

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

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

|                                                                     |                                                  |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 重庆市 PM <sub>2.5</sub> 浓度空间分异模拟及影响因子 .....                           | 吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)                           |
| 2012 ~ 2013 年间北京市 PM <sub>2.5</sub> 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析 .....        | 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)               |
| 南京地区大气 PM <sub>1.1</sub> 中 OC、EC 特征及来源解析 .....                      | 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)            |
| 太原市大气 PM <sub>2.5</sub> 中碳质组成及变化特征 .....                            | 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)                    |
| 朔州市市区 PM <sub>2.5</sub> 中元素碳、有机碳的分布特征 .....                         | 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)             |
| 中国 2013 年 1 月 PM <sub>2.5</sub> 重污染过程卫星反演研究 .....                   | 薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)                 |
| 高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究 .....                                    | 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)                |
| 重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量 .....                                         | 覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)                         |
| 海南五指山大气气态总汞含量变化特征 .....                                             | 雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)      |
| 树叶烟尘中的有机碳和元素碳 .....                                                 | 陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)                       |
| 介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析 .....                                          | 姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)                     |
| 长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价 .....                                | 母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)                 |
| 河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素 .....                                    | 王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)                  |
| 岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究 .....                                      | 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)                          |
| 岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析 .....                                      | 卢丽, 王喆, 裴建国 (862)                                |
| 两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例 .....                     | 闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)                   |
| 三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征 .....                                | 王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)             |
| 夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析 .....                                 | 梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)              |
| 南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比 .....                             | 程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)                 |
| 夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素 .....                                           | 杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)                                |
| 太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性 .....                                    | 叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)                     |
| 汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析 .....                                       | 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)                          |
| 三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化 .....                                          | 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)                          |
| 太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算 .....                                          | 金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)                          |
| 贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析 .....                                           | 苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)                  |
| 物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用 .....                                   | 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)                           |
| 磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响 .....                                       | 殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)               |
| 矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究 .....                                           | 王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)                          |
| PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝 .....                                         | 和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)                           |
| 微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用 .....                     | 宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)                       |
| 生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究 .....                                    | 汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)                 |
| 污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究 .....                                      | 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)            |
| 高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律 .....                                        | 卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)                      |
| MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制 .....                                       | 郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)                         |
| 基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响 .....                                      | 滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)                   |
| 天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究 .....                                           | 何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)                         |
| 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价 .....                                          | 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)                   |
| 不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响 .....                                         | 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)               |
| 种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 .....                                 | 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)                     |
| 江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价 .....                                     | 金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060) |
| 镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用 .....                                        | 章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)                        |
| 高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响 .....                                     | 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)           |
| 黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 .....                               | 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)                    |
| 单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究 .....                                     | 叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)                      |
| 不同有机物料中的磷形态特征研究 .....                                               | 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)                    |
| 北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究 .....                                     | 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)                   |
| 燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 .....                                        | 段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)                     |
| 菌根真菌金属耐性机制研究进展 .....                                                | 陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)                         |
| 亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展 .....                                          | 沈李东 (1133)                                       |
| 《环境科学》征订启事 (830)      《环境科学》征稿简则 (846)      信息 (838, 861, 913, 935) |                                                  |

# 太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性

叶琳琳<sup>1,2</sup>, 吴晓东<sup>3</sup>, 孔繁翔<sup>2\*</sup>, 刘波<sup>1</sup>, 闫德智<sup>1</sup>

(1. 南通大学地理科学学院, 南通 226000; 2. 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; 3. 中国科学院寒区与旱区环境工程研究所, 兰州 730000)

**摘要:**以太湖流域西北部殷村港和陈东港两条入湖河流为研究对象, 于 2012 年 9 月至 2013 年 8 月每月采集表层水体样品, 测定了水温、叶绿素 a 浓度和浮游细菌丰度, 并分析了溶解性有机碳 DOC (dissolved organic carbon) 浓度及其碳稳定同位素特征值 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ )、紫外吸光度  $\text{SUVA}_{254}$  (specific UV absorbance) 以及溶解性碳水化合物浓度的变化规律。结果表明, 殷村港和陈东港  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  变化范围为  $-27.03\text{‰} \pm 0.30\text{‰} \sim -23.38\text{‰} \pm 0.20\text{‰}$ , 以外源性碳为主。浮游植物光合作用产物的释放和外源输入是河流中溶解性碳水化合物的主要来源。两条入湖河流中多糖 PCHO (polysaccharides) 和单糖 MCHO (monosaccharides) 浓度在春夏季与秋冬季具有显著差异 ( $P < 0.01$ ,  $n = 12$ ;  $P < 0.01$ ,  $n = 12$ )。这与碳水化合物的来源及组分的可利用性有关。秋冬季藻类消亡过程中释放的 PCHO 在低温下不易被降解, 容易堆积, 因此两条入湖河流总溶解性碳水化合物 TCHO (total dissolved carbohydrates) 以 PCHO 为主; 而在春夏季, 随着温度升高, PCHO 被微生物分解利用转化为 MCHO, MCHO 是 TCHO 中主要组分。

**关键词:**溶解性碳水化合物; 溶解性有机碳; 来源; 殷村港; 陈东港

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0914-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.021

## Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu

YE Lin-lin<sup>1,2</sup>, WU Xiao-dong<sup>3</sup>, KONG Fan-xiang<sup>2\*</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>, YAN De-zhi<sup>1</sup>

(1. School of Geography Science, Nantong University, Nantong 226000, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Surface water samples of Yincungang and Chendonggang Rivers were collected from September 2012 to August 2013 in Lake Taihu. Water temperature, Chlorophyll a and bacterial abundance were analyzed, as well as dissolved organic carbon (DOC) concentrations, stable carbon isotope of DOC ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ ), specific UV absorbance ( $\text{SUVA}_{254}$ ) and dissolved carbohydrates concentrations.  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  ranged from  $-27.03\text{‰} \pm 0.30\text{‰}$  to  $-23.38\text{‰} \pm 0.20\text{‰}$ , indicating a terrestrial source. Both the autochthonous and allochthonous sources contributed to the carbohydrates pool in the tributaries. Significant differences in PCHO (polysaccharides) and MCHO (monosaccharides) concentrations were observed between spring-summer and autumn-winter ( $P < 0.01$ ,  $n = 12$ ;  $P < 0.01$ ,  $n = 12$ ), which might be caused by the variation in the sources and bioavailability of carbohydrates. PCHO contributed a major fraction to TCHO (total dissolved carbohydrates) in autumn and winter, which could be explained by the accumulation of undegradable PCHO limited by the low water temperature; MCHO contributed a major fraction to TCHO in spring and summer, which might be caused by the transformation from PCHO by microbes at high water temperature.

**Key words:** dissolved carbohydrates; dissolved organic carbon; sources; Yincungang River; Chendonggang River

溶解性有机碳 DOC (dissolved organic carbon) 是溶解性有机物 DOM (dissolved organic matter) 中重要组分<sup>[1]</sup>, 是浮游细菌生长代谢的重要碳源, 在微生物网循环中具有重要作用, 其生物可利用性一直是生态系统研究的重点与热点。内源和外源性 DOC 具有不同物质结构组成, 会影响细菌对其吸收利用以及碳素在食物网中的传递效率<sup>[2]</sup>。由于不同来源 DOC 的  $\delta^{13}\text{C}$  存在差异, 因此通过碳稳定同位素特征值可以追溯其来源<sup>[3]</sup>。比如在美国威斯康星州

Northern Highland 湖区的 32 个湖泊中研究发现, 部分湖泊  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  与陆源 C3 植物碳稳定同位素特征值 ( $-27\text{‰}$ ) 接近, 表明外源输入是 DOC 的主要来源<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2014-09-06; 修订日期: 2014-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41201076, 41001032); 湖泊与环境国家重点实验室开放基金项目 (2012SKL006)

作者简介: 叶琳琳 (1981 ~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为富营养化湖泊碳素循环, E-mail: yelinlin8164@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: fxxkong@niglas.ac.cn

紫外吸光度值  $SUVA_{254}$  可以表征 DOC 中腐殖质含量<sup>[5]</sup>,在日本 Kasumigaura 湖研究发现,入湖河流  $SUVA_{254}$  高于湖水<sup>[6,7]</sup>. 以往的研究认为外源性 DOC 中腐殖质含量较高,不易被细菌分解利用<sup>[8]</sup>. 但近来有研究表明<sup>[9]</sup>,腐殖质可以作为细菌生长碳源,在 Mississippi 和 Pear River 细菌生产力与  $SUVA_{254}$  显著正相关;但也有研究<sup>[10]</sup>认为外源性 DOC 的可利用效率低,在被细菌利用过程中会转化成二氧化碳,而不能传递到更高一级食物链.

一般认为内源性 DOC 由于富含碳水化合物、氨基酸等活性物质容易被细菌分解利用<sup>[11,12]</sup>. 碳水化合物是 DOM 中主要组分,其所占比例为 1% ~ 30%,它们主要来源于浮游植物光合作用产物的释放,被浮游动物捕食后破损细胞产生的可溶物以及各种陆源输入如地表径流,沉积物再悬浮<sup>[13,14]</sup>. 碳水化合物是浮游植物光合作用的基础产物,容易被细菌生长代谢所利用<sup>[15,16]</sup>,并且通过生物化学反应可以转化成其它重要的生物聚集体如蛋白质、脂肪和核酸<sup>[17]</sup>. 此外,碳水化合物能与有机物形成腐殖质,对重金属离子有极强的吸附和络合能力,影响重金属离子的生态和地球化学行为<sup>[18]</sup>.

目前在海洋、湖泊以及河口<sup>[17,18]</sup>等水生生态系统中已开展了大量关于 DOC 来源与碳水化合物分布特征的研究,但还没有关于富营养化湖泊入湖河流中 DOC 来源及碳水化合物生物可利用性的相关报道. 有研究表明在太湖河口区域,外源性碳成为浮游细菌生长代谢的主要碳源<sup>[19]</sup>. 作为太湖 15 条主要入湖河流,陈东港和殷村港入湖流量在环太湖流域河流中分别为第一和第三<sup>[20,21]</sup>,其中陈东港年平均水量达到 21 亿  $m^3$ ,占总入湖水量的 37%<sup>[22]</sup>,殷村港年平均水量为 11 亿  $m^3$ <sup>[23]</sup>. 因此太湖入湖河流中溶解性有机碳来源及其重要组分如碳水化合物,对于太湖水体微食物网碳循环具有重要影响. 本文以殷村港和陈东港两条入湖河流为研究对象,进行了为期一年的水样采集,分析了溶解性有机碳的来源,水温、叶绿素 a、浮游细菌丰度、溶解性有机碳、 $SUVA_{254}$  以及各种溶解性碳水化合物浓度的变化规律,探讨了碳水化合物的来源、各组分之间的转化关系及生物可利用性,以期为深入研究太湖流域水体碳素循环机制提供重要参考依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

陈东港位于宜兴丁蜀镇境内,西起东氿,东入太

湖. 殷村港位于宜兴市东北部,为太滬南运河入太湖断面. 两条入湖河流采样点分别距入湖处 3 km,用 GPS 定位系统对研究区采样点精确定位(图 1),于 2012 年 9 月至 2013 年 8 月,每月采集水体表层样品. 浮游细菌样品用 37% 甲醛固定,水样置于有冰袋的保温箱内在 4 h 内带回实验室做进一步处理.

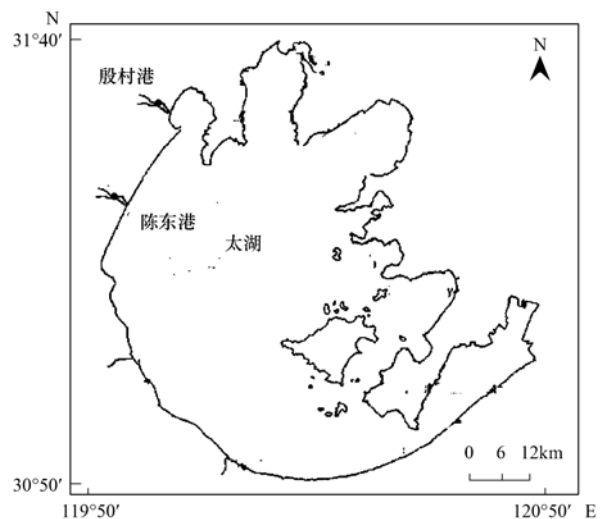


图 1 入湖河流采样点设置示意

Fig. 1 Location of the sampling sites in the tributaries

### 1.2 分析方法

叶绿素 a (Chl-a) 经 Whatman (GF/C) 滤膜过滤后,用乙醇萃取分光光度法测定<sup>[24]</sup>.

4',6'-二脒基-2-苯基吲哚 DAPI (4',6'-diamidino-2-phenylindole, Sigma 公司)染色法测定浮游细菌丰度 BA (bacterial abundance),将甲醛固定的样品,用无菌 Milli-Q 水稀释 10 倍,取 5 mL 水样,加适量的 DAPI 工作液至终浓度为  $2 \mu g \cdot mL^{-1}$ ,染色 10 min. 用手持式真空泵在压力  $< 10 \text{ mmHg}$  ( $1333 \text{ Pa}$ ) 下过滤到黑色滤膜上(孔径  $0.22 \mu m$ ),滴加无荧光的浸镜油后,用表面荧光显微镜 (Zeiss Axiovent 135 M, Germany) 在  $16 \times 100$  放大倍数下,随机计数 20 个视野,然后将视野内的细菌个数换算成每毫升水样中的实际细菌细胞数 ( $cells \cdot mL^{-1}$ )<sup>[25]</sup>.

经 Whatman (GF/F, 5 h,  $450^\circ C$ ) 滤膜过滤后水样用于测定 DOC 及其碳稳定同位素和  $SUVA_{254}$ . 溶解性有机碳 (DOC) 使用总有机碳分析仪 (Shimadzu TOC-V CPN, 岛津) 进行测定,标准物质为邻苯二甲酸氢钾. 过滤后水样冷冻干燥,使用 Finnigan MAT 公司的 Delta<sup>plus</sup> advantage 型稳定同位素质谱仪测定碳稳定同位素值,测定精度为 0.1‰.  $SUVA_{254} = [DOC]/A_{254}$ ,  $A_{254}$  为过滤后水样在 254 nm 处吸光

度<sup>[5]</sup>.

使用 2,4,6-反式 2-吡啶基三嗪 TPTZ (2,4,6-tripyridyl-s-tri-azine) 比色法测定总溶解性碳水化合物 TCHO (total dissolved carbohydrates), 多糖 PCHO (polysaccharides) 和单糖 MCHO (monosaccharides), 标准物质为葡萄糖. 其反应原理是还原性糖和 TPTZ 反应生成紫色络合物<sup>[26]</sup>. 测定 TCHO, 取 4 mL 水样和 0.4 mL 1 mol·L<sup>-1</sup> HCl 放置于安瓿瓶里, 封口后 150℃ 放置 1 h. 水解后, 用 0.4 mL 1 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 中和. 取 1 mL 水解溶液, 1 mL 0.7 mmol·L<sup>-1</sup> 铁氰化钾, 在沸水中保温 10 min. 然后加入 1 mL 2 mmol·L<sup>-1</sup> 氯化铁溶液和 2 mL 2.5 mmol·L<sup>-1</sup> TPTZ, 混匀后, 放置 30 min, 用紫外分光光度计在波长 595 nm 处测定. 所有的操作在黑暗处进行. 单糖 MCHO 的测定是取水样直接比色, 不需要水解. 多糖 PCHO 为 [TCHO] - [MCHO]. 铁氰化钾 (0.7 mmol·L<sup>-1</sup>): 400 mg 氢氧化钠, 20 g 碳酸钠, 230 mg K<sub>3</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>] 溶于 1 L 水. 氯化铁 (2 mmol·L<sup>-1</sup>): 164 g 无水羧酸钠, 42 g 柠檬酸和 300 g 醋酸溶于 1 L 水. 32.4 mg 无水三氯化铁溶于 100 mL 上述溶液. TPTZ (2.5 mmol·L<sup>-1</sup>): 1 mL 3 mol·L<sup>-1</sup> 醋酸中溶解 0.78 mg TPTZ.

### 1.3 数据分析

殷村港和陈东港各参数的季节差异使用 SPSS 16.0 软件配对样本 *t* 检验进行, 显著性水平 *P* = 0.05. 使用皮尔森 (Pearson) 相关系数法分析碳水化合物与环境因子相关性.

## 2 结果与分析

### 2.1 殷村港、陈东港的水温、叶绿素 a 和浮游细菌丰度的变化

殷村港、陈东港水温先减小再增大, 变幅分别为 5.75 ~ 31.37℃、4.98 ~ 30.90℃, 水温最大值和最小值都分别出现在 2013 年 7 月和 1 月 [图 2 (a)].

殷村港叶绿素 a 浓度从 2012 年 9 ~ 11 月逐渐减少, 并在 11 月出现最低值 3.46 μg·L<sup>-1</sup> ± 0.21 μg·L<sup>-1</sup>, 然后波动并逐渐增加, 在 2013 年 7 月出现最大值 40.47 μg·L<sup>-1</sup> ± 3.60 μg·L<sup>-1</sup>. 在 2012 年 11 月到 2013 年 3 月期间, 陈东港叶绿素 a 浓度低于 10.00 μg·L<sup>-1</sup>, 但在 2013 年 4 月达到最大值 137.27 μg·L<sup>-1</sup> ± 8.10 μg·L<sup>-1</sup>, 然后逐渐降低, 但在 2013 年 8 月达到 98.21 μg·L<sup>-1</sup> ± 6.20 μg·L<sup>-1</sup> [图 2 (b)].

殷村港浮游细菌丰度有显著波动, 其变幅为

$1.80 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1} \pm 1.50 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1} \sim 5.89 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1} \pm 4.00 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ . 陈东港浮游细菌丰度在 2012 年 12 月到 2013 年 5 月期间呈现增长规律, 然后减少, 但在 2013 年 8 月达到最大值  $8.80 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1} \pm 2.00 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ . (2012 年 9 月浮游细菌样品丢失) [图 2 (c)].

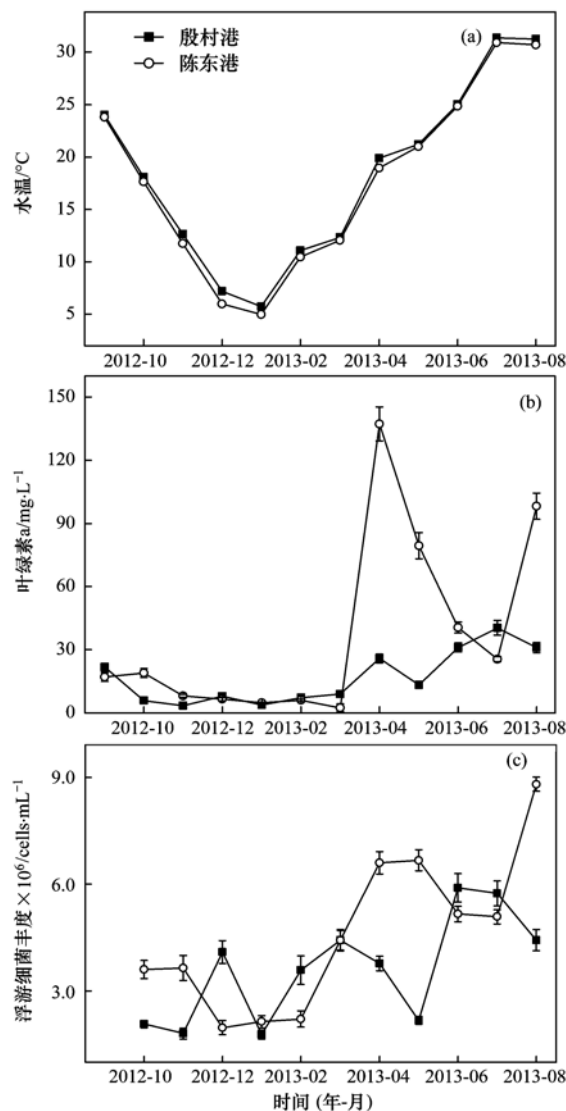


图 2 水温、叶绿素 a 和浮游细菌丰度的变化

Fig. 2 Variation of water temperature, Chl-a and bacterial abundance

### 2.2 殷村港、陈东港溶解性有机碳浓度, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ 和 $\text{SUVA}_{254}$

殷村港、陈东港 DOC 浓度从 2012 年 9 月开始逐渐增加, 并都在 2013 年 1 月达到最大值, 分别为  $265.49 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 9.36 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $247.84 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 27.69 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 此后, DOC 浓度呈现显著波动, 分别在 2013 年 3 月和 8 月出现高值. 同一时段的两条入湖河流 DOC 浓度没有显著差异 [图

3(a)].

在2012年9月到2013年1月期间,殷村港和陈东港 $\delta^{13}\text{C}$ 变化规律相反,其中殷村港 $\delta^{13}\text{C}$ 在2012年10月出现一低值 $-26.33\text{‰} \pm 0.20\text{‰}$ ,而陈东港在2012年11月达到最大值 $-23.38\text{‰} \pm 0.20\text{‰}$ .此后,两条入湖河流 $\delta^{13}\text{C}$ 变化规律基本一致[图3(b)].殷村港和陈东港 $\delta^{13}\text{C}$ 在春夏季与秋冬季具有显著差异( $P < 0.05$ ,  $n = 12$ ).

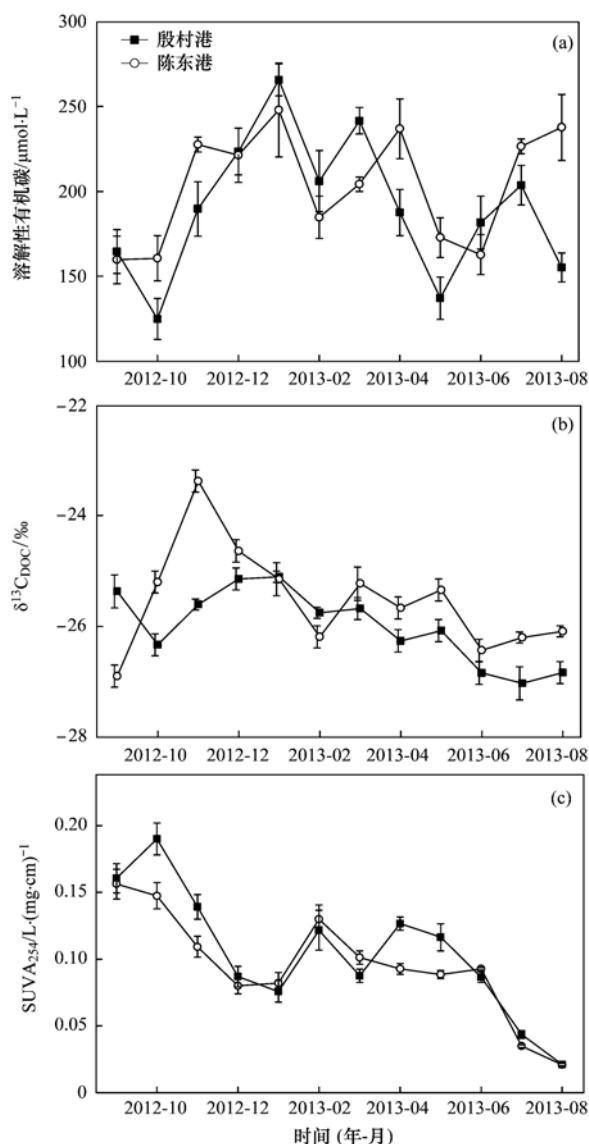


图3 溶解性有机碳浓度、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ 和 $\text{SUVA}_{254}$ 变化

Fig. 3 Variation of dissolved organic carbon concentrations  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  and  $\text{SUVA}_{254}$

殷村港、陈东港 $\text{SUVA}_{254}$ 变化规律基本一致,呈现逐渐减少趋势,变幅分别为 $0.02 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{cm})^{-1} \pm 0.0010 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{cm})^{-1} \sim 0.19 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{cm})^{-1} \pm 0.012 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{cm})^{-1}$ 、 $0.02 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{cm})^{-1} \pm 0.0010 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{cm})^{-1} \sim 0.16 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{cm})^{-1} \pm$

$0.011 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{cm})^{-1}$  [图3(c)].

## 2.3 总溶解性碳水化合物 TCHO、多糖 PCHO、单糖 MCHO 浓度变化及碳水化合物与环境因子相关分析

两条入湖河流 TCHO、PCHO 和 MCHO 浓度变化规律在研究期间基本一致. 其中 TCHO 呈现较大波动, 殷村港和陈东港 TCHO 浓度变幅分别为  $11.75 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.81 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \sim 64.58 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 5.50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $17.20 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.12 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \sim 57.48 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 4.05 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 都在2013年5月达到最大值, 而在2012年12月也都出现高值[图4(a)].

殷村港和陈东港 PCHO 浓度从2012年9月开始逐渐增加, 并都在2012年12月达到最大值, 分别

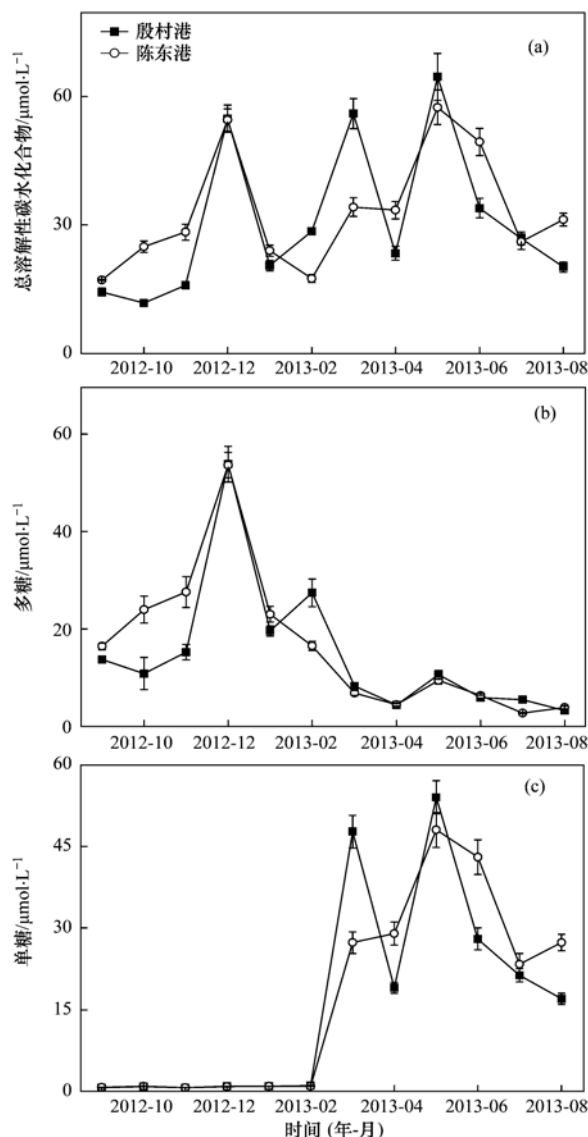


图4 总溶解性碳水化合物,多糖和单糖的变化

Fig. 4 Variation of total dissolved carbohydrates, polysaccharides and monosaccharides



为  $53.86 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \pm 3.67 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $53.66 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \pm 2.60 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ . 此后, PCHO 浓度逐渐减少[图 4(b)].

在 2012 年 9 月到 2013 年 2 月期间, 两条入湖河流 MCHO 都维持在低浓度水平 ( $< 1.00 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 此后, 殷村港和陈东港 MCHO 浓度显著增加, 并都在 2013 年 5 月达到最大值, 分别为  $54.00 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \pm 3.03 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $48.00 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \pm 3.20 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  [图 4(c)]. 两条入湖河流 PCHO 和

MCHO 浓度在春夏季与秋冬季具有显著差异 ( $P < 0.01$ ,  $n = 12$ ;  $P < 0.01$ ,  $n = 12$ ).

为明确入湖河流 DOC 以及各种碳水化合物和环境因子之间的相关性, 对 DOC、TCHO、MCHO、PCHO 与环境因子进行相关分析, 结果见表 1. 水温与叶绿素 a, 浮游细菌丰度和 MCHO 显著正相关, 与 DOC 显著负相关. 叶绿素 a 与浮游细菌丰度, MCHO 显著正相关. PCHO 与 MCHO 显著负相关.

表 1 碳水化合物与环境因子相关分析<sup>1)</sup> ( $n = 12$ )

Table 1 Pearson correlation coefficient of carbohydrates and environmental factors ( $n = 12$ )

|                     | WT        | Chl-a    | lg(BA)   | DOC       | TCHO     | PCHO      | MCHO     | TCHO/DOC | SUVA <sub>254</sub> |
|---------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|---------------------|
| WT                  | 1.000     |          |          |           |          |           |          |          |                     |
| Chl-a               | 0.483 *   | 1.000    |          |           |          |           |          |          |                     |
| lg(BA)              | 0.659 **  | 0.714 ** | 1.000    |           |          |           |          |          |                     |
| DOC                 | -0.413 *  | 0.122    | 0.09     | 1.000     |          |           |          |          |                     |
| TCHO                | -0.125    | 0.146    | 0.226    | 0.092     | 1.000    |           |          |          |                     |
| PCHO                | -0.687 ** | -0.416 * | -0.436 * | 0.240     | 0.250    | 1.000     |          |          |                     |
| MCHO                | 0.425 *   | 0.447 *  | 0.539 ** | -0.106    | 0.663 ** | -0.559 ** | 1.000    |          |                     |
| TCHO/DOC            | 0.044     | 0.102    | 0.125    | -0.267    | 0.911 ** | 0.091     | 0.711 ** | 1.000    |                     |
| SUVA <sub>254</sub> | -0.318    | -0.359   | -0.526 * | -0.520 ** | -0.280   | 0.153     | -0.358   | -0.104   | 1.000               |

1) \* 表示显著相关  $P < 0.05$ , \*\* 表示极显著相关  $P < 0.01$ ; lg(BA): 细菌丰度的 lg 转化值; WT: water temperature

### 3 讨论

#### 3.1 溶解性有机碳的来源

本研究中两条入湖河流  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  变化范围与美国富营养化湖泊的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  值域 ( $-27.6\text{‰} \sim -23.7\text{‰}$ ) 基本一致<sup>[27]</sup>. 有研究发现, 藻类水华过程对  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  有影响, 日本 Kasumigaura 湖  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  随着叶绿素 a 浓度的增加而增加; 此外, 伴随着湖泊初级生产力的增加, 碳同位素分馏作用减弱, 引起春季湖水的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  ( $-24.7\text{‰}$ ) 高于秋季 ( $-25.8\text{‰}$ )<sup>[3]</sup>. 本研究发现两条入湖河流的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  在春夏季 ( $-26.14\text{‰} \pm 0.59\text{‰}$ ) 与秋冬季 ( $-25.40\text{‰} \pm 0.90\text{‰}$ ) 具有显著差异, 但春夏季  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  均值与太湖外源性 DOC 的碳稳定同位素值<sup>[28]</sup> ( $-27\text{‰}$ ) 更接近, 这与在富营养化水库 Rophemel 的研究结果一致<sup>[29]</sup>, 表明两条入湖河流 DOC 中内源和外源所占比例在不同季节具有差异, 这种差异是由于外源输入和藻源性 DOC 释放共同变化的作用所引起. 在秋冬季, 本研究区域属于枯水期<sup>[30]</sup>, 因此河流中外源输入所占比例较低, 但藻类水华在秋冬季由于温度的迅速降低会发生细胞裂解, 释放大量内源性 DOC<sup>[31~33]</sup>. 如陈东港 2012 年 11 月  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  ( $-23.38\text{‰} \pm 0.20\text{‰}$ ) 与已报道的<sup>[34]</sup> 太湖浮游植物的碳稳定同位素均值

( $-23.2\text{‰} \pm 1.20\text{‰}$ ) 非常接近; 在春夏季, 研究区域属于丰水期<sup>[30]</sup>, 外源输入所占比例较高, 藻类水华所释放的 DOC 由于生物可利用性高, 在高温下会被细菌迅速分解利用, 因此入湖河流春夏季藻类水华的发生也不足以改变 DOC 的外源性同位素特征. 利用双组分混合模型<sup>[28, 35]</sup>, 估算了外源性碳对河流中 DOC 的贡献比例, 在春夏季和秋冬季分别为  $77\% \pm 15\%$  和  $58\% \pm 24\%$ . 此外, 本研究发现, 叶绿素 a 浓度与 DOC 之间不具有显著正相关性(表 1), 表明藻类水华不是 DOC 的主要来源, 这一结论也与通过同位素分析的结论一致.

#### 3.2 环境因子对溶解性有机碳浓度变化的影响

影响 DOC 浓度变化的因素很多, 包括叶绿素 a 浓度, 水温, 光化学氧化和颗粒态有机物的共沉淀, 以及细菌的降解作用等<sup>[36~38]</sup>. 本研究发现, 水温与浮游细菌丰度正相关, 而与 DOC 显著负相关(表 1), 这一结果与 Kim 等<sup>[39]</sup> 在日本海的研究结果一致. 在高温下, 细菌生长代谢速度快, 能快速分解有机质<sup>[40]</sup>, 因此水温与 DOC 之间具有负相关性.

SUVA<sub>254</sub> 可以用来表征 DOC 中类腐殖质物质的含量. 在 Balaton 湖和 Zala 河研究发现, 腐殖质物质是可利用 DOC 中重要组分<sup>[41]</sup>. 本研究发现, SUVA<sub>254</sub> 与浮游细菌丰度显著负相关(表 1), 表明入湖河流中类腐殖质物可以被细菌利用, 但由于没有

测定细菌生产力 BP (bacterial production) 和呼吸作用 BR (bacterial respiration), 因此无法估算细菌对 DOC 的利用效率。

### 3.3 碳水化合物的来源

浮游植物的光合作用是碳水化合物的主要来源<sup>[17]</sup>。一般而言,在春夏季浮游植物生长旺盛的季节,通过光合作用形成的各种碳水化合物容易积累和释放。因此,TCHO、PCHO、MCHO 与叶绿素 a 的相关关系一直是研究的热点问题。但大量研究结果表明,TCHO、PCHO、MCHO 与叶绿素 a 之间并非存在简单的相关关系<sup>[14, 17, 42]</sup>。研究发现<sup>[14]</sup>,胶州湾水体中 TCHO、PCHO 和 MCHO 与叶绿素 a 之间不具有显著相关性。本研究发现,TCHO 与叶绿素 a 浓度之间不具有显著相关性(表 1),可能原因是 TCHO 受到浮游植物种类组成、生长周期和营养盐含量等多种因素影响<sup>[43]</sup>。此外,外源输入,沉积物中底栖生物的释放等也是 TCHO 的重要来源<sup>[44]</sup>。有研究发现,受到外源输入的影响,胶州湾水体 TCHO 浓度在冬季达到一高值<sup>[14]</sup>。PCHO 是浮游植物光合作用的直接产物,有研究发现<sup>[45]</sup>,在藻类水华形成过程中,PCHO 会形成透明胞外聚合颗粒物 TEP (transparent exopolymer particles),将溶解性有机碳转为颗粒态有机碳,因此本研究中叶绿素 a 浓度与 PCHO 之间呈现负相关(表 1),但本文没有 TEP 的相关数据来支持之一结论。而两条入湖河流中 MCHO 浓度与叶绿素 a 浓度显著正相关(表 1),这与 Hung 等<sup>[42]</sup>在 Galveston Bay 研究结果一致,表明浮游植物是 MCHO 的重要来源。

### 3.4 各碳水化合物组分的生物可利用性

TCHO 在目前可识别的 DOC 组分中所占比例最高,是细菌生长代谢的重要物质基础。Guéguen 等<sup>[46]</sup>在 Yukon River 研究发现 TCHO 在 DOC 中的比例为 25%。Børshheim 等<sup>[47]</sup>研究发现,在 3 个不同的海洋环境中,TCHO 占 DOC 的比例为 15% ~ 21%。本研究发现,殷村港和陈东港 TCHO/DOC 变化范围为 7.74% ~ 47.05%。有研究表明 TCHO/DOC 可以表征 TCHO 的生物可利用性。Hung 等<sup>[48]</sup>研究发现在 Trinity River,水温与 TCHO/DOC 显著负相关,表明温度是影响微生物利用碳水化合物的主要因素。在印度 Mandovi 河口<sup>[49]</sup>,细菌数量与 TCHO/DOC 显著负相关,表明细菌通过分解碳水化合物来提供其物质代谢的主要碳源。但是本研究并没有发现这些相关性,这与 Wu 等<sup>[50]</sup>的研究结果一致,可能原因是河流生态系统中细菌利用碳水化合

物的生长代谢机制比较复杂。此外,细菌对碳源的利用还可能受到低浓度营养盐限制的作用<sup>[51]</sup>。

本研究发现,在秋冬季,两条入湖河流 TCHO 以 PCHO 为主,PCHO 在 TCHO 中所占比例为 92% ~ 98%。而在春夏季,MCHO 是 TCHO 中的主要组分,所占比例为 80% ~ 89%。这可能与碳水化合物的来源及其生物可利用性有关<sup>[48]</sup>。在秋冬季,随着温度降低,藻类消亡过程中细胞裂解会释放大量 PCHO<sup>[32, 33]</sup>,但由于温度较低,不易被微生物降解。因此 PCHO 容易累积,表现为 PCHO 是 TCHO 主要组分。而春夏季,碳水化合物的来源包括内源和外源。在黄海研究发现,叶绿素 a 浓度高的区域出现较高的 MCHO/TCHO 比值<sup>[50]</sup>。本研究也发现,随着温度升高和叶绿素 a 浓度的增加,春夏季 MCHO/TCHO 比值要高于秋冬季。其次,外源输入的碳水化合物在进入河流生态系统之前在环境中已被降解和矿化,MCHO 是其主要组分<sup>[52]</sup>。有研究发现在 Chena 河流,MCHO 所占比例为 89% ± 10%<sup>[53]</sup>。

此外,碳水化合物各组分之间存在相互转换关系,浮游植物释放的 PCHO 生物可利用性较高<sup>[42]</sup>,能够被胞外酶逐渐分解为 MCHO,或者被外媒催化分解断裂一个糖苷键释放 MCHO<sup>[15]</sup>。本研究发现水温与 PCHO 浓度显著负相关,与 MCHO 浓度显著正相关,PCHO 与 MCHO 之间显著负相关(表 1)。在春夏季随着温度升高,浮游植物光合作用加强,大量 PCHO 被生产并被释放到水体中,但本研究发现春夏季 PCHO 浓度低,MCHO 浓度高,表明部分单糖是由多糖水解而来<sup>[54, 55]</sup>,并且这个过程转化周期很短,这与吴冠伟<sup>[56]</sup>对东海碳水化合物的日变化观测结果一致,在 12:00 ~ 21:00 期间,东海水体中 PCHO 浓度逐渐降低,而 MCHO 浓度逐渐升高。

## 4 结论

(1)殷村港和陈东港溶解性有机碳的来源以外源为主,碳水化合物的主要来源包括内源如浮游植物光合作用产物的释放和外源输入。两条入湖河流 MCHO 浓度与叶绿素 a 浓度和水温显著正相关。

(2)两条入湖河流 PCHO 和 MCHO 浓度在春夏季与秋冬季具有显著差异。在秋冬季,殷村港和陈东港 PCHO 是 TCHO 主要组分;而在春夏季,MCHO 是 TCHO 主要组分。这与碳水化合物的来源及其可降解性有关。PCHO 与 MCHO 浓度之间显著的负相关性表明部分单糖是由多糖水解而来。

(3)殷村港和陈东港水体中 DOC 和 PCHO 与



水温显著负相关,表明温度是影响 DOC 和 PCHO 浓度变化的重要因子,但是 TCHO/DOC 和浮游细菌丰度、水温之间没有显著负相关性,表明河流生态系统中细菌对碳水化合物的利用机制比较复杂,可能受到低浓度营养盐的限制作用。

#### 参考文献:

- [1] Li W, Wu F, Liu C, *et al.* Temporal and spatial distributions of dissolved organic carbon and nitrogen in two small lakes on the Southwestern China Plateau [J]. *Limnology*, 2008, **9**(2):163-171.
- [2] Barros N, Mendonça R, Huszar V, *et al.* Carbon fluxes in an eutrophic urban lake [J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2014, **16**: EGU2014-13335.
- [3] Nara F, Imai A, Yoneda M, *et al.* Seasonal variation in sources of dissolved organic carbon in a lacustrine environment revealed by paired isotopic measurements ( $\Delta^{14}\text{C}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ ) [J]. *Radiocarbon*, 2007, **49**(2): 767-773.
- [4] Bade D L, Carpenter S R, Cole J J, *et al.* Sources and fates of dissolved organic carbon in lakes as determined by whole-lake carbon isotope additions [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **84**(2): 115-129.
- [5] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(20): 4702-4708.
- [6] Imai A, Fukushima T, Matsushige K, *et al.* Fractionation and characterization of dissolved organic matter in a shallow eutrophic lake, its inflowing rivers, and other organic matter sources [J]. *Water Research*, 2001, **35**(17): 4019-4028.
- [7] Kim Y H, Lee S H, Imai A, *et al.* Characterization of dissolved organic matter in a shallow eutrophic lake and inflowing waters [J]. *Environmental Engineering Research*, 2002, **7**(2): 93-101.
- [8] Moran M A, Hodson R E. Bacterial production on humic and nonhumic components of dissolved organic carbon [J]. *Limnology and Oceanography*, 1990, **35**(8): 1744-1756.
- [9] Duan S, Bianchi T S, Shiller A M, *et al.* Variability in the bulk composition and abundance of dissolved organic matter in the lower Mississippi and Pearl rivers [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112** (G2): G02024, doi: 10.1029/2006JG000206.
- [10] Karlsson J, Jansson M, Jonsson A. Respiration of allochthonous organic carbon in unproductive forest lakes determined by the keeling plot method [J]. *Limnology and Oceanography*, 2007, **52**(2): 603-608.
- [11] Søndergaard M, Borch N H, Riemann B. Dynamics of biodegradable DOC produced by freshwater plankton communities [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2000, **23**(1): 73-83.
- [12] Meon B, Kirchman D L. Dynamics and molecular composition of dissolved organic material during experimental phytoplankton blooms [J]. *Marine Chemistry*, 2001, **75**(3): 185-189.
- [13] Thornton D C O. Spatiotemporal distribution of dissolved acid polysaccharides (dAPS) in a tidal estuary [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(5): 1449-1460.
- [14] Yang G P, Zhang Y P, Lu X L, *et al.* Distributions and seasonal variations of dissolved carbohydrates in the Jiaozhou Bay, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, **88**(1): 12-20.
- [15] Hayakawa K. Seasonal variations and dynamics of dissolved carbohydrates in Lake Biwa [J]. *Organic Geochemistry*, 2004, **35**(2): 169-179.
- [16] Hanisch K, Schweitzer B, Simon M. Use of dissolved carbohydrates by planktonic bacteria in a mesotrophic lake [J]. *Microbial Ecology*, 1996, **31**(1): 41-55.
- [17] Mykkestad S M, Børsheim K Y. Dynamics of carbohydrates in the Norwegian Sea inferred from monthly profiles collected during 3 years at 66°N, 2°E [J]. *Marine Chemistry*, 2007, **107**(4): 475-485.
- [18] Hung C C, Guo L D, Santschi P H, *et al.* Distributions of carbohydrate species in the Gulf of Mexico [J]. *Marine Chemistry*, 2003, **81**(3-4): 119-135.
- [19] Gao G, Qin B Q, Sommaruga R, *et al.* The bacterioplankton of Lake Taihu, China: abundance, biomass, and production [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 177-188.
- [20] 石亚东, 莫李娟, 程媛华. 太湖水量分配方案实施保障措施探讨[J]. *水利经济*, 2012, **30**(5): 49-51.
- [21] Qin B Q, Xu P Z, Wu Q L, *et al.* Environmental issues of Lake Taihu, China [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 3-14.
- [22] 申金玉, 甘升伟, 陈润, 等. 环太湖出入湖水量影响因素分析及对策措施研究[J]. *水资源保护*, 2011, **27**(6): 48-52.
- [23] 杨晓英, 罗兴章, 郑正, 等. 平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3051-3056.
- [24] Páipista É, Ács É, Böddi B. Chlorophyll- $\alpha$  determination with ethanol — a critical test [J]. *Hydrobiologia*, 2002, **485**(1-3): 191-198.
- [25] 王博雯, 汤祥明, 高光, 等. 博斯腾湖细菌丰度时空分布及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2014, **34**(7): 1812-1821.
- [26] Mykkestad S M, Skånøy E, Hestmann S. A sensitive and rapid method for analysis of dissolved mono- and polysaccharides in seawater [J]. *Marine Chemistry*, 1997, **56**(3-4): 279-286.
- [27] de Kluijver A, Schoon P L, Downing J A, *et al.* Stable carbon isotope biogeochemistry of lakes along a trophic gradient [J]. *Biogeosciences Discuss*, 2014, **11**: 6615-6646.
- [28] 曾庆飞. 太湖悬浮颗粒稳定同位素特征及生态学意义研究[D]. 南京: 中国科学院, 2008. 73-74.
- [29] Pierson-Wickmann A C, Gruau G, Jardé E, *et al.* Development of a combined isotopic and mass-balance approach to determine dissolved organic carbon sources in eutrophic reservoirs [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(3): 356-366.

- [30] Yang S, Liu P. Strategy of water pollution prevention in Taihu Lake and its effects analysis [J]. Journal of Great Lakes Research, 2010, **36**(1): 150-158.
- [31] 叶琳琳, 史小丽, 吴晓东, 等. 西太湖秋季蓝藻水华过后细胞裂解对溶解性有机碳影响[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(1): 131-136.
- [32] Ye L L, Shi X L, Wu X D, *et al.* Phytoplankton cell lysis after water bloom in a eutrophic freshwater Lake Taihu (China) [J]. International Review of Hydrobiology, 2011, **96**(6): 709-719.
- [33] Ye L L, Shi X, Wu X D, *et al.* Dynamics of dissolved organic carbon after a cyanobacterial bloom in hypereutrophic Lake Taihu (China) [J]. Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters, 2011, **41**(4): 382-388.
- [34] Xu J, Zhang M, Xie P. Stable carbon isotope variations in surface bloom scum and subsurface seston among shallow eutrophic lakes [J]. Harmful Algae, 2007, **6**(5): 679-685.
- [35] Tan F C, Strain P M. Organic carbon isotope ratios in recent sediments in the St Lawrence estuary and the Gulf of St Lawrence [J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1979, **8**(3): 213-225.
- [36] Gobler C J, Sañudo-Wilhelmy S A. Cycling of colloidal organic carbon and nitrogen during an estuarine phytoplankton bloom [J]. Limnology and Oceanography, 2003, **48**(6): 2314-2320.
- [37] Minor E C, Simjouw J P, Mulholland M R. Seasonal variations in dissolved organic carbon concentrations and characteristics in a shallow coastal bay [J]. Marine Chemistry, 2006, **101**(3-4): 166-179.
- [38] Lindell M J, Granéli W, Tranvik L J. Enhanced bacterial growth in response to photochemical transformation of dissolved organic matter [J]. Limnology and Oceanography, 1995, **40**(1): 195-199.
- [39] Kim T H, Kim G. Factors controlling the C:N:P stoichiometry of dissolved organic matter in the N-limited, cyanobacteria-dominated East/Japan Sea [J]. Journal of Marine Systems, 2013, **115-116**: 1-9.
- [40] Pomeroy L R, Wiebe W J. Temperature and substrates as interactive limiting factors for marine heterotrophic bacteria [J]. Aquatic Microbial Ecology, 2001, **23**(2): 187-204.
- [41] Tóth N, Vörös L, Mózes A, *et al.* Biological availability and humic properties of dissolved organic carbon in Lake Balaton (Hungary) [J]. Hydrobiologia, 2007, **592**(1): 281-290.
- [42] Hung C C, Tang D G, Warnken K W, *et al.* Distributions of carbohydrates, including uronic acids, in estuarine waters of Galveston Bay [J]. Marine Chemistry, 2001, **73**(3-4): 305-318.
- [43] 张艳萍. 中国近海溶解碳水化合物的浓度分布与影响因素[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010. 89-92.
- [44] de Brouwer J F C, de Deckere E M G T, Stal L J. Distribution of extracellular carbohydrates in three intertidal mudflats in Western Europe [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, **56**(2): 313-324.
- [45] Engel A, Thoms S, Riebesell U, *et al.* Polysaccharide aggregation as a potential sink of marine dissolved organic carbon [J]. Nature, 2004, **428**(6986): 929-932.
- [46] Guéguen C, Guo L D, Wang D L, *et al.* Chemical characteristics and origin of dissolved organic matter in the Yukon River [J]. Biogeochemistry, 2006, **77**(2): 139-155.
- [47] Børshiem K Y, Mykkestad S M, Sneli J A. Monthly profiles of DOC, mono- and polysaccharides at two locations in the Trondheimsfjord (Norway) during two years [J]. Marine Chemistry, 1999, **63**(3-4): 255-272.
- [48] Hung C C, Warnken K W, Santschi P H. A seasonal survey of carbohydrates and uronic acids in the Trinity River, Texas [J]. Organic Geochemistry, 2005, **36**(3): 463-474.
- [49] Khodse V B, Bhosle N B, Matondkar S G P. Distribution of dissolved carbohydrates and uronic acids in a tropical estuary, India [J]. Journal of Earth System Science, 2010, **119**(4): 519-530.
- [50] Wu G W, Yang G P. Distributions of dissolved carbohydrates in the Yellow Sea and the Northern East China Sea in early winter [J]. Journal of Coastal Research, 2013, **29**(2): 449-459.
- [51] Becquevort S, Bouvier T, Lancelot C, *et al.* The seasonal modulation of organic matter utilization by bacteria in the Danube-Black Sea mixing zone [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, **54**(3): 337-354.
- [52] Hedges J I, Cowie G L, Richey J E, *et al.* Origins and processing of organic matter in the Amazon River as indicated by carbohydrates and amino acids [J]. Limnology and Oceanography, 1994, **39**(4): 743-761.
- [53] Cai Y H, Guo L D, Douglas T A. Temporal variations in organic carbon species and fluxes from the Chena River, Alaska [J]. Limnology and Oceanography, 2008, **53**(4): 1408-1419.
- [54] Bhosle N B, Bhaskar P V, Ramachandran S. Abundance of dissolved polysaccharides in the oxygen minimum layer of the Northern Indian Ocean [J]. Marine Chemistry, 1998, **63**(1-2): 171-182.
- [55] Pakulski J D, Benner R. Abundance and distribution of carbohydrates in the ocean [J]. Limnology and Oceanography, 1994, **39**(4): 930-940.
- [56] 吴冠伟. 黄海、东海溶解碳水化合物的分布特征[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011. 41-42.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                               |                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in Chongqing .....                                                                             | WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> ( 759 )          |
| Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM <sub>2.5</sub> in Beijing During 2012-2013 .....                                                                     | YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> ( 768 )    |
| Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM <sub>1.1</sub> from Nanjing .....                                                                                                | JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> ( 774 ) |
| Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Taiyuan, China .....                                                                    | ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> ( 780 )      |
| Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM <sub>2.5</sub> in Shouzhou City .....                                                                                            | LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> ( 787 )        |
| Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China .....                                                                                                               | XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> ( 794 )              |
| Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels .....                                                   | LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> ( 801 )     |
| Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing .....                                                                        | QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> ( 809 )    |
| Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain ( Wuzhishan ) Background Station in Hainan .....                                                                         | LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> ( 817 )           |
| Organic and Element Carbon in Foliar Smoke .....                                                                                                                                              | CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> ( 824 )                |
| Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge .....                                                                                 | JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> ( 831 )      |
| Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons ( PAHs ) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas .....                               | MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> ( 839 )           |
| Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors .....                                                                                            | WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> ( 847 )           |
| Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River .....                                                         | LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> ( 855 )        |
| Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedum in Karst Underground River .....                                                          | LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo ( 862 )                               |
| Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River ..... | YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> ( 869 )             |
| Ultraviolet-Visible ( UV-Vis ) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter ( DOM ) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region .....    | WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> ( 879 )           |
| Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter ( DOM ) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season .....                                           | LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> ( 888 )         |
| Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation .....                                   | CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> ( 898 )               |
| Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors .....                                                                                      | YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei ( 905 )                             |
| Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu .....                                                                 | YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> ( 914 )     |
| Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake .....                                                                       | WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> ( 922 )       |
| Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China .....                                                          | HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> ( 928 )          |
| Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu .....                                                                                        | JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> ( 936 )          |
| Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River .....                                                                                                     | GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> ( 946 )          |
| Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus .....                                            | SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> ( 955 )           |
| Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation .....                                                                             | YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> ( 963 )              |
| Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material .....                                                                                        | WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> ( 969 )    |
| Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles .....                                                                           | HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> ( 980 )             |
| Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst .....                                                      | SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> ( 989 )           |
| Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange .....                                                                                       | WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> ( 995 )          |
| Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System .....                                           | LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> ( 1000 )        |
| Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content .....                                      | ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> ( 1006 )               |
| Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR .....                                                                                      | GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> ( 1013 )         |
| Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell .....                                                                                        | TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> ( 1021 )    |
| Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite .....                                                                                                               | HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> ( 1027 )            |
| Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China .....                                                                                | LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> ( 1037 )         |
| Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions .....                                                                                               | QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> ( 1045 )   |
| Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province .....                        | ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> ( 1053 )    |
| Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk .....                   | JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> ( 1060 )        |
| Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i> .....                                                                                                           | ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> ( 1069 ) |
| Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow .....                                     | LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> ( 1075 )         |
| Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China .....                                       | LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> ( 1084 )        |
| Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts .....                                                                                                          | YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> ( 1092 )                  |
| Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials .....                                                                                                                     | DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> ( 1098 )         |
| Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing .....                                                                                      | SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> ( 1105 )    |
| Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants .....                                                                                  | DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> ( 1117 )               |
| Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi .....                                                                                                                 | CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> ( 1123 )       |
| Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria .....                                                                                     | SHEN Li-dong ( 1133 )                                               |

# 《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)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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