

# 北方典型城市地区水质评价及污染源分析

徐袞檬<sup>1,2</sup>, 潘兴瑶<sup>1</sup>, 苏遥<sup>2</sup>, 鞠琴<sup>2</sup>, 张宇航<sup>1,2</sup>, 张猛<sup>3</sup>

(1.北京市水科学技术研究院 北京市非常规水资源开发利用与节水工程技术研究中心,北京 100048;  
2.河海大学 水文水资源学院,江苏 南京 210098; 3.北京市北运河管理处,北京 101100)

**摘要:**近年来伴随着城市化的快速发展,城市地区水质污染情况愈加严重。为有效诊断北方典型城市地区的水质问题并提出适用于北方城市地区的水质污染治理对策,采用单指标评价法、综合污染指数法及模糊数学法研究分析了北京市丰台区河流地表水及地下水水质类别、超标情况及空间分布特征,结果表明:整体地表水水质属于重度污染,主要污染河流集中在中东部已建区,水质类别均为劣V类,超标水质指标主要为NH<sub>3</sub>-N、COD、COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>及TP等有机污染因子;地下水超标水质指标主要有总硬度、细菌总数、硝酸盐氮、总大肠杆菌群、溶解性固体及硫酸盐,研究区东部建成区主要为总硬度、硝酸盐氮及溶解性总固体,西部山区和农村地区主要为细菌总数及总大肠杆菌群。由现状评价结果可得,地表水与地下水水质污染指标化学成分具有一定相关性,研究区污染源主要为工业、生活废水点源污染及降雨径流面源污染,对此提出了将海绵设施对污染物的削减、净化作用应用到地表水及地下水水质污染治理方面的新思路。

**关键词:**水质评价;污染源分析;地表水;地下水;单指标评价法;综合污染指数法;模糊数学法;北方城市  
中图分类号:X824;X52 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2019)03-0078-07

## Water quality assessment and pollution source analysis of typical urban areas in northern China

XU Jiameng<sup>1,2</sup>, PAN Xingyao<sup>1,3</sup>, SU Yao<sup>1</sup>, JU Qin<sup>2</sup>, ZHANG Yuhang<sup>1,2</sup>, ZHANG Meng<sup>3</sup>

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing Unconventional Water Resources Development and Utilization and Water Saving Engineering Technology Research Center, Beijing 100048, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Beijing Beiyun River Management Division, Beijing 101100, China)

**Abstract:** Under the background of rapid urbanization, the pollution of water quality of urban areas is becoming more and more serious. In order to effectively diagnose the current situation of water quality in typical urban areas of northern China, this research puts forward universal countermeasures for water pollution control. The single-index evaluation method, comprehensive pollution index and fuzzy mathematics method were adopted. The results showed that the overall surface water quality is heavily polluted, and the main polluted rivers are concentrated in the built areas of central and eastern region. The water quality categories are inferior V and the main organic pollution factors are NH<sub>3</sub>-N, COD, COD<sub>Mn</sub>, BOD<sub>5</sub> and TP. Groundwater quality indicators are mainly total hardness, total bacteria, nitrate nitrogen, total coliform bacteria, soluble solids and sulphate. In the eastern part of the research area, total hardness, nitrate nitrogen and total soluble solids are the main indicators. In the western mountainous and rural areas, total bacteria and total coliform bacteria are the main indicators. Based on the results of current situation evaluation, the chemical composition of pollution indicators of surface water and groundwater are correlated. The main sources of pollution are point source pollution of industrial and domestic wastewater, non-point source pollution of urban and rural rainfall runoff. This paper proposes a new idea to apply the re-

收稿日期:2018-10-25; 修回日期:2019-01-14

基金项目:国家水专项课题“北京市海绵城市建设关键技术与管理机制研究与示范”(2017ZX07103-002);北京市科技新星计划(Z161100004916085)

作者简介:徐袞檬(1994-),女,山东烟台人,硕士研究生,研究方向为水文水资源。

通讯作者:潘兴瑶(1980-),男,河北威县人,博士,教授级高级工程师,研究方向为防洪减灾与海绵城市。

duction and purification of non-point source pollution by sponge facilities to the treatment of water pollution in rivers and groundwater.

**Key words:** water quality evaluation; pollution source analysis; surface water; groundwater; single index evaluation method; comprehensive pollution index method; fuzzy mathematics method; northern city

## 1 研究背景

近年来,城市化、工业化进程不断加快,水体污染形势愈加严峻,地表水及地下水水质污染情况也发生了较大改变<sup>[1-5]</sup>,对现状水质的有效评价将为水环境污染的问题诊断、科学治理提供数据基础及理论上的借鉴<sup>[6-8]</sup>。

2012年左锐等<sup>[9]</sup>采用因子分析法,利用因子得分进行多元线性回归,实现对金积水源地可能的地下水污染源的识别;2016年谷天雪等<sup>[10]</sup>运用Piper图分析地下水化学特征,采用单因子指数法评价污染现状,并采用因子分析法及克吕格空间插值等方法解析污染源空间分布特征;2017年徐庆勇等<sup>[11]</sup>采用地下水水质综合质量评价方法,评价了北京市北运河流域平原地区地下水水质,分析了其空间分布特征、成因及主要影响指标;2018年高玉琴等<sup>[12]</sup>利用提出的正态云-模糊可变速评价耦合模型评价秦淮河流域2016年水环境,并将评价结果与采用单因子指数评价法、模糊综合评价法和云模型评价法进行对比,得到耦合模型的评价精度更高的结论;2018年王彦丽等<sup>[13]</sup>针对辽河水质存在污染严重的问题,采用模糊综合评价和隶属度加权平均处理的方法对其干流2008-2017年10年间的水质状况进行了研究。综观近5年来水质评价方面的国内研究进展,可以发现国内学者对现状水质评价方面的研究,主要集中于对地下水及污染源识别解析方面的研究,研究重点在于研究方法的耦合创新或多种研究方法的对比分析,而对结合同一地区的地表水与地下水综合评价、分析二者之间的污染因子转化迁移关系及针对性的治理对策方面研究较少。因此本研究不对评价方法进行探讨,选取常用的单指标评价法、综合污染指数法、模糊数学法作为地表水及地下水水质评价的主要研究方法<sup>[14]</sup>,研究重点在于对地表水与地下水水质的综合评价,结合二者评价结果,针对性地将海绵城市的理念应用到城市流域水环境的治理,从而得到适用于北方城市流域的有效水环境治理策略。

本研究选取我国北方典型城市区域——北京市丰台区为研究区,基于2016年研究区域7条主要河流的8个地表水代表监测点及17个地下水监测井

的水质指标逐月监测数据,通过计算地表水和地下水超标水质指标的超标率及超标倍数,识别了研究区的地表水和地下水的主要污染因子,从微观和宏观的角度分析了地表水与地下水水质污染因子化学成分的相关关系及超标水质指标含量的空间分布;采用综合污染指数法和模糊数学法对研究区的地表水及地下水的整体水质进行了评价,识别了研究区水体污染的主要污染源。通过以上对水质污染的成因分析,从点源污染控制及面源污染治理两个方面提出针对性的水质治理对策。

## 2 研究区概况

本研究选取北京市丰台区作为北方城市地区的典型代表城市,丰台区位于北京城区西南部,面积305.9 km<sup>2</sup>,其中山区面积60.0 km<sup>2</sup>,平原区面积245.9 km<sup>2</sup>,平原区占总面积的80.4%。研究区内共有43条河道,总长度约203.5 km,分属于大清河、永定河、北运河水系。2016年研究区年平均降雨量为623.4 mm,汛期(6-9月)月平均降雨量为137.0 mm,非汛期月平均降雨量为15.9 mm,多年平均水面蒸发量为888.4 mm,地表水资源量为3797.8 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

依据城市功能特性,以中部永定河为界将研究区划分为东、西地区两个典型代表区域,东部区域主要为已建区,面积179.9 km<sup>2</sup>,西部地区多为郊区、农村及生态山地区,面积126.0 km<sup>2</sup>,较大的城市功能区跨度使其具有典型的北方城市地区的代表特征。本研究选取研究区内7条河道8个河流水质监测点监测数据进行现状地表水水质评价,选取17眼地下水水质长期监测井的监测数据进行地下水水质评价。研究区地理位置、地形、主要河道分布及地表水、地下水水质监测点位置见图1。

## 3 地表水现状水质评价

依据水资源综合规划技术细则的要求,本研究评价了地表水现状水质评价必评及选评项目共15项:溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、挥发酚(AR-OH)、总砷(As)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氟化物(F<sup>-</sup>)、总氰化物(CN<sup>-</sup>)、

总汞(Hg)、总铜(Cu)、总铅(Pb)、总锌(Zn)、总镉(Cd)、六价铬(Cr<sup>6+</sup>)以及石油类(OIL)。

### 3.1 河流整体水质类别及超标情况

河流整体水质类别评价选取汛期(6-9月)、非汛期和年度平均3个评价代表值,依据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)进行评价。依据地表水水域环境功能和保护目标,评价结果以河流水功能区(一般景

观水域)确定的地表水标准值类别V类为标准,计算超标倍数。评价结果表明:莲花河、新开渠、凉水河上段(大红门闸上)为IV类水质,凉水河上段(i测点)水质为V类水质,而马草河、新丰草河、小龙河及九子河均为劣V类水质,主要超标项目为NH<sub>3</sub>-N、COD、COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>及TP 5项,其中氨氮超标倍数最大,最大倍数达到了20.8倍(见表1)。

表1 研究区现状地表水水质类别评价

水系	河系	测点名称	水质评价结果			超标项目	超标备注
			全年	汛期	非汛期		
北运河水系	凉水河上段	i	V	IV	>V		
北运河水系	凉水河上段	m	IV	IV	IV		
北运河水系	莲花河	f	IV	IV	IV		
北运河水系	新开渠	h	IV	IV	IV		
北运河水系	马草河	k	>V	>V	>V	氨氮	氨氮2.5倍
北运河水系	新丰草河	g	>V	>V	>V	COD、COD <sub>Mn</sub> 、BOD <sub>5</sub> 、氨氮、总磷	COD4.9倍, COD <sub>Mn</sub> 1.9倍, BOD <sub>5</sub> 6.3倍, 氨氮20.8倍, 总磷9.4倍
北运河水系	小龙河	l	>V	>V	>V	COD、BOD <sub>5</sub> 、氨氮、总磷	COD1.7倍, BOD <sub>5</sub> 2.1倍, 氨氮5.7倍, 总磷2.2倍
大清河水系	九子河	a	>V	>V	>V	COD、COD <sub>Mn</sub> 、BOD <sub>5</sub> 、氨氮、总磷	COD6.2倍, COD <sub>Mn</sub> 1.8倍, BOD <sub>5</sub> 7.8倍, 氨氮20.6倍, 总磷10.1倍

由于河流水质受径流变化的影响较大<sup>[15]</sup>,因此地表水汛期和非汛期的水质情况具有一定的差异性。凉水河上段(i测点)汛期水质为IV类,非汛期为劣V类,此结果表明汛期降水的增多使得河流中污染因子浓度得以稀释,整体水质状况相对于非汛期有所改善。但除i测点以外的其他7个测点,汛期和非汛期的水质类别并无明显变化,这可能是由于研究区目前已经具有较高的城市化水平,下垫面的硬化程度较高,汛期河道污染物主要来自降雨径流冲刷的城市面源污染<sup>[8]</sup>。

### 3.2 河流地表水水质综合评价

采用综合污染指数法计算研究区各河流地表水综合污染指数(见表2),评价结果表明研究区各代表断面总体水环境状况较差,莲花河、新开渠河流水质较好,凉水河、马草河分别有轻度污染或中度污染,而新丰草河、小龙河及九子河污染极为严重,其中九子河污染指数达到了8.18,需重点加强其流域范围内的污染治理。

## 4 地下水现状水质评价

基于单指标评价法及模糊数学法进行地下水水

质评价,评价指标选取与地下水污染特征密切相关的色度、嗅味、浑浊度、PH值、总硬度、溶解性固体、硫酸盐、氯化物、铁、锰、铜、锌、酚类、阴离子合成洗涤剂、高锰酸钾指数、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、氨氮、氟化物、氰化物、汞、砷、镉、六价铬、铅、细菌总数、总大肠杆菌群共27项进行了水质评价。

表2 研究区河流地表水水质综合评价结果

河流	综合污染指数	污染级别
凉水河	0.51	轻污染
莲花河	0.35	尚清洁
新开渠	0.38	尚清洁
马草河	0.88	中污染
新丰草河	7.65	严重污染
小龙河	2.15	严重污染
九子河	8.18	严重污染

### 4.1 地下水水质指标超标情况

根据2016年研究区17眼监测井监测结果年平均值,以《地下水质量分类指标》(GB/T1484-2017)Ⅲ类水标准值为基准进行评价,地下水水质

超标指标有6项,即总硬度(以CaCO<sub>3</sub>计)、细菌总数、硝酸盐氮、总大肠杆菌群、溶解性固体及硫酸盐。结果表明:超标最严重的水质指标为总硬度,17眼井中有14眼井超标,超标率为82.35%;细菌总数和总大肠杆菌群污染等级在Ⅲ级以上的均为12处,超标率为70.59%;硝酸盐氮的超标情况与总硬度空间分布大概一致,溶解性固体及硫酸盐也有不同程度的超标,此外,其他水质指标均未出现超过Ⅲ类水的情况,但整体水质评价仍为Ⅴ类水。

#### 4.2 地下水整体水质类别评价

采用模糊数学评价法进行地下水水质类别评价(见表3),模糊数学评价法考虑到了每个污染因子的污染权重与隶属情况,所得到的水质评价结果能够较为综合地反映其水质情况,其中测点F、O、H、I、M、J、P的模糊数学水质整体评价结果均已超标,研究区整体的水质评价结果仍为Ⅴ类水,可见污染十分严重,需采取有力措施改善区内地下水水质。

表3 研究区现状地下水整体水质类别评价结果

区域	编号	测点	最高类别	模糊数学评价	整体水质
东部地区	1	L	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ
	2	F	Ⅴ	Ⅴ	
	3	K	Ⅲ	Ⅲ	
	4	N	Ⅳ	Ⅲ	
	5	O	Ⅴ	Ⅴ	
	6	Q	Ⅲ	Ⅰ	
	7	G	Ⅴ	Ⅲ	
	8	H	Ⅴ	Ⅴ	
	9	I	Ⅴ	Ⅴ	
	10	M	Ⅳ	Ⅴ	
西部地区	11	J	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ
	12	P	Ⅴ	Ⅴ	
	13	E	Ⅴ	Ⅲ	
	14	A	Ⅴ	Ⅲ	
	15	C	Ⅳ	Ⅲ	
	16	D	Ⅳ	Ⅰ	
	17	B	Ⅴ	Ⅱ	

#### 4.3 地下水超标水质指标含量空间分布

根据《地下水质量分类指标》(GB/T1484-2017),将超标水质指标分为5个等级指标,绘制研究区现状地下水超标水质指标含量分布图(见图2),以直观反映地下水污染空间分布情况。

由图2可得,总硬度、硝酸盐氮及溶解性总固体的超标地下水主要分布在研究区东南部的P测点、O测点及北部的I测点,东、西地区3项水质指标具

有明显的差异性,东部地区地下水污染情况明显高于西部地区;对于细菌总数和总大肠杆菌群,超标地下水主要分布在西部地区,农业面源污染对其地下水污染具有较大的影响;对于硫酸盐,研究区大部分区域已达标,但I测点周围地下水状况为Ⅴ类水,其周围分布有污水排放口,可推测污染来源主要为工业废水点源污染。

#### 4.4 地表水与地下水水质污染关系分析

地下水的补给主要源于大气降水、地表水体,因此地表水水质污染会严重影响地下水水质<sup>[16]</sup>。地表水中除了莲花河、新开渠等河流水质稍好以外,其他河流水质污染均非常严重,未经处理的工业废水和生活污水直排入河,地表水对地下水的补给会间接地污染地下水,由评价结果可知,地表水质较差的河流对应的地下水水质也极差,因此可知研究区地表水与地下水的污染因子化学成分具有一定的相关关系。

### 5 水质污染成因分析及对策

#### 5.1 水质污染成因分析

从超标污染因子化学成分角度分析,研究区地表水超标污染因子主要为NH<sub>3</sub>-N、COD、COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>及TP 5项,经调查,研究区工业和生活废水的主要成份为COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP和TN,可见地表水超标水质指标污染来源主要为未经处理的工业及生活废水点源污染。此外,据统计数据可得,2016年研究区化肥施用量为294.2 t,其中氮肥为112.2 t,氮肥、磷肥等化肥的过量使用可通过地表径流和土壤侵蚀汇入水体中<sup>[17-19]</sup>,导致NH<sub>3</sub>-N、TP等化学元素的严重超标,受纳水体有机物、微生物增多,从而导致COD、COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>超标严重。地下水超标污染因子主要为总硬度、细菌总数、硝酸盐氮、总大肠杆菌群、溶解性固体及硫酸盐6项,对于超标水质指标总硬度、溶解性固体及硫酸盐,超标原因与研究区地质环境有关,在水岩化学作用下使其含量偏大<sup>[20-22]</sup>;而细菌总数、硝酸盐氮及总大肠杆菌群超标的原因可能是相应的地表水体受到点源或面源污染,含磷含氮有机污水对浅层地下水水质影响程度较高,地表水在补给地下水的同时会将污染因子迁移到地下水中;其次,农村及城市降雨径流面源污染也会在降雨入渗补给的同时携带污染物进入地下水体中<sup>[23-25]</sup>。

从超标水质指标空间分布角度分析,地表水超标水质指标主要集中在马草河、小龙河、新丰草河、九子河。图3为研究区主要污水排放口位置分布

图,由图3可知,除新丰草河外,其他3处河流排污口分布均较为集中,说明未经处理的工业及生活污水点源污染对水质影响较为严重,而新丰草河所在位置城市化程度较高,因此可推测污染源主要为城市降雨径流对下垫面污染物的冲刷。地下水受影响较为严重的河流主要有马草河、九子河、牯牛河、佃

起河、新丰草河、小清河、造玉沟;其中马草河、九子河、新丰草河地表水污染也较为严重,地下水污染主要来自地表水补给的污染物迁移。此外,由图3可知,其他4处河流分布有密集的排污口,点源污染为地下水主要污染源。

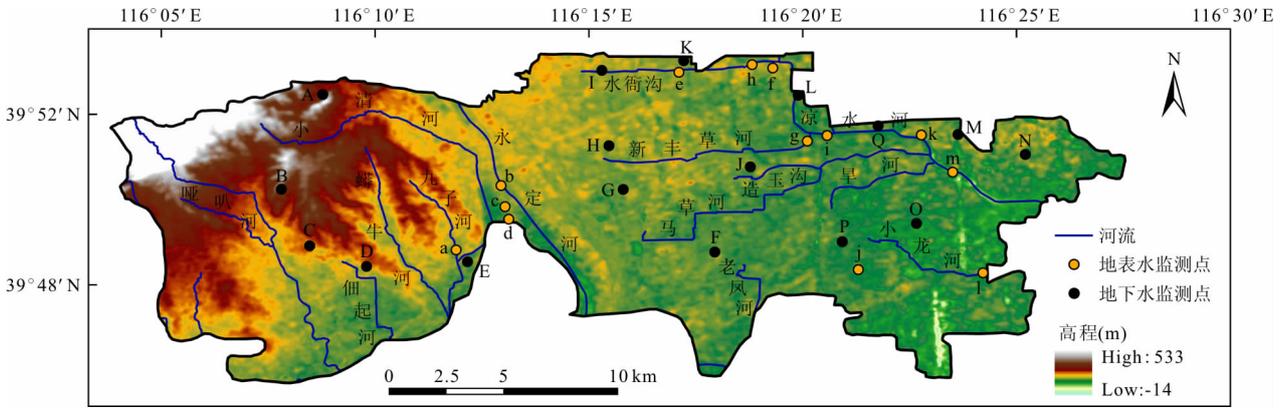


图1 研究区地理位置、地形图及水质监测点位置图

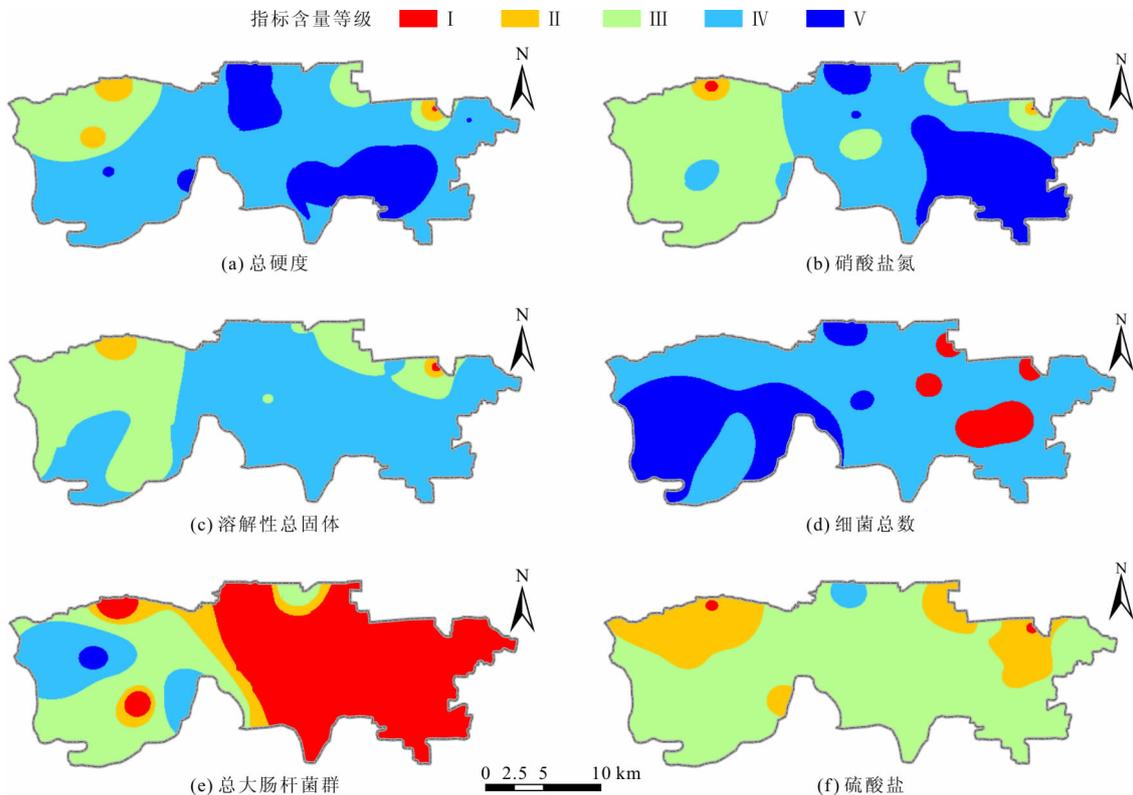


图2 研究区现状地下水超标水质指标含量分布图

根据调查可知,研究区东部建成区全部河道均采取了截污措施,但雨污合流问题仍十分突出,在超标降雨情景下,合流制溢流污水直排入河,对受纳水体水质造成了严重污染。农村地区基础设施建设滞后,市政污水管网不健全,大部分污水直接入河,河

道内水质均为劣V类。哑叭河、九子河、牯牛河、佃起河流域目前基本无污水系统,雨水及部分生活、工业污水全部直排入河,河道水质严重恶化。

5.2 对策

城市地区应新建或扩建污水处理厂,通过对污

水处理厂的升级改造确保污水处理水质的达标,提升整体污水处理能力;对于农村地区,需配合河道截污,新建污水处理站,也可就近纳入城镇污水管网。完善城市污水收集管网,增加污水收集能力,对雨污合流口开展截流式合流制改造,在经济和空间条件允许情况下,可进行雨污分流改造。建设再生水管网,加大再生水利用量,增加河道环境用水,扩大园林绿化、道路浇洒等市政杂用利用量。对地表污染源及地下水污染物扩散较严重区域采取防范措施。建议今后海绵城市建设过程中,将LID措施的生态功能与浅层点源污染控制相结合<sup>[26-28]</sup>。

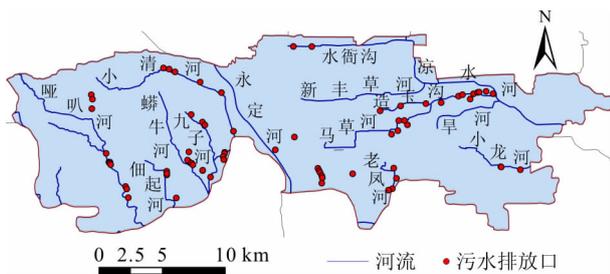


图3 研究区主要污水排放口位置分布图

全面治理面源污染的建议如下:(1)城市降雨径流面源污染。解决城市降雨径流面源污染最有效的措施是进行低影响开发改造处理。在进行LID改造之前,需计算河流的污染物容量,对于超出接纳水体污染容量的降雨径流,则需进行径流污染的源头LID改造<sup>[29]</sup>。在降雨径流进入市政排水管网前对其进行污染物的削减和处理,常用的海绵措施包括绿色屋顶、雨水罐和生物滞留池等。此外,在市政排水管网中雨水或雨污合流污水排入接纳水体之前,可进行末端处理的工程性措施改造,如滞留池、雨水湿地、滨水植被缓冲区以及雨污合流制排水系统中的就地调蓄池及截污设施等。除工程性措施以外,非工程性措施的有效实施也有利于改善城市面源污染,如保持街道清洁、加强城市固体废物管理、城市绿化中控制肥料和杀虫剂的使用以及完善相应的法律法规等。(2)农村面源污染。减少农业化肥的使用,保护好农村地区现有的森林、绿地、湿地等能够对污染物进行稀释、降解的自然区域。

## 6 结论与讨论

(1)研究基于北京市丰台区2016年水质指标逐月监测数据,分析北方典型城市地区的地表水及地下水水质污染现状情况及污染成因。通过评价分析各监测河流地表水整体水质类别及超标情况可

得,研究区8个河流监测点有一半监测河流整体水质为劣V类水质,主要超标项目为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{COD}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 及TP5项,其中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标倍数最大,达到20.8倍;研究区地下水单指标评价结果表明超标最严重的污染因子为总硬度,超标率为82.35%,地下水整体水质类别为V类水。针对评价结果,提出了应用“海绵城市”理念的适用于北方城市地区水环境治理的新思路。

(2)本研究的重点在于通过对研究区整体水质进行评价后,针对评价结果将“海绵城市”理念应用到城市流域的水环境治理上,因此只采用常规方法进行评价,未进行深入探讨。而综合指数法、模糊数学法均采用超标赋权法计算权重,模糊性、随机性及最大隶属度不严谨的特点往往导致评价结果与实际有所偏差,建议今后采用多方法耦合或改进的研究方法,综合各评价方法的优点,以得到更精确的评价结果。

## 参考文献:

- [1] 刘玲花,吴雷祥,吴佳鹏,等. 国外地表水水质指数评价法综述[J]. 水资源保护,2016,32(1):86-90+96.
- [2] HU Yuanan, CHENG Hefa. Water pollution during China's industrial transition [J]. Environmental Development, 2013,8:57-73.
- [3] YAN Zhenguang, WANG Weili, ZHOU Junli, et al. Screening of high phytotoxicity priority pollutants and their ecological risk assessment in China's surface waters [J]. Chemosphere, 2015, 128:28-35.
- [4] JIANG Yong. China's water scarcity [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(11):3185-3196.
- [5] 徐舒,张璐,付晓,等. 河南泌阳县域地表水质特征及污染控制对策研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(S1):278-284.
- [6] 郭怀成,王金凤,刘永,等. 城市水系功能治理方法及应用[J]. 地理研究, 2006(4):596-605.
- [7] 刘灿. 基于B样条小波的反演方法及地下水污染源识别应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
- [8] 刘博,肖长来,梁秀娟,等. 吉林市城区浅层地下水污染源识别及空间分布[J]. 中国环境科学, 2015, 35(2):457-464.
- [9] 左锐,韦宝玺,王金生,等. 基于多元统计分析的地下水水源地污染源识别[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(6):17-21.
- [10] 谷天雪,卞建民,杨广森,等. 大庆市浅层地下水化学特征及污染源解析[J]. 人民黄河, 2016, 38(7):68-72.
- [11] 徐庆勇,陈忠荣,杨巧凤,等. 北京北运河流域平原区地

- 下水水质空间分布特征[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 61-65+71.
- [12] 高玉琴, 赖丽娟, 姚敏, 等. 基于正态云-模糊可变耦合模型的水环境质量评价[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 1-7.
- [13] 王彦丽, 赵敏宁. 近10年辽河干流水质综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 53-59.
- [14] 于洪涛, 吴泽宁. 灰色关联分析在南水北调中线澧河水水质评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2010(3): 39-41+45.
- [15] 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 等. 漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 359-369.
- [16] 朱世丹, 张飞, 张海威, 等. 新疆艾比湖主要入湖河流同位素及水化学特征的季节变化[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1707-1721.
- [17] CHEN Xiqing, YAN Yixin, FU Renshou, et al. Sediment transport from the Yangtze River, China, into the sea over the Post-Three Gorge Dam Period: A discussion[J]. Quaternary International, 2008, 186(1): 55-64.
- [18] 董维红, 林学钰, 张博, 等. 鄂尔多斯苏里格南区块浅层地下水水化学分布特征及污染源分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 103-108.
- [19] 高彦芳, 沈立成, 杨平恒. 重庆金佛山地下水的氮污染源研究[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(6): 23-26+31.
- [20] 陈亚峰, 杨彪山, 贾志宏, 等. 成都市红层地下水水质特征研究[J]. 地下水, 2017, 39(6): 33-37.
- [21] 王石, 陈丽媛, 孙翔, 等. 从“大截排”到清源和低影响开发——基于水质目标约束的情景模拟与规划[J]. 中国环境科学, 2017, 37(10): 3981-3990.
- [22] 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, 51(10): 1-3.
- [23] 荆红卫, 张志刚, 郭婧. 北京北运河水系水质污染特征及污染源分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(2): 319-327.
- [24] 曹锡军, 张英明, 崔延松, 等. 南通市濠河水环境容量评价和提升措施[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 37-39+27.
- [25] 陈言菲, 李翠梅, 齐国远, 等. 基于GMS的江南某地区浅层地下水溶质迁移规律分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(8): 33-38.
- [26] 汪顺生, 黄天元, 陈豪, 等. 基于CRITIC赋权的模糊综合评判模型在水质评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6): 48-51.
- [27] 崔学慧, 李炳华, 陈鸿汉. 太湖平原城近郊区浅层地下水中多环芳烃污染特征及污染源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 1806-1810.
- [28] 马越, 姬国强, 石战航, 等. 西咸新区沣西新城秦皇大道低影响开发雨水系统改造[J]. 给水排水, 2017, 53(3): 59-67.

(上接第77页)

- [13] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准: GB3838-2002 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 国家技术监督局. 地下水质量标准 GB/T14848-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] 王若师, 许秋瑾, 张娴, 等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3083-3088.
- [16] PAN Huiyun, LU Xinwei, LEI Kai. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: contamination, source apportionment and spatial distribution [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 1361-1369.
- [17] ZHOU Qihong, ZHENG Na, LIU Jingshuang, et al. Residents health risk of Pb, Cd and Cu exposure to street dust based on different particle sizes around zinc smelting plant, Northeast of China [J]. Environmental Geochemistry and health, 2015, 37(2): 207-220.
- [18] 王济, 张一修, 高翔. 城市地表灰尘重金属研究进展及展望[J]. 地理研究, 2012, 31(5): 821-830.