

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.014

制药废水的重金属排放特征及去除效果分析

姚静华, 连霞, 齐珺, 骆坚平, 潘涛, 郭行
(北京泷涛环境科技有限公司, 北京 100072)

摘要: 为研究制药废水重金属排放特点,在5个省市选择5家化学原料药生产企业和5家生物制药企业,监测分析车间排水和出水总汞、总砷、六价铬、总铬、总镉、总铅等6种重金属浓度。结果表明:10家制药企业废水重金属排放浓度均低于有关排放标准。化学原料药制药废水检出率最高的指标为总砷,其次为总汞、总铬,其中车间排水总砷检出率高达100%。生物制药废水总汞检出率最高,其次为总砷、总铬,其中车间排水总汞检出率高达100%。大多数企业采用预处理、生化处理及深度处理组合式污水处理工艺,多数对总汞、总砷和总铬具有明显去除效果,原因主要在于混凝相关工艺及微生物的生物吸附和絮凝作用使废水中的重金属从溶解的离子状态转变成难溶性化合物或稳定的螯合物而转移到污泥中。

关键词: 制药废水; 重金属; 化学原料药; 生物制药; 去除效果

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0083-06

Discharge Characteristics and Removal Efficiency of Heavy Metals in Pharmaceutical Wastewater

YAO Jing-hua, LIAN Xia, QI Jun, LUO Jian-ping, PAN Tao, GUO Hang
(Longtech Environmental Technology Co. Ltd., Beijing 100072, China)

Abstract: Characteristics of heavy metal discharge in pharmaceutical wastewater from five chemical active pharmaceutical ingredient (API) enterprises and five biopharmaceutical enterprises located in five provinces and cities were studied. The concentrations of six heavy metals including total mercury, total arsenic, hexavalent chromium, total chromium, total cadmium and total lead in the workshop effluent and the enterprises effluent were analyzed. It was found that the concentrations of heavy metals in effluent of the ten pharmaceutical enterprises were lower than the national discharge standards. Heavy metal with the highest detection rate of API wastewater was total arsenic, followed by total mercury and total chromium. The detection rate of total arsenic in workshop effluent was as high as 100%. Heavy metal with the highest detection rate of biopharmaceutical wastewater was total mercury, followed by total arsenic and total chromium, and the detection rate of total mercury in workshop effluent was as high as 100%. The combined wastewater treatment process of pretreatment, biochemical treatment and advanced treatment were adopted by most enterprises, and most of them had obvious removal effects on total mercury, total arsenic and total chromium. Coagulation together with biological adsorption and flocculation were the main reasons contributing to the heavy metals removal, in which dissolved heavy

metal ions were converted into insoluble compounds or stable chelates in the sludge.

Key words: pharmaceutical wastewater; heavy metal; chemical API; biopharmaceutical; removal efficiency

1 研究背景

改革开放以来,制药行业发展迅速,近年来我国已成为世界原料药和医药中间体生产大国。制药行业产品种类多,涉及原料广,工艺过程复杂,废水产生环节多,排放量大。制药废水具有成分复杂、特征污染物多、生化性较差等特点,部分废水含有多种重金属元素,可能影响生化处理系统的稳定运行。王国文等^[1]的研究表明,重金属杂质对磷酸铵镁结晶法去除制药废水中 PO_4^{3-} 、 NH_4^+ 污染物有较大干扰作用。

尽管制药废水重金属含量较低^[2],但由于其难降解性和生物富集效应,直接排放到环境中仍会产

生严重污染。国外有研究表明,制药废水中的有机重金属化合物可能对暴露的生物体产生强烈的致突变性和遗传毒性作用^[3],直接或间接危害人类身体健康。

重金属是《化学合成类制药工业水污染物排放标准》(GB 21904—2008)、《中药类制药工业水污染物排放标准》(GB 21906—2008)、《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)和《排污许可证申请与核发技术规范 制药工业—原料药制造》(HJ 858.1—2017)中规定的重要监控指标,相关排放标准中一些重金属指标的排放浓度限值如表 1 所示。

表 1 制药废水相关排放标准中重金属指标的排放浓度限值

Tab. 1 Limits of concentrations of heavy metals in relevant discharge standards of pharmaceutical wastewater

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

| 项目 | 《发酵类制药工业水污染物排放标准》(GB 21903—2008) | 《化学合成类制药工业水污染物排放标准》(GB 21904—2008) | 《提取类制药工业水污染物排放标准》(GB 21905—2008) | 《中药类制药工业水污染物排放标准》(GB 21906—2008) | 《生物工程类制药工业水污染物排放标准》(GB 21907—2008) | 《混装制剂类制药工业水污染物排放标准》(GB 21908—2008) | 《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015) B 级 |
|---|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 总汞 | — | 0.05 | — | 0.05 | — | — | 0.005 |
| 总砷 | — | 0.5 | — | 0.5 | — | — | 0.3 |
| 六价铬 | — | 0.5 | — | — | — | — | 0.5 |
| 总铬 | — | — | — | — | — | — | 1.5 |
| 总镉 | — | 0.1 | — | — | — | — | 0.05 |
| 总铅 | — | 1.0 | — | — | — | — | 0.5 |
| 注:《污水排入城镇下水道水质标准》B 级控制项目限值为城镇下水道末端污水处理厂采用二级处理时排入城镇下水道的水质应符合的规定。 | | | | | | | |

目前国内外有关制药废水重金属排放特点的研究较少,对不同类型制药废水重金属种类、浓度、来源及污水处理工艺对不同重金属的去除效果鲜有报道。了解重金属的种类和含量是制定制药废水重金属污染风险防范策略的基础和前提,基于此,对国内 10 家制药企业废水进行监测,分析其中总汞、总砷、六价铬、总铬、总镉、总铅等 6 种常见重金属浓度特征、主要来源及各种污水处理工艺对重金属的去除效果。

研究成果有利于企业设计适合制药工业废水的处理方案,有效防范重金属对人体健康和生态环境的风险,促进医药产业的可持续发展。

2 研究内容与方法

在北京、河北、上海、浙江、广东等 5 个省市选择 10 家制药企业作为研究对象,其中 5 家为化学原料药生产企业,5 家为生物制药企业。10 家企业均为规模以上制药工业企业,其中化学原料药企业主要产品为抗生素、维生素等化学原料药,主要生产工艺为发酵和化学合成。生物制药企业主要产品为合成人胰岛素、血液制品等生物药品,主要生产工艺为发酵和提取。

现场调查企业污水处理工艺,并对企业车间排水和污水站出水的重金属质量浓度进行监测,检测项目及分析方法见表 2。

表 2 检测项目与分析方法

Tab.2 Test items and analysis methods

| 项目 | 检出限/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 方法依据 | 检测方法 | 仪器名称及型号 |
|-----|---|--------------|----------------------------|-------------------------|
| 总汞 | 4×10^{-5} | HJ 694—2014 | 水质 汞、砷、硒、铋和锑的测定 原子荧光法 | 原子荧光光度计 AFS-9750 |
| 总砷 | 3×10^{-4} | | | |
| 六价铬 | 0.004 | GB 7467—1987 | 水质 六价铬的测定 二苯碳酰二肼分光光度法 | 可见分光光度计 JH723 |
| 铬 | 0.03 | HJ 757—2015 | 水质 铬的测定 火焰原子吸收分光光度法 | 原子吸收分光光度计 iCE 3500 |
| 总镉 | 0.005 | HJ 776—2015 | 水质 32 种元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法 | 电感耦合等离子体发射光谱仪 iCAP 7200 |
| 总铅 | 0.073 | | | |

3 结果与讨论

3.1 重金属检出情况

对 10 家制药企业车间排水和污水站出水的重金属浓度进行监测,共获得 48 组数据,其中化学原料药废水数据 21 组,生物制药废水数据 27 组。检出率及浓度值范围如表 3~6 所示。

表 3 化学原料药企业车间排水重金属检出率及浓度范围

Tab.3 Detection rates and concentration ranges of heavy metals in workshop effluent of chemical API enterprises

| 项目 | 样本数/个 | 检出率/% | 最小值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 最大值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 平均值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) |
|-----|-------|-------|---|---|---|
| 总汞 | 21 | 85.7 | 6×10^{-5} | 3.00×10^{-3} | 8.32×10^{-4} |
| 总砷 | 21 | 100 | 1.0×10^{-3} | 0.027 1 | 6.88×10^{-3} |
| 六价铬 | 21 | 0 | — | — | — |
| 总铬 | 21 | 52.4 | 0.04 | 0.19 | 0.097 |
| 总镉 | 21 | 0 | — | — | — |
| 总铅 | 21 | 9.5 | 0.09 | 0.11 | 0.100 |

表 4 化学原料药企业出水重金属检出率及浓度范围

Tab.4 Detection rates and concentration ranges of heavy metals in effluent of chemical API enterprises

| 项目 | 样本数/个 | 检出率/% | 最小值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 最大值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 平均值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) |
|-----|-------|-------|---|---|---|
| 总汞 | 21 | 38.1 | 8×10^{-5} | 8.6×10^{-4} | 4.13×10^{-4} |
| 总砷 | 21 | 47.6 | 4×10^{-4} | 0.010 0 | 3.29×10^{-3} |
| 六价铬 | 21 | 0 | — | — | — |
| 总铬 | 21 | 23.8 | 0.06 | 0.13 | 0.092 |
| 总镉 | 21 | 0 | — | — | — |
| 总铅 | 21 | 0 | — | — | — |

可见,企业车间排水和出水基本呈现一致性规律,化学原料药制药废水检出率最高的指标为总砷,其次为总汞、总铬,其中车间排水总砷检出率高达 100%。生物制药废水则略有不同,检出率最高的指标为总汞,其次为总砷、总铬,其中车间排水总汞检出率高达 100%。化学原料药废水的总铅检出率较低,车间排水为 9.5%,出水为 0。生物制药废水总铅检出率为 0。两类制药废水六价铬和总镉的检出

率均为 0。总之,生物制药废水重金属检出率与化学原料药制药废水接近,大部分企业废水中六价铬、总镉、总铅等指标低于本研究各项指标的检出限。

表 5 生物制药企业车间排水重金属检出率及浓度范围

Tab.5 Detection rates and concentration ranges of heavy metals in workshop effluent of biopharmaceutical enterprises

| 项目 | 样本数/个 | 检出率/% | 最小值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 最大值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 平均值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) |
|-----|-------|-------|---|---|---|
| 总汞 | 27 | 100 | 6×10^{-5} | 7.15×10^{-3} | 2.116×10^{-3} |
| 总砷 | 27 | 85.2 | 7×10^{-4} | 7.4×10^{-3} | 2.37×10^{-3} |
| 六价铬 | 27 | 0 | — | — | — |
| 总铬 | 27 | 25.9 | 0.08 | 0.16 | 0.111 |
| 总镉 | 27 | 0 | — | — | — |
| 总铅 | 27 | 0 | — | — | — |

表 6 生物制药企业出水重金属检出率及浓度范围

Tab.6 Detection rates and concentration ranges of heavy metals in effluent of biopharmaceutical enterprises

| 项目 | 样本数/个 | 检出率/% | 最小值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 最大值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 平均值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) |
|-----|-------|-------|---|---|---|
| 总汞 | 27 | 85.2 | 6×10^{-5} | 2.22×10^{-3} | 6.82×10^{-4} |
| 总砷 | 27 | 51.9 | 7×10^{-4} | 0.010 6 | 4.95×10^{-3} |
| 六价铬 | 27 | 0 | — | — | — |
| 总铬 | 27 | 22.2 | 0.07 | 0.08 | 0.077 |
| 总镉 | 27 | 0 | — | — | — |
| 总铅 | 27 | 0 | — | — | — |

从浓度来看,化学原料药企业车间排水所有重金属检出值的最大值都低于表 1 中相关标准的排放浓度限值,其中总汞最大值为 0.003 mg/L,与《污水排入城镇下水道水质标准》B 级 0.005 mg/L 的限值较为接近。车间排水检出率较高的总汞、总砷和总铬的浓度范围分别为 $6 \times 10^{-5} \sim 3.00 \times 10^{-3}$ 、0.001 0~0.027 1、0.04~0.19 mg/L,对应的出水浓度范围依次为 $8 \times 10^{-5} \sim 8.6 \times 10^{-4}$ 、0.000 4~0.010 0、0.06~0.13 mg/L。生物制药企业车间排水检出率较高的总汞、总砷和总铬的浓度范围分别为 $6 \times 10^{-5} \sim 7.15 \times 10^{-3}$ 、 $7 \times 10^{-4} \sim 7.4 \times 10^{-3}$ 、

0.08 ~ 0.16 mg/L, 对应的出水浓度范围依次为 6×10^{-5} ~ 2.22×10^{-3} 、0.000 7 ~ 0.010 6、0.07 ~ 0.08 mg/L。生物制药废水重金属平均浓度水平与化学原料药制药废水基本相当。

制药废水重金属的来源主要有:涉及重金属的化学反应或催化剂,实验室检测废水及原辅材料本身携带。目前药品生产涉及重金属的化学反应较少。如六价铬和总铬仅在个别甾体糖皮质激素类原料药生产的个别工段中使用。部分化学合成类原料药生产过程涉及重金属催化剂的使用,使用重金属的种类与药品种类有关。路洪涛等^[4]的研究表明,化学合成制药常用的催化剂多为钨、铜、铂、镍、汞、镉、铅、锌等。重金属催化剂价格昂贵,企业管控严格。催化剂一般为负载型催化剂,具有较高机械强度,进入水体的浓度和总量均较低。废催化剂一般由催化剂生产厂家定期回收,重新活化后再次投入生产过

程,回收率较高,一般接近 100%。由表 3、4 可见,化学原料药企业废水有多种重金属检出,是由于生产过程涉及的重金属以溶液状态回收不完全而附着在设备或清洗器上,随清洗过程进入工艺废水,最终汇入综合废水。生物制药企业生产过程较少涉及重金属有关催化剂或化学反应,工艺废水排放重金属较少,但由表 5、6 可知,同样有总砷、总汞、总铬等多种重金属检出。生物制药企业实验室检验测试环节较多用到砷和汞等重金属,因此实验室废水排放是该类废水重金属的主要来源,此外,可能还有部分动植物原辅材料所携带重金属的溶出作用。

3.2 重金属去除效果

对 10 家制药企业废水检出率较高的总汞、总砷和总铬等 3 种重金属浓度均值及污水站处理工艺进行汇总分析,结果如表 7 所示。其中企业 A ~ E 为化学原料药生产企业,企业 F ~ J 为生物制药企业。

表 7 制药废水重金属去除效果

Tab. 7 Removal effects of heavy metals in pharmaceutical wastewater

| 项目 | 总汞 | | | 总砷 | | | 总铬 | | | 处理工艺 |
|------|----------------------------------|--------------------------------|-----------|----------------------------------|--------------------------------|-----------|----------------------------------|--------------------------------|-----------|-------------------------------------|
| | 车间排水/ (mg · L ⁻¹) | 出水/ (mg · L ⁻¹) | 去除 率/% | 车间排水/ (mg · L ⁻¹) | 出水/ (mg · L ⁻¹) | 去除 率/% | 车间排水/ (mg · L ⁻¹) | 出水/ (mg · L ⁻¹) | 去除 率/% | |
| 企业 A | 0.000 060 | ND | — | 0.001 40 | 0.000 45 | 67.9 | ND | ND | — | MBBR + 生物接触氧化 + 混凝气浮 |
| 企业 B | 0.001 577 | 0.000 320 | 79.7 | 0.009 10 | 0.001 70 | 81.3 | 0.135 | 0.065 | 51.9 | 混凝气浮 + MSBR + BAF |
| 企业 C | 0.002 153 | 0.000 720 | 66.6 | 0.022 77 | 0.007 30 | 67.9 | 0.123 | 0.110 | 10.6 | EC 厌氧反应器 + A/O + CASS + 混凝沉淀 |
| 企业 D | 0.000 170 | 0.000 090 | 47.1 | 0.002 30 | 0.002 30 | 0 | 0.050 | ND | — | 气浮 + AF + AO ² + 混凝沉淀 |
| 企业 E | 0.000 463 | ND | — | 0.002 10 | 0.001 50 | 28.6 | ND | ND | — | UASB + CASS + 芬顿氧化 + 混凝沉淀 + BAF |
| 企业 F | 0.000 107 | 0.000 298 | -178.5 | 0.005 53 | 0.009 90 | -79.0 | 0.090 | ND | — | A ² O |
| 企业 G | 0.000 350 | 0.000 117 | 66.6 | 0.002 00 | 0.001 10 | 45.0 | ND | ND | — | 缺氧 + 接触氧化 + 混凝沉淀 |
| 企业 H | 0.002 352 | 0.002 067 | 12.1 | 0.002 70 | 0.000 97 | 64.1 | 0.115 | 0.077 | 33.0 | 水解酸化 + 接触氧化 |
| 企业 I | 0.000 850 | 0.000 110 | 87.1 | 0.001 73 | 0.001 67 | 3.7 | ND | ND | — | 水解酸化 + 混凝沉淀 + 两级好氧活性污泥 + 混凝沉淀 + MBR |
| 企业 J | 0.005 700 | 0.000 240 | 95.8 | 0.001 43 | ND | — | ND | ND | — | 水解酸化 + 接触氧化 + 混凝沉淀 |

注: ①ND 表示该企业所有样本对应项目均未检出;②处理工艺中 AF 为厌氧生物滤池,AO² 为缺氧 + 两级好氧工艺。

目前国内处理制药废水的一般流程为预处理单元+生化处理单元,部分企业还设有深度处理单元或回用处理单元。预处理工艺主要有:气浮、混凝、沉淀、调节、中和、氧化、还原等;生化处理工艺主要有:上流式厌氧污泥床反应器(UASB)、水解酸化、生物接触氧化法、缺氧/好氧(A/O)、厌氧/缺氧/好氧(A²/O)、序批式活性污泥法(SBR)及其变形工艺(CASS、MSBR、ICEAS等)等;深度处理单元工艺主要有:混凝、过滤、高级氧化、膜生物反应器(MBR)、曝气生物滤池(BAF)等;回用处理单元主要工艺有:砂滤、超滤(UF)、反渗透(RO)、脱盐、消毒。

由表7可知,制药废水处理工程多采用组合处理工艺,一般为各种预处理、生化处理及深度处理工艺的联合应用。

处理废水中重金属的常用方法可分为3大类:化学法、物化法和生物法。化学法主要有电解、化学沉淀、混凝沉淀。物化法主要有萃取分离、离子交换、膜分离、混凝及吸附法。生物法包括生物吸附、生物絮凝、植物修复等方法。

混凝相关工艺一般对水中的重金属具有较好的去除效果。路洪涛等^[4]的研究结果表明,对重金属含量较高的化学合成类制药废水,主要预处理工艺是混凝沉淀,使重金属形成金属氢氧化物,混凝沉淀后去除。制药废水成分复杂,为保证达标排放,企业多采用多种生化和物化工艺组合,由表7可知,大多数企业的污水处理流程包含混凝沉淀/气浮工艺。

此外,制药废水中重金属浓度较低,微生物的生物吸附和絮凝作用可能对重金属的削减具有一定效果。微生物胞外聚合物(EPS)主要由蛋白质、腐殖酸和多糖类物质等构成,具有多孔聚合结构,含有大量以羰基、羧基、羟基等官能团为代表的潜在吸附位点,能够有效吸附重金属离子^[5]。黄兢^[6]的研究表明,利用EPS的絮凝和吸附特性制成的微生物絮凝剂在投加碱性药剂时对废水中镉和铅等重金属具有较好的捕集去除效果,对Pb的去除率可达到95.9%,生物吸附能力可达566.7 mg/g。

上述方法不能分解破坏废水中的重金属,只能转移它们的存在位置或改变它们的物理和化学形态。一些研究表明,重金属基本不能通过生物降解去除。某制药厂采用水解-交替流生物反应器处理生产废水,发现进、出水中Cr、Ni、Cu、Zn、Pb等重金属含量基本不变,部分重金属还出现了出水浓度大

于进水的现象^[7]。本研究企业F采用A²O生化处理工艺,总汞和总砷同样出现了出水浓度大于进水的现象。原因可能是微生物不能降解重金属,细胞积累重金属离子的能力有限,生物吸附饱和后在一定环境条件下发生了重金属的脱附现象。污水处理过程中,重金属元素主要通过吸附或沉淀转移到污泥中。郭广慧等^[8]曾报道城市污泥重金属Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr和Ni含量分别为182.5、65.3、729.6、2.1、1.4、11.5、97.5和44.9 mg/kg。

目前大部分制药企业废水日常管理没有重金属监测要求,所以污水处理工艺并未就重金属去除进行针对性设计,但表7中大多数企业的污水处理工艺对废水中总汞、总砷和总铬具有较为明显的去除效果,如企业I和企业J的总汞去除率分别达87.1%和95.8%。根据以上分析,认为重金属的去除原因主要在于混凝沉淀/气浮等工艺及微生物的生物吸附和絮凝作用,使废水中的重金属从溶解的离子状态转变成难溶性化合物或稳定的螯合物而从水中转移到污泥中。

4 结论

① 10家制药企业废水监测结果表明,从检出率来看,化学原料药企业车间排水和出水基本呈现一致性规律,检出率最高的指标为总砷,其次为总汞、总铬,其中车间排水总砷检出率高达100%。生物制药废水检出率最高的指标为总汞,其次为总砷、总铬,其中车间排水总汞检出率高达100%。大部分企业废水中六价铬、总镉、总铅等指标低于本研究各项指标的检出限。从检测浓度来看,生物制药废水重金属平均浓度水平与化学原料药制药废水基本相当。

② 大多数企业的污水处理工艺对废水中的总汞、总砷和总铬具有较好的去除效果,原因主要是混凝相关工艺及微生物的生物吸附和絮凝作用使废水中的重金属从溶解的离子状态转变成难溶性化合物或稳定的螯合物,而从水中转移到污泥中。

参考文献:

- [1] 王国文,王栋,王明明,等. 重金属杂质对磷酸铵镁结晶法处理制药废水的影响[J]. 环境工程学报,2013,7(12):4866-4868.
Wang Guowen, Wang Dong, Wang Mingming, et al. Effect of heavy metal impurities on struvite precipitation for

- treatment of pharmaceutical wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7 (12): 4866 – 4868 (in Chinese).
- [2] Rajender S R, Vikash K, Prashant S, *et al.* Assessment of heavy metals in pharmaceutical industrial wastewater of Pharmacy, Selaqui, Dehradun, Uttarakhand, India [J]. Anal Chem Let, 2014, 4 (1): 29 – 39.
- [3] Ali S, Muhammad A, Aftab A A, *et al.* Pharmaceutical wastewater being composite mixture of environmental pollutants may be associated with mutagenicity and genotoxicity [J]. Environ Sci Pollut Res, 2016, 23 (3): 2813 – 2820.
- [4] 路洪涛, 李燕, 赵红梅. 化学合成类制药项目废水预处理工艺分析与研究 [J]. 资源节约与环保, 2016 (10): 187 – 188.
- Lu Hongtao, Li Yan, Zhao Hongmei. Analysis and research on wastewater pretreatment process of chemical synthesis pharmaceutical enterprises [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2016 (10): 187 – 188 (in Chinese).
- [5] 魏亮亮, 王胜, 薛茂, 等. 城镇污泥胞外聚合物对重金属吸附特征及机制 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50 (8): 188 – 198.
- Wei Liangliang, Wang Sheng, Xue Mao, *et al.* Study on adsorption of heavy metals onto sludge extracellular polymers substances (EPS): A review [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50 (8): 188 – 198 (in Chinese).
- [6] 黄兢. 胞外聚合物对重金属捕集及对污泥微泡扩增的行为机制研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- Huang Jing. Behaviors and Mechanisms of Heavy Metal Capture and Accumulation and Sludge Foaming Pretreatment by Extracellular Polymeric Substances [D]. Changsha: Hunan University, 2016 (in Chinese).
- [7] 李华宇, 刘苗苗, 姚宏, 等. 北方某合成制药厂废水处理系统设计及运行效果 [J]. 中国给水排水, 2014, 30 (12): 133 – 135.
- Li Huayu, Liu Miaomiao, Yao Hong, *et al.* Design and operation of wastewater treatment system in a chemical synthesis pharmaceutical plant [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30 (12): 133 – 135 (in Chinese).
- [8] 郭广慧, 陈同斌, 杨军, 等. 中国城市污泥重金属区域分布特征及变化趋势 [J]. 环境科学学报, 2014, 34 (10): 2455 – 2461.
- Guo Guanghui, Chen Tongbin, Yang Jun, *et al.* Regional distribution characteristics and variation of heavy metals in sewage sludge of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34 (10): 2455 – 2461 (in Chinese).



作者简介: 姚静华 (1986 –), 女, 河北石家庄人, 硕士, 工程师, 研究方向为工业废水处理和智慧环境。

E – mail: 15010385825@163.com

收稿日期: 2019 – 05 – 27

节水就是开源, 就是增效, 就是减排, 就是降损