

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价

李娟, 李金香*, 杨妍妍

(北京市生态环境监测中心, 北京 100048)

摘要: 在城市固废管理中, 污水处理厂污泥科学合理地处置利用问题越来越重要, 阐明城镇污水处理厂污泥的污染状况和化学性质, 评价城市污泥污染物的生态风险和危害, 可以为污泥的资源化利用提供依据. 对某市 49 家城镇污水处理厂污泥泥质 (pH、含水率、Cd、Cr、Cu、Zn、Pb、As、Hg、Ni、矿物油、挥发酚、多环芳烃、有机质和氮磷钾) 开展监测, 分析其重金属和有机污染物状况、污染物含量频数分布以及污泥养分变化特征, 并应用内梅罗指数法和 Hakanson 潜在生态危害指数评估污泥在农利用过程中重金属的潜在生态风险和危害. 结果表明, 在污泥 pH 总体呈现中性、且高含水率的状况下, 重金属含量高低为: $Zn > Cu > Cr > Pb > Ni > As > Hg > Cd$, 其中, Cd、Pb、Hg、Ni 和 As 为重金属来源第一主成分 (生活清洁和医疗) 的主要载荷因素; 在所有样品中, 8 项重金属频数分布最集中的含量分别为: 38.9 ~ 1380.0、62.6 ~ 182.7、63.6 ~ 181.3、0.0 ~ 97.8、19.3 ~ 68.4、0.8 ~ 29.2、0.3 ~ 8.7 和 0.01 ~ 0.96 $mg \cdot kg^{-1}$; 矿物油、挥发酚和多环芳烃含量最集中的频数分布占比分别为: 87.0%、87.9% 和 77.6%; 污泥养分含量高于我国平均水平, 有机质含量为农家粪肥 (猪粪、牛粪和鸡粪) 的 67.4%、75.9% 和 92.5%, 氮磷钾含量与农家粪肥相差不大. 内梅罗指数和 Hakanson 生态危害指数显示某市城镇污水处理厂污泥存在一定的生态风险; 此外, 在符合污泥农用标准的 44 家城镇污水处理厂中, 共有 4 家污水处理厂污泥属于重度污染或强生态危害. 综上所述, 某市污水处理厂污泥农用存在一定的潜在生态风险, 施用前需降低其重金属含量, 在污泥符合农用标准的前提下, 还需综合生态风险评价, 合理选择污泥资源化方式.

关键词: 城镇污水; 污泥泥质; 重金属; 潜在生态风险; 频数分布

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1956-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202005332

Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants

LI Juan, LI Jin-xiang*, YANG Yan-yan

(Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China)

Abstract: In urban solid waste management, the scientific and reasonable disposal and utilization of sewage sludge is becoming more and more important. It can be said that the pollution status and chemical properties of sewage sludge in urban sewage treatment plants can provide a basis for the scientific disposal and utilization of sludge. In this study, the characteristics of pH, moisture content, Cd, Cr, Cu, Zn, Pb, As, Hg, Ni, mineral oil, volatile phenol, PAHs, organic matter, nitrogen, phosphorus, and potassium were evaluated in sewage sludge collected from 49 sewage treatment plants in a certain city. The pollution status of heavy metals and organic pollutants, the frequency distribution of pollutant concentrations, and changes in the nutrient content were analyzed. The Nemero index and Hakanson potential ecological hazard index were used to assess the potential ecological risks of heavy metals in the agricultural utilization process of sludge. The results showed that under the condition of neutral pH values and high moisture content, the order of heavy metal content was $Zn > Cu > Cr > Pb > Ni > As > Hg > Cd$. The principal component analysis (PCA) results indicated that Cd, Pb, Hg, Ni, and As constituted the main load factors of the first main component of heavy metal sources. The most concentrated contents of 8 heavy metal frequency distributions among the 49 samples were 38.9-1380.0, 62.6-182.7, 63.6-181.3, 0.0-97.8, 19.3-68.4, 0.8-29.2, 0.3-8.7, and 0.01-0.96 $mg \cdot kg^{-1}$. In addition, the most concentrated frequency distribution of mineral oil, volatile phenol, and PAH concentration were 87.0%, 87.9%, and 77.6%, respectively. Moreover, the nutrient content of sludge was higher than the average level in China, and the organic matter content was 67.4%, 75.9%, and 92.5% of that of pig manure, cow dung, and chicken manure, while the content of nitrogen, phosphorus, and potassium was not very different. The Nemero index and Hakanson ecological hazard index results showed that the sludge of urban sewage treatment plant in the city has certain ecological risks. However, four sewage treatment plants were heavily polluted or highly ecologically hazardous among the 44 plants in this study, which were in line with the Standards for pollutant control of agricultural sludge. In summary, there are certain potential ecological risks for the agricultural utilization of sludge in the city, and it is necessary to reduce the heavy metal content before resourcing. More importantly, on the premise that the sludge meets the agricultural standards, a comprehensive ecological risk assessment is required to select a reasonable sludge recycling method.

Key words: urban sewage; sludge characteristics; heavy metals; potential ecological risk; frequency distribution

收稿日期: 2020-05-31; 修订日期: 2020-07-04

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0209903)

作者简介: 李娟 (1990 ~), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为环境监测, E-mail: lijuan19900801@163.com

* 通信作者, E-mail: jinxiangli@hotmail.com

近年来,不同规模大小的污水处理厂在各城市广泛分布,且随着我国污水处理能力迅速增长,产生了大量的剩余污泥. 根据文献[1]可知,2018 年中国城镇污水处理厂的数量达到了2 321座,污水处理总量为 $4.98 \times 10^{10} \text{ m}^3$,产生 $14.38 \times 10^6 \text{ t}$ 污泥(干固体). 以北京为例,2018 年全市城镇污水处理厂数量为158座,污水处理量为20.77亿t,以0.3%~0.5%的产泥率来计算,年产污泥量可达623.1万~1 038.5万t^[2].

污泥作为污水处理厂的主要产物,产量非常大,急需有效且安全的处理方式. 目前污泥的处理方式包括填埋、焚烧和土地利用^[3]. 土地利用是污泥实现资源化的一种重要处置方法,也是目前最普遍的方式,剩余污泥微生物丰富,其新陈代谢可以使土壤的空隙增多,增加通气性和含水率,生物间的物理化学反应对农田的酸碱性能有缓冲作用;另外,污泥中含有的大量有机质、氮磷钾养分元素和多种植物生长所需的微量元素,有利于提高作物产量和减少化学肥料的使用^[4~6]. 然而,城市污水处理厂污泥物质来源广泛,污泥中可能同时含有大量病原菌、无机或有机的有毒污染物(如金属微量元素和多环芳烃等),具有毒性大、潜伏期长和易在食物链中富集等特性^[7,8]. 其中,重金属作为一种持久性潜在有毒污染物,不容易被微生物利用降解,会致使重金属在土地农作过程中可能产生生态危害风险,从而限制其大规模土地利用^[9,10]. 因此,在污泥进行土地利用前,评估污泥中重金属等污染物的潜在生态风险具有十分重要的意义.

目前,针对城市污水处理厂污泥的研究重点在于某一个污水处理厂或主城区污水处理厂的重金属分析,谭国栋等^[11]以某市11个城镇污水处理厂的生污泥为样品,对其进行pH值、含水率和有机质等养分和重金属含量化验分析;何绪文等^[12]连续采集某市某污水处理厂污泥,并对重金属赋存形态和污染指数进行分析;杨妍妍等^[2]对某城市中心城区8家城镇污水处理厂污泥中重金属开展了持续监测,分析其重金属污染状况、年际及季节变化特征和潜在生态风险. 然而,城市城镇污水处理厂数量较多,分布范围较广,污泥产量大,以往研究对象范围不够广,样本量少,监测覆盖面代表性不足,同时对污泥有机物污染分析也比较缺乏. 因此,本文采集了某市49家城镇污水处理厂的污泥样品,对其污泥特性进行测定分析,同时对重金属的污染生态风险和潜在生态危害进行评估. 通过对全市污泥泥质特性进行全面的统计分

析,以期为该市乃至全国污水处理和污泥资源化利用提供基础数据和理论依据,也为制定污泥处置政策提供支持.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本实验采样阶段于2018年12月至2019年1月进行,对某市49家城镇污水处理厂开展1次污泥采集,采样点位为脱水机房出泥口、污泥车间堆放处、污泥车间传送带、污泥放置池以及污泥晾晒场,样品均为脱水污泥,采样样品质量大于1kg,现场加采10%的平行样,共获取54个污泥样品,采样后,样品存放于现场冷藏保温箱,在4℃下冷藏密封保存.

1.2 采集对象

这49家污水处理厂分布于某市14个区和经济技术开发区,且均建有生物污泥工艺,污水设计处理能力合计为480万t·d⁻¹,占该市污水处理厂总的污水设计能力的88%,处理污水90%以上为城市生活污水,污水处理工艺多为活性污泥法,包括A²/O工艺、SBR工艺和MBR工艺,部分污水厂采用生物膜法和超滤膜工艺;污泥产生量为1.8万t·d⁻¹,污泥脱水方式主要为机械脱水工艺,污泥去向以土地利用(23家)和焚烧(15家)为主,土地利用量和焚烧量占比分别为54%和31%.

1.3 检测与分析方法

此实验检测项目包括pH、含水率、Cd、Cr、Cu、Zn、Pb、As、Hg、Ni、矿物油、挥发酚、多环芳烃、有机质和氮磷钾. 根据文献[2]的方法,pH和含水率采用梅特勒酸度计(S220,瑞士)和电子天平(MS204TS,瑞士)进行测定;Cu、Cd、Zn、Pb、Ni和钾采用原子吸收分光光度计(A3F-13,中国)测定;As和Hg采用原子吸收分光光度计(AFS-9700,中国)测定;Cr采用电感耦合等离子体发射光谱仪(Optima8300,美国)测定;挥发酚、氰化物和氮磷采用紫外可见分光光度计(1810,中国)测定;矿物油采用红外分光测油仪(JDS-106U+,中国)测定;多环芳烃采用气相色谱质谱联用仪(QP2020 Ultra,日本)测定. 为保证检测工作质量,本项目通过精密度控制(至少10%平行样测试)、准确度控制(加标回收、标准参考物或质控样测试)、实验室空白测试和标准点检验等质控措施,确保检测样品质控率不低于10%. 数据分析时,若标准差远远大于均值,可判定数据存在异常值,并对其进行处理,所有数据和绘图均采用Origin 9.0软件和Excel 2013进行分析和分析.

1.4 内梅罗指数法

单个污泥样品中各重金属元素内梅罗单项污染指数(P_i)如式(1)^[13],内梅罗综合污染指数法可全面反映各污染物的平均污染水平,计算如式(2),同时,综合污染指数也突出了污染最严重的污染物给环境造成的危害^[14],内梅罗加权综合污染指数法[见式(3)]是根据不同污水处理厂污泥产量占比计算所得.

$$P_i = C_i/S_i \tag{1}$$

$$P = \sqrt{(P_{imax}^2 + P_{iave}^2)/2} \tag{2}$$

$$P' = \left(\sum P_j \cdot \frac{m_j}{M} \right) \cdot N^{-1} \tag{3}$$

式中, P_i 为土壤中污染物*i*的环境质量指数; C_i 为污染物*i*的实测含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 为参比值,本次评价以《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284-2018)中A级污泥的控制限值为参比值; P 为监测点的综合污染指数; P_{imax} 为*i*监测点污染物单污染指数中的最大值; P_{iave} 为*i*监测点所有污染物单污染指数平均值; P' 为加权综合污染指数; P_j 为第*j*家污水处理厂的综合污染指数; m_j 为第*j*家污水处理厂污泥产量; M 为49家污水处理厂污泥总产量; N 为污水处理厂数量.依据单因子指数法和内梅罗综合污染指数法可将重金属污染划分为5个等级: ≤ 0.7 ,Ⅰ级(清洁); $0.7 \sim 1.0$,Ⅱ级(警戒线); $1.0 \sim 2.0$,Ⅲ级(轻度污染); $2.0 \sim 3.0$,Ⅳ级(中度污染); > 3.0 ,Ⅴ级(重度污染).

1.5 Hakanson 潜在生态危害指数法

重金属潜在生态风险评价采用瑞典科学家提出的评价方法^[15],该方法是目前沉积物重金属污染质量评价应用最广泛的方法之一^[16].计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i} \tag{4}$$

$$RI' = \frac{\sum RI_j \cdot \frac{m_j}{M}}{N} \tag{5}$$

式中, C_f^i 为重金属*i*相对参比值的污染系数; C_s^i 为重金属*i*的实测含量; C_n^i 为重金属*i*的评价参比值; E_r^i 为第*i*种重金属单因子潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属*i*毒性响应系数; RI 为多元素综合潜在生态风险指数; RI' 为加权综合潜在生态风险指数; RI_j 为第*j*家污水处理厂的综合潜在生态风险指数. C_n^i 为参比值,本次评价中以《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284-2018)中A级污泥的控制限值为参比值.不同生态风险水平的划分标准参照表1,污泥产物化学性质和污染物含量限值参照表2.

表 1 不同生态风险水平的划分

Table 1 Division of different ecological risk levels		
E_r^i	RI	潜在生态风险等级
$E_r^i < 40$	$RI < 50$	轻微生态危害
$40 \leq E_r^i < 80$	$50 \leq RI < 300$	中等生态危害
$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强生态危害
$160 \leq E_r^i < 320$	$RI \geq 600$	很强生态危害
$E_r^i \geq 320$		极强生态危害

表 2 污泥产物化学性质和污染物含量限值
Table 2 Concentration limits of the chemical properties and pollutants in sludge

序号	控制项目	污染物限制	
		A 级污泥产物	B 级污泥产物
1	pH	5.5~8.5	5.5~8.5
2	含水率/%	≤ 60	≤ 60
3	总镉(以干基计)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 3	< 15
4	总汞(以干基计)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 3	< 15
5	总铅(以干基计)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 300	$< 1\,000$
6	总铬(以干基计)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 500	$< 1\,000$
7	总砷(以干基计)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 30	< 75
8	总镍(以干基计)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 100	< 200
9	总锌(以干基计)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$< 1\,200$	$< 3\,000$
10	总铜(以干基计)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 500	$< 1\,500$
11	矿物油(以干基计)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 500	$< 3\,000$
12	多环芳烃(以干基计)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 5	< 6
13	有机质(以干基计)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	≥ 200	≥ 200

2 结果与讨论

2.1 pH 值和含水率

pH 值对污泥处理来说是十分重要的条件.有研究表明,国内污水处理厂的污泥 pH 值均在 6~9 之间^[9].本研究采集污泥的 pH 值在 4.84~8.67 之间(图 1 和表 3),其中有 3 家单位超过了《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284-2018)对其限值(5.5~8.5),这是因为少数污水处理厂污水来源为工业产酸或产碱废水,因此导致其 pH 值过低或过高;49 家污水处理厂中有 39 家污水污泥 pH 值在 6.0~7.0 之间,在污泥农用时不会对土壤的酸碱度造成大的影响,但是从图 1 中可以看出该市污水处理厂污泥含水量较高(平均为 81.3%),86% 的污水处理厂脱水污泥含水率均在 70% 以上,因此,高含水率污泥不宜直接施用于不同处置方式中,需将对应污泥进行下一步脱水处理才可以利用.污泥脱水工艺分为自然干化工艺和机械脱水工艺,自然干化的方法操作简单但脱水周期长且脱水不彻底,机械脱水方式脱水率较高,一般可采用真空过滤脱水、离心脱水和压滤脱水的方式来降低污泥含水率.

2.2 污泥重金属含量分析

污泥中重金属的 85%~95% 附着于生物团(细菌碎屑)上,5%~15% 存在于矿物颗粒和有机碎屑

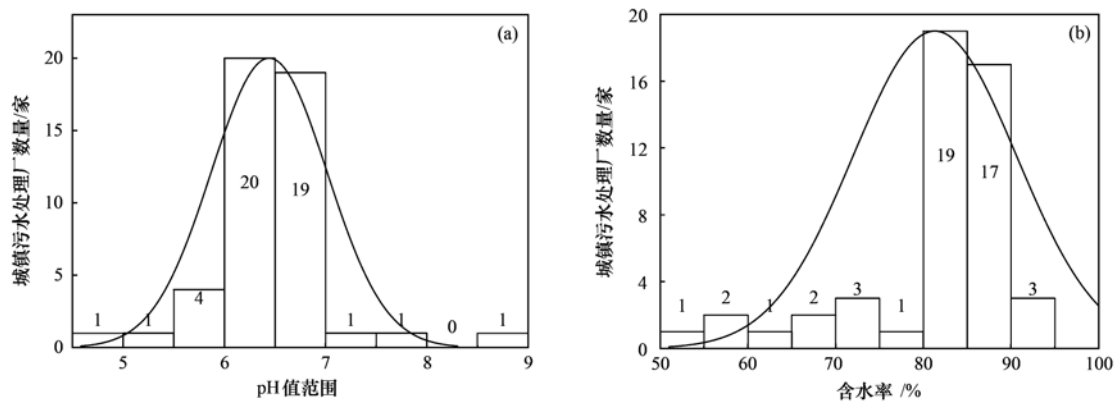


图1 污泥pH值和含水率的频数分布

Fig. 1 Frequency distribution of pH and moisture content from urban sewage sludge

颗粒物上,很少一部分存在于可溶态和胶状的有机物质上.重金属有剂量小、危害大、易富集等特点,一直是限制污泥农业利用的最主要的因素,其在土壤中的含量超过了一定含量,会对植物产生毒害作用^[20,21].该市49家城镇污水处理厂污泥重金属含量频数分布和统计分析如图2和表3所示,从中可知,该市城镇污水处理厂重金属含量呈现偏态分布,其高低排序为:Zn>Cu>Cr>Pb>Ni>As>Hg>Cd.其中,Zn的含量最高,含量在38.9~1380.0 mg·kg⁻¹之间的样品占93.9%,其次是Cu,含量在62.6~182.7 mg·kg⁻¹之间的样品占89.6%,污泥中Zn和Cu含量较高的原因是城市管网镀Zn和镀Cu管道的使用,该市49家污水处理厂污泥中Zn和Cu平均含量未超过国家平均水平,但是分别有1家和2家污水处理厂污泥Zn和Cu含量超过了《农用污泥污染物控制标准(GB 4284-2018)》对其限值^[12].

污泥中的Cr主要来源于不锈钢的使用、防水布

料和照相制版等^[22],Cr含量在63.6~181.3 mg·kg⁻¹之间的样品占89.4%;Pb主要来源于聚氯乙烯(PVC)管路、汽车维修和清洗废水,Pb含量在0.0~97.8 mg·kg⁻¹之间的样品占93.5%,其中80.8%的样品含量均值低于国家平均水平,原因是我国禁止在PVC管路中使用含Pb稳定剂,并全面禁止使用含Pb汽油^[23],从而降低进入污水处理厂的Pb含量;Ni来源于钢铁、电镀及电池制造等行业,Ni含量在19.3~68.4 mg·kg⁻¹之间的样品占91.8%.

As主要来源于合金冶炼、农药医药、颜料防腐剂和洗涤剂^[4],As含量在0.8~29.2 mg·kg⁻¹之间的样品占89.8%.Hg来源于牙科材料废水、电镀、电池制造和消毒剂制造等行业^[24,25],该市涉Hg工业极少,49个样品中Hg含量在0.3~8.7 mg·kg⁻¹之间的样品占95.9%,且77.5%的样品中Hg含量超过了国家平均水平,原因可能是大部分研究对象接纳污水以生活污水为主,污水中Hg的来

表3 某市49家城镇污水处理厂污泥成分含量统计分析

Table 3 Statistical analysis of the sludge composition in 49 sewage plants in a certain city

成分	极小值	中位数	极大值	均值	标准差	全国平均水平 ^[2,9,17~19]	
						平均值	范围
pH	4.84	6.43	8.67	6.46	0.79	7.12	6~9
含水率/%	54.0	84.5	93.0	77.4	13.2	87.3	10~90
Cd/mg·kg ⁻¹	0.01	0.43	3.4	0.5	0.4	7.1	0.4~39.9
Cr/mg·kg ⁻¹	32.1	104.6	444.2	118.5	46.5	136.9	10.6~639
Hg/mg·kg ⁻¹	0.31	4.1	35.2	5.0	4.5	2.8	0.1~15.8
As/mg·kg ⁻¹	0.85	11.7	91.7	16.8	15.9	15.7	0.9~61.8
Cu/mg·kg ⁻¹	41.0	99.9	532.1	121.0	64.8	283.5	55.7~2867.4
Ni/mg·kg ⁻¹	19.3	33.2	107.6	39.7	52.7	63.6	13.1~495.3
Pb/mg·kg ⁻¹	20	20	346.3	93.6	35.9	78	9.3~370
Zn/mg·kg ⁻¹	38.9	583.0	1710	686.1	4327	925.7	42.1~3568.3
矿物油/mg·kg ⁻¹	58	214	865	250.5	123.2	—	100~500
挥发酚/mg·kg ⁻¹	0.05	1.67	14.8	3.4	0.8	—	—
多环芳烃/mg·kg ⁻¹	0.1	0.25	2.32	0.44	0.3	—	1.39~143.8
有机质/g·kg ⁻¹	169	480	830	481	136	384	112~509
N/g·kg ⁻¹	10.8	33.4	52.3	32.1	1.7	27.0	8.4~50.3
P/g·kg ⁻¹	1.41	12.7	22.7	13.2	4.9	14.3	6.0~37.5
K/g·kg ⁻¹	1.93	6.1	11.5	5.8	3.7	7.0	1.4~12.2

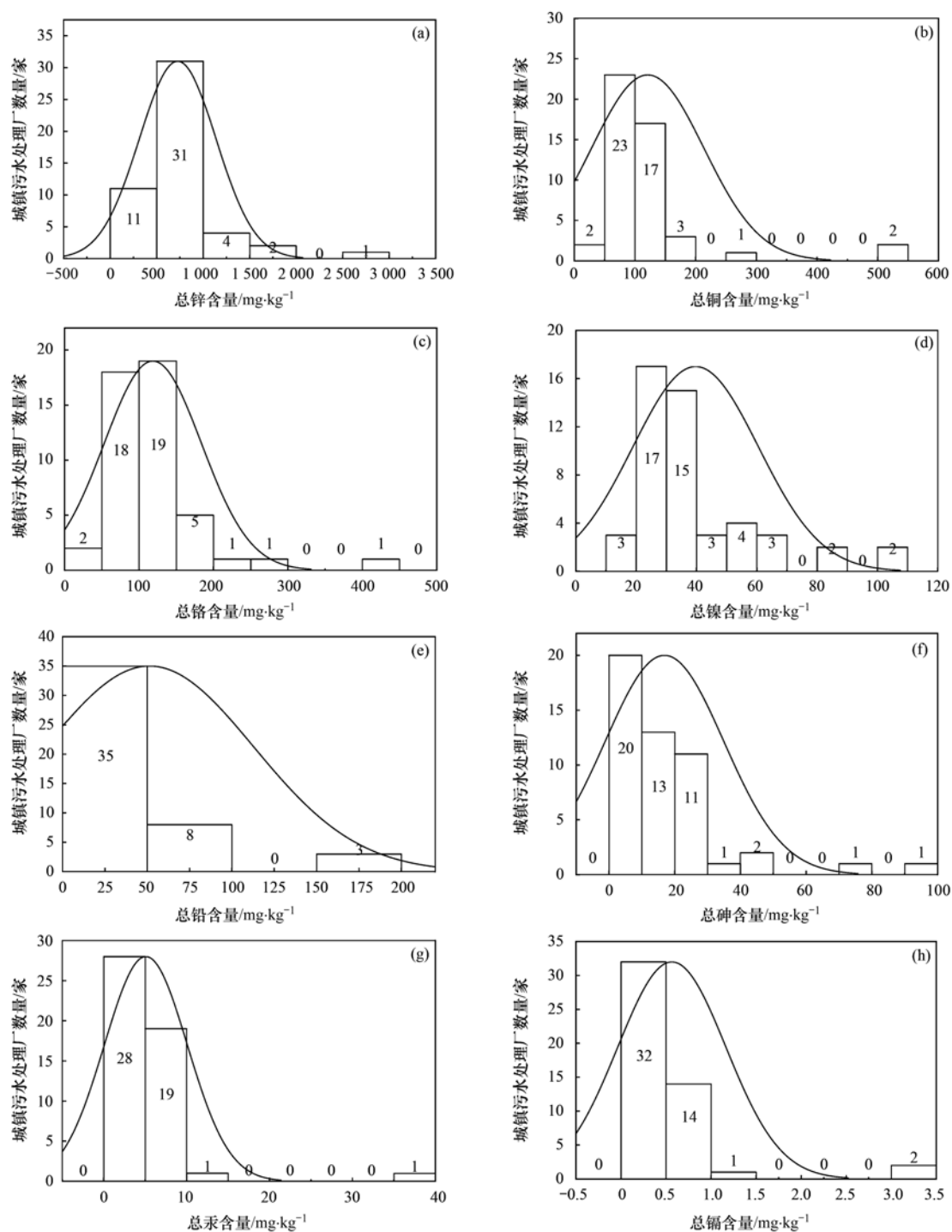


图2 污泥中重金属含量的频数分布

Fig. 2 Frequency distribution of heavy metal concentrations from urban sewage sludge

源主要考虑医院、牙科门诊、美容美发等生活面源,以及化学、环境和安全等实验室废水排放,另外大气干湿沉降也可能产生一定的影响;Cd 主要来自于电镀、印刷和塑料等工业废水^[26],生活污水中也含有少量的Cd,如塑料包装物和印刷纸品,93.9%的样品中Cd含量在 $0.01\sim0.96\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。

此外,综合49家污水处理厂污泥重金属含量可知,符合《农用污泥污染物控制标准(GB 4284-2018)》A级和B级的污水处理厂数量分别为9家

和35家,有5家污水处理厂重金属超标,不符合污泥农用标准,建议采用焚烧处置的方法。对比杨妍妍等^[2]对该市中心城区8家污水处理厂污泥重金属年际变化的研究可知,2019年该市城镇污水处理厂污泥重金属含量与2011~2017年相比,其中As和Zn的含量变化不大,Cu、Cd和Hg含量呈现下降趋势,而Cr、Ni和Pb含量有所上升,这可能是因为污泥是在冬季采样,季节对污泥重金属含量有影响,根据杨妍妍等^[2]的研究结果可知,冬季污泥重金属含量

高于春夏秋三季.

2.3 污泥重金属相关性分析和来源

在污水污泥中,重金属之间往往具有复杂的相关关系,它们之间的关系主要由人为因素控制,如人类活动和工业分布等,其次也会受到底层岩性的影响.采用 Pearson 相关分析法对污泥重金属之间的相关性进行分析^[27],结果如表 4 所示.从中可知,Pb 和 Cd(r

$=0.601$)之间是呈强相关性,As 和 Cr($r=0.586$)之间呈显著相关,Cr 和 Ni($r=0.478$)之间是呈显著相关,Ni 和 As($r=0.523$)之间是呈显著相关. Pb 和 Cd 之间呈强相关关系、As 和 Cr 之间的显著相关关系、Cr 和 Ni 之间的显著相关关系和 Ni 和 As 之间的显著相关关系表明 Pb 和 Cd 可能具有同源污染物质,As、Cr 和 Ni 可能受相同的人类活动所影响.

表 4 某市 49 家城镇污水处理厂污泥重金属相关性分析¹⁾ ($n=49$)

Table 4 Correlation analysis of the sludge composition in 49 urban sewage plants in a certain city ($n=49$)								
	总镉	总汞	总铅	总铬	总砷	总铜	总锌	总镍
总镉	1.000							
总汞	0.069	1.000						
总铅	0.601 *	-0.042	1.000					
总铬	-0.033	-0.042	-0.027	1.000				
总砷	0.009	-0.061	0.108	0.586 *	1.000			
总铜	-0.056	-0.046	-0.036	-0.027	-0.146	1.000		
总锌	0.125	0.284	-0.078	-0.026	-0.092	0.083	1.000	
总镍	-0.016	-0.144	-0.069	0.478 *	0.523 *	0.084	-0.069	1.000

1) * 表示相关性在 0.01 层上显著 (双尾)

对污泥重金属进行主成分分析,其结果如表 5 和图 3 所示,得出污泥重金属特征根大于 1 的两个主成分,其累计方差贡献率为 97.26%,主成分 1 的贡献率可达 94.17%,可知第一主成分占主要贡献,对重金属影响较大.城镇污水处理厂接纳水体主要包括居民生活污水,机关、学校、医院、商业服务机构及各种公共设施排水,以及允许排入城镇污水收集系统的工业废水和初期雨水.该市城镇污水处理厂以居民生活污水为主,其中化妆品、家庭清洁和使用

电池等会含有 Cd、Pb、Hg、Ni 和 As,除此之外,医院和医疗美容相关单位的污水会导致 Hg 的污染.由上述分析可知,主成分 1 的相关因子为 Cd、Pb、Hg、Ni 和 As,主要由人类活动所造成,其来源解译为生活清洁和医疗.此外,从图 3 (b) 可以看出 38.6% 的城镇污水处理厂污泥重金属来源比较密集,应多为生活清洁和医疗废水来源,这与样品采集中所提到处理污水 90% 以上为城市生活污水是一致的,且污泥受 Cd、Pb、Hg、Ni 和 As 影响较大.

表 5 某市城镇污水处理厂污泥重金属主成分矩阵和分析因子载荷矩阵

Table 5 Principal component matrix and analysis factor loading matrix for heavy metals from the sludge of sewage plants in a certain city										
主成分	特征根	变量百分比	累计百分比	重金属	主成分					
		%	%		1	2	3	4	5	6
1	44.3	94.17	94.17	Cd	0.856	-0.917	0.493	0.230	-0.237	-0.161
2	1.45	3.09	97.26	Hg	0.717	-0.767	0.489	0.201	-0.185	-0.223
3	0.68	1.75	99.01	Pb	0.281	-0.804	-0.742	-0.728	0.021	-0.022
4	0.49	0.67	99.68	Cr	0.100	0.233	-0.665	0.871	-0.201	0.003
5	0.08	0.19	99.87	As	0.286	-0.835	0.286	0.359	-0.006	0.474
6	0.04	0.09	99.96	Cu	0.262	0.404	0.807	-0.347	-0.059	0.053
7	0.002	0.04	100	Zn	-0.073	0.599	0.090	-0.105	0.005	-0.013
8	0.000 1	0	100	Ni	0.571	0.285	0.242	0.308	0.662	-0.109

在主成分分析中,主成分 2~4 的贡献率很低,分别为 3.09%、1.75% 和 0.67%,其整体载荷因子为 Zn、Cu、Cr、Cd 和 Hg,镀锌和镀铜管道的使用会造成 Zn 和 Cu 污染,部分冶金行业也会造成 Zn 和 Cu 的污染,Cr 主要来源于皮革制剂、鞣革和橡胶工业.通过重金属含量分析可知,部分工业过程如电镀行业和电池制造行业会造成 Cd 和 Hg 的污染,因城镇污水处理厂会收纳一部分允许排放城镇污水收集系统的工

业废水,所以在重金属成分中会存在 Cd 和 Hg 的载荷因子.因此,主成分 2~4 的整体主要来源可以解译为镀锌镀铜管道、皮革橡胶和电镀电池制造.结合图 3(b) 可以看出,26.1% 的城镇污水处理厂污泥重金属受主成分 2~4 影响较大,在所采集的样品中除了 90% 的城市生活污水外,还含有少量可排入城镇污水收集系统的工业废水,图 3(b) 较离散的几个点是 Zn、Cu、Cr 和 Hg 超标的 5 家城镇污水处理厂.

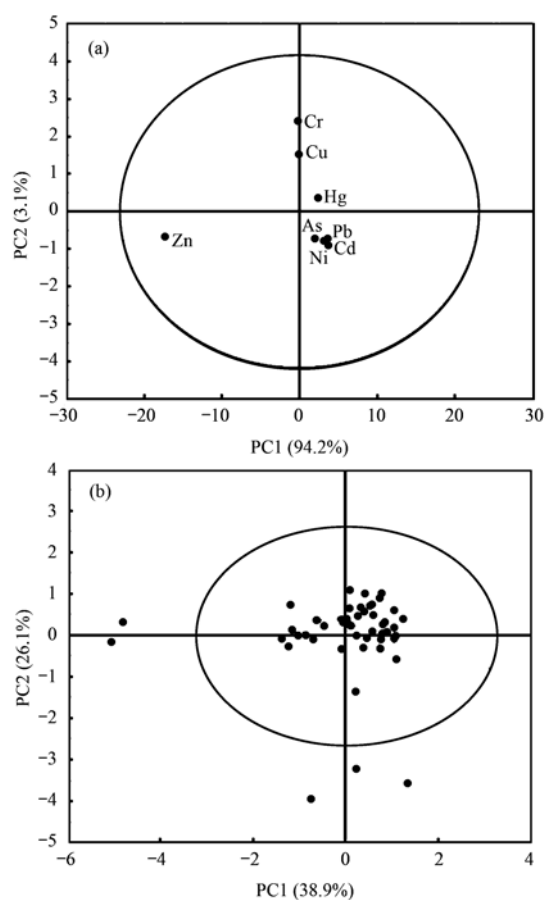


图3 某市城镇污水处理厂污泥中重金属主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis of heavy metal concentrations from urban sewage plants in a certain City

2.4 污泥有机污染物含量分析

污泥是污水处理中有机污染物的主要富集载体,有机污染物含量差异大、种类繁多,决定了污泥构成的复杂性^[28].其中,矿物油来源于洗衣粉,洗涤剂和农药乳化剂等制造废水中,这也是导致污水处理厂矿物油超标的原因^[29],从图4(a)中可以看出,49家污水处理厂污泥矿物油含量集中分布在58.0~398.0 mg·kg⁻¹之间,占比为87.0%;97.9%的污泥矿物油含量符合污泥农用A级和B级标准.

多环芳烃广泛分布于环境中,任何有机物加工,废弃、燃烧或使用的地方都有可能产生多环芳烃^[30],污泥中的多环芳烃人为源主要来自于工业生产工艺生产过程和食品制作过程等方面^[31],多环芳烃含量主要分布在0.10~0.81 mg·kg⁻¹之间[图4(b)],占比为87.9%;挥发酚主要污染源为煤气洗涤、合成氨、造纸和木材防腐等^[18],存在挥发酚污染的污水处理厂,其含量主要在0.0~1.9 mg·kg⁻¹之间[图4(c)],占比为77.6%;多环芳烃和挥发酚含量虽低,但其累积会造成农作物的污染,最终危害人体健康.

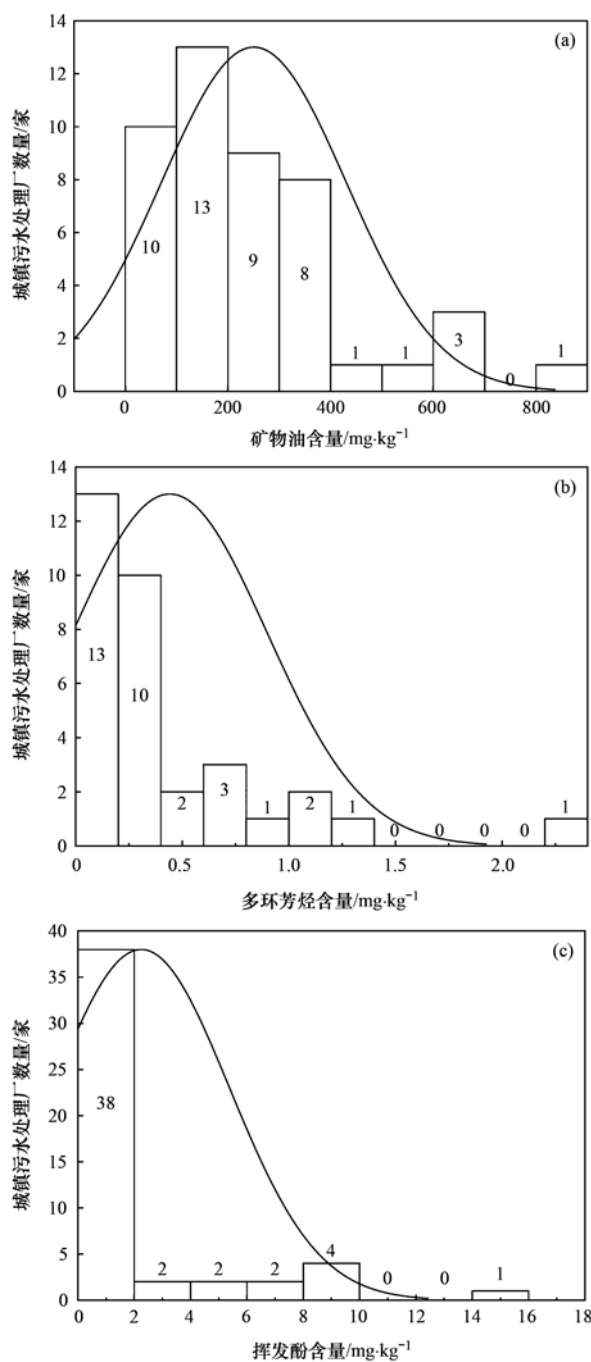


图4 污泥中矿物油、多环芳烃和挥发酚含量的频数分布

Fig. 4 Frequency distribution of mineral oil, PAHs and volatile phenol from urban sewage sludge

2.5 污泥养分含量分析

城市污泥是富含有机质和氮磷钾,是营养比较丰富的有机肥原料,可以维持植物正常生长所必须的元素,同时还可以提高土壤的保水性能和保肥能力^[19].该市49家污水处理厂污泥营养成分含量频数分布如图5所示,其呈现正态分布.污水处理厂污水来源和污泥处理工艺的不同,决定了不同污水处理厂污泥养分含量的不同,但总体上污泥是一种富含有机质(平均为481 g·kg⁻¹)、高氮(平均为32.1 g·kg⁻¹)、高磷(平均为13.2 g·kg⁻¹)、低钾(平均为

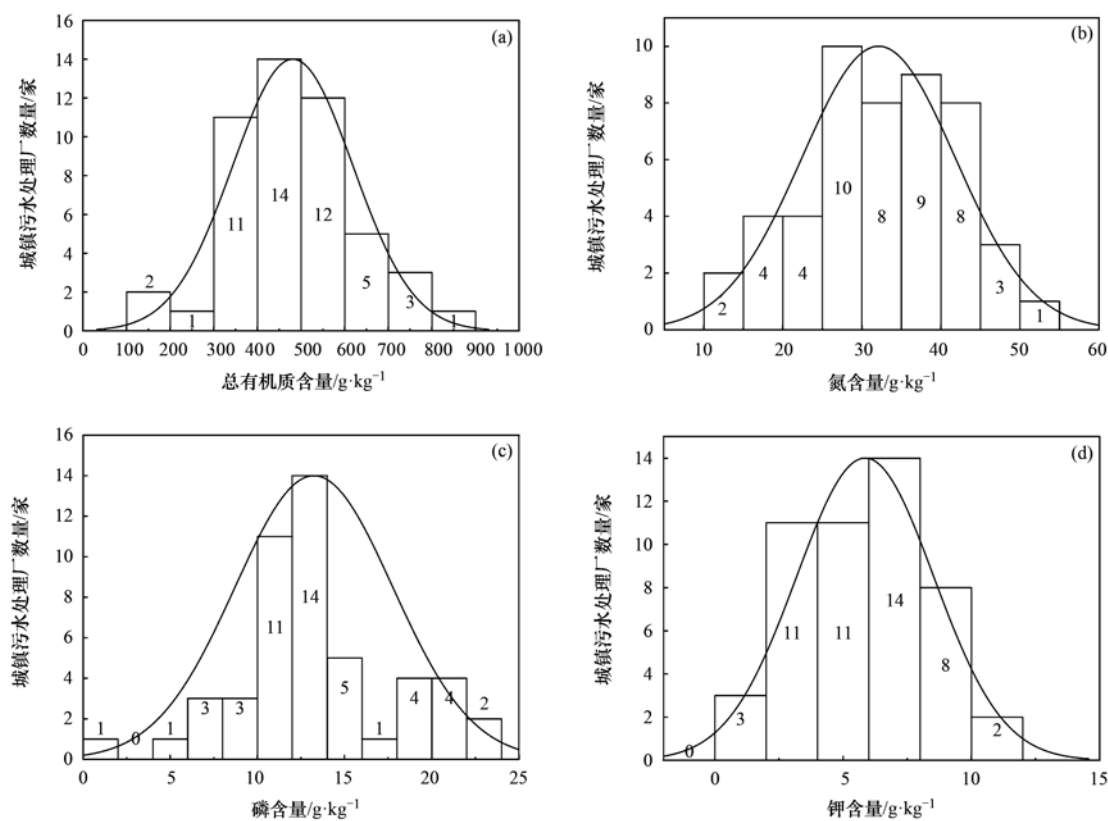


图5 污泥中有机质和氮磷钾含量的频数分布

Fig. 5 Frequency distribution of organic matter, nitrogen, phosphorus, and potassium content from urban sewage sludge

5.8 g·kg⁻¹)的有机肥,呈现出“三高一低”的状况。该市49个污水处理厂污泥养分的平均值高于我国的城市污泥养分平均值(381 g·kg⁻¹),污泥中的有机质含量与传统农家肥相比,相当于纯猪粪有机质(713 g·kg⁻¹)、纯牛粪有机质(634 g·kg⁻¹)和纯鸡粪有机质(520 g·kg⁻¹)^[11]平均含量的67.4%、75.9%和92.5%,氮磷钾含量与猪粪、鸡粪和牛粪氮磷钾含量相差不大。因此,该市城镇污水处理厂污泥的农用具有一定的养分价值,但农用是应充分调配好养分比例,以防养分不均衡。

2.6 污泥重金属生态风险评价

采用内梅罗综合指数评价法对该市49家污水处理厂污泥中重金属进行生态风险评价,结果如表6和图6所示,从中可以看出各种重金属生态污染指数大小顺序为:Cr>Hg>Zn>Ni>Pb>As>Cu>Cd,Cr的污染指数最高,为3.19,Cd污染指数最低,为0.19。按照评价标准,8种重金属中有4种污染水平为处于清洁;由表6可知,8种重金属内梅罗综合污染指数为5.3,内梅罗加权综合污染指数为19.1,表明该市49家污水处理厂污泥在处理不当的条件下,其重金属含量总体上对环境存在着一定的风险。

从表7和图6中还可以看出,49个污泥样品中重金属污染等级处于轻度污染(Ⅲ级)及以下的样

表6 某市49家城镇污水处理厂污泥重金属平均生态风险等级¹⁾

Table 6 Average ecological risk level of heavy metals in the sludge from 49 sewage plants in a certain city

重金属	实测均值	土壤背景值 /mg·kg ⁻¹	P_i	污染等级
Cd	0.5	0.145	0.19	I级(清洁)
Cr	118.5	31.1	3.19	V级(重度污染)
Hg	5.0	0.1	1.68	Ⅱ级(警戒限)
As	16.8	7.81	0.45	I级(清洁)
Cu	121.0	19.7	0.37	I级(清洁)
Ni	39.7	27.9	0.71	Ⅱ级(警戒限)
Pb	93.6	22.4	0.58	I级(清洁)
Zn	686.1	59.6	0.73	Ⅱ级(警戒限)

1) P 为5.3, P' 为19.1,污染等级为V级(重度污染)

品有29个,处于中度污染等级的污泥样品有14个,处于重度污染等级的样品有6个;处于重金属中度污染等级的14个污泥样品中,有12个污泥样品的最大污染贡献金属为Hg,其余2个污泥样品的最大污染贡献金属分别为Pb和As;处于重金属重度污染等级的6个污泥样品中,有2个污泥样品的最大污染贡献金属为Hg,其余4个污泥样品的最大污染贡献金属分别为Cu、Zn、Pb和Cr。综上可见,重金属Hg、Cu、Zn、Cr、Cd和As对生态环境风险较大,这与杨妍妍等^[1]的研究结果比较一致。因此,在污泥农用于土壤前,应加强对重金属的去除与治理,降低其含量值,尤其要重视对风险较大重金属的去除。

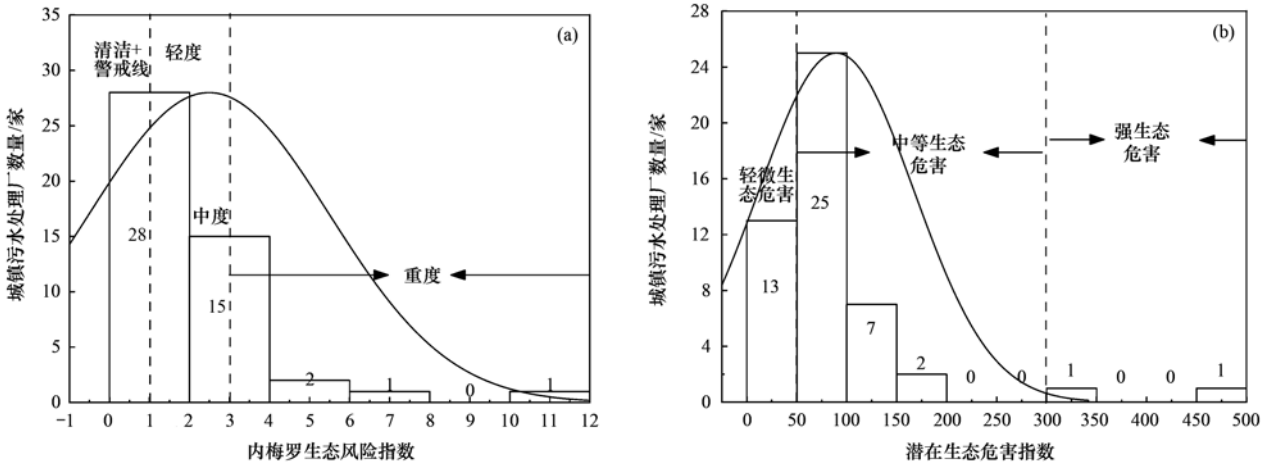


图 6 污泥生态风险和生态危害指数分布

Fig. 6 Distribution of ecological risk and potential ecological hazard indexes of urban sewage sludge

表 7 不同评级等级样品数量和主要污染贡献重金属

指标	内梅罗综合污染等级					Hakanson 生态毒性等级				
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	轻微	中等	强	很强	极强
样品数量	2	5	22	14	6	13	34	2	0	0
污染贡献重金属	—	—	—	Hg、Pb 和 As	Hg、Cu、Zn、Pb 和 Cr	—	Hg、Cd 和 As	Hg 和 Cr	—	—

采用 Hakanson 潜在生态危害指数评价法对该市 49 家污水处理厂污泥中重金属进行评价,结果如表 8 所示,各种重金属潜在生态危害等级大小顺序为: $\text{Hg} > \text{Cr} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Zn}$, 其中, Hg 金属潜在危害最大,为中等生态危害,其他 7 种金属均为轻微生态危害. 所有污水处理厂的复合潜在生态危害指数 (RI 和 RI') 为 89.6 和 240.4,显示污泥危害程度为中等. 从表 7 和图 6 污泥中重金属生态毒性等级分布图中还可以看出,所有污泥样品中重金属污染等级处于中等生态危害及以下的样品有 47 个,最大污染贡献金属分别为 Hg 、 Cd 和 As ,处于强生态危害的样品均为 2 个,最大污染贡献金属分别为 Hg 、 Cr 和 Cu . 由上可见,处于生态危害顶层的重金属仍然主要为 Hg 、 Cd 、 Cr 和 As ,说明该市污水处理厂污泥中重金属,尤其是 Hg 、 Cd 和 As 等致癌重金属的控制应引起足够重视. 由此可见,部分污水处理厂污泥虽然符合污泥农用标准,但是综合生态风险评价表明其农用会对环境造成一定的生态风险,应合理选择其他资源化方式,如焚烧或水泥窑协同处置.

在符合《农用污泥污染物控制标准 (GB 4284-2018)》A 级的 9 家污水处理厂中,有 1 家污水处理厂污泥属于重度污染和强生态危害,符合 B 级的 35 家污水处理厂中,有 3 家污水处理厂污泥属于重度污染和强生态危害,因此,部分污水处理厂污泥虽然符合污泥农用标准,但是综合生态风险评价表明其农用会对环境造成一定的生态风险,应合理选择污

表 8 某市城镇污水处理厂污泥重金属平均潜在生态危害等级¹⁾

Table 8 Average potential ecological hazard levels of heavy metals in the sludge from urban sewage plants in a certain city			
重金属	T_i	E_i^p	潜在生态危害程度
Cd	30	5.7	轻微
Cr	2	6.4	轻微
Hg	40	66.1	中等
As	10	4.6	轻微
Cu	5	1.9	轻微
Ni	2	1.4	轻微
Pb	5	3.0	轻微
Zn	1	0.7	轻微

1) RI 为 89.6, RI' 为 240.4,潜在生态危害程度为中等程度

泥资源化方式.

3 结论

(1) 某市 49 家城镇污水处理厂污泥中重金属含量高低为: $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Cd}$, 且 Cd 、 Pb 、 Hg 、 Ni 和 As 为重金属来源第一主成分 (生活清洁和医疗) 的主要载荷因素; 其中, 90% 的污水厂污泥符合污泥农用标准 A 级和 B 级.

(2) 污泥中矿物油、挥发酚和多环芳烃频数分布最集中的含量值分别为 58.0 ~ 398.0、0.0 ~ 1.9 和 0.1 ~ 0.81 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 矿物油和多环芳烃超标的城镇污水处理厂数量分别为 1 家和 2 家; 所有污水处理厂污泥农用具有一定的养分价值,且其有机质平均含量相当于传统农家肥的 67.4% ~ 92.5%,氮磷钾含量与传统农家肥氮磷钾含量相差不大.

(3)内梅罗指数和 Hakanson 生态危害指数显示,该市城镇污水处理厂污泥农用时存在一定的生态风险,污泥农用前应结合生态风险评价,合理选择其他污泥资源化方式,如焚烧或水泥窑协同处置,避免对环境造成破坏。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2018 中国城乡建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China statistical yearbook of urban and rural construction 2018[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [2] 杨妍妍, 李金香, 刘亚平, 等. 北京城市污水处理厂污泥中重金属污染状况及潜在生态风险分析[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(9): 1098-1102, 1107.
Yang Y Y, Li J X, Liu Y P, et al. Pollution feature and assessment of potential ecological risk of heavy metals in municipal sludge from wastewater treatment plants in Beijing[J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(9): 1098-1102, 1107.
- [3] 王涛, 宿宇. 污泥处理处置技术路线综述[J]. 中国环保产业, 2020, (1): 51-55.
Wang T, Su Y. Analysis on stabilization, reducing, harmless and resource levels of sludge treatment and disposal technical route[J]. China Environmental Protection Industry, 2020, (1): 51-55.
- [4] 郭广慧, 杨军, 陈同斌, 等. 中国城市污泥的有机质和养分含量及其变化趋势[J]. 中国给水排水, 2009, 25(13): 120-121.
Guo G H, Yang J, Chen T B, et al. Concentrations and variation of organic matter and nutrients in municipal sludge of China[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(13): 120-121.
- [5] Qian L L, Wang S Z, Xu D H, et al. Treatment of municipal sewage sludge in supercritical water: A review [J]. Water Research, 2016, 89: 118-131.
- [6] Kacprzak M, Neczaj E, Fijałkowski K, et al. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development [J]. Environmental Research, 2017, 156: 39-46.
- [7] 李冰阳, 李克虎, 张玮, 等. 污水处理厂污泥重金属污染现状分析[J]. 煤炭与化工, 2017, 40(7): 22-25, 157.
Li B Y, Li K H, Zhang W, et al. Analysis of heavy metal pollution in sludge of sewage treatment plant [J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(7): 22-25, 157.
- [8] Wang C, Li X C, Ma H T, et al. Distribution of extractable fractions of heavy metals in sludge during the wastewater treatment process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(3): 1277-1283.
- [9] 杨婷, 肖远东, 黄华军, 等. 污泥中重金属污染程度和生态风险评估优化[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(2): 202-209.
Yang T, Xiao Y D, Huang H J, et al. Assessment optimization of the contamination degree and ecological risk of heavy metals in sewage sludge[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(2): 202-209.
- [10] Huang H J, Yuan X Z. The migration and transformation behaviors of heavy metals during the hydrothermal treatment of sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2016, 200: 991-998.
- [11] 谭国栋, 李文忠, 何春利. 北京市污水处理厂污泥特性分析[J]. 科技信息, 2011, (7): 435-437.
Tan G D, Li W Z, He C L. Analysis of characteristics of sludge in Beijing wastewater treatment plant[J]. Science & Technology Information, 2011, (7): 435-437.
- [12] 何绪文, 房增强, 王宇翔, 等. 北京某污水处理厂污泥重金属污染特征、潜在生态风险及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2016, 36(3): 1092-1098.
He X W, Fang Z Q, Wang Y X, et al. Pollution characteristics, potential ecological risk and health risk assessment of heavy metal in a sewage treatment plant in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(3): 1092-1098.
- [13] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 522-523.
Chen H M. Environmental soil science[M]. Beijing: Science Press, 2005. 522-523.
- [14] 李清芳, 姚靖, 黄晓容, 等. 黔江区污水处理厂污泥中重金属生态风险评价与健康风险评估[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(3): 120-129.
Li Q F, Yao J, Huang X R, et al. Ecological risk evaluation and health risk assessment on heavy metals in sludge of the sewage treatment Plant in Qianjiang District [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2019, 41(3): 120-129.
- [15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [16] 于云江, 胡林凯, 杨彦, 等. 典型流域农田土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2010, 23(12): 1523-1527.
Yu Y J, Hu L K, Yang Y, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils of a typical basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(12): 1523-1527.
- [17] 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、来源解析及风险评估[J]. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1675-1681.
Yang S B, Li J, Zhang C H, 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.
- [18] 赵君. 贵阳市污水处理厂污染物特性分析[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2014.
Zhao J. Characteristic analysis of pollutants in municipal wastewater treatment plant of Guiyang [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2014.
- [19] 马学文, 翁焕新, 章金骏. 中国城市污泥重金属和养分的区域特性及变化[J]. 中国环境科学, 2011, 31(8): 1306-1313.
Ma X W, Weng H X, Zhang J J. Regional characteristics and trend of heavy metals and nutrients of sewage sludge in China [J]. China Environmental Science, 2011, 31(8): 1306-1313.
- [20] 马倩, 朱伟, 龚森, 等. 超临界水气化处理对脱水污泥中重金属环境风险的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1417-1425.
Ma Q, Zhu W, Gong M, et al. Influence of supercritical water gasification treatment on environmental risk of heavy metals in dewatered sewage sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(5): 1417-1425.
- [21] 薛允嘉. 污泥农中重金属元素的环境影响及其对策[J]. 现代园艺, 2012, (13): 9-10.
- [22] 张文超, 吕森林, 刘丁彧, 等. 宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估[J]. 环境科学, 2015, 36(5): 1810-1817.

- Zhang W C, Lü S L, Liu D Y, *et al.* Characteristics of heavy metals in the street dusts in Xuanwei and their health risk assessment[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1810-1817.
- [23] Sheng Q, Zhang H F, Wang C Y, *et al.* Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metal of the sludge in treatment plants in Beijing[J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2018, **186**(3), doi: 10.1088/1755-1315/186/3/012070.
- [24] 任福民, 汝宜红, 许兆义, 等. 北京市生活垃圾重金属元素调查及污染特性分析[J]. *北方交通大学学报*, 2011, **25**(4): 66-68.
- Ren F M, Ru Y H, Xu Z Y, *et al.* Investigation of heavy metal elements in municipal solid waste in Beijing[J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 2011, **25**(4): 66-68.
- [25] Sörme L, Lagerkvist R. Sources of heavy metals in urban wastewater in stockholm[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **298**(1-3): 131-145.
- [26] Denys S, Caboche J, Tack K, *et al.* In vivo validation of the unified BARCE method to assess the bioaccessibility of arsenic, antimony, cadmium, and lead in soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(11): 6252-6260.
- [27] 段宝玲. 城市污泥重金属源解析及生态风险与健康风险评价——以山西省为例[D]. 晋中: 山西农业大学, 2018.
- Duan B L. Source apportionment of heavy metals in municipal sewage sludge and ecological and health risk assessment-A case study in Shanxi Province[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2018.
- [28] Liu C, Xu Y P, Ma M, *et al.* Evaluation of endocrine disruption and dioxin-like effects of organic extracts from sewage sludge in autumn in Beijing, China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, **8**(3): 433-440.
- [29] 赵录录, 田冬梅. 城市污泥中的有机污染物的 GC-MS 法类型分布研究[J]. *辽宁大学学报(自然科学版)*, 2012, **39**(4): 373-377.
- Zhao L L, Tian D M. On types and distribution of organic pollutants in sewage sludge by GC-MS[J]. *Journal of Liaoning University (Natural Science Edition)*, 2012, **39**(4): 373-377.
- [30] 赵晓莉, 朱伟. 长三角部分城市污泥 PAHs 质量分数及特征分析[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(9): 1174-1179.
- Zhao X L, Zhu W. Contents and characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in municipal sewage sludge from cities in Yangtze River Delta area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(9): 1174-1179.
- [31] Dai J Y, Xu M Q, Chen J P, *et al.* PCDD/F, PAH and heavy metals in the sewage sludge from six wastewater treatment plants in Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(2): 353-361.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)