

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

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

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)

乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)

典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)

某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)

基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)

珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 孙成玲,谢绍东 (1250)

低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)

太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)

一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)

外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范娟,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)

基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 孙法圣,程品,张博 (1285)

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)

重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 根系对沉积物中各形态磷的影响 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)

循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)

不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)

再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)

二级处理出水的 UV-TiO₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜 (1332)

水中 C₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)

XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)

纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 付融冰 (1351)

共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)

硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)

基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)

模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)

电活性生物膜介导 Cu²⁺ 生物还原的试验研究 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)

模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)

填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)

化学合成施氏矿物与 H₂O₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)

处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)

剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 董慧岭,季民 (1421)

锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)

1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)

碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 徐冰洁,高品,薛昱,何梦琦,吴凡 (1443)

利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)

毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)

缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)

微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 王妮敏,邓琦,邹华,梁婵娟 (1468)

东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 张巍巍,王光华,王美玉,刘晚冰,冯兆忠 (1473)

生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)

老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)

土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)

藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)

三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)

浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)

生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)

上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)

SDBS/Na⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)

稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)

藻类水体 Cd²⁺ 毒性快速监测新方法研究 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)

用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)

Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO₃⁻ 吸附性能的研究 钟琼,李欢 (1566)

污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)

城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)

水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)

六价铬细菌还原的分子机制研究进展 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)

农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)

《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法

王燕^{1,2}, 朱春刚³, 许笛¹, 丁士明^{1*}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 东南大学土木工程学院, 南京 210096)

摘要: 利用 384 微孔板微量比色分析方法, 建立了一种大批量分析微量溶液样品中溶解态反应磷(DRP)和溶解态铁(II)含量的方法, 确定了方法的最佳参数和条件. 利用 Epoch 微孔板分光光度计, 对溶液中磷和铁分别采用磷钼蓝和邻菲罗啉比色法进行分析, 所需溶液样品体积(稀释后)为 20 ~ 50 μL , 磷和铁的检出限分别为 0.006 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.010 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 精密密度控制在 5% 以内. 在此基础上, 采用高分辨间隙水扩散平衡装置(HR-Peeper, 垂向分辨率 2 mm)获取了太湖沉积物间隙水样品, 利用本方法同步分析了微量间隙水样品中 DRP 和溶解态铁(II)的含量, 发现两者含量同步升高的现象.

关键词: 微量比色; 高分辨; 批量; 溶解态磷(DRP); 溶解态铁(II); 沉积物

中图分类号: X830.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1271-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.009

Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes

WANG Yan^{1,2}, ZHU Chun-gang³, XU Di¹, DING Shi-ming¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; ; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A method was established to measure the concentrations of dissolved reactive phosphate (DRP) and dissolved ferrous iron (Fe) in micro-volume solution samples through colorimetric determination in large batch using a 384-well Microplate Spectrophotometer. Concentrations of DRP and dissolved Fe were determined by the molybdenum blue and phenanthroline colorimetric methods, respectively. The results showed that the sample consumption used for each parameter was between 20 and 50 μL after dilution, and the detection limits for DRP and dissolved Fe were 0.006 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 0.010 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively, while the analytical precision varied between 1% and 5%. The established method was applied to measure DRP and dissolved Fe in pore waters of sediment profiles in Lake Taihu, which were collected by a high-resolution Peeper (HR-Peeper) device with a vertical resolution of 2 mm. The results showed a simultaneous increase of DRP and dissolved Fe in their concentrations with the depth of two sediment profiles investigated.

Key words: microplate spectrophotometer; high resolution; batch analysis; dissolved reactive phosphorus (DRP); dissolved ferrous Fe; sediment

沉积物向水体释放污染物, 是造成水体污染的主要途径之一. 大量污染物自流域进入集水区后, 大部分将蓄积于沉积物中, 并在一定的条件下释放进入水体, 造成水体的内源性污染^[1,2]. 近年来, 随着外源污染治理力度的加大, 内源污染的强度呈现增加的趋势, 尤其是内源磷污染备受关注. 磷是湖泊富营养化的主要限制性因子, 对水体营养状态和生态系统结构发挥十分关键的调控作用^[2~4]. 已有研究发现, 很多浅水富营养化湖泊都会发生高强度的内源磷污染, 造成水体富营养化治理效果出现滞后的现象^[5,6]. 目前, 普遍认为沉积物铁是控制内源磷释放的关键因子之一, 在缺氧或厌氧条件下, 氧化铁被

还原, 造成铁结合态磷向沉积物间隙水中释放和向上迁移, 从而形成内源磷污染^[7~10]. 围绕沉积物磷铁响应关系开展工作, 对于阐明内源磷污染发生过程与形成机制将发挥重要的作用.

准确获取间隙水中溶解态磷和铁的含量分布信息, 可为评价内源磷污染水平和研究污染发生机制提供重要信息. 对间隙水样品的获取一般采用主动

收稿日期: 2013-08-26; 修订日期: 2013-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177134, 41001334); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2011165)

作者简介: 王燕(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊界面化学, E-mail: yuyan19881116@163.com

* 通讯联系人, E-mail: smding@niglas.ac.cn

破坏式的方法,即收集沉积物后,通过离心或压榨获取间隙水样品^[11,12].由于厌氧沉积物暴露空气后极易被氧化,该方式难以准确真实获取间隙水磷铁的含量信息,因此发展原位采样技术十分必要.已有原位采样技术包括间隙水扩散平衡技术(Peeper)^[13,14]、薄膜扩散平衡技术(DET)^[15~17]、根际溶液采样技术(Rhizon)^[18]等.最近发展的高分辨 Peeper(HR-Peeper),在沉积物中仅需要平衡 1~2 d,间隙水垂向空间分辨率达到 2 mm^[19],满足了高时空分辨信息的获取要求.通过 HR-Peeper 获得的间隙水样品数量多,且每个间隙水样品的体积仅有 15 μL ,远远低于磷铁常规比色分析所需要的体积(1 mL 左右),给间隙水样品的分析带来较大的挑战.

微量比色技术(通常配合使用 96 微孔板与 384 微孔板)多用于生物细胞和蛋白质的测定,有关磷的测定国外学者已有研究,Telli 等^[28]用 96 孔微量比色法研究了植物根系钙结合态磷的细胞毒性,Angelo 等^[29]基于 96 微量比色技术快速、微量测定了水体和土壤中磷含量.384 微孔板相比于 96 孔具有体积更加微量的特点,Onoue 等^[30,31]使用 384 微孔板作为测定手段进行药物风险的评估与生物光化学研究.目前 384 微量技术的应用大多在生物、医药方面,对于化学元素的测定应用不多.本研究利用 384 微孔板微量比色技术,发展了一种大批量分析微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法,并考

表 1 3 种磷钼蓝比色法的显色剂配方

Table 1 Compositions of three coloring reagents for the molybdenum blue method

显色剂	显色剂配方	文献
显色剂 I	抗坏血酸固体溶解于钼酸盐储备液 1, 比例为 1.5 g: 100 mL	[22]
显色剂 II	10% 抗坏血酸溶液与钼酸盐储备液 2, 按体积比 1:2 混合后加入样品	[20,21]
显色剂 III	10% 抗坏血酸溶液与钼酸盐储备液 2, 按体积比 1:1 先后加入样品	根据显色剂 I 与 II 调整酸度与配比

1.4 磷钼蓝微量比色法参数优化

显色剂、显色温度和时间、显色体积、显色方式是影响微量比色的主要参数,将其逐一进行优化.①在选择显色剂时,首先在 700 nm 波长处测定微孔板空白值,测定后的微孔板加不同浓度磷溶液,每个浓度各做 6 组平行,然后按样品与显色剂体积比 10:1 分别加入 3 种显色剂,在其他条件完全一致条件下振荡显色,显色完毕后再测定其吸光值,样品测定值减去空白值即为样品的真实吸光度,通过分析 3 种显色剂的方法参数,对比选出最适合的显色剂.②在优化显色温度、时间和体积时,使用同一浓度的磷溶液分别设置 7 个体积梯度,7 个显色时间

梯度,分别加入已确定的显色剂进行显色,显色过程中保证其他参数条件一致,显色完毕测定吸光值,判断最佳显色时间、温度与体积.③在确定上述参数后考虑显色方式对磷钼蓝微量比色的影响,将显色后的溶液离心并振荡显色,同时分别做不离心与不振荡的对比实验,通过方法参数的对比,判断离心与振荡对微量比色的影响.

1 材料与方法

1.1 微量比色方法

DRP 的测定采用磷钼蓝比色法^[19,22],即在酸性条件下,正磷酸盐与钼酸铵、酒石酸锑氧钾反应,生成磷钼杂多酸,被抗坏血酸还原后变成蓝色络合物即磷钼蓝,在波长 700 nm 处测定其吸光值.溶解态铁(Fe^{2+})测定采用邻菲罗啉比色法^[19,22],即亚铁离子在 pH 3~9 时与邻菲罗啉生成稳定的橙红色络合物,在波长 520 nm 处测定其吸光值.

1.2 主要仪器

Epoch 微孔板分光光度计(BioTek, USA)、384 微孔板(24 × 16, 上海精睿生物科技有限公司)、QB-9006 恒温微孔板快速振荡器、H-2050R 高速冷冻离心机(湘仪离心机仪器有限公司).

1.3 主要试剂

磷酸盐与硫酸亚铁的标准使用液、0.5% 邻菲罗啉显色剂与 1% 盐酸羟胺还原剂、利用钼酸盐储备液 1^[22]与钼酸盐储备液 2^[20,21]配置的 3 种磷钼蓝比色法的显色剂(表 1).

梯度和 3 个显色温度梯度,分别加入已确定的显色剂进行显色,显色过程中保证其他参数条件一致,显色完毕测定吸光值,判断最佳显色时间、温度与体积.③在确定上述参数后考虑显色方式对磷钼蓝微量比色的影响,将显色后的溶液离心并振荡显色,同时分别做不离心与不振荡的对比实验,通过方法参数的对比,判断离心与振荡对微量比色的影响.

1.5 邻菲罗啉微量比色法参数优化

邻菲罗啉微量比色法的操作参照常规方法^[22].显色剂为 0.5% 邻菲罗啉,还原剂为 1% 盐酸羟胺,显色完毕后在 520 nm 波长处测定吸光值.显色温度和时间是影响微量显色的主要参数,设置 8 个显色时间

梯度与 4 个显色温度梯度,分别作标准曲线,通过吸光值的变化与线性水平确定最佳显色时间和温度.在最佳温度和时间下采取离心与振荡的方式显色,并不离心和不振荡条件下作对比,通过各方法参数的比较判断显色方式对邻菲罗啉微量比色的影响.

1.6 现场采样

选取太湖北部的梅梁湾作为研究区域布设采样点(选取两个沉积物剖面).现场利用投放器将已充氮去氧的 HR-Peeper 装置垂直且缓慢插入沉积物中,上覆水保留 2~4 cm(装置长 18 cm).待装置平衡 2 d 后取出,迅速用半湿的滤纸将表面的沉积物擦除,将装置装入自封袋中,用与装置暴露窗口面积相同的不锈钢片压住窗口表面,并用夹子固定,通过喷干冰冷冻剂将装置小室内的间隙水样品冷冻,随后装入车载冰箱带回实验室^[19].

将现场冷冻的 HR-peeper 装置从冰箱拿出,去除自封袋,用塑料膜盖住暴露窗口,并用小玻璃块压住塑料膜,防止样品氧化^[19].待小室内间隙水解冻后,依次取下玻璃块,并用移液枪刺穿塑料膜,分别两次吸取每个小室的溶液 6 μL 至 384 微孔板中,用去离子水稀释至 30 μL 测定 DRP,用 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 稀释至 15 μL 测定溶解态 Fe^{2+} .按照已优化的参数方法进行操作,显色后用 Epoch 微孔板分光光度计测定 DRP 和 Fe^{2+} 的浓度.

1.7 数据处理

使用线性范围、检出限、最低检测限、精密度和灵敏度分析各参数优化后的结果.线性范围是通过测定时标准液的最低和最高浓度来确定^[23];检

出限为 3 倍空白水样的标准偏差^[23,24];最低检测限为检出限的两倍^[23];精密度用相对标准偏差 RSD 表示^[23];灵敏度用校准曲线的斜率表示^[23].

2 分析与讨论

2.1 DRP 测定参数优化

2.1.1 显色剂选择与显色时间

微量比色的反应室体积小,对显色剂的要求较严格.采用不同显色剂配方在同一条件下显色,结果存在差异.表 2 为 3 种显色剂的方法参数对比,可以看出,显色剂 III 的检出限与最低检出限明显低于另外两者,精密度与灵敏度也略优.显色剂 I 的浓硫酸含量为 19.46% (体积分数),显色剂 II 和 III 的浓硫酸含量为 30% (体积分数),后者酸度较大.显色剂 III 与 II 比较,还原剂的量增加.因此,显色剂 III 主要通过增加显色剂的酸度与还原剂的量来提高测定的精密度,同时降低检出限.

传统磷钼蓝分光光度计法 30 min 即可显色完全,显色物质在 120 min 之内保持稳定^[17~20].从图 1 可看出,同一溶液显色,显色剂 I 与 II 的吸光值随着显色时间的增加呈逐渐上升的趋势,这是由于反应在微量体积内进行,显色难以达到完全,线性 R^2 只达到 0.99;显色剂 III 在显色 90 min 后基本达到稳定,与 120 min 时的吸光值差异不明显,说明显色基本完全,且线性关系好, R^2 达到 0.999 9, RSD 控制在 5% 之内,精密度高.综合比较,选用优化后的显色剂 III 作为磷钼蓝微量比色的显色剂,显色 90 min,其测定结果相对精确.

表 2 磷钼蓝比色法使用 3 种显色剂的方法参数对比

Table 2 Analytical parameters of the three coloring reagents for determining the concentration of DRP

显色剂	线性范围 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	检出限 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	最低检测限 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	相对标准差 (RSD/%)	灵敏度
显色剂 I	0~0.6	0.009	0.018	2~6	0.220
显色剂 II	0~0.6	0.006	0.012	>5	0.200
显色剂 III	0~0.6	0.003	0.006	2~5	0.240

2.1.2 样品体积

微孔板分光光度计的光源从微孔板底部透射,加样量应满铺微孔底部,同时不能溢出微孔.实际操作时发现,溶液样品体积大于 6 μL 时才能使溶液铺满

微孔底部,当样品超过 50 μL ,操作时易使样品溢出.

表 3 为同一磷溶液样品在不同加样量梯度(6~50 μL)下显色的吸光值.当样品量为 6~15 μL 时,测定值小且误差大;当样品量为 20 μL 时,测定

表 3 磷钼蓝比色法不同样品体积显色的测定误差

Table 3 Analytical error of the molybdenum blue method using different sample volumes for coloration

项目	样品体积/ μL						
	6	10	15	20	30	40	50
平均吸光值	0.062 2	0.056 1	0.063 1	0.059 8	0.091 6	0.105 7	0.103 4
标准差(SD)	0.017 6	0.021 3	0.006 2	0.001 9	0.004 1	0.002 3	0.008 9
相对标准差(RSD)/%	28	38	10	3	4	2	8

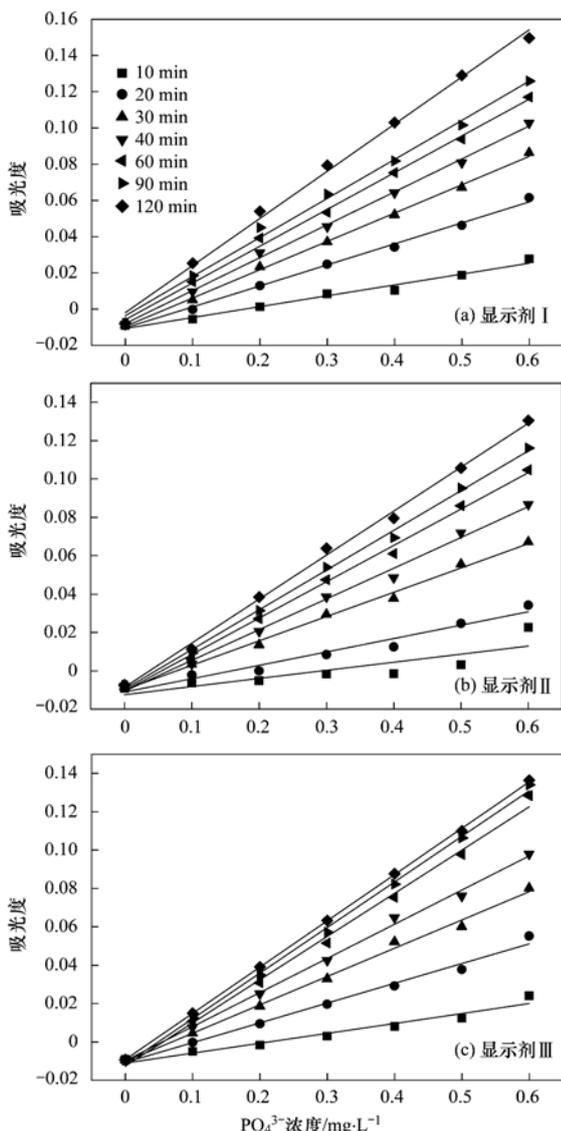


图 1 3 种磷钼蓝显色剂不同时间下显色的标准曲线
Fig. 1 Calibration curves of the molybdenum blue method using three coloring reagents with different reaction times

值仍然较小,但误差明显减小;当样品量在 30 ~ 40 μL 时,测定值明显升高,且相对标准偏差控制在 5% 之内.将加样量进一步升高至 50 μL 时,测定值基本不变,但误差增大.由此可见,加样量可确定为 30 ~ 40 μL .对于体积少的样品,可通过稀释,将其显色的体积提高至 30 ~ 40 μL .

2.1.3 显色温度

图 2 为不同温度条件下的标准曲线.可以看出,随着温度的升高,同一浓度溶液在相同显色时间下的吸光值越大.10 $^{\circ}\text{C}$ 和 25 $^{\circ}\text{C}$ 显色不完全,线性较差 (R^2 只能达到 0.99).35 $^{\circ}\text{C}$ 时显色完全,与 45 $^{\circ}\text{C}$ 的吸光值基本一致,且两者线性好 (R^2 达到 0.999).因此,可选定 35 ~ 45 $^{\circ}\text{C}$ 作为微量比色的适合温度,显色完全且线性稳定.

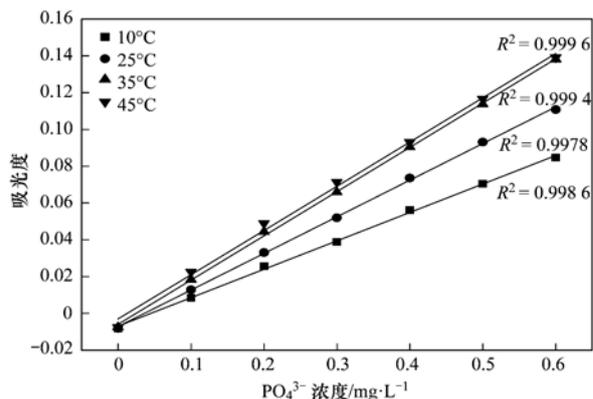


图 2 磷钼蓝比色法不同显色温度下的标准曲线
Fig. 2 Calibration curves for the molybdenum blue method at different temperatures

2.1.4 气泡消除与显色方式

离心可使微孔板里的溶液充分混合均匀,消除反应或操作过程中可能产生的气泡.从表 4 可看出,离心与不离心的检出限与灵敏度基本一致.这是由于磷钼蓝比色是在强酸性条件下进行,不易产生气泡,同时加样时避免了气泡引入.但进一步研究发现,碱性条件下发生的反应极易产生气泡,必须通过离心消除气泡的影响.

由于 384 微孔的体积小,溶液组分之间不易交换,在静置条件下显色,易造成显色不完全或不均匀.采用振荡的方式可能会加快反应速率,使反应快速达到完全.通过对比振荡与不振荡显色,发现振荡显色的检出限与精密度均优于不振荡,且灵敏度高(表 4).由此可见,磷钼蓝微量比色时需辅助振荡,保证溶液在微小体积内显色完全与均匀.

表 4 不同显色方式下磷钼蓝比色法的分析参数对比

Table 4 Comparison of the analytical parameters for the molybdenum blue method between different coloring ways

类型	显色方式	线性范围 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	检出限 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	最低检测限 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	相对标准差 (RSD)/%	灵敏度
气泡消除	离心	0 ~ 0.6	0.003	0.006	2 ~ 6	0.240
	不离心	0 ~ 0.6	0.003	0.006	2 ~ 5	0.230
显色方式	振荡	0 ~ 0.6	0.001	0.002	2 ~ 4	0.240
	静置	0 ~ 0.6	0.003	0.006	3 ~ 8	0.140

2.2 溶解态铁(II)测定参数优化

与磷钼蓝显色反应不同,溶解态铁(II)与邻菲罗啉反应进行较快,其显色直接生成橙红色络合物,没有中间产物过渡.相应地,对溶解态铁(II)微量比色的参数优化较为简单,与常规方法基本一致.

图3为 Fe^{2+} 与邻菲罗啉在不同显色时间和温度条件下反应的标准曲线.图3(a)为 35°C 下振荡显色不同时间的吸光值,显色15 min后吸光值基本

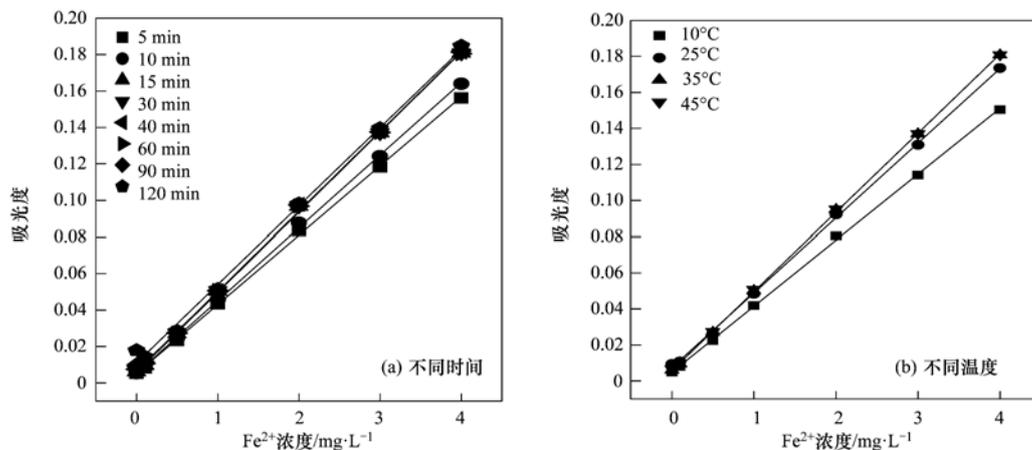


图3 不同时间和温度条件下邻菲罗啉比色法的标准曲线

Fig. 3 Calibration curves for the phenanthroline colorimetric method at different times and temperatures for coloration

2.3 与已有方法的对比

目前已经发展了96微孔板对DRP和 Fe^{2+} 的微量比色分析方法^[26,27],一次性分析样品的数量为96个,需要的样品体积 $100\sim 200\ \mu\text{L}$ (稀释后).本研究发展的384微孔板微量比色方法与前者相比,一次性分析样品的数量为384个,所需的样品体积为 $30\sim 40\ \mu\text{L}$ (稀释后),在提高分析效率和节省试剂方面具有明显的优势.将两种方法与传统的分光光度

计方法^[25]进行了对比,各方法的参数列于表5.可以看出,384孔微量比色测定DRP的检出限、最低检测限及精密度略逊于96孔,但优于传统的分光光度计方法.测定 Fe^{2+} 的检出限、最低检测限及精密度均与96孔相当,在检出限与最低检测限方面优于分光光度计方法.总之,384微孔板微量比色方法的参数经过优化后,满足了微量样品大批量分析的要求.

邻菲罗啉分光光度法测定亚铁是以冰乙酸作为缓冲液,酸性条件下显色不易产生气泡,所以微量比色时不需要离心,但显色时需要振荡,使得溶液充分混匀,促使显色反应在较短的时间内达到完全.

表5 两种微量比色法与传统分光光度法测定DRP与 Fe^{2+} 的参数对比

Table 5 Comparison between two microplates and traditional spectrophotometer for determining DRP and Fe^{2+}

测定元素	测定方法	线性范围 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	检出限 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	最低检出限 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	相对标准差 (RSD%)	灵敏度
DRP	384微孔板	0~0.6	0.003	0.006	2~5	0.240
	96微孔板	0~0.6	0.002	0.004	1~4	0.300
	分光光度计	0~0.6	0.004	0.008	1~5	0.450
铁(II)	384微孔板	0~5.0	0.003	0.006	2~5	0.043
	96微孔板	0~5.0	0.003	0.006	1~5	0.057
	分光光度计	0~5.0	0.010	0.020	1~5	0.045

2.4 沉积物间隙水样品的分析

通过HR-Peeper装置在2 mm尺度上获取了太湖梅梁湾沉积物两个剖面的微量间隙水样品,利用上述优化的微量比色方法,对间隙水样品的

DRP和 Fe^{2+} 进行了分析.从图4可以看出,上覆水中DRP和 Fe^{2+} 的浓度均在 $0.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,且数值较为稳定;由沉积物-水界面向下,DRP和 Fe^{2+} 浓度均随深度的增加而升高,在界面下20 mm附

近达到局部最大值;随后 Fe^{2+} 浓度呈现降低的趋势,DRP 则在剖面底部出现升高或降低的趋势.在界面至 -20 mm 处,DRP 和 Fe^{2+} 浓度的同步变化反映了两者的耦合关系,即磷在沉积物中的二次迁移和活性受到铁氧化-还原反应的控制,铁氧化物在缺氧和厌氧条件下发生溶解,促使溶解态 Fe^{2+} 与铁结合态磷出现同步释放和浓度升高的现象,并在界面附近形成浓度梯度,通过磷向上覆水

体的扩散造成内源性污染^[5].

与已有方法相比,将 HR-Peeper 装置与本研究发展的微量样品大批量分析方法结合后,可以将界面溶解态磷和铁的垂向分辨率从 cm 级提高到 mm 级,获取时间从 20 d 左右缩短到 2 d ,基本实现了溶解态磷和铁在界面附近浓度梯度分布信息的准确、实时获取,为估算内源磷负荷、揭示内源磷污染规律与形成机制提供关键信息.

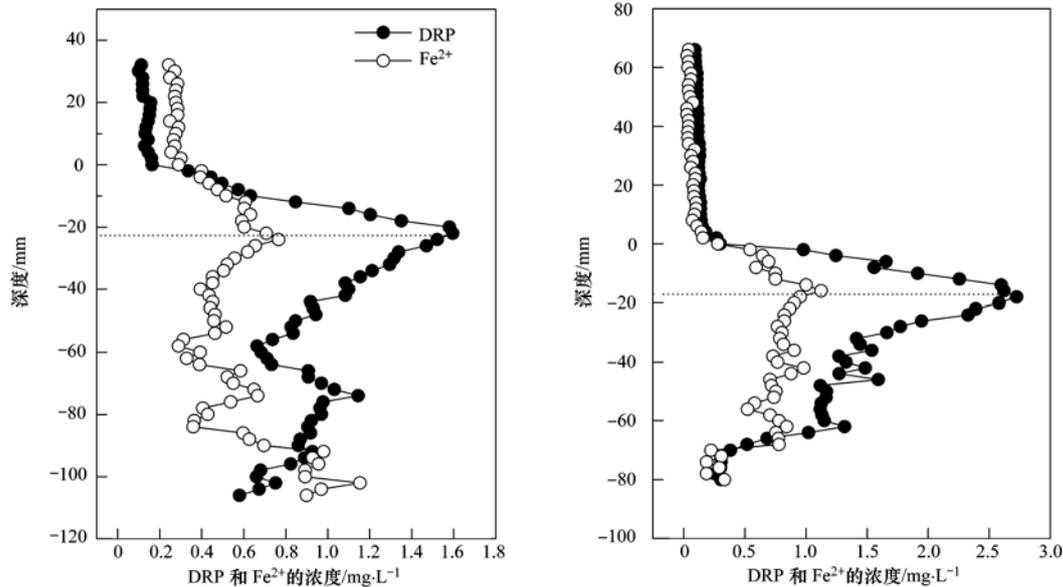


图 4 沉积物间隙水中 DRP 和 Fe^{2+} 的垂向分布

Fig. 4 Concentrations of DRP and Fe^{2+} in pore waters with the depth of two sediment profiles

3 结论

(1)DRP 微量比色方法:加入适量溶液样品于微孔中,并用去离子水稀释至 $30\ \mu\text{L}$,按溶液与显色剂体积比 $10:1$ 加入显色剂 III,将微孔板置于微振荡器上, 35°C 振荡显色 $90\ \text{min}$ 后,用 Epoch 微孔板分光光度计于 $700\ \text{nm}$ 波长处测定其吸光度,减去空白值后,根据标准曲线换算成样品浓度.

(2) Fe^{2+} 微量比色方法:加入适量溶液样品于微孔中,使用 $0.1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{HCl}$ 将样品稀释至 $15\ \mu\text{L}$,依次按样品与显色剂体积比 $1:1$ 加入显色剂、按样品与还原剂体积比 $10:1$ 加入还原剂,放置于振荡器 35°C 振荡显色 $30\ \text{min}$,用 Epoch 微孔板分光光度计于 $520\ \text{nm}$ 波长下测定其吸光度,减去空白值后,根据标线换算成样品浓度.

(3)384 微孔板微量比色法具有大批量分析微量体积样品的优势,尤其适用于微量间隙水样品的高分辨分析.此外,本研究发展的方法可以拓展到其

他元素(如氨氮)、酶活等指标的测定,为满足微量环境样品的分析要求提供重要的技术支撑.

致谢:本实验在采样过程中得到河海大学陈义飞的帮助,分析过程中得到中国科学院南京地理与湖泊研究所姚磊的协助,在此表示诚挚感谢.

参考文献:

- [1] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**(1-3): 135-145.
- [2] 高丽, 杨浩, 周健民. 湖泊沉积物中磷释放的研究进展[J]. *土壤*, 2004, **36**(1): 12-15.
- [3] Downing J A, McCauley E. The nitrogen: phosphorous relationship in lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(5): 936-945.
- [4] Jin L V, Wu H J, Chen M Q. Effects of nitrogen and phosphorus on phytoplankton composition and biomass in 15 subtropical, urban shallow lakes in Wuhan, China [J]. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2011, **41**(1): 48-56.
- [5] Christophoridis C, Fytianos K. Conditions affecting the release of phosphorus from surface lake sediments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**(4): 1181-1192.

- [6] Bostrom B, Andersen J M, Fleischer S, *et al.* Exchange of phosphorus across the sediment-water interface [J]. *Hydrobiologia*, 1988, **170**(1): 229-244.
- [7] Søndergaard M, Jeppesen E, Torben L, *et al.* Lake restoration: success, failures and long-term effects [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007, **44**(6): 1095-1105.
- [8] 李江, 金相灿, 姜霞, 等. 太湖不同营养水平湖区沉积物理化性质和磷的垂向变化[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(4): 64-69.
- [9] Rozan T F, Taillefert M, Trouwborst R E, *et al.* Iron-sulfur-phosphorus cycling in the sediments of a shallow coastal bay: Implications for sediment nutrient release and benthic macroalgal blooms [J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, **47**(5): 1346-1354.
- [10] 任万平, 李晓秀, 张汪寿. 沉积物中磷形态及影响其释放的环境因素研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2012, **34**(9): 65-70.
- [11] 王华, 冯启言, 郝莉莉. 我国底泥重金属污染防治[J]. *污染防治技术*, 2004, **17**(1): 75-78.
- [12] 刘素美, 张经. 沉积物间隙水的几种制备方法[J]. *海洋环境科学*, 1999, **18**(2): 66-71.
- [13] Hesslein R H. An in-situ sampler for close interval pore water studies [J]. *Limnology and Oceanography*, 1976, **21**(6): 912-914.
- [14] Teasdale P R, Batley G E, Apte S C, *et al.* Pore Water Sampling with Sediment Peeper [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 1995, **14**(6): 250-256.
- [15] Davison W, Grime G W, Morgan J A W, *et al.* Distribution of dissolved iron in sediment pore waters at submillimeter resolution [J]. *Nature*, 1991, **352**(6333): 323-325.
- [16] Davison W, Zhang H. *In-situ* speciation measurements of trace components in natural waters using thin-film gels [J]. *Nature*, 1994, **367**(6463): 546-548.
- [17] 时丹, 丁士明, 许笛, 等. 利用薄膜扩散平衡技术分析沉积物间隙水溶解态反应性磷[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(6): 768-774.
- [18] 吴龙华, 骆永明. 根际土壤溶液取样器——介绍一种新型原位土壤溶液采集装置[J]. *土壤*, 1999, **1**(5): 54-56.
- [19] Xu D, Wu W, Sun Q, *et al.* A high-resolution dialysis technique for rapid determination of dissolved reactive phosphate and ferrous iron in pore water of sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 245-252.
- [20] GB 11893-89, 水质总磷的测定 钼酸铵分光光度法[S].
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 246-248.
- [22] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 154-187, 182-187.
- [23] 孙宝盛. 环境分析监测理论与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [24] 刘丽君. 水质分析方法的检出限及其确定方法[J]. *净水技术*, 2003, **22**(1): 37-39.
- [25] 董冬吟. 总磷测定方法的现状与发展[J]. *海峡科学*, 2011, **2**(5): 29-32.
- [26] Laskov C, Herzog C, Lewandowski J, *et al.* Miniaturized photometrical methods for the rapid analysis of phosphate, ammonium, ferrous iron, and sulfate in pore water of freshwater sediments [J]. *Limnology and oceanography-Methods*, 2007, **5**(5): 63-71.
- [27] 李斌, 贾飞, 张银龙, 等. 沉积物间隙水溶解态磷和铁(II) 高分辨同步分析方法的研究[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(3): 485-489.
- [28] Telli C, Serper A, Dogan A L, *et al.* Evaluation of the cytotoxicity of calcium phosphate root canal sealers by MTT assay [J]. *Journal of Endodontics*, 1999, **12**(25): 811-813.
- [29] Angelo E, Crutchfield J, Vandiviere M, *et al.* Rapid, sensitive, microscale determination of phosphate in water and soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**(6): 2206-2209.
- [30] Onoue S, Takahashi H, Kawabata Y, *et al.* Formulation design and photochemical studies on nanocrystal solid dispersion of curcumin with improved oral bioavailability [J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2010, **4**(99): 1871-1881.
- [31] Onoue S, Kawamura K, Igarashi N, *et al.* Reactive oxygen species assay-based risk assessment of drug-induced phototoxicity: Classification criteria and application to drug candidates [J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2008, **4-5**(47): 967-972.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 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