

吴志宇, 旷玉丹, 李杏清, 等. 高效绿色氧化剂 SK-901 处理化学镀镍废水试验[J]. 净水技术, 2022, 41(11):108-112, 136.
WU Z Y, KUANG Y D, LI X Q, et al. Experimental on electroless nickel plating wastewater treatment with efficient green oxidant SK-901[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(11):108-112, 136.



扫我试试?

高效绿色氧化剂 SK-901 处理化学镀镍废水试验

吴志宇, 旷玉丹*, 李杏清, 王怡璇, 黎建平

(深圳市世清环保科技有限公司, 广东深圳 518105)

摘要 在化学镀镍废水中添加高效绿色氧化剂 SK-901 可降低化学镀镍废水中 TP、COD_{Cr}、氨氮等污染物的含量。以某化学镀镍废水为处理对象, 对其污染物深度处理的去除效果进行试验验证。研究发现, SK-901 对化学镀镍废水中 TP、COD_{Cr}、氨氮污染物能起到一定的去除作用。通过正交试验得到最佳处理工艺条件: 反应 pH 值为 10.0, 按投加量为 25 mL/L 向水样中加入质量浓度为 10 000 mg/L 的 SK-901 水溶液, 反应 1.5 h 后加入适量絮凝剂, 絮凝沉淀后过滤。SK-901 处理化学镀镍废水可与其他氧化技术联用, 拓宽其适用范围。

关键词 化学镀镍废水 氧化剂 SK-901 高效绿色 处理工艺 清洁生产

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2022)11-0108-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.11.015

Experimental on Electroless Nickel Plating Wastewater Treatment with Efficient Green Oxidant SK-901

WU Zhiyu, KUANG Yudan*, LI Xingqing, WANG Yixuan, LI Jianping

(Shenzhen S-King Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shenzhen 518105, China)

Abstract Efficient green oxidant SK-901 was added in electroless nickel plating wastewater, which could reduce the contents of pollutants such as TP, COD_{Cr} and ammonia nitrogen. Taking a electroless nickel plating wastewater as the treatment object, experiments were carried out to verify the removal effect of pollutants in advanced treatment. Results showed that SK-901 had a certain removal effect of TP, COD_{Cr}, ammonia nitrogen and other pollutants in electroless nickel plating wastewater. The optimal treatment conditions were obtained through orthogonal test: react pH value was 10, added a mass concentration of 10 000 mg/L SK-901 solution with dosage of 25 mL/L to the water sample, reaction time was 1.5 h, while added appropriate amount of flocculant, and filtered after flocculation and precipitation. SK-901 treatment of electroless nickel plating wastewater could combined with other oxidation technologies to broaden its application range.

Keywords electroless nickel plating wastewater oxidant SK-901 efficient green treatment process clean production

化学镀镍技术是利用还原剂把溶液中的镍离子还原沉积在具有催化活性的表面上形成镀层, 由于其不需要外电源且镀层均匀, 已成为我国印制电路板行业不可或缺的部分, 化学镀镍废水主要来源于

化学镀镍生产过程中的镀件清洗^[1]。化学镀镍废水中次磷酸盐、亚磷酸盐、TP、COD_{Cr}、氨氮、金属离子等含量高。为保证镀液的稳定性及镀层质量, 还需要加入络合剂、缓冲剂和光亮剂等助剂, 这些无机或有机助剂易与镍形成稳定络合物, 使得废水处理难度陡然增大。如柠檬酸铵使得废水中氨氮的含量升高^[2], 工艺中采用氨水调节 pH, 故废水中的氨除存在络合形态, 还存在游离氨^[3]。因此, 化学镀镍废水主要污染指标为络合镍、次磷酸盐、亚磷酸盐、

[收稿日期] 2021-09-02

[作者简介] 吴志宇(1988—), 男, 工程师, 主要从事工业废水处理工艺的开发, E-mail: 605459434@qq.com。

[通信作者] 旷玉丹(1998—), 女, 主要从事工业废水处理, E-mail: 3030747184@qq.com。

COD_{Cr}、氨氮等。目前,采用一般化学方法处理化学镀镍废水,水质难以达标且需二次添加药剂,处理成本较高,废水回用率较低。

采用氧化剂 H₂O₂、高锰酸钾(钠)、氯气、NaClO、臭氧等,降低废水 COD_{Cr} 的同时还将次磷酸盐、亚磷酸盐氧化为磷酸盐^[2]。贾晓玲等^[4]采用 NaClO 氧化法,使化学镀镍废水的氨氮去除率达到 91% 以上,但采用此方法处理废水中的氨氮,将氨氮氧化成 N₂,需要再添加其他药剂,将增加企业成本。张洪亮等^[5]采用 Fenton 氧化和沸石吸附联合处理化学镀镍废水,TP 的去除率可达到 91.88%,氨氮的去除率为 86.3%。但采用此方法处理化学镀镍废水需添加药剂 H₂O₂、FeSO₄·7H₂O、絮凝剂等,污泥量大且易产生二次污染,对环境和人类健康有害。氧化剂 SK-901 是一种新型、高效、多功能的绿色水处理剂,具有极强的氧化性,同时具有高絮凝性,不需要二次添加其他药剂,能够将化学镀镍废水中的次/亚磷酸氧化为正磷酸,能够捕捉 Ni(OH)₂ 颗粒和磷酸盐沉淀,沉淀颗粒不断长大,最后泥水分离,可降低废水中的污染物含量,绿色环保。

本研究开展了氧化剂 SK-901 处理化学镀镍废水的小试试验。分别考察不同 SK-901 添加量、pH、反应时间,探讨出工艺最佳运行条件,为处理化学镀镍废水的实际应用提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 试验废水

试验废水取自深圳某电路有限公司化学镀镍废水,具体水质如表 1 所示。

表 1 试验废水水质
Tab. 1 Test Wastewater Quality

水质 指标	TP/ (mg·L ⁻¹)	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	络合镍/ (mg·L ⁻¹)
数值	315.40	680.40	36.40	173

1.2 试验材料

氧化剂 SK-901:SK-901 是一种新型、高效、多功能的绿色水处理剂,主要通过高价金属铁的化合物制得,铁以高价态形式存在,其标准电极电势达到 2.20 V,具有极强的氧化性,能够将化学镀镍废水中的次/亚磷酸氧化为正磷酸,将有机物矿化为 CO₂ 和 H₂O₂。被还原的 Fe³⁺ 生成 Fe(OH)₃ 颗粒,释放的

Ni²⁺ 形成 Ni(OH)₂ 颗粒、正磷酸形成沉淀物。Fe(OH)₃ 本身是一种混凝剂,能够捕捉 Ni(OH)₂ 颗粒和磷酸盐沉淀,在絮凝剂的作用下,沉淀颗粒不断长大,最后进行泥水分离,降低废水中的污染物含量。

采用 SK-901 处理化学镀镍废水针对性强,可降低化学镀镍废水中络合镍、次/亚磷酸盐、COD_{Cr}、氨氮等污染物的含量。

1.3 试验药剂和仪器

试验仪器:电子天平,pHSJ-4F 型 pH 计,HJ-6A 型磁力搅拌器,TU-1900 型紫外可见分光光度计。

试验药剂:重铬酸钾、硫酸铝钾、钼酸铵、硫酸汞、抗坏血酸、酒石酸锑钾、碘化钾、碘化汞、酒石酸钾钠,所用药品均采用分析纯。试验室用水均为蒸馏水。

1.4 试验方法

对供试水样进行烧杯试验。取 100 mL 化学镀镍废水放于烧杯中,调节废水 pH,添加 10 mL 质量浓度为 10 000 mg/L 的 SK-901 水溶液,置于磁力搅拌器上搅拌,进行氧化反应。待反应完成,加入少量絮凝剂絮凝沉淀,过滤后取滤液测定处理后水样中 TP、COD_{Cr}、氨氮含量,并计算去除率。

(1) 单因素试验方法

取适量试验水样,调节废水至不同 pH,添加不同量(0~50 mL)的 10 000 mg/L SK-901 水溶液,置于磁力搅拌器上搅拌,进行氧化反应,设置不同的反应时间。待反应完成,加入少量絮凝剂絮凝沉淀,过滤后取滤液测定处理后水样中 TP、COD_{Cr}、氨氮含量。

(2) 正交试验方法

以出水中残余 TP、COD_{Cr}、氨氮的质量浓度为指标,以反应时间、废水初始 pH、SK-901 的添加量进行 L₉(3³) 正交试验。采用极差分析法对正交试验结果进行分析。

1.5 分析方法

COD_{Cr} 采用快速消解分光光度法^[6]进行测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法^[7]测定;TP 采用钼酸铵分光光度法^[8]进行测定;络合镍采用火焰原子吸收分光光度法^[9]进行测定。

2 结果与分析

2.1 添加量对处理效果的影响

在室温条件下,取 600 mL 试验水样,平均分成 6 份放于 6 个烧杯中,每份水样中分别添加 0、10、

20、30、40、50 mL 质量浓度为 10 000 mg/L 的 SK-901 水溶液, 反应时间为 0.5 h, 考察 SK-901 添加量对 COD_{Cr} 、氨氮、TP 处理效果的影响, 结果如图 1 所示。

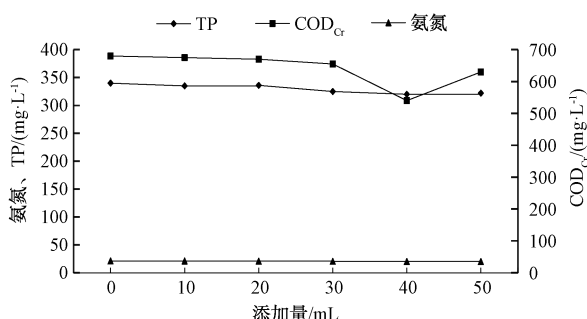


图 1 添加量对污染物去除的影响

Fig. 1 Effect of Dosages on Pollutants Removal

如图 1 所示, SK-901 处理化学镀镍废水 TP、氨氮和 COD_{Cr} 时, 随着添加量的增加, COD_{Cr} 去除率趋于平缓, 但 TP 和氨氮降低趋势不明显。这是因为 SK-901 去除 COD_{Cr} 是依靠其强氧化能力, 而其氧化能力具有一定限度^[10]。另外, 增大投加量会造成处理成本的增加。崔红梅等^[11]采用 Fenton 氧化法处理生产废水, 随着药剂投加量的增加去除效果先增大后趋于平缓, 最后废水 COD_{Cr} 的去除率可以达到 63.4%。罗琨等^[12]采用 Fenton 氧化法降解电镀废水中的有机物, COD_{Cr} 的去除率为 75.15%, Ni^{2+} 去除率为 86.60%。

2.2 反应 pH 影响

在室温条件下, 取 500 mL 试验水样, 平均分成 5 组。分别设置反应 pH 值为 2.0、4.0、6.0、8.0、10.0, 添加 3 mL 质量浓度为 10 000 mg/L 的 SK-901 水溶液, 反应时间为 0.5 h, 考察反应 pH 对 COD_{Cr} 、氨氮、TP 处理效果的影响, 结果如图 2 所示。

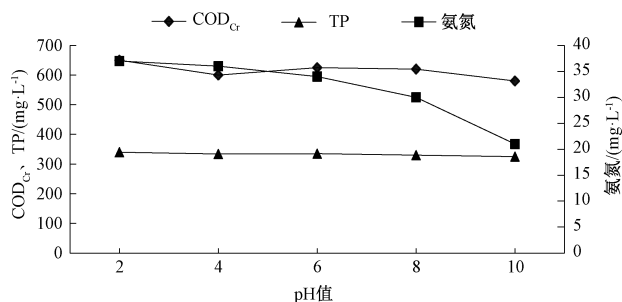


图 2 pH 值对污染物去除的影响

Fig. 2 Effect of pH Value on Pollutants Removal

如图 2 所示, 在不同反应 pH 下 SK-901 处理化学镀镍废水中 TP、氨氮和 COD_{Cr} 时, 碱性条件下的处理效果优于酸性或中性条件。SK-901 与废水中的污染物发生氧化还原反应, 被还原的 Fe^{3+} 生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 颗粒, 捕捉废水中的污染物与其絮凝沉淀, 降低废水中污染物的含量。当反应 pH 值为 10.0 时, 氨氮和 COD_{Cr} 去除率分别 68.02% 和 6.19%, 达到最佳去除效果, 但 TP 的去除率基本保持不变。当 pH 为碱性时, 废水中 OH^- 的含量逐渐增加, 废水中的 NH_4^+ 与 OH^- 不断结合, 分子态 NH_3 的含量逐渐增加, 导致废水氨氮的降低。研究^[13]表明, 当 pH 为碱性时, 氨氮脱氮率可达 92.4%。

2.3 反应时间影响

在室温条件下, 取 500 mL 试验水样, 平均分成 5 组。设置反应 pH 值为 10.0, 添加 3 mL 质量浓度为 10 000 mg/L 的 SK-901 水溶液, 分别设置反应时间为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 h, 考察反应时间对 COD_{Cr} 、氨氮、TP 处理效果的影响, 结果如图 3 所示。

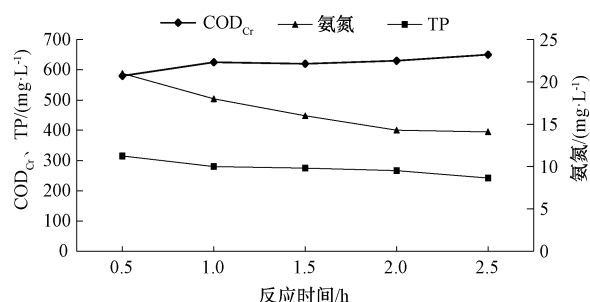


图 3 反应时间对污染物去除的影响

Fig. 3 Effect of Reaction Time on Pollutants Removal

如图 3 所示, SK-901 处理化学镀镍废水 TP、氨氮和 COD_{Cr} 时, 随着反应时间的增加, TP 和氨氮显著降低, 但 COD_{Cr} 出现增加趋势。反应 2.0 h 时, TP 和氨氮质量浓度分别降至 266.60 mg/L 和 14.30 mg/L, 去除率分别为 15.47% 和 60.71%。再进一步增加处理时间, 氨氮的去除效果提升不明显, 但 TP 质量浓度可进一步降至 242.20 mg/L, 其去除率达到 23.21%。SK-901 具有强氧化性, 处理初期反应速率较快, 随着处理时间的延长, 氨氮受自身浓度和 SK-901 浓度的影响, 表现为去除率随反应时间的增加增幅减缓。在反应 0.5 h 之后, COD_{Cr} 出现升高趋势, 由于 SK-901 的强氧化性, 难降解的络合态分子分解生成能被重铬酸钾氧化的物质, 采用重

铬酸钾法测定 COD_{Cr} 会出现上升趋势,且随着时间的延长,反应不断进行,测得的 COD_{Cr} 含量不断上升。研究^[14]表明,随着时间的延长,废水中残余磷浓度不断下降,一定时间后趋于平稳,磷去除率可达到 99.99%。胡冰等^[15]采用芬顿氧化处理制药废水二级生化出水,氧化反应在 1.5 h 已经基本完成对 COD_{Cr} 的去除,继续延长反应时间, COD_{Cr} 去除率基本不再发生变化。

2.4 正交试验

SK-901 处理化学镀镍废水受到不同因素影响,如 pH、SK-901 添加量、反应时间,正交试验确定这 3 个反应条件为 SK-901 处理化学镀镍废水的试验研究因素,每个因素 3 个水平(表 2)。A 因素为反应 pH 值,参照 pH 单因素试验,碱性条件下处理效果最佳,因此,pH 值共 3 个水平即 9.0、10.0、11.0;B 因素为 SK-901 用量,共 3 个水平即投加量为 25、30、35 mL/L;C 因素为反应时长,共 3 个水平即 1.5、2.0、2.5 h。采用 $L_9(3^3)$ 正交表进行试验,以 TP、 COD_{Cr} 、氨氮去除率为试验观测值。

表 2 SK-901 处理化学镀镍废水的正交试验设计

Tab. 2 Orthogonal Test Design of SK-901 for Chemical Nickel Wastewater Treatment

试验号	A 因素 (pH 值)	B 因素(SK-901 投 加量)/(mL·L ⁻¹)	C 因素 (反应时长)/h
1	9.0	25	1.5
2	9.0	30	2.5
3	9.0	35	2.0
4	10.0	25	2.5
5	10.0	30	2.0
6	10.0	35	1.5
7	11.0	25	2.0
8	11.0	30	1.5
9	11.0	35	2.5

按照表 2 所列方案进行试验,共进行 9 组试验,正交结果如表 3 所示。其中 H_1 、 H_2 、 H_3 为 TP 在各因素对应条件下的平均去除率, I_1 、 I_2 、 I_3 为 COD_{Cr} 在各因素对应条件下的平均去除率, J_1 、 J_2 、 J_3 为氨氮在各因素对应条件下的平均去除率。

表 3 SK-901 处理化学镀镍废水的正交试验结果

Tab. 3 Orthogonal Test Results of Nickel Wastewater Treatment by SK-901

序列	A 因素(pH 值)	B 因素(SK-901 投加量)	C 因素 (反应时长)	TP 去除率	COD_{Cr} 去除率	氨氮去除率
1	9	25 mL/L	1.5 h	14.97%	4.12%	66.32%
2	9	30 mL/L	2.5 h	9.98%	2.06%	61.37%
3	9	35 mL/L	2.0 h	14.14%	4.12%	64.31%
4	10	25 mL/L	2.5 h	9.14%	4.12%	63.46%
5	10	30 mL/L	2.0 h	11.23%	0.00	67.75%
6	10	35 mL/L	1.5 h	14.97%	6.19%	68.02%
7	11	25 mL/L	2.0 h	9.14%	0.00	74.87%
8	11	30 mL/L	1.5 h	13.31%	4.81%	71.36%
9	11	35 mL/L	2.5 h	12.06%	5.50%	67.84%
H_1	13.03%	11.08%	14.42%	—	—	—
H_2	11.78%	11.51%	11.50%	—	—	—
H_3	11.50%	13.72%	10.39%	—	—	—
H 极差	1.53%	2.64%	4.03%	—	—	—
I_1	3.43%	2.75%	5.04%	—	—	—
I_2	3.44%	2.29%	1.37%	—	—	—
I_3	3.44%	5.27%	3.89%	—	—	—
I 极差	0.01%	2.98%	3.67%	—	—	—
J_1	64.00%	68.22%	68.57%	—	—	—
J_2	66.41%	66.83%	68.98%	—	—	—
J_3	71.36%	66.72%	64.22%	—	—	—
J 极差	7.36%	1.50%	4.76%	—	—	—

注: H_1 、 H_2 、 H_3 为 TP 在各因素对应条件下的平均去除率; I_1 、 I_2 、 I_3 为 COD_{Cr} 在各因素对应条件下的平均去除率; J_1 、 J_2 、 J_3 为氨氮在各因素对应条件下的平均去除率

由表 3 可知,可以预测 SK-901 处理化学镀镍废水 TP 的最优工艺条件是 C1B3A1,反应 pH 值为 9.0,按投加量为 35 mL/L 加入质量浓度为 10 000 mg/L 的 SK-901 水溶液,反应 1.5 h。处理 COD_{Cr} 的最优工艺条件是 C1B3A2,反应 pH 值为 10.0,按投加量为 35 mL/L 加入质量浓度为 10 000 mg/L 的 SK-901 水溶液,反应 1.5 h。处理氨氮的最优工艺条件是 A3C2B1,反应 pH 值为 11.0,按投加量为 25 mL/L 加入质量浓度为 10 000 mg/L 的 SK-901 溶液,反应 2.0 h。

综合考虑,SK-901 最佳处理工艺条件:设置反应 pH 值为 10.0,按投加量为 25 mL/L 向化学镀镍废水中加入质量浓度为 10 000 mg/L 的 SK-901 水溶液,反应 1.5 h。此时试验水样中 COD_{Cr} 质量浓度为 638.28 mg/L,氨氮质量浓度为 11.64 mg/L,TP 质量浓度为 268.18 mg/L,络合镍质量浓度为 96.7 mg/L。

2.5 药剂成本分析

在相同条件下使用表 4 中的氧化剂将相同量的次/亚磷酸转换成相同量的正磷酸,成本分析与去除效率如表 4~表 5 所示。

(1) 表 4 中所选择的除 SK-901 外的其他 3 种氧化剂均是处理镀镍废水工艺中进行氧化还原时所普遍使用的药剂。

(2) 表 5 中所选择的除 SK-901 外的其他方法均是目前处理镀镍废水常用并且达标排放的工艺方法。

(3) 由表 4~表 5 可知,SK-901 相对于其他药剂,用量少,药剂成本低。

(4) SK-901 通过高价金属铁的化合物制得,具有极强的氧化性,能够将化学镀镍废水中的次/亚磷酸氧化为正磷酸。而且被还原的 Fe³⁺生成 Fe(OH)₃ 颗粒,能够捕捉废水中的磷酸盐,与正磷酸形成沉淀物,降低废水中 TP 含量,减少企业的药剂成本。

表 4 不同氧化剂的药剂成本分析

Tab. 4 Pharmaceutical Cost Analysis of Different Oxidants

序号	名称	用量/ (kg·m ⁻³)	单价/ (元·kg ⁻¹)	成本/ (元·m ⁻³)
1	SK-901	0.25	10	2.5
2	NaClO	2.00	2	4
3	H ₂ O ₂	3.00	3	9
4	高锰酸钾	1.00	8	8

表 5 同一条件下 SK-901 与传统处理方法对比

Tab. 5 Comparison between SK-901 and Traditional Treatment Meathods under the Same Condition

序号	名称	TP 去除率	COD _{Cr} 去除率	氨氮去除率
1	SK-901	14.97%	6.19%	68.02%
2	中和法	8.52%	6.80%	42.60%
3	化学沉淀法	13.60%	7.90%	56.82%
4	氧化还原法	10.69%	5.30%	78.60%

3 结论

(1) SK-901 氧化剂最佳处理工艺条件:设置反应 pH 值为 10.0,按投加量为 25 mL/L 向水样中添加质量浓度为 10 000 mg/L 的 SK-901 水溶液,反应 1.5 h 后,加入适量絮凝剂絮凝沉淀后过滤,此时处理效果最佳。

(2) 高效绿色氧化剂 SK-901 对化学镀镍废水 TP、COD_{Cr}、氨氮污染物能起到一定的去除作用。COD_{Cr} 质量浓度为 680.40 mg/L 时最佳去除率为 6.19%,TP 质量浓度为 315.40 mg/L 时最佳去除率为 14.97%,氨氮质量浓度为 36.40 mg/L 时最佳去除率为 68.02%。

(3) 使用高效绿色氧化剂 SK-901 可减少企业药剂成本。

(4) 高效绿色氧化剂 SK-901 既具有极强氧化性,又具有混凝效果,可产生协同作用,与其他氧化技术联用可拓宽其适用范围,从而对电镀行业的清洁生产做出贡献。

(5) 更快、更高效地处理化学镀镍废水是当今环保方面亟需解决的一个难题。现有化学镀镍废水的处理工艺众多,都有其各自的优缺点。传统的处理方式可以达到排放标准,但快速高效、经济成本更加合理的处理工艺方法仍然是化学镀镍废水处理工艺发展的重要方向。

参考文献

- [1] 王成刚,陈铭,赵德忠,等. 芬顿氧化工艺处理化学镀镍废水中的总镍[J]. 山东化工, 2020, 49(7): 261-262.
- [2] 刘洋. 化学镀镍废水中污染物去除工艺的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [3] 刘文芬. 塑料电镀 Cu/Ni/Cr 废水处理新工艺研究与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2018.

(下转第 136 页)

- elements in the surface sediments of Baiyangdian Lake, North China [J]. *Ecotoxicology*, 2022, 31: 289 – 298. DOI: 10.1007/s10646-021-02517-z.
- [16] REN Y Z, HE J, CHENG Q L, et al. Climate change prior to human activity reduces the mobility of phosphorus in eutrophic alpine lake[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022; 130364. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130364.
- [17] KONG M, HAN T L, CHEN M S, et al. High mobilization of phosphorus in black-odor river sediments with the increase of temperature[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145595. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145595.
- [18] 耿雪,文帅龙,孙培荣,等. 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义[J]. *环境科学*, 2019, 40(12): 5358–5366.
- [19] PENG H, JIANG A, WANG H. Adsorption and desorption characteristics of phosphorus on sediments in Panzhihua Section of Jinsha River, China[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 651(4): 042059. DOI: DOI: 10.1088/1755-1315/651/4/042059.
- [20] ZHU G R, YANG Y. Variation laws and release characteristics of phosphorus on surface sediment of Dongting Lake [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(13): 12342–12351.
- [21] 侯俊,王超,王沛芳,等. 太湖表层沉积物粒度组成时空分布特征及分类命名[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(2): 114–119.
- [22] XIE F Z, DAI Z L, ZHU Y R, et al. Adsorption of phosphate by sediments in a eutrophic lake: Isotherms, kinetics, thermodynamics and the influence of dissolved organic matter[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 562: 16–25. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.11.009.
- [23] HUANG L, LI L, HUANG L, et al. Influence of incubation time on phosphorus sorption dynamics in lake sediments[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(3): 443–455.
- [24] VAROL M. Spatio-temporal changes in surface water quality and sediment phosphorus content of a large reservoir in Turkey[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 259: 113860. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113860.
- [25] 叶琳琳,朱燕,徐圣友. 微生物对巢湖沉积物生物可利用磷的稳定性影响[J]. *资源环境与工程*, 2007, 21(3): 339–343.
- [26] 朱苏葛,刘凌,陈沐松,等. 微生物对阳澄湖间隙水溶解活性磷释放的影响[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(1): 45–48.
- [27] 陈洁,许海,詹旭,等. 沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(6): 2671–2678.
- [28] 徐洁,王红,李思言,等. 湖泊沉积物中微生物与生物地球化学循环[J]. *环境科技*, 2019, 32(1): 74–78.
- [29] 孔明,张路,尹洪斌,等. 蓝藻暴发对巢湖表层沉积物氮磷及形态分布的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(5): 1285–1292.
- [30] 林玉清,焦聪聪,施鸿昊,等. 蓝藻暴发对莫愁湖水体和沉积物营养盐的影响[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(2): 1–11.
- [31] SUN Z, LI G, WANG C, et al. Community dynamics of prokaryotic and eukaryotic microbes in an estuary reservoir[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 6966. DOI:10.1038/srep06966.
- [32] JONES R T, ROBESON M S, LAUBER C L, et al. A comprehensive survey of soil acidobacterial diversity using pyrosequencing and clone library analyses [J]. *Isme Journal*, 2009, 3(4): 442–453.
- [33] LAUBER C L, HAMADY M, KNIGHT R, et al. Pyrosequencing-based assessment of soil ph as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(15): 5111–5120.

(上接第 112 页)

- [4] 贾晓玲,柯水洲,朱佳. 次氯酸钠氧化脱除化学镀镍废水中的氨氮[J]. *环境工程*, 2019, 37(1): 93–97.
- [5] 张洪亮,王棉棉,吕斯濠,等. Fenton 氧化-沸石吸附联合处理化学镀镍废水[J]. *电镀与环保*, 2017, 36(6): 61–65.
- [6] 国家环境保护总局. 水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法: HJ/T 399—2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [7] 环境保护部. 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法: HJ 535—2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2019.
- [8] 国家环境保护总局. 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法: GB 11893—1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [9] 国家技术监督局. 水质 络合镍的测定 火焰原子吸收分光光度法: GB 11912—1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [10] 张新妍,崔建国,李红艳,等. K_2FeO_4 -PAC-PAM 同时去除氨氮、总磷和 COD_{Cr} 研究[J]. *应用化工*, 2019, 48(10): 2358–2362.
- [11] 崔红梅,郭静,周丽娜,等. Fenton 法预处理 ABS 废水的试验研究[J]. *工业用水与废水*, 2018, 49(3): 31–34.
- [12] 罗琨,庞妮,李雪,等. 镀镍废水 Fenton 氧化-铁氧体法处理研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(7): 109–114.
- [13] 景明霞. 化学沉淀法处理稀土氨氮废水的研究[J]. *安徽化工*, 2010, 36(3): 71–74.
- [14] 苏畅. 化学镀镍废水中磷处理的研究[J]. *环境与发展*, 2014, 26(1): 40–45.
- [15] 胡冰,时永辉,苏建文. Fenton 氧化深度处理制药废水二级生化出水[J]. *工业用水与废水*, 2014, 45(4): 28–31.