

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第11期

Vol.34 No.11

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京不同污染事件期间气溶胶光学特性	施禅臻, 于兴娜, 周斌, 项磊, 聂皓浩 (4139)
秋季渤海、北黄海大气气溶胶中水溶性离子组成特性与来源分析	张岩, 张洪海, 杨桂朋 (4146)
中国北部湾地区夏季大气碳气溶胶的空间分布特征	杨毅红, 陶俊, 高健, 李雄, 施展, 韩保新, 谢文彰, 曹军骥 (4152)
改进的大气 CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CO 在线观测 FTIR 系统	夏玲君, 刘立新, 周凌晔, 方双喜, 王红阳, 张振波 (4159)
长沙市郊大气 CH ₄ 浓度变化特征	刘鲁宁, 王迎红, 徐小娟, 王卫东, 王跃思 (4165)
麦草及其烟尘中正构烷烃的组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹 (4171)
过二硫酸盐降解碱液吸收的甲硫醇恶臭	杨世迎, 王雷雷, 冯琳玉, 赵腊娟, 石超 (4178)
污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征	钟佳, 魏源送, 赵振凤, 应梅娟, 周国胜, 熊建军, 刘培财, 葛振, 丁刚强 (4186)
长江口沿岸及近海水体中胶体的分布和理化性质研究	顾丽军, 杨毅, 刘敏, 聂明华, 李涛, 侯立军 (4195)
海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评价	吕书丛, 张洪, 单保庆, 李立青 (4204)
汾河流域太原段河水及沉积物中 PFOS 和 PFOA 的浓度分布特征	东口朋宽, 史江红, 张晖, 刘晓薇 (4211)
基于 L-THIA 模型的市桥河流域非点源氮磷负荷分析	李凯, 曾凡棠, 房怀阳, 林澍 (4218)
合流制排水系统雨天溢流污染 CMB 法源解析	戴梅红, 李田, 张伟 (4226)
微藻脂肪酸在中国近海缺氧海水-沉积物界面中的降解模拟研究	随伟伟, 丁海兵, 杨桂朋, 陆小兰, 李文娟, 孙立群 (4231)
太湖两种水生植物群落对沉积物中氮素的影响	马久远, 王国祥, 李振国, 许宽, 周锋, 张佳 (4240)
表面流人工湿地中硫丹的去除规律研究	秦晶, 高甫威, 谢慧君 (4251)
带菌盐藻对不同形态砷的富集和转化研究	王亚, 张春华, 王淑, 申连玉, 葛滢 (4257)
铜改性沸石活性覆盖控制重污染河道底泥溶解性磷酸盐和铵释放研究	李佳, 林建伟, 詹艳慧 (4266)
底栖动物扰动对河床渗透性的影响研究	任朝亮, 宋进喜, 杨小刚, 薛健 (4275)
铜绿微囊藻胞内物消毒副产物生成: 氯化化和溴化比较	田川, 郭婷婷, 刘锐平, William Jefferson, 刘会娟, 曲久辉 (4282)
天然有机物对混凝效果影响机制及絮体特性分析	徐磊, 俞文正, 梁亮, 王彤 (4290)
DOM 纳滤膜污染及对膜截留卡马西平性能的影响	丰桂珍, 董秉直 (4295)
零价铁去除废水中的汞	周欣, 张进忠, 邱昕凯, 王定勇 (4304)
Fe ₃ O ₄ 稳定化纳米 Pd/Fe 对水中 2,4-D 的催化还原脱氯研究	周红艺, 梁思, 曾思思, 雷双健 (4311)
不同粒径粉末活性炭对水中天然有机物吸附性能的比较研究	李政剑, 石宝友, 王东升 (4319)
氯化十六烷基吡啶改性活性炭对水中硝酸盐的吸附作用	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 方巧, 杨孟娟, 王虹 (4325)
改性石墨烯对水中亚甲基蓝的吸附性能研究	吴艳, 罗汉金, 王侯, 张子龙, 王灿, 王雨微 (4333)
经典等温吸附模型在重金属离子/硅藻土体系中的应用及存在问题	朱健, 吴庆定, 王平, 李科林, 雷明婧, 张伟丽 (4341)
硝酸盐对矿化垃圾中兼/厌氧甲烷氧化的影响	刘妍妍, 龙焰, 尹华, 叶锦韶, 何宝燕, 张娜 (4349)
硫酸盐/氨的厌氧生物转化试验研究	张丽, 黄勇, 袁怡, 李祥, 刘福鑫 (4356)
硫酸盐还原-氨氧化反应的特性研究	袁怡, 黄勇, 李祥, 张春蕾, 张丽, 潘杨, 刘福鑫 (4362)
UASB 系统低 pH 运行时对产氢性能的分析	赵健慧, 张百惠, 李宁, 王兵, 李永峰 (4370)
响应面法优化赤泥负载 Co 催化剂制备及活性评价	李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 孙德智 (4376)
高浓度氨氮胁迫对纤细裸藻的毒性效应	刘炎, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (4386)
NAPLs 污染物垂向指流迁移分形表征中图像处理的影响研究	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4392)
近 50 年浙江省耕作土壤有机质和酸碱度的变化特征	章明奎, 常跃畅 (4399)
浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨	黄春雷, 宋明义, 魏迎春 (4405)
黄河口新生湿地土壤 Fe 和 Mn 元素的空间分布特征	孙文广, 甘卓亭, 孙志高, 李丽丽, 孙景宽, 孙万龙, 牟晓杰, 王玲玲 (4411)
崇明岛土壤中 MCCPs 的污染水平、组成与来源研究	孙阳昭, 王学彤, 张媛, 孙延枫, 李梅, 马中 (4420)
福建戴云山山脉土壤有机氯农药残留及空间分布特征	瞿程凯, 祁士华, 张莉, 黄焕芳, 张家泉, 张原, 杨丹, 刘红霞, 陈伟 (4427)
电子垃圾拆解地周边土壤中二噁英和二噁英类多氯联苯的浓度水平	邵科, 尹文华, 朱国华, 巩宏平, 周欣, 王玲, 刘劲松 (4434)
外源水溶性氟在茶园土壤中赋存形态的转化及其生物有效性	蔡荟梅, 彭传燧, 陈静, 侯如燕, 宛晓春 (4440)
丛枝菌根真菌在不同类型煤矸石山植被恢复中的作用	赵仁鑫, 郭伟, 付瑞英, 赵文静, 郭江源, 毕娜, 张君 (4447)
丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果	李少朋, 毕银丽, 孔维平, 王瑾, 余海洋 (4455)
超积累植物垂序商陆 (<i>Phytolacca americana</i> L.) 吸收锰机制的初步探讨	徐向华, 李仁英, 刘翠英, 施积炎, 林佳 (4460)
<i>Shewanella oneidensis</i> MR-1 对硫化汞的生物利用性研究	陈艳, 王卉, 司友斌 (4466)
基于我国西南地区儿童行为模式的 IEUBK 模型本地化研究	蒋宝, 崔晓勇 (4473)
不同结构有机磷在(氢)氧化铝表面的吸附与解吸特征	柳飞, 张延一, 严玉鹏, 刘凡, 谭文峰, 刘名茗, 冯雄汉 (4482)
煤中铁元素赋存状态的超声逐级化学提取研究	熊金钰, 李寒旭, 董众兵, 张颂, 钱宁波, 武成利 (4490)
植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应	杨新萍, 赵方杰 (4495)
《环境科学》征订启事 (4239)	
《环境科学》征稿简则 (4369)	
信息 (4225, 4265, 4303, 4375)	

合流制排水系统雨天溢流污染 CMB 法源解析

戴梅红, 李田*, 张伟

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 对上海市某合流制排水系统服务范围内的地表径流、旱流污水和管道沉积物的污染物特性进行检测分析, 通过对比不同污染源的污染特征, 确定 Zn 、 NH_4^+-N 、 P 的含量分别在地表径流、旱流污水和管道沉积物中具有特异性且相对稳定, 提出以 Zn/P 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{Zn}$ 、 P/K 这 3 个无量纲比值作为上述 3 个排放源各自的特征参数, 据此探讨了 CMB 法在合流制雨天溢流污染源解析中的应用, 结果表明, 地表径流、旱流污水和管道沉积物对溢流污染的平均贡献率分别为 42.8%、12.2%、23.8%, 解析结果可基本反映 CSO 污染的构成情况。研究方法的结果为合流制系统雨天溢流污染源解析提供了参考。

关键词: 地表径流; 旱流污水; 管道沉积物; 合流制溢流; CMB 法; 特征指标参数; 源解析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)11-4226-05

Pollutant Source Apportionment of Combined Sewer Overflows Using Chemical Mass Balance Method

DAI Mei-hong, LI Tian, ZHANG Wei

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Pollutant characteristics of surface runoff, sanitary sewage and sewer deposits from a combined sewer system in Shanghai were studied. It was confirmed that the content of Zn , NH_4^+-N , P , respectively in surface runoff, sanitary sewage and sewer deposits was specific and relatively stable based on contrasting pollutant characteristics of different sources. Three non-dimensional parameters— Zn/P , $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{Zn}$, P/K were proposed as characteristic index for surface runoff, sanitary sewage and sewer deposits. In order to find sources of pollutants in CSO, the application of chemical mass balance method was discussed; the average contributions to CSO were 42.8% for surface runoff, 12.2% for sanitary sewage, 23.8% for sewer deposits, and the results basically reflected the composition of CSO pollution. The research method and results can provide guidance for pollutant source apportionment of combined sewer overflows.

Key words: surface runoff; sanitary sewage; sewer deposits; combined sewer overflows; CMB method; characteristic index; source apportionment

合流制排水系统雨天溢流 (combined sewer overflows, CSO) 中携带了大量的污染物, 是城市水体水质下降的主要原因^[1~5], 研究 CSO 污染的主要来源——地表径流、旱流污水、管道沉积物^[6,7] 的污染特点及源贡献率对溢流污染负荷的削减、排水系统的优化管理有重要意义。目前, 对雨天溢流污染来源的定量分析主要有系统输入输出质量平衡法 (entry-exit mass balance)^[6,8]、化学质量平衡法 (chemical mass balance, CMB)^[9,10] 和正定矩阵分解模型 (positive matrix factorization, PMF)^[10] 等。对于人口密集且地势低平的老城区, 如上海中心城区, 城市排水管网密集, 管理部门将相邻的水泵强制排水系统互相连通以提高排涝安全性。排水系统的边界不封闭导致输入输出质量平衡法难以应用。与系统输入输出质量平衡法相比, CMB 法具有不受排水系统是否封闭的影响、不需要准确测量雨天流量等优点。近年来, CMB 法在大气污染源的确定^[11], 旱流污水的污染来源计算^[12~14] 中应用广泛, 而在雨天溢

流污染源解析中的应用案例很少, 仅 Soonthornnonda 等^[9,10] 利用化学质量平衡法进行美国密尔沃基市 CSO 的源解析, 并通过解析结果证实地表径流是 CSO 污染的重要来源。

本研究以上海市某截流式合流制排水系统为考察对象, 探讨系统内地表径流、旱流污水、雨天溢流的水质特性和管道沉积物的污染特性, 采用 CMB 法对 CSO 污染来源进行定量分析, 以期对 CSO 污染的源解析和雨天溢流污染的控制提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究系统及分析方法

1.1.1 研究系统

以上海市某截流式合流制排水系统 H 为研究对

收稿日期: 2013-02-02; 修订日期: 2013-04-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07316-001)

作者简介: 戴梅红 (1987~), 女, 硕士, 主要研究方向城市面源污染控制与雨水管理, E-mail: dmh1027@126.com

* 通讯联系人, E-mail: tianli@tongji.edu.cn

象,该系统为水泵强制排水系统,基本情况如表 1 所示. 研究区域内建筑和人口密度较高,卫生环境条件

相对较差,管道沉积状况较为严重,初步判定地表径流和管道沉积物是雨天溢流污染负荷的主要来源.

表 1 排水系统 H 的基本情况

Table 1 Parameters of the area served by H sewer system

用地类型	区域面积/km ²	道路比例/%	屋面比例/%	绿地比例/%
老式住宅/商业混合用地	1.18	45.6	43.8	10.6

1.1.2 样品采集方法

(1) 地表径流水样的采集

为提高地表径流水质调查数据的代表性,按车流密度和服务类型的不同,在汇水区域内选取 3 处道路雨水口分别人工采集道路径流样品,在降雨径流的初期每 5 min 采集一个样品,后期采样时间间隔为 10 ~ 15 min,具体根据降雨强度大小而定. H 系统内的绿地多数在居住小区中,公共绿地极少(仅占总面积的 1.34%),按照现行《室外排水设计规范》要求,H 系统内新建小区中的排水管道多数分为污水、雨水两个系统. 以区域内 1 新建分流制小区雨水管道出流代表屋面、庭院、绿地的径流水质,采样点布置在小区雨水干管出口处,水样采集方法与路面径流相似,采样过程中用速度-面积流量计(NIVUS PCM4)同步测定管道中的径流流量. 2012 年 6 ~ 9 月共采集 8 场有效降雨的地表径流过程样品.

(2) 早流水样的采集

于 2012 年 4 ~ 10 月期间先后 5 次监测了前期晴天数超过 5 d 的非降雨日早流污水水质,样品通过在排水泵站前池安装自动采样仪(ISCO 6712),设定“2 h 等间隔采样”的程序 24 h 连续自动采集样品.

(3) 雨天溢流水样的采集

用自动采样仪采集雨天溢流水样,采样时间间隔设置为:自雨水泵启动开始,最初的 60 min 内每隔 10 min 采集一个样品,之后的 120 min 内每隔 20 min 采集一个样品,再之后每隔 30 min 采集一个样品,直至雨水泵关闭. 2012 年 6 ~ 9 月共监测 6 次降雨溢流事件. 研究区域内的降雨量、雨水泵运行状况等参数由泵站配置的 SCADA 系统获得.

(4) 管道沉积物样品采集

2012 年 5 ~ 9 月采集了 H 系统内的管道沉积物样品,根据用地类型、管径大小和地面状况,通过人工采样共采集管道沉泥样品 13 个.

1.1.3 样品分析方法

水质分析项目:COD、SS、TN、TP、NH₄⁺-N、总

金属及其化合物(Zn、Pb、Fe、Al、K、Na). 水中的总金属浓度通过对过程样等体积混合得到的混合样进行分析,其他参数均直接分析过程样. 分析方法:总金属及其化合物采用电感耦合等离子体光谱-质谱仪(ICP Agilent 720ES、ICPMS Agilent 7700)测定,径流、旱流污水及溢流水样的常规指标分析采用文献[15]的方法,管道沉积物样品的测定采用土壤分析方法[16].

1.2 化学质量平衡法(CMB)

化学质量平衡法(CMB)于 1972 年由 Miller 等[17]首次提出,1980 年由 Cooper 等[18]正式命名为化学质量平衡法,CMB 法污染源解析应用至今已有 30 多年. 该方法的基本原理是质量守恒,认为受体样品的含量是各类污染源排放贡献的线性组合,当污染物数目大于排放源数目时,方程组可利用最小二乘法得到一组最优解. Pitt 等[13]和 Field 等[14]在运用 CMB 法解析具有一定程度混接的雨水系统旱流污水来源的研究中,选取各污染源的特征指标并结合出口处旱流污水相应的实测指标建立正定矩阵,求解出各污染源对旱流污水的贡献率. 本研究中,对于 CSO,旱流污水、地表径流以及管道沉积物是其 3 个主要来源,通过选取每种来源的特征参数建立方程组可求解出各排放源对雨天溢流污染物的贡献率. 方程组的数学表达式如下:

$$\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, c_i 为雨天溢流污水中污染物 i 的浓度测量值; F_{ij} 是源 j 中示踪参数 i 的特征值; X 、 Y 、 T 分别为排放源 1、2、3 的贡献值即求解值.

2 结果与分析

2.1 排放源及雨天溢流中污染物浓度分析

地表径流和泵站雨天溢流污染物浓度受到累计前期晴天数、最大降雨强度、降雨历时等因素的影响,污染物浓度值在不同的降雨事件中波动较大,雨天溢流污染物浓度还受到雨水、污水泵运行状况的

影响. 由于现场道路雨水口连接管流量太小, 现场实测径流流量过程难度较大, 本研究根据实测降雨数据, 通过坡面流模型 (Infoworks CS) 计算对应降雨事件中道路径流的流量过程, 并结合实测径流水质过程获得道路径流常规污染物事件平均浓度 (EMC)^[19]; 小区径流与泵站溢流常规污染物 EMC 值由水质与相应水量过程值确定, 地表径流常规污染物 EMC 值由系统内市政道路、小区径流水质与对应类型的用地面积比例加权平均确定. 表 2 列出了地表径流、泵站溢流在监测降雨事件中实测污染物平均浓度和旱流污水实测污染物浓度均值, 其中, 地表径流、溢流污水中常规污染物的平均浓度采用监测降雨、溢流事件的污染物事件平均浓度 (EMC) 的均值, 表 3 列出了管道沉积物污染物的平均含量. 由表 2 可见, 由于交通情况及周边环境不同, 3 条道路径流的 EMC 均值相差较大, 小区径流水质稍好于

道路径流, 这与李田等^[20]研究得出的地表径流污染物分布规律类似. H 系统溢流污染程度严重; 其常规污染物指标高于德国 ATV-DVWK Datenpool 2001 数据库给出的 CSO 污染物 EMC 的中值浓度^[21], 与李贺等^[4]前期监测的 H 系统雨天溢流水质相当. 溢流污水 COD、SS 浓度高于地表径流和旱流污水, 表明此类污染物主要来源于管道沉积物; Zn、Pb 在 CSO 中浓度近似于地表径流浓度, 意味着地表径流是此类污染物的主要来源; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、K、Na 指标在旱流污水中浓度远高于地表径流, 而在 CSO 中的浓度并不低, 暗示出此类污染物主要来自旱流污水. 由表 3 可知, 管道沉积物中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、K、Na 的含量处于较低水平, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的含量与重金属 Pb 的含量相近, K、Na 的含量仅是重金属 Zn 含量的 1~5 倍, 再次说明 CSO 中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、K、Na 等主要来源于旱流污水.

表 2 各类雨污水的监测污染物的平均浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 2 Mean concentration of the monitored pollutants in different runoff/sewage/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

监测指标	COD	SS	TN	TP	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	K	Na	Al	Fe	Zn	Pb
旱流污水	380	104	46.70	4.21	33.66	16.19	35.22	0.91	1.63	0.26	0.01
道路 a	201	187	5.82	0.92	2.11	5.18	5.21	6.37	6.92	0.82	0.18
道路 b	178	159	4.94	0.85	2.50	4.95	6.37	4.12	5.50	0.69	0.11
道路 c	136	110	9.08	0.78	1.91	4.24	6.61	5.09	5.90	0.60	0.10
小区径流	84	102	8.37	0.37	2.39	5.26	8.06	2.89	3.33	0.43	0.05
泵站溢流	387	324	23.17	2.20	10.72	7.68	13.12	7.67	11.74	0.78	0.11

表 3 管道沉积物中各监测污染物的平均含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$

Table 3 Mean content of the monitored pollutants in sewer deposits/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$

监测指标	COD	SS	TN	TP	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	K	Na	Al	Fe	Zn	Pb
管道沉积物	/ ¹⁾	/	/	5.28	0.54	4.93	1.64	13.73	28.04	0.97	0.49

1) 表示未分析

2.2 特征指标的确定

对比旱流污水、地表径流和管道沉积物各自的污染物含量后发现, 旱流污水常规污染物指标 (不包括 SS) 和 K、Na 含量显著高于地表径流, 而金属 Al、Fe、Zn、Pb 与 SS 含量明显低于地表径流; 管道沉积物则体现出高 P、低 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量的特征. 通过比较分析 3 个污染源的污染特征, 并考虑污染物指标值波动范围及稳定性, 分别选取 Zn、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 P 作为地表径流、旱流污水和管道沉积物的特征指标. 以 CMB 法解析 CSO 污染构成时, 式 (1) 左边为地表径流、旱流污水、管道沉积物各自的特征指标浓度/含量与贡献比例乘积的加和, 等式右边为 CSO 中相应指标的浓度. 地表径流、旱流污水以及 CSO 特征指标的量纲为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而管道沉积物的特征指标量纲为 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 为了使 CMB 方程两边量纲保持平衡并增加特征指标在不同来源之间的区分度, 本

文采用 Zn/P 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N/Zn}$ 、 P/K 这 3 个无量纲比值分别作为地表径流、旱流污水和管道沉积物的特征参数. 表 4 列出了 Zn/P 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N/Zn}$ 、 P/K 这 3 个特征参数以及与特征参数相关的指标实测值在多次降雨/采样事件中的统计均值与变差系数. 由表 4 可知, Zn、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、P、K 在 3 个排放源中的变差系数最大为 0.40, 说明对于同一种来源, 特征指标在不同事件中的数值是比较稳定的. 采用 Zn/P 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N/Zn}$ 、 P/K 这 3 个无量纲比值作为地表径流、旱流污水和管道沉积物各自的特征参数, 变差系数基本小于 0.40, 说明采用无量纲比值方法并未增加特征值的变化幅度. 图 1 为 3 个特征参数在对应来源中的概率分布, 从中也可以直观地看出 Zn/P 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N/Zn}$ 、 P/K 这 3 个特征比值在地表径流、旱流污水和管道沉积物中的特异性, 以及相关比值在不同降雨事件中分布的稳定性.

表 4 各特征指标、特征参数值及其变差系数¹⁾

Table 4 Characteristic parameter value, characteristic index and the variation coefficients

样品类型		地表径流	旱流污水	管道沉积物	雨天溢流
样本数量(取样次数)		6~8	5	13	6
特征指标	Zn/mg·L ⁻¹	0.61	0.26	0.97 *	0.78
	变差系数	0.35	0.17	0.32	0.38
	P/mg·L ⁻¹	0.65	4.21	5.28 *	2.20
	变差系数	0.33	0.14	0.21	0.34
	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	2.28	33.66	0.54 *	10.72
	变差系数	0.40	0.11	0.19	0.28
	K/mg·L ⁻¹	5.01	16.19	4.93 *	7.68
特征参数	变差系数	0.35	0.27	0.24	0.19
	Zn/P	0.92	0.08	0.19	0.44
	变差系数	0.28	0.10	0.18	0.24
	NH ₄ ⁺ -N/Zn	3.35	91.51	0.60	12.82
	变差系数	0.42	0.21	0.28	0.21
	P/K	0.15	0.26	1.03	0.34
	变差系数	0.37	0.31	0.17	0.31

1) 标注“*”的污染物含量单位为mg·g⁻¹

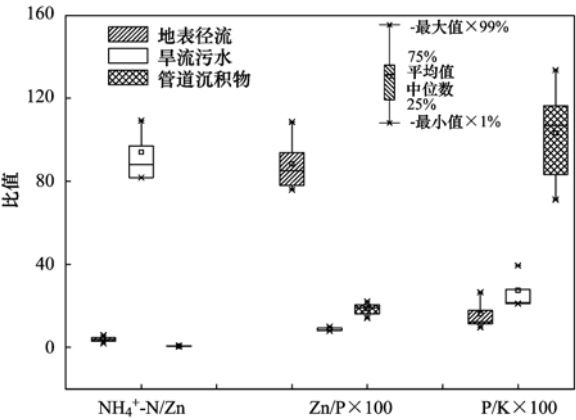


图 1 特征参数的分布概率

Fig. 1 Distribution probability of the characteristic index

3 讨论

根据地表径流、旱流污水、管道沉积物各自的特征参数与雨天溢流水质指标的相应比值,由式(1)计算得出次降雨事件中各污染源对溢流污染的贡献率(表5)。由于现场实验时人力、物力有限,本研究采集的地表径流样与泵站溢流样在次降雨事件上并不完全对应,3个排放源的特征比值采用多次监测的特征指标比值的均值。对雨天溢流污染,地表径流的贡献率在29.6%~60.9%之间,旱流污水的贡献率在8.1%~15.1%之间,管道沉积物的贡献率在10.0%~33.8%之间。计算结果表明,地表径流和管道沉积物是雨天溢流污染的主要来源,其中地表径流贡献比率最大,平均贡献值高达42.8%;旱流污水对溢流总污染物的贡献很小,平均贡献率为12.2%。计算结果,3个污染源贡献率之和<100%。这与本研究提出的污染源的特征指

标对实际溢流污染排放机制的描述还不够准确有关。运用特征指标CMB法进行排水管道污染源解析时,容易发生各排放源贡献率之和小于1的情况^[14]。尽管如此,本研究的源解析结果仍基本反映了CSO的污染构成。

表 5 雨天溢流污染源解析结果

Table 5 Source apportionment of CSO

时间	地表径流 贡献率	旱流污水 贡献率	管道沉积物 贡献率	∑ 贡献率
2012-07-06	0.498	0.121	0.169	0.788
2012-08-08	0.422	0.081	0.239	0.741
2012-08-13	0.609	0.138	0.100	0.846
2012-08-20	0.385	0.103	0.278	0.766
2012-09-07	0.296	0.151	0.305	0.752
2012-09-09	0.355	0.142	0.338	0.835
平均值	0.428	0.122	0.238	0.788

CSO 污染源解析结果能代表与特征指标同类或相近的一类污染物的贡献率。由于现采用的沉积物特征参数P/K对颗粒态污染物,特别是SS的代表性不理想,采用本研究的源解析结果评价SS的来源时,管道沉积物的贡献率偏低。H系统雨天运行分截流和溢流两种模式,当系统内水位达到溢流控制水位时,排水泵站从截流模式转为溢流模式,截流模式下管道内水流速度较小,地表径流中含P量低的颗粒物沉积于管道沉积物的表层,溢流模式下此类颗粒物被强烈的水流冲刷优先输出,CSO中颗粒物的含P量降低,而沉积物的P含量较高且相对稳定,这可能是本文采用的CMB法计算得到的沉积物贡献率偏低的原因。继续相关研究确定对管道沉积物更具代表性和特异性的特

征因子具有重要意义。

CMB 法用于 CSO 污染源解析过程中未涉及地表径流、旱流污水以及溢流污水水量,既可以避免水量监测的精度对源解析结果的影响,又可以节约水量监测工作的投入;适用条件广、不受排水系统边界是否封闭的影响;以特征比值作为 3 个排放源的示踪指标,可以有效地解决管道沉积物的污染物量纲与地表径流、旱流污水、CSO 污染物量纲不一致的问题。总体来说,本研究提出的特征参数的 CMB 法的源解析结果可基本反映 CSO 污染的构成情况,为同类合流制排水系统雨天溢流污染的源解析提供了借鉴。

4 结论

(1)通过对系统内地表径流、旱流污水和管道沉积物污染物含量的调查,确定 Zn 、 NH_4^+ -N、P 分别在地表径流、旱流污水和管道沉积物中分布具有特异性且较稳定。提出以 Zn/P 、 NH_4^+ -N/ Zn 、 P/K 这 3 个比值分别作为地表径流、旱流污水和管道沉积物的特征指标参数,以实现量纲统一并增加特征指标在不同来源之间的区分度,数据分析证明采用无量纲比值方法并未增加特征参数在不同降雨事件之间的不稳定性。

(2)采用特征参数 CMB 法分析了 H 系统雨天溢流污染的来源构成:地表径流、旱流污水、管道沉积物对溢流污染的平均贡献率分别为 42.8%、12.2%、23.8%。源解析结果基本反映 CSO 污染构成情况。

(3)以 CMB 法解析 CSO 污染来源过程中,不涉及地表径流、旱流污水以及溢流污水流量过程的精确测定,可以节约流量监测工作的投入。同时,该方法还具有适用条件广、不受排水系统边界是否封闭的影响等优点。

参考文献:

- [1] Gasperi J, Garnaoud S, Rocher V, *et al.* Priority substances in combined sewer overflows: Case study of the Paris sewer network [J]. *Water Science and Technology*, 2011, **63**(5): 853-858.
- [2] Gasperi J, Zgheib S, Cladière M, *et al.* Priority pollutants in urban stormwater: Part 2 -Case of Combined sewers[J]. *Water Research*, 2012, **46**(20): 6693-6703.
- [3] Rossi L, Chèvre N, Fankhauser R, *et al.* Sediment contamination assessment in urban areas based on total suspended solids[J]. *Water Research*, 2013, **47**(1): 339-350.
- [4] 李贺, 李田. 上海高密度居民区合流制系统雨天溢流水质研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(8): 1565-1569.
- [5] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff [J]. *Water Research*, 2000, **34**(6): 1773-1780.
- [6] Gasperi J, Gromaire M C, Kafi M, *et al.* Contributions of wastewater, runoff and sewer deposit erosion to wet weather pollutant loads in combined sewer systems[J]. *Water Research*, 2010, **44**(20): 5875-5886.
- [7] Krejci V, Dauber L, Gujer W. Contribution of different sources to pollutant loads in combined sewers[A]. In: *Proceedings of the IV International Conference in Urban Storm Drainage* [C]. IARH, 1987. 34-39.
- [8] Gromaire M C, Garnaoud S, Saad M, *et al.* Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers[J]. *Water Research*, 2001, **35**(2): 521-533.
- [9] Soonthornnonda P, Christensen E R, Boudjou U, *et al.* An evaluation of separating combined sewers and its effect on water quality in the Greater Milwaukee, Wisconsin area [A]. In: *Proceedings of the 80th Annual Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference* [C]. San Diego, CA: Water Environment Federation, 2007. 13-17.
- [10] Soonthornnonda P, Christensen E R. Source apportionment of pollutants and flows of combined sewer wastewater[J]. *Water Research*, 2008, **42**(8-9): 1989-1998.
- [11] Kasahara M, Choi K C, Takahashi K. Source contribution of atmospheric aerosols in Japan by chemical mass balance method [J]. *Atmospheric Environment*, 1990, **24**(3): 457-466.
- [12] 孟莹莹, 冯沧, 李田, 等. 不同混接程度分流制雨水系统旱流水量及污染负荷来源研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3527-3533.
- [13] Pitt R, Field R, Laior M, *et al.* Investigation of inappropriate pollutant entries into storm drainage systems: a user guide[R]. EPA/600/SR-92/238, Storm and Combined Sewer Pollution Control Program. US Environmental Protection Agency (EPA). Ohio, 1993. 2-8.
- [14] Field R, Pitt R, Laior M, *et al.* Investigation of dry-weather pollutant entries into storm drainage systems [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1994, **120**(5): 1044-1066.
- [15] 国家环境保护局. 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. 210-418.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 1999. 14-151.
- [17] Miller M S, Friedlander S K, Hidy G M. A chemical element balance for the Pasadena aerosol [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1972, **39**(2): 165-176.
- [18] Cooper J A, Watson J G. Receptor oriented methods of air particulate source apportionment[J]. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1980, **30**(10): 1116-1125.
- [19] Charbeneau R J, Barrett M E. Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads[J]. *Water Environmental Research*, 1998, **70**(7): 1295-1302.
- [20] 李田, 林莉峰, 李贺. 上海市城区径流污染及控制对策[J]. *环境污染与防治*, 2006, **28**(11): 868-871.
- [21] Brombach H, Weiss G, Fuchs S. A new database on urban runoff pollution: comparison of separate and combined sewer system[J]. *Water Science and Technology*, 2005, **51**(2): 119-128.

CONTENTS

Aerosol Optical Properties During Different Air-Pollution Episodes over Beijing	SHI Chan-zhen, YU Xing-na, ZHOU Bin, <i>et al.</i> (4139)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Aerosol Ions over the Bohai Sea and the North Yellow Sea in Autumn	ZHANG Yan, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (4146)
Spatial Distribution Characteristics of Carbonaceous Aerosol During Summer in Beibu Gulf Zone, China	YANG Yi-hong, TAO Jun, GAO Jian, <i>et al.</i> (4152)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Greenhouse Gas by an Improved FTIR	XIA Ling-jun, LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (4159)
Distribution of CH ₄ in the Suburb of Changsha City, China	LIU Lu-ning, WANG Ying-hong, XU Xiao-juan, <i>et al.</i> (4165)
Chemical Composition of <i>n</i> -Alkanes in Wheat Straw and Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (4171)
Degradation of the Absorbed Methyl Mercaptan by Persulfate in Alkaline Solution	YANG Shi-ying, WANG Lei-lei, FENG Lin-yu, <i>et al.</i> (4178)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from the Full Process of Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHONG Jia, WEI Yuan-song, ZHAO Zhen-feng, <i>et al.</i> (4186)
Distribution and Physicochemical Properties of Aquatic Colloids in the Yangtze Estuarine and Coastal Ecosystem	GU Li-jun, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4195)
Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Estuaries Surface Sediments from the Haihe River Basin	 LÜ Shu-cong, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4204)
Distribution of Perfluorooctanesulfonate and Perfluorooctanoate in Water and the Sediment in Fenhe River, Shanxi Province	Higashiguchi Tomohiro, SHI Jiang-hong, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4211)
Analysis on Nitrogen and Phosphorus Loading of Non-point Sources in Shiqiao River Watershed Based on L-THIA Model	LI Kai, ZENG Fan-tang, FANG Huai-yang, <i>et al.</i> (4218)
Pollutant Source Apportionment of Combined Sewer Overflows Using Chemical Mass Balance Method	DAI Mei-hong, LI Tian, ZHANG Wei (4226)
Simulated Study of Algal Fatty Acid Degradation in Hypoxia Seawater-Sediment Interface Along China Coastal Area	SUI Wei-wei, DING Hai-bing, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4231)
Influence of Two Different Species of Aquatic Plant Communities on the Concentration of Various Nitrogen Forms in Sediment of Lake Taihu	 MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (4240)
Study on Removal Rule of Endosulfan in Surface Flow Constructed Wetland	QIN Jing, GAO Fu-wei, XIE Hui-jun (4251)
Accumulation and Transformation of Different Arsenic Species in Nonaxenic <i>Dunaliella salina</i>	WANG Ya, ZHANG Chun-hua, WANG Shu, <i>et al.</i> (4257)
Evaluation of <i>in situ</i> Capping with Lanthanum-Modified Zeolite to Control Phosphate and Ammonium Release from Sediments in Heavily Polluted River	 LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (4266)
Effects of Invertebrate Bioturbation on Vertical Hydraulic Conductivity of Streambed for a River	REN Chao-liang, SONG Jin-xi, YANG Xiao-gang, <i>et al.</i> (4275)
Formation of Disinfection By-products by <i>Microcystis aeruginosa</i> Intracellular Organic Matter: Comparison Between Chlorination and Bromination	 TIAN Chuan, GUO Ting-ting, LIU Rui-ping, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Natural Organic Matter on Coagulation Efficiency and Characterization of the Flocs Formed	XU Lei, YU Wen-zheng, LIANG Liang, <i>et al.</i> (4290)
DOM Membrane Fouling and Effects on Rejection Behaviors of NF Membranes	FENG Gui-zhen, DONG Bing-zhi (4295)
Removal of Hg in Wastewater by Zero-Valent Iron	ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, QIU Xin-kai, <i>et al.</i> (4304)
Catalytic Dechlorination of 2,4-D in Aqueous Solution by Fe ₃ O ₄ -Stabilized Nanoscale Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, LIANG Si, ZENG Si-si, <i>et al.</i> (4311)
Comparative Study on Adsorption Behaviors of Natural Organic Matter by Powered Activated Carbons with Different Particle Sizes	LI Zheng-jian, SHI Bao-you, WANG Dong-sheng (4319)
Removal of Nitrate from Aqueous Solution Using Cetylpyridinium Chloride (CPC)-Modified Activated Carbon as the Adsorbent	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4325)
Adsorption Properties of Modified Graphene for Methylene Blue Removal from Wastewater	WU Yan, LUO Han-jin, WANG Hou, <i>et al.</i> (4333)
Application of Classical Isothermal Adsorption Models in Heavy Metal Ions/Diatomite System and Related Problems	ZHU Jian, WU Qing-ding, WANG Ping, <i>et al.</i> (4341)
Effects of Nitrate on Anoxic/Anaerobic Oxidation of Methane in the Aged Refuse	LIU Yan-yan, LONG Yan, YIN Hua, <i>et al.</i> (4349)
Study on the Biotransformation of Sulfate and Ammonia in Anaerobic Conditions	ZHANG Li, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4356)
Characteristics of Sulfate Reduction-Ammonia Oxidation Reaction	YUAN Yi, HUANG Yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (4362)
Analysis of Hydrogen-production Performance in a UASB System at Low pH	ZHAO Jian-hui, ZHANG Bai-hui, LI Ning, <i>et al.</i> (4370)
Preparation of Red Mud Loaded Co Catalysts: Optimization Using Response Surface Methodology (RSM) and Activity Evaluation	LI Hua-nan, XU Bing-bing, QI Fei, <i>et al.</i> (4376)
Toxic Effects of High Concentrations of Ammonia on <i>Euglena gracilis</i>	LIU Yan, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (4386)
Influence of Image Process on Fractal Morphology Characterization of NAPLs Vertical Fingering Flow	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4392)
Changing Characteristics of Organic Matter and pH of Cultivated Soils in Zhejiang Province over the Last 50 Years	ZHANG Ming-kui, CHANG Yue-chang (4399)
Study on Selenium Contents of Typical Selenium-rich Soil in the Middle Area of Zhejiang and Its Influencing Factors	HUANG Chun-lei, SONG Ming-yi, WEI Ying-chun (4405)
Spatial Distribution Characteristics of Fe and Mn Contents in the New-born Coastal Marshes in the Yellow River Estuary	SUN Wen-guang, GAN Zhuo-ting, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (4411)
Level, Composition and Sources of Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soils from Chongming Island	SUN Yang-zhao, WANG Xue-tong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4420)
Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Soil from Daiyun Mountain Range in Fujian, China	QU Cheng-kai, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (4427)
Levels of PCDD/Fs and Dioxin-Like PCBs in Soils Near E-Waste Dismantling Sites	SHAO Ke, YIN Wen-hua, ZHU Guo-hua, <i>et al.</i> (4434)
Chemical Form Changes of Exogenous Water Solution Fluoride and Bioavailability in Tea Garden Soil	CAI Hui-mei, PENG Chuan-yi, CHEN Jing, <i>et al.</i> (4440)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Vegetation Restoration of Different Types of Coal Mine Spoil Banks	ZHAO Ren-xin, GUO Wei, FU Rui-ying, <i>et al.</i> (4447)
Effects of the Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Environmental Phytoremediation in Coal Mine Areas	LI Shao-peng, BI Yin-li, KONG Wei-ping, <i>et al.</i> (4455)
Preliminary Analysis of Manganese Uptake Mechanism in the Hyperaccumulator <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LI Ren-ying, LIU Cui-ying, <i>et al.</i> (4460)
Research on the Bioaccessibility of HgS by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	CHEN Yan, WANG Hui, SI You-bin (4466)
Study on IEUBK Model Localization Based on Behavior Parameters of Children from Southwestern China	JIANG Bao, CUI Xiao-yong (4473)
Sorption and Desorption Characteristics of Different Structures of Organic Phosphorus onto Aluminum (Oxyhydr) Oxides	LIU Fei, ZHANG Yan-yi, YAN Yu-peng, <i>et al.</i> (4482)
Study on the Occurrence of Ferrum in Coal by Ultrasound-assisted Sequential Chemical Extraction	XIONG Jin-yu, LI Han-xu, DONG Zhong-bing, <i>et al.</i> (4490)
A Review of Uptake, Translocation and Phytotoxicity of Engineered Nanoparticles in Plants	YANG Xin-ping, ZHAO Fang-Jie (4495)

《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)

2013年11月15日 34卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 11 Nov. 15, 2013

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