

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市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)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的藜袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫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)	

典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征

姚昕¹, 邹胜章², 夏日元², 许丹丹², 姚敏¹

(1. 聊城大学环境与规划学院, 聊城 252059; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004)

摘要: 西南岩溶水系统中有机质和养分有独特的产生、分解和保存方式, 了解有机质与养分循环耦合机制是恢复和优化调控这些脆弱生态系统退化的科学基础. 以桂林寨底地下河系统为研究对象, 对岩溶地下水的补给、径流、排泄过程中 DOM 的性质和行为变化进行示踪分析, 为深刻认识岩溶地下水 DOM 的生物地球化学循环提供科学依据. 结果表明共检验出 3 种 DOM 荧光组分, 其中 C1、C2 为陆源输入的一类腐殖质荧光有机物, C3 则为内源类蛋白酪氨酸荧光有机物. DOM 荧光组分以陆源类腐殖质荧光组分为主, 反映了夏季丰水期外源输入对地下水系统 DOM 的重要贡献. 与传统理化指标相比, 岩溶地下水系统的 DOM 空间变化更加明显, 也更能反映出地下水系统的细微变化. 传统的理化指标主要反映地下河系统的区域特征, 而 DOM 荧光组分则更多地反映了采样点的类型差异.

关键词: 岩溶; 地下水系统; 溶解性有机质; 三维荧光光谱-平行因子分析法; 来源辨析

中图分类号: X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2014)05-1766-07 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.2014.05.018

Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems

YAO Xin¹, ZOU Sheng-zhang², XIA Ri-yuan², XU Dan-dan², YAO Min¹

(1. School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: Dissolved organic matter (DOM) and nutrients have a unique way of producing, decomposing and storing in southwest karst water systems. To understand the biogeochemical cycle of DOM in karst aquifer systems, we investigated the behavioral changes of DOM fluorescence components in Zhaidi karst river system. Two humic-like components (C1 and C2), and one autochthonous tyrosine-like component (C4) were identified using the parallel factor analysis (PARAFAC) model. Compared with the traditional physical and chemical indicators, spatial heterogeneity of DOM was more obvious, which can reflect the subtle changes in groundwater system. Traditional indicators mainly reflect the regional characteristics of karst river system, while DOM fluorescence components reflect the attribute gaps of sampling types.

Key words: karst water; groundwater system; DOM; EEM-PARAFAC; source analysis

西南岩溶地区存在广泛的易被侵蚀的碳酸盐岩, 由于岩溶含水介质具有内在结构不均一的特性, 加之地表土被不连续或土壤层较薄, 导致其渗透性能急剧增强, 对地表污染物质的过滤作用极弱, 因而地表水和污染物质极易通过落水洞、竖井、裂隙灯通道直接进入岩溶含水层或地下河, 在降雨期间表现得尤为明显^[1~7]. 降雨期间, 岩溶地下水的流量、地球化学指标对降雨事件响应迅速, 地下水系统与外界环境的物质能量进行了充分的交换^[8~10]. 因此, 与非岩溶含水层相比, 岩溶系统更具开放性, 岩溶含水系统对外界环境更具敏感性和脆弱性, 更易受到人类活动的影响^[11].

溶解性有机质(DOM)广泛存在于各类水体, 是天然水体中的重要化学组分, 在全球碳循环、生态系统营养盐平衡、以及有机污染物运移中都发挥着重要作用, 直接影响着生态系统的物质与能量的转换^[12]. 岩溶系统独特的二元水文地质结构使得水体中有机质和养分有着独特的产生、分解和保存方

式, 因此, 了解岩溶地下水系统中有机质的迁移转化特征与养分循环耦合机制是恢复和优化调控这些脆弱生态系统退化的科学基础^[13,14]. 以往岩溶地下水的水文地球化学特征研究(污染物迁移和污染的敏感性评价)等受到国内外研究者的广泛关注, 然而在地下水系统特有的溶解性有机质的运移特征方面研究却相当薄弱^[15,16].

荧光性质是 DOM 的重要光学性质之一, 由于物质的结构和能量分布的差异, 不同种类的荧光物质显示出各自的荧光光谱, 根据其光谱可以灵敏并无污染地对物质种类识别和定量分析^[4~7]. 近年来发展起来的三维荧光光谱技术(three-dimensional excitation-emission matrix spectra, 3DEEMs)结合平

收稿日期: 2013-08-11; 修订日期: 2013-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301544); 山东省自然科学基金项目(ZR2012DQ003); 国家地质调查项目(1212011121166); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB201001)

作者简介: 姚昕(1982~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为水体天然有机质运移规律, E-mail: yaoxin@lcu.edu.cn

行因子分析法(PARAFAC),可以用于鉴别相似水生生态环境中虽小但是有显著影响的 DOM 组分,是理想的研究湖泊、河流以及海洋环境中 DOM 迁移转化的方法,也应用于地下水与地表水的物质交换研究^[17~22]。

因此,鉴于水体 DOM 研究在国际研究领域中的前沿性,以及岩溶水系统 DOM 迁移转化机制的独特性,选择典型岩溶小流域——桂林寨底地下河系统为研究对象,利用三维荧光技术,结合常规理化指标,探讨岩溶水系统中不同来源 DOM 的光学特性、化学组成,并对岩溶地下水的补给、径流、排泄过程中 DOM 的性质和行为变化进行示踪研究,以期为深刻认识岩溶地下水 DOM 的生物地球化学循环提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处广西桂林市海洋山西南麓山区,属亚热带季风气候区,炎热多雨。每年 4~8 月为雨季,约占全年总降水量的 60% 左右。岩溶含水系统内的地下水主要来自大气降水,通过落水洞、地下河或伏流入口集中灌入等方式补给。

研究区为封闭条件相对较好的系统,面积为 31.06 km²,边界周长 29.69 km。岩溶发育强烈,地下河、溶洞、落水洞、地下河天窗、洼地分布众多。

根据系统内地下水的径流和分布特征,寨底地下河系统由 9 个子系统组成,其中本研究的样品采集主要涉及到以下 4 个子系统。

(1) 钓岩地下河子系统

该子系统主要汇集了黄土塘洼地、白虎岩洼地、荞麦塘洼地和邓塘谷地南段的地下水,向钓岩地下河出口径流汇集。在本次采样点中,G006 为地下河入口,G016 为地下河出口,水由此以地表水和地下潜流的形式流向 G025。

(2) 水牛坳地下河子系统

水牛坳地下河子系统主要汇集琵琶塘岩溶泉子系统及其以北的岩溶水,同时也汇集了水牛坳地下河出口东西两侧上游的岩溶水。在水牛坳村北洼地北侧以地下河出口(实为伏流出口)形式排泄出地表,形成地表小河。

(3) 豪猪岩-东究地下河子系统

该子系统面积较大,主要汇集东究以东较大范围内的岩溶地下水,并形成甘野-小税-豪猪岩-东究一线的主径流管道以及支岭塘-豪猪岩、大税-豪猪

岩 2 条分支径流管道。甘野村岩溶边缘洼地汇集了东部碎屑岩区的孔隙-裂隙水,以地下河入口和落水洞形式潜入岩溶含水层构成该地下河的东部源头。

本研究的采样中,甘野村岩溶边缘洼地汇集的东部碎屑岩区孔隙-裂隙水流至 G014 以落水洞形式潜入岩溶含水层流至 G011,此外,G011 还接收另外两条分支径流的水流,以地下潜流的形式从 G032 排出。

(4) 寨底地下河系统总出口

各子系统均向水牛坳-东究-冷水田-小浮-响水岩一线径流汇集,在空连山西南方向约 300 m 处有一个较大的地下河入口,此入口至响水岩一线沿地下河形成多个地下河天窗或落水洞,并以响水岩村北的一个最大。最终在响水岩-寨底地下河出口一线形成无地下水露头的地下河主管道。

在本研究的采样中,各子系统以各种类型排出的水(如 G030、G032、G070)经由多个天窗或落水洞(如 G037)流入地下河主管道,最终从地下河系统总出口 G047 排出。

1.2 样品采集

2012 年 8 月 3~4 日丰水期在寨底地下河不同子系统内设立 28 个采样点,样点涵盖了岩溶泉、溶潭、落水洞、天窗、地下河出口等类型(图 1,表 1)。现场测定水体温度、pH 值、氧化还原电位 E_h 、水流流量 Q 。每个采样点采集 500 mL 水样,所有采样瓶事前均以 10% HCl 溶液浸泡、去离子水清洗及现场水润洗,采集完毕后送回实验室分析,在分析前

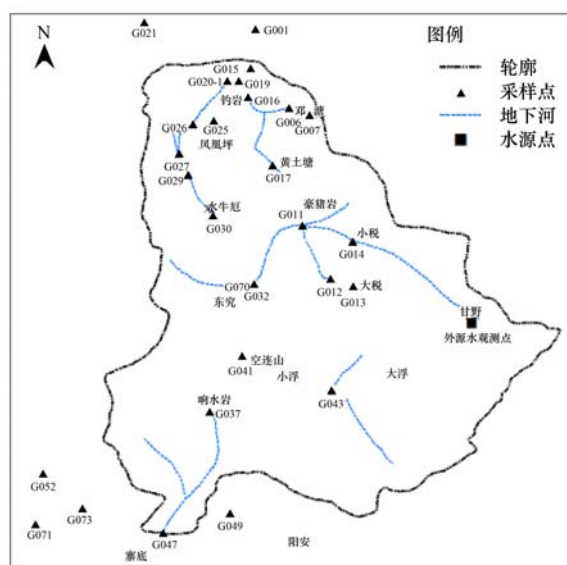


图 1 寨底地下河系统采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites in Zhaidi karst river system

表 1 寨底地下河系统样点类型
Table 1 Type of sampling sites

样点	类型	样点	类型	样点	类型	样点	类型
G001	泉点	G027	泉点	G016	地下河出口	G047	地下河出口
G006	落水洞	G029	溶潭	G017	落水洞	G049	泉点
G007-1	民井	G030	地下河出口	G019	溶潭	G052	泉点
G011	天窗	G032	地下河出口	G020-1	溶潭	G070	地下河出口
G013	泉点	G037	天窗	G021	泉点	G071	溶潭
G014	落水洞	G041	溶潭	G025	溶潭	G072	泉点
G015	溶潭	G043	泉点	G026	溶潭	G073	泉点

保证水样 4℃ 冷藏。

样品的阴阳离子 (K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-}) 以及溶解性有机碳 DOC 含量由中国地质科学院桂林岩溶地质研究所水质化验中心测定。

1.3 DOM 光学性质的测定方法

DOM 光学性质的测定工作在中国科学院南京地理与湖泊研究所光学实验室进行。

光谱吸收系数测定采用孔径 0.22 μm 的 Millipore 膜过滤的水样在 UV-2450PC 型分光光度计 240 ~ 800 nm 波长测定吸光度, 然后进行计算、校正得到各波长的吸收系数, 本研究以 355 nm 的吸收系数 a_{355} 来表示 DOM 光学物质的浓度并以此波长处的吸收与荧光强度建立关系。

三维荧光光谱采用日立 F-7000 FL Spectrophotometer 分光光度计测定, 激发和发射夹缝宽度为 5 nm, 激发波长为 200 ~ 450 nm, 间隔为 5 nm, 发射波长 250 ~ 600 nm, 以 1 nm 间隔得到荧光光谱, 减去 Milli-Q 超纯水三维荧光光谱以校正水的拉曼散射, 同时利用 0.01 $mg \cdot L^{-1}$ 硫酸奎宁进行荧光定标。

1.4 平行因子分析法 (PARAFAC)

PARAFAC 法是通过数学统计的方法把 DOM 复杂的荧光数据矩阵分离出不同的组分, 将所有点位的整个三维荧光数据组分解成 3 个线性项和一个残留数组, 它是基于三线性理论的一种方法。PARAFAC 法计算过程可以称为交替最小二乘 (ALS) 算法:

$$x_{ijk} = \sum_{f=1}^F a_{if} b_{jf} c_{kf} + e_{ijk},$$

$i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K$ 式中, x_{ijk} 是第 i 个样点在激发波长为 k 、发射波长为 j 处的荧光强度; a_{if} 是第 i 个样点的第 f 次分析的含量; b_{jf} 和 c_{kf} 分别与第 f 次分析后激发波长为 j 、发射波长为 k 光谱线性相关。 e_{ijk} 为系统残差, 是不受模

型控制的变量。 F 为模型中选择的组分因子数量。

1.5 统计分析

在 MATLAB 中使用 DOMFluor 工具箱运行 PARAFAC 法模型对样点的三维荧光数据进行分析。运用 SPSS 11.5 进行均值、标准差、组间方差以及线性拟合等数据统计分析。运用 SPSS 11.5 进行均值、标准差、组间方差以及线性拟合等数据统计分析。回归分析和相关分析用于检测变量之间的关系。 $P > 0.05$ 表示未达到显著检验水平, $0.01 < P < 0.05$ 为显著水平, $P < 0.001$ 为极显著水平。

2 结果与分析

2.1 寨底地下河系统地下水的理化特征

表 2 展示了寨底地下河系统中 28 个采样点的基本物理指标 (E_c 、pH), 化学指标以及 DOM 特征值 (a_{355} 、DOC)。

由水化学组成得出本系统的地下水均为 $Ca-HCO_3$ 型, 反映出 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 为该区地下水中的主要阴阳离子, 表明整个寨底地下水系统的地下水水文化学特征主要受水岩相互作用控制。

2.2 DOM 荧光物质的 PARAFAC 组分解译

将 28 个采样点的 CDOM 三维荧光图谱全部放入 PARAFAC 模型中进行计算, 得到 3 种荧光组分, 图 2 给出平行因子分析法获得的 3 种荧光组分的三维荧光图谱及对半检验结果, 这 3 种荧光组分的光谱特征与文献报道的其他水生环境中得到的荧光组分很相似^[23-26]。

由图 2 可知, 组分 C1 最大激发波长在 230 nm 处, 最大发射波长在 417 nm, 其位置分别与陆源类腐殖质荧光峰 A 位置相似, 同时也与其他研究中的 PARAFAC 陆源类腐殖质荧光组分相似。组分 C2 在 255 nm 处和 370 nm 处存在激发最大值, 一个发射最大值在 469 nm 处, 其峰值与文献中陆源类腐殖质荧光 A 峰和 C 峰的位置相近, 同时也与其他研究中的 PARAFAC 陆源类腐殖质荧光组分相似。组分 C3

有两个最大的激发波长,分别在 $<225\text{ nm}$ 和 275 nm 处,最大发射波长在 $<300\text{ nm}$,其峰值与文献中自生来源的类蛋白酪氨酸荧光峰 B 峰的位置相近,同时也与其他研究中的 PARAFAC 类蛋白酪氨酸荧光组分相似。

因此,结合以往的研究结果和本文分析,可以认为组分 C1、C2 为陆源输入的一类腐殖质荧光有机物,组分 C3 则为内源类蛋白酪氨酸荧光有机物。在本次取样调查中并没有发现有海源类腐殖质荧光峰以及内源类蛋白酪氨酸荧光峰,而这两种荧光峰都是由微生物作用生成的荧光峰,据此

推断,丰水期寨底地下水系统中 DOM 的荧光特征以外源输入为主。

就整个系统地下水的 DOM 荧光组分而言,陆源类腐殖质荧光峰组分的贡献率 $C1\% + C2\%$ 变化范围为 $27.96\% \sim 84.33\%$,均值为 $58.21\% \pm 15.15\%$,内源类蛋白酪氨酸荧光组分贡献率 $C3\%$ 变化范围为 $15.67\% \sim 72.04\%$,均值为 $41.49\% \pm 15.15\%$,组间方差分析显示 $C1\% + C2\%$ 显著大于 $C3\%$ (ANOVA, $P \leq 0.005$),表明 DOM 荧光组分以陆源类腐殖质荧光组分为主,反映了夏季丰水期外源输入对地下水系统 DOM 的重要贡献。

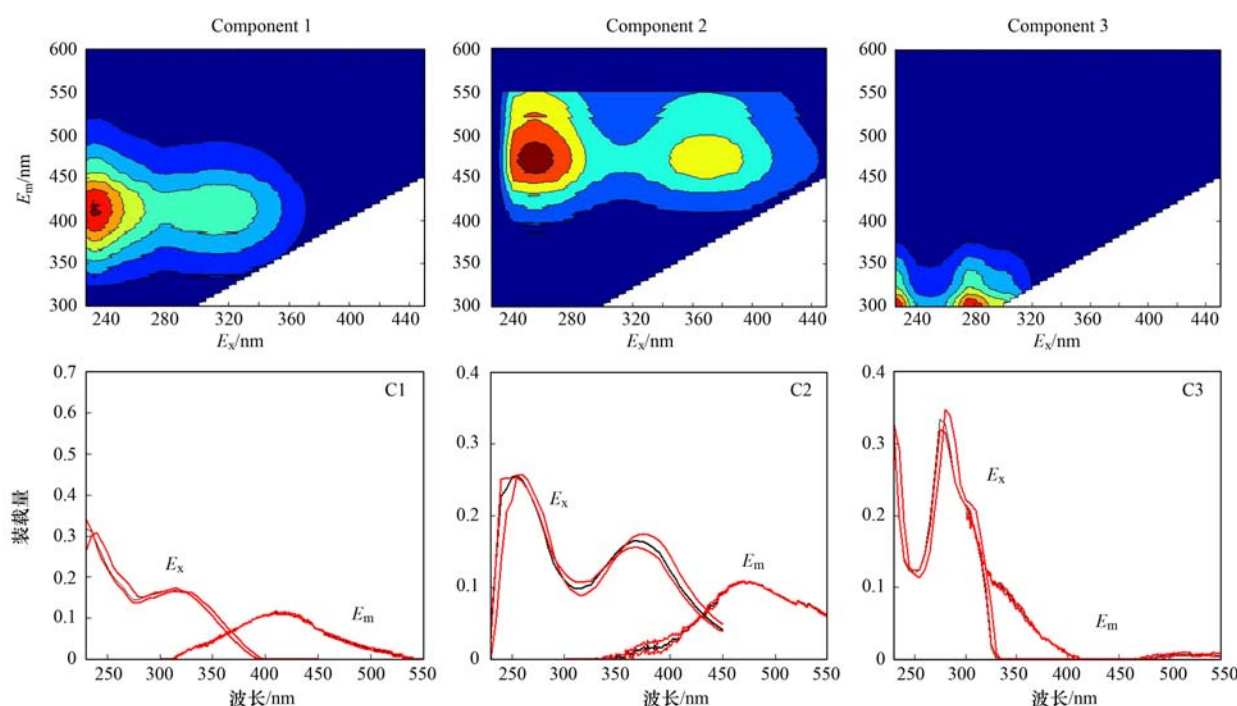


图2 寨底地下河系统地下水 CDOM 荧光组分三维荧光图及对半检验

Fig. 2 EEM contours of the four fluorescent components identified by PARAFAC

2.3 DOM 荧光组分的 PCA 分析

对平行因子分析法解译出的 5 种荧光组分对总荧光强度的贡献率进行 PCA 分析,得到的 PCA 前两轴载荷图,其中轴 1 和轴 2 对原数据的解释量分别为 96.16% 和 3.84% ,两轴对数据的解释率为 100% ,说明 PCA 分析对原数据的损失不大,而且第一轴基本上涵盖了原数据的主要信息。如图 3,类腐殖质荧光 C1 和 C2 位于第一象限,类蛋白酪氨酸荧光组分 C3 则位于第三象限。第一主成分轴(或第二主成分轴)得分越高,代表类腐殖质荧光所占比重越大,反之,第一主成分轴(或第二主成分轴)得分

越低,代表类蛋白酪氨酸荧光所占比重越大。

如图 3,CDOM 荧光组分主成分分析图呈现的是样点之间的类型差异,而非区域差异。泉点类型的样点主要集中在第二、三象限,在第一轴的得分基本上为负值,表明泉点的 DOM 表现出明显的类蛋白酪氨酸荧光特征优势。溶潭类型的样点主要集中分布在第四象限,说明其类蛋白酪氨酸荧光比重低于泉点,但高于其他类型。而其他类型如天窗、落水洞以及地下河出口类型的样点分布比较分散,没有呈现出较强的规律性,可能受区域差异的影响较大。

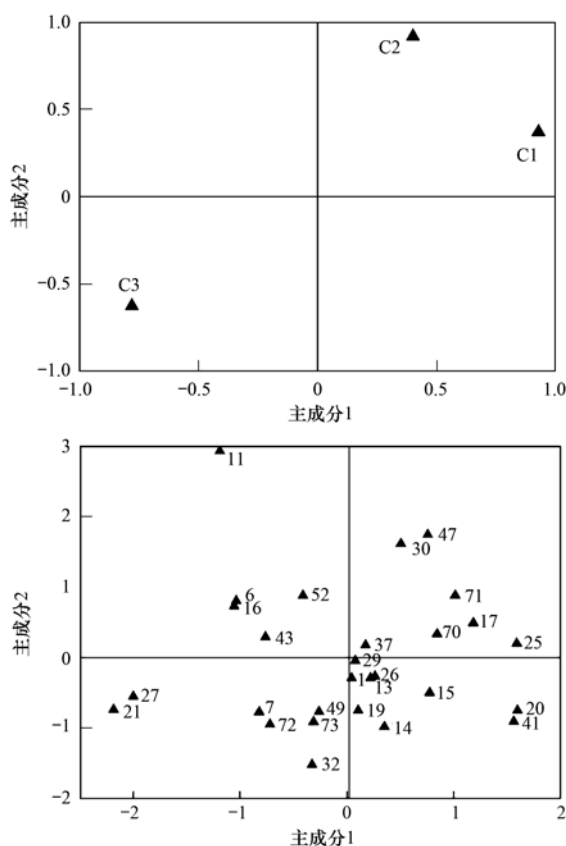


图3 DOM 荧光组分主成分分析

Fig. 3 PCA results of DOM fluorescence components

3 讨论

3.1 DOM 荧光组分与传统指标之间的关联

对表2中涉及到的各基本理化指标以及DOM特征值分别进行了均值、极值、标准方差、变异系数以及偏度等5项统计学分析,其中变异系数最大的是 a_{355} 和DOC,均超过了1.0,其次是阳离子 K^+ 、 Na^+ 以及阴离子 Cl^- ,反映了与传统的地下水阴阳离子指标相比,DOM特征值的空间变化更加明显,也更能反映出地下水系统的细微变化(表2)。

对各指标进行相关分析,发现 K^+ 与 a_{355} 、DOC以及DOM类腐殖质荧光组分C1、C2之间都存在极显著相关关系。由于钾的化学性质比较活泼,而且它的生物活性也决定了钾离子的迁移性比较弱,导致有机质常常吸附钾离子,而且动植物有机质也可以从水中吸收钾,因此,DOM与钾离子之间的相关关系可以用来监测地下水钾离子的变化规律以及辨析其来源。

3.2 DOM 的补径排变化特征

由以上的分析可以看出,传统的理化指标主要反映地下河系统的区域特征,而DOM荧光组分则

更多地反映了类型差异,因此,将传统的理化指标和DOM荧光组分特征相结合,更加系统地分析寨底地下河系统不同区域以及不同类型的补径排变化特征。

(1) 钓岩地下河子系统

水由G006~G016,理化指标 E_c 、 Ca^{2+} 以及 HCO_3^- 有明显上升,表明其经历了碳酸盐岩与水的相互作用;DOM特征值明显下降,而各荧光组分所占比重均无明显变化,表明由G006输入地下河管道的外源DOM只是在物理作用(如泥沙颗粒吸附等)下经历了量的变化,而并没有经历微生物降解作用发生质的改变。由G016~G025,理化指标 E_c 、 Ca^{2+} 以及 HCO_3^- 、DOM特征值及荧光组分第一轴得分均明显升高,即从地下河出口流出的水在流向泉点的过程中,水岩相互作用持续,而且水流携带了大量陆源类腐殖质荧光有机质。表明在丰水期,水主要以地表水的形式由G016流向G025。

(2) 水牛砚地下河子系统

溶潭G026及泉点G027下泄的地表水经由G029进入地下,从G030排出,整个过程中理化指标均无明显变化,表明水流过程中水岩交互并不强烈,受人为影响也不大。但地表水流至G029时,DOC降低伴随 a_{355} 及荧光组分第一轴得分增加,表明在无DOM输入的情况下,微生物降解发挥了主要作用,将非荧光DOM降解为荧光DOM;排入地下后至G030,DOC不变, a_{355} 降低,荧光组分第一轴得分则继续增加,表明地下水中的微生物降解继续发挥作用,荧光组分中易被降解的类蛋白荧光有机质作为能量被消耗。

(3) 豪猪岩-东究地下河子系统

由G011~G032,理化指标 E_c 、 Ca^{2+} 以及 HCO_3^- 上升,DOC下降而 a_{355} 、FI上升,荧光组分第二轴得分下降,表明地下潜流水岩交互强烈,地下水微生物活动强烈,将非荧光物质降解为荧光物质,而且微生物死亡腐烂生成的活性有机质也使得类蛋白荧光比重大幅增加。

(4) 寨底地下河系统总出口

不同区域及类型的地表水混合后流至G037,导致各种指标变化较复杂。流入地下后至G047,理化指标 E_c 、 Ca^{2+} 以及 HCO_3^- 上升, Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 以及 SO_4^{2-} 下降,DOC、 a_{355} 、FI小幅度下降,荧光组分第一、二轴得分均增加,表明地下水-岩交互强烈,受人为影响不大,基本无外源DOM输入,地下水微生物对DOM的降解并不明显,主要是微生物呼吸

表 2 寨底地下河系统地下水的理化及 DOM 特征指标

Table 2 Physicochemical indicators and DOM features of karst water samples											
样点	E_c / $\mu S \cdot cm^{-1}$	pH	K^+ / $mg \cdot L^{-1}$	Na^+ / $mg \cdot L^{-1}$	Ca^{2+} / $mg \cdot L^{-1}$	Mg^{2+} / $mg \cdot L^{-1}$	Cl^- / $mg \cdot L^{-1}$	SO_4^{2-} / $mg \cdot L^{-1}$	HCO_3^- / $mg \cdot L^{-1}$	a_{355} / cm^{-1}	DOC / $mg \cdot L^{-1}$
G001	385	7.32	0.69	1.78	82.98	2.76	6.58	12.01	232.86	0.42	1.54
G006	233	7.8	0.28	0.71	71.06	3.46	2.75	7.1	205.79	0.71	1.16
G007	391	7.46	2.47	2.52	91.36	3.86	6.78	9.73	238.28	0.28	1.08
G011	185.4	7.86	0.83	0.4	39.42	4.14	1.54	5.54	121.31	0.71	6.60
G013	436	7.28	0.37	0.39	116.7	1.45	1.08	6.82	337.93	0.46	3.14
G014	429	7.29	0.37	0.48	109.1	1.89	2.31	13.44	277.27	0.53	1.41
G015	411	7.42	1.87	1.61	86.28	2.62	7.22	12.08	238.28	1.80	3.28
G016	339	7.75	0.36	0.56	81.38	3.08	2.87	8.25	236.12	0.23	0.84
G017	376	7.72	3.7	1.53	86.14	1.69	3.15	10.78	225.28	4.84	5.63
G019	342	7.87	0.96	1.18	56.96	2.56	4.93	10.24	160.3	1.77	3.72
G020	377	7.58	2.01	1	64.64	2.66	4.71	9.63	186.29	2.86	6.22
G021	36.8	6.21	0.27	0.35	5.69	1.32	1.25	2.62	17.33	0.30	1.13
G025	389	7.44	0.69	0.24	94.97	2.36	1.44	8.77	277.27	1.57	1.58
G026	397	7.53	1.74	1.83	78.11	3.91	5.06	8.95	218.78	0.90	3.11
G027	371	7.48	1.22	1.6	79.55	3.92	4.58	8.64	233.95	0.81	1.52
G029	375	7.74	1.26	1.65	79.45	3.87	4.65	8.85	220.95	1.04	1.29
G030	371	7.38	1.14	1.48	76.46	3.89	4.74	9	223.12	0.74	1.30
G032	247	7.57	0.86	0.36	54.81	3.99	1.63	6.45	175.46	1.36	1.85
G037	335	7.84	0.84	0.65	74.95	4.08	2.48	7.66	242.61	0.71	1.24
G041	332	8.12	1.22	0.76	67.72	2.74	2.94	8.7	175.46	2.37	4.61
G043	440	7.55	0.09	0.14	108.6	1.57	1.06	6.31	328.18	0.39	1.04
G047	347	7.6	0.76	0.59	76.1	4.04	2.46	7.94	238.28	0.67	1.18
G049	431	7.52	0.21	0.18	111.8	2.33	1.27	6.31	324.93	0.39	0.90
G052	401	7.56	0.12	0.4	94.53	3.52	1.35	9.98	279.44	0.51	0.89
G070	400	7.5	0.4	0.31	97.14	3.68	1.78	10.45	281.61	1.15	2.08
G071	333	7.41	2.56	0.5	63.77	3.35	2.48	5.26	203.62	10.87	13.65
G072	518	7.52	0.16	0.26	123.1	3.94	1.18	8.19	363.92	0.25	1.41
G073	438	7.54	0.14	0.15	107.8	2.47	1.12	7.08	316.27	0.74	1.65

作用消耗类蛋白荧光物质。

4 结论

(1)与传统的地下水阴阳离子指标相比,DOM 特征指标值空间变化更加明显,也更能反映出地下水系统的细微变化。

(2)传统的理化指标主要反映地下河系统的区域特征,而 DOM 荧光组分则更多地反映了类型差异。

(3)共检验出 3 种 DOM 荧光组分,其中 C1、C2 为陆源输入类腐殖质荧光有机物,C3 则为内源类蛋白酪氨酸荧光有机物。DOM 荧光组分以陆源类腐殖质荧光组分为主,反映了夏季丰水期外源输入对地下水系统 DOM 的重要贡献。

致谢:本实验的现场采样工作由中国地质科学院岩溶地质研究所王喆、卢海平等协助完成,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 刘丛强.生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特

流域侵蚀与生源要素循环[M].北京:科学出版社,2007.

265-375.

[2] 蒲俊兵,袁道先,扈志勇,等.高分辨率监测岩溶地下水 NO_3^- 的动态变化及对外界环境的响应[J].环境科学,2011,32(3):680-686.

[3] 章程,袁道先,曹建华,等.典型表层岩溶泉短时间尺度动态变化规律研究[J].地球学报,2004,25(4):467-471.

[4] 何守阳,朱立军,董志芬,等.典型岩溶地下水系统地球化学敏感性研究[J].环境科学,2010,31(5):1176-1182.

[5] 刘再华,袁道先.中国典型表层岩溶系统的地球化学动态特征及其环境意义[J].地球论评,2000,46(3):324-327.

[6] 徐尚全,杨平恒,殷建军,等.重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究[J].环境科学,2013,34(1):77-83.

[7] 蒋勇军,袁道先,谢世友,等.岩溶流域土地利用变化对地下水水质的影响——以云南小江流域为例[J].地理学报,2006,61(5):471-481.

[8] 杨平恒,旷颖仑,袁文昊,等.降雨条件下典型岩溶流域地下水中的物质运移[J].环境科学,2009,30(11):3249-3255.

[9] 杨平恒,刘子琦,贺秋芳.降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析[J].环境科学,2012,33(10):3376-3381.

- [10] 李强, 孙海龙, 贺秋芳, 等. 自然降雨条件下岩溶区土壤钾、氮流失及其对泉水水化学的影响——以广西马山弄拉为例[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(2): 467-470.
- [11] 袁道先. 岩溶作用对环境变化的敏感性及其记录[J]. 科学通报, 1995, **40**(13): 1210-1213.
- [12] 吴丰昌, 王立英, 黎文等. 天然有机质及其在地表环境中的重要性[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 1-12.
- [13] Chen C C, Gillig D, McCarl B A. Effects of climatic change on a water dependent regional economy: A study of the Texas Edwards Aquifer [J]. Climatic Change, 2001, **49**(4): 397-409.
- [14] Butscher C, Huggenberger P. Modeling the temporal variability of Karst groundwater vulnerability, with implications for climate change [J]. Environmental Science and Technology, 2009, **43**(6): 1665-1669.
- [15] Baker A, Genty D. Fluorescence wavelength and intensity variations of cave waters [J]. Journal of Hydrology, 1999, **217**(1-2): 19-34.
- [16] Baker A, Lamont-Black J. Fluorescence of dissolved organic matter as a natural tracer of ground water [J]. Ground Water, 2003, **39**(5): 745-750.
- [17] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Production of chromophoric dissolved organic matter fluorescence in marine and estuarine environments: an investigation into the role of phytoplankton [J]. Marine Chemistry, 2002, **77**(1): 7-21.
- [18] Mcknight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. Limnology and Oceanography, 2001, **46**(1): 38-48.
- [19] Kowalczyk P, Cooper W J, Whitehead R F, *et al.* Characterization of CDOM in an organic-rich river and surrounding coastal ocean in the South Atlantic Bight [J]. Aquatic Sciences, 2003, **65**(4): 384-401.
- [20] Burdige D J, Kline S W, Chen W H. Fluorescent dissolved organic matter in marine sediment pore waters [J]. Marine Chemistry, 2004, **89**(1-4): 289-311.
- [21] 王静, 吴丰昌, 王立英, 等. 超滤、三维荧光光谱与高效体积排阻色谱联合表征地表水环境中溶解有机质的性质[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3027-3034.
- [22] 徐华山, 赵同谦, 孟红旗, 等. 河岸带地下水营养元素和有机质变化及与洪水的响应关系研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 955-962.
- [23] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation emission-matrix spectroscopy [J]. Marine Chemistry, 1996, **51**(4): 325-346.
- [24] Yao X, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Resolving the variability of CDOM fluorescence to differentiate the sources and fate of DOM in Lake Taihu and its tributaries [J]. Chemosphere, 2011, **82**(2): 145-155.
- [25] Komada T, Reimers C E, Luther G W, *et al.* Factors affecting dissolved organic matter dynamics in mixed-redox to anoxic coastal sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, **68**(20): 4099-4111.
- [26] Stedmon C A, Markager S, Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy [J]. Marine Chemistry, 2003, **82**(3-4): 239-254.

CONTENTS

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