万方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勖之，姜瑢，王国庆，陈玉东，龙涛，林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年2月
第43卷 第2期
Vol.43 No.2

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 43 卷 第 2 期
2022 年 2 月 15 日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第43卷第2期 2022年2月
Vol.43,No.2 Feb.,2022

廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析

潘欣荣[1],左剑恶[1*],张宇[1],门聪[1],张丽萍[1],黄守斌[2]

(1.清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084;2.北京国环清华环境工程设计研究院有限公司,北京 100084)

摘要:降雨径流污染主要是通过雨水的冲刷和淋溶作用携带污染物进入受纳水体,造成水体黑臭化或富营养化.了解和掌握降雨径流污染特征是有效控制径流污染的前提.全面分析廊坊市城区降雨径流污染时空分布特征和各污染物相关关系,通过在市区设置14个采样点采集了7次降雨径流样品,分析了样品中的悬浮固体(SS)、化学需氧量(COD)、N、P、粪大肠杆菌、阴离子表面活性剂和挥发酚以及Zn、Cr^{6+}、As和Cu等污染指标,基于因子分析和聚类分析探讨污染物的来源和时空分布特征.结果表明,廊坊市降雨径流中各种污染物在不同时间和地点的变化非常大.各点的平均ρ(SS)范围高达150~500 $mg \cdot L^{-1}$,粪大肠杆菌超过了地表Ⅴ类水标准,同时各点的COD、N和P的平均质量浓度都超过地表Ⅴ类水标准.阴离子表面活性剂、石油类和挥发酚的平均质量浓度在地表Ⅰ类水和Ⅴ类水之间.NH_4^+-N与TN、挥发酚和As有较高的正相关,COD与TN、TP、Cr^{6+}和As有一定的正相关,而粪大肠杆菌与Zn和Cu呈现一定的负相关.道路径流中有机物、P、Cu和SS很可能主要来源于机动车轮胎和路面.各采样点可根据污染类型大致分为4类,主要为商业服务区、居民住宅区、较大的主干道和社区间的小型道路.廊坊市区降雨径流整体污染较为严重,尤其体现在COD、N和P污染.该研究对廊坊市区及其他北方城市降雨径流污染控制和治理有重要参考价值.

关键词:城市降雨径流;污染分布特征;源解析;主成分分析;聚类分析

中图分类号:X522 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2022)02-0795-08 **DOI**:10.13227/j.hjkx.202103119

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City

PAN Xin-rong[1], ZUO Jian-e[1*], ZHANG Yu[1], MEN Cong[1], ZHANG Li-ping[1], HUANG Shou-bin[2]

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Guohuan Tsinghua Environmental Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: Urban runoff pollution can carry pollutants into the receiving water through scouring and leaching, causing black color and odor or eutrophication. Understanding and mastering the characteristics of runoff pollution is a prerequisite for the effective control of runoff pollution. This study aimed to comprehensively analyze the temporal and spatial distribution characteristics of runoff pollution and the correlation between pollutants in the urban area of Langfang City. Rainfall runoff samples were collected seven times by setting up 14 sampling sites within the urban area. The suspended solids (SS), chemical oxygen demand (COD), N, P, fecal *E. coli*, anionic surfactants, volatile phenols, and Zn, Cr^{6+}, As, Cu, etc. were analyzed. The source and distribution of pollutants were summarized and analyzed through principal component analysis and cluster analysis. The results showed that the concentration of pollutants in runoff in Langfang City varied greatly at different times and locations. The average ρ(SS) at each point ranged from 150-500 $mg \cdot L^{-1}$, and the average concentrations of COD, N, P, and fecal *E. coli* all exceeded those of the surface water standard Ⅴ. The average concentration of anionic surfactants, petroleum, and volatile phenols were between those of the surface water standard Ⅰ and standard Ⅳ. The concentrations of metal pollutants were relatively low. NH_4^+-N had a positive correlation with total nitrogen (TN), volatile phenols, and As. COD had a certain positive correlation with TN, total phosphorus (TP), Cr^{6+}, and As, whereas fecal *E. coli* had a certain negative correlation with Zn and Cu. The organic matter, P, Cu, and SS were probably derived from vehicle tires and road surfaces. All sampling sites could be roughly divided into four types according to the features of pollution: mainly commercial service areas, residential areas, larger arterial roads, and small roads between communities. The pollution of runoff in Langfang City was relatively serious, especially that of COD, N, and P. This research provides important reference values for the control and regulation of runoff pollution in urban areas and other northern cities.

Key words: urban runoff; pollution distribution characteristics; source apportionment; principal component analysis; cluster analysis

城市降雨径流污染,主要是降雨引起的地表径流通过冲刷和淋溶作用使得污染物被裹挟进入受纳水体所造成的水体污染现象[1].城市降雨径流会将地表累积的SS、有机物、N、P、金属离子和细菌病毒等带入受纳水体[2],使得河流湖泊黑臭化或者富营养化[3,4].影响城市降雨径流污染的主要因素有:降雨特征、土地利用类型、大气污染状况、城市卫生管理水平和不透水地面面积等[5,6].

了解和掌握降雨径流污染特征是对其进行有效管理控制的基础和前提[7].发达国家在20世纪60年代就开始研究城市降雨径流污染问题,主要针对城市不同下垫面的径流污染类型及控制[8,9]、径流初期冲刷效应[10,11]和径流污染模型[12]等方面进行了深入研究.我国在城市径流污染控制方面也取得了长足的进步[13].国内课题组开展了大量关于城

收稿日期:2021-03-13;**修订日期**:2021-07-06
基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07105-003)
作者简介:潘欣荣(1989~),男,博士,主要研究方向为有机废弃物厌氧发酵和面源污染控制,E-mail:942217293@qq.com
* 通信作者,E-mail:jiane.zuo@mail.tsinghua.edu.cn

市道路径流污染排放特征[14]、城市降雨径流水质评价[15]和径流污染控制技术[16,17]等方面的研究. 但是关于城市降雨径流污染的长时间大范围的监测较少,对径流污染物在城区的时空分布特征需要进一步探索,对不同用地类型污染特性的分析不够全面,对污染物来源的解析也需要进一步地证实.

本研究以廊坊市城市降雨径流为目标,全面分析了各种污染指标的时空分布特征. 采用主成分分析法进行污染物来源分析,采用聚类分析对不同采样点的污染特征进行分析归纳,全面探讨了各污染物的相关关系和不同城市下垫面的污染类型,以期为城市径流污染控制提供理论基础和科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

廊坊市是河北省的一个地级市,位于河北省中部偏东. 廊坊市年均降雨量在 530.5 mm(1989 ~ 2018 年,廊坊市环保局数据),降水季节分布不均,多集中在夏季,6 ~ 8 月这 3 个月降水量一般可达全年总降水量的 70% ~ 80%. 年平均气温为 12℃左右,1 月最冷,7 月最热. 本研究在廊坊市采样点主要布置在广阳区和安次区,广阳区和安次区面积共约 900 km^2. 廊坊市总人口大概 480 万人,广阳区和安次区人口共 90 万左右. 路面环卫作业制度每天清扫 1 次,采用普扫 + 保洁的作业方式. 一、二级道路实行普扫 + 全天保洁,三、四级道路实行普扫 + 巡回保洁. 公共场所地面按照一级道路标准实行,居住小区地面按照二级道路标准实行. 近年来,廊坊市城区经济持续快速发展. 与此同时,环城水系水资源环境特别是水生态环境与经济发展的矛盾日益凸显,水环境不堪重负,生态环境面临巨大压力. 为研究廊坊市中心城区径流污染分布特点,本研究设置了道路、居民区和商业区等不同类型的 14 个采样点,采样点分布如图 1 所示.

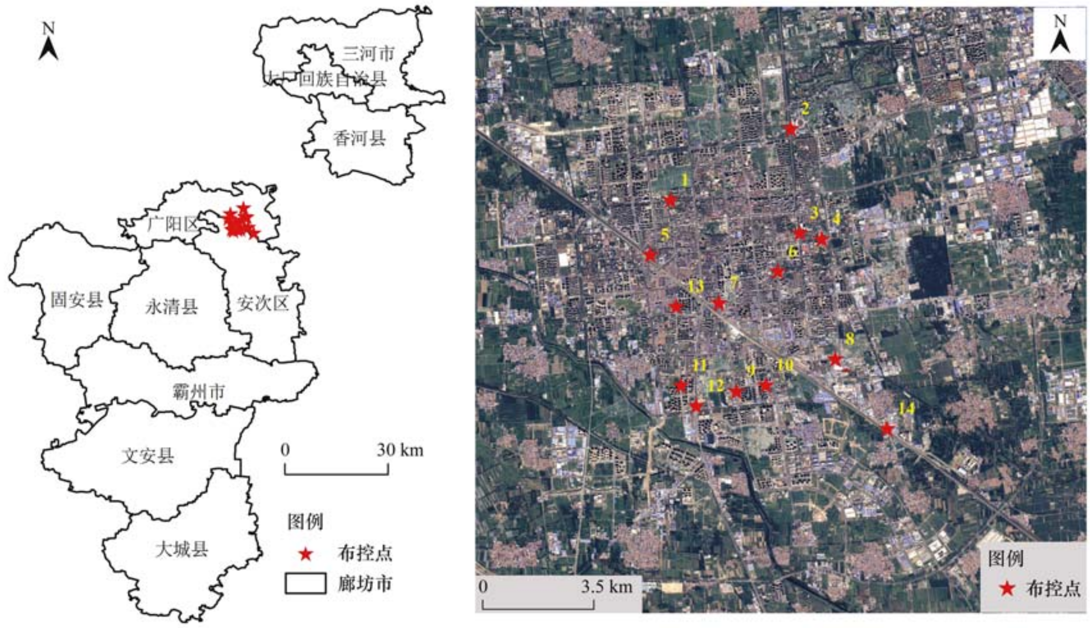

图 1 径流采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of runoff sampling sites

1.2 样品采集

表 1 总结了 1 ~ 14 号采样点分别对应的具体采样位置,并且把采样点分为城市道路、商业服务区、社区道路、居民住宅区和高速路口 5 类. 采集了从 2019 年 7 月到 2020 年 8 月的不同时间段的 7 次径流样品. 表 2 总结了 7 次降雨的主要特征,包括降雨日期、降雨量、降雨时长和雨前干期. 以道路旁的雨水篦子或桥下径流排口为径流样品接取点,等比例收集径流产生 1 h 内的样品,样品体积至少 5 L. 样品用聚乙烯瓶采集,随后对各类指标进行分析测试. 降雨特征通过安装在廊坊市安次区的 Vantage Pro 2 系列气象站(Davis,美国)进行记录整理.

1.3 样品分析

测试指标包括:pH、COD、NH_4^+-N、TN、TP、SS、电导率、氧化还原电位(oxidation-reduction potential,ORP)、阴离子表面活性剂、挥发酚、石油类、Cr^{6+}、Cu、Zn、As、Se、Cd、Pb、粪大肠杆菌. pH 和 ORP 用梅特勒 F2 型 pH 计测试,COD 用快速密闭消解法测定,NH_4^+-N用纳氏试剂光度法,TP 用钼酸铵分光光度法,用的仪器为可见分光光度计(7230G). TN 用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度

表 1　采样点编号对应的采样点位置

Table 1　Corresponding actual locations to the sampling numbers

编号	位置	类型
1	广阳道黄金部队	城市道路
2	新源道与和平路交口	城市道路
3	和平路国际饭店门前	商业服务区
4	东安路与爱民道交口处	城市道路
5	爱民道下穿铁路桥区域	社区道路
6	新开路管道局医院门前	城市道路
7	解放道下穿铁路桥区域	城市道路
8	益民道区域	居民住宅区
9	常甫路区域	社区道路
10	辛庄道和瑞丰道区域	商业服务区
11	常青路永华道以南区域	社区道路
12	银河南路永华道以南区域	社区道路
13	常青路光明西道以北区域	城市道路
14	枣林路彭庄村口	高速路口

表 2　各场次降雨特征

Table 2　Characteristics of different rainfall sample

场次	日期（年-月-日）	降雨量/mm	降雨时长/h	雨前干期/d
1	2019-07-28	19.8	16	5
2	2019-09-13	15.2	7	23
3	2020-04-16	24.6	5	19
4	2020-05-07	16.6	18	17
5	2020-06-25	3.2	26	13
6	2020-07-27	33.2	6	1
7	2020-08-05	3.0	8	2

法，使用紫外分光光度计（T6 新世纪型）进行测试. SS 采用重量法，使用电子天平（FA 2004B）和电热鼓风干燥箱（FX101-2）进行分析，电导率用雷磁 DDS-307A 电导率仪测试. 阴离子表面活性剂用亚甲基蓝分光光度法，挥发酚用萃取分光光度法，使用分光光度计（723C）进行测试. 石油类用紫外分光光度计（T6 新世纪型）进行测试. Cr^{6+} 用二苯碳酰二肼分光光度法，使用分光光度计（723C）进行分析. 铜、锌、镉、铅用原子吸收分光光度计（AA-6880 系列）进行测试分析，砷和硒用原子荧光光度计（AFS-3000）进行分析，粪大肠杆菌用多管发酵法和滤膜法，使用霉菌培养箱（MJX-160B-Z）进行培养计数.

1.4　数据分析方法

使用 Rstudio 的 psych 包对不同污染物之间进行相关性分析，分析各污染物间的内在联系. 使用 NbClust 包对不同采样点进行聚类分析，探索不同土地利用类型的污染物特点，同时用 Excel 和 Origin 软件整理污染物测试数据，绘制污染物质量浓度分布、相关性分析和因子分析的结果表格.

2　结果与讨论

2.1　地表径流污染物的时空分布特征

图 2 总结了 8 次径流样品中质量浓度较高的污染物分布情况. 不同点位的污染物质量浓度变化很大，同一个点位不同时间的径流污染物质量浓度分布范围也比较广. 大部分点位平均 ρ(SS) 范围在 150～500 mg·L^{-1}，质量浓度较高的月份主要在 4 月和 5 月. 14 号点位的最高质量浓度达到了 1 400 mg·L^{-1}，14 号点位处于城市周边的高速路段，来往车辆很多，轮胎磨损和路面磨损都会造成径流中颗粒物增多，因此整体的 SS 质量浓度较高[18]. 另外在 9 号点附近采样期间有施工情况，导致地面径流中携带比较多的固体颗粒. 各点的平均 ρ(COD) 范围在 100～300 mg·L^{-1}，远远超过了地表Ⅴ类水标准的 40 mg·L^{-1}，其中质量浓度较高的点在 1、6 和 9 号，最高质量浓度达到了 800 mg·L^{-1}. COD 质量浓度波动比较大，COD 较高容易造成河道的黑臭化，因此需要在源头或者排口控制径流中的 COD[19]. 各点的平均 ρ(NH_4^+-N) 范围在 1～4 mg·L^{-1}，分布于地表Ⅴ类水（2 mg·L^{-1}）和劣Ⅴ类水范围，最高质量浓度达到了 20 mg·L^{-1}，远远超过了地表Ⅴ类水标准. ρ(TN) 范围在 2～10 mg·L^{-1}，大部分都超过了地表Ⅴ类水标准的 2 mg·L^{-1}. 9 号点的 TN 质量浓度分布比较广，最大达到了 46 mg·L^{-1}，较高的 N 量可能会造成河流湖泊的富营养化，因此在径流污染中 N 需要特别注意控制[20]. 各点的 ρ(TP) 范围在 0.4～1.6 mg·L^{-1}，大部分都超过了地表Ⅴ类水的标准限值 0.4 mg·L^{-1}，其中 9、10 和 14 号点的 TP 质量浓度较高，最高达到了 6.5 mg·L^{-1}[21]. 径流样品中粪大肠杆菌的范围在 1×10^5～1×10^7 个·L^{-1}，比地表水标准（4×10^4 个·L^{-1}）限值高 1～3 个数量级，这部分可能是来自于降雨期间溢流污水和宠物等排泄物，会造成水体中病原菌的传播.

图 2(g)～2(i) 主要表述阴离子表面活性剂、石油类和挥发酚的质量浓度分布情况. 其中各点的平均 ρ(阴离子表面活性剂) 范围在 0.35～0.80 mg·L^{-1}，整体都超过了地表Ⅴ类水标准的 0.3 mg·L^{-1}，某个采样点的最高质量浓度可达 1.68 mg·L^{-1}，是地表Ⅴ类水标准的 5 倍，说明有几个点的质量浓度比较高，造成了平均质量浓度的升高. 另外从图 3 中不同采样时间污染物质量浓度分布看，阴离子表面活性剂在 2020 年的 5、6 和 7 月质量浓度明显更高，因此径流中阴离子表面活性剂污染控制的重点需要放在质量浓度

较高的时间段[22]. 石油类污染物的情况类似,各点的平均质量浓度范围在 0.5 ~ 0.8 mg·L^{-1},在地表Ⅳ ~ Ⅴ类水之间(0.5 ~ 1.0 mg·L^{-1}),但污染物质量浓度的中位数在 0.3 mg·L^{-1}左右,说明大部分样品质量浓度较低,部分样品的质量浓度高达 2.67 mg·L^{-1},提高了整体的平均值. 石油类污染物重要来源可能是路面车辆的润滑油泄漏或者工业用油的泄漏. 平均ρ(挥发酚)范围在 0.003 ~ 0.007 mg·L^{-1},在地表Ⅱ ~ Ⅳ类水之间(0.002 ~ 0.01 mg·L^{-1}),其中在 7 号点的质量浓度相对较高,最高质量浓度可达 0.012 mg·L^{-1},略高于Ⅴ类水标准.

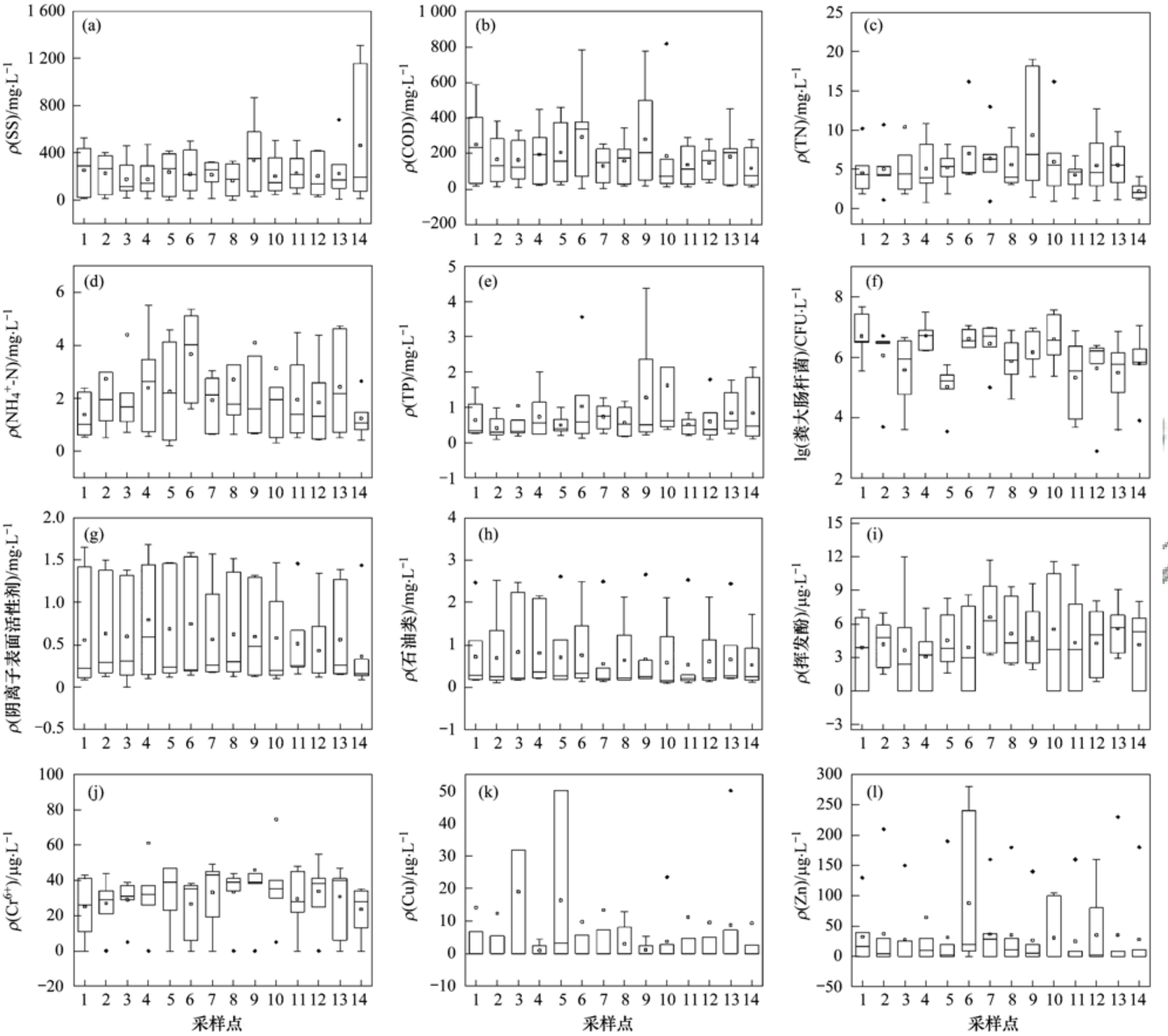

图 2 径流样品中主要污染物在不同采样点的分布情况

Fig. 2 Distribution of main pollutants at different sampling sites

金属类污染物中,各点的平均ρ(Cr^{6+})范围在 0.023 ~ 0.143 mg·L^{-1},在地表Ⅰ ~ Ⅴ类水之间(0.01 ~ 0.1 mg·L^{-1}),整体分布较为平均,其中质量浓度较高的在 5 号点,最高质量浓度达到了 0.82 mg·L^{-1},远远超出地表Ⅴ类水标准. 平均ρ(Cu)范围在 0.001 ~ 0.016 mg·L^{-1},优于地表Ⅱ类水(1.0 mg·L^{-1}),并且大部分样品的质量浓度都为 0. 在径流中平均ρ(Zn)范围在 0.027 ~ 0.087 mg·L^{-1},大部分在地表Ⅰ ~ Ⅱ类水之间(0.05 ~ 0.1 mg·L^{-1}),质量浓度较高的月份集中在 7 ~ 9 月. Cu 主要来源于汽车制动瓦片和建筑防腐材料,Zn 的来源主要是屋面材料和轮胎磨损,可能是 7 ~ 9 月车流量较大,因此造成 Cu 和 Zn 在径流中含量较高[23]. As 在径流中的质量浓度分布较为平均,平均ρ(As)在 0.002 5 ~ 0.004 5 mg·L^{-1},都优于地表Ⅰ类水标准(0.05 mg·L^{-1}). 虽然最高质量浓度达到 0.023 9 mg·L^{-1},但大部分样品ρ(As)范围在 0.002 ~ 0.006 mg·L^{-1}. 降雨径流样品中的 pH 值大部分都在 7.0 ~ 7.5 之间,总体比较稳定,优于地表水Ⅰ类标准值.

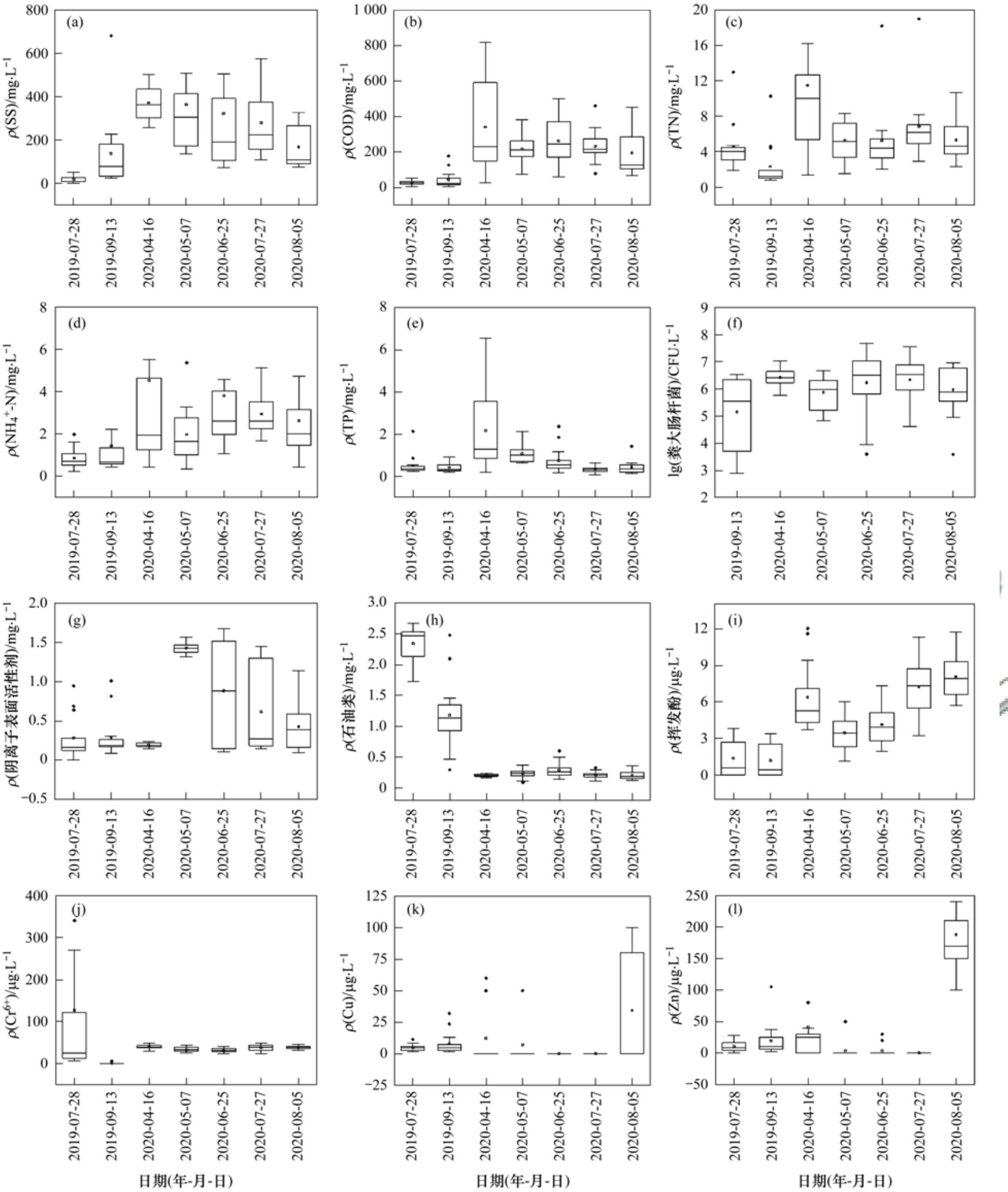

图 3　径流样品中主要污染物在不同采样时间分布情况

Fig. 3　Distribution of main pollutants at different sampling times

2.2　不同污染物的相关性及来源分析

表 3 是对地表径流中不同污染物进行相关性分析的汇总，大部分污染物的相关性程度都不高．其中NH_4^+-N与 TN 相关系数达到了 0.624，显著性检验也达到了比较显著的水平[24]，同时NH_4^+-N与挥发酚和 As 的相关性达到了 0.822 和 0.636，相关性检验显示达到了显著和比较显著的水平，说明NH_4^+-N与挥发酚和 As 污染有一定联系．COD 与 TN、TP、Cr^{6+}和 As 显示出一定的正相关，相关系数分别为 0.733、0.843、0.635 和 0.791．SS 与石油类显现出一定的负相关性，可能是由于 SS 能够吸附石油类污染物．但是在污染物随着雨水径流迁移过程，这类污染物会再次溶解到水中，同样会造成受纳水体的污染[25]．粪大肠杆菌与 Zn 和 Cu 呈现一定的负相关，可能由于这两种离子对微生物生长有一定的抑制作用．有研究指出，水中较低

质量浓度的 Cu 离子也能够显著抑制微生物的活性并影响其功能[26].

结合表 4 因子分析的结果对污染物进行解析. 与正交旋转所得因子载荷阵列相比,斜交旋转的载荷阵列噪声比较大,因为斜交旋转允许潜在因子相关. 因此斜交旋转更为复杂,但更为真实. 通过斜交旋转因子分析,能够得到影响道路径流水质的 4 各主要因子. 因子 1、2、3 和 4 对方差的贡献分别为 29%、17%、17% 和 16%,能够解释全部变量的 79%. 因子 1 上NH_4^+-N、TN、表面活性剂、挥发酚和 As 有较高的正载荷,因子 2 上 pH、Cu 和 Zn 有较高的正载荷,粪大肠杆菌有较高的负载荷,因子 1 和 2 主要反映了道路径流中 N 和溶解性金属的污染情况. 有研究表明,大气干湿沉降对金属污染负荷的贡献占到 57% ~ 100%[27],同时干湿沉降也会对径流中的 N 有一定贡献,干、湿沉降中氮沉降通量能够达到$(20.6 \pm 11.2)\,kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$和$(19.3 \pm 9.2)\,kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$[28]. 此外,由于本实验的采样点大部分都设置在道路边缘的雨水篦子处,因此机动车尾气排放也可能是径流污染中 N 的一个主要来源. 机动车在行驶过程中会产生大量含有 NO_x 的尾气,这部分污染物能够进一步通过干湿沉降进入地表,最终随着雨水进入径流中产生污染[29]. 因子 3 上 COD 和 TP 有较高的正载荷,Cu 有较高的负载荷. 因子 4 的特点表现为在 SS 上有较高的正载荷,在石油类上有较高的负载荷. 因子 3 和因子 4 主要反映了道路径流中有机物、P、Cu 和 SS 的污染状况[30]. 有研究指出,SS 主要来源于轮胎的磨损、路面材料的磨损,这部分污染物会成为重金属及其他有机污染物的载体[31,32].

表 3 径流污染物相关性分析1)

Table 3 Spearman coefficients from correlation analysis of runoff pollutants

	pH	COD	NH_4^+-N	TN	TP	SS	表面活性剂	挥发酚	石油类	Cr^{6+}	Cu	Zn	As	粪大肠杆菌
pH	1													
COD	0	1												
NH_4^+-N	−0.255	0.391	1											
TN	−0.155	0.733 *	0.624 *	1										
TP	−0.005	0.843 **	0.169	0.594	1									
SS	−0.227	0.591	0.609	0.446	0.487	1								
表面活性剂	−0.055	0.373	0.555	0.542	0.314	0.027	1							
挥发酚	−0.53	0.498	0.822 **	0.602	0.229	0.447	0.648 *	1						
石油类	−0.255	−0.291	−0.2	−0.087	−0.169	−0.618 *	−0.045	−0.05	1					
Cr^{6+}	−0.201	0.635 *	0.548	0.492	0.334	0.648 *	0.397	0.573	−0.438	1				
Cu	0.153	−0.354	−0.079	−0.46	−0.677 *	−0.217	−0.364	−0.154	0.148	0.117	1			
Zn	0.326	0.275	−0.079	0.07	−0.168	−0.103	0.056	0.066	−0.182	0.457	0.591	1		
As	−0.036	0.791 **	0.636 *	0.642 *	0.606 *	0.355	0.682 *	0.731 *	−0.045	0.493	−0.217	0.187	1	
粪大肠杆菌	−0.661 *	−0.109	0.132	0.084	0.137	0.159	−0.05	0.284	0.337	−0.256	−0.498	−0.715 *	−0.105	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

表 4 地表径流污染物因子分析结果

Table 4 Results of factor analysis of runoff pollutants

指标	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
pH	−0.33	0.64	0.17	−0.05
COD	0.44	0.23	0.52	0.26
NH_4^+-N	0.74	−0.21	−0.12	0.2
TN	0.62	−0.03	0.37	0.04
TP	0.12	−0.02	0.86	0.18
SS	−0.03	−0.35	0.14	1.14
表面活性剂	0.77	0.09	0.17	−0.32
挥发酚	1.03	−0.28	−0.19	−0.02
石油类	0.17	−0.19	−0.1	−0.63
Cr^{6+}	0.53	0.2	−0.13	0.46
Cu	0.02	0.42	−0.83	0.02
Zn	0.26	0.76	−0.35	0
As	0.83	0.19	0.28	−0.13
粪大肠杆菌	0.04	−0.95	0.17	−0.03
方差贡献/%	29	17	17	16

2.3 地表径流污染物空间聚类分析

以地表径流水质中的污染物 SS、COD、NH_4^+-N、TN、TP、粪大肠杆菌、pH、阴离子表面活性剂、石油类、挥发酚、Cr^{6+}、Cu、Zn 和 As 为基础,对 14 个采样点的污染特征进行聚类分析. 结果如图 4 所示,大概可将采样点分为 4 类. 因为采样点地面情况复杂,兼有各种用地类型的特征,导致污染物的特点相互重叠,分类结果不理想. 第一类包括 3 号和 10 点,具体位置为和平路国际饭店门前、辛庄道和瑞丰道区域. 这两个点属于商业服务区,含有较高的有机污染物,同时一些金属类污染物较高. 第二类只含有 8 号点的益民道区域, 8 号点属于居民住宅区,附近还有一些建材厂、废旧车回收厂和面粉厂等,有机物、N、P 和一些金属类污染物质量浓度(比如 Zn)相对较高. 第三类包括 1、4、6、

7 和 13 号区域，这 5 个采样点都设置在城区内的较大的主干道上，相对污染物程度较低．第四类包括 2、5、9、11、12 和 14 号区域，这 6 个采样点主要是社区间的小型道路，这部分区域金属类污染物较低，其他污染物的分布范围很广，这部分地区的降雨径流污染受积累污染物的影响很大，多取决于土地利用类型、人流量和地表卫生管理水平等多种因素影响，因此径流水质变化复杂[33]．

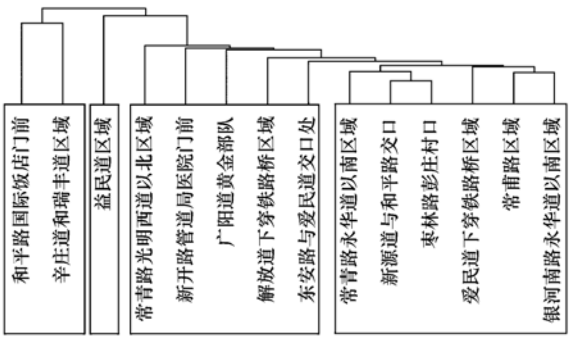

图 4　地表径流采样点聚类

Fig. 4　Cluster diagram of sampling sites

3　结论

（1）廊坊市降雨径流中各种污染物在时空分布特征中呈现出时间和空间上的多样性，污染物在不同时间和地点的变化非常大．

（2）廊坊市区降雨径流整体污染较为严重，尤其体现在 COD、N 和 P 污染，三者的平均质量浓度都超过地表Ⅴ类水标准．

（3）NH_4^+-N与 TN、挥发酚和 As 有较高的正相关，COD 与 TN、TP、Cr^{6+} 和 As 有一定的正相关，而粪大肠杆菌与 Zn 和 Cu 呈现一定的负相关．SS 可能会成为重金属及其他有机污染物的载体．

（4）工厂附近的采样点径流污染中有机物、N、P 和一些金属类污染物质量浓度较高，城区内较大的主干道上的径流中污染物质量浓度相对较低．社区间的道路上的污染物变化比较复杂，分布范围较广．

参考文献：

[1] 曾思育，董欣，刘毅．城市降雨径流污染控制技术［M］．北京：中国建筑工业出版社，2016．

[2] 房金秀，谢文霞，朱玉玺，等．合流制面源污染传输过程与污染源解析［J］．环境科学，2019，**40**(6)：2705-2714．
Fang J X, Xie W X, Zhu Y X, *et al*. Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in combined sewer systems[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2705-2714.

[3] Peter K T, Hou F, Tian Z Y, *et al*. More than a first flush: urban creek storm hydrographs demonstrate broad contaminant pollutographs[J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(10): 6152-6165.

[4] 查慧铭，朱梦圆，朱广伟，等．太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析［J］．环境科学，2018，**39**(3)：1102-1112．
Zha H M, Zhu M Y, Zhu G W, *et al*. Seasonal difference in water quality between lake and inflow/outflow rivers of Lake Taihu, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1102-1112.

[5] Perera T, McGree J, Egodawatta P, *et al*. Taxonomy of influential factors for predicting pollutant first flush in urban stormwater runoff[J]. Water Research, 2019, **166**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115075.

[6] Xu J, Jin G Q, Tang H W, *et al*. Response of water quality to land use and sewage outfalls in different seasons[J]. Science of the Total Environment, 2019, **696**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134014.

[7] 高斌，许有鹏，陆苗，等．高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算［J］．环境科学，2020，**41**(8)：3657-3664．
Gao B, Xu Y P, Lu M, *et al*. Analysis of rainfall runoff pollution and pollution load estimation for urban communities in a highly urbanized region[J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3657-3664.

[8] Okaikue-Woodi F E K, Cherukumilli K, Ray J R. A critical review of contaminant removal by conventional and emerging media for urban stormwater treatment in the united states[J]. Water Research, 2020, **187**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116434.

[9] Luthy R G, Sharvelle S, Dillon P. Urban stormwater to enhance water supply[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(10): 5534-5542.

[10] Zeng J J, Huang G R, Luo H W, *et al*. First flush of non-point source pollution and hydrological effects of LID in a Guangzhou community[J]. Scientific Reports, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-50467-8.

[11] Todeschini S, Manenti S, Creaco E. Testing an innovative first flush identification methodology against field data from an Italian catchment[J]. Journal of Environmental Management, 2019, **246**: 418-425.

[12] Perera T, McGree J, Egodawatta P, *et al*. A bayesian approach to model the trends and variability in urban stormwater quality associated with catchment and hydrologic parameters[J]. Water Research, 2021, **197**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117076.

[13] Wang Z B, Qi F, Liu L Y, *et al*. How do urban rainfall-runoff pollution control technologies develop in China? A systematic review based on bibliometric analysis and literature summary[J]. Science of the Total Environment, 2021, **789**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148045.

[14] 武俊良，任玉芬，王雪梅，等．城市道路径流的排污特征［J］．环境科学，2015，**36**(10)：3691-3696．
Wu J L, Ren Y F, Wang X M, *et al*. Characterization of pollutant wash-off in the urban stormwater[J]. Environmental Science, 2015, **36**(10): 3691-3696.

[15] Jia H F, Wang Z, Zhen X Y, *et al*. China's sponge city construction: a discussion on technical approaches[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017, **11**(4), doi: 10.1007/S11783-017-0984-9.

[16] Liang Y, Wei D Y, Hu J S, *et al*. Glyphosate and nutrients removal from simulated agricultural runoff in a pilot pyrrhotite constructed wetland[J]. Water Research, 2020, **168**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115154.

[17] 曾思育，董欣．城市降雨径流污染控制技术的发展与实践［J］．给水排水，2015，(10)：1-3．

[18] Järlskog I, Strömvall A M, Magnusson K, *et al*. Traffic-related

microplastic particles, metals, and organic pollutants in an urban area under reconstruction[J]. Science of the Total Environment, 2021, **774**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145503.

[19] 白冬锐, 张涛, 陈坦, 等. 苏州古城区域河道碳氮磷类污染物的分布特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1403-1415.
Bai D R, Zhang T, Chen T, *et al*. Distribution characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus bearing pollutants in the ancient town rivers of Suzhou[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1403-1415.

[20] 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 等. 基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4936-4947.
Sun H Y, Wei X F, Jia F C, *et al*. Source of groundwater nitrate in Luanping basin based on multi-environment media nitrogen cycle and isotopes[J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4936-4947.

[21] You Z Y, Zhang L, Pan S Y, *et al*. Performance evaluation of modified bioretention systems with alkaline solid wastes for enhanced nutrient removal from stormwater runoff[J]. Water Research, 2019, **161**: 61-73.

[22] 聂云汉, 陈浩, 李磊, 等. 城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2272-2280.
Nie Y H, Chen H, Li L, *et al*. Molecular chemo-diversity of the dissolved organic matter occurring in urban stormwater runoff[J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2272-2280.

[23] 郭文景, 张志勇, 闻学政, 等. 长江下游居民区降水地表径流的污染特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3304-3315.
Guo W J, Zhang Z Y, Wen X Z, *et al*. Contamination characteristics of surface runoff in densely populated areas in downstream Yangtze River, China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3304-3315.

[24] 李曼, 曲直, 刘佩勇, 等. 基于人工降雨的北方城市道路径流污染特征研究[J]. 中国给水排水, 2020, **36**(21): 110-114.

[25] Hu D X, Zhang C, Ma B, *et al*. The characteristics of rainfall runoff pollution and its driving factors in northwest semiarid region of china-a case study of Xi'an[J]. Science of the Total Environment, 2020, **726**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138384.

[26] Ochoa-Herrera V, León G, Banihani Q, *et al*. Toxicity of copper (Ⅱ) ions to microorganisms in biological wastewater treatment systems[J]. Science of the Total Environment, 2011, **412-413**: 380-385.

[27] 陈莹, 王昭, 吴亚刚, 等. 降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2828-2835.
Chen Y, Wang Z, Wu Y G, *et al*. Impacts of rainfall characteristics and occurrence of pollutant on effluent characteristics of road runoff pollution [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2828-2835.

[28] Liu L, Zhang X Y, Zhang Y, *et al*. Dry particulate nitrate deposition in China[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(10): 5572-5581.

[29] 王人洁, 王堃, 张帆, 等. 中国国道和省道机动车尾气排放特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3553-3560.
Wang R J, Wang K, Zhang F, *et al*. Emission characteristics of vehicles from national roads and provincial roads in China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3553-3560.

[30] 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 等. 宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3275-3284.
Xu Y J, Gong Y M, Bi J P, *et al*. Analysis of rainwater runoff pollution characteristics of various typical underlying surfaces in Ningbo[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3275-3284.

[31] Qiao P W, Lei M, Yang S C, *et al*. Development of a model to simulate soil heavy metals lateral migration quantity based on SWAT in Huanjiang watershed, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, **77**: 115-129.

[32] Jayarathne A, Wijesiri B, Egodawatta P, *et al*. Role of adsorption behavior on metal build-up in urban road dust[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, **83**: 85-95.

[33] 杨志豪, 何明靖, 杨婷, 等. 有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5135-5141.
Yang Z H, He M J, Yang T, *et al*. Occurrence and distribution of the organophosphate esters in soils of mixed-land use area in Chongqing city[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5135-5141.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 2

Feb. 15, 2022

CONTENTS