际效用函数的最佳人力资源管理模型研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(1): 106–112.
- [22] 龙爱华, 徐中民, 张志强, 等. 基于边际效益的水资源空间动态优化配置研究——以黑河流域张掖地区为例[J]. 冰川冻土, 2002, 24(4): 407–413.
- [23] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 2014[EB/OL]. (2014-04-17) [2021-07-10]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm.
- [24] MARCHANT B P, MCBRATNEY A B, LARK R M, et al. Optimized multiphase sampling for soil remediation surveys[J]. *Spatial Statistics*, 2013, 4: 1–13.
- [25] RAMSEY M, TAYLOR P, LEE J. Optimized contaminated land investigation at minimum overall cost to achieve fitness for purpose[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2002, 4(5): 809–814.
- [8] JOHNSEN D. L, EMAMIPOUR H, GUEST J. S, et al. Environmental and economic assessment of electrothermal swing adsorption of air emissions from sheet-foam production compared to conventional abatement techniques[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50: 1465–1472.
- [9] 羌宁, 史天哲, 缪海超. 挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 638–646.
- [10] 王志良, 周大顺, 胡志军, 等. 属性层次模型(AHM)在有机废气净化技术决策中的应用[J]. 环境工程, 2014(10): 90–95.
- [11] 王灿, 席劲瑛, 胡洪营, 等. 挥发性有机物控制技术评价指标体系初探[J]. *化工环保*, 2011, 31(1): 73–76.
- [12] 沈达, 刘金吉, 周飞, 等. 化工企业 VOCs 治理评估指标体系的建立与应用[J]. 环境监测与预警, 2020, 12(4): 51–55.
- [13] 中华人民共和国生态环境部. 排污许可证申请与核发技术规范 总则: HJ942—2018[S/OL]. (2018-02-08) [2020-11-20]. http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bzwb/pwxk/201802/t20180211_431302.shtml.
- [14] 上海市生态环境局. 关于印发《挥发性有机物治理设施运行管理技术规范(试行)》的通知 [EB/OL]. (2019-09-04)[2020-11-15]. http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202006/t20200624_785827.html.

(上接第 139 页)