

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM _{2.5} 成因分析及效果评估	吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦	(1)
长三角地区重点源减排对PM _{2.5} 浓度的影响	于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉	(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析	戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东	(24)
京津冀及周边地区PM _{2.5} 时空变化特征遥感监测分析	陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉	(33)
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性	王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强	(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响	赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳	(55)
天津夏季边界层低层大气中PAN和O ₃ 的输送特征分析	姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹	(67)
成都冬季PM _{2.5} 化学组分污染特征及来源解析	吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健	(76)
郑州市冬季PM _{2.5} 传输路径和潜在源分析	段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹	(86)
常州春季PM _{2.5} 中WSOC和WSON的污染特征与来源解析	李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东	(94)
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子	孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧	(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征	梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻	(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性	杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义	(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性	阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋	(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放	张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀	(135)
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除	任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军	(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义	桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟	(149)
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征	程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈苇, 杨丽阳	(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析	朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏	(164)
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓	(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性	李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双	(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO ₂ 交换通量及其影响因素	罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦	(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用	李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠	(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征	李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉	(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例	丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚	(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量	李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文	(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源	苗迎, 孔祥胜, 李成展	(239)
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价	张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华	(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险	付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭	(256)
原水性质对新型含Ca ²⁺ 复合混凝剂混凝过程的影响	曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升	(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用	李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国	(273)
MoS ₂ /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能	张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐	(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星	倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖	(293)
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能	张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋	(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能	邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意	(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化	唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设	(318)
不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应	胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌	(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响	崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶	(336)
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响	甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明	(343)
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响	王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆	(352)
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷	巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇	(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行	李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰	(369)
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建	(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响	冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊	(392)
紫色土N ₂ O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应	黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅	(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征	张双双, 靳振江, 贾远航, 李强	(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析	孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进	(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化	贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿	(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估	王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志辉, 韩科, 阮心玲	(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响	杨伟光, 王美娥, 陈卫平	(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价	林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖	(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征	许议元, 何天容	(461)
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹	(470)
不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响	王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥	(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析	王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成	(488)
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响	邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民	(496)
一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价	冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟	(504)
《环境科学》征订启事(113)		
《环境科学》征稿简则(238)		
信息(93, 262, 342)		

基于 UV-vis 及 EEMs 解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量 DOM 的光谱特征及来源

周石磊¹, 张艺冉¹, 黄廷林^{2*}, 刘艳芳¹, 张磊¹, 李贵霞¹, 岳琳¹, 罗晓¹

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 运用三维荧光光谱(EEMs)技术结合平行因子分析法(PARAFAC)以及紫外-可见光谱技术,对周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量雨水的溶解性有机物(DOM)光谱特征和来源进行分析。结果表明,夏秋季降雨不同相对分子质量 DOM 的紫外-可见吸收光谱并无明显特征峰,吸收系数的变异系数在 75% ~ 469% 之间,表明其性质在不同季节和相对分子质量上存在差异; a_{254} 和 E3/E4 变化说明 DOM 的相对浓度和富里酸所占 DOM 的比例随着季节由夏入秋而增加;三维荧光通过 PARAFAC 解析出 4 种组分,分别为类腐殖质(C1、C2)、可见区富里酸(C3)和类蛋白(C4);对 4 个组分进行相关性分析,结果显示 C1 与 C2、C3 以及 C4 具有显著的相关性($P < 0.01$),C2 与 C3 具有显著的相关性($P < 0.01$);夏秋季降雨 DOM 总荧光强度以及各组分荧光强度差异明显($P < 0.05$),类腐殖质(C1 + C2)是其主要成分、富里酸的荧光强度和所占比例随着季节由夏入秋而增加、类蛋白随着季节由夏入秋而减少;夏秋季降雨有机物来源都呈现以自生源为主的特征,夏季降雨具有自生源特征更强、类蛋白物质含量和占比更多的特点;PCA 分析显示夏秋季降雨中不同相对分子质量雨水荧光特征差异明显,并且组分 C1、C2 和 C3 与 DOM 特征参数[HIX、Fn(355)、Fn(280)、E3/E4、 a_{254}]以及水质参数(硝氮、氨氮、总氮以及有机碳)显著相关性($P < 0.01$)。通过对夏秋季不同降雨相对分子质量的 DOM 光谱特征研究,可以进一步分析水库大气沉降型外源输入的有机物污染特征,并为水库水质管理提供技术支持。

关键词: 溶解有机质(DOM);降雨;相对分子质量;紫外-可见光谱;三维荧光光谱(EEMs)

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0172-13 DOI: 10.13227/j.hjkt.201805215

Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs

ZHOU Shi-lei¹, ZHANG Yi-ran¹, HUANG Ting-lin^{2*}, LIU Yan-fang¹, ZHANG Lei¹, LI Gui-xia¹, YUE Lin¹, LUO Xiao¹

(1. Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on excitation emission matrix spectroscopy (EEMs) technology combined with parallel factor analysis (PARAFAC) and UV-Vis spectra, we analyzed the spectral characteristics and sources of dissolved organic matter (DOM) in rainwater with different DOC molecular weight in summer and autumn in the Zhoucun Reservoir. The results show that the UV-Vis absorption spectrum of DOM have no notably characteristic peak and the variation coefficient of the absorption coefficient ranges between 75% and 469%, which shows the properties of DOM with different molecular weight. The changes of a_{254} and E3/E4 show that the relative concentration of DOM and the proportion of fulvic acid in DOM both increase from summer to autumn, respectively; Two humic-like substances (C1, C2), one fulvic-like substance (C3), and one protein-like substance (C4) were identified with the PARAFAC model, with a significant correlation coefficient ($P < 0.01$) in C1&C2/C3/C4 and C2&C3, respectively. The total DOM fluorescence intensity and the fluorescence intensity of each component exhibit significantly different distributions ($P < 0.01$). Moreover, C1 + C2 account for the majority proportion of DOM and C3 and C4 exhibit an increase and decrease from summer to autumn, respectively. The rainwater in summer and autumn both exhibit a strong autochthonous component characteristics and the summer rainwater has higher autochthonous characteristics. The PCA shows that the spectral characteristics of the rainwater exhibit notable differences. Moreover, C1, C2, and C3 exhibit a significant correlation coefficient ($P < 0.01$) with DOM indices [HIX, Fn(355), Fn(280), E3/E4, a_{254}] and water quality parameters. The results contribute to the future exploration and control of organic carbon pollution sources by managers of the Zhoucun Reservoir.

Key words: dissolved organic matter (DOM); rainwater; relative molecular weight; UV-vis spectrum; excitation emission matrix spectroscopy (EEMs)

收稿日期: 2018-05-25; 修订日期: 2018-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478378); 国家科技支撑计划项目(2012BAC04B02); 优博培育基金项目(6040317010)

作者简介: 周石磊(1987~),男,博士,讲师,主要研究方向为水质微污染控制与水资源保护, E-mail: ZSLZhouShilei@126.com

* 通信作者, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是生态系统的重要组成部分,主要包括亲水性有机酸、类蛋白、类氨基酸、类腐殖酸和碳水化合物等^[1]。溶解性有机质在碳循环过程中发挥着重要的作用,并且广泛地存在水体和沉积物中。溶解性有机质不仅可以作为微生物的营养和能源来源^[2],而且还可以与金属以及有机污染物相结合、从而影响了其化学形态^[3],并且在水处理过程中与消毒剂发生反应产生消毒副产物、进而给水质安全带来潜在的危害^[4, 5]。由于溶解性有机质在全球碳循环中日益受到重视^[6],因此,关于溶解性有机物的组成及其特征的研究成为近年来的热点^[7]。

紫外-可见光谱以及三维荧光结合平行因子分析技术因其灵敏高效的特征,被广泛用于表征河流^[8, 9]、河口^[10, 11]、湖泊^[12, 13]、水库^[14~17]、海湾^[18, 19]、湿地^[20]、海洋^[21, 22]和土壤^[23]等不同来源 DOM 的组成结构和来源解析。众所周知,大气沉降是全球碳迁移循环的一个关键环节。因此,开展溶解有机物(DOM)在雨水中的含量分布及其特征解析,有助于探讨大气沉降途径在碳循环中所起的作用。特别是,近年来在全球气候变化的影响下,极端暴雨事件频发,不仅使流域内陆源物质的浓度和通量在短时间内呈现脉冲式增加^[24, 25],而且还会改变水体 DOM 的化学组成和生物可利用性^[26],进而间接影响有机污染物的形态^[27]。然而,针对降雨中 DOM 组分和来源的解析鲜有报道。比如,魏珈等^[25]研究了降雨事件对不同流域背景河流 DOM 组成和入海通量的影响,结果表明暴雨事件会放大人类活动对下游河口生态环境的影响;梁俭等^[28]利用紫外-可见光谱与三维荧光光谱对夏、秋季降雨

中溶解性有机质的光谱特征和来源进行了解析,结果表明雨水 DOM 与水体、土壤 DOM 具有类似性质光谱特征,证明降雨 DOM 也是陆地及水环境中 DOM 地化特征的重要贡献者;吴秀萍等^[29]对广州市番禺区大学城雨水溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征进行了研究,夏季 DOM 平均相对分子质量较高,而春季和冬季 DOM 相对分子质量相对较低。尤其是,对于饮用水水库水源地周边的降雨中 DOM 的组成和光谱特征研究更少。

周村水库是山东省枣庄市重要的水源水库,其水质安全影响人民的切身生活^[30]。开展雨水中 DOM 组成和特性的研究,对评估水源水体大气沉降型的有机物外源输入和富营养化控制,具有非常重大的意义。因此,本研究利用紫外可见吸收光谱以及三维荧光光谱分析技术,分析 2016 年夏秋两季(6~11 月)雨水不同相对分子质量下的 DOM 组成和光谱特征。通过对夏秋季雨水中不同相对分子质量溶解有机质组分及其荧光特征的研究,将有助于了解 DOM 的结构、来源以及对其生态环境效应的影响,以为周村水库水体水质污染防治以及运行管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样地点和时间

周村水库位于山东省枣庄市孟庄镇周村南,地理位置为 34°56'14"~34°57'48"N、117°39'33"~117°41'33"E,总库容 8 404 万 m³,是枣庄市主要的城市供水水源地。本研究选取 2016 年夏秋季降雨(6~11 月)为研究对象,夏秋两季降雨的详细情况如表 1 所示。

表 1 周村水库夏秋两季降雨的基本情况¹⁾/mm

Table 1 Basic information about summer/autumn rainwater in the Zhoucun Reservoir/mm

降雨月份	第一场降雨	第二场降雨	第三场降雨	第四场降雨	第五场降雨	第六场降雨	第七场降雨
6	81 (23)	93.3 (30)	—	—	—	—	—
7	32 (13)	37.5 (15)	59 (19)	29 (20)	32 (21)	22.5 (28)	10.5 (31)
8	16.5 (7)	4.5 (15)	6 (20)	—	—	—	—
9	19.5 (7)	6.5 (12)	—	—	—	—	—
10	26 (1)	30.5 (15)	6 (21)	13.5 (24)	8 (26)	12 (28)	—
11	5.5 (7)	4.5 (21)	—	—	—	—	—

1) 括号内数据表示降雨日期

1.2 样品提取及测定

采用自制雨量器采集夏秋两季的雨水样品,采样完成后应用超滤杯对雨水样品进行过滤得到不同相对分子质量的 DOM^[31]。收集的不同降雨历时雨水用 0.45 μm 玻璃纤维滤膜(预先 450℃灼烧 5 h)进行过滤得到溶解性有机物雨水样品,通过超滤杯滤膜孔径为 50 × 10³、5 × 10³ 以及 1 × 10³ 的滤膜过

滤后得到相对分子质量 < 50 × 10³、< 5 × 10³ 以及 < 1 × 10³ 的雨水样品。24 h 内完成雨水中硝氮、亚硝氮、氨氮、溶解性总氮、总氮、总有机碳和溶解性有机碳的测定。其中硝氮、亚硝氮、氨氮、溶解性总氮和总氮依据水和废水监测分析方法进行测定^[32],过滤的水样装入玻璃瓶内保存在 4℃ 冰箱里以备 DOM 的光谱分析。

1.3 紫外可见吸收光谱的测定

紫外-可见光谱采用 DR6000 分光光度计(美国 HACH 公司)进行测定,以 Mill-Q 水为空白,用 1 cm 石英比色皿在 200 ~ 700 nm 范围内进行吸光度测定. 本文采用如下公式计算吸收系数^[33, 34]:

$$a'(\lambda) = 2.303 \cdot D(\lambda)/r \quad (1)$$

$$a(\lambda) = a'(\lambda) - a'(700) \cdot \lambda/700 \quad (2)$$

式中, λ 为波长,单位为 nm; $a'(\lambda)$ 和 $a(\lambda)$ 分别为未经散射校正的波长为 λ 处的吸收系数和经过散射校正后的波长为 λ 处的吸收系数,单位为 m^{-1} ; $D(\lambda)$ 为吸光度; r 为光程路径,单位为 m. 本文选取 a_{254} 来表示溶解性有机质的相对浓度. E2/E3 是 250 nm 和 365 nm 处的紫外吸光度之比, E2/E3 值与相对分子质量大小成反比^[23, 35]. 一般腐殖酸的相对分子质量较大,富里酸的则较小,因而可以通过 E2/E3 值表征 DOM 的腐殖化程度. E3/E4 是 300 nm 和 400 nm 处的紫外吸光度之比,用来衡量腐殖质的腐殖化程度和芳香性. SUVA₂₅₄ (a_{254}/DOC)^[36] 和 SUVA₂₈₀ (a_{280}/DOC)^[37] 表征 DOM 芳香性的强弱, SUVA₂₆₀ (a_{260}/DOC)^[36] 表征 DOM 疏水组分的含量.

1.4 三维荧光光谱测定

三维荧光光谱采用 F97 荧光分光光度计进行测定. 设备的激发波长、发射波长以及扫描速度等参数设置同文献[15]. 利用超纯水扣除散射影响,并结合 Delaunay 三角形内插值法修正去除拉曼峰散射和瑞利散射^[38]. 利用 MATLAB 2014a 软件把 88 个样品的荧光矩阵组合,采用 N-way 和 DOMFluor 工具箱进行平行因子分析^[39],并通过核一致性分析确定荧光组分数,利用折半分析结果的可靠性^[40].

1.5 三维荧光光谱的特征指数

荧光指数 FI^[41, 42] 被定义为激发波长为 370 nm 时, 荧光发射光谱在 470 nm 与 520 nm 处的强度比值 ($\text{FI} = F_{470}/F_{520}$), 这个比值反映了芳香氨基酸与非芳香物对 CDOM 荧光强度的相对贡献率,因而可以作为物质的来源以及 DOM 的降解程度的指示指标; 腐殖程度指标 HIX^[43] 被定义为在 254 nm 激光波长下 435 ~ 480 nm 间荧光峰值与 300 ~ 345 nm 间荧光峰值积分值之商 ($F_{435 \sim 480}/F_{300 \sim 345}$), HIX 指数越高则表示 DOM 腐殖化程度越高^[44]; 生物源指数指标 BIX^[45] 被定义为激发波长为 310 nm 时, 荧光发射波长在 380 nm 和 430 nm 处荧光强度的比值 ($\text{BIX} = F_{380}/F_{430}$), 它被用来估计内源物质对 DOM 的相对贡献; 新鲜度指数 ($\beta:\alpha$) 被定义为激发波长为 310 nm 时, 荧光发射波长在 380 nm 处荧光强度

与荧光发射波长在 420 ~ 435 nm 区间最大荧光强度的比值, 反映新生 DOM 在整体 DOM 中所占比例, 是评估水体生物活性的重要依据. Fn(280) 是 $E_x = 280$ nm 时, E_m 在 340 ~ 360 nm 间最大荧光强度, 代表类蛋白质相对浓度水平^[46]. Fn(355) 是 $E_x = 355$ nm 时, E_m 在 440 ~ 470 nm 间最大荧光强度, 代表类腐殖物质的相对浓度水平^[46].

1.6 数据分析

应用皮尔逊相关性分析法以及斯皮尔曼相关性分析法在 SPSS (22.0) 软件中对 DOM 中各荧光组分以及各个特征指数、环境因子进行相关性分析, 应用单因素方差分析来研究雨水样品 DOM 间的差异性.

2 结果与讨论

2.1 紫外-可见吸收光谱曲线特征

如图 1 所示, 分别表示夏秋季 22 场降雨、共 88 个不同相对分子质量雨水样品的紫外吸收系数以及差异系数变化情况. 其中图 1(a) 和 1(b) 表示相对分子质量为 0.45 μm 的 22 场降雨的雨水样品吸收系数和变异系数; 图 1(c) 和 1(d) 表示相对分子质量为 50×10^3 的 22 场降雨的雨水样品吸收系数和变异系数; 图 1(e) 和 1(f) 表示相对分子质量为 5×10^3 的 22 场降雨的雨水样品吸收系数和变异系数; 图 1(g) 和 1(h) 表示相对分子质量为 1×10^3 的 22 场降雨的雨水样品吸收系数和变异系数.

夏秋季不同时期降雨的雨水 DOM 吸收光谱中并无明显特征峰(除 6 月 30 日降雨的 0.45 μm 相对分子质量雨水样品外), 整体上吸收系数随波长增长呈指数形式递减, 在波长达到 540 nm 后吸收几乎为 0. 夏秋两季不同时期降雨的紫外吸收系数差异明显, 而且同一场降雨不同相对分子质量雨水样品中 DOM 的紫外吸收系数也存在差异. 通过夏秋两季降雨的雨水样品紫外吸收系数的变异系数 (75% ~ 469%) 可知, 夏秋两季不同时期降雨的雨水 DOM 性质上存在较大差异, 并且不同相对分子质量雨水样品的 DOM 性质也不同.

2.2 紫外-可见吸收光谱特征参数分析

本研究将夏秋两季的降雨分别按照不同的相对分子质量进行统计分析, 结果如图 2 所示. 如图 2(a) 夏秋两季 0.45 μm 相对分子质量雨水样品中, 夏季样本相比于秋季 DOM 的 E2/E3 值较小, 且分布较分散; 夏秋两季 50×10^3 相对分子质量雨水样品中, 夏季样本相比于秋季 DOM 的 E2/E3 值较大, 且分布特征相似; 夏秋两季 5×10^3 相对分子质量

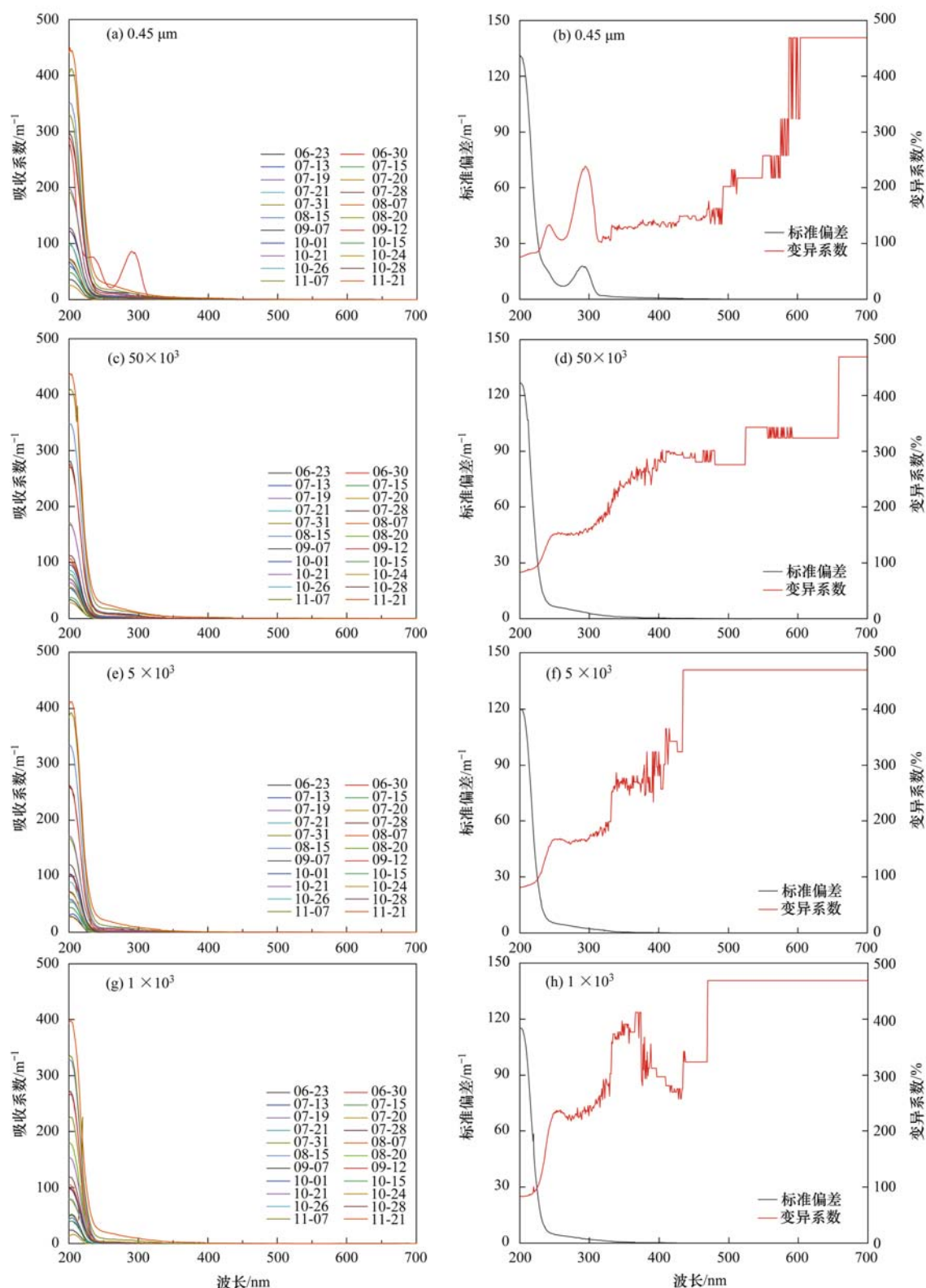
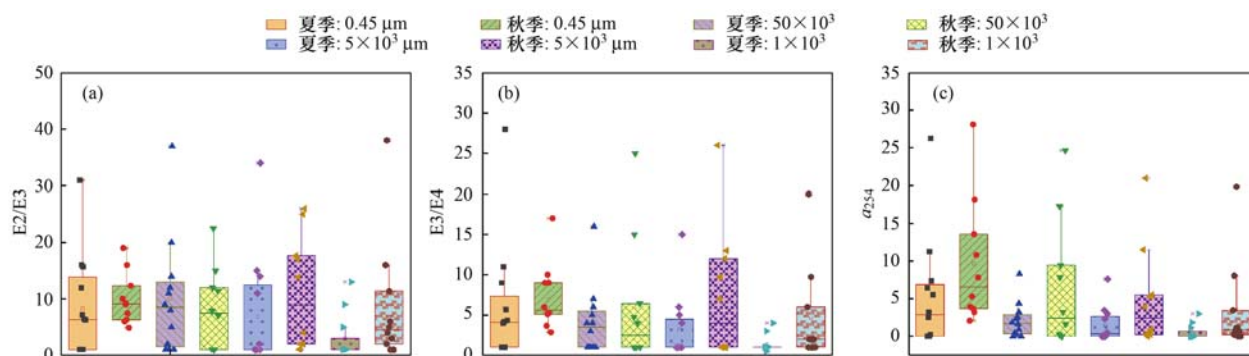


图1 夏秋季降水 DOM 的紫外-可见吸收光谱

Fig. 1 Ultraviolet-visible spectroscopy of the rainwater DOM in summer and autumn

雨水样品中,夏季样本相比于秋季 DOM 的 E2/E3 值较小,且分布较集中;夏秋两季 1×10^3 相对分子质量雨水样品中,夏季样本 DOM 的 E2/E3 值明显小于秋季雨水样本,且分布较集中;从整体上看秋季雨水样品的富里酸占比较大,同一季节间不同降雨的雨水样品也存在差异。图 3 中表示夏秋季降雨

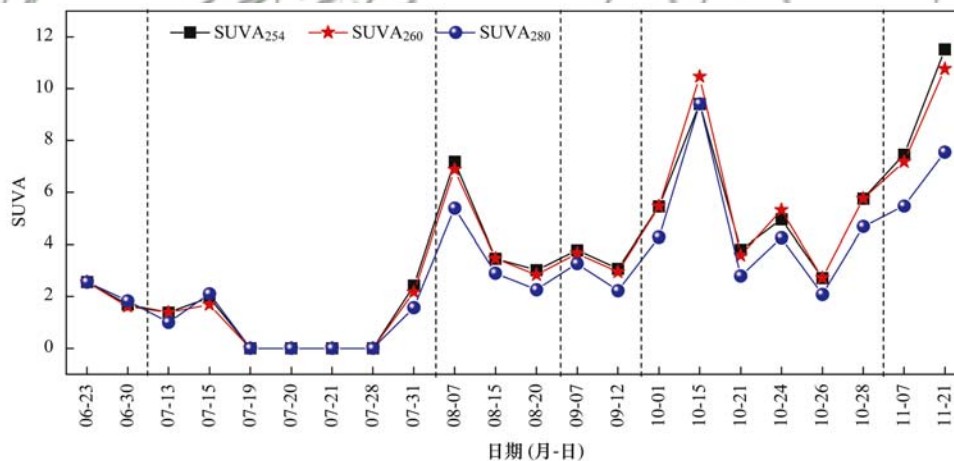
中 SUVA 值的变化情况。秋季降雨的 $SUVA_{260}$ 要高于夏季降雨的雨水样品,表明秋季降雨的疏水性组分强于夏季降雨(图 3);夏季降雨中 $SUVA_{254}$ 和 $SUVA_{280}$ 同样是小于秋季降雨,表明芳香化程度逐渐减弱(图 3);两场暴雨中 $SUVA_{254}$ 与 $SUVA_{260}$ 和 $SUVA_{280}$ 都呈现显著正相关关系($P < 0.01$),相关系

图2 夏秋季降水 DOM 的 E2/E3、E3/E4、 a_{254} Fig. 2 The a_{254} , E2/E3, and E3/E4 values of rainwater DOM in summer and autumn

数达到 0.995 和 0.969, 表明疏水性和芳香性结构关系密切, 即芳香性结构主要存在于疏水组分中, 与高洁等^[36]研究三峡库区消落带土壤中溶解性有机质的结论相一致。

E3/E4 用来衡量腐殖质的腐殖化程度、芳香性以及相对分子质量等。一般而言, 当 E3/E4 < 3.5 时腐殖质以腐殖酸为主, E3/E4 > 3.5 时以富里酸为主。如图 2(b) 本研究 0.45 μm 相对分子质量雨水样品中 E3/E4 的均值均大于 3.5、雨水样品中 DOM 以富里酸为主。各个相对分子质量雨水样品

中夏季雨水样品的 E2/E3 值都要明显小于秋季雨水样品, 说明秋季降雨的 DOM 富里酸的相对比例高于夏季降雨。并且随着相对分子质量的减少各个季节雨水样品的 E3/E4 值在减少, 表明随着相对分子质量的减少, 各个季节雨水样品 DOM 腐殖化程度在增加。本研究用 a_{254} 表示 DOM 的相对浓度, 由图 2(c) 可知秋季降雨的 a_{254} 明显高于夏季降雨, 并且随着相对分子质量的减少 a_{254} 呈现下降的趋势, 与夏秋两季溶解性有机碳以及相对分子质量的分布是一致的。

图3 夏秋季降水 DOM 的 SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀、SUVA₂₈₀Fig. 3 SUVA₂₅₄, SUVA₂₆₀, and SUVA₂₈₀ values of rainwater DOM in summer and autumn

2.3 暴雨不同历时的 DOM 荧光组分特征分析

2.3.1 沉积物间隙水 DOM 的荧光组分分析

通过平行因子分析对夏秋季降雨不同相对分子质量的雨水样品进行三维荧光解析, 分析 DOM 的成分构成。因为 PARAFAC 对组分数很敏感, 只有选择正确的组分数目而且信噪比合适, 解析的结果才能反映真实的谱图。从图 4 可以看到, 成分从 3 变为 4 时, 残差平方和急剧变小, 而从 $F=4$ 变成 $F=5$ 时, 残差平方和变化不大, 初步确定成分 $F=4$ 最合适。对 $F=4$ 时的结果经过折半分析[图 4(b)], 得到折半曲线吻合; 核一致性检验(图 5)表

明, 成分为 4 时核一致性系数为 74.54% 位于 80% 附近, 并且处于急剧下降段; 因此最终确定成分 $F=4$ 最合适。

夏秋两季降雨不同相对分子质量的雨水样品的各成分的荧光光谱图如图 6 所示, 共解析得到 4 种组分, 2 种类腐殖质(C1 和 C2)、1 种类富里酸(C3)以及 1 种类蛋白(C4)。

结合前人研究的成果(表 2), 综合分析得到: C1 的荧光峰位置是 345/420 nm (E_x/E_m), 为可见光类腐殖质(C 峰); C2 的荧光峰位置是 350/460 nm (E_x/E_m), 为长波类腐殖质/陆源类腐殖质、具

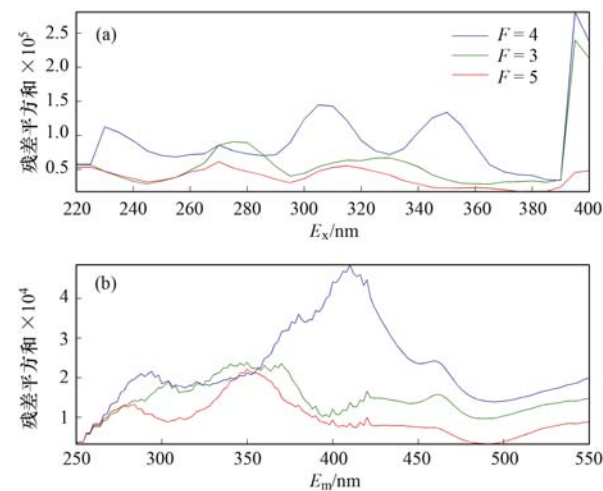


图 4 夏秋季降水荧光组分的残差分析
Fig. 4 Residual analysis of EEM samples in rainwater in summer and autumn

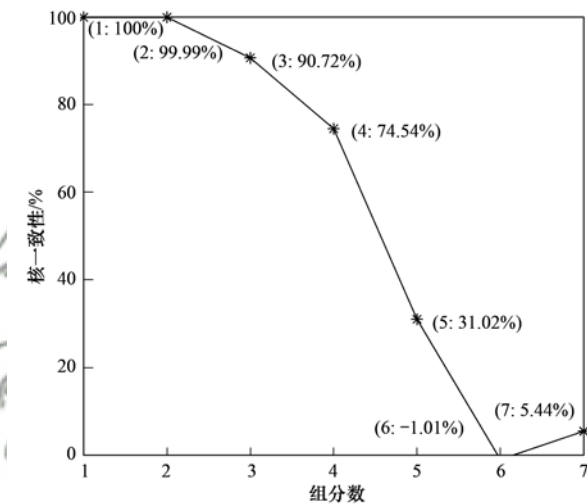


图 5 夏秋季降水荧光组分的核一致性检验
Fig. 5 Core consistency of EEM samples in rainwater in summer and autumn

有相对分子质量大易光解的特征; C3 的荧光峰位置是 310/415 nm (E_x/E_m), 为长波类可见区富里酸; C4 的荧光峰位置是 280/315 nm (E_x/E_m), 为类色氨酸。

2.3.2 DOM 的荧光组分强度及分布特征

夏秋两季降雨不同相对分子质量雨水的 DOM 荧光组分以及相对比例的变化情况如图 7 所示. 其中图 7(a) 和 7(b) 表示夏秋两季 0.45 μm 相对分子质量雨水样品 DOM 荧光组分以及相对比例的变化情况; 图 7(c) 和 7(d) 表示夏秋两季 50×10^3 相对分子质量雨水样品 DOM 荧光组分以及相对比例的变化情况; 图 7(e) 和 7(f) 表示夏秋两季 5×10^3 相对分子质量雨水样品 DOM 荧光组分以及相对比例的变化情况; 图 7(g) 和 7(h) 表示夏秋两季 1×10^3 相对分子质量雨水样品 DOM 荧光组分以及相对比例的变化情况。

夏秋两季降雨不同相对分子质量的雨水样品 DOM 总荧光强度以及各荧光组分的荧光强度差异显著 ($P < 0.01$), 整体上看不同降雨的雨水样品 DOM 光谱强度主要由相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 的样品的 DOM 构成, 与王静等^[53] 研究乌江水库水体有机胶粒的三维荧光特征得出荧光物质主要存在于真溶液 ($< 1 \times 10^3$) 的结论相一致. 夏秋两季降雨 0.45 μm 相对分子质量雨水样品 DOM 的总荧光强度在 252.83 ~ 3489.93 A. U. 内变化, 最小值发生在 10 月 15 日的降雨中可能跟该月份大气中荧光性 DOM 较少有关, 最大值发生在 11 月 21 日的降雨中; 相对分子质量 $< 50 \times 10^3$ 的雨水样品 DOM 的总荧光强度在 238.41 ~ 3047.42 A. U. 内变化; 相对分子质量 $< 5 \times 10^3$ 的雨水样品 DOM 的总荧光强度在

表 2 夏秋季降雨雨水样品 DOM 的荧光组分特征

Table 2 Characteristics of components in rainwater in summer and autumn

组分	$E_x/E_m/\text{nm}$	物质	文献中的波长/nm
C1	345/420	可见光类腐殖质(C 峰)	320 ~ 335/423 ~ 436 ^[17]
C2	350/460	长波类腐殖质/陆源类腐殖质	370/440 ^[47] ; 350 ~ 440/430 ~ 510 ^[48]
C3	310/415	长波类可见区富里酸	305 ~ 325/410 ~ 420 ^[49, 50]
C4	280/315	类色氨酸	270 ~ 280/300 ~ 320 ^[51] , 230(280)/330 ^[52]

310.82 ~ 2914.81 A. U. 内变化; 相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 的雨水样品 DOM 的总荧光强度在 220.63 ~ 3186.44 A. U. 内变化(最小值发生在 10 月 15 日的降雨中, 最大值发生在 11 月 21 日的降雨中); 很明显说明荧光类物质主要存在于相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 的雨水样品中。

经平行因子分析得到的 4 种荧光组分中, 腐殖质物质 C1 + C2 是其主要构成成分, 在相对分子质量 $< 0.45 \mu\text{m}$ 雨水样品中的相对含量在 43.32% ~

78.19% 之间(最小值发生在 7 月 31 日降雨中, 最大值发生在 7 月 15 日降雨中), 并且夏秋两季不同降雨的雨水样品中差异明显 ($P < 0.01$); 在相对分子质量 $< 50 \times 10^3$ 雨水样品中腐殖质物质 C1 + C2 的相对含量在 45.25% ~ 80.24% 之间变化; 在相对分子质量 $< 5 \times 10^3$ 雨水样品中 C1 + C2 的相对含量在 42.99% ~ 77.09% 之间变化; 在相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 雨水样品中 C1 + C2 的相对含量在 40.12% ~ 74.20% 之间变化. 可见光区富里酸 C3 所占的比

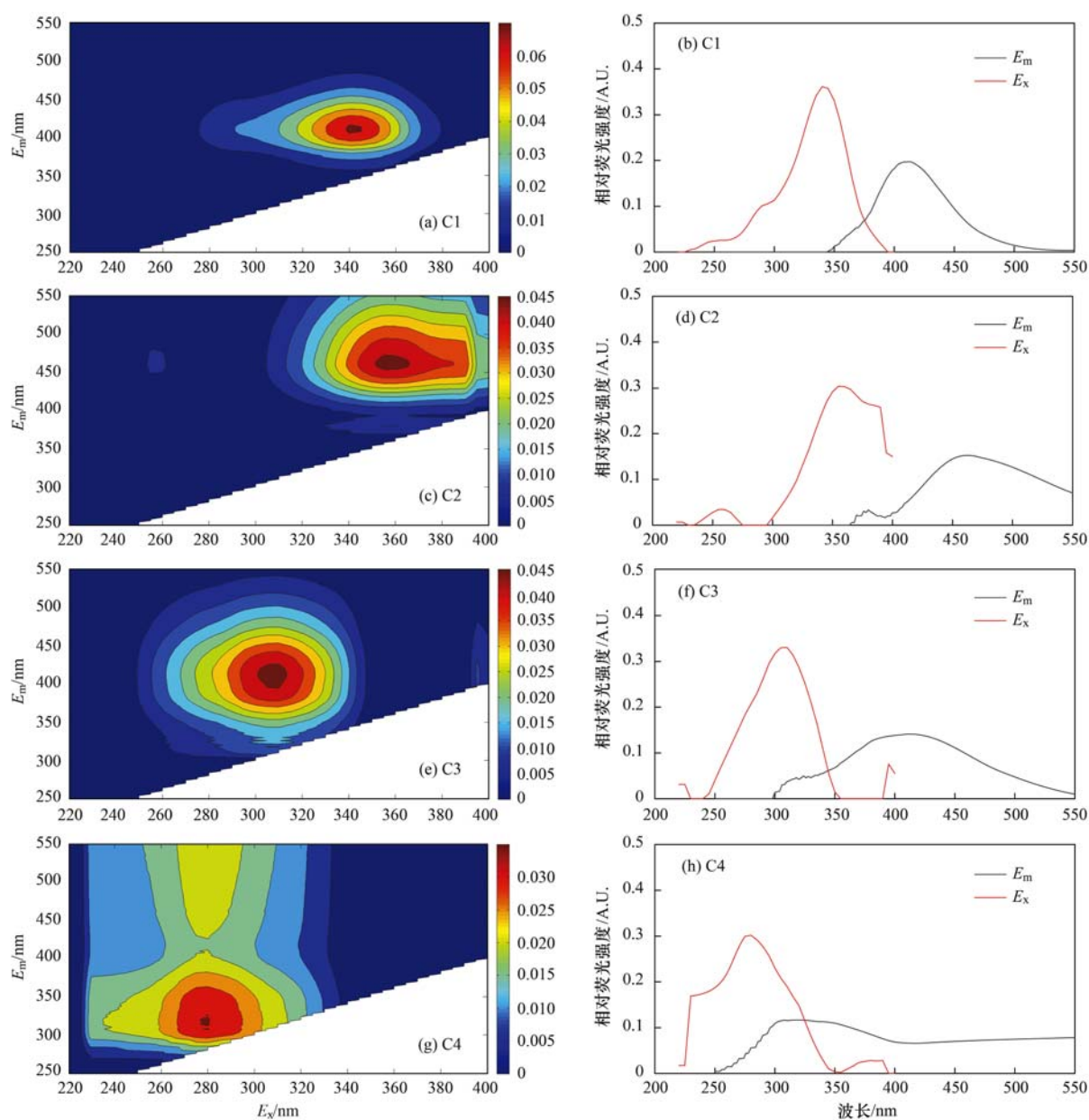


图 6 PARAFAC 解析出的 DOM 中 4 个荧光组分及其激发发射波长位置

Fig. 6 Fluorescence spectra of four components identified with the PARAFAC model

例从夏季到秋季呈现增加的变化过程, 相对分子质量 $< 0.45 \mu\text{m}$ 雨水样品中相对含量从 2.17% 上升到 36.37%; 相对分子质量 $< 50 \times 10^3$ 雨水样品中相对含量从 2.63% 上升到 36.71%; 相对分子质量 $< 5 \times 10^3$ 雨水样品中相对含量从 1.38% 上升到 36.79%; 相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 雨水样品中相对含量从 0.86% 上升到 35.31%; 表明随着季节从夏季变化到秋季, 大气中 DOM 富里酸组分在增加, 与紫外光谱特征得到秋季富里酸较多的结果相一致. 类色氨酸 C4 在夏秋两季降雨不同相对分子质量雨水样品中呈现出与富里酸 C3 相反的变化过程, 各个不同相对分子质量的雨水样品中类色氨酸 C4 从夏季到秋季呈现下降的变化趋势, 从开始的 52.82% ~ 57.11% 下降到结束的 5.97% ~

13.37%, 这可能与夏季大气中氨基酸类有机物含量高有关.

通过对夏秋季降雨不同相对分子质量雨水样品中各组分荧光强度进行相关性分析, 来研究各个组分间的相互关系, 结果如表 3 所示. 皮尔逊相关性分析得到类腐殖质 (C1) 与类腐殖质 (C2)、可见光区富里酸 (C3) 以及类色氨酸 (C4) 具有显著的相关性, 其相关系数为 0.537 ($P < 0.01$)、0.360 ($P < 0.01$) 和 0.267 ($P < 0.05$); 类腐殖质 (C2) 与可见光区富里酸 (C3) 以及类色氨酸 (C4) 具有显著的相关性, 其相关系数为 0.887 ($P < 0.01$) 和 0.305 ($P < 0.01$). 预示着在两场暴雨雨水中, 组分 C1 与 C2/C3/C4 以及 C2 与 C3/C4 有着相近的来源.

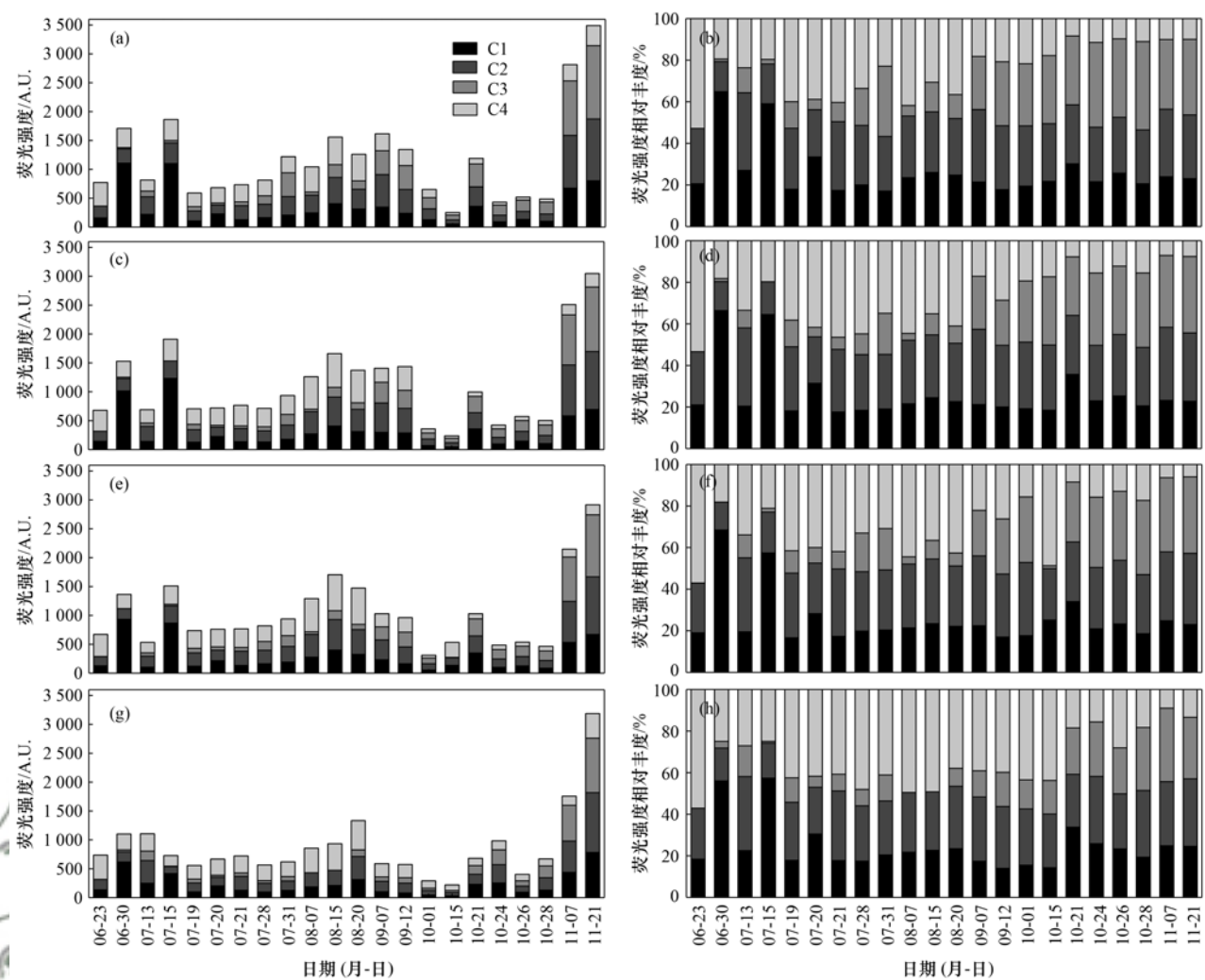


图 7 夏秋降雨不同相对分子质量雨水 DOM 组分荧光强度和相对丰度

Fig. 7 Fluorescence intensity and component percentages in rainwater with different DOC molecular weight in summer and autumn

表 3 周村水库夏秋季降雨 DOM 中 4 个荧光组分的皮尔逊相关性¹⁾

Table 3 Correlations of four components in rainwater in summer and autumn in the Zhoucun Reservoir

	C1	C2	C3	C4
C1	1.000			
C2	0.537 **	1.000		
C3	0.360 **	0.887 **	1.000	
C4	0.267 *	0.305 **	-0.112	1.000

1) ** 表示在 0.01 级别(双尾), 相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾), 相关性显著, 下同

2.4 DOM 的荧光特征参数分析

为了进一步分析夏秋季降雨不同相对分子质量雨水样品 DOM 的光谱特征, 本文对 DOM 的荧光特征参数进行了分析, 具体情况如图 8 所示. 图 8(a)、8(b)和 8(c)表示夏秋两季雨水在不同月份间的荧光特征参数分布情况; 图 8(d)、8(e)和 8(f)表示夏秋两季雨水在不同相对分子质量间的荧光特征参数分布情况.

Huguet 等^[45]和肖隆庚等^[54]指出 BIX 在 0.6 ~

0.7 之间时, 具有较少的自生组分; BIX 在 0.7 ~ 0.8 之间时, 具有中度新近自生源特征; BIX 在 0.8 ~ 1.0 之间时, 具有较强的自生源特征; 大于 1.0 时, 为生物活动产生. 如图 8(a)本实验中 6 月份降雨的 BIX 为 0.85 ± 0.16 , 7 月降雨的 BIX 为 0.80 ± 0.10 , 8 月降雨的 BIX 为 0.87 ± 0.08 , 9 月降雨的 BIX 为 0.87 ± 0.12 , 10 月降雨的 BIX 为 0.82 ± 0.16 , 11 月降雨的 BIX 为 0.78 ± 0.04 , 表明随着季节由夏入秋, 雨水中自生源呈现出减弱的变化特征, 与秋季地表植物代谢降低有关. 从图 8(d)可知, 相对分子质量小的雨水中呈现出更高的自生源特征, 特别是 6 月 23 日和 10 月 15 日 $< 1 \times 10^3$ 的雨水样品中 BIX 达到 1.15(生物活动特征明显).

Lavone 等^[42]以及 Mcknight 等^[55]提出 FI 可以作为物质的来源以及 DOM 的降解程度的指示指标, FI > 1.8 以自生源为主, FI < 1.2 以陆源输入为主. 如图 8(a), 6 月降雨的 FI 为 1.47 ± 0.56 , 7 月降雨的 FI 为 1.43 ± 0.30 , 8 月降雨的 FI 为 1.34 ± 0.24 , 9 月降雨的 FI 为 1.39 ± 0.20 , 10 月降雨的

FI 为 1.59 ± 0.19 , 11 月降雨的 FI 为 1.67 ± 0.11 , 秋季降雨的荧光指数 FI 要高于夏季降雨, 说明秋季降雨的陆源输入特征相比于夏季的更弱, 并且秋季的荧光指数分布要相对集中一些.

Hugue 等^[56]和 Ohno 等^[57]指出 $HIX > 16$ 代表 DOM 具有强腐殖化特征, 以陆源输入为主; $6 < HIX < 10$ 代表较强腐殖化特征, 且有较弱自生源特征; $4 < HIX < 6$ 代表弱腐殖化特征, 及较强自生源特征; $HIX < 4$ 表示以自生源为主. 本研究中夏秋季降雨的 HIX 指数都小于 4 (图 8), DOM 腐殖化程度较弱, 与上述紫外-可见吸收光谱的结论非常吻合. 如图 8(b), 6 月降雨的 HIX 为 1.04 ± 0.14 , 7 月降雨的 HIX 为 1.03 ± 0.16 , 8 月降雨的 HIX 为 1.09 ± 0.09 , 9 月降雨的 HIX 为 1.21 ± 0.21 , 10 月降雨的 HIX 为 1.15 ± 0.36 , 11 月降雨的 HIX 为 $2.07 \pm$

0.41, 很明显随着由夏入秋, 大气降雨中 DOM 的腐殖化程度在加强、自生源特征在减弱. 图 8(b) 显示 11 月的雨水样品与其他月的降雨分布明显不同, 并且各个相对分子质量的雨水样品 HIX 指数相差不大 [图 8(e)].

新鲜度指数 ($\beta:\alpha$) 反映了新产生的 DOM 在整体 DOM 中所占的比例. 6 月降雨的 $\beta:\alpha$ 为 0.78 ± 0.16 [图 8(c)], 7 月降雨的 $\beta:\alpha$ 为 0.76 ± 0.11 , 8 月降雨的 $\beta:\alpha$ 为 0.84 ± 0.07 , 9 月降雨的 $\beta:\alpha$ 为 0.82 ± 0.10 , 10 月降雨的 $\beta:\alpha$ 为 0.76 ± 0.13 , 11 月降雨的 $\beta:\alpha$ 为 0.74 ± 0.03 . 很明显随着由夏入秋, 大气降雨中 DOM 的新鲜度指数有一个先上升后下降的过程, 表明大气中新产生的 DOM 在整体 DOM 中所占的比例随着由夏入秋有个先上升后降低的变化趋势.

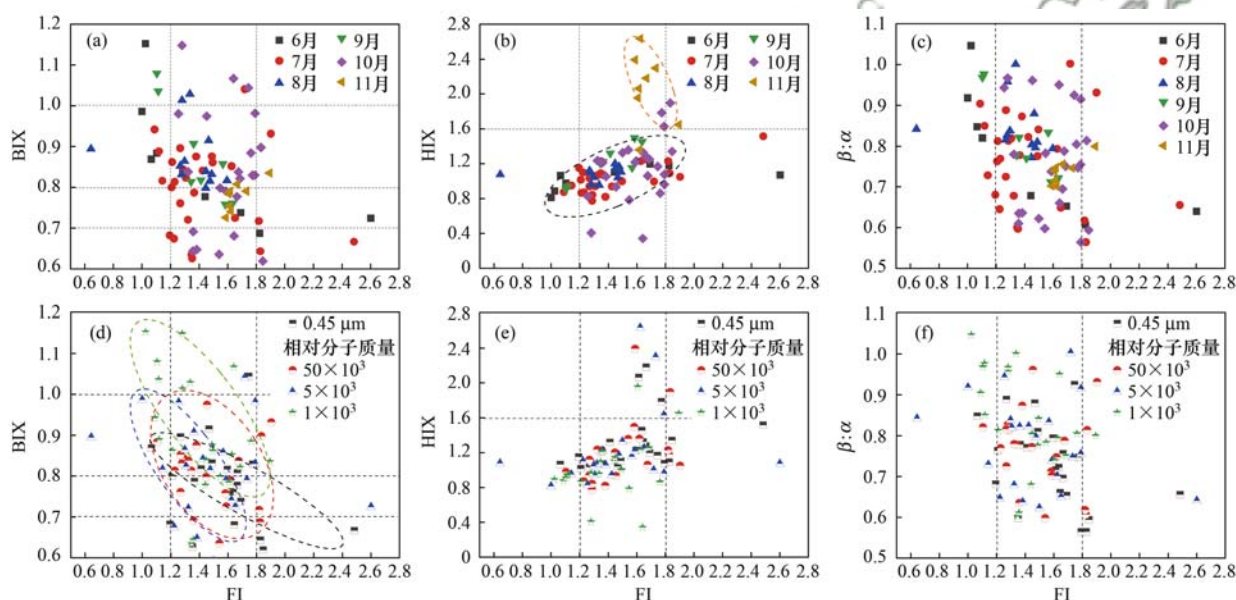


图 8 夏秋季降雨雨水 DOM 的 FI-BIX、FI-HIX、FI- $\beta:\alpha$ 分布

Fig. 8 FI-BIX, FI-HIX, and FI- $\beta:\alpha$ distributions of rainwater DOM in summer and autumn

$F_n(355)$ 可以代表类腐殖质组分相对浓度, 而 $F_n(280)$ 代表了类蛋白质组分相对浓度, 两个指标分别用来表征陆源和自生源对水体 DOM 组分的贡献. 从整体上看, 夏秋季降雨各相对分子质量雨水的 $F_n(355)$ 相差不大 [图 9(a)]; 夏季各相对分子质量雨水样品的 $F_n(280)$ 要高于秋季降水的 $F_n(280)$ 值 [图 9(b)], 说明夏季降雨的自生源特征更强, 与 BIX 指数相一致. 综上所述, 夏秋两季降雨中不同相对分子质量雨水样品的光谱特征指数分布差异明显; 都呈现以自生源为主的特征, 但是夏季降雨的自生源特征更强、类蛋白质物质含量和占比更多.

2.5 DOM 的荧光组分与环境因子的相关分析

为了研究周村水库在夏秋季大气沉降的 DOM

特征, 本研究基于夏秋两季 22 场降雨事件共 88 个不同相对分子质量的雨水样本, 进行了主成分分析 (PCA) 和皮尔逊相关性分析, 探讨了大气沉降过程中 DOM 荧光组分和环境因子的关系.

图 10(a) 所示的是相对分子质量 $< 0.45 \mu m$ 雨水样品的 PCA 分析, 基于雨水 DOM 特征的主成分分析中, PC1 和 PC2 总共解释了 80.47%; 图 10(b) 所示的是相对分子质量 $< 50 \times 10^3$ 雨水样品的 PCA 分析, PC1 和 PC2 总共解释了 86.55%; 图 10(c) 所示的是相对分子质量 $< 5 \times 10^3$ 雨水样品的 PCA 分析, PC1 和 PC2 总共解释了 86.43%; 图 10(d) 所示的是相对分子质量 $< 50 \times 10^3$ 雨水样品的 PCA 分析, PC1 和 PC2 总共解释了 86.58%; 各个相对分子质量的 PCA 分析都能够很好反映总体的

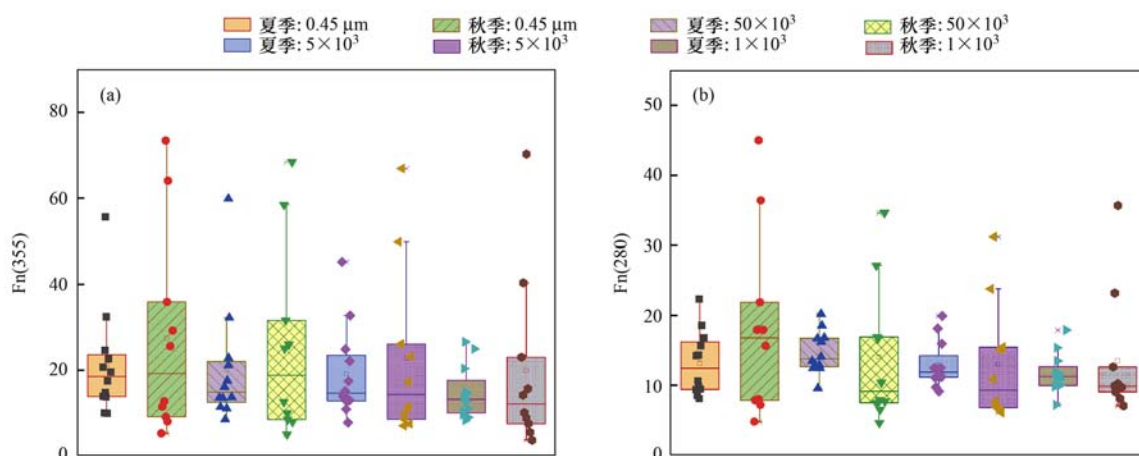


图9 夏秋季降雨雨水 DOM 的 Fn(355) 和 Fn(280) 分布情况

Fig. 9 Fn(355) and Fn(280) distributions of rainwater DOM in summer and autumn

变化. 图 10 表明, 同一月份的降雨分布相对集中, 各个月份间差异明显; 随着相对分子质量的减小,

各个月份的样本分布更加集中. 综上, 可以侧面解释夏秋季降雨的雨水 DOM 组分和特征差异.

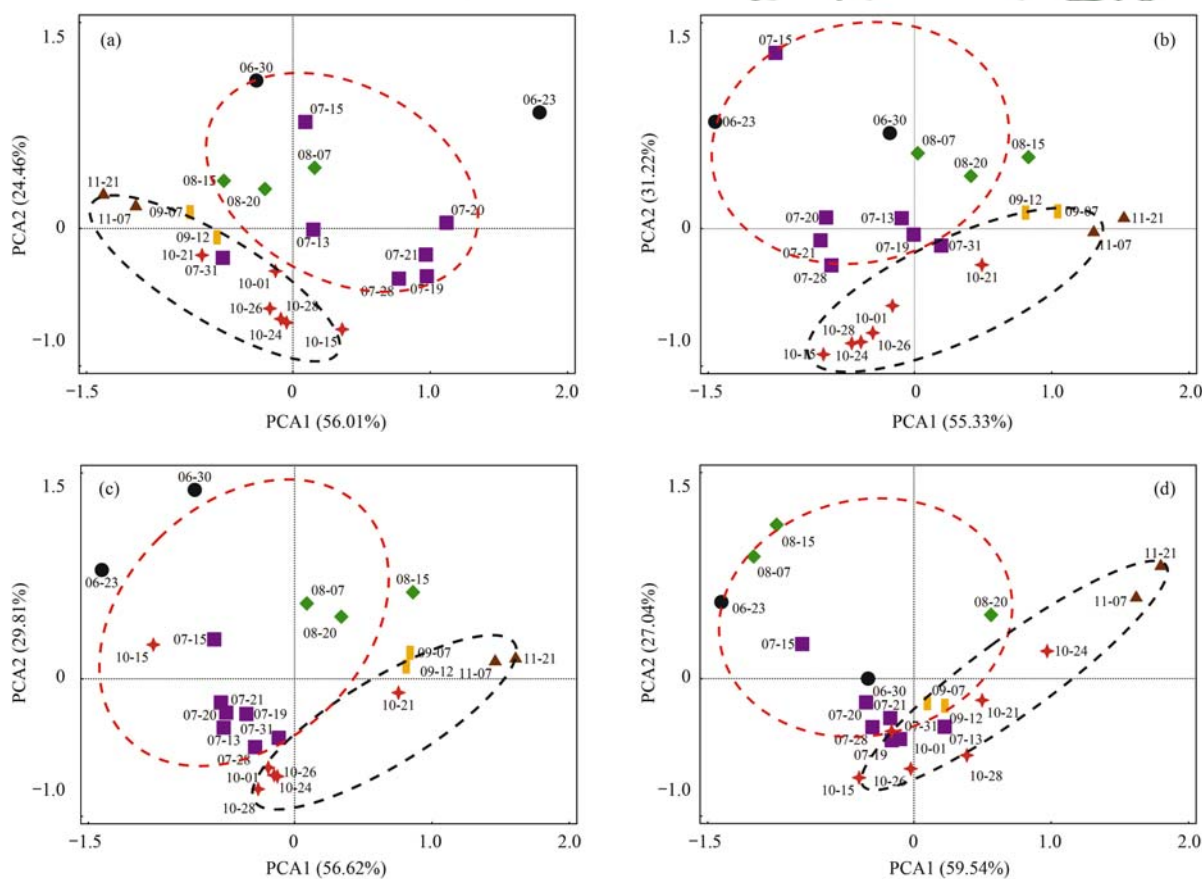


图10 夏秋季降雨不同相对分子质量雨水 DOM 特征及水质参数的主成分分析

Fig. 10 Principal component analysis of different molecular weights of rainwater DOM in summer and autumn

表 4 为夏秋季降雨不同相对分子质量雨水样品的 4 个荧光组分与 DOM 特征参数以及水质参数的相关性. 结果表明, 腐殖质组分 C1、C2 与 DOM 特征参数 HIX、Fn(355)、Fn(280)、E3/E4 以及 a_{254} 呈现正相关 ($P < 0.01$); 富里酸组分 C3 与 HIX ($P < 0.01$)、Fn(355) ($P < 0.01$)、Fn(280) ($P < 0.01$)、E2/E3 ($P < 0.05$)、E3/E4 ($P < 0.05$)、 a_{254}

($P < 0.01$)、 SUVA_{260} ($P < 0.01$) 以及 SUVA_{280} ($P < 0.01$) 呈现显著正相关; 类色氨酸 C4 与 FI 呈现显著负相关 ($P < 0.05$).

表 5 为夏秋季降雨不同相对分子质量雨水样品的 4 个荧光组分与水质参数的相关性. 结果表明, 腐殖质 C1 与 TN ($P < 0.05$)、TDN ($P < 0.05$)、 NO_3^- -N ($P < 0.05$) 以及 NH_4^+ -N ($P < 0.05$) 都呈现显

著的正相关性;腐殖质 C2 和富里酸 C3 与 pH ($P < 0.01$)、ORP ($P < 0.01$)、TN ($P < 0.01$)、TDN ($P < 0.01$)、 NO_3^- -N ($P < 0.01$)、 NH_4^+ -N ($P < 0.01$) 以及 DOC ($P < 0.01$) 呈现显著的正相关性;色氨酸 C4 与 TOC ($P < 0.05$) 呈现显著的正相关性. 因此,可

以通过应用降雨雨水的 DOM 特征参数和雨水水质参数对雨水 DOM 组分进行多元线性回归拟合,利于评估大气沉降过程中溶解性有机物特征,便于水库管理人员对夏秋季降雨型外源有机污染物输入进行评价和水源水库的富营养化控制.

表 4 夏秋季降雨中 4 个荧光组分与特征参数的相关性

Table 4 Correlation matrix of DOM indices and four PARAFAC components of rainwater in summer and autumn

	BIX	FI	HIX	$\beta:\alpha$	Fn(355)	Fn(280)	E2/E3	E3/E4	a_{254}	SUVA ₂₆₀	SUVA ₂₈₀
C1	-0.085	0.181	0.319 **	-0.136	0.464 **	0.345 **	0.203	0.283 **	0.441 **	0.174	0.160
C2	-0.091	0.016	0.554 **	-0.046	0.569 **	0.674 **	0.296 **	0.281 **	0.623 **	0.419	0.331
C3	-0.090	0.121	0.598 **	-0.054	0.498 **	0.599 **	0.228 *	0.252 *	0.579 **	0.562 **	0.455 **
C4	-0.066	-0.215 *	-0.086	-0.007	0.115	0.169	0.178	0.073	0.040	-0.192	-0.206

表 5 夏秋季降雨中 4 个荧光组分与水质参数的相关性

Table 5 Correlation matrix of the water quality and four PARAFAC components of rainwater in summer and autumn

	pH	ORP	TN	TDN	NO_3^- -N	NO_2^- -N	NH_4^+ -N	TP	TOC	DOC
C1	0.496	-0.483	0.488 *	0.510 *	0.520 *	0.176	0.584 *	0.560	0.224	0.282
C2	0.933 **	-0.748 **	0.846 **	0.851 **	0.871 **	0.563 *	0.849 **	0.318	0.746 **	0.869 **
C3	0.872 **	-0.642 **	0.750 **	0.735 **	0.811 **	0.515 *	0.703 **	0.079	0.419	0.658 **
C5	0.307	-0.166	0.389	0.431	0.396	0.300	0.449	0.489	0.514 *	0.385

3 结论

(1) 夏秋季降雨不同相对分子质量雨水样品 DOM 的吸收光谱曲线没有明显的特征峰,吸收系数的变异系数波动较大,表明夏秋季降雨 DOM 在性质上存在较大差异. a_{254} 、E2/E3 以及 E3/E4 的变化表明 DOM 的相对浓度和富里酸所占 DOM 的比例随着由夏入秋逐渐增加.

(2) 夏秋季降雨的三维荧光光谱解析出了 2 种类腐殖质(C1、C2)、1 种富里酸(C3)和 1 种类蛋白(C4). C1 与 C2、C3 以及 C4 具有显著的相关性($P < 0.01$), C2 与 C3 以及 C4 具有显著的相关性($P < 0.01$);夏秋季降雨的 DOM 总荧光强度以及各组分荧光强度存在显著差异($P < 0.05$);夏秋季降雨中类腐殖质为 DOM 中主要成分,富里酸组分随着季节由夏入秋其荧光强度和所占比例逐渐增加、色氨酸组分呈现相反的变化特征.

(3) 夏 秋 季 降 雨 中 SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀ 和 SUVA₂₈₀ 随着季节由夏入秋呈现增加的过程,并且芳香化程度逐渐增加;夏秋季降雨的 HIX 指数表明雨水呈现以自生源为主的特征,结合 FI、BIX 以及 Fn(280)得到夏季降雨具有自生源特征更强、类蛋白质含量和占比更多的特点.

(4) PCA 分析显示夏秋季降雨的雨水 DOM 荧光特征差异明显,并且组分 C1、C2 和 C3 与 DOM 特征参数[HIX、Fn(355)、Fn(280)、E3/E4、 a_{254}]以及水质参数(硝氮、氨氮、总氮以及有机碳)显著

相关性($P < 0.01$).

参考文献:

- [1] Driscoll C T, Lehtinen M D, Sullivan T J. Modeling the acid - base chemistry of organic solutes in adirondack, New York, lakes [J]. Water Resources Research, 1994, **30**(2): 297-306.
- [2] Findlay S E G, Sinsabaugh R L. Aquatic ecosystems: interactivity of dissolved organic matter [M]. New York: Academic Press, 2003. 217-241.
- [3] Guéguen C, Dominik J. Partitioning of trace metals between particulate, colloidal and truly dissolved fractions in a polluted river: the upper vistula river (Poland) [J]. Applied Geochemistry, 2003, **18**(3): 457-470.
- [4] Beggs K M H, Summers R S. Character and chlorine reactivity of dissolved organic matter from a mountain pine beetle impacted watershed[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(13): 5717-5724.
- [5] Hur J, Lee M H, Song H, et al. Microbial transformation of dissolved organic matter from different sources and its influence on disinfection byproduct formation potentials[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(6): 4176-4187.
- [6] Aufdenkampe A K, Mayorga E, Raymond P A, et al. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2011, **9**(1): 53-60.
- [7] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, et al. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties [J]. Geoderma, 2003, **113**(3-4): 273-291.
- [8] Knapik H G, Fernandes C V S, De Azevedo J C R, et al. Biodegradability of anthropogenic organic matter in polluted rivers using fluorescence, UV, and BDOC measurements [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, **187**(3): 104.
- [9] Yu H B, Song Y H, Du E, et al. Comparison of PARAFAC components of fluorescent dissolved and particular organic matter from two urbanized rivers [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(11): 10644-10655.

- [10] Sun Q Y, Wang C, Wang P F, *et al.* Absorption and fluorescence characteristics of chromophoric dissolved organic matter in the Yangtze estuary [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(5): 3460-3473.
- [11] Canuel E A, Hardison A K. Sources, ages, and alteration of organic matter in estuaries [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2016, **8**: 409-434.
- [12] Kellerman A M, Kothawala D N, Dittmar T, *et al.* Persistence of dissolved organic matter in lakes related to its molecular characteristics [J]. *Nature Geoscience*, 2015, **8**(6): 454-457.
- [13] Zieglergruber K L, Zeng T, Arnold W A, *et al.* Sources and composition of sediment pore - water dissolved organic matter in prairie pothole lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2013, **58**(3): 1136-1146.
- [14] 方开凯, 黄廷林, 张春华, 等. 淮河流域周村水库夏季 CDOM 吸收光谱特征、空间分布及其来源分析 [J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(1): 151-159.
- Fang K K, Huang T L, Zhang C H, *et al.* Summer absorption characteristics, spatial distribution and source analysis of CDOM in Zhoucun reservoir in Huaihe catchment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(1): 151-159.
- [15] 黄廷林, 方开凯, 张春华, 等. 利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4577-4585.
- Huang T L, Fang K K, Zhang C H, *et al.* Optical characteristics of dissolved organic matter from two different full mixed reservoirs in winter based on UV-vis and EEMs [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4577-4585.
- [16] 黄廷林, 方开凯, 张春华, 等. 荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3394-3401.
- Huang T L, Fang K K, Zhang C H, *et al.* Analysis of distribution characteristics and source of dissolved organic matter from Zhoucun Reservoir in summer based on fluorescence spectroscopy and PARAFAC [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3394-3401.
- [17] 卢松, 江韬, 张进忠, 等. 两个水库型湖泊中溶解性有机质三维荧光特征差异 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 516-523.
- Lu S, Jiang T, Zhang J Z, *et al.* Three-dimensional fluorescence characteristic differences of dissolved organic matter (DOM) from two typical reservoirs [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 516-523.
- [18] Luciani X, Mounier S, Paraquetti H H M, *et al.* Tracing of dissolved organic matter from the Sepetiba bay (Brazil) by PARAFAC analysis of total luminescence matrices [J]. *Marine Environmental Research*, 2008, **65**(2): 148-157.
- [19] Chari N V H K, Sarma N S, Rao P S, *et al.* Fluorescent dissolved organic matter dynamics in the coastal waters off the central east indian coast (bay of Bengal) [J]. *Environment and Ecology Research*, 2016, **4**(1): 13-20.
- [20] Chen M L, Jaffé R. Photo- and bio-reactivity patterns of dissolved organic matter from biomass and soil leachates and surface waters in a subtropical wetland [J]. *Water Research*, 2014, **61**: 181-190.
- [21] Dainard P G, Guéguen C. Distribution of PARAFAC modeled CDOM components in the north Pacific ocean, Bering, Chukchi and Beaufort seas [J]. *Marine Chemistry*, 2013, **157**: 216-223.
- [22] Su R G, Bai Y, Zhang C S, *et al.* The assessment of the spatial and seasonal variability of chromophoric dissolved organic matter in the southern Yellow sea and the east China sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **100**(1): 523-533.
- [23] 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 等. 三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 933-941.
- Li L L, Jiang T, Yan J L, *et al.* Ultraviolet-Visible (UV-Vis) spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in soils and sediments of typical water-level fluctuation zones of three gorges reservoir areas [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 933-941.
- [24] Buffam I, Galloway J N, Blum L K, *et al.* A stormflow/baseflow comparison of dissolved organic matter concentrations and bioavailability in an Appalachian stream [J]. *Biogeochemistry*, 2001, **53**(3): 269-306.
- [25] 魏珈, 郭卫东, 王志恒, 等. 降雨事件对不同流域背景河流 DOM 组成及入海通量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(4): 737-744.
- Wei J, Guo W D, Wang Z H, *et al.* Impacts of storm event on DOM composition and flux in two Jiulong tributaries with different watershed features [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(4): 737-744.
- [26] Lu Y H, Bauer J E, Canuel E A, *et al.* Photochemical and microbial alteration of dissolved organic matter in temperate headwater streams associated with different land use [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, **118**(2): 566-580.
- [27] Lee T Y, Huang J C, Kao S J, *et al.* Temporal variation of nitrate and phosphate transport in headwater catchments: the hydrological controls and land use alteration [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(4): 2617-2632.
- [28] 梁俭, 江韬, 魏世强, 等. 夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 888-897.
- Liang J, Jiang T, Wei S Q, *et al.* Absorption and fluorescence characteristics of dissolved organic matter (DOM) in rainwater and sources analysis in summer and winter season [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 888-897.
- [29] 吴秀萍, 宋海燕, 谭军, 等. 雨水中溶解有机质的光谱学研究 [J]. *华南师范大学学报 (自然科学版)*, 2015, **47**(4): 74-79.
- Wu X P, Song H Y, Tan J, *et al.* Spectroscopic characterization of dissolved organic matter isolated from rainwater [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2015, **47**(4): 74-79.
- [30] 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 等. 我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1337-1344.
- Zeng M Z, Huang T L, Qiu X P, *et al.* Seasonal stratification and the response of water quality of a temperate reservoir-Zhoucun reservoir in north of China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1337-1344.
- [31] Zhou S L, Huang T L, Zhang H H, *et al.* Nitrogen removal characteristics of enhanced in situ indigenous aerobic denitrification bacteria for micro-polluted reservoir source water [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **201**: 195-207.
- [32] 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.
- [33] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains [J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**(1): 43-53.
- [34] Keith D J, Yoder J A, Freeman S A. Spatial and temporal distribution of coloured dissolved organic matter (CDOM) in Narragansett bay, Rhode Island: implications for phytoplankton

- in coastal waters [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, **55**(5): 705-717.
- [35] 牛城, 张运林, 朱广伟, 等. 天目湖流域 DOM 和 CDOM 光学特性的对比[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(9): 998-1007.
- Niu C, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Comparison of optical properties of DOM and CDOM in lake Tianmuhu catchment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(9): 998-1007.
- [36] 高洁, 江韬, 李璐璐, 等. 三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 151-162.
- Gao J, Jiang T, Li L L, *et al.* Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and fluorescence spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in soils of water-level fluctuation zones of the three gorges reservoir region [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 151-162.
- [37] 梁俭, 江韬, 卢松, 等. 淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2496-2505.
- Liang J, Jiang T, Lu S, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic Matter (DOM) releases from soils of typical water-level fluctuation zones of three gorges reservoir areas: UV-Vis spectrum[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2496-2505.
- [38] Zepp R G, Sheldon W M, Moran M A. Dissolved organic fluorophores in southeastern US coastal waters; correction method for eliminating rayleigh and raman scattering peaks in excitation-emission matrices[J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 15-36.
- [39] 刘海龙, 吴希军, 田广军. 三维荧光光谱技术及平行因子分析法在绿茶分析及种类鉴别中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 685-689.
- Liu H L, Wu X J, Tian G J. Three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with parallel factor analysis as a complementary technique for green tea characterization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(5): 685-689.
- [40] Stedmon C A, Markager S. Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis [J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(2): 686-697.
- [41] Cory R M, Mcknight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8149.
- [42] Lavonen E E, Kothawala D N, Tranvik L J, *et al.* Tracking changes in the optical properties and molecular composition of dissolved organic matter during drinking water production [J]. *Water Research*, 2015, **85**: 286-294.
- [43] Ohno T, Fernandez I J, Hiradate S, *et al.* Effects of soil acidification and forest type on water soluble soil organic matter properties[J]. *Geoderma*, 2007, **140**(1-2): 176-187.
- [44] Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, *et al.* Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying[J]. *Chemosphere*, 1999, **38**(1): 45-50.
- [45] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(6): 706-719.
- [46] Zhang Y L, Liu M L, Qin B Q, *et al.* Photochemical degradation of chromophoric-dissolved organic matter exposed to simulated UV-B and natural solar radiation[J]. *Hydrobiologia*, 2009, **627**(1): 159-168.
- [47] 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 等. 舟山渔场有色溶解有机物 (CDOM) 的三维荧光-平行因子分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 163-171.
- Zhou Q Q, Su R G, Bai Y, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Zhoushan fishery using excitation-emission matrix spectroscopy (EEMs) and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 163-171.
- [48] 李帅东, 姜泉良, 黎烨, 等. 环滇池土壤溶解性有机质 (DOM) 的光谱特征及来源分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, **37**(5): 1448-1454.
- Li S D, Jiang Q L, Li Y, *et al.* Spectroscopic characteristics and sources of dissolved organic matter from soils around dianchi lake, Kunming [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, **37**(5): 1448-1454.
- [49] 施俊, 王志刚, 封克. 水体溶解有机物三维荧光光谱表征技术及其在环境分析中的应用 [J]. *大气与环境光学学报*, 2011, **6**(4): 243-251.
- Shi J, Wang Z G, Feng K. Characterization techniques of dissolved organic pollutants in wastewater by three-dimensional fluorescent spectroscopy and its application in environmental analysis [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, **6**(4): 243-251.
- [50] 欧阳二明, 张锡辉, 王伟. 城市水体有机污染类型的三维荧光光谱分析法[J]. *水资源保护*, 2007, **23**(3): 56-59.
- Ouyang E M, Zhang X H, Wang W. Three-dimensional fluorescence spectroscopy in the analysis of organic pollution type of urban waters [J]. *Water Resources Protection*, 2007, **23**(3): 56-59.
- [51] Chen X F, Chuai X M, Yang L Y, *et al.* Climatic warming and overgrazing induced the high concentration of organic matter in lake Hulun, a large shallow eutrophic steppe lake in northern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **431**: 332-338.
- [52] 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.
- [53] 王静, 郭建阳, 秦海波, 等. 乌江水库水体中有机胶粒的三维荧光特征研究[J]. *地球与环境*, 2015, **43**(1): 104-110.
- Wang J, Guo J Y, Qin H B, *et al.* Research on the characterization of three dimensional excitation-emission matrix of dissolved organic colloids in Wujiang reservoir [J]. *Earth and Environment*, 2015, **43**(1): 104-110.
- [54] 肖隆庚, 陈文松, 陈国丰, 等. 中国南海 CDOM 三维荧光光谱特征研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(1): 160-167.
- Xiao L G, Chen W S, Chen G F, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy of chromophoric dissolved organic matter in the south China Sea [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 160-167.
- [55] 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.
- [56] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* New insights into the size distribution of fluorescent dissolved organic matter in estuarine waters [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**(6): 595-610.
- [57] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 742-746.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)