

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第1期

Vol.33 No.1

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

30年来中国民航运输行业的大气污染物排放	何吉成(1)
北京上甸子站气相色谱法大气 CH ₄ 和 CO 在线观测方法研究	汪巍,周凌晔,方双喜,张芳,姚波,刘立新(8)
2010年1月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子	朱李华,陶俊,陈忠明,赵岳,张仁健,曹军骥(13)
广东东江流域多氯萘的大气沉降研究	王琰,李军,刘向,成志能,张瑞杰,张干(20)
塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征	段魏魏,娄恺,曾军,胡蓉,史应武,何清,刘新春,孙建,晁群芳(26)
紫外光降解对生物过滤塔去除氯苯性能的影响机制研究	王灿,席劲瑛,胡洪营,姚远(32)
春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征	丁雁雁,张传松,石晓勇,商荣宁(37)
春季胶州湾海水汞的形态研究	许廖奇,刘汝海,王金玉,汤爱坤,王舒(42)
丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素	蒲焘,何元庆,朱国锋,张蔚,曹伟宏,常丽,王春风(48)
塔里木河下游输水间歇地下水埋深及化学组分的变化	陈永金,李卫红,董杰,刘加珍(55)
某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟	马志飞,安达,姜永海,席北斗,李定龙,张进保,杨昱(64)
北京市城市降雨径流水质评价研究	侯培强,任玉芬,王效科,欧阳志云,周小平(71)
重庆市路面降雨径流特征及污染源解析	张千千,王效科,郝丽岭,侯培强,欧阳志云(76)
沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究	陈祈春,李正魁,王易超,吴凯,范念文(83)
Pd/TiO ₂ 对水体中2,4-二氯酚的催化加氢脱氯研究	张寅,邵芸,陈欢,万海勤,万玉秋,郑寿荣(88)
pH值对纳米零价铁吸附降解2,4-二氯苯酚的影响	冯丽,葛小鹏,王东升,汤鸿霄(94)
给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究	陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超(104)
安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价	宋大平,庄大方,陈巍(110)
染整废水深度处理纳滤工艺膜污染成因分析	曹晓兵,李涛,周律,杨海军,王晓(117)
间歇式气水联合反冲洗生物炭池的试验研究	谢志刚,邱雪敏,赵燕玲(124)
pH及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响	庞会玲,杨桂朋,高先池,曹晓燕(129)
硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究	吕昌伟,崔萌,高际玫,张细燕,万丽丽,何江,孟婷婷,白帆,杨旭(135)
农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用	徐仁扣,赵安珍,肖双成,袁金华(142)
高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究	廉菲,刘畅,李国光,刘一夫,李勇,祝凌燕(147)
活性污泥对四环素的吸附性能研究	陈瑞萍,张丽,于洁,陶芸,张忠品,李克勋,刘东方(156)
加油站油类污染物自然衰减现场试验研究	贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(163)
生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法	宋洋,王芳,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,谢祖彬,蒋新(169)
利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为 MUCT 工艺运行控制参数	王晓玲,尹军,高尚(175)
数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响	董峰,张捍民,杨凤林(181)
不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响	刘奋武,周立祥,周俊,姜峰,王电站(191)
间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究	曾龙云,杨春平,郭俊元,罗胜联(197)
鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究	陈广银,常志州,叶小梅,杜静,徐跃定,张建英(203)
北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估	陈操操,刘春兰,李铮,王海华,张妍,王璐(208)
外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性的研究	杨慧,刘志华,李小明,杨麒,方丽,黄华军,曾光明,李硕(216)
赤潮藻电致化学发光分子探针检测系统的构建	朱霞,甄毓,米铁柱,池振明,徐晓春(222)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究	别聪聪,李锋民,王一斐,王昊云,赵雅茜,赵薇,王震宇(228)
纳米 TiO ₂ 对短裸甲藻的毒性效应	李锋民,赵薇,李媛媛,田志佳,王震宇(233)
苏州河底泥3种内分泌干扰物的空间分布及环境风险	李洋,胡雪峰,王效举,茂木守,大塚宜寿,细野繁雄,杜艳,姜琪,李珊,冯建伟(239)
电子废物拆解区农业土壤中 PCNs 的污染水平、分布特征与来源解析	王学彤,贾金盼,李元成,孙阳昭,吴明红,盛国英,傅家谟(247)
洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险	刘德鸿,王发园,周文利,杨玉建(253)
湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价	刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治(260)
广西铅锡矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律	项萌,张国平,李玲,魏晓飞,蔡永兵(266)
缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究	吴锡,许丽英,张雪霞,宋雨,王新,贾永锋(273)
可渗透反应复合电极法对铬(VI)污染土壤的电动修复	付融冰,刘芳,马晋,张长波,何国富(280)
胡敏酸对汞还原能力的测定和表征	江韬,魏世强,李雪梅,卢松,李梦婕,罗畅(286)
Zn(II)对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响	黎少杰,陈天虎,周跃飞,岳正波,金杰,刘畅(293)
油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究	张莹,李宝珍,杨金水,汪双清,袁红莉(299)
利用 PCR-DGGE 分析未开发油气田地微生物群落结构	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(305)
黄土高原六道沟流域8种植物根际细菌与 AMF 群落多样性研究	封晔,唐明,陈辉,丛伟(314)
鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析	张健,关连珠,颜丽(323)
杂质对废塑料裂解产物及污染物排放的影响	赵磊,王中慧,陈德珍,马晓波,栾健(329)
《环境科学》征稿简则(7)	
《环境科学》征订启事(19)	
信息(47,70,202,304)	

北京市城市降雨径流水质评价研究

侯培强,任玉芬,王效科*,欧阳志云,周小平

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085)

摘要:选取北京市城市天然雨水与3个不同下垫面(屋面、单位内部道路和环路干道道路)的降雨径流为研究对象,在2010年7~10月期间,测定了8场降雨中的13个理化指标,并采用灰色关联分析和主成分分析方法进行水质综合评价和污染物来源分析。结果表明,环路干道径流的综合水质最差,其他依次为屋面径流、单位内部道路径流和天然雨水,其中环路干道径流综合水质超出国家地表水Ⅴ类水质标准,天然雨水、单位内部道路径流和屋面径流综合水质满足国家地表水Ⅱ类水质标准;天然雨水与各下垫面降雨径流的主要污染物为氮,其中TN和 NH_4^+-N 平均浓度为 $5.49 \sim 11.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.90 \sim 5.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;环路干道径流中第一类污染物为P、SS和有机污染物,其主要来源为车辆轮胎和路面材质的磨损;第二类污染物为N和溶解态重金属,其主要来源为车辆尾气 and 大气干湿沉降。本研究结果可以为城市雨水水质评价、城市面源污染控制和雨水回收利用提供科学依据。

关键词:北京;城市降雨径流;水质评价;灰色关联分析;主成分分析

中图分类号:X832;X824 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2012)01-0071-05

Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff

HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, ZHOU Xiao-ping

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The natural rainwater and stormwater runoff samples from three underlying surfaces (rooftop, campus road and ring road) were sampled and analyzed from July to October, 2010 in Beijing. Eight rainfall events were collected totally and thirteen water quality parameters were measured in each event. Grey relationship analysis and principal component analysis were applied to assess composite water quality and identify the main pollution sources of stormwater runoff. The results show that the composite water quality of ring road runoff is mostly polluted, and then is rooftop runoff, campus road runoff and rainwater, respectively. The composite water quality of ring road runoff is inferior to V class of surface water, while rooftop runoff, campus road runoff and rainwater are in II class of surface water. The mean concentration of TN and NH_4^+-N in rainwater and runoff is $5.49\sim11.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $2.90\sim5.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, indicating that rainwater and runoff are polluted by nitrogen (N). Two potential pollution sources are identified in ring road runoff: ① P, SS and organic pollutant are possibly related to debris which is from vehicle tyre and material of ring road; ② N and dissolved metal have relations with automobile exhaust emissions and bulk deposition.

Key words: Beijing; urban rainfall runoff; evaluation of water quality; grey relationship analysis; principal component analysis

目前,许多城市面临着水资源短缺和水质污染的双重问题,为了缓解城市供水压力,一些城市已经开发利用雨水资源。城市雨水利用的可行性及可利用程度主要取决于降雨量、降雨时空分布和降雨径流的水质状况。相关研究表明,城市降雨径流中含有大量的污染物^[1,2],回收利用受污染的雨水会对环境产生危害。因此,健康的雨水回收利用必须建立在可靠的降雨径流水质监测、分析和评价之上。

发达国家自20世纪60年代开始研究城市降雨径流污染问题,在城市降雨径流监测方案、水质特性、污染排放规律、模型预测以及管理等方面取得了诸多成果^[3]。Gilbert等^[4]认为,城市降雨径流中的污染物通常有固体物质、营养物质、重金属、油脂、细菌等。Kim等^[5,6]对径流水质特征进行了大量调查,对径流中污染物累积、排放和迁移过程进行了模拟。

Schiff等^[7]对美国圣塔安那城市降雨径流进行了研究,发现其降雨径流过程存在明显的初始冲刷效应,且初期径流中的污染物浓度是后期的3~10倍。近年来我国在北京^[8]、上海^[9]、澳门^[10]等城市开展了大量的城市降雨径流水质的监测和分析工作,对降雨径流水质进行了评价,但主要是关于单因子评价^[11,12],尚未对城市降雨径流进行综合水质评价,且很少鉴别出降雨径流中的污染物来源^[10]。

本研究以北京市城市降雨径流为例,测定了北京市城区天然雨水、屋面和道路径流中13种常见污

收稿日期:2011-01-27;修订日期:2011-04-18

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41030744);国家自然科学基金项目(40901265)

作者简介:侯培强(1983~),男,博士研究生,主要研究方向为城市面源污染,E-mail:hpg83@163.com

* 通讯联系人,E-mail:wangxk@rcees.ac.cn

染物的含量,采用灰色关联分析和主成分分析方法分别进行了水质综合评价和污染物来源分析,旨在为城市雨水水质评价、城市面源污染控制和雨水回收利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

北京市的气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均降雨量为 600 mm,80% 的降雨集中在夏季和秋季,所以,采样时间设在 7~10 月。

1.2 样品采集

在 2010 年 7~10 月期间共采集 8 次降雨径流样品,包括天然雨水、屋面径流、单位内部道路径流和环路干道径流。

天然雨水的采样点共有 3 个,分别位于中国科学院生态环境研究中心化工楼楼顶(距离地面 16 m)、北京化工大学环境楼楼顶(距离地面 20 m)和北京市教学植物园木房房顶(距离地面 3 m)。将自制的仪器放置于楼顶或房顶,收集天然雨水。

屋面径流共设 3 个采样点,均位于中国科学院生态环境研究中心实验楼,其屋面材料均为沥青油毡。屋面径流的收集方法是:在楼房雨水管道出水口处放置收集箱,等比例全过程收集楼顶流出的雨水。

单位内部道路径流共设 3 个采样点,均位于中国科学院生态环境研究中心院内,路面材料为水泥混凝土和烧结砖。路面径流的收集方法为:在路面上的雨水下水井内装有容器,当路面产生径流时,等比例全过程收集流入下水井的雨水。

环路干道径流共设 6 个采样点,分别位于北京市北二环、北三环和北四环道路立交桥,路面材料均为沥青混凝土。路面径流的收集方法为:在立交桥的雨水下水口处放置收集箱,当路面产生径流时,等比例全过程收集流入下水井的雨水。

1.3 样品分析

监测指标包括 pH、SS、DO、BOD₅、COD、TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、TP、TOC 和溶解态重金属(Zn、Pb 和 Cu)等。按照国家水质分析标准^[13,14],pH 采用玻璃电极法,SS 采用重量法,DO 采用便携式溶解氧仪法,BOD₅ 采用稀释与接种法,COD 采用快速密闭消解法,TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法,NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法,TP 采用硫酸钾氧化-钼蓝比色法,TOC 采用非分散红外吸收法,溶解态重金属 Zn、Pb 和 Cu 采用 ICP-MS 测定。

1.4 数据分析方法

1.4.1 非参数检验分析

采用 SPSS 统计软件的非参数检验方法(Cruskal-Wallis H)对天然雨水与不同下垫面降雨径流之间的各污染物浓度差异性进行显著性分析,并利用 Mann-Whitney U 检验方法对不同降雨径流之间两两的差异性进行比较分析。

1.4.2 灰色关联分析方法

采用灰色关联分析方法综合评价不同降雨径流的水质级别,其基本原理是:选取降雨径流中的有代表性的水质因子(包括 DO、BOD₅、COD、TP、TN、NH₄⁺-N、Zn、Pb 和 Cu)实测值作为参考序列,水质评价标准为比较序列,求出多个关联度,与比较序列关联度最大的参考序列所对应的级别就是城市降雨径流水质的所属级别^[15]。

由于我国尚未制定城市降雨径流污染物排放标准,国内相关环保工作者的研究多以《国家地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)作为参考,同时考虑到降雨径流水质的特殊性,因此,笔者根据《国家地表水环境质量标准》将地表水划分为六类标准,即Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类和劣Ⅴ类。采用初值化对原始数据进行无量纲化处理,按照沈珍瑶等^[16]提出的方法计算绝对差,最后采用平均值法求出关联度,具体计算步骤可见文献^[16,17]。

比较各关联度的大小,按最大关联原则判定某降雨径流水质所属级别,其优劣排序规则为:①级别不同者,级别越低,品质越好;②级别相同者,比较其次高级别,次高级别越低品质越好;以此类推。如果最后一个级别仍相同,则再比较第Ⅰ级的关联度,关联度越大,品质越好,若关联度相等,则再比较第Ⅱ级,以此类推,直到分出优劣为止。

1.4.3 主成分分析方法

环路干道径流中各污染物的 Bartlett 球度检验相伴概率<0.001,小于显著性水平 0.05,因此可以作主成分分析(PCA)以揭示环路干道降雨径流中的污染物来源。

所有数据的整理与统计均采用 Excel 和 SPSS 软件。

2 结果与分析

2.1 各污染物在天然雨水和不同下垫面降雨径流中浓度的差异分析

非参数检验结果表明,各污染物浓度在天然雨水和不同下垫面降雨径流中均表现出显著性差异($P <$

0.05)(表1). 其中,环路干道径流中的 pH、SS、BOD₅、COD、TP、TOC 和 Cu 浓度均明显高于单位内部道路径流、屋面径流和天然雨水的浓度,其值分别为 7.62、467.68、14.26、308.26、1.034、21.50 和 0.027 mg·L⁻¹. 屋面径流中的 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 Zn 浓度明显高于环路干道径流、屋面径流和天然雨水中的浓度(除环路干道径流中的 NO₃⁻-N,天然雨水中的 NH₄⁺-N 和 Zn),其值分别为 11.75、4.50、5.67 和 0.144 mg·L⁻¹. 天然雨水中的 DO 和 Pb 浓度明显高于环路干道径流、单位内部道路径流和屋面径流(除单位内部道路径流中的 DO 和屋面径流中的 Pb),其值分别为 8.26 和 0.016 mg·L⁻¹.

表 1 天然雨水和不同下垫面降雨径流的各污染物浓度平均值¹⁾

Table 1 Mean concentration of different pollutants in natural rainwater and different underlying surfaces runoff						
指标	天然雨水 (n = 20)	屋面径流 (n = 23)	单位内部道路径流 (n = 11)	环路干道径流 (n = 39)	地表水 V 类标准	P 值
pH	5.53 ± 1.22 ^a	6.77 ± 0.19 ^b	7.06 ± 0.34 ^c	7.62 ± 0.27 ^d	6~9	0.000
SS/mg·L ⁻¹	0.79 ± 1.88 ^a	37.70 ± 60.36 ^b	53.45 ± 96.47 ^b	467.68 ± 315.93 ^c	—	0.000
DO/mg·L ⁻¹	8.26 ± 0.7 ^a	6.39 ± 1.55 ^b	7.33 ± 1.51 ^{ab}	4.70 ± 1.83 ^c	2	0.000
BOD ₅ /mg·L ⁻¹	3.12 ± 2.65 ^a	4.20 ± 2.31 ^a	5.19 ± 3.62 ^a	14.26 ± 9.62 ^b	10	0.000
COD/mg·L ⁻¹	33.91 ± 27.02 ^a	68.91 ± 40.33 ^b	67.52 ± 19.54 ^b	308.26 ± 115.80 ^c	40	0.000
TN/mg·L ⁻¹	5.49 ± 2.7 ^a	11.75 ± 6.77 ^b	5.88 ± 3.97 ^a	7.73 ± 4.54 ^a	2	0.003
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	2.09 ± 1.46 ^a	4.50 ± 2.37 ^b	2.45 ± 1.8 ^{ac}	3.59 ± 2.58 ^{bc}	—	0.002
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	3.54 ± 2.17 ^{abc}	5.67 ± 3.32 ^a	2.90 ± 1.36 ^{bc}	2.96 ± 2.24 ^c	2	0.009
TP/mg·L ⁻¹	0.039 ± 0.038 ^a	0.084 ± 0.083 ^b	0.200 ± 0.093 ^c	1.034 ± 0.491 ^d	0.4	0.000
TOC/mg·L ⁻¹	1.58 ± 0.71 ^a	4.24 ± 2.23 ^b	5.59 ± 1.00 ^c	21.50 ± 6.80 ^d	—	0.000
Zn/mg·L ⁻¹	0.099 ± 0.058 ^a	0.144 ± 0.144 ^a	0.030 ± 0.016 ^b	0.027 ± 0.019 ^b	2	0.000
Pb/mg·L ⁻¹	0.016 ± 0.018 ^a	0.006 ± 0.006 ^{ab}	0.003 ± 0.001 ^{bc}	0.003 ± 0.005 ^c	0.1	0.000
Cu/mg·L ⁻¹	0.010 ± 0.008 ^a	0.012 ± 0.006 ^a	0.011 ± 0.006 ^a	0.027 ± 0.013 ^b	1	0.000

1) 表中数据为 mean ± S. D., n 为样品个数,相同字母表示各污染物在不同降雨径流中不存在显著性的差异(P>0.05).

2.2 天然雨水和不同下垫面降雨径流的水质综合评价

根据最大关联原则,天然雨水、单位内部道路径流和屋面径流综合水质达到国家地表水Ⅱ类水质标

准,环路干道径流综合水质超出国家地表水Ⅴ类水质标准(表2). 根据水质优劣排序规则,各监测点降雨径流水质优劣排序为天然雨水>单位内部道路径流>屋面径流>环路干道径流(表2).

表 2 天然雨水和不同下垫面降雨径流的关联度及所属类型

Table 2 Grey relationship degrees and the assessment results for natural rainwater and different underlying surfaces runoff							
径流类型	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类	劣 V 类	最大关联度对应的等级
天然雨水	0.918	0.926	0.824	0.815	0.794	0.820	II 类
屋面径流	0.842	0.878	0.777	0.762	0.736	0.815	II 类
单位内部道路径流	0.903	0.912	0.825	0.826	0.805	0.830	II 类
环路干道径流	0.819	0.827	0.733	0.738	0.733	0.853	劣 V 类

2.3 环路干道径流中各污染物的主成分分析

通过主成分分析及方差极大法旋转,可以提取出影响北京市环路干道径流水质的 4 个主要因子,其贡献率分别为 23.36%、22.61%、15.24% 和 13.96%,这 4 个因子能够解释全部变量的 75.18%(表3). 第一主成分特点表现为因子变量在 TP、COD、SS 和 TOC 的浓度上有较高的正载荷. 第二主成分特点表现为因子变量在 Cu、和 NO₃⁻-N 的浓度上有较高的正载荷,在 pH 和 DO 的浓度上有较高的负载荷. 第三主成分特点表现为因子变量在 NH₄⁺-N 和 BOD₅ 的浓度上有较高的正载荷. 第四主成分特点表现为因子变量在 Pb、Zn 和 TN 的浓度上有较高的

正载荷.

3 讨论

灰色关联分析结果表明,天然雨水、单位内部道路径流和屋面径流综合水质均达到国家地表水Ⅱ类水质标准,环路干道径流综合水质级别超出国家地表水环境质量Ⅴ类水质标准,说明天然雨水、单位内部道路径流和屋面径流受到轻度污染,采取适当的预处理可以对其进行雨水回收利用,而环路干道径流受到严重污染,不宜进行回用. 监测指标浓度超出国家地表水环境质量标准Ⅴ类限值(GB 3838-2002),便认为该指标受到污染,可以看出北京城区

表 3 环路干道径流的主成分分析结果

Table 3 Results of principal component analysis and varimax rotated loading for the ring road runoff

指标	成分			
	PC1	PC2	PC3	PC4
pH	0.476	-0.572	-0.324	0.271
SS	0.784	-0.089	0.246	-0.125
DO	-0.302	-0.780	-0.152	-0.038
BOD ₅	0.122	0.386	0.716	0.253
COD	0.837	0.284	0.305	-0.113
TN	0.074	0.434	0.494	0.548
NO ₃ ⁻ -N	-0.036	0.746	0.274	0.174
NH ₄ ⁺ -N	0.259	0.088	0.878	0.134
TP	0.878	-0.005	0.049	0.152
TOC	0.700	0.541	-0.053	0.181
Zn	0.186	0.136	0.297	0.643
Pb	-0.135	0.102	0.028	0.875
Cu	0.049	0.832	0.055	0.253
方差贡献/%	23.36	22.61	15.24	13.96

的天然雨水主要受 pH、TN 和 NH₄⁺-N 的污染,单位内部道路径流和屋面径流主要受 COD、TN 和 NH₄⁺-N 的污染,环路干道径流主要受 BOD₅、COD、TP、TN 和 NH₄⁺-N 的污染(表 1)。因此北京城区天然雨水与不同下垫面降雨径流中的氮污染比较严重,其中 TN 平均浓度为 5.49 ~ 11.75 mg·L⁻¹,超出国家地表水 V 类水质标准 2.75 ~ 5.88 倍, NH₄⁺-N 平均浓度为 2.90 ~ 5.67 mg·L⁻¹,超出国家地表水 V 类水质标准 1.45 ~ 2.84 倍。侯立柱^[18]和任玉芬^[19]等分别在 2001 年和 2004 ~ 2006 年间对北京市降雨径流进行监测分析,与其结果相比,本研究中天然雨水、单位内部道路径流和屋面径流中的大部分污染物浓度偏低,这可能与北京市政府在扬尘、机动车、工业和燃煤污染方面采取的有效治理和控制措施有关;然而,本研究中环路干道径流中的大部分污染物浓度偏高,这可能与北京市机动车辆的猛增有关。

与天然雨水、屋面径流和单位内部道路径流相比,环路干道径流的综合水质最差,其中,环路干道径流的 pH、SS、BOD₅、COD、TP、TOC 和 Cu 浓度最高,均明显高于单位内部道路径流、屋面径流和天然雨水,可能是因为环路路面车辆、行人等交通量大,沥青混凝土路面材质释出大量污染物^[20],致使环路路面废气、扬尘和路面沉积物等污染物较多,从而导致环路干道径流水质最差。屋面径流的综合水质优于环路干道径流而劣于天然雨水和单位内部道路径流,其中,屋面径流的 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 Zn 浓度明显高于环路干道径流、单位内部道路径流和天然雨水中的浓度,这是因为,在监测期间单位内部及周

围有大量的建筑物拆迁和建筑施工,扬尘大,屋面从未清扫过,且油毡沥青屋面能够释放出大量的重金属和有机物质^[21],而单位内部道路车流量少,路面材质为水泥混凝土和烧结砖,路面释出污染物少,且每天均有专人清扫路面,所以单位内部屋面径流水质劣于单位内部道路。天然雨水的综合水质最好,但天然雨水中的 Pb 浓度明显高于环路道路径流、单位内部道路径流和单位内部屋面径流,这可能和 Pb 的赋存形态有关,即 Pb 主要以 SS 为载体,吸附在 SS 上,以颗粒态形式存在于自然环境中^[22,23]。

环路干道径流的主成分分析结果表明,第一主成分主要反映了环路干道径流中的 P、SS 和有机污染状况,其污染源主要为机动车辆轮胎和路面材质,因为汽车在行驶和刹车过程中,汽车轮胎与沥青地面摩擦、腐蚀而产生道路灰尘,会带来碳氢化合物、磷酸盐及颗粒物等污染物^[20]。这与其他学者对道路径流中磷、悬浮物和有机污染物来源分析基本一致,王吉苹等^[24]认为道路径流中的磷主要源于磨损的轮胎碎屑和路面材料颗粒;邓鑫楠等^[25]认为 SS 是公路径流的主要污染物,SS 主要来源是车辆轮胎和路面材料的摩擦,以及车辆部件磨损释放的颗粒和除冰剂等;黄金良^[26]和 Drappe^[27]等发现道路降雨径流中的 TOC 和 COD 等有机物质主要来源于车辆轮胎损耗,且当路面类型为沥青路面时,径流中的 COD 和 TOC 的浓度是相同条件下混凝土路面径流的 3 ~ 5 倍。第二、三和四主成分主要反映了环路干道径流中的 N 和溶解态重金属污染状况,其污染源为大气干湿沉降和机动车尾气。相关研究表明^[28,29],道路径流中 57% 的 Zn、74% 的 Cu、100% 的 Pb 和 70% ~ 90% 的 N 负荷来源于大气干湿沉降,本研究中天然雨水的 NH₄⁺-N、Pb 和 Zn 的浓度高于环路干道径流(表 1),说明道路径流中的 N 和溶解态重金属主要来源于大气干湿沉降。此外,环路干道径流中 N 的另一个主要来源是车辆尾气,因为机动车辆在行驶过程中产生的汽车尾气含有大量的 NO_x^[30-32],这些污染物通过大气干湿沉降的形式下落到道路上,从而对道路径流产生污染。

4 结论

(1) 平均浓度均超过地表水 V 类水质标准的污染物在天然雨水中主要为 pH、TN 和 NH₄⁺-N,单位内部道路径流和屋面径流主要为 COD、TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N,环路干道径流主要为 SS、BOD₅、COD、TP、TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N。

(2)环路干道径流的综合水质最差,超出国家地表水Ⅴ类水质标准,其他依次为屋面径流、单位内部道路径流和天然雨水,其综合水质均满足国家地表水Ⅱ类水质标准。

(3)环路干道径流水质污染物来源主要有2类:一是与P、SS和有机污染物有关的机动车辆轮胎和路面材质污染源;二是与N和溶解态重金属污染有关的大气干湿沉降和机动车尾气污染源。

参考文献:

- [1] Lye D J. Rooftop runoff as a source of contamination; a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(21): 5429-5434.
- [2] Ren Y F, Wang X K, Ouyang Z Y, *et al.* Stormwater runoff quality from different surfaces in an urban catchment in Beijing, China [J]. *Water Environment Research*, 2008, **80**(8): 719-724.
- [3] 尹澄清. 城市面源污染的控制原理和技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. 15-23.
- [4] Gilbert J K, Clausen J C. Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut [J]. *Water Research*, 2006, **40**(4): 826-832.
- [5] Kim L H, Kang J, Kayhanian M, *et al.* Characteristics of litter waste in highway storm runoff [J]. *Water Science and Technology*, 2006, **53**(2): 225-234.
- [6] Kim L H, Kayhanian M, Zoh K D, *et al.* Modeling of highway stormwater runoff [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **348**(1-3): 1-18.
- [7] Schiff K C, Tiefenthaler L L. Seasonal flushing of pollutant concentrations and loads in urban stormwater [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2011, **47**(1): 136-142.
- [8] 张巍, 张树才, 万超, 等. 北京城市道路地表径流及相关介质中多环芳烃的源解析 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(6): 1478-1483.
- [9] 常静, 刘敏, 许世远, 等. 上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应 [J]. *地理研究*, 2006, **25**(6): 994-1002.
- [10] Huang J, Du P, Ao C, *et al.* Multivariate analysis for stormwater quality characteristics identification from different urban surface types in Macau [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, **79**(6): 650-654.
- [11] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 等. 城市不同下垫面的降雨径流污染 [J]. *生态学报*, 2005, **25**(12): 3226-3230.
- [12] Wei Q S, Zhu G F, Wu P, *et al.* Distributions of typical contaminant species in urban short-term storm runoff and their fates during rain events; a case of Xiamen City [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(4): 533-539.
- [13] 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.
- [14] HJ/T 91-2002, 地表水和污水监测技术规范 [S].
- [15] 李祚泳, 丁晶, 彭荔红. 环境质量评价原理与方法 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 149-152.
- [16] 沈珍瑶, 谢彤芳. 一种改进的灰关联分析方法及其在水环境质量评价中的应用 [J]. *水文*, 1997, (3): 13-15.
- [17] 李炳军, 朱春阳, 周杰. 原始数据无量纲化处理对灰色关联度的影响 [J]. *河南农业大学学报*, 2002, **36**(2): 199-202.
- [18] 侯立柱, 丁跃元, 冯绍元, 等. 北京城区不同下垫面的雨水径流水质比较 [J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(23): 35-38.
- [19] 任玉芬. 北京城市生态系统暴雨径流过程及污染负荷研究 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2007.
- [20] 余爱华, 石迪, 赵尘. 公路沥青路面径流的水质特性 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2008, **32**(5): 149-152.
- [21] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等. 沥青油毡屋面降雨径流污染物浓度历时变化研究 [J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(4): 601-606.
- [22] Furumai H, Balmer H, Bollner M. Dynamic behavior of suspended pollutants and particle size distribution in highway runoff [J]. *Water Science and Technology*, 2002, **46**(11-12): 413-418.
- [23] Sansalone J J, Buchberger S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, **123**(2): 134-143.
- [24] 王吉苹, 朱木兰. 厦门城市降雨径流氮磷非点源污染负荷分布探讨 [J]. *厦门理工学院学报*, 2009, **17**(2): 57-61.
- [25] 邓鑫楠, 张慧, 吴湘滨. 高速公路路面径流及路侧水质污染研究 [J]. *西部交通科技*, 2007, (2): 7-9.
- [26] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市小流域地表径流污染特征分析 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1753-1759.
- [27] Drapper D, Tomlinson R, Williams P. Pollutant concentrations in road runoff: Southeast Queensland case study [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2000, **126**(4): 313-320.
- [28] Sabin L D, Lim J H, Stolzenbach K D, *et al.* Contribution of trace metals from atmospheric deposition to stormwater runoff in a small impervious urban catchment [J]. *Water Research*, 2005, **39**(16): 3929-3937.
- [29] Wu J S, Allan C J, Saunders W L, *et al.* Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1998, **124**(7): 584-592.
- [30] Chen J H, Wang W, Zhang J Y, *et al.* Characteristics of gaseous pollutants near a main traffic line in Beijing and its influencing factors [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(3): 470-480.
- [31] Wang T, Xie S D. Assessment of traffic-related air pollution in the urban streets before and during the 2008 Beijing Olympic Games traffic control period [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(35): 5682-5690.
- [32] 傅立新, 郝吉明, 何东全, 等. 北京市机动车污染物排放特征 [J]. *环境科学*, 2000, **21**(3): 68-70.

CONTENTS

Air Pollutant Emissions of Aircraft in China in Recent 30 Years	HE Ji-cheng (1)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Atmospheric CH ₄ and CO by GC-FID Method at the Shangdianzi GAW Regional Station	WANG Wei, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (8)
Reconstructed Ambient Light Extinction Coefficient and Its Contribution Factors in Beijing in January, 2010	ZHU Li-hua, TAO Jun, CHEN Zhong-ming, <i>et al.</i> (13)
Atmospheric Deposition of Polychlorinated Naphthalenes in Dongjiang River Basin of Guangdong Province	WANG Yan, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (20)
Metabolic Characteristics of Air Microbial Communities from Sandstorm Source Areas of the Taklamakan Desert ...	DUAN Wei-wei, LOU Kai, ZENG Jun, <i>et al.</i> (26)
Mechanisms of UV Photodegradation on Performance of a Subsequent Biofilter Treating Gaseous Chlorobenzene ...	WANG Can, XI Jin-ying, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (32)
Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Bohai Sea and Yellow Sea in Spring	DING Yan-yan, ZHANG Chuan-song, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (37)
Research on the Mercury Species in Jiaozhou Bay in Spring	XU Liao-qi, LIU Ru-hai, WANG Jin-yu, <i>et al.</i> (42)
Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijiang Basin, Northwest Yunnan	PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (48)
Variations in Depth and Chemistry of Groundwater in Interval of Water Delivery at the Lower Tarim River	CHEN Yong-jin, LI Wei-hong, DONG Jie, <i>et al.</i> (55)
Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill	MA Zhi-fei, AN Da, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (64)
Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff	HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (71)
Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (76)
Applied Study of the Submerged Macrophytes Bed-Immobilized Bacteria in Drinking Water Restoration	CHEN Qi-chun, LI Zheng-kui, WANG Yi-chao, <i>et al.</i> (83)
Catalytic Hydrodechlorination of 2,4-Dichlorophenol over Pd/TiO ₂	ZHANG Yin, SHAO Yun, CHEN Huan, <i>et al.</i> (88)
Effects of pH Value on the Adsorption and Degradation of 2,4-DCP by Nanoscale Zero-Valent Iron	FENG Li, GE Xiao-peng, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (94)
Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System	CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, <i>et al.</i> (104)
Risk Assessment of the Farmland and Water Contamination with the Livestock Manure in Anhui Province	SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei (110)
Analysis of Membrane Fouling Genesis in Nanofiltration Process for Advanced Treatment of Dyeing and Finishing Wastewater	CAO Xiao-bing, LI Tao, ZHOU Lü, <i>et al.</i> (117)
Experimental Research on Combined Water and Air Backwashing Reactor Technology for Biological Activated Carbon	XIE Zhi-gang, QIU Xue-min, ZHAO Yan-ling (124)
Impacts of pH and Surfactants on Adsorption Behaviors of Norfloxacin on Marine Sediments	PANG Hui-ling, YANG Gui-peng, GAO Xian-chi, <i>et al.</i> (129)
Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments	LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, <i>et al.</i> (135)
Adsorption of Methylene Blue from Water by the Biochars Generated from Crop Residues	XU Ren-kou, ZHAO An-zhen, XIAO Shuang-cheng, <i>et al.</i> (142)
Adsorption and Desorption of Dyes by Waste-Polymer-Derived Activated Carbons	LIAN Fei, LIU Chang, LI Guo-guang, <i>et al.</i> (147)
Study on the Sorption Behavior of Tetracycline onto Activated Sludge	CHEN Rui-ping, ZHANG Li, YU Jie, <i>et al.</i> (156)
<i>In situ</i> Experimental Research on Natural Attenuation of Oil Pollutants in a Gas Station	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (163)
Influence and Assessment of Biochar on the Bioavailability of Chlorobenzenes in Soil	SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, <i>et al.</i> (169)
Control for MUCT Process Operation Using Nitrate Concentration in the Secondary Anoxic Zone	WANG Xiao-ling, JIN Yun, GAO Shang (175)
Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter	DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin (181)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System	LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (191)
Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter	ZENG Long-yun, YANG Chun-ping, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (197)
Methane Production by Anaerobic Co-digestion of Chicken Manure and <i>Spartina alterniflora</i> Residue After Producing Methane	CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, <i>et al.</i> (203)
Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing	CHEN Cao-cao, LIU Chun-lan, LI Zheng, <i>et al.</i> (208)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cells Enhanced by Additional Enzyme	YANG Hui, LIU Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (216)
Construction of Electrochemiluminescence System for Harmful Algae Detection	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (222)
Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae <i>Gymnodinium breve</i>	BIE Cong-cong, LI Feng-min, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (228)
Toxic Effects of Nano-TiO ₂ on <i>Gymnodinium breve</i>	LI Feng-min, ZHAO Wei, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (233)
Spatial Distribution of Three Endocrine Disrupting Chemicals in Sediments of the Suzhou Creek and Their Environmental Risks	LI Yang, HU Xue-feng, OH Kokyo, <i>et al.</i> (239)
Level, Distribution, and Source Identification of Polychlorinated Naphthalenes in Surface Agricultural Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, JIA Jin-pan, LI Yuan-cheng, <i>et al.</i> (247)
Heavy Metal Pollution in Street Dusts from Different Functional Zones of Luoyang City and Its Potential Ecological Risk	LIU De-hong, WANG Fa-yuan, ZHOU Wen-li, <i>et al.</i> (253)
Soil Contamination and Assessment of Heavy Metals of Xiangjiang River Basin	LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, <i>et al.</i> (260)
Characteristics of Heavy Metals in Soil Profile and Pore Water Around Hechi Antimony-Lead Smelter, Guangxi, China	XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (266)
Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions	WU Xi, XU Li-ying, ZHANG Xue-xia, <i>et al.</i> (273)
Remediation of Chromium(VI) Contaminated Soils Using Permeable Reactive Composite Electrodes Technology	FU Rong-bing, LIU Fang, MA Jin, <i>et al.</i> (280)
Determination and Characterization on the Capacity of Humic Acid for the Reduction of Divalent Mercury	JIANG Tao, WEI Shi-qiang, LI Xue-mei, <i>et al.</i> (286)
Effect of Zn (II) on Microbial Activity in Anaerobic Acid Mine Drainage Treatment System with Biomass as Carbon Source	LI Shao-jie, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (293)
Diversity of Culturable Butane-oxidizing Bacteria in Oil and Gas Field Soil	ZHANG Ying, LI Bao-zhen, YANG Jin-shui, <i>et al.</i> (299)
Microbial Community Structure Analysis of Unexploited Oil and Gas Fields by PCR-DGGE	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (305)
Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China	FENG Ye, TANG Ming, CHEN Hui, <i>et al.</i> (314)
Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation	ZHANG Jian, GUAN Lian-zhu, YAN Li (323)
Influence of Impurities on Waste Plastics Pyrolysis: Products and Emissions	ZHAO Lei, WANG Zhong-hui, CHEN De-zhen, <i>et al.</i> (329)

《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)

2012年1月15日 33卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 1 Jan. 15, 2012

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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行