



移动扫码阅读

李林,陈进斌,向林.多环芳烃污染场地高级氧化修复技术试验研究[J].能源环境保护,2021,35(3):18-23.

LI Lin, CHEN Jinbin, XIANG Lin. Experimental study on advanced oxidation restoration technology for a polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated site[J].Energy Environmental Protection, 2021, 35(3): 18-23.

多环芳烃污染场地高级氧化修复技术试验研究

李林¹, 陈进斌², 向林¹

(1.国家电投集团远达环保工程有限公司重庆科技分公司, 重庆 401122; 2.福建省环境保护设计院有限公司, 福建 福州 350012)

摘要:以重庆市某多环芳烃污染场地为研究对象,选用多种强氧化性自由基对土壤开展化学氧化修复技术研究,探讨了无机与有机复配药剂对土壤中多环芳烃去除率的影响。结果表明:在芬顿试剂、过氧化钙、高锰酸钾、活化过硫酸钠4种氧化体系中,活化过硫酸钠的氧化效果最佳,过硫酸钠的最佳投加量为15倍SOD;与单独投加活化过硫酸钠相比,活化过硫酸钠复配少量柠檬酸的氧化修复效果更好;在硫酸亚铁、过硫酸钠、柠檬酸的摩尔比为4:1:1、过硫酸钠投加量为15倍SOD、养护时间为6d的最优条件下,土壤中多环芳烃的去除率均超过92%,多环芳烃的含量均低于《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(试行)(GB 36600—2018)中的第一类用地筛选值。

关键词:多环芳烃;化学氧化;复配药剂;过硫酸钠;柠檬酸

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)03-0018-06

Experimental study on advanced oxidation restoration technology for a polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated site

LI Lin¹, CHEN Jinbin², XIANG Lin¹

(1.SPIC Yuanda EP Science & Technology Branch, Chongqing 401122, China; 2.Fujian Environmental-Protection Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350012, China)

Abstract: A polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated site in Chongqing was selected as the research object, and the chemical oxidation remediation technology was studied by using a variety of free radicals with strong oxidizing to remediate the contaminated soil. The effect of inorganic agents and organic compound agents on the removal rate of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil was discussed. The results showed that the oxidation effect of activated sodium persulfate was the best among the oxidation systems of Fenton reagent, calcium peroxide, potassium permanganate and activated sodium persulfate. The optimum dosage of sodium persulfate was 15 times of stoichiometric oxidant demand (SOD). Compared with adding activated sodium persulfate alone, the oxidation repair effect of activated sodium persulfate combined with a little citric acid was better. The removal rate of PAHs in soil was more than 92%, when the molar ratio of ferrous sulfate, sodium persulfate and citric acid was 4:1:1, the dosage of sodium persulfate was 15 times of SOD, and the curing time was 6 days. The content of residual PAHs was lower than the screening value of type I land use in soil environmental quality—risk control standard for soil contamination of development land (GB 36600—2018).

Key Words: PAHs; Chemical oxidation; Compound agents; Sodium persulfate; Citric acid

0 引言

土壤是社会经济可持续发展的物质基础,保护好土壤生态环境是推进生态文明建设的重要内容^[1]。多环芳烃通常以土壤为载体^[2],可通过多种途径进入人体,对人们的生命健康造成严重威胁^[3]。因此,有效解决土壤污染问题已迫在眉睫^[4]。

目前,多环芳烃污染土壤的修复技术主要包括水泥窑协同处置技术、热脱附技术和化学氧化技术等,其中化学氧化技术以强氧化性、周期短、见效快、稳定性好和经济等特点,深受人们关注。常见的氧化药剂有芬顿试剂、过氧化钙、高锰酸钾和过硫酸盐等,而过硫酸盐以对土壤微生物抑制作用小、反应产物友好和氧化效果较好等优势成为了人们研究的热点^[5-6]。其中,过硫酸盐主要是在 Fe^{2+} 、过氧化氢等活化作用下,使自身的—O—

O—断裂产生具有强氧化性的 $\text{SO}_4^{\cdot -}$ ^[7],从而达到降解土壤中多环芳烃的目的。

本工作以重庆市某多环芳烃污染场地为研究对象,开展化学氧化修复技术研究,选用羟基自由基、高锰酸根自由基、过硫酸根自由基多种氧化体系进行比选实验,并对其中效果较好的氧化体系进行无机-有机复配,利用多种药剂的协同作用达到高效氧化的目的。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自重庆某多环芳烃污染场地的表层(0~300 mm),现场取样后去除其中的石块、植物根茎、动植物残体、塑料等杂物,冷冻干燥机干燥,捣碎研磨过 20 mm 筛,混合均匀,装袋密封备用。供试土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

土壤类型	pH	有机质含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	含水率/ %	苯并[a]芘/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	苯并[a]蒽/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	苯并[b]荧蒽/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	二苯并[a,h]蒽/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
棕色砂土	8.72	33.40	5.64	12.50	14.70	22.0	1.80
筛选值*	—	—	—	0.55	5.50	5.50	0.55

注:《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(试行)(GB 36600—2018)^[8]中的第一类用地筛选值。

由表 1 可见,供试土壤的苯并[a]芘、苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒽、二苯并[a,h]蒽含量超标,其中,苯并[a]芘含量超标最为明显,高达标准值的 22.7 倍,其它污染因子均未检出。

1.2 试剂和仪器

试剂: $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 、 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 购自成都科隆化学制品有限公司; H_2O_2 购自成都金山化学试剂有限公司,均为分析纯; NaOH 、 $2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2$ 、 CaO_2 和 KMnO_4 购自重庆川东化工(集团)有限公司,均为分析纯。

仪器:ME802/02 型电子天平、S220-K 型 pH 计(上海右一仪器有限公司);7890A 型气相色谱仪(山东鲁南瑞虹化工仪器有限公司);7890A-5975C 型气相色谱质谱联用仪(上海硅仪生化科技有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 不同氧化药剂

称取 200 g 供试土壤于 500 mL 烧杯中,按表 2 分别加入 30 mL 不同浓度的芬顿试剂、过氧化钙、过硫酸钠和高锰酸钾溶液,然后搅拌 8~

10 min,使其充分接触反应。置于通风橱常温养护 6 d 后对供试土壤中的多环芳烃含量进行测定。

1.3.2 不同投加量

称取 200 g 供试土壤于 500 mL 烧杯中,按表 3 先加入 20 mL 不同浓度的过硫酸钠溶液,再加入 10 mL 硫酸亚铁溶液,然后搅拌 8~10 min,使其充分接触反应。置于通风橱常温养护 6 d 后对供试土壤中的多环芳烃含量进行测定。

1.3.3 不同投加方式

称取 200 g 供试土壤于 500 mL 烧杯中,按表 4 先加入一定量的过硫酸钠和硫酸亚铁颗粒,再加入 30 mL 清水;或先加入 20 mL 不同浓度的过硫酸钠溶液,再加入 10 mL 硫酸亚铁溶液,然后搅拌 8~10 min,使其充分接触反应。置于通风橱常温养护 6 d 后对供试土壤中的多环芳烃含量进行测定。

1.3.4 复配实验

称取 200 g 供试土壤于 500 mL 烧杯中,按表 5 先加入 10 mL 不同浓度的过硫酸钠溶液,接着加

入 10 mL 不同浓度的硫酸亚铁溶液,再加入 10 mL 不同浓度的柠檬酸溶液,然后搅拌 8~10 min,使其充分接触反应。置于通风橱常温养护 6 d 后对供试土壤中的多环芳烃含量进行测定。

1.4 分析方法

按照《土壤 pH 值的测定 电位法》(HJ 962—2018)^[9]测定供试土壤的 pH 值;采用重铬酸钾容量法^[10]测定供试土壤的有机质含量;采用烘干法测定供试土壤的含水率;按照《土壤和沉积物 半挥发性有机物的测定 气相色谱-质谱法》(HJ 834—2017)^[11]测定供试土壤的多环芳烃含量。

同时以《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(试行)(GB 36600—2018)^[8]中的第一类用地筛选值作为氧化修复效果评估标准。

2 结果与讨论

2.1 氧化药剂种类对多环芳烃氧化效果的影响

在文献研究的基础上,考察四种氧化药剂在各最优因素配比下,对供试土壤的氧化效果^[12-14]。其中,各氧化体系的最优实验因素比详见表 2,实验结果见图 1。

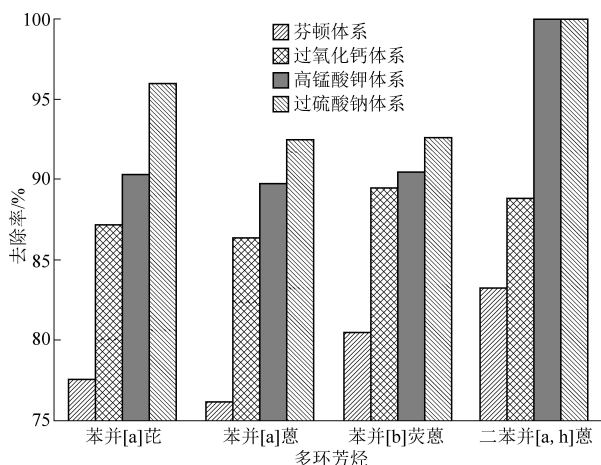
表 2 各氧化体系的最优实验因素配比

Table 2 The optimum proportion of experimental factors for each oxidation system

序号	氧化体系	氧化剂投加量/ (mol · kg ⁻¹)	反应温 度/℃	备注
1	空白	—	24~27	—
2	芬顿试剂	2.35	24~27	$v_{\text{过氧化氢}} : v_{\text{硫酸亚铁}} = 1 : 5$
3	过氧化钙	0.69	24~27	—
4	活化过硫酸钠	0.13	24~27	$n_{\text{过硫酸钠}} : n_{\text{硫酸亚铁}} = 2 : 1$
5	高锰酸钾	0.11	24~27	—

注:芬顿试剂为过氧化氢+硫酸亚铁;活化过硫酸钠为过硫酸钠+硫酸亚铁;每组实验均有平行实验,最后取平均值作为实验结果。

由图 1 可见,四种氧化药剂在最优条件下的氧化效果:活化过硫酸钠>高锰酸钾>过氧化钙>芬顿试剂,原因是 $\text{SO}_4^{\cdot -}$ 氧化多环芳烃的选择性能力更优,验证了 $\text{SO}_4^{\cdot -}$ 优先夺取非芳香 π 电子和芳香 π 电子(苯系)能力强于夺 $\alpha\text{-H}$ 和夺非 $\alpha\text{-H}$, $\text{HO}\cdot$ 夺取 $\alpha\text{-H}$ 的能力优于 $\text{SO}_4^{\cdot -}$ 。^[15] 其中,活化过硫酸钠对供试土壤中多环芳烃的去除率均在 92% 以上,且含量均低于筛选值。高锰酸钾对供试土壤中多环芳烃的去除率在 89.8%~100% 之间,过氧化钙对供试土壤中多环芳烃的去除率在 86.4%~89.5% 之间,芬顿试剂对供试土壤中多环



注:高锰酸钾和活化过硫酸钠对应的二苯并[a,h]蒽浓度低于检出限,图中用 100% 表示

图 1 四种氧化体系对多环芳烃的去除率

Fig.1 Removal rate of PAHs by four oxidation systems

芳烃的去除率在 76.2%~83.3% 之间,其中苯并[a]蒽和苯并[b]荧蒽含量均低于 5.5 mg/kg,二苯并[a,h]蒽含量均低于 0.55 mg/kg,而苯并[a]芘含量均高于 0.55 mg/kg。同时通过空白实验可知,在通风橱中对实验样品进行搅拌、养护等操作不会造成多环芳烃有明显的挥发和损失。

高锰酸钾的使用对环境有一定程度的负面影响,其氧化产物 MnO_2 对植物的发芽和生长有抑制作用^[16],同时过量的高锰酸钾会导致土壤板结;过氧化钙和 H_2O_2 具有一定的安全隐患,需妥善存放,并防止分解。因此,仅从氧化体系的氧化效果和环境安全性角度出发,在实际修复工程中用活化过硫酸钠体系是处置多环芳烃污染土壤的不二选择。后续实验选择硫酸亚铁活化过硫酸钠作为氧化剂,养护时间为 6 d。

2.2 投加量对多环芳烃氧化效果的影响

在实际工程项目中,少量的氧化剂不能达到修复土壤的目标,而过量的氧化剂会加大修复成本。为此,本研究引入氧化剂需求指数^[17]—SOD (Stoichiometric Oxidant Demand)。SOD 指土壤中的 PAHs 被氧化剂氧化为 CO_2 和 H_2O 时氧化剂的理论投加量,可通过化学反应方程计算而得。SOD 指数的计算公式如下:

$$V_{\text{SOD}} = M_{\text{ox}} \sum S_i n_i \quad (1)$$

上式中: V_{SOD} 指 1 kg 土壤中氧化剂的投加量, g/kg; M_{ox} 指氧化剂摩尔质量, g/mol; S_i 指化学反应方程式中氧化剂与某种 PAHs 的物质的量之比; n_i 指 1 kg 土壤中某种 PAHs 的物质的量, mol/kg。

以 SOD 指数为基准,分别研究氧化剂用量为 8、10、12、15 和 18 倍 SOD 时对供试土壤中多环芳烃的氧化效果,具体投加量详见表 3。其中,过硫酸钠的具体投加量详见表 2,实验结果见图 2。

表 3 过硫酸钠投加量对供试土壤中多环芳烃去除率的影响

Table 3 Effect of sodium persulfate dosage on the removal rate of PAHs in tested soil					
序号	SOD 的 倍数	投加量/ (mol · kg ⁻¹)	$n_{\text{氧化剂}} : n_{\text{活化剂}}$	反应温 度/℃	备注
1	8	0.074	2 : 1	24~27	
2	10	0.092	2 : 1	24~27	
3	12	0.111	2 : 1	24~27	
4	15	0.138	2 : 1	24~27	
5	18	0.166	2 : 1	24~27	

注:每组实验均有平行实验,最后取平均值作为实验结果。

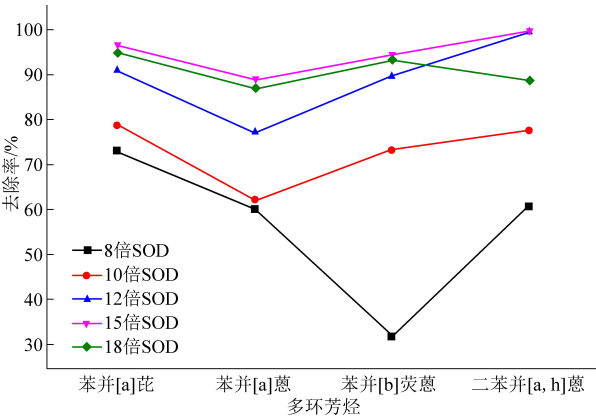


图 2 投加量对多环芳烃去除率的影响

Fig.2 Effect of dosage on the removal rate of PAHs

由图 2 可见,硫酸亚铁活化过硫酸钠能在一定程度上提高土壤中多环芳烃的去除率,且随着投加量的增加而逐渐增大。土壤中多环芳烃的去除率出现“先迅速上升后缓慢上升,继而再缓慢下降”的情况,原因是由于土壤中有有机质或其他杂质消耗了一些 $\text{SO}_4 \cdot$ 以及发生了一些副反应。当投加量低于 15 倍 SOD 时,土壤中多环芳烃的去除率随之上升;而当大于 15 倍 SOD 时,多环芳烃的去除率随之下降,可能是由于过量的过硫酸钠造成 $\text{SO}_4 \cdot$ 发生的副反应增加,从而导致多环芳烃的氧化效果降低。后续实验选择投加量为 15 倍 SOD 的过硫酸钠,养护时间为 6 d。

2.3 投加方式对多环芳烃氧化效果的影响

有学者研究过序批式投加氧化剂可以提高氧化剂的氧化效果^[18]。为此,本文选用不同投加方式对供试土壤进行氧化处置。其中,实验设计详

见表 4,实验结果见图 3。

表 4 投加方式对供试土壤中多环芳烃去除率的影响

Table 4 Effect of dosing methods on the removal rate of PAHs in tested soil				
序号	过硫酸钠 投加量/ (mol · kg ⁻¹)	$n_{\text{氧化剂}} : n_{\text{活化剂}}$	反应温 度/℃	备注
1	0.138	2 : 1	24~27	固体一次投加
2	0.138	2 : 1	24~27	液体一次投加
3	0.069	2 : 1	24~27	液体等量二次投加
4	0.046	2 : 1	24~27	液体等量三次投加

注:每组实验均有平行实验,最后取平均值作为实验结果。

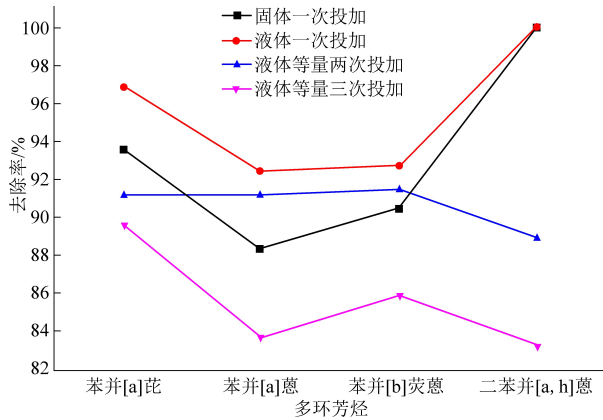


图 3 投加方式对多环芳烃去除率的影响

Fig.3 Effect of dosing methods on the removal rate of PAHs

由图 3 可见,多环芳烃的氧化效果:液体一次性投加>固体一次性投加,主要原因是氧化剂与土壤的接触反应更加充分。常规来说,分批式投加氧化剂能提高多环芳烃的氧化效果,而在本研究中,多环芳烃的氧化效果:液体一次性投加>液体两次投加>液体三次投加,可能是由于分批式投加时,反应初期氧化剂浓度不足, $\text{SO}_4 \cdot$ 生成量受到阻碍,造成氧化反应的助推力大大减弱,从而致使氧化效果减弱^[18],而液体一次性投加能保证氧化剂所需的浓度,因此氧化效果更好。

2.4 柠檬酸-硫酸亚铁-过硫酸钠复配药剂对多环芳烃氧化效果的影响

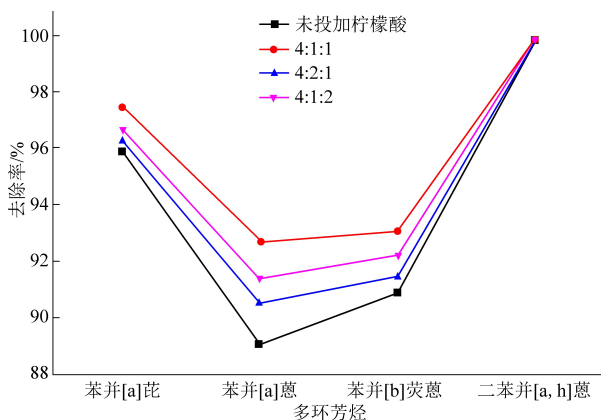
柠檬酸是目前最常用络合剂,能有效吸附土壤中的多环芳烃,并提高土壤中多环芳烃的生物可利用性^[19]。本实验通过外加入少量柠檬酸与硫酸亚铁活化过硫酸钠(15 倍 SOD)进行无机-有机复配,对供试土壤进行氧化处置。其中,实验设计详见表 5,实验结果见图 4。

表 5 复配药剂对供试土壤中多环芳烃去除率的影响

Table 5 Effect of compound agents on the removal rate of PAHs in tested soil

序号	过硫酸钠 投加量/ (mol · kg ⁻¹)	$n_{\text{氧化剂}} : n_{\text{活化剂}} : n_{\text{络合剂}}$	反应温 度/℃	备注
1	0.138	2 : 1	24~27	未投加络合剂
2	0.138	4 : 1 : 1	24~27	-
3	0.138	4 : 2 : 1	24~27	-
4	0.138	4 : 1 : 2	24~27	-

注:每组实验均有平行实验,最后取平均值作为实验结果。



注:图中比例从左到右依次代表着硫酸钠、硫酸亚铁、柠檬酸

图 4 不同配比的柠檬酸、硫酸亚铁、过硫酸钠对多环芳烃去除率的影响

Fig.4 Effect of different proportions of citric acid, ferrous sulfate and sodium persulfate on the removal rate of PAHs

由图 4 可见,将少量柠檬酸与硫酸亚铁、过硫酸钠复配投加于供试土壤中,可进一步提高土壤中多环芳烃的去除率,氧化修复效果优于单独投加硫酸亚铁和过硫酸钠,原因是柠檬酸一方面增加污染物的溶解度,另一方面将 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} , 并且与 Fe^{2+} 形成螯合物,阻止其与 $\text{SO}_4^{\cdot -}$ 反应^[20-21]。过硫酸钠、硫酸亚铁和柠檬酸的摩尔比为 4 : 1 : 1 时,供试土壤的氧化效果最佳,多环芳烃的去除率提高了 1.6%~3.7%,主要原因是 Fe^{2+} 能最大程度地激活过硫酸钠产生 $\text{SO}_4^{\cdot -}$, 从而最大限度地氧化土壤中的多环芳烃。

3 结论

以重庆市某多环芳烃污染场地为研究对象,比选了羟基自由基、高锰酸根自由基、过硫酸根自由基的氧化效果,优化了过硫酸根自由基的投加量及投加方式,同时开展了过硫酸根自由基—柠檬酸的复配实验。结论如下:

(1) 在最优因素配比下,芬顿试剂、过氧化钙、

高锰酸钾和活化过硫酸钠 4 种氧化体系均能在一定程度上降低土壤中的多环芳烃含量,且活化过硫酸钠氧化体系的氧化效果最佳。

(2) 硫酸亚铁活化过硫酸钠的投加量为 15 倍 SOD 时,土壤中多环芳烃的去除率最高。

(3) 硫酸亚铁活化过硫酸钠与少量柠檬酸复配投加的氧化修复效果优于单独投加硫酸亚铁活化过硫酸钠。

(4) 选用氧化效果较好的硫酸亚铁活化过硫酸钠与少量柠檬酸复配作为氧化剂,在过硫酸钠投加量为 15 倍 SOD、三者摩尔比为 4 : 1 : 1、养护时间为 6 d 的最优条件下,供试土壤中多环芳烃的去除率均达 92% 以上,多环芳烃的含量低于 GB 36600—2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(试行)中的第一类用地筛选值。

参考文献

- [1] 孟华. 太湖流域水质改善的政策影响因素分析 [J]. 福建农林大学学报 (哲学社会科学版), 2019, 22 (2): 60-68.
- [2] Pajpara R K, Dudhagara D R, Bhatt J K, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at the Gulf of Kutch, Gujarat, India: Occurrence, source apportionment, and toxicity of PAHs as an emerging issue [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 119 (2): 231.
- [3] 曹文文, 张振江, 赵若杰, 等. 室内空气 PM_{10} 中 PAHs 对老年人的致癌风险评价——以天津市某社区为例 [J]. 中国环境科学, 2013, 33 (2): 345-350.
- [4] 肖鹏飞, 姜思佳. 活化过硫酸盐氧化法修复有机污染土壤的研究进展 [J]. 化工进展, 2018, 37 (12): 4862-4873.
- [5] Tsitonaki A, Smets B F, Bjerg P L. Effects of heat-activated persulfate oxidation on soil microorganisms [J]. Water Research, 2008, 42 (2): 1013-1022.
- [6] 李林, 陈进斌, 李紫龙, 等. 过硫酸盐在多环芳烃污染土壤的研究进展 [J]. 广州化工, 2020, 48 (21): 22-23.
- [7] 王兵, 李娟, 莫正平, 等. 基于硫酸自由基的高级氧化技术研究及应用进展 [J]. 环境工程, 2012, 30 (4): 53-57.
- [8] 生态环境部土壤环境管理司, 生态环境部科技标准司. 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准 (试行): GB 36600—2018 [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019: 4.
- [9] 生态环境部环境监测司, 生态环境部科技标准司. 土壤 pH 值的测定 电位法: HJ 962—2018 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2018: 1-4.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 34-38.
- [11] 生态环境部环境监测司, 生态环境部科技标准司. 土壤和沉积物 半挥发性有机物的测定 气相色谱-质谱法: HJ834—2017 [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2017:

- 1-11.
- [12] 张杨, 李森, 张宏玲, 等. 不同氧化体系去除污染土壤中多环芳烃的对比研究 [J]. 浙江农业学报, 2018, 30 (10): 1748-1754.
- [13] 占升, 郑义, 李森, 等. 不同氧化剂活化过硫酸钠对土壤中多环芳烃降解的影响 [J]. 浙江农业学报, 2017, 29 (1): 129-136.
- [14] 周金倩, 马建立, 商晓甫, 等. 过硫酸盐氧化修复多环芳烃污染土壤的研究 [J]. 环境工程技术学报, 2020, 10 (3): 482-486.
- [15] 刘衡锡, 张乃东, 朱正江. 硫酸自由基在水处理中的反应特性 [J]. 科学通报, 2012, 57 (36): 3493-3499.
- [16] 刘荣, 刘方, 商正松. 不同类型锰矿废渣浸提条件下重金属释放特征及其对植物种苗生长的影响 [J]. 环境科学导刊, 2011, 30 (1): 5-9.
- [17] Silva P T, Silva V L, Neto B B, et al. Phenanthrene and pyrene oxidation in contaminated soils using Fenton's reagent [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161 (2): 967-973.
- [18] 丁丽, 曾琪静, 文方, 等. 药剂配比及投加方式对 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8/\text{FeSO}_4/\text{CA}$ 修复石油污染土壤的影响 [J]. 应用化工, 2019, 48 (7): 1540-1547.
- [19] Ling W, Ren L, Gao Y, et al. Impact of low-molecular-weight organic acids on the availability of phenanthrene and pyrene in soil [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41 (10): 2187-2195.
- [20] Ryland B L, S tahl S S. Practical aerobic oxidations of alcohols and amines with homogeneous copper/TEMPO and related catalyst systems [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2014, 53 (34): 8824-8838.
- [21] 徐源洲, 张力浩, 方成, 等. 优化 SO_4^{2-} ·高级氧化技术修复 PAHs 复合污染土壤 [J]. 中国环境科学, 2020, 40 (3): 1183-1190.

(上接 17 页)

- vents formed between choline chloride and carboxylic acids: Versatile alternatives to ionic liquids. [J]. Journal of the American Chemical Society, 2004, 126 (29): 9142-9147.
- [11] 赵泽馨, 纪颖鹤, 刘晓妹, 等. 基于低共熔溶剂的萃取分离技术及其应用研究进展 [J]. 色谱, 2021, 39 (2): 152-161.
- [12] 吴彦瑜, 周少奇, 覃芳慧, 等. 响应面法优化 Fenton 处理难降解反渗透垃圾浓缩渗滤液 [J]. 环境工程学报, 2010, 4 (11): 2494-2498.
- [13] 王方舟, 刘雪瑜, 肖书虎, 等. 污泥磷形态及响应面分析法优化释磷试验 [J]. 环境工程技术学报, 2021, 11 (1): 151-157.
- [14] 韩伟, 彭茹洁, 赵少甫. PB 实验-响应面优化白及多糖的提取工艺研究 [J]. 徐州工程学院报 (自然科学版), 2018, 33 (4): 23-24.
- [15] 刘岚, 张平安, 沈玥, 等. 响应面法优化淀粉/豆渣复合凝胶 [J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12 (4): 1313-1319.
- [16] 谷薇薇. Box-Behnken 响应面法优化芒果苷凝胶处方的研究 [J]. 中药材, 2019, 42 (10): 2363-2366.
- [17] 姜盛基, 王刚, 严亚萍, 等. 响应面法优化重金属螯合絮凝剂 MAAPAM 去除水中 Cu (II) [J]. 环境科学与技术, 2020, 43 (11): 124-130.