

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫酸类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究

薛培英¹, 李国新², 赵全利³

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 保定 071001; 2. 厦门理工学院环境科学与工程学院, 厦门 361024; 3. 河北农业大学教学实验场, 保定 071001)

摘要: 应用室内模拟试验, 通过对铜(Cu)的短期吸收动力学、各亚细胞组分吸收动力学以及Cu的释放研究, 探讨了两种沉水植物轮叶黑藻[*Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle]和穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.)对Cu的吸收机制。结果表明: ①轮叶黑藻和穗花狐尾藻均对Cu具有较高的吸收速率, 且两种植物最高吸收速率差异不显著 [$V_{\max}$ (DW) 为 $2 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$, $P > 0.05$]; ②在 $2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu 溶液中暴露不同时间(0~96 h), 两种沉水植物叶片和茎中各亚细胞组分的Cu含量均迅速增加并约在12 h后达到平衡。各时间处理下, 两种植物叶片富集的Cu含量均显著高于茎($P < 0.05$), 并且叶片中的Cu均主要分布在细胞壁(>60%), 其次是可溶部分和细胞器; ③两种植物相比, 黑藻叶片细胞壁中富集的Cu含量显著高于狐尾藻, 而细胞内富集的Cu含量差异不显著。轮叶黑藻对Cu的富集和释放能力均高于穗花狐尾藻。

关键词: 轮叶黑藻; 穗花狐尾藻; 铜; 亚细胞; 吸收机制

中图分类号: X17 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1878-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.035

Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle and *Myriophyllum spicatum* L.

XUE Pei-ying¹, LI Guo-xin², ZHAO Quan-li³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Agriculture University of Hebei, Baoding 071001, China; 2. College of Environmental Science and Technology, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 3. Farm of Teaching and Experimentation, Agriculture University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract: Cultivation experiments, including short-term copper uptake kinetics, uptake kinetics of Cu by different subcellular fractions and efflux of Cu, were carried out to investigate mechanisms of copper uptake by two species of submerged macrophyte, *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle and *Myriophyllum spicatum* L. The results showed that: ① Both *H. verticillata* and *M. spicatum* showed high influx rates for copper ions with no statistically significant differences [$V_{\max}$ (DW) is $2 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$]; ② Both leaf and stem Cu concentrations of two strains of plants showed sharp increase with the external medium, and the equilibrium was reached for about 12 h after being exposed to solution with $2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu. Leaves of these two plants accumulated much higher concentrations of Cu than stems. Furthermore, Cu in leaves concentrated predominantly in cell walls (>60%), followed by soluble and organelle fractions; ③ Copper accumulated in cell wall of *H. verticillata* leaf was considerably higher than that of *M. spicatum*, and Cu concentrated in intracellular fractions of leaves showed no statistically significant difference between these two plants. Moreover, ability of Cu accumulation and efflux by *H. verticillata* was higher than that by *M. spicatum*.

Key words: *Hydrilla verticillata*; *Myriophyllum spicatum*; copper; subcellular; uptake mechanism

铜(Cu)在自然界中广泛分布。近年来随着工农业的发展,采矿、石油冶炼、农药施用等人为活动使得越来越多的Cu进入到环境中,造成环境污染。通常Cu污染水体的浓度在 $30 \sim 60 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ [1], 而一些工业排放污水可以达到 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。应用大型水生植物,如挺水植物、浮叶植物和漂浮植物修复水体重金属污染已经得到广泛研究[2~8]。沉水植物作为水体生态系统中具有重要生态和环境功能的初级生产者,具有很强的修复重金属污染水体的潜力[9,10],然而沉水植物对Cu的吸收和富集机制尚不明确,阻碍了其应用于水体Cu污染修复。

本研究选取了自然水体中常见的两种沉水植物轮叶黑藻和穗花狐尾藻为对象。这两种植物在水体

中分布于不同深度区域且具有明显不同的形态和生理特征,但它们在世界范围内均广泛分布,都具有很强的繁殖能力和较大的生物量,而且已有研究表明这两种植物均具有很强的富集水体中重金属的能力,如Pb、Hg、Cd、Ni、As和Cu,因此是理想的水体修复材料[9,11~15]。笔者研究了轮叶黑藻和穗花狐尾藻对Cu的短期吸收动力学及不同亚细胞组分对铜的吸收动力学特征,探讨两种沉水植物对Cu的

收稿日期: 2013-09-02; 修订日期: 2013-10-25

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2012J05030); 国家自然科学基金项目(41073074)

作者简介: 薛培英(1982~),女,博士,讲师,主要研究方向为土壤环境质量及城市湿地生态与环境, E-mail: pyxue0812@yahoo.com

吸收与富集机制,同时通过 Cu 释放研究进一步明确沉水植物对 Cu 的代谢过程,以期对沉水植物应用于水体 Cu 污染提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 植物材料与培养

轮叶黑藻 [*Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle] 和穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum* L.) 取自江苏省无锡市太湖水域。植物采集后置于温室的玻璃缸内 (50 L, 含 5 ~ 10 cm 土层和 1 cm 石英砂, 取 10 ~ 20 cm 植物顶枝栽于土中, 待其生出新根和顶枝) 培育 3 ~ 5 个月。对植物进行处理之前, 取生长一致的顶枝于人工淡水中驯化 7 d。

人工淡水配方: 22.7 mg·L⁻¹ MgSO₄·7 H₂O, 30.7 mg·L⁻¹ MgCl₂·2 H₂O, 20.4 mg·L⁻¹ CaCl₂·2 H₂O, 45.7 mg·L⁻¹ NaCl, 26.0 mg·L⁻¹ NaHCO₃, 3.61 mg·L⁻¹ KCl, 1.41 mg·L⁻¹ FeCl₃·6 H₂O, 0.97 mg·L⁻¹ Al₂(SO₄)₃·18 H₂O, 0.19 mg·L⁻¹ MnCl₂·4 H₂O, 3.86 μg·L⁻¹ ZnSO₄·7 H₂O, 2.17 μg·L⁻¹ CuCl₂·2 H₂O^[16], 溶液 pH 值用 NaOH 和 HCl 调至 7.0, 此 pH 值条件下, 溶液中 Cu 主要以 Cu²⁺ 形式存在^[17]。

植物生长条件: 试验在可控光控温的培养箱中进行, 光暗周期为 14 h/10 h, 25℃ ± 2℃, 光照强度为 115 μmol·(m²·s)⁻¹, 相对湿度 70%。

1.2 铜的短期吸收动力学研究

植物驯化 7 d 后, 挑选生长一致的、健康的顶枝进行吸收动力学试验。试验前用双蒸水清洗植物并拭干。称取 0.3 g 植物放入一系列盛有 50 mL Cu 溶液 (CuCl₂) 的具塞三角瓶中, 浓度分别为 0、5、20、40、80、160、320、460 和 640 μmol·L⁻¹。每个处理 3 个重复。所有的待测液中均含有 5.0 mmol·L⁻¹ 的 MES (2-N-吗啉代乙磺酸) 和 0.5 mmol·L⁻¹ CaCl₂ 以保持体系的 pH 值 (6.0) 和离子强度。三角瓶置于 60 r·min⁻¹ 的摇床上振荡 20 min, 温度 25℃。将植物取出后, 于 EDTA 混合溶液 (5 mmol·L⁻¹ EDTA + 5 mmol·L⁻¹ MES, pH 6.0) 中浸提 5 min 去除吸附在植物表面的 Cu, 之后用去离子水冲洗 3 次并拭干, 于 70℃ 烘箱烘干至恒重, 消煮测定植物体内 Cu 含量。通常米氏方程 (Michaelis-Menten Equation) 用作表征酶促反应动力学, 在此通过拟合米氏方程表示植物对金属的吸收动力学特征:

$$V = \frac{V_{\max} c}{K_m + c} \quad (1)$$

式中, V 为吸收速率 (以 DW 计, 下同), μmol·(g·min)⁻¹; $V_{\max}$ 为最大吸收速率, μmol·(g·min)⁻¹; K_m 为吸收速率达到 1/2 $V_{\max}$ 的浓度, μmol·L⁻¹, 反映质膜与金属物质结合的紧密程度; c 为溶液浓度, μmol·L⁻¹。

1.3 各亚细胞组分对 Cu 的吸收动力学研究

为了探讨两种沉水植物对 Cu 的吸收和富集过程, 于不同时间处理下, 测定茎、叶内各亚细胞组分的 Cu 含量。将挑选好的生长一致的植物顶枝 (每盆 6 株), 置于 200 mL 的 2 μmol·L⁻¹ Cu 溶液中 (毒理试验研究表明, 在保证两种沉水植物正常生长前提下, 在此 Cu 溶液浓度下对 Cu 的富集能力最强), 分别处理 0、2、5、12、24 和 96 h。每个处理 3 个重复。取样后将植物用去离子水冲洗干净并拭干, 分为茎、叶两部分, 于液氮中保存, 进行亚细胞分离测定。

1.4 植物亚细胞分离提取

采用差速离心法分离不同的亚细胞组分。在经典方法基础上加以改进: 称取植物鲜样 0.5 g, 加入预先冷藏的提取液 [500 mmol·L⁻¹ 蔗糖 + 50 mmol·L⁻¹ Hepes 磷酸缓冲液 (pH 7.5) + 1 mmol·L⁻¹ 二硫赤鲜糖醇 (DTT) + 5.0 mmol·L⁻¹ 抗坏血酸 + 质量浓度 10 g·L⁻¹ 交联聚酰胺 (PVPP)], 研磨匀浆。第一步: 匀浆液经过 100 μm 孔径的尼龙网过滤, 并用提取液冲洗, 保证最终加入的提取液共计 8 mL; 第二步: 将上清液在冷冻离心机 500 r·min⁻¹ (Hettich Universal 320R, Sigma, 美国) 下离心 15 min, 得到的沉淀加上第一步过滤的沉淀为细胞壁组分; 第三步: 上一步得到的上清液在 10 000 r·min⁻¹ 下高速离心 30 min (Hitachi CR22G II, 日本), 得到的沉淀为细胞器组分, 上清液为可溶部分。全部操作在 4℃ 下进行。细胞壁和细胞器组分别于 70℃ 烘干消煮测定 Cu 含量; 可溶部分加入 40 μL 优级纯浓硝酸于 4℃ 保存待测溶液中 Cu 浓度。

1.5 铜的释放研究

将挑选好的轮叶黑藻和穗花狐尾藻 (0.7 g 左右) 分别置于 2 μmol·L⁻¹ Cu 溶液中培养 24 h, 之后洗去吸附在植物表面的 Cu, 去离子水洗净拭干, 置于 50 mL 超纯水中, 分别于 0、20 min、2 h、12 h 和 24 h 取样, 测定溶液中的 Cu 浓度。

此外还以轮叶黑藻为例, 研究了代谢抑制剂间

氯苯胍羰基氢化物 (CCCP) 和 2,4-二硝基苯酚 (DNP) 以及 P-型 ATP 酶抑制剂钒酸钠对 Cu 释放的影响. 如上所述将处理好的植物置于 50 mL 不同处理的溶液中. 处理包括: 对照 (超纯水), + 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CCCP, + 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 钒酸钠 (Vanadate), + 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ DNP. 每个处理重复 3 次. 处理 2 h 后测定溶液中 Cu 浓度.

1.6 样品消煮和分析

将烘干的植物样品剪碎称取 0.02 g, 置于 50 mL 聚丙烯酰胺管中, 加入 5 mL 优级纯浓硝酸过夜, 于 CEM 微波消解炉进行微波消煮 (MARS; CEM Microwave Technology Ltd, U. S.). 消煮过程中温度缓慢上升, 第一阶段 55℃ 加热 10 min, 第二阶段 75℃ 加热 10 min, 第三阶段 95℃ 加热 30 min 至酸解液澄清透明, 植物样完全分解. 同时加入试剂空白和标准物质 (灌木枝叶, GBW07602, 国家标准物质研究中心) 作为消煮过程和测定分析的质量控制. 待消煮液冷却后用超纯水 (18.2 M Ω) 定容至 25 mL, 过滤. 采用原子吸收光谱仪 (AASM6, Thermo Elemental, 美国) 测定消煮液中的 Cu 浓度. 试验测得标准物质 (灌木枝叶, GBW07602) 的平均 Cu 浓度 (以 DW 计, 下同) 为 $(5.2 \pm 0.5) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 该值在标准物质的参考阈值范围内 $[(4.9 \pm 0.3) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$, 说明该消解方法可靠.

1.7 数据分析

试验数据采用 SPSS 13.0 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 用最小显著差数法 (LSD 法) 进行数据的多重比较. 采用 SigmaPlot 10.0 软件作图.

2 结果与分析

2.1 铜的短期吸收动力学特征

铜的短期动力学试验中, 较低浓度 Cu 处理时 ($0 \sim 160 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), 随着外界 Cu 浓度的增加, 轮叶黑藻和穗花狐尾藻对 Cu 的吸收速率均呈线性增加 (图 1). 穗花狐尾藻对 Cu 的吸收直线斜率约为黑藻的 2 倍 (表 1).

较高浓度 Cu 处理时 ($0 \sim 640 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), 随着外界 Cu 浓度的增加, 轮叶黑藻和穗花狐尾藻对 Cu 的吸收速率均呈曲线增加, 并且其吸收动力学曲线可以很好地拟合米氏方程, 相关系数 R^2 分别可达 0.978 和 0.980 (表 1). 两种植物的最大吸收速率差异不显著 ($P > 0.05$), 但是轮叶黑藻的米氏常数 K_m 约为穗花狐尾藻的 2 倍.

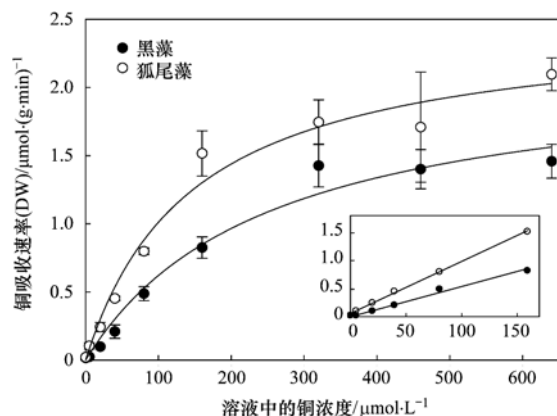


图 1 轮叶黑藻和穗花狐尾藻对 Cu 的短期吸收动力学特征 (mean $\pm$ S. E., $n = 3$)

Fig. 1 Uptake kinetics of Cu by *H. verticillata* and *M. spicatum*

表 1 轮叶黑藻和穗花狐尾藻吸收 Cu 的动力学参数¹⁾

Table 1 Kinetic parameters for Cu influx into *H. verticillata* and *M. spicatum*

沉水植物	线性方程			米氏方程		
	<i>A</i> (斜率)	<i>b</i> (截距)	R^2	$V_{\max}$ $/\mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$	K_m $/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	R^2
轮叶黑藻	0.005	0.010	0.999	2.17 ± 0.25	250 ± 67.2	0.978
穗花狐尾藻	0.009	0.054	0.991	2.49 ± 0.19	146 ± 31.8	0.980

1) 较低浓度 Cu 处理时 ($0 \sim 160 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), 吸收曲线用线性回归方程拟合; 较高浓度 Cu 处理时 ($0 \sim 640 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), 吸收曲线用米氏方程拟合

2.2 各亚细胞组分对铜的吸收动力学特征

植物体中各亚细胞组分的 Cu 含量用鲜重 (FW) 计算 (图 2). 96 h 处理内, 轮叶黑藻叶片中富集的 Cu 主要分布在细胞壁 (79% ~ 85%), 其次是可溶部分 (12% ~ 17%) 和细胞器 (3% ~ 8%); 暴露于 $2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu 溶液 2 h 后, 叶片各组分 Cu 含量均迅速

增加, 约为对照的 2 倍; 之后随处理时间的增加各组分 Cu 含量缓慢增加并约在 12 h 后达到平衡, 但是细胞壁组分增加的 Cu 含量显著高于细胞内组分; 96 h 处理各组分 Cu 含量略降低 [图 2(a)]. 轮叶黑藻茎中富集的 Cu 总含量 (各亚细胞组分 Cu 含量之和) 显著低于叶片 ($P < 0.05$), 各亚细胞组分 Cu 的分布顺

序为:细胞壁(35% ~46%) = 可溶部分(35% ~51%) > 细胞器(8% ~23%); 随处理时间的增加,各亚细胞组分 Cu 含量均逐渐增加,约在 12 h 达到平衡,96 h 处理略有降低[图 2(c)].

96 h 处理内,穗花狐尾藻叶片中富集的 Cu 同样主要分布在细胞壁(60% ~64%),但是其对 Cu 的富集量显著低于黑藻($P < 0.05$),其次分布在可溶部分(17% ~24%)和细胞器(5% ~8%),两种植物细胞内组分 Cu 富集含量差异不显著($P > 0.05$);

各亚细胞组分 Cu 含量随时间呈现出与轮叶黑藻相似的变化趋势,2 h 后各组分含量迅速增加为对照的 2 ~3 倍,之后缓慢增加并于 12 h 达到平衡并保持稳定[图 2(b)]. 穗花狐尾藻茎中富集的总 Cu 含量同样显著低于叶片,且低于轮叶黑藻对 Cu 的富集量;各亚细胞组分 Cu 分布顺序为:细胞壁(35% ~50%) = 可溶部分(20% ~51%) > 细胞器(6% ~18%);茎中各亚细胞组分 Cu 含量随时间的变化规律与叶片相同[图 2(d)].

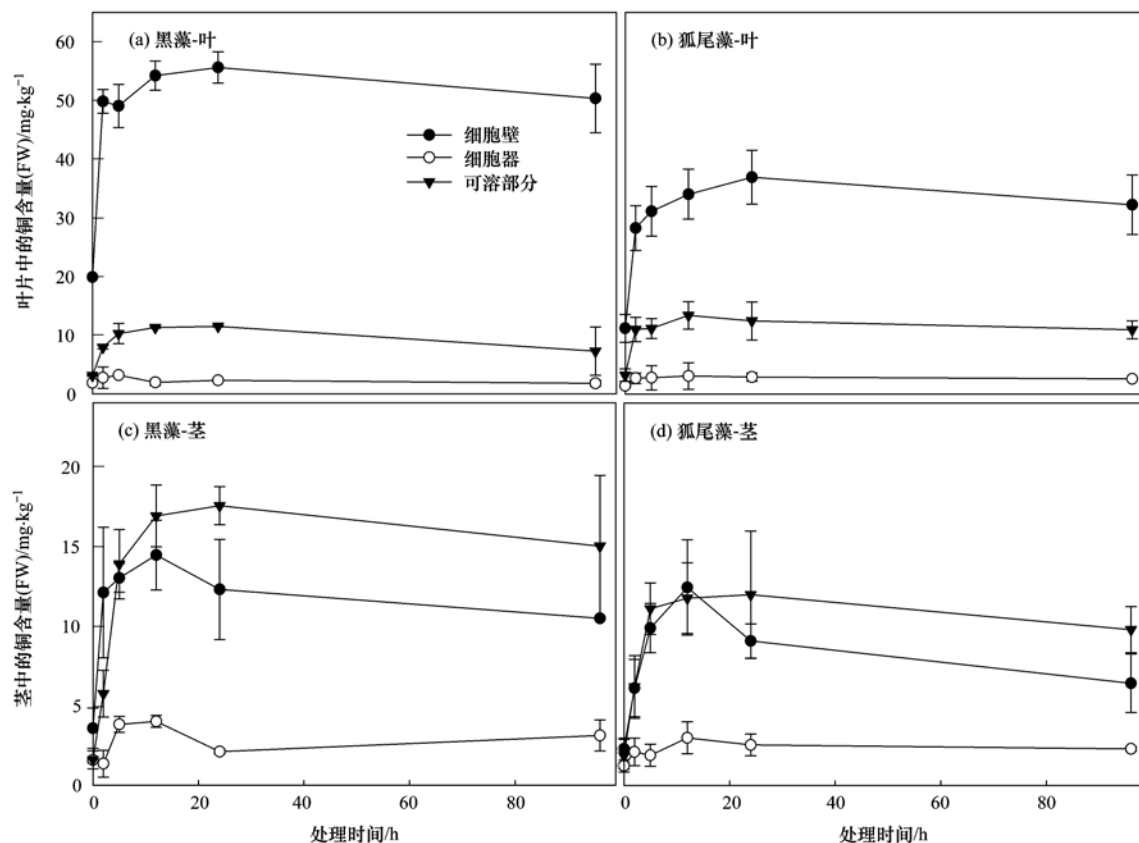


图 2 $2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu 处理 96 h 内两种植物叶片和茎中 Cu 亚细胞分布 (mean $\pm$ S. D., $n = 3$)

Fig. 2 Subcellular distributions of Cu by leaves and stems of *H. verticillata* and *M. spicatum* exposed to $2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu for different times up to 96 h

2.3 沉水植物对铜的释放能力

轮叶黑藻和穗花狐尾藻在 $2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu 溶液中暴露 24 h 后,置于不含 Cu 的溶液中进行 Cu 释放研究. 结果如图 3 所示,随时间延长,两种植物释放到溶液中的 Cu 含量均呈曲线增加. 其中轮叶黑藻 Cu 释放能力显著高于穗花狐尾藻($P < 0.05$),20 min 后轮叶黑藻释放到溶液中 Cu 含量达到 $0.4 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,是穗花狐尾藻释放量的近 10 倍;24 h 后轮叶黑藻和穗花狐尾藻释放的 Cu 含量达到最大值,分别为 $0.9 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. 但是两种植物对 Cu 的释放量仅约为 Cu 的富集量的 1/16

(数据未列出).

轮叶黑藻于 $2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu 溶液中处理 24 h 后,置于不含 Cu 的不同处理溶液中,用植物鲜重计算植物向外释放的 Cu 含量(以 FW 计, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) (图 4). 与对照相比,CCCP 处理 Cu 的释放量增加了 40%,而 DNP 显著抑制了 Cu 的释放($P < 0.05$),降低了 30%,钒酸钠(vanadate)不影响轮叶黑藻对 Cu 的释放.

3 讨论

短期吸收动力学研究表明,较低浓度 Cu 处理

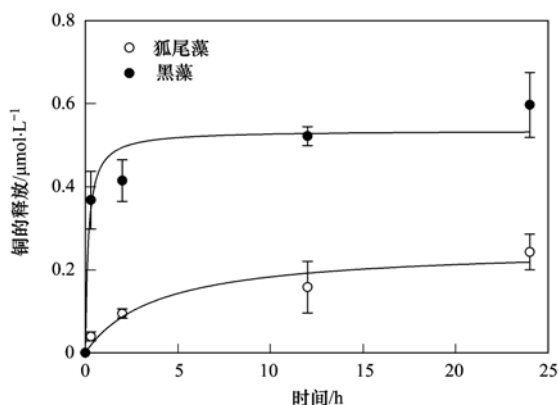
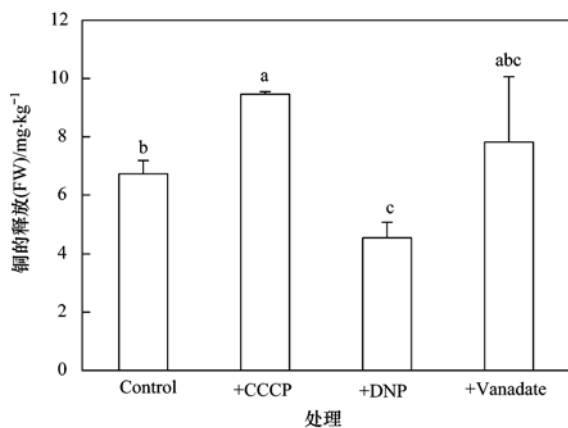


图3 轮叶黑藻和穗花狐尾藻在24 h内Cu的释放量

Fig. 3 Cumulative efflux of Cu by *H. verticillata* and *M. spicatum* during 24 h time course



不同字母表示处理间差异显著, $P < 0.05$; S. E. ($n = 3$)

图4 不同抑制剂对黑藻Cu释放的影响

Fig. 4 Effects of CCCP, DNP and sodium vanadate on the efflux of Cu

时($0 \sim 160 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),两种植物可以迅速吸收外界的Cu,吸收速率呈线性增加,说明Cu可能是以被动扩散方式进入植物体内的^[18]。早期有研究发现在厌氧条件和代谢抑制剂存在时,植物对Cu的吸收不受影响,表明Cu吸收不受代谢调节^[19];而较高浓度Cu处理时,两种植物对Cu的吸收动力学曲线符合米氏方程(表1),可见Cu的吸收并非完全是被动扩散过程,而是同时以主动和被动方式进入轮叶黑藻和穗花狐尾藻细胞内的。并且各亚细胞组分吸收动力学试验表明,两种植物叶片和茎中的Cu含量均在约12 h后达到平衡(图2),说明Cu由溶液进入植物细胞壁再进入细胞内部是一个快速的过程。尽管两种植物的最大吸收速率差异不显著,但在 $2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu溶液中暴露不同时间后,轮叶黑藻叶片和茎中Cu富集含量均显著高于穗花狐尾藻(图2),这与颜昌宙等^[15]的研究结果一致,可见植

物对Cu的富集能力不仅与吸收速率有关,还受体内富集和代谢的影响。

各亚细胞组分对Cu的吸收动力学研究表明,轮叶黑藻叶片各亚细胞组分中只有细胞壁的Cu含量显著高于狐尾藻,这可能与两种植物的化学组成有关。轮叶黑藻体内的粗纤维素占干物质的比重是穗花狐尾藻的2倍多,因此细胞壁表面可以提供更多的Cu吸附位点,导致富集量较高^[15]。而且随时间增加,两种植物叶片中增加的Cu含量均主要富集在细胞壁(图2),可见将Cu富集在细胞壁是这两种沉水植物对Cu的主要抗性机制之一,这与Fritioff等^[20]对眼子菜富集Cu的研究结果一致。并且两种植物叶片对Cu的富集能力均高于茎,这与其他人对沉水植物的研究结果一致^[20,21]。首先是由于叶片与溶液的接触面积高于茎,其次可能是叶片表面可以提供更多的阳离子吸附位点。Fritioff等^[20]对眼子菜的研究表明,叶片的有机质含量高于茎,有机质组分包含大量细胞壁胶质,其中含有很多带负电荷的聚半乳糖醛酸,可以提供大量的阳离子结合位点。

Cu的释放试验结果表明,两种植物均可将体内富集的Cu释放到外界环境中,且释放到水体的Cu含量随时间增加呈曲线增加(图3),同时代谢抑制剂DNP的加入抑制了对Cu的释放(图4),说明这是一个依靠能量的主动过程,但是钒酸钠不影响Cu的释放,说明这不依靠P型ATP酶的作用,因此水稻体内鉴定到的负责向外运输Cu的P型-ATP酶家族基因OsHMA9^[22]不是轮叶黑藻体内负责向外释放Cu的作用基因。CCCP促进Cu的释放,可能是因为CCCP作为一种解耦联剂,会引起质膜的去极化,从而增加Cu离子释放^[23]。主动释放体内富集的重金属是细菌主要的抗性机制,参与的转运子包括P-型ATP酶或者阳离子/ H^+ 反向运载器等^[24]。虽然还不清楚哪些转运蛋白参与Cu离子的释放过程,但是至少证明这两种沉水植物具有主动释放Cu的能力。而且轮叶黑藻释放Cu的能力较强,同时短期动力学结果也表明,轮叶黑藻的米氏常数 K_m 高于穗花狐尾藻(表1),说明轮叶黑藻细胞质膜对Cu的结合能力较弱。但是它们对Cu的释放能力均远低于Cu的富集能力,不影响对Cu的修复作用。

两种沉水植物相比,相对于穗花狐尾藻,轮叶黑藻属于“抵抗植物”,通过将Cu富集在细胞壁而阻止向细胞内运输,此外还可以通过释放体内富集的Cu来降低毒害作用,这也是Cu抗性植物(如白玉草,*Silene vulgaris*)的主要抗性机制^[25];而穗花狐尾

藻细胞内组分 Cu 富集量与轮叶黑藻相同, 且具有较低的 Cu 释放能力, 因此它可能具有较强的体内抗氧化能力. 颜昌宙等^[15]对比分析了轮叶黑藻和穗花狐尾藻体内叶绿素、SOD 等抗氧化酶类含量在不同浓度 Cu 暴露下的变化, 结果表明穗花狐尾藻具有较强的内部抗氧化能力, 与本试验结论相符.

总之, 这两种沉水植物对 Cu 均具有较强的吸收和富集能力, 并且两种沉水植物均具有较大的生物量以及较强的繁殖能力, 尽管可以向体外释放 Cu, 但释放能力远小于吸收能力, 因此具有应用于修复 Cu 污染水体的潜力.

4 结论

(1) 轮叶黑藻和穗花狐尾藻均具有快速的 Cu 吸收能力. 在 $2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu 溶液中暴露不同时间 (0 ~ 96 h) 后, 两种沉水植物叶片和茎中各亚细胞组分中的 Cu 含量均迅速增加, 并约在 12 h 后达到平衡. 随处理时间增加, 两种植物叶片中增加的 Cu 含量均主要分布在细胞壁 (占各亚细胞总量的 > 60%); 茎对 Cu 的富集能力均低于叶片, 各亚细胞 Cu 的分布顺序为: 细胞壁 = 可溶部分 > 细胞器.

(2) 两种沉水植物相比, 轮叶黑藻叶片和茎富集的 Cu 含量均显著高于穗花狐尾藻, 并且叶片细胞壁富集的 Cu 含量显著高于穗花狐尾藻, 而细胞内部富集的 Cu 含量差异不显著; 轮叶黑藻体内释放 Cu 的能力也高于狐尾藻, 并且是主动释放 Cu 的过程.

参考文献:

- [1] Brown B T, Rattigan B M. Toxicity of soluble copper and other metal ions to *Elodea canadensis* [J]. *Environmental Pollution*, 1979, **20**(4): 303-314.
- [2] 王敏, 唐景春, 王斐. 常见水生植物对富营养化和重金属复合污染水体的修复效果研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, **24**(2): 50-56.
- [3] 陆东芳, 陈孝云. 水生植物原位修复水体污染应用研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2011, **11**(21): 5137-5142.
- [4] 王谦, 成水平. 大型水生植物修复重金属污染水体研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(5): 96-102.
- [5] 代军, 陶春元, 孙剑奇. 鄱阳湖水生植物对重金属铜、铅、锌的富集作用研究[J]. *九江学院学报(自然科学版)*, 2010, **5**(4): 5-8.
- [6] 潘义宏, 王宏斌, 谷兆萍, 等. 大型水生植物对重金属的富集与转移[J]. *生态学报*, 2010, **30**(23): 6430-6441.
- [7] Mohammad A R, Hiroshi H. Aquatic arsenic: Phytoremediation using floating macrophytes [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(5): 633-646.
- [8] Cardwell A J, Hawker D W, Greenway M. Metal accumulation in aquatic macrophytes from southeast Queensland, Australia [J]. *Chemosphere*, 2002, **48**(7): 653-663.
- [9] Lesage E, Mundia C, Rousseau D P L, et al. Removal of heavy metals from industrial effluents by the submerged aquatic plant *Myriophyllum spicatum* L [A]. In: *Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands* [M]. Netherlands: Springer, 2008. 211-221.
- [10] 苏胜齐, 姚维志. 沉水植物与环境关系评述[J]. *农业环境保护*, 2002, **21**(6): 570-573.
- [11] Xue P Y, Li G X, Liu W J, et al. Copper uptake and translocation in a submerged aquatic plant *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle [J]. *Chemosphere*, 2010, **81**(9): 1098-1103.
- [12] Xue P Y, Yan C Z. Arsenic accumulation and translocation in the submerged macrophyte *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(7): 1176-1181.
- [13] Srivastava S, Mishra S, Tripathi R D, et al. Phytochelatins and antioxidant systems respond differentially during arsenite and arsenate stress in *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(8): 2930-2936.
- [14] Srivastava S, Mishra S, Dwivedi S, et al. Role of thiol metabolism in arsenic detoxification in *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2010, **212**(1-4): 155-165.
- [15] 颜昌宙, 曾阿妍, 金相灿, 等. 沉水植物轮叶黑藻和穗花狐尾藻对 Cu^{2+} 的等温吸附特征[J]. *环境科学*, 2006, **27**(6): 1068-1072.
- [16] Stauber J L, Florence T M. The effect of culture medium on metal toxicity to the marine diatom *Nitzschia closterium* and the freshwater green alga *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Water Research*, 1989, **23**(7): 907-911.
- [17] Schneider I A H, Rubio J. Sorption of heavy metal ions by the nonliving biomass of freshwater macrophytes [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(13): 2213-2217.
- [18] Sharples J M, Meharg A A, Chambers S M, et al. Mechanism of arsenate resistance in the ericoid mycorrhizal fungus *Hymenoscyphus ericae* [J]. *Plant Physiology*, 2000, **124**(3): 1327-1334.
- [19] 田生科, 李廷轩, 杨肖娥, 等. 植物对铜的吸收运输及毒害机理研究进展[J]. *土壤通报*, 2006, **37**(2): 387-394.
- [20] Fritioff A, Greger M. Uptake and distribution of Zn, Cu, Cd, and Pb in an aquatic plant *Potamogeton natans* [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(2): 220-227.
- [21] Duman F, Obali O, Demirezen D. Seasonal changes of metal accumulation and distribution in shining pondweed (*Potamogeton lucens*) [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(11): 2145-2151.
- [22] Lee S, Kim Y Y, Lee Y, et al. Rice $\text{P}_{1\text{B}}$ -type heavy-metal ATPase, OsHMA9, is a metal efflux protein [J]. *Plant Physiology*, 2007, **145**(3): 831-842.
- [23] Ali W, Isayenkov S V, Zhao F J, et al. Arsenite transport in plants [J]. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2009, **66**(14): 2329-2339.
- [24] Hall J L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, **53**(366): 1-11.
- [25] Song J, Zhao F J, Luo Y M, et al. Copper uptake by *Elsholtzia splendens* and *Silene vulgaris* and assessment of copper phytoavailability in contaminated soils [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **128**(3): 307-315.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人