

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)

南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析 薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)

2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征 李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)

结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟 郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)

2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析 沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翡 (1662)

移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO₂ 的时空分布 李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)

秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成 刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)

连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制 窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)

我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平 于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)

巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响 马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)

京杭大运河(杭州段)典型断面水生生物多样性调查及其与水环境相关性研究 陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)

合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)

重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算 潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)

千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价 唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)

九龙江流域潜在病原菌污染分析 侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)

江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响 刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)

鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征 简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)

典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征 姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)

基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析 席庆, 李兆富, 罗川 (1773)

混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究 孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)

不同波长和强度光照对水体汞还原的影响 李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)

地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响 杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)

溴化铍可见光催化降解高效氯氟菊酯的研究 彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)

石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究 常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)

电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究 卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)

典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋 甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)

颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制 何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)

石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究 周贵忠, 王兆丰, 王绚, 李文倩, 李少香 (1832)

靛基氯甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用 张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)

FePMo₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究 王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)

实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究 杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)

SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究 龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)

不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响 尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)

黄原酸化废弃污泥吸附 Cu²⁺ 研究 岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)

轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究 薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)

不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能 黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)

北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究 李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)

泰州市区重金属污染的藜袋法与路尘法评价研究 陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)

放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响 王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)

苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)

重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究 王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)

上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征 奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)

不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³C 连续标记法 谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)

污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究 郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)

石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究 李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)

大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究 虞俊超, 王宝盛, 王亚韡, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)

应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性 周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)

氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究 王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)

吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制 黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立涛, 王惜若 (1974)

牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究 焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)

针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响 杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)

城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究 王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)

铈插层黏土负载铁催化剂在 H₂S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究 孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)

脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征 祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)

固定污染源排气中 PM_{2.5} 采样方法综述 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)

产甲烷微生物研究概况 李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)

《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)

合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价

李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要: 为掌握合肥市环城河水系水环境状况, 于 2012 年 9 月~2013 年 7 月, 在城区选取 6 个典型景观水体测定水体理化指标和叶绿素浓度, 开展水体氮磷污染特征分析及富营养化评价, 结果表明: ①各水体氮、磷污染较为严重, TN 和 TP 月平均浓度均远超过国际认可的富营养化临界值; ②南淝河、黑池坝和雨花塘水体氮浓度表现出显著的逐月变化性, 南淝河水体 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 一直在较高浓度状态下波动, 而银河公园水体则呈现显著的上升趋势; ③雨花塘与黑池坝水体 TN/TP 比平均值分别为 104.7 和 158.3, 包河公园、银河公园、逍遥津公园和南淝河水体分别为 16.8、18.7、6.4 和 16.8, 表明雨花塘、黑池坝水体处于磷限制性状态, 逍遥津公园为氮限制性状态; ④聚类分析将 6 个景观水体聚为两大类, 即污染严重的黑池坝和南淝河归为一类, 其余 4 个相对封闭的水体为另一类; ⑤营养状态指数评价结果表明, 所有水体均处于富营养化状态, 且富营养化程度排序为: 银河公园 > 黑池坝 > 南淝河 > 逍遥津公园 > 雨花塘 > 包河公园。

关键词: 氮磷浓度; 景观水体; 富营养化; 叶绿素浓度; 合肥市

中图分类号: X524; X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1718-09 DOI: 10.13227/j.hjcx.2014.05.012

Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City

LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, YANG Ji-wei, ZHANG Pian-pian

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To understand the water environment regimes of the city-circling water system in Hefei City, six typical landscape waters were chosen to investigate pollution characteristics of nitrogen and phosphate and evaluate water eutrophication level according to the monitoring data of water physicochemical characteristics and chlorophyll content from September 2012 to July 2013. Study results showed that ① the six waters mentioned above have been seriously polluted by nitrogen and phosphorus loadings, with the monthly mean values of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) concentrations far exceeding the universally accepted threshold values of water eutrophication; ② the nitrogen contents in the waters of Nanfeihe River, Heichiba and Yuhuatang scenic spots exhibited a markedly monthly variation, and both TP and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in Nanfeihe River showed a fluctuated characteristic with high concentrations while presenting a significant upward trend in Yuhuatang scenic spot; ③ the average values of TN/TP ratios for Yuhuatang and Heichiba scenic spots were 104.7 and 158.3, respectively, and the ratios for Baohe Park, Yinhe Park, Xiaoyaojin Park, and city segment of Nanfeihe River were 16.8, 18.7, 6.4 and 16.8, respectively, indicating that the scenic waters of Yuhuatang and Heichiba were phosphate-limited whereas Xiaoyaojin Park was nitrogen-limited; ④ all the six scenic waters were, in general, subsumed under just two broad categories, namely Hechiba scenic spot and Nanfeihe River, which were seriously polluted, and clustered together, and the others fall into the second class; and ⑤ water eutrophication appraisal result indicated that the six waters were all in the state of eutrophication, and could be arranged in the order of eutrophication level, Yinhe Park > Heichiba scenic spot > city segment of Nanfeihe River > Xiaoyaojin Park > Yuhuatang scenic spot > Baohe Park.

Key words: nitrogen and phosphorus contents; landscape waters; eutrophication; chlorophyll content; Hefei City

随着城市化、工业化进程的不断加快和城市建设用地规模的不断扩大, 来自工业、生活、交通等领域的污染物排放量显著增加, 导致城市景观水体污染日趋加重, 水质不断恶化^[1-3]. 其中, 水体富营养化就是一个极为典型的问题^[4]. 大量调查和研究表明, 水域功能是否能够满足相应的水质目标要求, 很大程度上是由氮、磷生境要素所属水质类别所决定, 表明氮磷污染对于地表水质的重要影响^[5,6]. 景观水体是城市人居环境中重要的组成部分, 主要包括小型的天然湖库、人造湖泊、与房地产开发相配套的人造景观湖以及各种

景观用河道等. 由于城市景观水体大都地处城区的中心地域, 面积相对较小、且被街区包围, 除少数城市的景观水体能够引流入内外, 绝大多数都处于一种近似封闭或半封闭的状态, 水体流动性较差, 容易发生富营养化^[7]. 目前, 针对小型景观水体污染和富营养化问题的研究, 引起人们的关注^[8-12].

收稿日期: 2013-09-21; 修订日期: 2013-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179042)

作者简介: 李如忠(1970~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水环境保护与修复机制, E-mail: Lrz1970@163.com

合肥市是安徽省省会,因东淝河与南淝河由此发源而得名,特别是其绵延 8.7 km、面积达 137.6 hm^2 的敞开式环城公园,构成了一幅“园在城中、城在园中”的城景交融格局。1992 年,合肥市与北京、珠海一道被评为全国首批 3 个“园林城市”。同全国其他很多城市一样,近年来合肥市也面临景观水体污染和富营养化的困扰。虽然主城区已实现污水截流,但排水管网渗漏及城市非点源污染依旧威胁景观水体水质安全。李如忠等^[13]曾对合肥市主城区地表灰尘氮、磷含量开展较为系统的调查,发现灰尘中 TN、TP 平均含量分别高达 1 418.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、948.34 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明城市非点源污染具有很高的潜在风险。目前,合肥市已初步完成环城公园水系补水中水回用工程建设,但由于受生产规模和水质处理能力等的限制,补水效果还不能令人满意。尽管合肥市政府关注城区景观水体的水环境问题,但对景观水体的水质状况,仍还缺乏专门、系统的调查和深入研究。鉴于此,本研究以该市环城水系中 6 个典型景观水体为对象,在连续 11 个月水样采集和分析测试基础上,开展水体氮磷污染特征分析与富营养化状况评估,并探究影响景观水体水环境质量和导致不同水体间水质显著差异性的主要原因,以期景观水体水环境保护和水质状况改善提供科学依据。

1 研究区概况

合肥市地处安徽省中部,位于巢湖之滨,属亚热带湿润季风气候,年均气温 15.7 $^{\circ}\text{C}$,降雨量近 1 000 mm。市域总面积 7 029 km^2 ,户籍总人口 480 万。位于主城区的环城公园有着合肥市“翡翠项链”的美誉,它是由南淝河及古护城河围成的敞开式环城公园,主要包括包河公园、银河公园、逍遥津公园、雨花塘景区、黑池坝景区等若干相对独立的湖泊型景观单元。除南淝河水体具有较高的开放程度外,其它景观水体几乎都处于相对封闭状态,虽然部分水体之间也有涵管联通,但由于缺乏水动力条件,彼此交换能力相当弱。

南淝河是巢湖水体主要入湖河流之一,河道上游从合肥市中心地带穿过,为老城区北部和东部环城水系的构成主体。尽管城区内已基本实现管道截污,但由于老城区排水管网渗漏、城区非点源污染输入、沉积层内源释放及来自四里河、板桥河等支流未经处理的污水汇入等影响,使得南淝河水体水质一直较差。根据合肥市环境状况公报,南淝河水体常年处于劣 V 类,主要超标污染物为 COD、TN、TP 和 NH_4^+-N 。环城水系中 6 个主要水体的基本水力参数见表 1^[14]。不难看出,除南淝河外,其它 5 个水体都为小型景观水体。

表 1 景观水体的基本特征

Table 1 Basic physical characteristic of each landscape water body

| 景观水体 | 水体长度 /m | 平均深度 /m | 平均宽度 /m | 水面面积 / hm^2 | 蓄水量 $\times 10^4/\text{m}^3$ |
|-------|------------|------------|------------|-------------------------|---------------------------------|
| 南淝河 | — | 3 | 40 | 15.2 | — |
| 黑池坝 | 900 | 3.5 | 120 | 9.3 | 33 |
| 雨花塘 | 1 100 | 3.2 | 110 | 10.5 | 34 |
| 银河景区 | 700 | 2.8 | 60 | 3.6 | 10 |
| 包河公园 | 1 300 | 1.9 | 120 | 13.3 | 25 |
| 逍遥津公园 | 500 | 1.7 | 140 | 6.7 | 11 |

2 材料与方法

2.1 采样点的布设

根据景观水体的基本特征,在包河公园、银河公园、逍遥津公园以及雨花塘、黑池坝景区等湖泊型景观水体上,各筛选 3 个具有代表性的采样点位。对于南淝河城市段,考虑在蒙城路桥至屯溪路桥之间布置 4 个采样点,整个研究共设置 19 个采样点,见图 1。在数据处理上,每次均以水体多个采样点位的平均值代表该水体水质。

2.2 样品的采集与分析

2.2.1 样品采集

2012 年 9 月~2013 年 7 月,按每旬 1 次的采样频次采集水样,且水样采集工作安排在同一天内进行。水样在水面以下 0.3 m 采集,立即送往实验室低温保存。实验室测定指标主要包括总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、硝酸盐氮(NO_3^--N)、亚硝酸盐氮(NO_2^--N)、总磷(TP)、磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)、化学需氧量(COD)及叶绿素 a(Chl-a)等。其中,仅在 2013 年 6 月和 7 月开展了 Chl-a 浓度的分析测试。现场测定指标主要有 pH 值、电导率(EC)、氧化还原电位(ORP)及水温(WT)等。

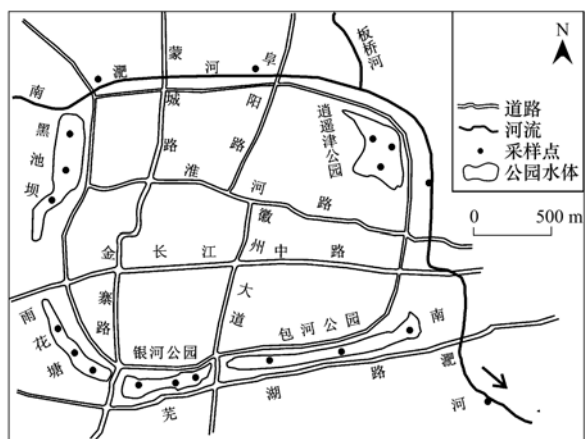


图1 各景观水体采样点分布示意

Fig. 1 Sketch-map of sampling sites in each landscape water body

2.2.2 分析测试方法

水样预处理及分析测试,参照国家相关标准方法^[15]。其中,TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,TP 采用过硫酸钾消解紫外分光光度法, NH_4^+ -N 为纳氏试剂比色法, NO_3^- -N 为紫外分光光度法, PO_4^{3-} -P 为钼锑抗分光光度法, NO_2^- -N 为 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法,COD 采用快速催化消解分光光度法,Chl-a 采用冷冻浸提法测定等。pH、WT 和 EC 使用哈纳 HI98130pH/EC/TDS/°C 测试笔测定;水体 ORP 采用 ORP-986 高精度笔式 ORP 计测定。

2.3 数据处理

采用 SPSS 17.0 统计软件进行数据处理及方差分析(ANOVA)和聚类分析,并用 Origin 8.0 和 SPSS 17.0 软件进行图形绘制。

3 结果与分析

3.1 景观水体氮磷浓度的统计分析

6 个景观水体氮磷浓度的统计结果见图 2 所示。不难看出,不同景观水体水质指标的差异性较为明显。就 TN 浓度来看,黑池坝水体不仅浓度高而且变化范围大,平均浓度达 $14.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;南淝河水体次之,为 $11.84 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;其次是银河和雨花塘,平均值分别为 4.29 和 $4.99 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;而包河公园和逍遥津公园水体仅为 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右。除了包河公园、逍遥津公园水体外,其它水体 TN 平均浓度均达《国家地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的劣 V 类水平。在 NH_4^+ -N 方面,南淝河、黑池坝和银河公园水体浓度较高,平均值分别达 8.62 、 6.37 和 $2.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均为劣 V 类;雨花塘水体则为 $1.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;而包河公园和逍遥津公园平均浓度分别仅

为 $0.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在 NO_3^- -N 浓度方面,黑池坝水体浓度相对最高,平均达 $6.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其次是雨花塘和南淝河水体,平均浓度分别为 $2.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而包河公园、逍遥津公园水体平均浓度则仅为 $0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。南淝河、黑池坝水体 NO_2^- -N 浓度稍高于其它 4 个水体,但平均浓度均不超过 $0.42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

从 TP 浓度来看,南淝河平均值最高,达 $0.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,为劣 V 类;雨花塘和包河公园水体相对较低,平均浓度分别为 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,恰好对应于地表水的 III、IV 类标准(以湖、库计,下同);黑池坝和逍遥津公园平均浓度分别为 $0.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,达 V 类标准;银河公园水体平均浓度为 $0.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,为劣 V 类。从 PO_4^{3-} -P 浓度看,南淝河水体的平均浓度高达 $0.62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,不仅明显高于其它景观水体,而且浓度变化相当显著;银河公园和逍遥津公园水体分别为 $0.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,黑池坝水体为 $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,包河公园和雨花塘公园则仅有 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

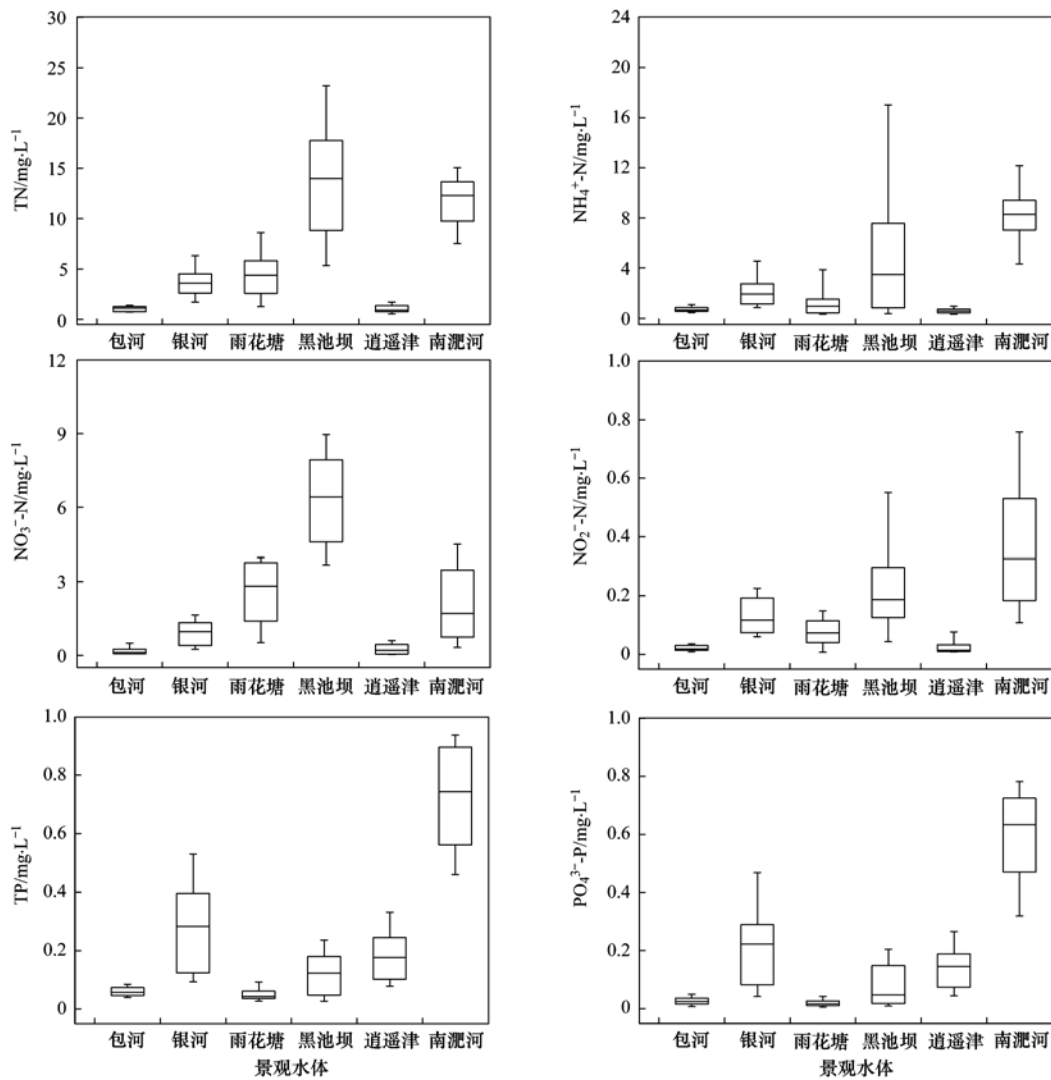
与国内其他一些城市的景观水体相比,包河公园、逍遥津公园与上海市的中山公园、黄兴公园水体水质相当,黑池坝水体污染比和平公园严重一些^[16];南淝河水体 TN、TP 平均浓度分别是南京秦淮河的 3.5 和 4.6 倍^[17]。从统计数据来看,合肥市各景观水体 TN、TP 平均浓度均远超过国际上广泛认可的发生水体富营养化临界浓度:TN 为 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TP 为 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明氮磷生源要素完全可以满足藻类生长的需要,一旦温度、光照、水动力条件等合适,藻类就可能快速生长、繁殖,从而导致水质恶化^[18]。事实上,上述景观水体每年夏、秋季节频频出现的“水华”现象,便是很好的佐证。在 COD 平均浓度方面,6 个景观水体非常接近,平均浓度仅为 $30.93 \sim 43.99 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

3.2 景观水体氮磷动态变化性分析

不妨对每个月内的 3 次采样结果取平均值,开展景观水体氮磷动态变化性分析。

3.2.1 氮的动态变化性

各景观水体不同形态氮的逐月变化曲线见图 3。不难看出,除逍遥津公园和包河公园水体 TN 浓度较低和变幅较小外,其它水体均表现出先增大再逐步下降的变化态势。而且,银河公园、雨花塘、黑池坝和南淝河水体的 TN 月平均浓度基本都处在劣 V 类水平,尤其是冬季。黑池坝水体 TN 浓度最高,



从上到下的横线分别代表 90%、75%、50%、25% 和 10% 数据信息

图 2 各景观水体氮磷浓度的统计结果

Fig. 2 Statistical results of nitrogen and phosphorus concentrations in each landscape water

而且动态变化也最剧烈,呈现出明显的单峰型特征。由图 3,包河公园和逍遥津公园水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随时间的波动性很弱,黑池坝浓度变化则最为剧烈,呈明显的单峰型特征。雨花塘和银河公园的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度先逐步上升,并在翌年 1 月或 2 月达到峰值后再迅速下降。南淝河水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度总体呈稳步增加态势,但在 2013 年 2 月后表现出一定的波动。整个采样期间,包河公园和逍遥津公园水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均未超出地表水 V 类水质,而其它水体则不同程度地超标。

在 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度方面,包河公园和逍遥津公园波动性较小,而黑池坝水体则呈明显的“M”形变化特征,两个峰值分别出现在 2012 年 11 月和 2013 年 6 月,低值则出现在 2013 年的冬季;南淝河水体在

2013 年 1 月前表现出上升态势,随后迅速下降并在翌年 3 月后趋于稳定;雨花塘水体在冬季时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度达到最高值,且变化过程明显有别于其它水体。总的来看,各景观水体 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度变化情况较为简单(见图 3),仅黑池坝和南淝河水体在部分月出现明显的动态变化性。

3.2.2 磷的动态变化性

TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的跨年度逐月变化情况见图 4。显然,在整个采样期间,南淝河水体 TP 浓度处于 $0.58 \sim 0.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内波动,且明显高于其它水体。银河景区水体 TP 浓度一直处于波动状态,并在 2013 年 1 月后波动上升态势明显,最高浓度达 $0.62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,单次采样浓度变化范围为 $0.09 \sim 0.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。逍遥津和黑池坝水体 TP 浓度也表现出明

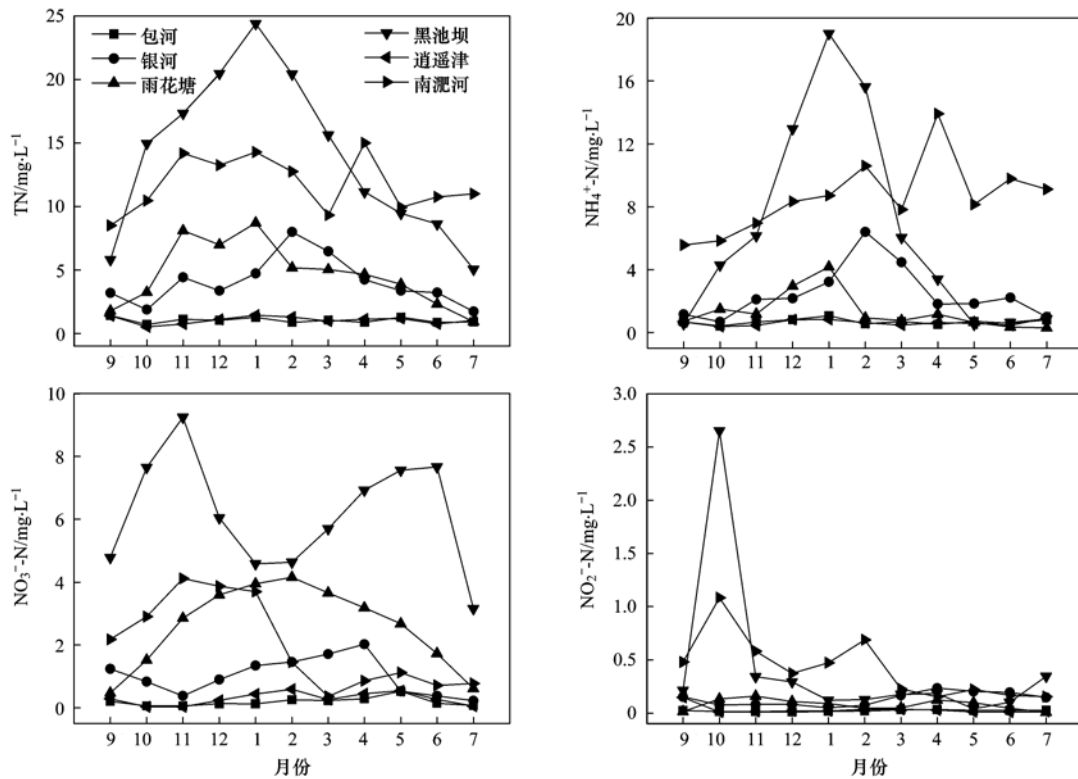


图3 各景观水体氮浓度的逐月变化特征

Fig. 3 Monthly variation of nitrogen concentrations for the six landscape waters

显的波动性,但变幅相对都不大,浓度一般都不超过 $0.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 相比而言,雨花塘和包河景区水体不仅 TP 浓度低且都较为平稳. 采样过程中发现,银河景区夏季“水华”现象严重,并因水体缺氧,经常出现死鱼现象. 2013 年 4 月以后银河景区水体 TP 浓度快速上升,可能与水体缺氧导致沉积物中磷释放有关^[19,20].

从图 4 不难看出, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 与 TP 变化趋势基本一致. 这是因为,南淝河、银河、逍遥津和黑池坝等景观水体 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 占 TP 的比重都相当大,大致为 74.07% ~ 84.51%,致使 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 与 TP 具有极为相

似的逐月变化特征. 包河公园和雨花塘水体 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 占 TP 比重虽然均仅有 40% 左右,但由于 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 含量都不高,因此 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 逐月变化差异不是很明显.

3.2.3 TN/TP 比值的动态变化性

TN/TP 比值对于藻类的爆发性生长具有重要的意义,是水体中浮游植物营养结构特点的重要反映^[21]. 一些研究指出,当湖水 TN 和 TP 浓度比在 10:1 ~ 25:1 时,藻类生长与氮、磷浓度存在直线相关关系^[22]. 在 6 个景观水体中,雨花塘与黑池坝水体 TN/TP 比值相对最高(见图 5),分别为 104.7 和

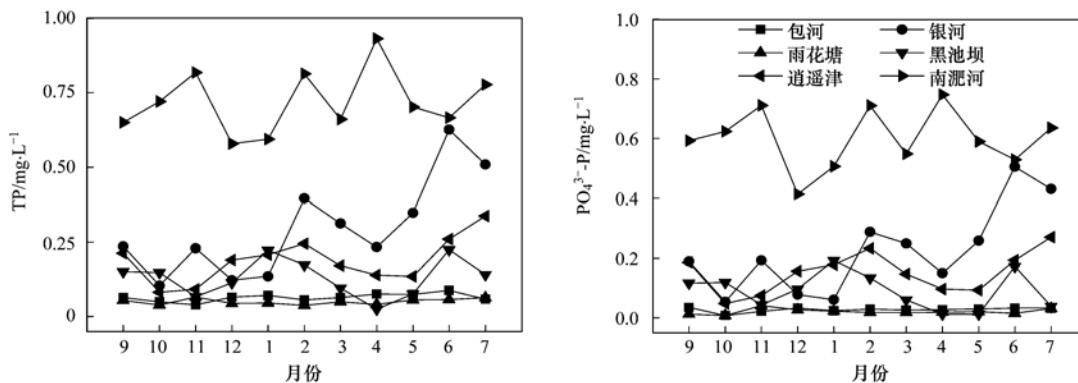


图4 各景观水体磷浓度的逐月变化特征

Fig. 4 Monthly variation of phosphate concentrations for the six landscape waters

158.3, 远高于一般湖库水体^[22]; 而包河公园、银河公园、逍遥津公园和南淝河水体的 TN/TP 平均值分别仅为 16.8、18.7、6.4 和 16.8, 单次采样大部分结果也都介于 10:1 ~ 25:1 范围, 与北京城市湖泊氮磷浓度比(即 10:1 ~ 21:1)^[12] 相近, 属于有利于藻类生长的营养条件. 即便是按 TN/TP 比值在 8 ~ 30 范围适合藻类生长的标准^[23], 包河公园、银河公园和南淝河水体 TN/TP 依旧归属于这一范畴. 根据 Guildford 等^[24] 提出的水中营养物限制性分类标准, 即 TN/TP ≥ 22.6 (质量比) 为磷限制性状态, TN/TP ≤ 9.0 (质量比) 为氮限制性状态, 则可初步判定雨花塘、黑池坝水体处于磷限制性水体, 逍遥津公园为氮限制性水体.

TN/TP 比值的逐月动态变化情况见图 5. 雨花塘和黑池坝水体大部分时段 TN/TP ≥ 100, 而在气温较高的夏、秋季(9 月和次年 5 ~ 7 月)相对较低, 这可能因为夏季水体生物活动较为旺盛, 导致水底缺氧, 从而促使沉积物中磷释放的缘故. 大体上, 黑池坝水体 TN/TP 比值变化曲线呈“M”形状, 冬季比值降至 100 左右, 而雨花塘水体除在夏、秋季相对较低外, 其余时段较为平稳. 其它水体 TN/TP 比值变化幅度基本不大. 由营养物限制性分类标准, 雨花塘和黑池坝水体处于磷限制性状态, 逍遥津公园水体处于氮限制性状态, 其它水体则只在短时间内出现磷或氮限制性.

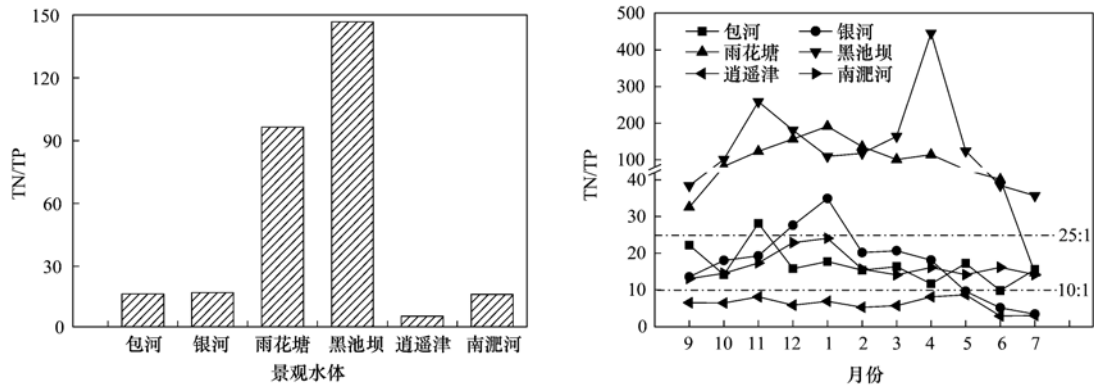


图 5 各景观水体 TN/TP 平均值及逐月变化特征

Fig. 5 Average values and monthly variation of TN/TP rates for the six landscape waters

3.2.4 Chl-a 浓度

水体 Chl-a 浓度是指示水体富营养化程度的关键参数^[25-27], 常被用于估测藻类及其它浮游生物的生物量和初级生产力. 图 6 展示了 2013 年 6、7 月各景观水体叶绿素含量情况. 不难看出, 银河公园水体 Chl-a 浓度相对最高, 6 月 Chl-a 浓度达

157.99 mg·m⁻³, 7 月甚至达到 1 049.25 mg·m⁻³. 从实地调查的情况看, 7 月大部分湖面都聚集着厚厚的一层蓝藻. 除逍遥津公园外, 其它景观水体均表现为 6 月 Chl-a 浓度高于 7 月. 大体上, 南淝河、包河公园、逍遥津公园、雨花塘、黑池坝和银河公园水体 Chl-a 平均浓度分别为 16.86、20.46、30.72、41.01、60.21 和 603.62 mg·m⁻³. 根据 OECD 富营养化单因子(Chl-a)评价标准(Chl-a < 3 mg·m⁻³ 为贫营养; Chl-a 介于 3 ~ 11 mg·m⁻³ 为中营养; Chl-a 介于 11 ~ 78 mg·m⁻³ 为富营养; Chl-a > 78 mg·m⁻³ 为严重富营养)^[28], 除银河公园水体属于严重富营养外, 其它各个水体均属富营养化水平.

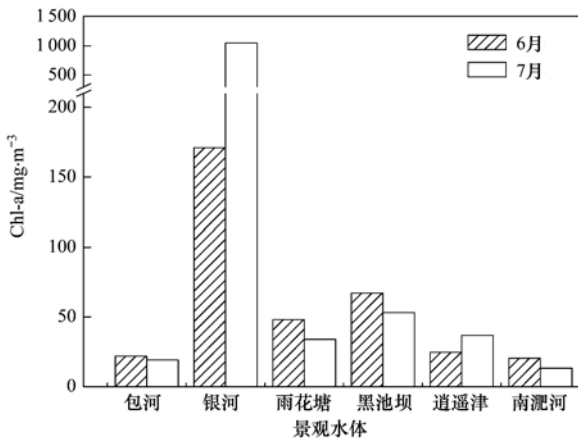


图 6 各景观水体 Chl-a 浓度

Fig. 6 Mean chlorophyll contents for each landscape water

3.3 景观水体的差异性及其聚类分析

3.3.1 方差分析

方差分析是用于两个及两个以上样本均数差别的显著性检验, 又称“变异数分析”或“F 检验”. 这里, 选择 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TP、PO₄³⁻-P、COD、EC、ORP、pH 和 WT 等作为因素变

量,以各指标的月均值为水平,利用最小显著性差异法(LSD法)进行水体差异性分析,筛选出每两个景观水体之间差异性相对较大的指标,结果见表2.可以看出,作为开放性流动水体的南淝河与作为封闭

性滞留水体的各湖泊型景观水体之间,在很大一部分水质指标上存在较为显著差异性.在湖泊型景观水体中,黑池坝水体又与其它水体存在较多的差异性指标.

表2 各景观水体之间差异性比较

Table 2 Difference compared with the ANOVA method on water quality among the six landscape waters

| | 包河 | 银河 | 雨花塘 | 黑池坝 | 逍遥津 | 南淝河 |
|-----|--|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--|-----|
| 包河 | — | | | | | |
| 银河 | EC、TP、 PO_4^{3-} -P | — | | | | |
| 雨花塘 | NO_3^- -N | PO_4^{3-} -P、TP | — | | | |
| 黑池坝 | EC、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TN | TP、TN、 NO_3^- -N | EC、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TN | — | | |
| 逍遥津 | PO_4^{3-} -P | EC | NO_3^- -N | EC、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TN | — | |
| 南淝河 | NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TN、 PO_4^{3-} -P、TP | PO_4^{3-} -P、TP、 NH_4^+ -N、TN | PO_4^{3-} -P、TP、 NH_4^+ -N、TN | EC、 PO_4^{3-} -P、TP、 NO_3^- -N | EC、 PO_4^{3-} -P、 NO_3^- -N、TP、 NH_4^+ -N、TN | — |

3.3.2 聚类分析

根据整个采样阶段各水质指标的实测数据信息,采用欧氏距离平方,按照样本之间的相似程度对各景观水体进行聚类,结果见图7.这里,黑池坝和南淝河归为一类,两者不仅污染程度相对最为严重,水质常年处于V类~劣V类,而且黑池坝和南淝河也是方差分析结果中,与其它景观水体水质指标差异性最大的2个水体;其它4个湖泊型封闭水体归为另一类,其中污染相对较轻的包河公园和逍遥津公园水体归为一个子类,污染相对较重的银河公园和雨花塘水体则归入了另一子类.事实上,十多年以来,银河公园与雨花塘水体在每年的夏、秋季几乎都会出现明显的蓝藻水华,尤其是银河公园.不难看出,聚类结果与实际情况是吻合的.

式中,EI为营养状态指数, E_n 为评价指标赋分值,N表示评价指标个数.相应的营养状态分级标准为: $0 \leq EI \leq 20$,贫营养; $20 \leq EI \leq 50$,中营养; $50 \leq EI \leq 60$,轻富营养; $60 \leq EI \leq 80$,中富营养; $EI \geq 80$,重富营养.6个景观水体富营养化程度评价结果,见图8.显然,每个水体基本都处于富营养化状态,且富营养化程度呈现一定的时间变化性,除银河公园7月水体富营养化最重外,其它水体都表现为6月富营养化相对更重.根据营养状态指数大小,得到水体富营养化程度排序:银河公园>黑池坝>南淝河>逍遥津公园>雨花塘>包河公园.其中,银河公园水体属于中富-重富营养、黑池坝和南淝河水体均属于中富营养水平,逍遥津公园介于轻富营养-中富营养等级之间,雨花塘水体在轻富营养等级上、下限附近徘徊,包河公园为中营养-轻富营养水平.

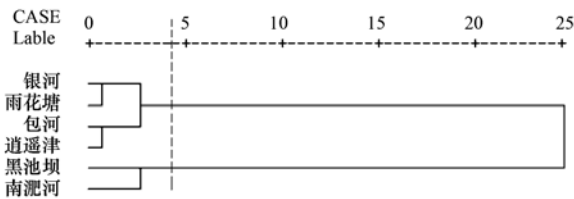


图7 各公园景观水体聚类分析结果

Fig. 7 Results of clustering among the total six landscape waters

4 水体富营养化评价

根据2013年6、7月水质数据,选取TN、TP和Chl-a为评价指标,采用文献[29]推荐的营养状态指数法,开展景观水体富营养化评价.营养状态指数计算公式为:

$$EI = \sum_{n=1}^N E_n / N$$

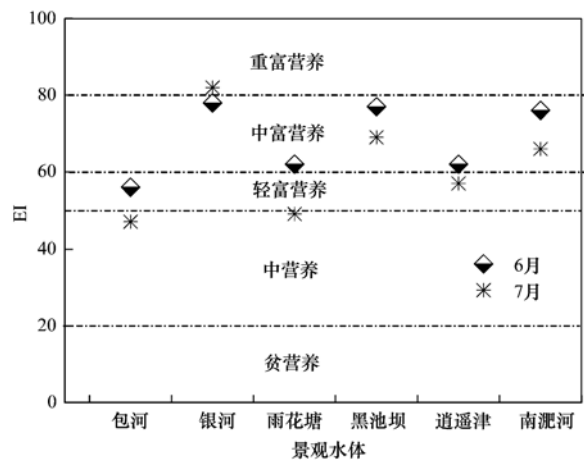


图8 各景观水体富营养化评价结果

Fig. 8 Evaluation results of eutrophication degree for the six landscape waters

根据美国 EPA 在水质富营养化研究中所采用的 Gekstatter 提出的标准值 ($TP > 0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{Chl-a} > 10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)^[30], 也可以认定所有 6 个景观水体均处于富营养化水平。

5 讨论

目前, 合肥市已投入运行和在建的城市污水处理厂有 10 多座, 城市排水管网系统建设取得了很大进步, 基本实现了城区生活污水和工业废水的集中处理。但老城区排水管网设计能力偏低, 加之管材老化、堵塞不通等原因, 导致部分生活污水和工业废水渗漏, 并在一定程度上影响了城区地表水环境质量。事实上, 降雨形成的地表径流在流经商业区、住宅区、街道、停车场时, 地表聚集的一系列污染物, 如氮、磷、盐分、有毒物质及杂物等, 经地表径流和排水管网的传输, 进入了城市景观水体中。根据文献[13], 合肥城区地表灰尘 TN、TP 平均含量甚至高于一些污染严重的河流水体沉积物^[31,32], 分别达 $1418.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $948.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 对城区景观水体水质构成潜在危害。徐微等^[33]对合肥市典型城区非渗透性铺面地表径流污染特征的研究发现, 径流中 TP 事件平均浓度 (EMC) 为 $0.066 \sim 1.953 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $0.893 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 EMC 达 $0.864 \sim 6.220 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $2.857 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; TN 的 EMC 值达 $5.021 \sim 19.570 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $10.016 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。不仅如此, 在生活区和商业区地表径流中, TN 甚至出现了高达 $34.916 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的瞬时平均浓度。林莉峰等^[34]得到了上海市城区非渗透性径流中 TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的 EMC 均值, 分别为 0.57 、 4.85 和 $7.74 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。显然, 与上海市相比, 合肥城区非点源氮磷污染似乎更为严重一些。

整个采样期间, 包河公园、逍遥津公园的 TN 浓度单次采样最大值颇为接近, 分别为 1.80 、 $1.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均显著低于其它水体, 在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 指标上也存在类似特点。包河公园和逍遥津公园水体在氮元素方面表现出的迥异现象, 可能与这两个景观水体 2004 年开展的底泥清淤有关。但在磷元素方面, 逍遥津公园表现出明显高于雨花塘的特点, 究其原因, 可能与逍遥津公园东南角动物园的动物粪尿随雨水径流汇入水体, 以及游人长期向景观水体中观赏鱼群投加鱼饵等活动有关。毫无疑问, 适时开展底泥清淤对于改善城市景观水体水质有着重要意义。总体上, 各景观水体 TN 浓度最大值基本都出现在冬季, 可能与枯水季节, 降水量偏少

有关。进入春季后, 合肥地区降水量开始有所增加, 尽管有非点源径流污染负荷的补充, 但因水量的大量增加而使水体 TN 浓度依然表现出下降态势。而景观水体表现出冬季 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度偏高的特点, 除与降水偏少有关外, 可能还与低温环境下硝化细菌或微生物活性较低, 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降解转化能力较弱有一定的关系。

合肥市主城区的 6 个不同景观水体在营养元素限制状态方面, 具有显著的差异性, 可能与大部分水体的水面面积较小且处于较为封闭状态、彼此间缺乏有效的沟通与联络有关系。在水体指标差异性方面, 南淝河与其它 5 个湖泊型封闭性景观水体间差异性都较大, 笔者以为, 一方面可能因为南淝河为开放性流动水体, 而其它水体处于相对封闭状态, 存在流动性差、换水周期长的局限性; 另一方面, 南淝河不仅接受城市排水管网渗漏和城区非点源污染影响, 同时还接纳上游以及沿河支流污水的汇入, 这与其它景观水体明显不同。同大多数城市一样, 近年来合肥市对城市生活污水、工业废水等点源污染的控制颇为重视, 但在城市非点源污染控制方面则还相对空白^[33]。由于合肥市的年均降雨量高达 1000 mm 左右, 雨水径流造成的污染比降雨量小的城市要严重得多, 因此推进城市非点源污染控制, 对合肥市景观水体水质改善更具实际意义。

6 结论

(1) 黑池坝、南淝河、雨花塘和银河公园水体氮污染较为严重, 南淝河水体 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度显著偏高, 而且所有水体 TN、TP 平均浓度均远超国际认可的发生水体富营养化临界值。

(2) 南淝河、黑池坝和雨花塘水体氮浓度表现出显著的逐月变化特征, 银河公园水体 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度波动性上升趋势明显, 而南淝河水体 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 则处在较高浓度状态下波动。根据 TN/TP 比值, 判定雨花塘与黑池坝水体属于磷限制性状态, 其它水体属于氮限制性状态。

(3) 方差分析表明, 流动水体与湖泊型封闭景观水体之间在多项水质指标上差异性显著。根据富营养化评价结果, 城区 6 个景观水体均处于富营养化状态, 其富营养化程度排序为: 银河公园 > 黑池坝 > 南淝河 > 逍遥津公园 > 雨花塘 > 包河公园。

(4) 包河公园和逍遥津公园水体氮磷污染情况表明, 开展内源清淤对于改善景观水体水质至关重要。此外, 城市非点源污染控制是合肥市景观水体

水质改善和保护必须认真对待的问题。

参考文献:

- [1] Tu J, Xia Z G, Clarke K C, *et al.* Impact of urban sprawl on water quality in eastern Massachusetts, USA[J]. *Environmental Management*, 2007, **40**(2): 183-200.
- [2] Xian G, Crane M, Su J S. An analysis of urban development and its environmental impact on the Tampa Bay watershed [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, **85**(4): 965-976.
- [3] 岳隽, 王仰麟, 李正国, 等. 河流水质时空变化及其受土地利用影响的研究——以深圳市主要河流为例[J]. *水科学进展*, 2006, **17**(3): 359-364.
- [4] Moore J W, Schindler D E, Scheuerell M D, *et al.* Lake eutrophication at the urban Fringe, Seattle Region, USA [J]. *AMBIO*, 2003, **32**(1): 13-18.
- [5] Pinto U, Maheshwari B, Shrestha S, *et al.* Modelling eutrophication and microbial risks in peri-urban river systems using discriminant function analysis[J]. *Water Research*, 2012, **46**(19): 6476-6488.
- [6] Soares M, Vale M, Vasconcelos V. Effects of nitrate reduction on the eutrophication of an urban man-made lake (Palácio de Cristal, Porto, Portugal) [J]. *Environmental Technology*, 2011, **32**(9-10): 1009-1015.
- [7] 刘韵琴. 再生水补给的城市景观水体富营养化和生态防治[J]. *中南林业科技大学学报(社会科学版)*, 2013, **7**(3): 30-35.
- [8] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. 城市小型人工湖围隔中生源要素和藻类的时空分布[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(6): 1039-1045.
- [9] 李飞鹏, 张海平, 陈玲. 小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3854-3861.
- [10] Schneider Y, Grube S, Weilandt M. Determination and evaluation of the phosphorus load of an artificial shallow lake [J]. *Water Science and Technology*, 2008, **58**(10): 1993-2000.
- [11] Yang Y K, Wang W K, Deng H Z, *et al.* Analysis on aquatic environment of an artificial lake and control measures to its pollution [J]. *Agricultural Science and Technology*, 2012, **13**(8): 1749-1753.
- [12] 荆红卫, 华蕾, 孙成华, 等. 北京城市湖泊富营养化评价与分析[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(3): 357-363.
- [13] 李如忠, 周爱佳, 童芳, 等. 合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1159-1166.
- [14] 尹成国, 陆伟. 合肥市环城水系沟通设计[J]. *江淮水利科技*, 2008, (4): 11-12.
- [15] 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. 254-282.
- [16] 程婧蕾, 王丽卿, 季高华, 等. 上海市 10 个城市公园景观水体富营养化评价[J]. *上海海洋大学学报*, 2009, **18**(4): 435-442.
- [17] 李跃飞, 夏永秋, 李晓波, 等. 秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 91-97.
- [18] 雷沛, 张洪, 单保庆. 丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3038 -3045.
- [19] Holdren G C, Armstrong D E. Armstrong, factors affecting phosphorus release from intact lake sediment cores [J]. *Environmental Science and Technology*, 1980, **14**(1): 79-87.
- [20] Ingall E, Jahnke R. Evidence for enhanced phosphorus regeneration from marine sediments overlain by oxygen depleted waters [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, **58**(11): 2571-2575.
- [21] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡水库小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(4): 509-517.
- [22] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. *科学通报*, 2006, **51**(16): 1857-1866.
- [23] 张晟, 郑坚, 刘婷婷, 等. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 58-63.
- [24] Guildford S J, Hecky R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: is there a common relationship? [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(6): 1213-1223.
- [25] 张晟, 李崇明, 刘婷婷, 等. 三峡水库支流回水区营养状态季节变化[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 64-69.
- [26] 金相灿. 湖泊富营养化研究中的主要科学问题——代“湖泊富营养化研究”专栏序言[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(1): 21-23.
- [27] 邓建才, 陈桥, 翟水晶, 等. 太湖水体中氮、磷空间分布特征及环境效应[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3382-3386.
- [28] Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). *Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control* [M]. Paris: OECD, 1982.
- [29] SL 395-2007, 地表水环境质量评价技术规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [30] 李颖, 曹文志, 张玉珍, 等. 九龙江流域上游浅水湖泊富营养化机制[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(5): 906-911.
- [31] 李如忠, 李峰, 周爱佳, 等. 巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1503-1510.
- [32] 卢少勇, 远野, 金相灿, 等. 7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1497-1502.
- [33] 徐微, 郜红建, 李田. 合肥市典型城区非渗透性铺面地表径流污染特征[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(4): 84-88, 113.
- [34] 林莉峰, 李田, 李贺. 上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1430-1434.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行