

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源 梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)

北京大气 PM_{2.5} 与惰性 SiO₂ 的生物毒性比较 刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)

APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析 高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)

2000 ~ 2014 年北京市 SO₂ 时空分布及一次污染过程分析 程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)

利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因 周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)

长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟 张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)

珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征 刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)

春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成 李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)

洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究 庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)

大辽河主要污染源营养盐输入特征 马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)

三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析 张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)

不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究 李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)

周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联 王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)

华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例 孔晓乐, 王仕琴, 赵焱, 袁瑞强 (4051)

某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征 崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)

乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征 贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)

青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征 梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)

多环芳烃在岩溶地下河表层沉积物-水相的分配 蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)

降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析 江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)

重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力 任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)

三峡水库消落带植物汞的分布特征 梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)

物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响 王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)

超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果 魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)

载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7 王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)

TiO₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析 陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)

单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究 张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)

间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)

单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究 杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)

水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响 王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)

氨氮对 AOB 抑制的形态及规律 崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)

厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水 张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)

同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征 冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)

HCO₃⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响 李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究 巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)

活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响 徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)

温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响 谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙酉, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)

污染场地修复技术筛选方法及应用 白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)

基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析 杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)

大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)

缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响 李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)

不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响 兰木岭, 高明 (4252)

生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征 杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)

不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响 姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)

组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究 朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文毅, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)

水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)

大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估 王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)

覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构 邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)

阳极内添加阳离子交换树脂提升钼压“三合一”膜电极 MFC 性能 梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)

应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的萘和苯并芘 李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)

《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)

周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联

王逢武^{1,2}, 刘玮^{2,3}, 万娟娟^{1,2}, 杨嘉利², 刘雪梅¹, 向速林^{1*}, 吴永红^{2*}

(1. 华东交通大学环境工程系, 南昌 330013; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3. 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037)

摘要: 目前人工水草、弹性填料等多种载体广泛用于地表水体净化, 通过载体表面富集的周丛生物去除污染物达到净化效果。尤其在周丛生物存在情况下, 不同水层的氧化还原带分布情况与污染物的去除有着直接或间接的关系, 因此, 研究周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其微生物特征具有重要的实际意义。在模拟的水柱装置中, 加入玄武湖采集的富营养化水, 再悬挂弹性填料富集周丛生物, 待周丛生物生长达到稳定期之后, 监测不同水层氧化还原因子及其微生物。结果表明, 周丛生物作用下, 水柱中不同水层自上而下依次出现5条氧化还原带, 周丛生物在每个带所利用的最终电子受体分别为 O₂、NO₃⁻、Fe³⁺、CO₂ 和 SO₄²⁻, 依次称为氧还原带、NO₃⁻ 还原带、铁还原带、产甲烷带和 SO₄²⁻ 还原带; 各带的标志性物质 DO、NO₂⁻、Fe²⁺、HCO₃⁻ 和硫化物的最高值分别为 11.290、4.950、38.326、120.000 和 12.180 mg·L⁻¹。通过 Biolog 技术监测微生物特征显示: 不同水层对应的周丛生物其组成、代谢活性、碳源利用能力存在显著差异, 由此造成了不同水层氧化还原带的分布。不同水层氧化还原带分布及其微生物特征的研究, 为揭示周丛生物净化不同深度水体水质提供了科学解释, 也为发展高效的基于周丛生物净化水质的技术提供了理论依据。

关键词: 周丛生物; 氧化还原带; 电子受体; 微生物; 水质净化

中图分类号: X172; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4043-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.013

Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms

WANG Feng-wu^{1,2}, LIU Wei^{2,3}, WAN Juan-juan^{1,2}, YANG Jia-li², LIU Xue-mei¹, XIANG Su-lin^{1*}, WU Yong-hong^{2*}

(1. Department of Environment Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. College of Forestry Resource and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: So far, many types of carriers (such as artificial mat, industrial soft carriers) have been widely used in removing pollutants, purifying water quality via the periphyton attached on the surface of these carriers. In the presence of periphyton, the distribution of redox zone at different water layers is directly or indirectly associated with the removal rate of pollutants. Therefore, it is more practically significant to study the distribution of redox zone at different water layers and the microbial diversity in the presence of periphyton. In this study, the pilot experiment was performed in a simulated water column bioreactor. Firstly, the eutrophic water collected from XuanWu Lake was added into the simulated water column bioreactor. The industrial soft carriers were then suspended into the water column in order to enhance the growth of periphyton. After periphyton gained a steady growth state, the oxidation reduction zones (redox zones) and the responsible microorganisms at different water layers were monitored. The results showed that five sequent redox zones (i. e. oxygen reduction, nitrate reduction, iron reduction, methanogenic and sulfate reduction zones, respectively) appeared in different water layers from top-down in the presence of periphyton and their responsible terminal electron acceptors were O₂, NO₃⁻, Fe³⁺, CO₂ and SO₄²⁻ respectively. The indicators of the different zones were DO, NO₂⁻, Fe²⁺, HCO₃⁻ and sulfide, and the highest concentrations were 11.290 mg·L⁻¹, 4.950 mg·L⁻¹, 38.326 mg·L⁻¹, 120.000 mg·L⁻¹ and 12.180 mg·L⁻¹, respectively. The results of microbiological characteristics tested by Biolog EcoPlate™ technology revealed that there were significant differences in the composition, metabolic activity, carbon utilization of periphyton at different water layers, causing the difference in the distribution of redox zones at different water layers. These findings implies that study on the distribution of redox zones and microbiological characteristics in the presence of periphyton provides a better understanding that periphyton is capable of improving water quality at different layer, and also provides some theoretical basis for the development of technology for purifying water quality based on periphyton.

收稿日期: 2015-05-02; 修订日期: 2015-06-11

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(41422111)

作者简介: 王逢武(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为基于周丛生物的计量化学生态学, E-mail: fwwang@issas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: slxiang2001@163.com; yhwu@issas.ac.cn

Key words: periphyton; redox zones; electron acceptors; microorganisms; water purification

近年来,水体富营养化问题正日益严重地威胁着人类的生存与发展^[1]. 目前,很多学者通过悬挂弹性填料或人工水草等方式,使载体表面富集大量周丛生物,达到净化不同深度水体的目的. 引入的周丛生物,不仅提高了水质净化效果,还构成了一个完整的微生态系统^[2, 3].

微生物活动对水体的化学组成和化学物质的迁移等有很大的影响,而水体中存在的 O_2 、 NO_3^- 、 Fe^{3+} 、 SO_4^{2-} 等最终电子受体直接影响着微生物种群的分布和微生物活动^[4, 5]. 从生物地球化学角度讲,多数反应是把最终电子传递给外部最终电子受体的过程. 微生物利用这些最终电子受体,通过好氧呼吸、脱氮、铁还原、硫酸盐还原和产甲烷等途径对有机污染物进行降解^[6]. 根据热力学原理,微生物利用这些最终电子受体的顺序为 $O_2 > NO_3^- > Fe^{3+} > SO_4^{2-} > CO_2$ ^[7, 8]. 也就是说,微生物在降解有机污染物的过程中,首先利用 O_2 作为最终电子受体,当 O_2 消耗殆尽时依次利用 NO_3^- 、 Fe^{3+} 、 SO_4^{2-} 和 CO_2 ,这已在地下环境中得到初步验证^[9]. 不同电子受体和微生物的代谢活动相互作用,相互影响,最终影响水环境中的氧化还原情况,形成不同的氧化还原条带.

周丛生物定义为淹没于水体基质表面的各种微生物及其与周边的非生物物质交织在一起的集合体^[10]. 从环境化学角度看,周丛生物普遍理解为由金属氧化物(铁、锰和铝氧化物等)、有机质和少量矿物质组成^[11~13]. 周丛生物的胞外聚合物形成了整个微生物的骨架,为微生物的附着生长和包裹吸附其他物质提供了物质基础^[14]. 周丛生物对水体中营养盐的迁移转化^[15]和污染物的消纳^[16]具有重要影响,对污染物如磷有较强的富集^[17]和固持能力^[18]. 因此,周丛生物常用于低浓度污水(如地表水体)的净化和生态系统修复^[19].

本文通过水柱模拟实验对如下 2 个问题进行研究:一是周丛生物作用下,不同水层水体中氧化还原条带的分布情况,二是不同水层氧化还原条带的分布与微生物特征的关联情况. 通过研究,初步阐明周丛生物与不同水层氧化还原条带的相互关系,揭示周丛生物对不同水层水质净化的机制,以为开发高效的生态净水技术提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置与材料

1.1.1 周丛生物反应器

如图 1 和图 2 所示,培养装置由储液箱、培养柱、废液桶和支架这 4 个部分组成. 其中,储液箱(长×宽×高=30 cm×30 cm×45 cm)用于储备培养液;培养柱(内径×外径×高=14 cm×15 cm×120 cm)为圆柱体,并在培养柱中悬挂周丛生物载体——工业弹性填料(长 50 cm,半径 10 cm,苏州宜兴永达环保公司)用于富集周丛生物. 培养柱一侧

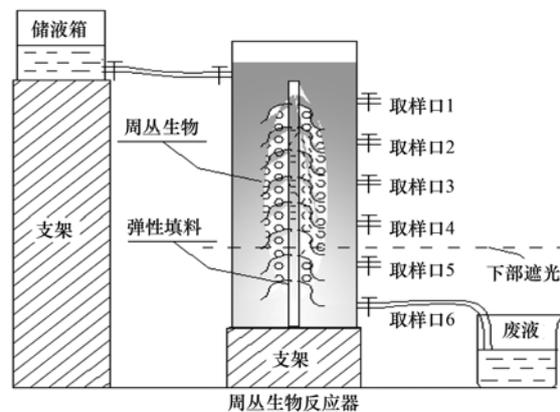


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic design of the experimental equipment



图 2 周丛生物富集载体:工业弹性填料

Fig. 2 Periphyton substrate: industrial soft carriers (ISC)

配有 6 个口径 0.500 cm、间距 12 cm 的水阀,用于采集不同水层水样。废液桶为 1 L 的玻璃烧杯,用于收集废液。以上 3 部分之间由硅胶软管相互连接。

1.1.2 周丛生物的培养和富集

实验初期,将工业弹性填料放入水柱装置后,添加从南京玄武湖采集的富营养水(水质指标见表 1),使富营养水长期淹没弹性填料,每天更换一定的采集于玄武湖中的新鲜水。培养期间 COD 为 150~200 mg·L⁻¹,pH 值为 7.0~9.0。培养水柱置于温室,培养条件如下:水体温度 25℃ 左右,自然光照。经过 20 d 的培养,填料表面出现一层亮绿色黏稠状物质,此时认为周丛生物已初步富集完成。

表 1 实验用水的水质指标

Table 1 Average (±S. D.) chemical parameters for water used in experiments

项目	pH	TN/mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	TDP/mg·L ⁻¹
水	7.920 ± 0.030	1.260 ± 0.020	0.730 ± 0.020	0.530 ± 0.010	0.120 ± 0.002	0.040 ± 0.001

1.1.3 样品采集

采集不同水层水样用于多种指标的检测,鉴定不同水层水样的氧化还原条带。为避免水体流动对实验的影响,水样采集由上而下依次取样。首先打开进水阀和取样口 1,关闭其他取样口,待水流出 3 s 后,采集水样 50 mL,采样结束迅速关闭水阀。重复进水阀操作,采集其它水层水样。

采集不同水层对应的周丛生物样品,用于显微结构观察及 Biolog 实验功能多样性分析。将填料从培养柱中取出,用消毒过的镊子轻轻将周丛生物从载体剥落,样品至于 4℃ 冰箱内保存,以备分析测定。

1.2 实验方法

1.2.1 水体氧化还原条带的检测

主要测定指标为 DO、硫化物、HCO₃⁻、Fe²⁺ 和 NO₂⁻。DO 采用美国 YSI 多功能水质监测仪直接测定。硫化物的测定采用碘量法、NO₂⁻ 的测定采用重氮化偶合分光光度法^[20]。HCO₃⁻ 的测定采用传统滴定法、Fe²⁺ 的测定采用邻菲罗啉分光光度法^[21]。

1.2.2 周丛生物显微结构观察

显微结构,采用显微镜观察(Nikon, H600L)。

1.2.3 Biolog 实验

采用 Biolog 生态测试板(ECO microplate, 美国 Matrix Technologies Corporation 生产)测定周丛生物微生物群落功能多样性,测定仪器为 The Biolog EcoPlates™(美国, Hayward 公司)^[22~24]。

1.3 数据处理

所有实验中每组均设有 3 个平行。采用 Excel

实验后期,按照 1 L 玄武湖水添加 1 mL WC 培养液的标准配置 WC 营养液,通过阀门控制流速模拟自然河道水体,动态驯化培养周丛生物。主要过程如下:往储液箱内注满 WC 营养液,打开进水阀和取样口 6,控制流速,使得培养柱中玄武湖水被 WC 营养液缓慢地替代,至玄武湖水完全替换后关闭进水阀和取样口 6,静置 2 d。打开进水阀和取样口 6,控制流速(0.010 mL·s⁻¹)使得培养柱中的营养液持续缓慢流动。驯化培养过程中对培养柱取样口 4 以下部分轻微遮光,模拟水体自然环境。维持动态培养一个月,培养柱中明显出现深褐色的周丛生物后,随即开展采样与监测。

2013 和 Origin pro 8.5 对数据进行统计和绘图;采用 SPSS 16.0 中的 Duncan 法和“Date Reduction”程序分别对数据进行差异显著性分析和主成分分析。所有实验数据均采用平均值 ± 标准误(mean ± SD)表示,显著水平为 P < 0.05。

Biolog 分析中平均每孔颜色变化率及多样性指数的计算方法如下。

(1) 平均每孔颜色变化率(average well color development, AWCD)^[25] 计算公式为:

$$AWCD = \left[\sum (C - R) \right] / 31$$

式中, C 为测得 31 个反应孔的吸光值; R 为对照孔的吸光值。

(2) Shannon 指数(H)^[26] 可以表征微生物群落丰富度,计算公式为:

$$H = - \sum (P_i \ln P_i)$$

式中, P_i 为第 i 孔相对吸光值(C - R)与所有 31 孔的吸光值总和的比率。

(3) Simpson 指数(D)^[26] 用于评估微生物群落优势度,计算公式为:

$$D = 1 - \sum (P_i)^2$$

式中, P_i 为第 i 孔的相对吸光值与整个平板相对吸光值总和的比率。

(4) McIntosh 指数(U)^[26] 是基于群落物种多维空间距离的多样性指数,反映微生物群落均一性,计算公式为:

$$U = \sum (n_i)^2$$

式中, n_i 是第 i 孔的相对吸光值.

2 结果与讨论

2.1 不同水层水体最终电子受体及其还原产物的分布

实际污染水环境里, 存在不同种类的碳源和丰富的电子受体. 周丛生物作为一个含丰富物种的微生物聚集体, 可以提供多种不同代谢途径的微生物物种, 而不同代谢微生物利用电子受体是不同的. 本研究采集周丛生物反应器中不同水层的水样, 检测该水层中代表性电子受体 (O_2 、 NO_3^- 、 Fe^{3+} 、 CO_2 、 SO_4^{2-}) 的还原产物, 观察氧化还原条带分层现象, 稳定期的检测结果如图 3 所示.

2.1.1 分布规律

从图 3 可以看出 DO 、 NO_2^- 、 Fe^{2+} 、硫化物和 HCO_3^- 在不同位置的浓度分布规律. DO 在初始阶段就开始下降, 在 12 cm 处由初始的 $11.290 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $2.520 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右; NO_2^- 和 Fe^{2+} 分别是 NO_3^- 和 Fe^{3+} 的还原产物, 其浓度均呈先升高后降低的变化趋势, 在 24 cm 和 48 cm 处分别达到峰值 $4.950 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $38.326 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 硫化物从 12 cm 开始随水深的增大而逐渐增大, 最大达到 $12.183 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; HCO_3^- 从 12 cm 开始随水深的增大而逐渐增大, 到

60 cm 最大达到 $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在 72 cm 降低至 $110 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.1.2 水体中氧化还原带

根据图 3 的不同最终电子受体及其还原产物的分布特点和浓度变化规律, 将整个过程自上而下划分为 5 个氧化还原带, 即氧还原带、 NO_3^- 还原带、铁还原带、甲烷还原带和 SO_4^{2-} 还原带.

①氧还原带水深在 18 cm 以上的区间, DO 浓度为 $11.290 \sim 10.630 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在该区好氧微生物利用 O_2 为电子受体, 对污染物进行降解; ② NO_3^- 还原带: 水深在 16 ~ 36 cm 内, NO_2^- 浓度急剧升高, 最高达 $4.920 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 比其他区间最高高出 29%. 在该区间周丛生物利用 NO_3^- 作为最终电子受体对污染物进行降解. NO_2^- 作为 NO_3^- 的主要还原产物, 其浓度的增加指示着硝酸盐还原带的出现; ③铁还原带: 水深在 24 ~ 54 cm 内, Fe^{2+} 最高浓度达到 $38.326 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Fe^{2+} 浓度的急剧增大指示着铁还原带的出现. 因此, 周丛生物在这一区间主要利用 Fe^{3+} 作为电子受体对污染物进行降解. ④产甲烷带: 水深在 56 ~ 72 cm 区间, HCO_3^- 浓度最高达到 $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 根据这一特点将该区划分为产甲烷带. 在该区主要利用 CO_2 作为最终电子受体对污染物进行降解, 但是与 SO_4^{2-} 还原带有一定的重合.

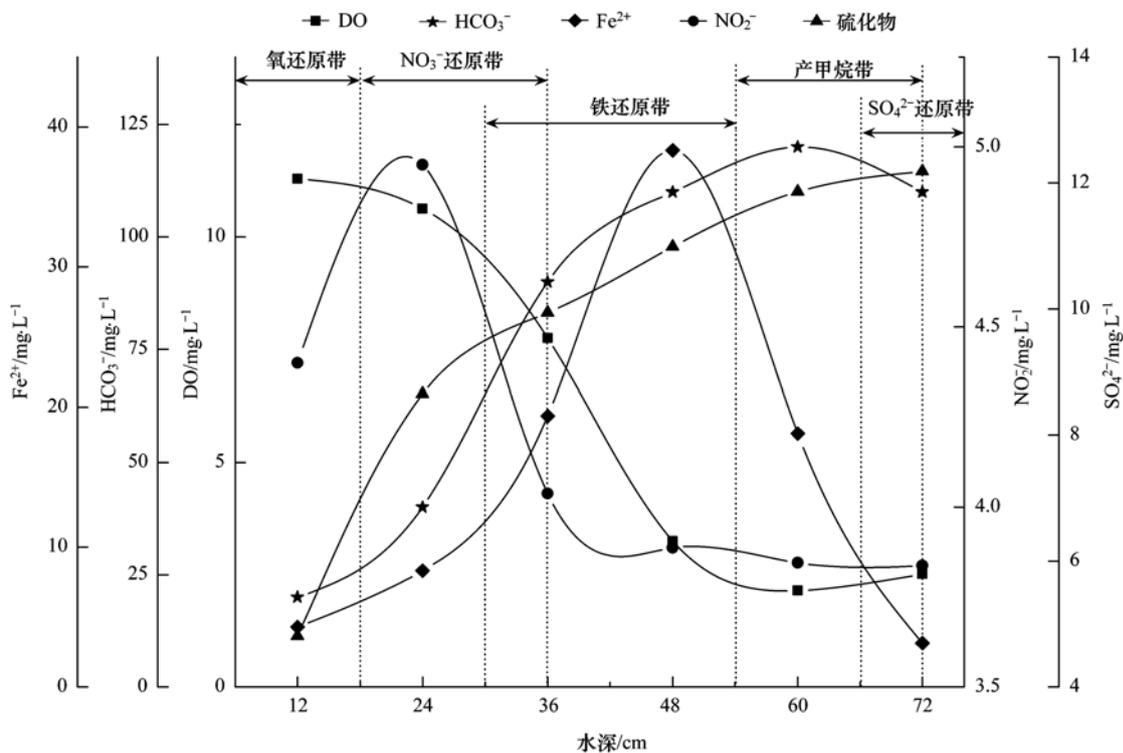


图 3 不同水层 Fe^{2+} 、 DO 、 NO_2^- 、 HCO_3^- 和硫化物的分布及氧化还原带

Fig. 3 Distribution of Fe^{2+} , DO , NO_2^- , HCO_3^- and sulfide and redox zones in different water layers

⑤ SO_4^{2-} 还原带: 水深在 66 ~ 76 cm 区间, 硫化物浓度逐渐增大, 最高达 $12.183 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 根据这一特点将该区划分为 SO_4^{2-} 还原带. 在该区主要利用硫化物作为最终电子受体对污染物进行降解, 但是与产甲烷带有一定的重合, 无明显的界限.

氧化还原条带的分层现象与周丛生物中存在多种电子受体紧密相关, 其中主要的电子受体有 O_2 、 NO_3^- 、 Fe^{3+} 、 CO_2 和 SO_4^{2-} . 不同电子受体和周丛生物的代谢活动相互作用, 相互影响, 最终导致水体形成 5 个不同的氧化还原条带.

2.2 不同水层中周丛生物显微结构的研究

由以上研究可知, 不同水层中代表性最终还原产物具有显著差异, 氧化还原能力也不同. 氧化还原条带的分布可能与不同水层周丛生物丰度及生长

状况存在一定的关系.

在光学显微镜 400 倍下, 观察不同水层的周丛生物. 由图 4 可知, 样品 1 取样于 12 cm 水深, 由于接受充足的阳光与氧气, 群落丰度较高, 并且呈现以蓝绿藻为代表的光能自养型微生物群落; 样品 4 取样于 48 cm 水深, 其水环境含氧量不高, 好氧微生物和兼性厌氧微生物同时存在, 群落丰度和生物量低于上层周丛生物. 样品 6 取样于 60 cm 水深, 处于底层厌氧环境, 阳光不充足, 故没有观察到绿色自养微生物种类, 厌氧微生物占优势但生物量较少. 由此可知, 不同水层周丛生物群落丰度及生长状态因水深而存在显著性差异. 不同水层环境影响周丛生物的生长状况, 通过周丛生物又反作用于水体, 改变水体氧化还原条件, 并形成不同的氧化还原条带.

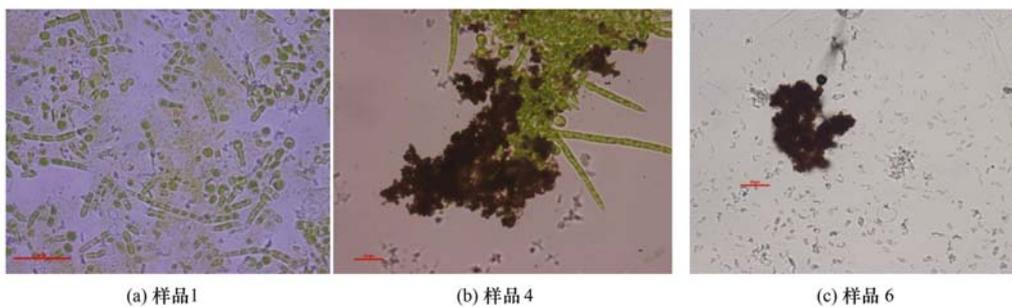


图 4 不同氧化还原条带下周丛生物的光学显微镜观察

Fig. 4 Observation of periphyton at different redox zones by optical microscopy

2.3 不同水层周丛生物微生物研究

2.3.1 不同水层中周丛生物微生物群落活性的差异

平均每孔颜色变化率^[25]是反应周丛生物利用不同碳源总体能力的一个重要指标. AWCD 值越高, 表明周丛生物对碳源的利用率也越高, 活性也越大. 基于平均颜色显影变化下的原理, 不同水层对应的周丛生物利用不同碳源的新陈代谢强度, 如图 5 所示.

结果表明, 不同水层周丛生物的活性 (AWCD) 随着水深的增大而降低, AWCD 值的变化说明不同水层中周丛生物的活性存在显著差异. 实验的 24 ~ 48 h 时间段内, 各样品 AWCD 值均快速上升, 48 h 后, 水深 60 cm 和 72 cm 样品进过短暂稳定后再次恢复上升趋势, 而其他 4 组样品则保持上升趋势直至稳定. 达到最终稳定状态时, 中层 (水深 36 cm、48 cm) AWCD 值相对较高、上层 (水深 12 cm、24 cm) AWCD 值相对居中, 而下层 (水深 60 cm、72 cm) AWCD 值则为最低.

实际水环境中, 存在不同的最终电子受体, 它们获取电子的能力不同. 周丛生物作为一个富含物

种的微生物聚集体, 巨大的比表面积为吸附污染物提供了附着点^[27, 28]. 同时, 周丛生物可以提供不同代谢途径的微生物, 这些微生物利用水环境中的电子受体也不同. 因此在不同水深条件下, 氧化还原带也不相同, 周丛生物的活性也不同, 表明周丛

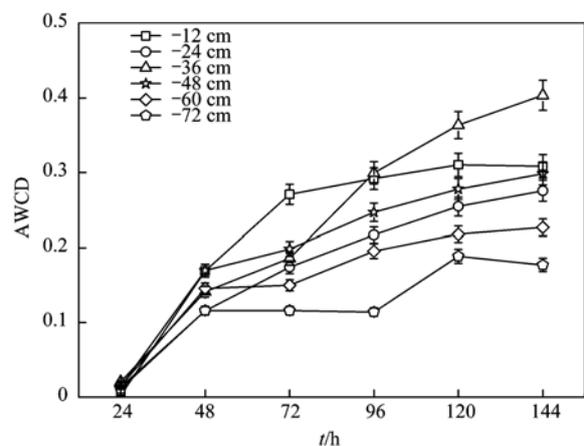


图 5 不同处理 AWCD 值变化曲线

Fig. 5 Changes in average well color development with incubation time in different treatments

生物的代谢途径不一样,利用的电子受体不同,而不同的受体在接受电子后产生不同的还原产物。

2.3.2 不同水层中周丛生物功能多样性指数比较

采用 96 h 的吸光值计算周丛生物在不同水层的 3 种多样性指数,以分析其功能多样性。由表 2 可以看出,Shannon 指数^[26]最大值出现于水深 48 cm 处,高于上层和下层,说明中层的微氧环境可能同时给好氧、厌氧以及兼性微生物提供适宜的条件。Simpson 指数^[26]与 McIntosh 指数^[26]的最小值皆出现在中间水层兼性厌氧范围,进一步说明了中间水层周丛生物群落丰富度较高,但群落分布不均衡。这 3 类指数从不同的侧面反映了不同水层周丛生物的功能多样性,从而通过不同的碳源代谢途径与水体的氧化还原条带相互制约与影响,揭示周丛生物的功能多样性直接影响水体的氧化还原环境。

2.3.3 不同水层中周丛生物对不同碳源代谢能力的比较

Biolog 态测试板具有 31 种不同碳源与一个空

白对照。实验采用统计学方法取标准化后的平均值用于评估周丛生物的总体活性与功能多样性。然而,通过分析不同水层周丛生物不同种类的碳源代谢能力异同,可以进一步揭示氧化还原条带的形成与周丛生物不同代谢途径之间的关系。

表 2 96 h 时的周丛生物功能多样性

深度/cm	Shannon 指数	Simpson 指数	McIntosh 指数
-12	2.130 ± 0.210	0.840 ± 0.060	2.150 ± 0.190
-24	2.220 ± 0.240	0.870 ± 0.090	2.060 ± 0.110
-36	1.330 ± 0.070	0.530 ± 0.040	1.590 ± 0.820
-48	2.470 ± 0.150	0.810 ± 0.100	1.630 ± 0.910
-60	1.920 ± 0.120	0.790 ± 0.050	1.480 ± 0.740
-72	2.170 ± 0.140	0.830 ± 0.100	1.790 ± 1.010

选取样品 96 h 的吸光值评估周丛生物对不同碳源的利用情况,如图 6 所示。结果大致表现为:酚酸和羧酸被上层周丛生物利用较多;多聚物 and 胺类被中层周丛生物利用较多;对于碳水化合物和氨基酸类,各水层周丛生物均有所利用,但整体角度分

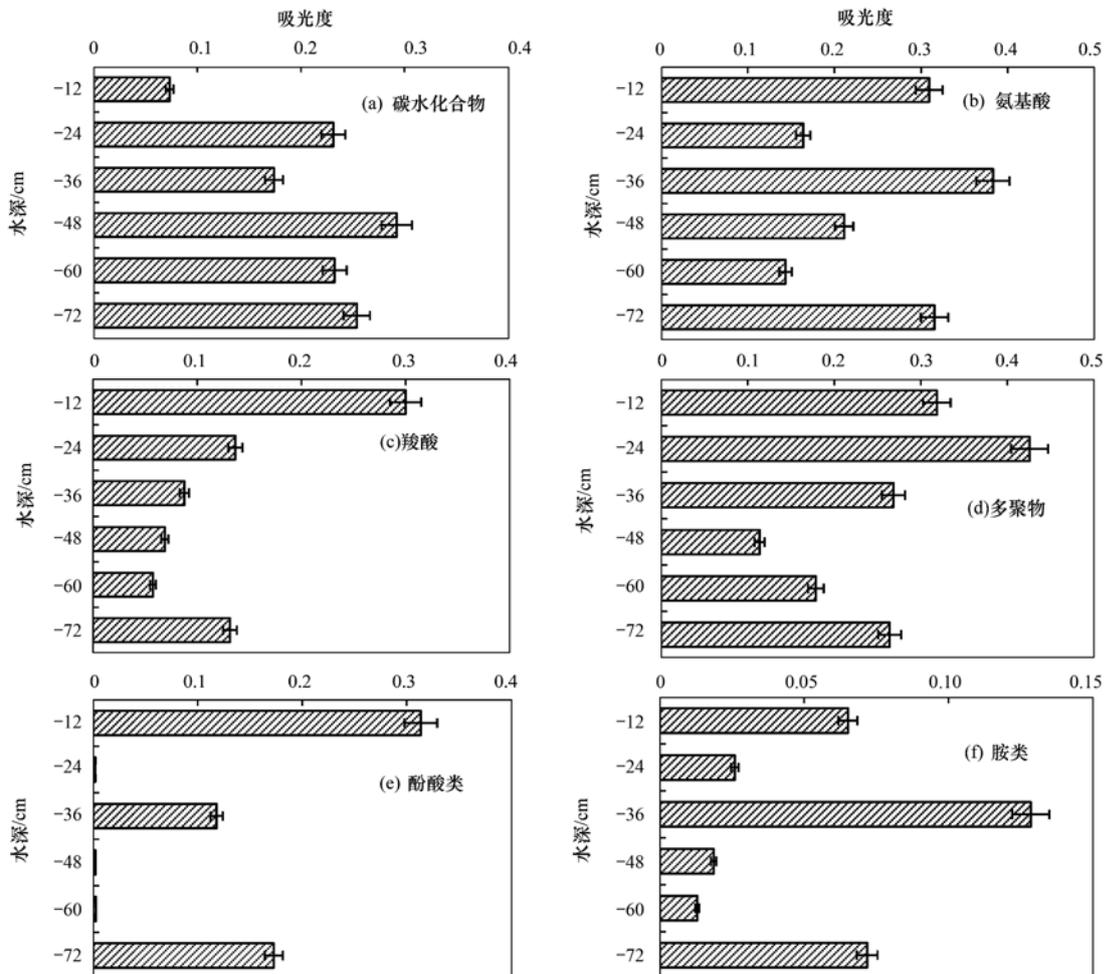


图 6 不同碳源在 96 h 时的代谢程度

Fig. 6 Average well color development for different C source group at 96 h

析,其主要被底层周丛生物利用. 从微生物代谢底物的角度分析,不同水层周丛生物代谢途径及碳源利用情况存在显著差异. 这一现象的出现是由于周丛生物具有丰富的微生物群落,并且在各水群落分布不同. 通过对群落丰度的观察(图 4)证明某些优势群落的存在是造成氧化还原条带的关键因素. 正是由于优势微生物群落不同水层的空间不均匀分布,造成各水层的微生物群落功能不同(图 5),及其利用碳源的代谢途径也不一样(图 6),进而使周丛生物利用不同的最终电子产物,最终形成不同的氧化还原条带.

2.3.4 不同水层中周丛生物对不同碳源代谢能力的比较

为研究不同水层周丛生物碳源利用多样性的特点,分析并解释氧化还原条带之间存在一定的重合,没有明显界限的原因,实验选择 96 h 为取样点,对 Biolog 所测得数据进行标准化变换后,实施主成分分析. 提取的主向量前两个主成分(PC1/PC2)的累积贡献率为 58.408%. 将前两个主成分得分作图,表征不同周丛生物群落的代谢^[23, 26].

其中 PC1(42.826%)能够将 48 cm 以下的周丛生物区分开,PC2 (15.582%)能够将 36 cm 以下的周丛生物区分开,说明不同水深周丛生物对碳源利用情况不一样. 12 cm 处的周丛生物,分布趋向 PC1 轴,也与 PC2 有关联; 12 cm 和 24 cm、36 cm 和 48 cm、60 cm 和 72 cm 处的周丛生物,所处水环境大致相似,其利用碳源相近,并分别与 PC2、PC1、PC2 强烈负相关. PC1 负轴上出现了 4 个不同水深的样品,4 个样品均处于水深 48 cm 上部,其利用碳源明显区别于 48 cm 以下的碳源. 可能是因为 48 cm 以上的水环境明显有别于下部厌氧遮光环境. 同时相邻两组之间的周丛生物所处水体环境相近,其利用碳源情况也类似,导致产生的氧化还原条带有一定

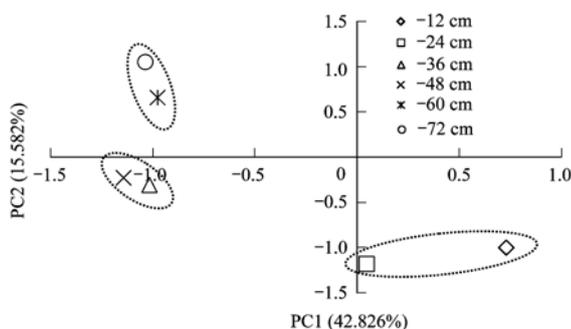


图 7 不同水深周丛生物群落碳源利用主成分分析

Fig. 7 Principal component analysis on microbial community of periphyton at different water depths

的重合,无明显的界限. 如产甲烷带和硫酸盐还原带所处水体环境相似(遮光厌氧),其碳源利用情况相似,并且它们有相似的氧化还原电位,故两个还原带存在一定的重合.

3 结论

周丛生物存在下,不同水层会形成氧化还原条带由上而下依次称为氧还原带、 NO_3^- 还原带、铁还原带、产甲烷带和 SO_4^{2-} 还原带. 这种氧化还原条带出现分层现象的原因为: 不同水层周丛生物群落组成、种群丰度及代谢活性的差异,导致其碳源代谢利用的最终电子产物不同,由此形成的还原产物不同,进而形成不同水层不同氧化还原环境.

参考文献:

- [1] 金苗,任泽,史建鹏,等. 太湖水体富营养化中农业面污染源的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(10): 106-109, 119.
- [2] 宋姣,周洲,傅大放,等. 三种新型浮床载体对微污染水体中氮的去除效果研究[J]. 安全与环境工程, 2013, **20**(5): 67-73.
- [3] 张劲,黄薇,桑连海. 浮床植物水质净化能力及其影响因素研究[J]. 长江科学院院报, 2011, **28**(12): 39-42.
- [4] Christensen T H, Bjerg P L, Banwart S A, et al. Characterization of redox conditions in groundwater contaminant plumes[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000, **45**(3-4): 165-241.
- [5] Brun A, Engesgaard P. Modelling of transport and biogeochemical processes in pollution plumes: literature review and model development[J]. Journal of Hydrology, 2002, **256**(3-4): 211-227.
- [6] Lønborg M J, Engesgaard P, Bjerg P L, et al. A steady state redox zone approach for modeling the transport and degradation of xenobiotic organic compounds from a landfill site[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2006, **87**(3-4): 191-210.
- [7] 董军,赵勇胜,王翊虹,等. 渗滤液污染羽中沉积物氧化还原缓冲能力研究[J]. 环境科学, 2007, **27**(12): 2558-2563.
- [8] 秦传玉,赵勇胜,郑苇,等. 空气扰动技术对地下水中氯苯污染晕的控制及去除效果[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, **40**(1): 164-168.
- [9] 董军,赵勇胜,韩融,等. 垃圾渗滤液污染羽在地下环境中的分带现象研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1901-1905.
- [10] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] Golladay S, Sinsabaugh R L. Biofilm development on leaf and wood surfaces in a boreal river[J]. Freshwater Biology, 1991, **25**(3): 437-450.
- [12] Lorite G S, Rodrigues C M, De Souza A A, et al. The role of conditioning film formation and surface chemical changes on *Xylophaga fastidiosa* adhesion and biofilm evolution[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2011, **359**(1): 289-295.
- [13] Coenye T, De Prijck K, De Wever B, et al. Use of the modified

- Robbins device to study the *in vitro* biofilm removal efficacy of NitrAdine™, a novel disinfecting formula for the maintenance of oral medical devices [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2008, **105**(3): 733-740.
- [14] Wu Y H, Liu J T, Yang L Z, *et al.* Allelopathic control of cyanobacterial blooms by periphyton biofilms[J]. *Environmental Microbiology*, 2011, **13**(3): 604-615.
- [15] Castro M C R, Urrea G, Guasch H. Influence of the interaction between phosphate and arsenate on periphyton's growth and its nutrient uptake capacity[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **503-504**: 122-132.
- [16] Likens G E. *Encyclopedia of inland waters* [M]. New York: Academic Press, 2009.
- [17] 陆海鹰, 陈建贞, 李运东, 等. 磷在“沉积物-自然生物膜-上覆水”三相体系中的迁移转化[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(4): 497-504.
- [18] McCormick P V, Shuford R B E, Chimney M J. Periphyton as a potential phosphorus sink in the Everglades Nutrient Removal Project[J]. *Ecological Engineering*, 2006, **27**(4): 279-289.
- [19] Du B W, Haddad S P, Scott W C, *et al.* Pharmaceutical bioaccumulation by periphyton and snails in an effluent-dependent stream during an extreme drought[J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 927-934.
- [20] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法* [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [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. 10.
- [22] Lu H Y, Yang L Z, Zhang S Q, *et al.* The behavior of organic phosphorus under non-point source wastewater in the presence of phototrophic periphyton[J]. *PLoS One*, 2014, **9**(1): e85910.
- [23] Li T L, Bo L J, Yang F, *et al.* Comparison of the removal of COD by a hybrid bioreactor at low and room temperature and the associated microbial characteristics[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **108**: 28-34.
- [24] Davey M E, O'toole G A. Microbial biofilms: from ecology to molecular genetics [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2000, **64**(4): 847-867.
- [25] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, **57**(8): 2351-2359.
- [26] Winding A, Rønn R, Hendriksen N B. Bacteria and protozoa in soil microhabitats as affected by earthworms [J]. *Biology and Fertility Soils*, 1997, **24**(2): 133-140.
- [27] Wu Y H, Li T L, Yang L Z. Mechanisms of removing pollutants from aqueous solutions by microorganisms and their aggregates: a review[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **107**: 10-18.
- [28] Wu Y H, Xia L Z, Yu Z Q, *et al.* *In situ* bioremediation of surface waters by periphytons [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **151**: 367-372.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Si-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitrification-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitrification Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人