

doi:10.3969/j.issn.2095-1035.2024.04.006

基于元素分析的污泥焚烧处置综合性评估

范雪滢^{1,2,3,4} 卢嘉慧^{1,2,3,4} 林健辉^{1,2,3,4} 杨旭楠^{1,2,3,4}
梁嘉慧^{1,2,3,4} 曾国驱^{1,2,3,4*}

(1. 广东省科学院微生物研究所, 广州 510070; 2. 广东省微生物分析检测中心, 广州 510070;
3. 华南应用微生物国家重点实验室, 广州 510070; 4. 广东省菌种保藏与应用重点实验室, 广州 510070)

摘要 污泥的无害化处置和资源化利用是目前社会关注的重点,对污泥泥质的综合性评估是污泥处置和利用的前提。采用8个地区的出厂污泥,基于元素分析结果,综合考虑其碳排放量和风险性,对污泥“焚烧+灰渣利用”处置方式进行综合性评估。污泥的工业分析发现地区1、7、8污泥中的干基低位发热量均值分别为11.60、10.39和12.04 MJ/kg,有机物含量均值为53.98%、51.23%和54.97%,发热量和有机成分含量较高,发热量和有机成分存在显著正相关关系($P < 0.05$)。而地区1、2、6污泥的重金属含量较高,8个地区的污泥浸出液中镍、铜、锌所占比例较大,3种元素之和约为总体的90%。从碳排放和风险性分析可得,地区1、7、8的碳补偿量分别为958.59、909.08和963.39 kgCO₂/t,碳补偿量较大,总碳排放量较小,但地区1污泥在采用制砖、水泥熟料处置时综合污染指数分别为0.72和0.71,在污染警戒范围(0.7~1.0)内。结果表明,地区1、7、8的出厂污泥宜采用“焚烧+灰渣利用”处置方式,但地区1污泥处置时需关注重金属污染风险。污泥的元素分析能为污泥的焚烧处置提供科学性指导。

关键词 元素分析;污泥处置;焚烧;碳排放;风险性分析

中图分类号:O657.63 文献标志码:A 文章编号:2095-1035(2024)04-0418-11

Comprehensive Evaluation of Sludge Incineration Disposal Based on Element Analysis

FAN Xueying^{1,2,3,4}, LU Jiahui^{1,2,3,4}, LIN Jianhui^{1,2,3,4}, YANG Xu'nan^{1,2,3,4},
LIANG Jiahui^{1,2,3,4}, ZENG Guoqu^{1,2,3,4*}

(1. Institute of Microbiology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510070, China;

2. Guangdong Detection Center of Microbiology, Guangzhou, Guangdong 510070, China;

3. State Key Laboratory of Applied Microbiology Southern China, Guangzhou, Guangdong 510070, China;

4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangzhou, Guangdong 510070, China)

Abstract The harmless disposal and resource utilization of sludge are currently concerned by social attention, and comprehensive evaluation of sludge quality is a prerequisite for sludge disposal and utilization. Based on the

收稿日期:2023-07-21 修回日期:2023-12-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF1301203);广东省科学院打造综合产业技术创新中心行动资金资助项目(2022GDASZH-2022010105)

作者简介:范雪滢,女,工程师,主要从事环境监测、生态毒理和农业生态研究。E-mail:fanxy@gddcm.com

*通信作者:曾国驱,男,研究员,主要从事环境工程和生态毒理研究。E-mail:zengguo@gdim.cn

引用格式:范雪滢,卢嘉慧,林健辉,等.基于元素分析的污泥焚烧处置综合性评估[J].中国无机分析化学,2024,14(4):418-428.

FAN Xueying, LU Jiahui, LIN Jianhui, et al. Comprehensive Evaluation of Sludge Incineration Disposal Based on Element Analysis[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(4): 418-428.

results of elemental analysis of sludge from 8 regions, the 'incineration+ash utilization' disposal method of sludge was evaluated comprehensively considering its carbon emission and risk. The industrial element analysis of sludge found that the calorific value in sludge from regions 1, 7 and 8 were 11.60, 10.39 and 12.04 MJ/kg, respectively, and organic contents were 53.98%, 51.23% and 54.97% respectively, which were significantly higher than other regions, and there was a significant positive correlation between calorific value and organic components ($P < 0.05$). In addition, the heavy metal contents of sludge in regions 1, 2 and 6 were higher, and the proportion of Ni, Cu and Zn in the sludge leaching solution of 8 regions was about 90%. From the analysis of carbon emissions and risks, the carbon compensation of regions 1, 7 and 8 were 958.59, 909.08 and 963.39 kgCO₂/t, respectively, which had larger carbon compensation amounts and smaller carbon emissions. However, for sludge brick making and cement clinker disposal in region 1, the comprehensive pollution indexes were 0.72 and 0.71, which was within the pollution warning range (0.7—1.0). Based on comprehensive evaluation, it can be concluded that the 'incineration+ash utilization' disposal should be adopted for the sludge in regions 1, 7 and 8. However, attention should be paid to the risk of heavy metal pollution when disposing of sludge in region 1. The elemental analysis of sludge can provide scientific guidance for the incineration disposal of sludge.

Keywords elemental analysis; sludge disposal; incineration; carbon emissions; risk analysis

随着国家污泥无害化处置和资源化利用政策的颁布和推进,市政污泥泥质特性的研究和处置利用方式日益受到关注,目前污泥产量日益增长,但对应的无害化处置及资源化利用未能与之相匹配,导致大部分污泥未能规范处理,造成巨大的环境风险,不利于社会的可持续发展。污水处理厂收纳污水来源不一,导致产生污泥性质的差异,其中包括了污泥中的无机重金属、有机物和微生物群落多样性的差异。研究表明县城污泥较腐熟污泥和市区污泥中的重金属含量低,其存在的生态风险和健康风险较低^[1]。而周边金属处理和机械维修企业较多的污水处理厂,其污泥中多环芳烃含量相对较高^[2]。此外,污染土壤中蔡、菲降解菌均比活性污泥中的丰度高^[3]。污泥性质的差异,导致其适用的处置方式不同,因此,对市政污泥的持续监测,了解不同地区的污泥泥质特性,为污泥的无害化处置和资源化利用提供科学性参考。

污泥处置方式主要有填埋、焚烧、土地利用和建材利用^[4-5]。但目前我国主要的污泥处置方式仍为填埋,且大多采用简易填埋的处置方式,极可能造成二次污染的风险^[6]。江宇等^[7]对沈阳市13家污水处理厂污泥中的重金属进行分析,发现其Hg、Cd和Cu的单因子污染指数较高,其污染主要来源于工业生产。候永侠等^[8]也发现沈阳市的Hg在80%的采样点中污染程度为偏重污染和中度污染,具有较高的生态风险。耿源濛等^[9]对全国40家污水处理厂

的剩余污泥进行监测,发现城市污泥中Cd和Cu的潜在生态风险最高。杨潇^[10]采用兴义地区污泥堆肥种植蔬菜发现,其重金属超过食品安全国家标准的要求,存在健康风险。因此,有必要对污泥中的重金属元素进行风险评估,以确保其资源化利用的安全性,以免造成二次污染。此外,较发达地区由于土地利用紧张,污泥处置方式常选择焚烧或建材利用,污泥干化后可单独焚烧或与其他燃料混合焚烧,建材利用需要对污泥进行干化焚烧或协同焚烧处理^[6],因此需考虑污泥热值、碳含量、氢含量等相关工业分析指标及其碳排放分析,以评估其资源化利用效果。因此,本研究拟基于8个地区污水处理机构污泥的工业元素和重金属元素分析,研究各指标间的相关性,同时进行碳排放分析和风险性分析,对污泥的资源化利用进行综合评估,以摸清不同地区的污泥泥质特性,探明各指标的相关关系,为污泥的无害化处置和资源化利用提供科学性指导。

1 材料与方法

1.1 污泥样品来源

污泥样品为广东省内8个地区污水处理机构的出厂污泥,各机构污水处理量和污泥产量见表1。采集2021—2022年期间6个批次的出厂污泥各1kg,主要处置路线为“焚烧+灰渣利用”,灰渣利用方式主要为建材利用。

表 1 各地区污水处理机构基本情况

Table 1 Basic information of sewage treatment plants in different regions

No.	Region	Wastewater treatment capacity/(kt · d ⁻¹)	Factory sludge output/(t · d ⁻¹)
1	R1	669	133.4
2	R2	241	59.2
3	R3	1 178	295.6
4	R4	275	55.8
5	R5	440	123.6
6	R6	162	31.4
7	R7	121	13.3
8	R8	52	23.9

表 2 污泥泥质元素分析方法

Table 2 Elemental analysis of sludge characteristics

No.	Items	Method	Standard
1	Moisture	Gravimetric method	CJ/T 221—2005
2	Organic content	Gravimetric method	CJ/T 221—2005
3	Calorific value	Automatic oxygen bomb calorimeter method	GB/T 213—2008
4	Volatile, ash, fixed carbon	Gravimetric method	GB/T 212—2008
5	Total sulfur	Coulometric titration	GB/T 214—2007
6	C, H	Three section furnace method	GB/T 476—2008
7	N	Semi-micro Kjeldahl method	GB/T 19227—2008
8	P	Spectrophotometric method	GB/T 216—2003
9	Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb	ICP-MS method	HJ 766—2015
10	As, Hg	AFS method	HJ 702—2014
11	Pre-treatment of leaching solution	Sulphuric acid & nitric acid method	HJ/T 299—2007
12	Be, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Ba, Pb of leaching solution	ICP-MS method	HJ 766—2015
13	Hg of leaching solution	AFS method	HJ 702—2014

1.4 碳排放量和补偿量计算

根据污泥工业分析结果和各地区污泥产量,参考相关成果^[11-12]的计算方法,对不同地区污泥焚烧和灰渣综合利用产生的碳排放量进行计算。污泥焚烧产生 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的排放量计算见式(1)~(3),焚烧时的电力供应产生的碳排放量计算见式(4),焚烧热量回收的碳补偿量见式(5)~(6),灰渣综合利用的碳补偿量见式(7),为研究各地区单位污泥的碳排放量,污泥质量均以 1 t 计算。

污泥焚烧产生 CO₂ 的排放量:

$$E_{\text{CO}_2, \text{焚烧}} = m \times d_m \times CF \times FCF \times OF \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{CO}_2, \text{焚烧}}$ ——污泥焚烧产生的 CO₂ 排放量, kgCO₂/t;

m ——焚烧的污泥质量, t;

d_m ——污泥的干物质含量,以 100% 含水率计算, %;

CF ——污泥的碳含量, %, 采用本研究中的测试结果;

1.2 污泥泥质的元素分析

采用相关国家标准和行业标准对污泥样品进行元素分析,实验方法见表 2。各元素含量结果均以干基计算。

1.3 数据处理

采用 SPSS 26 软件对污泥工业分析和重金属元素分析结果进行单因素方差分析 ($P < 0.05$), 以判断各地区出厂污泥的差异性。同时,根据各地区泥质特性对各地区出厂污泥进行欧氏距离聚类分析 (CA)。采用 Origin 2021 对工业分析指标进行双尾皮尔逊相关性分析 ($P < 0.05$)。

FCF ——总碳中化石碳的比例, 12%;

OF ——氧化因子, 100%;

44/12——CO₂ 与碳的分子量转换系数。

污泥焚烧产生 N₂O 的排放量:

$$E_{\text{N}_2\text{O}, \text{焚烧}} = m \times d_m \times EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{焚烧}} \times G_{\text{N}_2\text{O}} \quad (2)$$

式中: $E_{\text{N}_2\text{O}, \text{焚烧}}$ ——污泥焚烧产生的 N₂O 碳排放量, kgCO₂/t;

$EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{焚烧}}$ ——焚烧过程 N₂O 的排放因子, 0.99 kg/t;

$G_{\text{N}_2\text{O}}$ ——全球增温潜势, 298。

污泥焚烧产生 CH₄ 的排放量:

$$E_{\text{CH}_4, \text{焚烧}} = m \times d_m \times EF_{\text{CH}_4, \text{焚烧}} \times G_{\text{CH}_4} \quad (3)$$

式中: $E_{\text{CH}_4, \text{焚烧}}$ ——污泥焚烧产生的 CH₄ 碳排放量, kgCO₂/t;

$EF_{\text{CH}_4, \text{焚烧}}$ ——焚烧过程 CH₄ 的排放因子, 0.024 25 kg/t;

G_{CH_4} ——全球增温潜势, 25。

焚烧时的电力供应产生的碳排放量:

$$E_{\text{电力}} = m \times d_m \times D \times EF_{\text{电力}} \quad (4)$$

式中: $E_{\text{电力}}$ ——焚烧时电力供应产生的碳排放量, kgCO_2/t ;

D ——耗电量, $300 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$;

$EF_{\text{电力}}$ ——电力供应排放因子, $0.5839 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

焚烧热量回收的碳补偿量:

$$CH_{\text{热电联产}} = \frac{Q - Q_{\text{损}}}{3.6} \times \omega_{\text{热电联产}} \times 10^3 \quad (5)$$

式中: $CH_{\text{热电联产}}$ ——热电联产发电效率, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$;

Q ——污泥干基低位发热量, GJ/t , 采用本研究中的测试结果;

$Q_{\text{损}}$ ——能量损失, 以热值的 7% 计算, GJ/t ;

$\omega_{\text{热电联产}}$ ——热电联产效率, 80%。

$$E_{\text{焚烧, 补偿}} = m \times d_m \times CH_{\text{热电联产}} \times EF_{\text{电力}} \quad (6)$$

式中: $E_{\text{焚烧, 补偿}}$ ——焚烧热量回收的碳补偿量, kgCO_2/t 。

灰渣综合利用的碳补偿量:

$$E_{\text{灰渣利用, 补偿}} = m \times d_m \times \varphi \times EF_{\text{灰渣}} \quad (7)$$

式中: $E_{\text{灰渣利用, 补偿}}$ ——灰渣综合利用的碳补偿量, kgCO_2/t ;

φ ——灰渣平均占比, 17.5%;

$EF_{\text{灰渣}}$ ——灰渣综合利用的排放因子, $0.52 \text{ t}/\text{t}$ 。

1.5 风险性评估

分别采用内梅罗指数法和 Hakanson 潜在生态危害指数法^[13-14]对重金属元素与污泥处置中制砖、水泥熟料的标准限值, 以及重金属浸出液与污泥处置中单独焚烧的标准限值对各地区污水处理机构进行环境污染和生态风险评价。内梅罗指数法中单项污染指数 P_i 计算见式(8), 各地区污水处理机构的综合污染指数 P 计算见式(9)。Hakanson 潜在生态危害指数法中多元素综合潜在生态风险指数 RI 计算见式(10)。

内梅罗指数法中单项污染指数 P_i :

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (8)$$

式中: P_i ——污染物 i 的单项污染指数;

C_i ——污染物 i 的实测含量, mg/kg ;

S_i ——污染物 i 在相关标准中的限值, mg/kg 。

综合污染指数 P :

$$P = \sqrt{\frac{P_{\text{imax}}^2 + P_{\text{iave}}^2}{2}} \quad (9)$$

式中: P ——污水处理机构的综合污染指数;

P_{imax} ——污水处理机构中单项污染指数的最大值;

P_{iave} ——污水处理机构中单项污染指数的平均值。

依据 P_i 和 P 的计算结果可将污水处理机构污泥的污染程度分为 5 个级别: ≤ 0.7 , I 级(清洁); $0.7 < P_i (P) \leq 1.0$, II 级(警戒线); $1.0 < P_i (P) \leq 2.0$, III 级(轻度污染); $2.0 < P_i (P) \leq 3.0$, IV 级(中度污染); > 3.0 , V 级(重度污染)。

Hakanson 潜在生态危害指数法中多元素综合潜在生态风险指数 RI :

$$RI = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i} \quad (10)$$

式中: RI ——多元素综合潜在生态风险指数;

T_r^i ——污染物 i 的毒性响应系数^[15];

C_s^i ——污染物 i 的实测含量, mg/kg ;

C_n^i ——污染物 i 在相关标准中的限值, mg/kg 。

依据 RI 的计算结果可将污水处理机构污泥的生态风险水平分为 4 个级别: $RI < 50$, 轻微生态危害; $50 \leq RI < 300$, 中等生态危害; $300 \leq RI < 600$, 强生态危害; $RI \geq 600$, 很强生态危害。

2 结果与讨论

2.1 污泥的工业分析

对各污水处理机构 6 个批次的污泥工业元素进行分析, 结果见表 3。根据污泥工业分析结果, 对各污水处理机构进行聚类分析, 结果见图 1。

由表 3 可得, 地区 1、7、8 出厂污泥中有机物含量、发热量、挥发分、固定碳、碳含量、氮含量较高, 灰分、硫含量较低, 有利于污泥的焚烧利用, 地区 2 污泥的硫含量较高, 地区 8 的磷含量较高。聚类分析的结果与工业分析结果基本一致(图 1), 总体以有机物含量、热值和碳含量高低进行分类。地区 1、7、8 污泥碳含量和热值等较高的污水处理机构归为一类, 其他机构归为一类。其中地区 6 污泥的有机物含量和热值较地区 2、3、4、5 高, 可单独划为一类, 地区 8 污泥的氮含量、磷含量较地区 1、7 高, 也可单独划为一类。

工业分析各参数间存在一定的相关性, 研究发现同一地区的油页岩发热量与挥发分、固定碳、碳含量、氢含量成正比, 与灰分成反比^[16]。同样在煤的工业分析中也发现其干基灰分与可应用基低位发热量间具有很强的负线性相关关系^[17]。为探讨各地区污泥工业分析参数间的相关性, 对各分析参数进行皮尔逊相关性分析, 结果见图 2。

表 3 各地区污泥工业分析结果

Table 3 Results of sludge industrial analysis in different regions($n=6$)

Items	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Moisture/%	35.7±0.6abc	35.0±0.5abc	36.3±1.2bc	36.9±0.6bc	35.9±1.5bc	33.7±0.8ab	32.4±1.5a	37.6±1.1c
Organic content/%	53.98±1.89c	38.44±0.88a	36.96±0.87a	35.71±3.06a	36.76±0.67a	43.09±0.91b	51.23±0.93c	54.97±2.54c
Gross calorific value/(MJ·kg ⁻¹)	12.07±0.53de	7.27±0.62ab	7.66±0.16bc	6.33±0.42a	6.97±0.25ab	8.78±0.25c	11.24±0.16d	12.96±0.39e
Net calorific value/(MJ·kg ⁻¹)	11.60±0.39e	6.54±0.60ab	6.90±0.17b	5.59±0.41a	6.24±0.24ab	8.19±0.25c	10.39±0.12d	12.04±0.39e
Volatile/%	48.77±1.43b	41.68±1.22a	41.73±0.46a	38.02±1.44a	39.29±0.81a	41.87±1.27a	48.27±0.81b	51.74±1.94b
Ash/%	46.01±1.84a	57.88±1.20b	57.76±0.44b	61.40±1.42b	60.17±0.78b	57.59±1.19b	47.07±0.60a	43.53±1.46a
Fixed carbon/%	5.22±0.59b	0.44±0.10a	0.51±0.10a	0.59±0.07a	0.53±0.08a	0.54±0.16a	4.67±0.54b	4.73±1.07b
Total sulfur/%	0.95±0.06a	3.10±0.21c	1.50±0.07b	1.51±0.08b	1.65±0.08b	1.46±0.08b	0.74±0.02a	0.83±0.01a
ω_C /%	18.91±3.75ab	17.53±1.68a	16.86±0.73a	16.26±0.79a	17.17±0.58a	16.75±1.28a	19.85±2.85ab	24.79±1.34b
ω_H /%	4.03±0.59b	3.47±0.48ab	3.37±0.12ab	3.05±0.31ab	2.89±0.07a	3.68±0.13ab	3.48±0.18ab	3.71±0.29ab
ω_N /%	3.25±0.61c	0.36±0.08a	0.55±0.05a	1.69±0.21b	0.62±0.04a	1.94±0.40b	3.81±0.14c	4.49±0.19d
ω_P /%	1.63±0.58a	1.89±0.10ab	2.50±0.26abc	1.96±0.07abc	2.74±0.16bc	1.55±0.44a	2.41±0.21abc	2.89±0.11c

Note: Different letters show significant differences at 0.05 level of probability according to Duncan's multiple comparison test among regions.

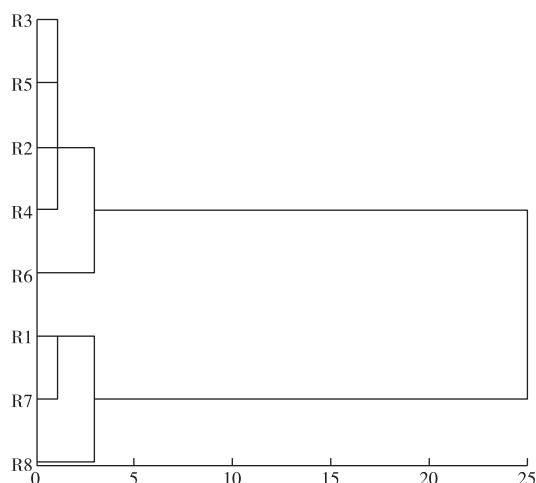
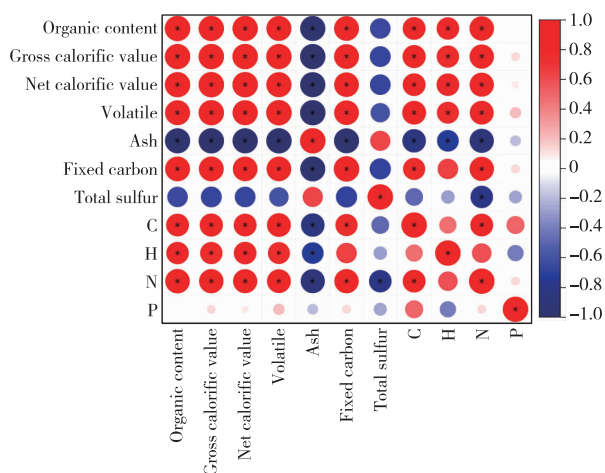


图 1 基于工业分析的各地区污水处理机构聚类分析结果

Figure 1 Cluster analysis of sewage treatment plants in different regions based on industrial analysis.

图 2 工业分析参数间的相关性分析(* $P<0.05$)Figure 2 Correlation analysis between industrial analysis parameters(* $P<0.05$).

由图 2 可得,发热量与有机物含量、挥发分、固定碳、碳含量、氢含量和氮含量显著正相关,与灰分显著负相关,与前文其他燃料的研究结果一致。研究表明污水处理机构中的污水水质、排水体制、污水及污泥处理工艺可影响污泥的挥发分含量,从而影响污泥的热值^[18]。根据挥发分、水分、灰分、固定碳等参数,通过一定的数学模型可推测出污泥的发热量和碳含量^[19-20],也有研究通过碳、氢、氧含量推测燃料的灰分含量^[21]。

2.2 污泥的重金属元素分析

对各污水处理机构 6 个批次的污泥重金属元素进行分析,结果见图 3。

由图 3 可得,地区 1、6 污泥的铬含量较高,均值均高于 200 mg/kg,地区 1 污泥的镍含量同样比其他地区显著偏高,均值为 187 mg/kg。地区 1、2、6 污泥的铜含量较高,均值均高于 900 mg/kg,地区 6 的污泥锌和砷含量也较其他地区显著偏高,均值分别为 1 517 和 43.7 mg/kg。各地区的镉含量分布与其他元素不同,地区 2、8 的镉含量显著偏高,分别为 11.1 和 17.8 mg/kg,地区 1、6 的镉含量则较低。但地区 1 的汞含量较其他地区高,均值为 1.04 mg/kg,而地区 6、7 的铅含量较高,均值分别为 76.3 和 83.1 mg/kg。总体来讲,地区 1、2、6 的 8 种重金属元素总量较大,在污泥处置时需关注重金属污染情况。对 8 个地区重金属含量测试结果进行聚类分析,结果见图 4。

由图 4 可得,地区 3、4、5 的污水处理机构可归为第一类,其污泥中的重金属含量较低,地区 7、8 的机构可归为第二类,其污泥中某一种重金属含量较高,地区 7 污泥中的铅可能来源于生活污染,如道路汽车尾气排放、生活垃圾等^[22-23],地区 8 主要为农业

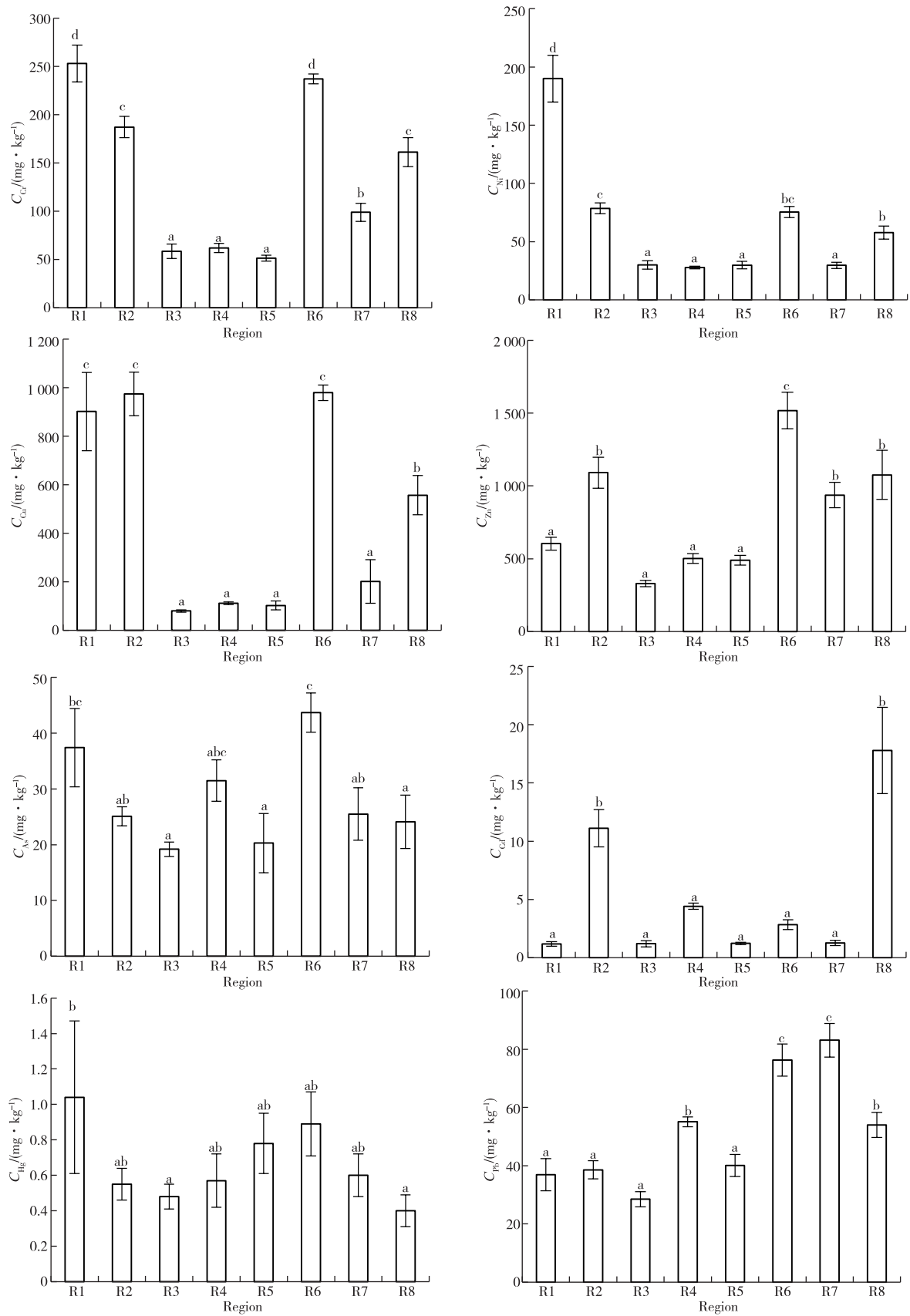


图 3 各地区污泥重金属元素分析结果

Figure 3 Results of sludge heavy metals analysis in different regions ($n=6$, R represents region).

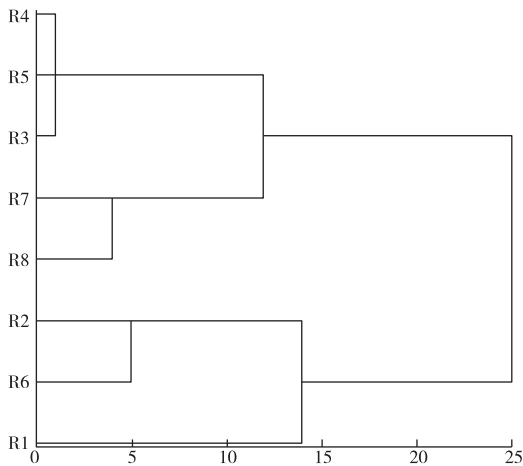


图4 基于重金属元素分析的各地区
污水处理机构聚类分析结果

Figure 4 Cluster analysis of sewage treatment plants in different regions based on heavy metals analysis.

生产区,其污泥中的镉可能来源于大气沉降和农业活动^[24]。地区2、6和地区1的机构可分别归为第三类和第四类,污泥中的多种重金属含量较高,大多来源于工业污染^[22]。除进水来源外,污泥中的重金属含量也会随着取样时间和季节不同而发生变化^[25]。不同机构污泥中的重金属含量不一,在微酸性条件下浸出后的分布也不尽相同,污泥浸出液的重金属含量分布见图5。

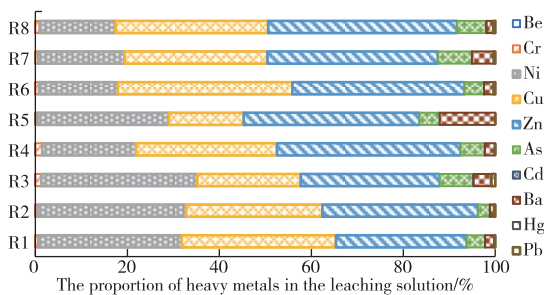


图5 各地区污泥浸出液重金属元素含量分布
Figure 5 Distribution of heavy metals in sludge leaching solution in different regions.

由图5可得,各地区污泥浸出液中镍、铜、锌3种元素之和约占总体90%,铬、砷、钡、铅占据一定比例,但所占比例较小,铍、镉、汞占比极少。酸对金属的浸出作用主要是通过两种机制实现的,一是固相中吸附的金属元素被质子交换,可破坏胞外聚合物结构,将吸附于表面的重金属离子释放;二是无机金属沉淀物在酸性条件下的溶解^[26-27]。不同酸对重金属的提取效率不一,STYLIANOOU等^[28]发现污泥经硫酸处理后,铬、镍、铜、锌均被大量去除,但铅的去除率较低,

与本研究的结果基本一致。但黎淑端等^[29]通过醋酸浸提发现,锌、镍提取比例较高,而铜、铬比例较低。而寇莹莹等^[30]采用谷氨酸与柠檬酸体积比为2:1浸提时,对污泥中Cu、Pb、Zn的去除率最高。污泥中钡元素在中性条件下浸出量比采用硫酸硝酸法高,而铍则在酸性条件下更容易解析^[31]。同时,铍、镉、汞在污泥中含量较低,且汞在污泥中的稳定性较高,大多残留在污泥中^[32],因此在浸出液中的含量较低。

2.3 污泥处置碳排放分析

对不同地区污泥焚烧和灰渣综合利用产生的碳排放量进行分析,结果见图6,其中由焚烧产生CO₂、N₂O和CH₄所得的碳排放量合并为焚烧产生的碳排放量。由图6可得,各地区由焚烧和电力供应产生的碳排放量差距不大,由于相关参数多采用含水率参与计算,因此含水率较低的地区(地区6、7)所得的碳排放量较高,虽然碳含量也参与CO₂排放的计算,但由于N₂O的全球增温潜势较大,焚烧排放量主要以N₂O产生的碳排放量为主,因此主要为含水率造成的差异。图6中负值所表示的为碳补偿量,其中地区1、7、8的碳补偿量较高,分别为958.59、909.08和963.39 kgCO₂/t,焚烧补偿的碳排放主要以干基低位发热量参与计算,因此发热量较高的地区,碳补偿量较高。

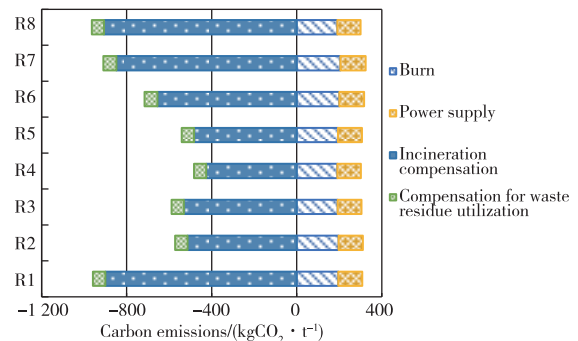


图6 各地区出厂污泥处置碳排放量分析
Figure 6 Analysis of carbon emissions of sludge disposal in different regions.

虽然图6中所示的碳补偿量较碳排放量大,但统计的范围是由出厂污泥开始的,前期污泥干化过程中产生的碳排放并未计算在内,参照李哲坤等^[12]对焚烧+建材利用的碳排放计算,前期干化和运输过程中产生的碳排放量为1405.76 kgCO₂/t,与现有的结果综合计算可得,总碳排放量平均约为1000 kgCO₂/t,干基低位发热量较高的地区1、7、8碳排放量较低,结合工业分析的相关性,说明污泥中的有机物含量、碳含量和发热量越高,焚烧的碳补偿量越大,可减少

总碳排放量。

2.4 污泥处置的风险性分析

根据污泥处置的 3 种方式:制砖、水泥熟料和焚

烧对各地区污泥中重金属(除焚烧外)或浸出液中的重金属含量(焚烧)进行内梅罗指数和 Hakanson 潜在生态危害指数评价,结果见表 4。

表 4 基于不同污泥处置方式下各机构污泥的综合污染指数和生态风险指数

Table 4 Comprehensive pollution index and ecological risk index of sludge from different regions based on sludge disposal methods

Region		Comprehensive pollution index <i>P</i>			Ecological risk index <i>RI</i>		
		Making brick ^[33]	Cement clinker ^[34]	Separate incineration ^[35]	Making brick	Cement clinker	Separate incineration
R1	Index	0.72	0.71	0.131	21.2	14.2	0.73
	Evaluate	Alert	Alert	Clean	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards
R2	Index	0.51	0.51	0.101	29.7	25.7	0.64
	Evaluate	Clean	Clean	Clean	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards
R3	Index	0.20	0.19	0.023	9.4	6.0	0.26
	Evaluate	Clean	Clean	Clean	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards
R4	Index	0.32	0.31	0.017	17.2	12.9	0.31
	Evaluate	Clean	Clean	Clean	Minorecological hazards	Minorecological hazards	Minorecological hazards
R5	Index	0.21	0.20	0.028	12.3	6.9	0.21
	Evaluate	Clean	Clean	Clean	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards
R6	Index	0.52	0.51	0.064	23.3	16.7	0.62
	Evaluate	Clean	Clean	Clean	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards
R7	Index	0.27	0.26	0.031	12.9	8.1	0.46
	Evaluate	Clean	Clean	Clean	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards
R8	Index	0.67	0.66	0.039	37.0	33.8	0.46
	Evaluate	Clean	Clean	Clean	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards	Minor ecological hazards

由表 4 可得,地区 1 污泥在除焚烧处置的方式外,综合污染指数均在警戒线级别,因此对于地区 1 的污泥处置,宜采用焚烧处置的方式。从生态风险指数来看,3 种污泥处置方式的生态风险指数均为轻微生态危害,对生态危害性较低。单独焚烧由于标准限值要求为污泥浸出液重金属浓度限值,且 8 个地区污泥浸出液的重金属浓度较低,因此单独焚烧处置的 *P* 和 *RI* 值均比制砖和水泥熟料处置的低。Hakanson 潜在生态危害指数评价较内梅罗指数法增加了生态学、毒理学的考虑因素,能更客观地反映研究地区的潜在风险,但该法仅考虑单一的重金属生态危害,未考虑到多种重金属的复合危害性,具有一定的不足^[36]。同时,在计算制砖、水泥熟料和单独焚烧时,前两种是依据污泥中重金属全量,焚烧是依据浸出液中的重金属含量,在水体中的重金属敏感性与污泥中是存在一定差别的,但本研究中采

用相同的毒性响应系数进行计算,也存在不足。同时,如考虑污泥的农用处置,也可进一步根据污泥的重金属特征,评估污泥处置对人体健康的风险^[37]。

3 结论

本研究基于元素分析,对各地区出厂污泥泥质进行分析,探索元素间的相关关系,对各地区污泥进行碳排放分析和风险性评估,主要研究结论如下:

1)从工业分析结果可得,地区 1、7、8 的出厂污泥中有机物含量、发热量、挥发分、固定碳、碳含量、氮含量较高,污泥处置方式采用焚烧处置较为适用。污泥的发热量与有机物含量、挥发分、固定碳、碳含量、氢含量和氮含量显著正相关,与灰分显著负相关,提高污泥的有机物含量有利于污泥的焚烧利用。

2)从重金属元素分析结果可得,地区 1、2、6 污泥的重金属含量较高,各地区污泥浸出液中镍、铜、

锌所占比例较大,在污泥处置时需关注重金属的污染。

3)从污泥处置的碳排放分析可得,地区 1、7、8 的干基低位发热量较高,焚烧的碳补偿量较大,总碳排放量较小,可通过提高污泥发热量,提高碳补偿量,降低碳排放量。

4)从污泥处置的风险性分析可得,地区 1 污泥在采用制砖、水泥熟料处置时具有污染风险,宜采用焚烧处置,各地区污泥在焚烧+灰渣综合利用处置的生态风险性较低。

参考文献

- [1] 常会庆,焦常锋,郑彩杰,等. 不同来源污泥重金属的含量特征及其风险评价[J]. 河南农业科学,2019,48(3):70-76.
CHANG Huiqing, JIAO Changfeng, ZHENG Caijie, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metal content in sewage sludge from different sources[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(3):70-76.
- [2] 杨少博,李江,张春辉,等. 贵阳市城市污泥中多环芳烃的分布特征、来源解析及风险评价[J]. 生态学杂志,2015,34(6):1675-1681.
YANG Shaobo, LI Jiang, ZHANG Chunhui, et al. Distribution, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sewage sludge from Guiyang city[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(6):1675-1681.
- [3] 汪从胜,高璐,成亮,等. 农田污染土壤及活性污泥中菲、萘降解复合菌群的驯化及其物种多样性分析[J]. 东北农业科学,2023,48(1):108-115.
WANG Congsheng, GAO Lu, CHENG Liang, et al. Acclimation of phenanthrene and naphthalene degrading compound bacteria from the polluted farmland soil and the activated sludge and their diversities revealed by 16S rDNA sequencing [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(1):108-115.
- [4] QU J H, DAI X H, HU H Y, et al. Emerging trends and prospects for municipal wastewater management in China[J]. ACS ES & T Engineering, 2022 (2):323-336.
- [5] 李尔,曾祥英. 武汉市主城区污水厂污泥处理处置现状及展望[J]. 中国给水排水,2021,37(18):8-13.
LI Er, ZENG Xiangying. Current situation and prospect of sludge treatment and disposal of WWTPs in the main urban area of Wuhan[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(18):8-13.
- [6] 戴晓虎,侯立安,章林伟,等. 我国城镇污泥安全处置与资源化研究[J]. 中国工程科学,2022,24(5):145-153.
DAI Xiaohu, HOU Li'an, ZHANG Linwei, et al. Safe disposal and resource recovery of urban sewage sludge in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5):145-153.
- [7] 江宇,侯永侠,丁睿尧,等. 沈阳市政污泥中重金属生态风险评价及源解析[J]. 山东化工,2022,51(19):215-219.
JIANG Yu, HOU Yongxia, DING Ruiyao, et al. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in Shenyang municipal sludge[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(19):215-219.
- [8] 侯永侠,江宇,丁睿尧,等. 沈阳市政污泥中重金属污染特征及其生态风险评价[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2022,34(4):251-259.
HOU Yongxia, JIANG Yu, DING Ruiyao, et al. Pollution characteristics and ecological risk evaluation of heavy metals in municipal sewage sludge of Shenyang[J]. Journal of Shenyang University(Natural Science), 2022, 34(4):251-259.
- [9] 耿源濛,张传兵,张勇,等. 我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价[J]. 环境科学,2021,42(10):4834-4843.
GENG Yuanmeng, ZHANG Chuanbing, ZHANG Yong, et al. Speciation and ecological risk assessment of heavy metal(loid)s in the municipal sewage sludge of China[J]. Environmental Science, 2021, 42(10):4834-4843.
- [10] 杨潇. 兴义地区污泥堆肥种植叶菜蔬菜的重金属污染风险研究[D]. 贵阳:贵州大学,2022.
YANG Xiao. Study on the risk of heavy metal pollution in leafy vegetables planted with sludge compost in Xingyi area[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.
- [11] 潘煜,李廉明,宋焜,等. 基于化石碳的污泥干化焚烧处置碳排放分析[J]. 环境工程学报,2023,17(3):990-1000.
PAN Yu, LI Lianming, SONG Kun, et al. Analysis on carbon emissions of sludge drying and incineration treatment based on fossil carbon[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(3):990-1000.
- [12] 李哲坤,张立秋,杜子文,等. 城市污泥不同处理处置工艺路线碳排放比较[J]. 环境科学,2023,44(2):1181-1190.
LI Zhekun, ZHANG Liqiu, DU Ziwen, et al. Comparison of carbon emissions in different treatment and disposal process routes of municipal sludge[J]. Environmental Science, 2023, 44(2):1181-1190.
- [13] 孟令华,杜小亮,刘乾,等. 泰安市城区土壤重金属污染

- 特征及风险评价[J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(5): 41-49.
- MENG Linghua, DU Xiaoliang, LIU Qian, et al. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in soil in urban area of Tai'an [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(5): 41-49.
- [14] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [15] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008(2): 112-115.
- XU Zhengqi, NI Shijun, TUO Xianguo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. Environmental Science & Technology, 2008(2): 112-115.
- [16] 薛华庆, 王红岩, 郑德温, 等. 油页岩工业分析与元素分析各项指标间的相互关系[J]. 化工科技, 2010, 18(1): 6-9.
- XUE Huaqing, WANG Hongyan, ZHENG Dewen, et al. The relationship between the proximate analysis and elementary analysis of oil shale [J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2010, 18(1): 6-9.
- [17] 梅晓仁, 陈鹏, 高永胜. 基于 SPSS 的煤质发热量相关因素分析及其回归模型研究[J]. 中国煤炭, 2011, 37(7): 88-91, 101.
- MEI Xiaoren, CHEN Peng, GAO Yongsheng. Correlative factors analysis and regression model research on coal calorific value using SPSS software[J]. China Coal, 2011, 37(7): 88-91, 101.
- [18] 陈萌, 韩大伟, 吉芳英, 等. 城市污水处理厂污泥热值及影响因素分析[J]. 给水排水, 2008(4): 37-40.
- CHEN Meng, HAN Dawei, JI Fangying, et al. On sludge heat value examination and its influencing factors of municipal wastewater treatment plants[J]. Water & Wastewater Engineering, 2008(4): 37-40.
- [19] 关睢, 聂淑瑜. 生物质固体成型燃料热值和碳元素预测模型的建立[J]. 化学分析计量, 2017, 26(3): 31-36.
- GUAN Ju, NIE Shuyu. Development of prediction models for heating value and carbon content of biomass solid fuel[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2017, 26(3): 31-36.
- [20] 周利, 郭雪松, 肖本益, 等. 城市污水处理厂剩余污泥热值估算方法研究[J]. 给水排水, 2011, 47(9): 134-139.
- ZHOU Li, GUO Xuesong, XIAO Benyi, et al. Study on estimating caloric value of excess sludge from municipal wastewater treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 47(9): 134-139.
- [21] 李薇, 付殿峥, 付正辉, 等. 生物质电厂燃料灰分含量与元素分析指标间相关分析研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(7): 1044-1048.
- LI Wei, FU Dianzheng, FU Zhenghui, et al. Research on correlation between ash content and proximate analysis indices of biomass fuel from biomass power plant [J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(7): 1044-1048.
- [22] 李锋, 刘思源, 李艳, 等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 934-944.
- LI Feng, LIU Siyuan, LI Yan, et al. Spatiotemporal variability and source apportionment of soil heavy metals in a industrially developed city [J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 934-944.
- [23] 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 等. 太湖运河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 5073-5081.
- LI Weidi, CUI Yunxia, ZENG Chengcheng, et al. Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils in the taige canal valley [J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 5073-5081.
- [24] 杨彦, 李良忠, 于云江, 等. 基于统计分析的太湖流域某市农业活动区重金属污染特征及来源[J]. 环境科学研究, 2012, 25(12): 1319-1327.
- YANG Yan, LI Liangzhong, YU Yunjiang, et al. Analysis of heavy metals distribution characteristics and sources based on agricultural region statistics of Taihu lake basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(12): 1319-1327.
- [25] 徐昌, 李钟玮. 大庆地区城市污泥中重金属元素含量水平调查与分析[J]. 中国无机分析化学, 2013, 3(3): 33-36.
- XU Chang, LI Zhongwei. Survey and analysis of heavy metal element level of the sludge in Daqing municipal area [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2013, 3(3): 33-36.
- [26] 路瑞娟, 付杰, 王晨晨, 等. 城市污泥处理过程中重金属迁移转化特性研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 318-324.
- LU Ruijuan, FU Jie, WANG Chenchen, et al. Research progress on the characteristics of heavy metal transfer and transformation in municipal sludge treatment [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 318-324.
- [27] DU F Z, FREGUIA S, YUAN Z G, et al. Enhancing toxic metal removal from acidified sludge with nitrite addition [J]. Environmental Science & Technology,

- 2015,49(10):6257-6263.
- [28] STYLIANOU M A, KOLLIA D, HARALAMBOUS K J, et al. Effect of acid treatment on the removal of heavy metals from sewage sludge [J]. *Desalination*, 2007, 215(1-3):73-81.
- [29] 黎淑端, 孙连鹏, 潘心红. 广东省污水处理厂污泥重金属含量及其毒性浸出分析[J]. *中国卫生检验杂志*, 2014, 24(12):1763-1765.
- LI Shuduan, SUN Lianpeng, PAN Xinhong. Study on concentration and toxicity leaching of heavy metals in sludge from sewage treatment plants in Guangdong province [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2014, 24(12):1763-1765.
- [30] 寇莹莹, 赵倩, 王雪娆, 等. 谷氨酸与柠檬酸复合去除污泥中重金属及处理后污泥农用可行性分析[J]. *环境工程*, 2019, 37(10):185-189, 43.
- KOU Yingying, ZHAO Qian, WANG Xueyao, et al. Removal of heavy metals from sludge by glutamic acid and citric acid and its agricultural utilization feasibility [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(10):185-189, 43.
- [31] 张浩, 魏显珍, 陆恩舟, 等. 两种浸提方法对水处理污泥中重金属的浸提特性研究[J]. *再生资源与循环经济*, 2022, 15(4):34-38.
- ZHANG Hao, WEI Xianzhen, LU Enzhou, et al. Study on leaching characteristics of heavy metals in sewage treatment sludge by two leaching methods [J]. *Recycling Research*, 2022, 15(4):34-38.
- [32] HU J L, ZHAO J X, ZHENG X, et al. Removal of heavy metals from sewage sludge by chemical leaching with biodegradable chelator methyl glycine diacetic acid [J]. *Chemosphere*, 2022, 300: 134496. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2022. 134496.
- [33] 住房和城乡建设部给水排水产品标准化技术委员会. 城镇污水处理厂污泥处置 制砖用泥质:GB/T 25031—2010[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
- Technical Committee for Standardization of Water Supply and Drainage Products of Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant-quality of sludge used in making brick:GB/T 25031—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [34] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 城镇污水处理厂污泥处置 水泥熟料生产用泥质:CJ/T 314—2009[S]. 北京:中国标准出版社, 2009.
- Research Institute of Standards and Norms Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant-quality of sludge used in the production of cement clinker:CJ/T 314—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [35] 住房和城乡建设部给水排水产品标准化技术委员会. 城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质:GB/T 24602—2009[S]. 北京:中国标准出版社, 2009.
- Technical Committee for Standardization of Water Supply and Drainage Products of Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant-quality of sludge used in separate incineration:GB/T 24602—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [36] 史明易, 王祖伟, 王嘉宝. Hakanson 指数法在评价土壤重金属生态风险上的应用进展[J]. *土壤通报*, 2019, 50(4):1002-1008.
- SHI Mingyi, WANG Zuwei, WANG Jiabao. Assessment for ecological risk of soil heavy metals with Hakanson index method: a review [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(4):1002-1008.
- [37] 刘文政, 杨绍群, 殷忠, 等. 黔产市售绿茶重金属的含量特征及健康风险评估[J]. *中国无机分析化学*, 2022, 12(6):19-25.
- LIU Wenzheng, YANG Shaoqun, YIN Zhong, et al. Health risk assessment and characteristics of heavy metals in green tea samples from urban markets in Guizhou province [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2022, 12(6):19-25.