

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.21.014

# 上海农村污水污泥重金属污染水平及营养指标评价

杨 早<sup>1</sup>, 李 瑜<sup>2</sup>, 王晶晶<sup>1</sup>, 胡昕晔<sup>2</sup>, 时珍宝<sup>3</sup>, 李 昕<sup>1</sup>,  
李怀正<sup>1</sup>, 董 滨<sup>1</sup>, 徐祖信<sup>1</sup>

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海市水利管理事务中心, 上海 200002; 3. 上海碧波水务设计研发中心, 上海 200233)

**摘 要:** 为了解上海市农村污水污泥中重金属的污染特征和其资源化利用的潜力,选取上海市稳定运行的分散式农村污水处理设施为研究对象,最终采集样本21个,利用ArcGIS阐明了重金属和营养元素的区域分布特征。结果表明:上海市农村污水污泥重金属的污染水平和潜在生态风险呈由北向南递减的趋势,但整体来说重金属含量均满足《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)B级污泥产物污染物限值要求,可以安全地进行土地资源化利用;除闵行区外,上海市其余区的农村污水污泥都已达到或极其接近《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)对N、P、K含量的要求(30 g/kg),稳定化处理后可就地进行还林利用;Cu、Zn、Pb的富集可能源于畜禽粪便污染和交通污染,推测Cd和As可能来源于施肥和工业活动。这可为上海市农村污水处理设施运行现状的研究提供参考,为上海市农村污泥处理方式与相关政策的制定提供依据。

**关键词:** 农村污水污泥; 重金属污染; 营养指标; 生态风险评价

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)21-0086-08

## Heavy Metal Pollution Level of Rural Sewage Sludge in Shanghai and Its Nutrition Indicator Evaluation

YANG Zao<sup>1</sup>, LI Yu<sup>2</sup>, WANG Jing-jing<sup>1</sup>, HU Xin-ye<sup>2</sup>, SHI Zhen-bao<sup>3</sup>, LI Xin<sup>1</sup>,  
LI Huai-zheng<sup>1</sup>, DONG Bin<sup>1</sup>, XU Zu-xin<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Water Conservancy Management Center, Shanghai 200002, China; 3. Shanghai Bibo Water Design and Research Center, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** This paper collected 21 available samples from decentralized rural sewage treatment facilities operated stably in Shanghai, clarified the regional distribution characteristics of heavy metals and nutrient elements by ArcGIS, so as to understand the pollution characteristics of heavy metals in rural sewage sludge in Shanghai and its potential for resource utilization. The heavy metal pollution level and potential ecological risk of rural sewage sludge in Shanghai showed a decreasing trend from north to south. However, the heavy metal content met the class B sludge product pollutant limit specified in *Control Standards of Pollutants in Sludge for Agricultural Use* (GB 4284-2018) on the whole, indicating that the

基金项目: 中国工程院咨询研究项目(2021-SH-XY-2); 国家自然科学基金资助重大项目(52192684); 上海市农村生活污水处理污泥典型调查项目

通信作者: 董滨 E-mail: dongbin@tongji.edu.cn

sludge could be safely used for resource utilization in land. Except Minhang District, the nitrogen, phosphorus and potassium contents of rural sewage sludge in other areas of Shanghai reached or was very close to the limits (30 g/kg) specified in *Disposal of Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plant—Quality of Sludge Used in Gardens or Parks* (GB/T 23486–2009), and the sludge could be returned to local forest after stable treatment. The enrichment of Cu, Zn and Pb might come from livestock manure and traffic pollution, and it was speculated that Cd and As might originate from fertilization and industrial activities. This paper provided a reference for the study of the operation status of rural sewage treatment facilities in Shanghai, and built an important basis for the treatment of rural sludge and the formulation of relevant policies in Shanghai.

**Key words:** rural sewage sludge; heavy metal pollution; nutrition indicator; ecological risk assessment

随着我国社会经济的快速发展和农村厕所革命后生活设施的改善,我国农村生活污水排放量持续增加。农村生活污水是指农村家庭生活产生的污水,包括厨房用水、厕所用水、洗涤用水和其他污水等,分别占农村生活污水总量的 26.0%、16.0%、46.0% 和 12.0%。未经处理或处理不当的生活污水随意排放,是导致农村生态环境污染的重要原因。据报道,造成太湖水体富营养化的主要污染物中,77.0% 的氨氮、66.0% 的总磷来源于农村面源污染<sup>[1]</sup>。因此,农村生活污水的治理至关重要。上海市农村生活污水产量约为  $29 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,自 2007 年起上海市郊区大力推进农村生活污水治理工作,截至 2020 年底,全市累计建成 84 万户的农村生活污水处理设施,处理率达到 85.0% 以上<sup>[2]</sup>。

农村生活污水的水质和水量受到居民生活习惯、生活水平的影响,其处理技术近年来成为了研究的热点<sup>[3]</sup>。目前对分散式农村污水处理设施的研究与应用主要关注处理工艺的选择和出水水质的控制<sup>[4-8]</sup>,但往往忽略了剩余污泥安全处置的相关技术与措施,剩余污泥的无序排放甚至导致了农村水环境的二次污染。

上海市出台了《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 31/T 1163—2019)、《上海市排水与污水处理条例》,强调农村生活污水处理设施产生的污泥经处理达到相应的泥质标准后,可进行就地还田、还林等资源化利用。基于上述要求,笔者选取了上海市郊区县共计 21 个农村污水处理设施进行调查取样,系统阐明了剩余污泥的有机质、营养元素(N、P、K)和重金属等的区域分布特征,对其

开展了污染与生态风险评价,提出对其实现资源化利用的可行性,以期为上海市农村污水污泥的处理与相关政策的制定提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调研区域与取样点

本研究于 2021 年 5 月—6 月采集了上海市 21 个稳定运行的农村污水处理设施所产生的剩余污泥,取样点概况见表 1。

表 1 取样点概况

Tab.1 Fundamental state of sampling sites

序号	所在区	所在村镇	处理工艺	处理水量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )
S1	闵行	浦江镇联星村	AO+MBR	2
S2	嘉定	工业区娄东村	接触氧化+人工湿地	35
S3	嘉定	外冈镇周泾村	AO+MBR	30
S4	宝山	顾村镇白杨村	A <sup>2</sup> O	240
S5	奉贤	庄行镇芦泾村	MBR	20
S6	奉贤	西渡街道益民村	生物滤池+人工湿地	30
S7	金山	漕泾镇蒋庄村	MBR	73.5
S8	金山	枫泾镇新义村	生物滤池+人工湿地	70
S9	金山	廊下镇中联村	MBR	15
S10	金山	吕巷镇马新村	MBR	70
S11	金山	亭林镇新巷村	MBR	80
S12	金山	朱泾镇万联村	MBR	60
S13	青浦	白鹤镇杜村	生物滤池+人工湿地	44
S14	青浦	金泽镇双祥村	A <sup>2</sup> O	65
S15	青浦	练塘镇朱庄村	生物滤池+人工湿地	70
S16	青浦	重固镇回龙村	生物滤池+人工湿地	16
S17	崇明	堡镇人民村	接触氧化+人工湿地	20
S18	崇明	港西镇富民村	MBR	35
S19	崇明	建设镇富安村	MBR	40
S20	崇明	绿华镇绿园村	MBR	30
S21	崇明	向化镇卫星村	MBR	30

在上海市降雨汛期来临之前完成了采样,尽量降低降雨对进水水质造成的影响,采样时间段气温为15~25℃,较为适宜且具有代表性,避免了低温对微生物生长的不利影响<sup>[9]</sup>。研究区域及取样点分布情况见图1,样品采集点主要分布在黄浦江上游农业区、杭州湾北岸农业区、环都市农业区和崇明三岛农业区。



图1 研究区域及取样点分布示意

Fig.1 Schematics of the research area and the distribution of sampling points

## 1.2 化学分析方法

参照《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018),对每个调研点分3次取总计1~4 L剩余污泥样品进行分析。将采集的农村污水污泥样品冷冻干燥后去除动植物残体等杂物,研磨后过200目筛,放入干燥皿中备用。有机质含量采用灼烧重量法测定;总氮采用元素分析仪测定;总磷采用钼酸铵分光光度法测定;Zn、Cu、Cr、Ni、Pb、As、Cd和K采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定。

## 1.3 评价指标

### 1.3.1 污染负荷指数

Tomlinson等<sup>[10]</sup>提出采用污染负荷指数(PLI)评估样品中重金属的综合污染状况。PLI<1,表示环境条件比较完善;1≤PLI<2,表示存在一定程度的污染;2≤PLI<3,表示存在中度污染风险;3≤PLI<5,表示污染风险高;PLI≥5则代表污染风险极其严重<sup>[11]</sup>。具体计算公式如下:

$$C_f^i = \frac{C_i}{C_n} \quad (1)$$

$$PLI = \sqrt[n]{C_f^1 \times C_f^2 \times \cdots \times C_f^n} \quad (2)$$

式中: $C_i$ 为取样点的重金属含量; $C_n$ 为研究中

采用的参考值,可采地质元素背景值<sup>[12]</sup>; $C_f^i$ 为某种重金属的单因素污染系数,数值越小说明污染越小; $n$ 为重金属的数量。

### 1.3.2 潜在生态危害指数

潜在生态危害指数(RI)评价方法最早由Hakanson于1980年提出。该方法从沉积学角度出发,以重金属的性质和环境行为特点为依据评价重金属的潜在生态危害,可以评价土壤和沉积物中多种元素的综合生态风险和环境毒性<sup>[13]</sup>。RI<150,代表生态风险低;150≤RI<300,代表具有中等生态风险;300≤RI<600,代表生态风险高;RI≥600则代表具有非常高的生态风险。具体计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C_i}{C_n} \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (4)$$

式中: $T_r^i$ 为毒性响应系数,代表某种重金属的毒性水平及生态敏感性,Zn、Cu、Cr、Ni、Pb、As、Cd的毒性响应系数分别为1、5、2、5、5、10、30<sup>[14]</sup>; $E_r^i$ 为某种重金属相应的潜在生态风险;RI为所有重金属的综合潜在生态风险。

### 1.3.3 相关性和主成分分析

相关性分析(CA)可通过相关性系数来确定不同种类重金属之间的显著相关性,从而指示重金属之间是否有相同的来源。根据显著性检验方法所得到的 $P$ 值,一般以 $P<0.05$ 为有统计学差异, $P<0.01$ 为有显著统计学差异, $P<0.001$ 为有极其显著的统计学差异。主成分分析(PCA)则是一种降维方法,在损失较少信息的前提下,将多个指标转化为几个主成分,得出主要的污染指标,从而判断污染源。应用该方法进行数据分析前,需保证检验统计量(KMO)均大于0.5,Bartlett球形检验的显著性均低于0.05,提取主成分时遵循主成分累积贡献率高于80%、特征值高于1的原则<sup>[15]</sup>。

## 1.4 统计分析方法

空间测绘采用ArcGIS 10.7软件,对重金属和营养元素(N、P、K)的浓度进行分析,以阐明区域分布特征;相关性和主成分分析在Origin 9.0中完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 剩余污泥重金属的空间分布特征

图2为污泥中7种重金属含量情况。可知,在整个研究区域内,Zn的平均含量最高,达到了



417.1 mg/kg,其次是Cr、Cu、Pb、Ni、As和Cd,平均含量分别为153.9、92.6、47.7、34.8、24.9和2.0 mg/kg。与李现瑾等<sup>[16]</sup>对上海市周边5个乡镇生活污水处理装置所产污泥的调查结果相比,本次调研中样品的重金属含量有所升高,但仍远低于城镇污水处理厂污泥的重金属含量。Cr、Ni、Pb三种重金属在青浦区农村污水污泥中的平均含量高于其他区域,分别为257.7、66.5、86.7 mg/kg;Zn和Cu在宝山区的平均含量最高,达955.7和133.2 mg/kg;As和Cd在嘉定区(91.3和7.6 mg/kg)平均含量最高。将上海市各区农村污水污泥的重金属含量与《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)A级污泥产物(可用于耕地、园地、牧草地)的污染物限值(图2中红线)、《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)的农用地土壤(pH>7.5)污染风险筛选值(图2中蓝线)进行比较,可知,上海市各区农村污水污泥的重金属绝大部分满足《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)中A级污泥产物污染物限值要求,仅有个别点位的As和Cd存在超过A级限值的风险,但也均满足B级污泥产物污染物限值要求,可以安全地进行土地利用。而对于更为严格的《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)来说,农村污水污泥无法同时满足其对所有重金属含量的限值要求,但除As、Cd、Zn和Cu外,Cr、Ni、Pb三种重金属的含量均已低于农用地土壤污染筛选值。

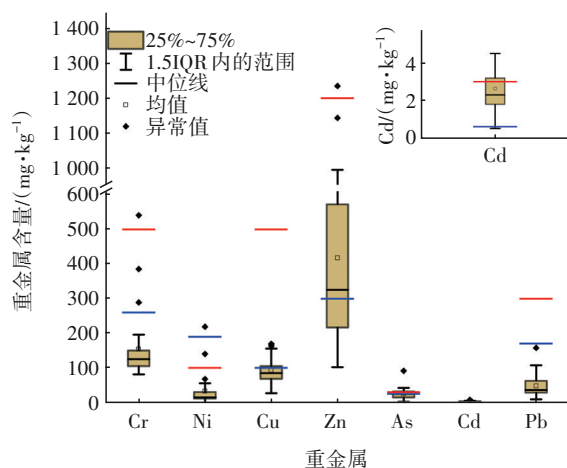


图2 污泥中重金属含量

Fig.2 Heavy metal contents in sludge

图3展现了Zn、Cu、As和Cd四种重金属在研究区域内的分布特征。可知,调研区域内上海市农村

污水污泥的重金属含量总体呈现北高南低的趋势,且远低于GB 4284—2018中B级污泥产物污染物限值,Zn和Cu均能满足A级污泥产物污染物限值。奉贤区和金山区的农村污水污泥中Cd未达到检出限,Zn和Cu低于农用地土壤(pH>7.5)污染风险筛选值。因此,经过妥善的处理处置并关注As和Cd等风险较大重金属的含量与去向,将农村污水污泥就地还林利用是具有可操作性的。

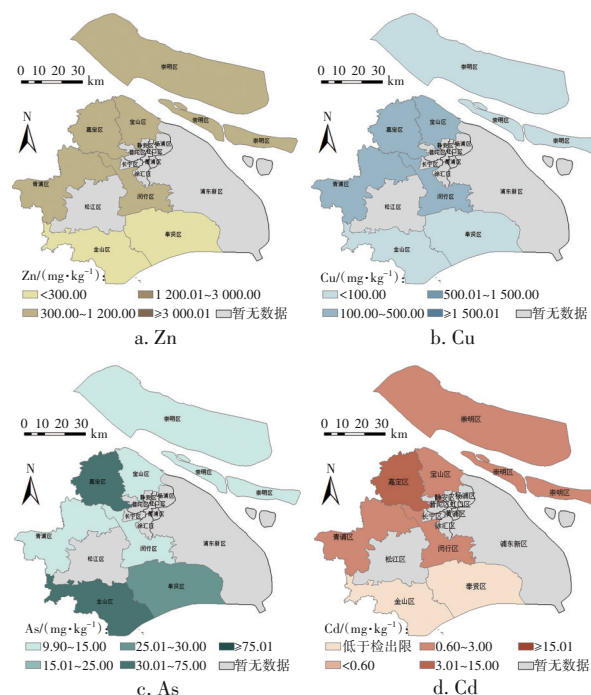


图3 农村污水污泥重金属含量区域分布

Fig.3 Spatial distribution of heavy metals in rural sewage sludge

## 2.2 重金属污染的生态风险评价

PLI和RI的综合评价方法可以量化研究区域内重金属的污染、健康和生态风险,其污染范围随着PLI的增加而扩大。图4为各区PLI的分布情况。

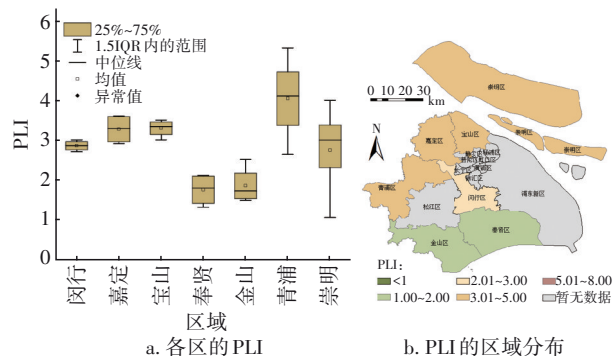


图4 PLI的分布情况

Fig.4 Distribution of PLI

由图4可知,奉贤区和金山区存在一定水平的生态风险,但相对来说污染水平较低;其次是闵行区;青浦区、嘉定区、宝山区和崇明区是污染水平相对较高的区域,与重金属含量的空间分布趋势基本相同。

图5为RI的分布情况。可知,Cd是RI的主要贡献者,其次是As、Cu、Pb、Zn和Ni,最后是Cr,其中As和Cd有可能对人体健康造成较大威胁,需要格外关注。整体来说,各取样点RI的范围在71.1~2 056.8,平均值为537.4。上海市农村污水污泥潜在生态风险最低的区域为奉贤区和金山区。在未来的农村污水污泥管理中,对潜在生态风险较低的区域应大力发展污泥就地农业利用;同时对少量生态风险偏高的区域,其资源化利用的方向应偏向还林,降低与人体直接接触的可能性。

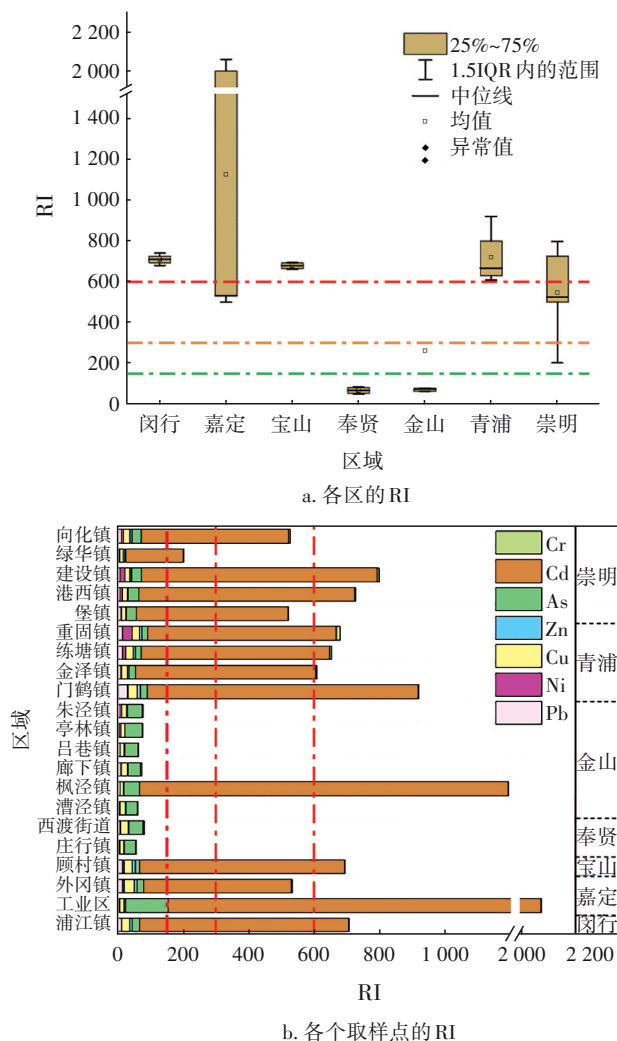


图5 RI的分布情况

Fig.5 Distribution of RI

## 2.3 重金属的来源分析

研究区域内农村污水污泥中重金属之间的相关性分析及相关系数( $r$ )的计算见图6。可知,Cr-Ni( $r=0.97$ )、Cu-Zn( $r=0.88$ )、Cu-Pb( $r=0.81$ )、Pb-Zn( $r=0.78$ )和Cd-As( $r=0.94$ )之间存在极其显著的正相关( $P<0.001$ ),表明这些重金属元素可能存在同源或复合污染关系。

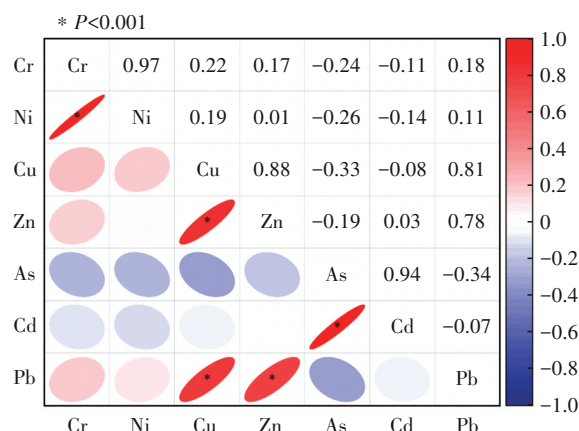


图6 上海市农村污水污泥中重金属的相关系数

Fig.6 Correlation coefficients of heavy metals in rural sewage sludge of Shanghai

KMO(0.597>0.5)和Bartlett球形度检验(0.00<0.05)表明适合进行主成分分析,结果见表2。

表2 上海市农村污水污泥中重金属的主成分分析

Tab.2 Principal component analysis of heavy metals in rural sewage sludge of Shanghai

项 目		成 分		
		PCA1	PCA2	PCA3
重金属	Cr	0.606	0.777	0.007
	Ni	0.509	0.843	-0.048
	Cu	0.825	-0.353	0.122
	Zn	0.827	-0.307	0.372
	As	-0.507	0.110	0.629
	Pb	0.878	-0.305	0.099
	Cd	-0.179	0.176	0.870
特征值		3.050	1.670	1.319
方差贡献率/%		43.58	23.85	18.84
累积贡献率/%		43.58	67.43	86.28

根据Kaiser特征值>1的标准,提取了贡献率分别为43.58%、23.85%和18.84%的3个主成分因子,累积贡献率为86.28%,可解释所有重金属的大部分信息。其中PCA1上载荷系数大于0.5的重金属有Pb、Zn、Cu、Cr和Ni,载荷系数分别为0.878、

0.827、0.825、0.606 和 0.509;PCA2 上载荷较大的重金属为 Ni 和 Cr,载荷系数分别为 0.843 和 0.777;PCA3 上载荷较大的重金属为 Cd 和 As,载荷系数分别为 0.870 和 0.629。结合相关系数可知,第一主成分为 Pb、Zn 和 Cu,第二主成分为 Ni 和 Cr,第三主成分为 Cd 和 As。

第一主成分中,Cu、Zn、Pb 的富集可能源于畜禽粪便污染和交通污染。畜禽养殖过程中饲料添加了 Cu、Zn 等微量元素,其不能被畜禽吸收,从而富集在畜禽粪便中<sup>[17]</sup>。若畜禽粪便无序堆积,其中的微量重金属可能会随降雨或居民冲洗地面时产生的径流汇入农村污水管道。Cu 还有可能来源于汽车零部件的磨损<sup>[18]</sup>;机动车刹片、润滑油燃烧、尾气排放和橡胶轮胎的磨损也会产生 Zn<sup>[19]</sup>;而 Pb 也是交通源污染的标志性元素,主要来自机动车尾气的排放<sup>[20]</sup>。交通运输和日常通行引起的交通污染会导致道路灰尘或附近土壤中相应重金属的蓄积,可能会通过降雨径流、扬尘等方式进入到农村污水处理系统中,是农村污水污泥中 Cu、Zn、Pb 富集的部分原因。

第二主成分中,Cr 和 Ni 的富集可能受自然和人为因素的影响。除青浦区外,Ni 在其他区域采样点的浓度基本低于上海土壤背景值,由此表明农村污泥中的 Ni 有受到土壤性质影响的可能性。同时 Cr 和 Ni 的积累,与长期施用杀虫剂和农药等农业生产活动密切相关<sup>[21]</sup>。在清洗被农药污染的容器过程中,重金属元素不可避免地进入到农村污水管道中,也可能在施用农药后随着地表径流进入农村污水处理设施,最终富集到农村污泥中。

第三主成分中,As 含量在嘉定区最高,多个汽车零部件、光电子信息、精密机械制造、新型材料等为主导产业的工业园区位于嘉定,且嘉定区的采样点 S2(工业区娄东村)和 S3(外冈镇)都位于工业园区附近,由此推测 As 来源于工业污染的可能性最大<sup>[22]</sup>。Cd 被认为是化肥施用的标志性元素,由于其常常是磷矿石中的杂质,不可避免地残留于磷肥中。因此,第三主成分中的两种重金属元素富集主要受到人为因素的影响。

## 2.4 营养元素的含量和分布

本次调研中上海市农村污水污泥含水率为 57.7%~99.9%,有机质含量(VS/TS)为 20.4%~59.9%,pH 为 7.5~8.5,N、P、K 含量(以 DS 计)分别

为 1.3~50.5、0.9~16.5、5.3~17.9 g/kg。总体来说,闵行区、嘉定区、宝山区、青浦区和崇明区的农村污水污泥平均有机质含量都满足农用污泥控制标准,即有机质含量 $\geq 200$  g/kg(20.0%),其中崇明区建设镇富安村污泥的有机质含量最高,达到约 60.0%。图 7 为各区农村污水 N、P、K 含量的分布情况。可知,N、P、K 总量 $\geq 30$  g/kg 的取样点位占 51.2%。除闵行区外,其他区域农村污水污泥都已达到或极其接近《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)中对 N、P、K 含量的要求(30 g/kg),其中嘉定区、宝山区和崇明区的农村污水污泥能够同时满足对有机质和 N、P、K 含量的要求。

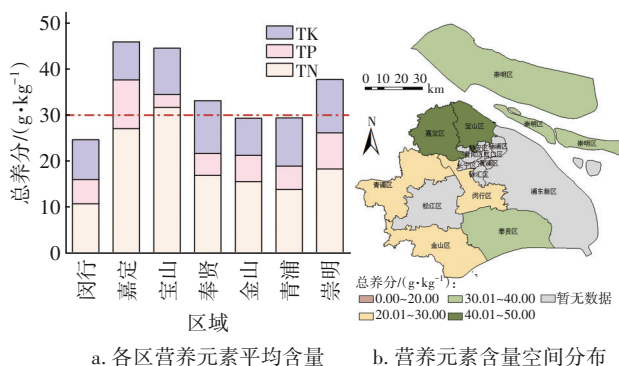


图 7 上海市农村污水污泥营养元素含量及分布

Fig.7 Content and distribution of nutrient elements in rural sewage sludge of Shanghai

污水中的有机物、N、P 等营养物被微生物吸收代谢,合成生物细胞,完成自身的生长繁殖,在宏观上表现为污泥浓度增加。而活性污泥浓度低、活性不高、脱氮除磷效果不理想,导致取得的活性污泥有机质含量低,N、P、K 含量不达标。上海市分散式农村生活污水处理装置产生的剩余污泥,其不同区域的营养指标(N、P、K 含量)差异较大,原因可能是进水的水质、水量不同,以及前期设计和后期维护的区别导致各生活污水处理装置的运行情况存在差异。

## 3 结论和建议

① 上海市农村污水污泥中重金属均满足《农用污泥污染物控制标准》B 级污泥产物污染物限值要求。奉贤区(除枫泾镇外)和金山区泥质的重金属含量均达到 A 级污泥产物污染物限值要求,稳定化处理后可以安全地进行就地还田或还林利用,潜在生态风险较低。其余区域主要是重金属中的 Cd、As 未达到 A 级要求,但完全满足 B 级要求,稳定化



处理后可以进行就地还林利用。

② 上海市农村污水污泥重金属的污染水平和潜在生态风险呈现由北向南递减的趋势。奉贤区和金山区重金属的污染水平和潜在生态风险最低。

③ 上海市农村污水污泥的N、P、K含量由高到低依次为:嘉定区、宝山区、崇明区、奉贤区、青浦区、金山区和闵行区。除闵行区外,其余区域农村污水污泥的N、P、K含量都已达到或极其接近园林绿化用污泥标准要求。同时考虑重金属污染情况和N、P、K含量,奉贤区的农村污水污泥稳定化处理后可进行就地还田或还林利用,其余区域建议稳定化处理后还林利用。

④ 相关性和主成分分析表明,第一主成分Cu、Zn、Pb的富集可能源于畜禽粪便污染和交通污染;第二主成分Cr、Ni可能受自然和人为因素的影响;第三主成分Cd、As则可能受到施肥和工业活动等人为因素的影响。

⑤ 农村污水具有水量波动大、进水浓度总体偏低的问题,总体来看上海市现有处理设施产生的剩余污泥有机质含量偏低。建议后续应做到集中规划、集中处置,进一步加强管理,补足农村管网建设短板,保证污水处理设施能够持续稳定地发挥作用。

#### 参考文献:

- [1] 马小雪,龚畅,郭加汛,等. 长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3291-3303.  
MA Xiaoxue, GONG Chang, GUO Jiaxun, *et al.* Water pollution characteristics and source apportionment in rapid urbanization region of the lower Yangtze River: considering the Qinhuai River catchment [J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3291-3303 (in Chinese).
- [2] 郭飞宏,张心良,汪龙眠,等. 太湖地区农村生活污水生物生态处理技术选择分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(20): 48-51.  
GUO Feihong, ZHANG Xinliang, WANG Longmian, *et al.* Selection and analysis of treatment technologies for rural sewage in Taihu Lake area [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(20): 48-51 (in Chinese).
- [3] 胡昕晔,翁晏呈,黄彰奕. 上海农村生活污水治理现状与发展的思考[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(1): 73-76.  
HU Xinye, WENG Yancheng, HUANG Zhangyi. Consideration on present situation and development of sewage treatment in rural areas of Shanghai [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2021, 41(1): 73-76 (in Chinese).
- [4] 谢林花,吴德礼,张亚雷. 中国农村生活污水处理技术现状分析及评价[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(10): 865-870.  
XIE Linhua, WU Deli, ZHANG Yalei. Analysis and evaluation of China's rural domestic sewage treatment technology [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(10): 865-870 (in Chinese).
- [5] 钱海燕,陈葵,戴星照,等. 农村生活污水分散式处理研究现状及技术探讨[J]. 中国农学通报, 2014, 30(33): 176-180.  
QIAN Haiyan, CHEN Kui, DAI Xingzhao, *et al.* Present status and technology on decentralized treatment of domestic sewage in rural areas [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(33): 176-180 (in Chinese).
- [6] 蒋岚岚,刘晋,钱朝阳,等. MBR/人工湿地工艺处理农村生活污水[J]. 中国给水排水, 2010, 26(4): 29-31.  
JIANG Lanlan, LIU Jin, QIAN Zhaoyang, *et al.* Treatment of rural domestic sewage by MBR/constructed wetland process [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(4): 29-31 (in Chinese).
- [7] 曹大伟,李先宁,李孝安,等. 地理式一体化生物滤池工艺处理农村生活污水[J]. 中国给水排水, 2008, 24(1): 30-34.  
CAO Dawei, LI Xianning, LI Xiao'an, *et al.* Buried integrated biofilter process for treatment of rural domestic sewage [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(1): 30-34 (in Chinese).
- [8] 李怀正,叶建锋,王晟,等. 垂直潜流人工湿地技术在上海市农村污水处理中的应用和发展[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(8): 84-89.  
LI Huaizheng, YE Jianfeng, WANG Sheng, *et al.* Application and development of vertical subsurface flow constructed wetland technology in rural sewage treatment in Shanghai [J]. Environmental Pollution and Control, 2008, 30(8): 84-89 (in Chinese).
- [9] 钱程,任丽波,姚瑶. 寒冷地区冬季低温对污水处理厂运行效率的影响研究[J]. 环境科学与管理, 2008,

- 33(5): 84-86.
- QIAN Cheng, REN Libo, YAO Yao. The effect of wastewater treatment plant in low temperature North [J]. Environmental Science and Management, 2008, 33 (5): 84-86 (in Chinese).
- [10] TOMLINSON D L, WILSON J G, HARRIS C R, *et al.* Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index [J]. Helgolander Meeresuntersuchungen, 1980, 33 (1): 566-575.
- [11] SURESH G, SUTHARSAN P, RAMASAMY V, *et al.* Assessment of spatial distribution and potential ecological risk of the heavy metals in relation to granulometric contents of Veeranam Lake sediments, India [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 84: 117-124.
- [12] 成杭新,李括,李敏,等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值 [J]. 地学前缘, 2014, 21 (3): 265-306.
- CHENG Hangxin, LI Kuo, LI Min, *et al.* Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 265-306 (in Chinese).
- [13] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control—a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [14] KE X, GUI S, HUANG H, *et al.* Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China [J]. Chemosphere, 2017, 175: 473-481.
- [15] LIU L, DONG Y, KONG M, *et al.* Insights into the long-term pollution trends and sources contributions in Lake Taihu, China using multi-statistic analyses models [J]. Chemosphere, 2020, 242: 125272.
- [16] 李现瑾,谢一泉,任亮,等. 生活污水处理装置污泥重金属及营养指标与城镇污水厂污泥的对比研究 [J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(10): 28-30.
- LI Xianjin, XIE Yixiao, REN Liang, *et al.* A comparative study on heavy metal and nutrient index of sludge from household sewage treatment plant and sewage treatment plant [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37 (10): 28-30 (in Chinese).
- [17] 姜萍,金盛杨,郝秀珍,等. 重金属在猪饲料-粪便-土壤-蔬菜中的分布特征研究 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 942-947.
- JIANG Ping, JIN Shengyang, HAO Xiuzhen, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in feeds, pig manures, soils and vegetables [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29 (5): 942-947 (in Chinese).
- [18] LU X, WANG L, LI L, *et al.* Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, NW China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173 (1/3): 744-749.
- [19] PAGOTTO C, RÉMY N, LEGRET M, *et al.* Heavy metal pollution of road dust and roadside soil near a major rural highway [J]. Environmental Technology, 2001, 22(3): 307-319.
- [20] WANG H, LU S. Spatial distribution, source identification and affecting factors of heavy metals contamination in urban-suburban soils of Lishui City, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64 (7): 1921-1929.
- [21] XIAO H, SHAHAB A, XI B, *et al.* Heavy metal pollution, ecological risk, spatial distribution, and source identification in sediments of the Lijiang River, China [J]. Environmental Pollution, 2021, 269: 116189.
- [22] PARIHAR P. Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: a review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 112: 247-270.
- 
- 作者简介:杨早(1998- ),女,云南大理人,博士研究生,研究方向为固体废弃物处理处置技术。  
E-mail:2210223@tongji.edu.cn  
收稿日期:2022-09-23  
修回日期:2022-11-16

(编辑:沈靖怡)