

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM_{2.5} 浓度遥感反演 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一(1513)

秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响 李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉(1520)

基于 GAM 模型的西安市 O₃ 浓度影响因素解析 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎(1535)

北京及周边 6 个城市大气 PM_{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征 朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕(1544)

典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析 李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤(1550)

成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛(1561)

天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖(1573)

涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正(1582)

典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤(1589)

中国地表水硝酸盐分布及其来源分析 张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦(1594)

中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇(1607)

小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟(1619)

浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征 马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖(1629)

三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴(1636)

骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子 张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军(1648)

拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系 王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁(1657)

基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升(1666)

岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航(1676)

巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应 李如忠, 王莉, 刘超(1684)

镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇(1692)

氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用 杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君(1700)

北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性 陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡(1709)

新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用 黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵娟, 冯华军(1716)

Ni 掺杂 Sb-SnO₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶 石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠(1725)

磁性 Fe₃O₄-CuO 非均相活化过碳酸钠降解 A07 徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅(1734)

赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星、性能和机制 史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟(1743)

工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响 张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜(1752)

污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性 陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇(1761)

改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性 毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆(1770)

A²/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性 刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康(1779)

基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制 杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮(1787)

HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪(1794)

低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征 朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(1801)

不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征 程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良(1808)

投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响 杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪(1816)

中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险 李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新(1825)

基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染 胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜(1838)

扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险 姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然(1847)

桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波(1855)

重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜(1864)

棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛(1871)

连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠(1880)

纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响 邓继宝, 张春来, 徐卫红(1888)

矿业废弃地复垦土壤-作物晒吸收特征及其对重金属拮抗效应 尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文(1904)

不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高(1914)

化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳(1921)

紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明(1930)

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰(1941)

极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国(1950)

红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽(1960)

稻田土壤 N₂O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制 郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅(1968)

京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 陈盼, 施晓清(1976)

中国城市工业化发展与 PM_{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波(1987)

《环境科学》征订启事(1618) 《环境科学》征稿简则(1635) 信息(1724, 1769, 1800)

浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征

马晓雁¹, 胡慧¹, 陆思嘉¹, 李青松², 薛乐飞¹, 李雪纯¹, 邓靖^{1*}

(1. 浙江工业大学土木工程学院, 杭州 310014; 2. 福建省农村污水处理与用水安全工程研究中心, 厦门理工学院水资源环境研究所, 厦门 361005)

摘要:以浙江省某市的饮用水及污水处理系统为主要调研对象,通过固相萃取-高效液相色谱(solid phase extraction-high performance liquid chromatography, SPE-HPLC)法展开了生活污水处理系统、水源、饮用水处理及供水系统中常见人工甜味剂的浓度调查.结果表明,SPE-HPLC 可准确测定水中安赛蜜、糖精、阿斯巴甜和纽甜,检测限分别为 57、120、170 和 47 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,定量限分别为 190、400、567 和 157 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;PWAX 柱固相萃取优化后,安赛蜜与糖精的回收率分别提高到 86.5% 和 97.7%,而纽甜的回收率略下降至 66.5%.生活污水中安赛蜜、糖精与纽甜的检出率可达 100.0%,阿斯巴甜检出率仅为 33.3%,4 种人工甜味剂的最高浓度为 0.83、4.52、1.22 和 7.57 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.水源水中安赛蜜、糖精、阿斯巴甜和纽甜最高检出浓度为 22.94、39.17、0.73 和 8.92 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,检出率为分别为 72.7%、90.9%、18.2% 和 90.9%.预臭氧工艺对安赛蜜、糖精和纽甜去除率为 67.7%~100.0%,深度处理工艺对 4 种人工甜味剂去除效果好,去除率为 73.7%~100.0%,有效降低了饮用水水质风险,管网中未检测到 4 种人工甜味剂的存在.

关键词:新型污染物;人工甜味剂;污水处理系统;饮用水处理系统;水质安全

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1629-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201910084

Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province

MA Xiao-yan¹, HU Hui¹, LU Si-jia¹, LI Qing-song², XUE Le-fei¹, LI Xue-chun¹, DENG Jing^{1*}

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Fujian Engineering and Research Center of Rural Sewage Treatment and Water Safety, Water Resources and Environmental Institute, Xiamen University of Technology, Xiamen 361005, China)

Abstract: Taking the sewage and drinking water treatment system of two cities in Zhejiang Province as the main research target, a systematic investigation on the common artificial sweeteners was carried out by solid phase extraction-high performance liquid chromatography (SPE-HPLC). The results showed that SPE-HPLC can accurately determine micro acesulfame (ACE), saccharin (SAC), aspartame (ASP), and neotame (NEO) in water. The detection limits were 57, 120, 170, and 47 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, and the quantification limits were 190, 400, 567, and 157 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. After optimization of the solid phase extraction procedure when using PWAX columns, the recoveries of ACE and SAC were enhanced to 86.5% and 97.7%; however, it slightly decreased to 66.5% for NEO. The occurrence rates of ACE, SAC, and NEO in domestic sewage were 100.0%, and it was only 33.3% for ASP. The highest concentrations of four aforementioned artificial sweeteners in domestic sewage were 0.83, 4.52, 1.22, and 7.57 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The highest concentrations of acesulfame, saccharin, aspartame, and neotame in source water were 22.94, 39.17, 0.73, and 8.92 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and detection rates were 72.7%, 90.9%, 18.2%, and 90.9%, respectively. Most artificial sweeteners were removed by the prozone process; the removal efficiencies of ACE, SAC, and NEO ranged from 67.7% to 100.0%, and the removal efficiencies of ACE, SAC, and NEO by the advanced treatment process ranged from 73.7% to 100.0%, which effectively reduced the risk of drinking water quality. The four artificial sweeteners were not detected in the water supply network.

Key words: emerging pollutants; artificial sweeteners; sewage treatment systems; drinking water treatment systems; water quality safety

人工甜味剂(artificial sweeteners),又名低热量甜味剂或非营养性甜味剂,常作为添加剂用于食品、饮料、饲料、药品及个人护理品,因其高甜度低热量的特点,深受糖尿病、龋齿、肥胖患者及减肥人群的欢迎^[1,2].全球允许使用的人工甜味剂常见的有安赛蜜(acesulfame, ACE)、三氯蔗糖(sucralose, SUC)、糖精(saccharin, SAC)、甜蜜素(cyclamate, CYC)、阿斯巴甜(aspartame, ASP)和纽甜(neotame,

NEO)等. ACE 与 SUC 因其突出的稳定性与持久性,常作为示踪剂揭示地下水等是否受到人为因素的污染^[3,4].

收稿日期: 2019-10-14; 修订日期: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678527, 51208468); 浙江省自然科学基金项目(LY19E080019); 福建省农村污水处理与用水安全工程研究中心开放项目(RST201803)

作者简介: 马晓雁(1978~),女,博士,主要研究方向为饮用水污染, E-mail: mayaner620@163.com

* 通信作者, E-mail: seudjing@163.com

据报道 2012 年全球大约消耗人工甜味剂 11.7 万 t^[5], 中国也逐渐成为亚太地区人工甜味剂的主要消费国与生产国^[2]. 大部分的人工甜味剂在生物体内几乎不被代谢吸收, 会以母体形式随排泄物大量进入污水系统^[6], 部分稳定性极高的甜味剂甚至穿透污水处理系统进入环境水体甚至饮用水中^[7,8]. 欧洲、北美洲和亚洲的近 20 个国家的调查研究表明人工甜味剂普遍存在于污水及地表水中, 最高浓度可达几百 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[4,9-12]; 污水处理工艺对 SAC、CYC、ASP 和 NEO 有较好的处理效果, 但对 SUC 和 ACE 去除效果不佳^[13,14]. 地表水中的人工甜味剂主要来源于生活污水、工业废水及面源污染. 人工甜味剂排入接纳水体后, 稀释和扩散等作用使其浓度略低于污水处理系统^[12,15], 欧洲国家的河流中检出 SUC, 浓度高达 $1\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[16]. 人工甜味剂可经由下渗等过程进入地下水中, 天津市某地下水中检出了 ACE、SAC、CYC 与 SUC, 浓度范围在 $6.10\sim 80\ \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, SAC 和 ACE 的浓度较高, SUC 最低^[12]. 加拿大地下水中检出浓度相对国内高, ACE 和 SUC 的最高浓度超过 $20\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[3]. 饮用水处理系统中人工甜味剂的相关研究不多, Scheurer 等^[17]的研究发现德国 6 个水厂均可检测到 ACE, 浓度高达 $2\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Buerge 等^[4]在瑞士某水厂的调查发现水源中 ACE 浓度在 $1.1\sim 2.6\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 臭氧处理后, 末端管中 ACE 的浓度降至 $0.02\sim 0.07\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 本课题组于浙江省某市饮用水处理及管网自来水中检出微量 SUC, 浓度范围为 $0.11\sim 0.75\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[18], 发现水处理工艺对人工甜味剂控制能力有限, 饮用水水质可能受到人工甜味剂的影响.

毒理学研究表明人工甜味剂在控制剂量下使用风险很低^[19], 但近期有研究证实甜味剂的长期摄入可能对动物产生不良后果. ACE 会降低脑补血糖并极大影响小鼠的短期记忆与认知功能^[20]. SUC 可能会改变小鼠和人类肠道内菌群, 造成葡萄糖不耐受, 增加糖尿病的发病风险^[21], 中等剂量的 SAC 可能诱导小鼠睡眠障碍^[22], 过量的 ASP 摄入可能参与某些精神障碍的发病机制 (DSM-IV-TR 2000) 以及影响学习和情绪功能^[23]. 饮用水是人们摄入人工甜味剂途径之一, 人工甜味剂在水环境尤其是水源及饮水环境中的分布及含量调查对于掌握污染基础信息, 评价其健康风险等具有科学意义.

本文通过优化固相萃取-高效液相色谱法 (solid phase extraction-high performance liquid chromatography, SPE-HPLC), 以浙江省的污水处理、饮用水处理及供水系统为目标, 在国内首次针对不同水环境展开了中人工甜味剂调查, 获取污染状况

基础数据, 并评价常规及深度水处理工艺对水源中微量人工甜味剂的控制能力, 以期为后续污染控制的工艺选择等深入研究提供数据支撑.

1 材料与方 法

1.1 样品采集与保存

于 2017 年 8 月~2018 年 11 月在浙江省境 H_1 市和 H_2 市的污水、饮用水处理及供水系统中选点取样. H_1 市 QT、JX、NX 和 XF 这 4 座自来水厂分别以 QT 江和 DT 为水源. H_2 市的 TH、CX 两座自来水厂分别以 T 湖 XT 溪与 LHT 水库为水源. BL 污水厂位于 H_2 市. 供水管网样品采自 QT 路和 DSZ 路每隔 800 m 建筑内水龙头, 为 QT 水厂供出. 在水源、水厂各处理工艺段以及不同管网点采集的水样保存于 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 棕色玻璃瓶中, 并于 48 h 内处理分析, 预处理前经 $0.45\ \mu\text{m}$ 的滤膜过滤.

1.2 试剂与材料

4 种人工甜味剂标准品 ACE (98%)、SAC (>99%)、ASP (98%) 与 NEO (>99%) 购于阿拉丁生化科技股份有限公司 (中国); HPLC 级甲醇、乙腈购自 CNW (德国); 所需溶液均由超纯水配制.

试验用预处理及分析仪器包括 SHIMADZU LC20A 高效液相色谱 (含四元泵, 自动进样器, 紫外检测器, 柱温箱) 配 Inertsil ODS-3 液相色谱柱 ($4.6\times 150\ \text{mm}$, $5\ \mu\text{m}$, SHIMADZU, 日本); N-EVAP-111 型氮吹仪 (美国 ORGANOMATION 公司); BS124S 型电子精密分析天平 (赛多利斯科学仪器有限公司); UPHW1-90T 型纯水机/超纯水制造系统 (北京优普时代科技有限公司); Visipre TM SPE 12 孔型固相萃取装置 (美国 SUPECLO 公司); Poly-SeryC18 柱、SeryPWAX 柱、Poly-SeryHLB 柱 ($60\ \text{mg}/3\ \text{mL}$, 德国 CNW 科技公司产品).

1.3 样品前处理

采用固相萃取对水样进行富集与提纯, 其中 C18 小柱作为除杂柱与 HLB 或 PWAX 小柱串联. 用 6 mL 甲醇活化萃取柱, 6 mL 纯水平衡 (PWAX 柱用 pH 为 4, 浓度为 $25\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的醋酸铵溶液平衡), 1 L 水样过柱, 流速为 $3\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 真空抽干 2 min, 用 6 mL 甲醇溶液缓慢淋洗小柱 (每次 3 mL, 真空抽干 2 min). 收集洗脱液, 氮气吹干, 用 1 mL 纯水定容, 并用 HPLC 分析.

1.4 样品分析方法

采用液相色谱对 4 种人工甜味剂进行定量分析, 流动相 A 为 $20\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硫酸铵溶液, 流动相 B 为乙腈. 检测波长为 200 nm, 色谱柱采用 Inertsil ODS-3 柱 ($4.6\times 150\ \text{mm}$, $5\ \mu\text{m}$, 岛津, 日本), 柱温

40℃, 流速 1 mL·min⁻¹, 进样量 80 μL. 梯度洗脱程序为 0~2 min, 95% A, 5% B; 2~30 min, 50% A, 50% B; 30~40 min, 95% A, 5% B.

2 结果与讨论

2.1 SPE-HPLC 测定人工甜味剂的优化

利用 SPE-HPLC 法对 4 种人工甜味剂进行测定, 选择在 200 nm 和 226 nm 进行定量分析, 并进行比较, 液相色谱图如图 1 所示.

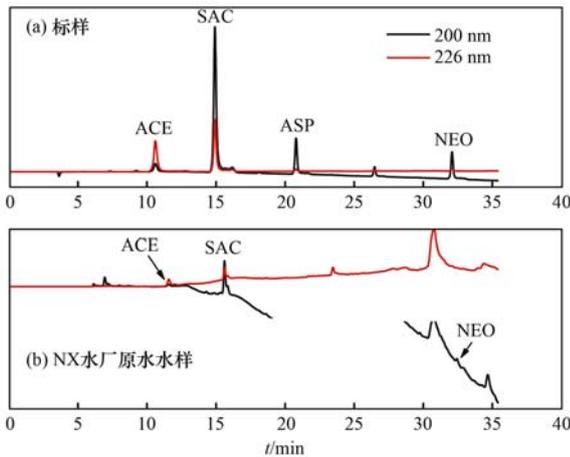


图 1 4 种人工甜味剂的双波长色谱图

Fig. 1 Dual-wavelength chromatograms of four artificial sweeteners

由图 1 可见, 4 种人工甜味剂在反相柱中实现良好分离, ACE 于 226 nm 波长处的响应高于 200 nm, 其余 3 种甜味剂在 200 nm 处的响应明显优于 226 nm, 两个波长下的响应值差异也作为在复杂水样中定性甜味剂峰的辅助手段. 用外标法分别对其

进行定量, 线性范围为 0.5~100 mg·L⁻¹, 线性相关系数均高于 0.999 7, 除 ASP 外其余 3 种人工甜味剂方法的相对标准偏差均小于 6%. 方法检测限为 3 倍信噪比, 定量限为 10 倍信噪比, ACE、SAC、ASP 和 NEO 的检测限为 57、120、170 和 47 μg·L⁻¹, 定量限分别为 190、400、567 和 157 μg·L⁻¹.

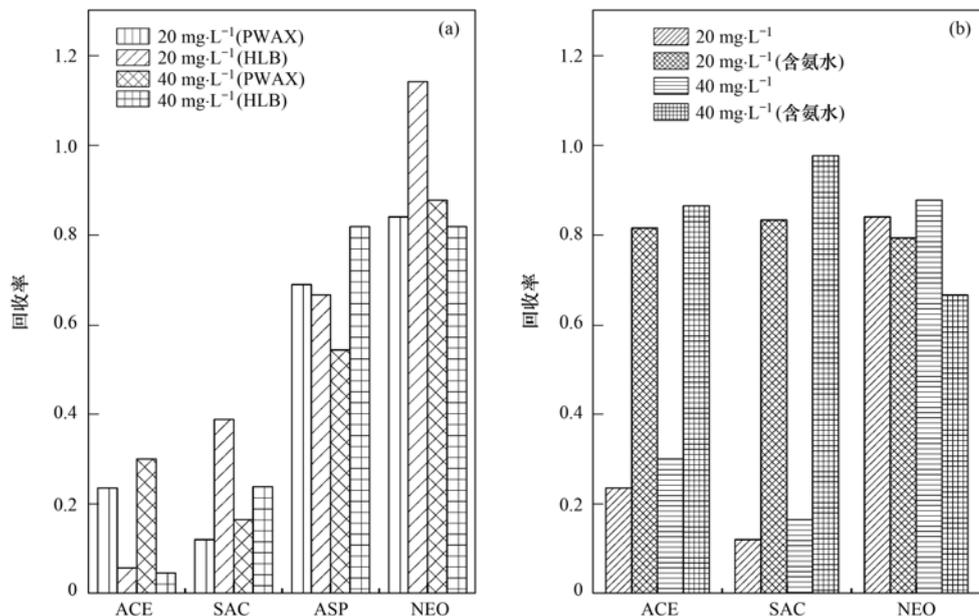
2.2 方法优化与有效性

4 种人工甜味剂 SPE 预处理方法的有效性由目标物加标回收率进行评价. 甜味剂加标浓度为 20 mg·L⁻¹ 和 40 mg·L⁻¹, 分别采用 HLB 与 PWAX 两种吸附柱经过柱吸附、洗脱、吹干和定容, 测定浓度, 计算回收率, 结果如图 2(a) 所示.

4 种人工甜味剂中, 两种填料对 ASP 和 NEO 的回收率较为理想, ASP 为 70.0% 左右, NEO 的回收率在 80.0% 以上. ACE 和 SAC 的回收率都低于 40.0%, 与 Arbeláez^[11] 和 Gan^[24] 的研究结果相符, 可能是由于填料对 ACE 和 SAC 的强吸附性或不合适的洗脱剂影响了回收率. HLB 对 ACE 的回收效果不理想, 为提高 ACE 的回收率, 对 PWAX 柱的固相萃取方法进行优化. 优化方法为甲醇中加入 2.0% 的氨水作为洗脱液, 对 PWAX 小柱进行洗脱, ACE、SAC 和 NEO 回收率的对比结果如图 2(b). 优化后 20 mg·L⁻¹ 与 40 mg·L⁻¹ 浓度下 ACE 与 SAC 回收率提高, 均超过 80.0%.

2.3 人工甜味剂在污水处理系统中的分布

H₂ 市 BL 污水厂为小型生活污水处理系统, 采用序批式活性污泥法 (SBR) 处理工艺. 采集水厂原



(a) HLB 与 PWAX 两种填料对比; (b) PWAX 柱改良洗脱对 3 种 ACE、SAC 与 NEO 种甜味剂回收率优化

图 2 人工甜味剂固相萃取纯水加标回收率

Fig. 2 Solid phase extraction recoveries of artificial sweeteners spiked in pure water

水、生物处理出水及消毒后出水进行分析,污水处理系统中甜味剂浓度变化如图 3.

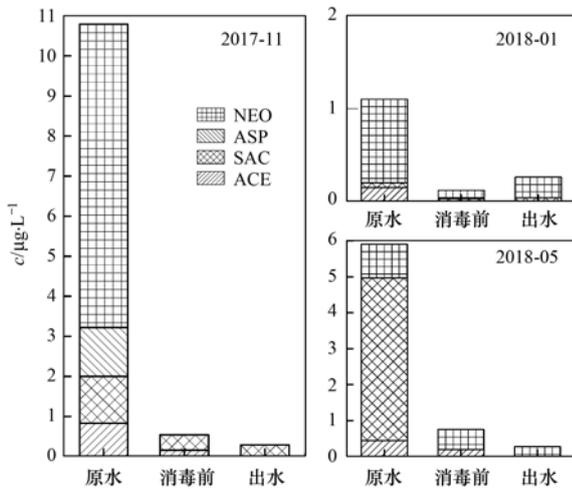


图 3 4 种人工甜味剂在 BL 污水厂中的浓度分布

Fig. 3 Concentration distribution of four artificial sweeteners in BL wastewater treatment plant

原水中 ACE、SAC 和 NEO 的检出率为 100.0%, ASP 仅在 2017 年 11 月污水原水中检出,浓度为 $1.22 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,且低于其它人工甜味剂,因其易被生物降解,在 pH 值高于 5 时发生环化反应^[25-27]. 调查期间,ACE 的最高浓度为 $0.85 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,最小浓度为 $0.15 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (低于定量限),SAC 的检出范围为 $\text{ND} \sim 4.52 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,NEO 的检出范围为 $\text{ND} \sim 7.57 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

污水处理系统中人工甜味剂均有不同程度的减少,ASP 在工艺阶段基本被去除,NEO 的去除率超过 70.0%,与研究报道类似^[28]. ACE 在生物处理工艺段去除率为 54.9%~80.2%,与污水处理工艺对 ACE 的去除效果报道(去除率 10%

~40%)相比略高^[12],ACE 在污水系统中的减量受微生物活性影响较大,因而波动较大^[5]. 此外,ACE 可光解,可被氯氧化,因此污水出水中 ACE 普遍低于检测限^[29,30]. 污水处理系统对 SAC 的控制效果也十分明显,去除率最高可达 100.0%,冬季低于春夏,可能冬季温度较低,生物活性低导致.

2.4 人工甜味剂在饮用水处理及供水系统中的分布

2.4.1 水源环境中的人工甜味剂

水源环境中 ACE、SAC 与 NEO 的检出率较高,其中 SAC 浓度较高,ASP 由于其不稳定性,易分解,检出率较低,4 种人工甜味剂在水源中的分布情况如图 4 所示.

Q 江水系为 H₁ 市的主要饮用水水源,2017 年 8 月 ACE、SAC、ASP 和 NEO 的检出浓度分别为 $0.15 \sim 0.30$ 、 $0.58 \sim 0.69$ 、 $0.30 \sim 0.73$ 和 $0.19 \sim 0.25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,SAC 浓度最高,NEO 浓度最低.

T 湖、L 水库和 T 溪水源地中 4 种甜味剂均有检出.T 湖及 T 溪内浓度较高,L 水库污染相对较轻.SAC 的检出率较高,2017 年 11 月 3 种原水水源的检出浓度范围为 $17.94 \sim 39.17 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,且该月水样所有检出甜味剂的浓度均超过 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其原因尚不知,可能为点源、面源污染的大量排入. 2018 年 5 月与 11 月中 ACE 的检出范围为 $\text{ND} \sim 0.13 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,SAC 为 $\text{LOD} \sim 0.07 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,NEO 为 $\text{ND} \sim 0.22 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,未检测出 ASP.

2.4.2 饮用水处理工艺中人工甜味剂的变化

CX 水厂以 T 溪与 L 水库的混合水为原水,处理工艺采用常规混凝、沉淀、过滤和消毒工艺,不同工艺段 4 种人工甜味剂含量如表 1 所示.

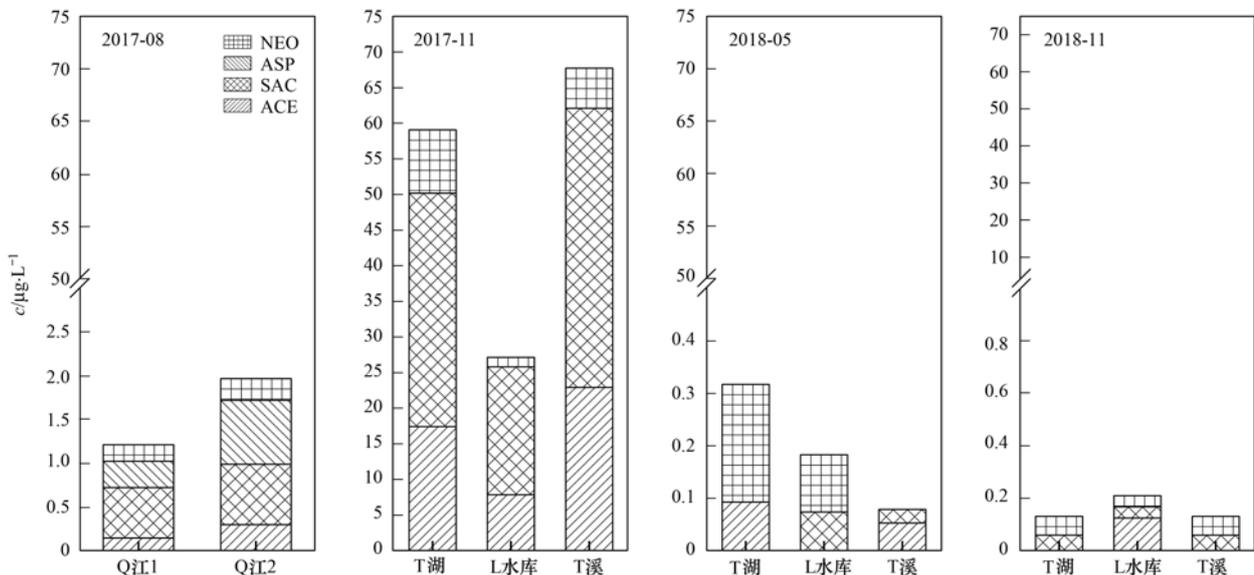


图 4 4 种人工甜味剂在水源水中的分布

Fig. 4 Distribution of four artificial sweeteners in source waters

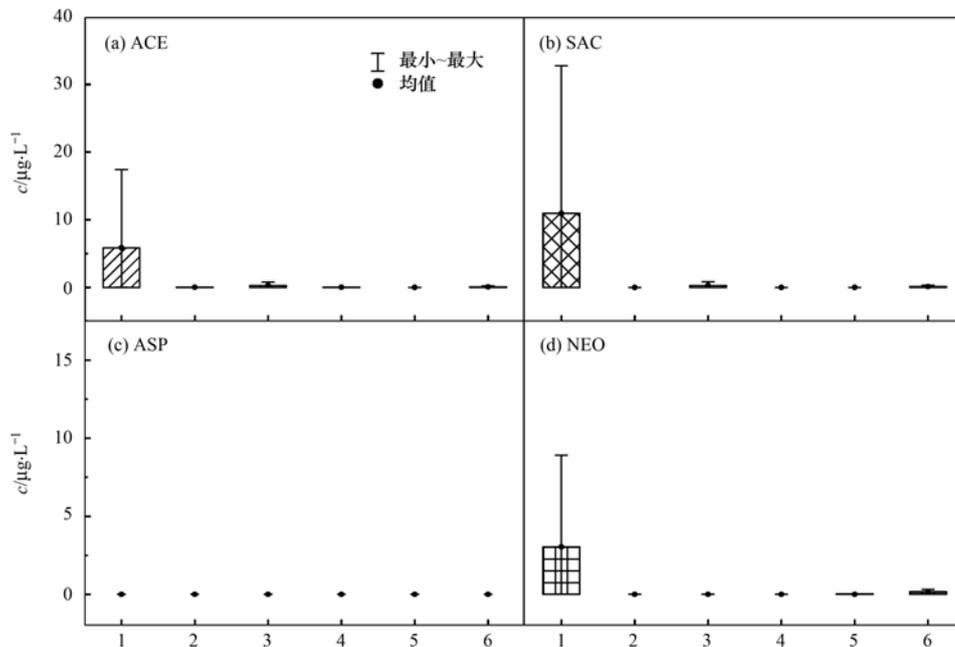
表 1 CX 水厂各工艺段 4 种人工甜味剂的含量¹⁾/μg·L⁻¹Table 1 Occurrence of four artificial sweeteners in each process sections of CX waterwork/μg·L⁻¹

日期(年-月)	项目	ACE	SAC	ASP	NEO
2018-11	T 溪原水	0.13	LOD	ND	0.04
	L 水库原水	ND	LOD	ND	0.07
	沉淀出水	0.43	LOD	ND	ND
	滤池出水	0.69	LOD	ND	ND
	出水	ND	ND	ND	ND
2017-12	T 溪原水	22.94	39.17	ND	5.61
	L 水库原水	7.88	17.94	ND	1.33
	砂滤出水	ND	ND	ND	ND
	出水	0.05	0.33	ND	0.36

1) ND 表示未检出

由表 1 可见, 经过常规水处理工艺后, ACE、SAC 和 NEO 浓度均有不同程度降低. 与 Scheurer 等^[1]的报道类似, SAC 在混凝沉淀与过滤阶段大幅减少, ACE 也有一定程度的减少, 可能与混凝携带、滤料表面的微生物等有关. 消毒阶段部分人工甜味剂可被氧化去除, 浓度降低同时能生成一定量消毒副产物^[30,31].

TH 水厂以 T 湖为原水, 处理工艺为预臭氧、絮凝、沉淀、砂滤、后臭氧、活性炭滤池和氯消毒, 2017 年 12 月和 2018 年 5 月、11 月不同工艺段内 4 种人工甜味剂的浓度变化如图 5 所示.



1. 原水; 2. 预臭氧出水; 3. 砂滤池出水; 4. 后臭氧出水; 5. 活性炭滤池出水; 6. 出水

图 5 4 种人工甜味剂在 TH 水厂深度处理工艺中的变化

Fig. 5 Variation of four artificial sweeteners in the advanced treatment process of TH water plants

饮用水处理系统中, ACE、SAC 和 NEO 的检出率为 38.9%、27.8% 和 33.3%, ASP 极易分解, 浓度低于检测限. 预臭氧工艺去除了水中大部分人工甜味剂, 对 ACE、SAC 和 NEO 的去除率为 67.7% ~ 100.0%, 深度处理工艺对 ACE、SAC 和 NEO 的去除率为 73.7% ~ 100.0%. Soh 等^[32]的研究证明, ACE 在 5 min 之内可被高浓度(100 倍浓度)臭氧完全降解, ACE、SAC 与 NEO 均具有不饱和碳键, 可被臭氧分子氧化. 絮凝、沉淀和砂滤在一定程度上去除了水体中部分杂质, 使得目标甜味剂更容易被富集, 所以能在滤池出水中检测到人工甜味剂的存在. 经过氯消毒, 水厂出水中的人工甜味剂含量极低, 可被余氯氧化. Li 等^[30]的研究发现 ACE 氯消毒后会产生几种受管制的消毒副产物, 对饮用水安全产生一定的威胁.

2.4.3 人工甜味剂在供水系统中的分布

供水管网采样点中 4 种人工甜味剂均未检出, 可见饮用水暂未受到 4 种目标甜味剂污染.

3 结论

(1) 优化 SPE-HPLC 法可实现水环境中微量人工甜味剂的准确测定, 4 种甜味剂安赛蜜、糖精、阿斯巴甜和纽甜回收率可满足分析需求, 检测限为 57、120、170 和 47 μg·L⁻¹, 定量限分别为 190、400、567 和 157 μg·L⁻¹.

(2) 生活污水处理系统、地表水源及饮用水处理系统中 4 种目标甜味剂均有检出, 污水中的检出率及浓度普遍高于地表水. 污水及饮用水处理系统可实现 ACE、SAC、ASP 和 NEO 等人工甜味剂的减量化, 供水管网中未检出目标人工甜味剂.

(3) 饮用水处理系统中可能存在甜味剂的转化, 尽管供水管网中未检出, 但其可能衍生臭氧降解产物、消毒副产物及其影响等需深入探讨。

参考文献:

- [1] Scheurer M, Brauch H J, Lange F T. Analysis and occurrence of seven artificial sweeteners in German waste water and surface water and in soil aquifer treatment (SAT) [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, **394**(6): 1585-1594.
- [2] Sylvetsky A C, Jin Y C, Clark E J, *et al.* Consumption of low-calorie sweeteners among children and adults in the United States [J]. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 2017, **117**(3): 441-448. e2.
- [3] Van Stempvoort D R, Roy J W, Brown S J, *et al.* Artificial sweeteners as potential tracers in groundwater in urban environments [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **401**(1-2): 126-133.
- [4] Buerge I J, Buser H R, Kahle M, *et al.* Ubiquitous occurrence of the artificial sweetener acesulfame in the aquatic environment: an ideal chemical marker of domestic wastewater in groundwater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(12): 4381-4385.
- [5] Castronovo S, Wick A, Scheurer M, *et al.* Biodegradation of the artificial sweetener acesulfame in biological wastewater treatment and sandfilters [J]. *Water Research*, 2017, **110**: 342-353.
- [6] 冯碧婷, 干志伟, 胡宏伟, 等. 人工甜味剂环境行为研究进展 [J]. *环境化学*, 2013, **32**(7): 1158-1167.
- Feng B T, Gan Z W, Hu H W, *et al.* Research progress on the environmental behavior of artificial sweeteners [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(7): 1158-1167.
- [7] Xu Y, Lin Z Y, Wang Y, *et al.* The UV/peroxymonosulfate process for the mineralization of artificial sweetener sucralose [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **317**: 561-569.
- [8] Toth J E, Rickman K A, Venter A R, *et al.* Reaction kinetics and efficiencies for the hydroxyl and sulfate radical based oxidation of artificial sweeteners in water [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2012, **116**(40): 9819-9824.
- [9] Ordoñez E Y, Quintana J B, Rodil R, *et al.* Determination of artificial sweeteners in sewage sludge samples using pressurised liquid extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2013, **1320**: 10-16.
- [10] Spoelstra J, Schiff S L, Brown S J. Artificial sweeteners in a large Canadian river reflect human consumption in the watershed [J]. *PLoS One*, 2013, **8**(12): e82706.
- [11] Arbeláez P, Borrull F, Pocurull E, *et al.* Determination of high-intensity sweeteners in river water and wastewater by solid-phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2015, **1393**: 106-114.
- [12] Gan Z W, Sun H W, Feng B T, *et al.* Occurrence of seven artificial sweeteners in the aquatic environment and precipitation of Tianjin, China [J]. *Water Research*, 2013, **47**(14): 4928-4937.
- [13] Tran N H, Nguyen V T, Urase T, *et al.* Role of nitrification in the biodegradation of selected artificial sweetening agents in biological wastewater treatment process [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **161**: 40-46.
- [14] Tran N H, Gan J, Nguyen V T, *et al.* Sorption and biodegradation of artificial sweeteners in activated sludge processes [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **197**: 329-338.
- [15] Sang Z Y, Jiang Y N, Tsoi Y K, *et al.* Evaluating the environmental impact of artificial sweeteners: A study of their distributions, photodegradation and toxicities [J]. *Water Research*, 2014, **52**: 260-274.
- [16] Loos R, Gawlik B M, Boettcher K, *et al.* Sucralose screening in European surface waters using a solid-phase extraction-liquid chromatography-triple quadrupole mass spectrometry method [J]. *Journal of Chromatography A*, 2009, **1216**(7): 1126-1131.
- [17] Scheurer M, Storck F R, Brauch H J, *et al.* Performance of conventional multi-barrier drinking water treatment plants for the removal of four artificial sweeteners [J]. *Water Research*, 2010, **44**(12): 3573-3584.
- [18] 朱世翠, 陆思嘉, 宋亚丽, 等. 典型饮水系统中人工甜味剂三氯蔗糖的调查 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, **53**(11): 2197-2205.
- Zhu S C, Lu S J, Song Y L, *et al.* Investigation of artificial sweetener sucralose in typical drinking water systems [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, **53**(11): 2197-2205.
- [19] Chattopadhyay S, Raychaudhuri U, Chakraborty R. Artificial sweeteners - a review [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, **51**(4): 611-621.
- [20] Ibi D, Suzuki F, Hiramatsu M. Effect of AceK (acesulfame potassium) on brain function under dietary restriction in mice [J]. *Physiology & Behavior*, 2018, **188**: 291-297.
- [21] Suez J, Korem T, Zeevi D, *et al.* Artificial sweeteners induce glucose intolerance by altering the gut microbiota [J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 181-186.
- [22] Oishi K, Higo-Yamamoto S, Yasumoto Y. Moderately high doses of the artificial sweetener saccharin potentially induce sleep disorders in mice [J]. *Nutrition*, 2016, **32**(10): 1159-1161.
- [23] Humphries P, Pretorius E, Naudé H. Direct and indirect cellular effects of aspartame on the brain [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2008, **62**(4): 451-462.
- [24] Gan Z W, Sun H W, Wang R N, *et al.* A novel solid-phase extraction for the concentration of sweeteners in water and analysis by ion-pair liquid chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2013, **1274**: 87-96.
- [25] Berset J D, Ochsenbein N. Stability considerations of aspartame in the direct analysis of artificial sweeteners in water samples using high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS) [J]. *Chemosphere*, 2012, **88**(5): 563-569.
- [26] Tran N H, Hu J Y, Ong S L. Simultaneous determination of PPCPs, EDCs, and artificial sweeteners in environmental water samples using a single-step SPE coupled with HPLC-MS/MS and isotope dilution [J]. *Talanta*, 2013, **113**: 82-92.
- [27] Baena-Nogueras R M, Traverso-Soto J M, Biel-Maeso M, *et al.* Sources and trends of artificial sweeteners in coastal waters in the bay of Cadiz (NE Atlantic) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **135**: 607-616.
- [28] Subedi B, Kannan K. Fate of artificial sweeteners in wastewater treatment plants in New York State, U. S. A [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(23): 13668-13674.
- [29] 干志伟. 人工甜味剂在环境中的分布、迁移转化及光降解机理研究 [D]. 天津: 南开大学, 2014.
- Gan Z W. Distribution, fate, and photolysis mechanism of artificial sweeteners in environment [D]. Tianjing: Nankai University, 2014.
- [30] Li A J, Wu P R, Law J C F, *et al.* Transformation of acesulfame in chlorination: kinetics study, identification of byproducts, and

- toxicity assessment[J]. *Water Research*, 2017, **117**: 157-166.
- [31] Prescott M, Krasner S W, Guo Y C. Estimation of NDMA precursor loading in source water via artificial sweetener monitoring[J]. *Journal - American Water Works Association*, 2017, **109**(6): E243-E251.
- [32] Soh L, Connors K A, Brooks B W, *et al.* Fate of sucralose through environmental and water treatment processes and impact on plant indicator species [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(4): 1363-1369.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjxx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjxx@rcees.ac.cn;网址:www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of AO7 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)