

不同材料复合添加对土壤铬形态的影响

游玉华^{1,2}, 金冬冬¹, 陆晓辉^{1,2}, 王济^{1,2}

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550001)

摘要:以铬污染黄壤为研究对象, 选择有机材料(泥炭)、pH 值调节剂(沸石)、生物炭(鸡粪)3 种不同种类的土壤重金属污染改良剂, 采用正交试验 $L_9(3^4)$ 设计和室内盆栽试验, 考察不同复合材料组对土壤中重金属铬形态、pH 值、有机质含量的影响。结果表明: 沸石的添加提高了土壤 pH 值、有机质含量, 增加了土壤可还原态、可氧化态铬含量; 鸡粪的添加通过提高土壤 pH 值从而增加土壤可还原态铬的含量; 泥炭的添加提高了土壤有机质含量、土壤可氧化态铬含量, 降低了土壤可交换态铬含量。

关键词: 铬形态; 泥炭; 沸石; 鸡粪生物炭; 土壤改良; 黄壤

中图分类号: X53 文献标志码: B 文章编号: 1006-2009(2024)02-0079-05

Effect of Composite Addition of Different Materials on Chromium Morphology in Soil

YOU Yuhua^{1,2}, JIN Dongdong¹, LU Xiaohui^{1,2}, WANG Ji^{1,2}

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: Taking chromium polluted yellow soil as the research object, three soil amendments for controlling heavy metal pollution, including organic material (peat), pH regulator (zeolite) and biochar (chicken manure), were selected and their effects on chromium morphology, pH value and the content of organic matter in soil were investigated by orthogonal test $L_9(3^4)$ and indoor pot experiments. The results showed that the addition of zeolite increased pH value, the content of organic matter, reducible chromium and oxidizable chromium in soil. The addition of chicken manure increased pH value and thus increased the content of reducible chromium in soil. The addition of peat increased the content of organic matter and oxidizable chromium, but decreased the content of exchangeable chromium in soil.

Key words: Chromium morphology; Peat; Zeolite; Chicken manure biochar; Soil amelioration; Yellow earth

土壤中的铬污染已成为严重的全球环境问题^[1]。铬进入土壤后与土壤中各种固体物质经过一系列复杂的物理化学反应, 会形成不同的结合形态, BCR (European Community Bureau of Reference) 将重金属形态分为残渣态、酸溶态 (如可交换态)、可还原态、可氧化态 4 种。由于不同结合态的铬毒性和生物利用性不同, 单从价态上不能完全反映土壤铬的特性, 须对不同结合态的铬进行分析。

黄壤作为贵州省主要土壤类型之一, 农业种植范围广, 其质量与农产品安全生产息息相关^[2-7]。对贵州省贵阳市乌当、白云、花溪及清镇 4 个区域

收稿日期: 2023-02-27; 修订日期: 2024-02-18

基金项目: 贵州省科技计划基金资助项目 (黔科合支撑 [2017] 2580 号)

作者简介: 游玉华 (1976—), 女, 江西南昌人, 高级实验师, 硕士, 主要从事环境科学理论研究与实验室教学管理工作。

菜园土壤重金属污染现状进行调查与分析,发现污染问题突出,而有关不同复合材料组合修复的研究则相对较少。今采用正交试验 $L_9(3^4)$ 设计,选择有机材料(泥炭)、pH 值调节剂(沸石)、生物炭(鸡粪)3种不同种类的土壤重金属污染改良剂,开展铬污染土壤调控修复试验,研究不同复合材料组对土壤重金属铬形态、pH 值、有机质含量的影响,以期对铬污染黄壤的安全利用与治理修复提供支撑。

1 材料与方 法

1.1 主要仪器与材料

ZEEnit 700P 型火焰石墨炉原子吸收光谱仪,德国耶拿分析仪器股份公司。

供试土壤为黄壤,采自贵州省贵阳市花溪区湖潮乡杨柳寨,采样点(E106°32'49", N26°24'23")海拔 1 202 m。土样经自然风干,除去石块、动植物残体等,过 1 mm 筛后混合均匀,备用。供试土壤样品中铬质量比为 0.1 mg/kg,有机质质量比为 26.31 g/kg, pH 值为 4.66。

泥炭,贵阳市花溪区阳光水乡洛平;沸石(分析纯),鸡粪过 100 目备用,贵州省环科院。其中,泥炭中铬质量比为 0.1 mg/kg,有机质质量比为 90 g/kg, pH 值为 5.98,腐殖酸质量分数为 54.83%,不被水解物质量分数为 30.10%;沸石的 pH 值为 7.82,粒径为 1 mm ~ 2 mm,相对密度为 2.0 g/cm³ ~ 2.6 g/cm³,含泥量 ≤ 1.0%,容重 1.6 g/cm³,水分质量分数 ≤ 1.5%,钠离子交换能力 ≥ 800 g/cm³;鸡粪中铬质量比为 0.1 mg/kg, pH 值为 6.96,比表面积为 147.78 m²/g。萝卜种子(*Raphanus sativus* L.),白菜种子(*Brassica rapa* var. *glabra* Regel),贵阳市花鸟市场购买。乙酸铬(分析纯),成都金山化学试剂有限公司。

1.2 试验方法

采用 $L_9(3^4)$ 正交试验设计,选择沸石(A)、泥炭(B)、鸡粪(C)3个调控因素,每个因素设置 3 个水平,正交试验设计见表 1(试验组 1 为对照组)。

称取风干土 100 g,置于 500 mL 玻璃瓶中,按表 1 向土壤中添加不同物料并充分混匀,铬(Ⅲ)(乙酸铬)加入量为 300 mg/kg,加入去离子水使土壤含水量达 65%,置于恒温箱中(25 ± 1) °C 恒温培养。培养过程中每隔 1 d 向各试验组添加去离子水,使得土壤含水量维持在 65%。分别在培养的第 10 天、20 天、30 天、40 天、50 天和 60 天采

表 1 正交试验设计

Table 1 Design of orthogonal test

编号	A w/ (g · kg ⁻¹)	B w/%	C w/ (g · kg ⁻¹)	试验组合
1	0	0	0	A ₁ B ₁ C ₁
2	0	2.5	1.5	A ₁ B ₂ C ₂
3	0	5	3	A ₁ B ₃ C ₃
4	2	2.5	3	A ₂ B ₂ C ₃
5	2	5	0	A ₂ B ₃ C ₁
6	2	0	1.5	A ₂ B ₁ C ₂
7	4	5	1.5	A ₃ B ₃ C ₂
8	4	0	3	A ₃ B ₁ C ₃
9	4	2.5	0	A ₃ B ₂ C ₁

集样品,每次每个试验组收集一个玻璃瓶内土壤样品,50 °C 下烘干,全部过 1 mm 筛,部分过 100 目筛,供化学分析。

1.3 化学分析

弱酸可交换态铬、可还原态铬、可氧化态铬和残渣态铬^[8]采用 BCR 三级四步提取法处理测定;土壤 pH 值^[9]采用电位法测定;土壤有机质^[9]采用重铬酸钾氧化外加热法测定。

1.4 数据处理与统计分析

运用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对数据进行制图和统计分析;通过单因素方差分析(ANOVA)比较不同材料复合添加对土壤铬形态含量、pH 值和有机质含量的影响。通过多因素方差分析(General linear model)和多重比较(LSD),探讨不同添加材料对土壤铬形态的影响。显著性水平设定为 $P=0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 土壤不同形态铬含量动态变化及差异性分析

由不同形态铬含量的动态分析发现:各试验组土壤弱酸可交换态铬含量在 10 d ~ 30 d 内达最低,然后升高,最后趋于稳定。在整个培养过程中,各添加物料组(除试验组 6、7、8 外)土壤中弱酸可交换态铬含量均低于对照组,试验组 3 土壤弱酸可交换态铬含量波动不大,且一直处于较低水平;可还原态铬含量随时间变化波动不大,试验组 4、6、8 可还原态铬含量高于或接近对照组,其他试验组可还原态铬含量明显低于对照组;可氧化态铬的含量随时间变化规律不明显,其含量总体高于对照组,试验组 7 又高于其他试验组;残渣态铬含量随

时间变化规律也不明显, 试验组 2、3 残渣态铬含量与对照组差异不明显, 而试验组 4、5、6、7、8、9 则总体上低于对照组。

将土壤中不同形态铬含量按正交试验设计做多因素方差分析, 结果见表 2。由表 2 可知, 泥炭显著影响土壤弱酸可交换态铬含量 ($P < 0.05$), 沸石、鸡粪影响不显著 ($P > 0.05$)。多重比较发现, 泥炭 3 个水平间存在显著差异, 土壤弱酸可交换态铬含量大小顺序为 $B_3 < B_2 < B_1$, 即添加泥炭可显著降低土壤弱酸可交换态铬含量, 且添加量为 5% (水平 3) 较 2.5% (水平 2) 作用效果更好。

上述 3 种因素均显著影响土壤可还原态铬含量 ($P < 0.05$)。沸石 3 个水平间存在显著差异, 大小顺序为 $A_1 < A_3 < A_2$, 表明添加沸石可显著提高土壤可还原态铬含量, 且添加量为 2 g/kg (水平 2) 作用效果好于 4 g/kg (水平 3)。泥炭 3 个水平间差异大小顺序为 $B_3 < B_2 < B_1$, 表明添加泥炭可显著降低土壤可还原态铬含量, 且添加量为 5% (水平 3) 作用效果好于 2.5% (水平 2)。鸡粪添加第 1、2 水平与第 3 水平间存在的差异为 $C_1、C_2 < C_3$, 表明鸡粪添加量为 3 g/kg 可显著提高土壤可还原态铬含量。

沸石、泥炭两种因素显著影响土壤可氧化态铬含量 ($P < 0.05$), 鸡粪因素影响不显著 ($P > 0.05$)。

表 2 土壤不同形态铬含量多因素方差分析^①

Table 2 Multi-factor analysis of variance for the content of different forms of chromium in soil^①

铬形态	统计值	因素		
		A	B	C
弱酸可交换态	<i>P</i>	0.508	0.000*	0.760
	水平 1	13.23a	18.80c	14.15a
	水平 2	13.39a	12.30b	13.91a
	水平 3	14.64a	10.16a	13.21a
可还原态	<i>P</i>	0.000*	0.000*	0.001*
	水平 1	7.59a	14.12c	8.49a
	水平 2	10.56c	8.16b	9.25a
	水平 3	9.74b	5.62a	10.15b
可氧化态	<i>P</i>	0.000*	0.000*	0.927
	水平 1	131.47a	126.89a	137.85a
	水平 2	140.34b	140.68b	138.54a
	水平 3	143.46b	147.71c	138.88a
残渣态	<i>P</i>	0.301	0.681	0.975
	水平 1	136.25a	140.42a	138.41a
	水平 2	137.95a	137.69a	139.08a
	水平 3	141.67a	137.76a	138.38a

①同列字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$), * 表示显著相关 ($P < 0.05$)。

沸石 3 个水平间存在显著差异, 大小顺序为 $A_1 < A_2、A_3$, 表明添加沸石可显著提高土壤可氧化态铬含量, 添加量为 4 g/kg (水平 3) 与 2 g/kg (水平 2) 差异不明显。泥炭 3 个水平间存在的差异大小顺序为 $B_1 < B_2 < B_3$, 表明添加泥炭可显著提高土壤可氧化态铬含量, 且添加量为 5% (水平 3) 作用效果好于 2.5% (水平 2)。

不同试验组土壤残渣铬含量差异多因素方差表明, 沸石、泥炭、鸡粪 3 个因素对土壤残渣态铬含量影响不显著 ($P > 0.05$)。

综上所述得出结论: ①泥炭是降低土壤可交换态铬含量的显著因素, 其添加量为 5% 时对降低土壤可交换态铬效果最佳。复合材料组 3 (沸石添加量为 0、泥炭质量分数为 5%、鸡粪添加量为 3 g/kg) 是降低土壤可交换态铬含量的最佳组合, 进而降低其生物有效性^[10]。②沸石、泥炭、鸡粪均是影响土壤可还原态铬含量的显著因素, 沸石 2 g/kg、鸡粪 3 g/kg 的添加对提高土壤可还原态铬效果最佳, 当泥炭质量分数为 5% 时对降低土壤可还原态铬含量效果最佳。③沸石、泥炭是提高土壤可氧化态铬含量的显著因素, 当沸石添加量为 2 g/kg 或 4 g/kg、泥炭添加量为 5% 时对提高土壤可氧化态铬含量效果最佳。复合材料组 7 (沸石添加量为 4 g/kg、泥炭质量分数为 5%、鸡粪添加量为 1.5 g/kg) 是提高土壤可氧化态铬含量的最佳组合^[11-12]。④复合材料添加对土壤残渣态铬影响不显著。

2.2 土壤 pH 值、有机质含量的动态变化及差异性分析

不同复合材料组对土壤 pH 值随时间的动态变化: 在第 10 ~ 20 天时基本稳定, 培养至第 20 ~ 30 天时 pH 值显著下降, 在 30 d 以后基本趋于稳定。各试验组土壤 pH 值在各时间段均高于对照组, 试验组 8 各时间段 pH 值总体均高于其他试验组。不同复合材料组对土壤有机质含量随时间变化规律不明显, 各试验组有机质含量总体上均高于对照组, 且试验组 7 有机质含量总体上高于其他试验组。

土壤 pH 值、有机质多因素方差分析结果见表 3。由表 3 可知, 沸石、鸡粪两因素显著影响土壤 pH 值 ($P < 0.05$), 泥炭影响不显著 ($P > 0.05$)。沸石 3 个水平间存在显著差异, 大小顺序为 $A_1 < A_2 < A_3$, 表明添加沸石可以显著提高土壤 pH 值, 且

表 3 土壤 pH 值、有机质多因素方差分析^①Table 3 Multi-factor analysis of variance for pH value and organic matter in soil^①

指标	统计值	因素		
		A	B	C
pH 值	<i>P</i>	0.000*	0.706	0.021*
	水平 1	4.94a	5.23a	5.05a
	水平 2	5.27b	5.17a	5.16ab
	水平 3	5.35c	5.15a	5.34b
有机质	<i>P</i>	0.014*	0.000*	0.160
	水平 1	38.19a	29.23a	39.26a
	水平 2	41.23b	38.73b	42.11a
	水平 3	42.55b	54.02c	40.60a

①同列字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$), * 表示显著相关 ($P < 0.05$)。

4 g/kg 添加量 (第 3 水平) 作用效果好于 2 g/kg 添加量 (第 2 水平)。鸡粪第 1 和第 3 添加水平间存在显著差异, 大小顺序为 $C_1 < C_3$, 说明鸡粪添加可以提高土壤 pH 值, 当添加量为 3 g/kg 水平时能显著提高土壤 pH 值。

沸石、泥炭是影响土壤有机质含量的显著因素 ($P < 0.05$), 鸡粪影响不显著 ($P > 0.05$)。沸石 3 个水平间大小顺序为 $A_1 < A_2, A_3$, 表明添加沸石显著提高了土壤有机质含量, 且 2 g/kg 添加量 (第 2 水平)、4 g/kg 添加量 (第 3 水平) 对提高土壤有机质含量效果均较好。泥炭 3 个水平间存在显著差异, 大小顺序为 $B_1 < B_2 < B_3$, 说明添加泥炭显著提高了土壤有机质含量, 且 5% 添加对提高土壤有机质含量效果最佳。

综上, 沸石、鸡粪是提高土壤 pH 值的显著因素, 且当沸石添加量水平为 4 g/kg、鸡粪的添加量水平为 3 g/kg 时对提高土壤 pH 值的效果最佳。复合材料添加组 8 (沸石添加量 4 g/kg、泥炭质量分数为 0、鸡粪添加量为 3 g/kg) 是提高土壤 pH 值的最佳材料组合。通过提高土壤 pH 值这一方式可降低土壤中可交换态铬的含量, 使土壤可氧化态铬含量提高, 可氧化态铬的生物可利用性不高, 从而降低土壤铬的有效性^[13-14]。

沸石、泥炭是提高土壤有机质的显著因素, 当沸石添加量为 2 g/kg 或 4 g/kg、泥炭添加量为 5% 水平时对提高土壤有机质含量效果最佳。复合材料组 7 (沸石添加量 4 g/kg、泥炭质量分数为 5%、鸡粪添加量为 1.5 g/kg) 是提高土壤有机质含量的最佳组合。各试验组有机质含量相比对照组均升

高, 随着有机质含量的提高使得土壤可交换态铬含量降低^[15]。

2.3 不同试验组白菜吸收铬差异性分析

不同试验组白菜中铬含量差异多因素方差分析见表 4。沸石、鸡粪是影响小白菜吸收铬的显著因素 ($P < 0.05$), 泥炭因素影响不显著 ($P > 0.05$)。沸石添加水平 1、2 与 3 间存在显著降低小白菜对铬的吸收量。鸡粪 3 个水平间存在显著差异, 大小顺序为 $C_3 < C_2 < C_1$, 即当鸡粪添加量为 3 g/kg 时, 对降低小白菜吸收铬的效果最佳。综上, 沸石、鸡粪是降低小白菜吸收铬的显著因素, 且当沸石添加量为 4 g/kg 水平、鸡粪生物炭添加量为 3 g/kg 水平时对降低小白菜吸收铬效果最佳。

2.4 不同试验组萝卜吸收铬差异性分析

不同试验组萝卜中铬含量差异多因素方差分析见表 4, 沸石、泥炭、鸡粪 3 个因素均显著影响萝卜根、叶对铬的吸收量 ($P < 0.05$)。沸石添加水平 2、3 与 1 间存在显著差异, 大小顺序为 $A_2, A_3 < A_1$, 表明沸石添加量为 2 g/kg、4 g/kg 均可显著降低萝卜根、叶中的铬含量。泥炭添加水平 1、3 与 2 间存在显著差异, 大小顺序为 $B_2 < B_3, B_1$, 表明泥炭添加量为 2.5% 时可显著降低萝卜根、叶中的铬含量。在萝卜根中鸡粪添加水平 2、3 与 1 间存在显著差异, 大小顺序为 $C_3, C_2 < C_1$, 表明鸡粪添加量为 1.5 g/kg、3 g/kg 时可显著降低萝卜根中的铬含量; 在萝卜叶中鸡粪 3 个水平间存在显著差异, 大小顺序为 $C_3 < C_2 < C_1$, 表明鸡粪可显著降低萝卜叶中的

表 4 盆栽植物吸收铬多因素方差分析^①Table 4 Multi-factor analysis of variance for chromium uptake by potted plants^①

蔬菜种类	统计值	因素		
		A	B	C
小白菜	<i>P</i>	0.007*	0.084	0.000*
	水平 1	0.65b	0.55a	0.68c
	水平 2	0.60b	0.56a	0.59b
	水平 3	0.51a	0.63a	0.48a
萝卜 (根)	<i>P</i>	0.035*	0.005*	0.000*
	水平 1	1.52b	1.50b	1.66b
	水平 2	1.29a	1.18a	1.25a
	水平 3	1.30a	1.43b	1.19a
萝卜 (叶)	<i>P</i>	0.000*	0.000*	0.000*
	水平 1	1.31b	1.32b	1.38c
	水平 2	0.74a	0.99a	1.05b
	水平 3	1.28b	1.02a	0.90a

①同列字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$), * 表示显著相关 ($P < 0.05$)。

铬含量,且添加量为3 g/kg(水平3)作用效果好于1.5 g/kg(水平2)。

3 结语

在了解土壤理化性质的基础上,通过室内动态培养试验,探讨不同材料复合添加对降低土壤铬有效性的最佳组合,并通过盆栽试验,验证了不同复合材料对小白菜、萝卜吸收铬的影响。结果表明,沸石、泥炭、鸡粪均是降低萝卜吸收铬的显著因素,且当沸石添加量为2 g/kg、4 g/kg,泥炭添加量为2.5%,鸡粪添加量为3 g/kg时对降低萝卜吸收铬效果最佳。上述研究初步阐明了不同复合材料对重金属铬形态及有效性的影响,下一步将继续研究其他改良剂复合添加对不同重金属污染土壤及其他蔬菜的影响,验证其应用的广泛性。

[参考文献]

- [1] SHAHID M, SHAMSHAD S, RAFIQ M, et al. Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: a review[J]. *Chemosphere*, 2017, 178: 513-533.
- [2] XU X M, LUO P, LI S H, et al. Distributions of heavy metals in

rice and corn and their health risk assessment in Guizhou Province[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2022, 108(5): 926-935.

- [3] ZHANG Y X, WU Y, SONG B Z, et al. Spatial distribution and main controlling factor of cadmium accumulation in agricultural soils in Guizhou, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424(Pt A): 127308.
- [4] O'DELL R, SILK W, GREEN P, et al. Compost amendment of Cu-Zn minespoil reduces toxic bioavailable heavy metal concentrations and promotes establishment and biomass production of *Bromus carinatus* (Hook. and Arn.) [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 148(1): 115-124.
- [5] HAIDOUTI C. Inactivation of mercury in contaminated soils using natural zeolites[J]. *Science of the Total Environment*, 1997, 208(1/2): 105-109.
- [6] GARCIA-SANCHEZ A, ALASTUEY A, QUEROL X. Heavy metal adsorption by different minerals: application to the remediation of polluted soils[J]. *Cell*, 1999, 242(1/3): 179-188.
- [7] 刘霞, 刘树庆. 土壤重金属形态分布特征与生物效应的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(Z1): 407-410.
- [8] 丁疆华, 温琰茂, 舒强. 土壤环境中镉、锌形态转化的探讨[J]. *城市环境与城市生态*, 2001, 14(2): 47-49.
- [9] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1266-1273.

本栏目编辑 姚朝英 吴珊

(上接第55页)

[参考文献]

- [1] 胡锋, 刘世辉, 陈静. 液液萃取/固相萃取净化/气相色谱法测定工业废水中硝基苯类化合物[J]. *环境研究与监测*, 2016, 29(2): 2440-2444.
- [2] 李利荣, 王艳丽, 戴天有, 等. 气相色谱-质谱法测定水和沉积物中15种硝基苯类化合物的固相萃取净化条件的比较[J]. *理化检验(化学分册)*, 2013, 49(12): 1436-1443.
- [3] PEREZ E, LEN L, PARRA G, et al. Simultaneous determination of pesticides, polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in seawater and interstitial marine water samples, using stir bar sorptive extraction-thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry[J]. *J Chromatogr*, 2009, 1170(1/2): 1551-1562.
- [4] 向彩虹, 董玉莲, 黄天笑. GC-ECD测定水中10种痕量硝基苯类化合物[J]. *分析仪器*, 2014(2): 38-42.
- [5] 张欢燕, 吴诗剑, 刘鸣, 等. GC-ECD测定地表水中的硝基苯类和氯苯类化合物[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(1): 84-88.
- [6] 环境保护部. 水质 硝基苯类化合物的测定 液液萃取/固相萃取-气相色谱法: HJ 648—2013[S]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [7] 环境保护部. 水质 硝基苯类化合物的测定 气相色谱-质谱法: HJ 716—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.

- [8] 许海青, 刘春力, 张兴磊. 液液萃取和固相萃取测定水质硝基苯类化合物的比较研究[J]. *分析实验室*, 2016, 35(10): 1209-1211.
- [9] 张梦雨, 张康宁, 刘玲花. SPE-UPLC-MS/MS法测定地下水中多种农药残留[J]. *环境监测管理与技术*, 2022, 34(2): 46-49.
- [10] 张付海, 胡雅琴, 田丙正, 等. 全自动固相萃取-GC-MS/MS法测定水中多氯联苯[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(4): 49-52.
- [11] 国家环境保护总局. 地表水和污水监测技术规范: HJ/T 91—2002[S]. 北京: 中国环境出版社, 2002.
- [12] 刘静, 曾兴宇, 赵云荣, 等. 大体积固相萃取-气相色谱法测定水中17种氯代有机物[J]. *化学分析计量*, 2019, 28(2): 17-21.
- [13] 阎正, 封棣, 李申杰, 等. 固相萃取-毛细管气相色谱法测定中草药中13种有机氯农药的残留量[J]. *色谱*, 2005, 23(3): 308-311.
- [14] 刘静, 曾兴宇. 大体积固相萃取-气相色谱法测定海水中10种多氯联苯[J]. *理化检验(化学分册)*, 2015, 51(8): 1183-1186.
- [15] 刘静, 王丽, 曾兴宇, 等. 固相萃取-气相色谱法测定海水中狄氏剂和四氯联苯[J]. *岩矿测试*, 2014, 33(2): 282-286.
- [16] 生态环境部. 环境监测分析方法标准制订技术导则: HJ 168—2020[S]. 北京: 中国环境出版社, 2020.