

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 ..... 黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)  
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率 ..... 李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)  
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析 ..... 杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)  
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 ..... 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)  
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布 ..... 李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)  
济南市夏、冬季 PM<sub>2.5</sub> 中化学组分的季节变化特征及来源解析 ..... 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)  
聊城冬季一重污染过程 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及成因分析 ..... 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)  
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量 ..... 王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)  
晋城市冬季空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析 ..... 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)  
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 ..... 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)  
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析 ..... 孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏楨, 王凤 (4060)  
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质 ..... 李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)  
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征 ..... 李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)  
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析 ..... 高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王朕, 滕彦国, 王金生 (4086)  
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 ..... 官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)  
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 ..... 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)  
黄河干流宁夏段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性 ..... 席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若琦, 崔锋 (4114)  
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比 ..... 李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)  
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素 ..... 王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)  
柳江盆地浅层地下水硝态氮水特征和成因分析 ..... 徐进, 何江涛, 彭颖, 曾颖 (4142)  
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性 ..... 张雯, 尹琳, 周念清 (4150)  
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 ..... 张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)  
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算 ..... 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)  
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响 ..... 何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)  
洱河流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响 ..... 李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)  
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应 ..... 聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)  
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响 ..... 储瑜, 何肖微, 曾中, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)  
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程 ..... 汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)  
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征 ..... 胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)  
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征 ..... 花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)  
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较 ..... 赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)  
城市污水管网中不同生化作用的基质流向 ..... 姚翔译, 石炬, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)  
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性 ..... 王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)  
UV 强化草酸络合 Fe<sup>3+</sup> 活化过硫酸盐氧化降解苯胺 ..... 韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)  
焦化废水 A/O<sup>2</sup> 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析 ..... 吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)  
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 ..... 俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)  
NaCl 盐度对 A<sup>2</sup>/O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响 ..... 张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)  
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响 ..... 陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)  
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验 ..... 孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)  
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响 ..... 安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)  
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 ..... 李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)  
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 ..... 宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)  
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 ..... 罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)  
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响 ..... 李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)  
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力 ..... 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)  
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 ..... 周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殿波 (4359)  
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响 ..... 韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)  
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险 ..... 李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)  
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析 ..... 靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小卉, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)  
《环境科学》征订启事 (3986) 《环境科学》征稿简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

# 基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析

高翔<sup>1,2</sup>, 左锐<sup>1,2\*</sup>, 郭学茹<sup>1,2</sup>, 孟利<sup>1,2</sup>, 刘鑫<sup>1,2</sup>, 王宾<sup>3</sup>, 滕彦国<sup>1,2</sup>, 王金生<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875; 3. 环境保护部环境规划院环境风险与损害鉴定研究中心, 北京 100012)

**摘要:** 傍河开采已成为国际公认的新型安全的取水方式. 本文以哈尔滨呼兰水源地为研究对象, 采用地下水污染解析技术对枯丰水期水源地污染源结构和特征进行了刻画, 在此基础上采用污染源-途径-受体模型进行了枯丰两季水源地区域污染风险评价, 综合分析了季节变化条件和人类活动共同作用下对傍河水源地地下水水质安全的影响. 结果表明, 基于源解析的地下水污染源在枯丰季节里表现出不同的空间分布特征, 主要受水源地开采引起的水-岩相互作用、原生地质影响下高  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  污染、人类活动影响下的氮污染和有机污染等共同作用; 污染风险评价结果显示, 在枯丰水期水源地均处于较低风险水平, 其差异性体现在丰水期水源地南部呼兰河沿岸区域水质污染风险较高, 枯水期高风险区主要分布于河岸周边及人类活动密集区, 因此枯水期的人类活动对区域地下水污染风险影响大, 是水源地综合污染管控的重点.

**关键词:** 傍河水源地; 污染风险; 主成分分析; 源解析; 季节性变化

中图分类号: X523; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4086-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201801275

## Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment

GAO Xiang<sup>1,2</sup>, ZUO Rui<sup>1,2\*</sup>, GUO Xue-ru<sup>1,2</sup>, MENG Li<sup>1,2</sup>, LIU Xin<sup>1,2</sup>, WANG Bin<sup>3</sup>, TENG Yan-guo<sup>1,2</sup>, WANG Jin-sheng<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation of Ministry of Education, Beijing 100875, China; 3. Center for Environmental Risk and Damage Assessment, Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Riverbank filtration is internationally accepted as a safe new method for extracting drinking water. This paper describes the structure and characteristics of pollution sources in the Hulan water source area of Harbin during wet and dry seasons, based on groundwater pollution sources apportionment technology. Pollution risk of the water source area was also assessed using the pollution sources-pathway-receptor model. Impacts on water quality safety under the collective effects of seasonal changes and human activities were then analyzed. Results showed that groundwater pollution sources have different spatial distribution characteristics based on pollution source apportionment during wet and dry seasons, with four principal influencing factors: ① water-rock interaction caused by exploitation of water sources, ② natural geological processes resulting from dissolution of iron manganese minerals, and pollution by ③ nitrogen and ④ organics in response to human activities. Pollution risk assessment showed that water sources were at low risk during both wet and dry seasons. However, the south area of the water source area showed high groundwater pollution risk during the wet season, while other high-risk areas were mainly distributed around the riverbanks and densely populated areas during the dry season. These findings indicate that human activities greatly influence groundwater pollution risk during the dry season; accordingly, this season should be the focus of integrated water quality management and control for the water source area.

**Key words:** riverside water source; pollution risk; principal component analysis; source apportionment; seasonal change

随着人口增长、城镇化和工业化进程加快, 过度开采和污染等一系列问题导致地下水环境面临着严峻的问题. 由于开采量得到充分保障, 而且岸滤系统可以起到较好的水质净化作用<sup>[1,2]</sup>, 傍河取水已在世界很多国家都成为首选<sup>[3]</sup>. 而傍河水源地在水质安全方面同样面临地表水、地下水等综合污染的影响, 目前关于傍河水源地的污染途径<sup>[4]</sup>及污染风险<sup>[5,6]</sup>一直是研究的热点.

污染源的确定一直是地下水污染风险评价的难点, 目前通用的污染源解析方法主要有比值法<sup>[7]</sup>、特

征化合物法、指纹谱图法、化学质量平衡模型法<sup>[8]</sup>、多元统计方法、同位素分析法<sup>[9]</sup>等定性或定量方法<sup>[10]</sup>, 而多元统计方法是目前区域污染源解析较为科学的方法之一. 主成分分析 (principal component analysis, PCA) 作为多元统计方法的一种, 是在没有污染源成分组成的先验知识下使用的降维方法, 可

收稿日期: 2018-01-30; 修订日期: 2018-03-16

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2014ZX07201-010); 国家自然科学基金项目 (41672228)

作者简介: 高翔 (1992 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水污染控制与修复, E-mail: gexart@mail.bnu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: zr@bnu.edu.cn

有效用于评价水质变化情况，常被用作有效的工具来对样品进行分类，并确定潜在的污染源<sup>[11, 12]</sup>。

近年来，地下水污染评价更多的关注点在于对技术方法的探讨开发<sup>[13, 14]</sup>，并结合不同尺度的研究区使用不同的评价体系<sup>[15, 16]</sup>，而对于季节变换产生的影响关注较少。我国北方地区地下水资源的时空不均匀性限制了水资源的综合利用。枯丰季节天然条件对地下水水质的影响已经得到广泛的关注<sup>[17, 18]</sup>，而由此引起的伴随着人类生产、生活方式的改变，对地下水环境造成的季节性的污染差异性尚未得到足够的重视<sup>[19, 20]</sup>。

为探究傍河水源地地下水风险季节性变化，本文选取典型傍河水源地枯丰两期采集的数据，运用基于源解析的污染分布结果进行地下水污染风险季节性变化的评价。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

##### 1.1.1 研究区水文地质概况

如图 1 所示，研究区位于哈尔滨市北部呼兰

河北岸呼兰区。地属中温带大陆性季风气候，雨热同期，年平均气温 3.3℃，年降水量均在 400 ~ 600 mm。地势平坦开阔，中西部低洼，东部略高，地面高程 110 ~ 180.5 m，高差 20 ~ 30 m。地下水源比较丰富，含水层平均厚度为 30 m，水位标高 113 m 左右，埋深 3 ~ 5 m，汛期河水补给地下水，造成水位升高，非汛期地下水向河水排泄。

##### 1.1.2 取样点水质评价

样品均采集自研究区范围内浅层地下水，共选取 31 个采样点(图 1)，埋深在 2 ~ 6 m 范围内，分为 8 月丰水期及 11 月枯水期两期进行样品采集。其中大部分采样点来自沿松花江、呼兰河分布的粗砂砾石含水层，并在呼兰河补给水源地的路径上进行了加密采集处理。

根据水化学性质和水文地质条件，选取钾(K<sup>+</sup>)、钠(Na<sup>+</sup>)、钙(Ca<sup>2+</sup>)、镁(Mg<sup>2+</sup>)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)、碳酸氢根(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、氯离子(Cl<sup>-</sup>)、硫酸盐(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)、硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、亚硝酸盐(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)、铁(Fe<sup>3+</sup>)、锰(Mn<sup>2+</sup>)、高锰酸盐指数、总溶解固体(TDS)和总硬度(TH)这 15 个地下水水质指标来分

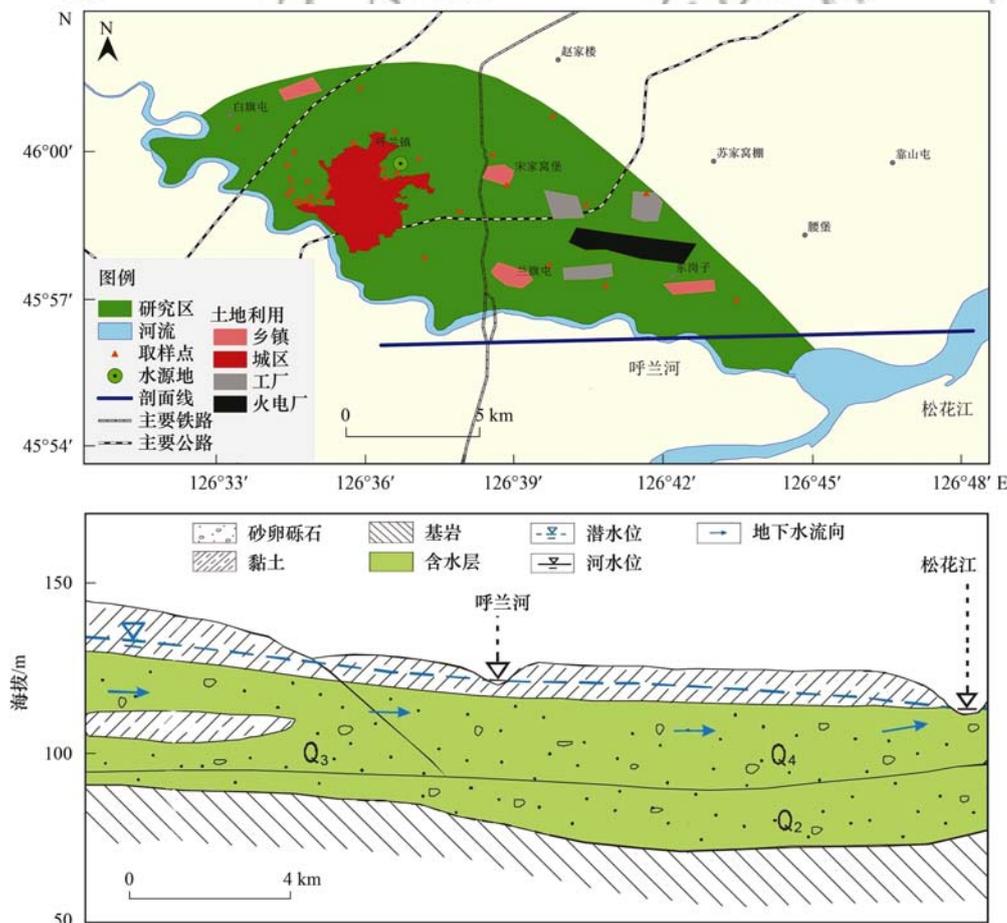


图 1 研究区概况

Fig. 1 General situation of study area

析研究区地下水污染总体状况,表征研究区的整体水质状况.所有样品送北京市理化分析测试中心进行检测.

根据《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中的三类水为标准,列出样品中7个重要水质指标的超标率(图2).可以看出,Fe<sup>3+</sup>、Mn<sup>2+</sup>的超标率明

显高出其他各项指标,除丰水期Fe<sup>3+</sup>的超标率在60%以上,其余均超过80%;结合实地勘察,研究区无铁锰污染工业<sup>[21]</sup>,推测为原生地质条件造成.NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>在部分点位的超标,则一般与人类活动相关.总体来看,枯水期整体的水质情况要明显劣于丰水期.

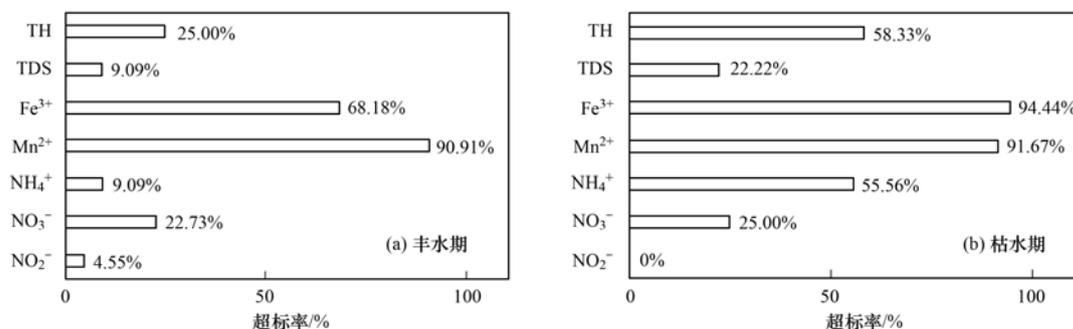


图2 样品水质超标率

Fig. 2 Percentage of water quality exceeding the standard

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 主成分分析法

PCA 依赖于正交变换转换一组相关的被称为主成分的变量的观测值,通过提取线性组合中方差最大者作为较少有代表性的公因子,来说明众多变量所提取的主要信息.将其应用于地下水质的污染源识别以及空间分布规律,可以提取水质指标,即变量观测值的数学特征,以较少的几个公因子来反映原有资料的大部分信息,从而找出影响研究区地下水质的主要因子及其对应的污染源.

### 1.2.2 风险评价方法

地下水污染风险评价采用污染源-途径-受体控制模型,结合地下水污染源、污染途径以及污染受体分析地下水污染风险.主要包括4个步骤:①将影响地下水水质的主要污染因子,即源解析结果分配以合适的权重并进行叠加,作为区域的主要识别污染源;②采用 DRASTIC 模型<sup>[22]</sup>分析区域地下水的内在脆弱性,表征地下水受到污染的主要途径;③地下水本体水质及水源保护区划作为地下水污染风险评估的受体<sup>[23]</sup>,确定地下水价值的空间分布;④将前3个步骤的结果耦合叠加后得出最终评价结果.

本研究中涉及到的统计分析及主成分分析,采用 EXCEL 2016 及 SPSS 20 软件完成.空间分布及叠加均采用 ArcGIS 10.2 软件完成并绘图.

## 2 结果与讨论

### 2.1 研究区污染源解析

首先对枯丰两期31个点位15项指标进行R型

因子分析,通过KMO和Bartlett球形检验对变量间的相关程度进行检验.其中枯丰两期的KMO测度均大于0.50,Bartlett球度检验的P值也均接近于0,表明适合做主成分分析.

通过SPSS 20软件进行因子分析计算得到各水质指标的特征值以及方差贡献率,枯丰两季均提取出了4个公因子,累积方差贡献率分别为77.452%和85.263%,表明4个因子较为集中地反映了整体绝大部分的信息.通过正交变换旋转因子荷载矩阵得出表1.

通过SPSS计算获得31个监测点位各公因子回归得分,得分越高表明该点位污染越严重,运用ArcGIS软件对得分进行反距离权重插值计算,绘制枯丰两季各主要污染源在研究区内的空间分布特征.

#### 2.1.1 丰水期污染源解析

通过污染源解析计算过程确定区内丰水期主要的污染因子和分布,如图3所示.

丰水期第一公因子(W-F1)特征值为6.455,贡献率达到了37.973%,主要荷载因子包括Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、TDS、TH这8项水质指标,包含了地下水中的8大主要离子中的6项,高分区域主要集中于水源地附近的中心区域及延伸向河岸部分地区.呼兰水源地的集中开采形成局部地下水降落漏斗,加速了可溶盐离子溶滤,矿化度增加<sup>[12, 24]</sup>.因此可归结为水源地开采下,水-岩溶滤作用引起的基础离子浓度上升对地下水环境的影响.

表 1 枯丰两期旋转因子的荷载矩阵<sup>1)</sup>

Table 1 Component loadings for groundwater parameters during wet and dry seasons

水化学指标	丰水期成分				枯水期成分			
	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
K <sup>+</sup>	0.323	0.003	<b>0.900</b>	-0.099	<b>0.561</b>	0.241	-0.166	-0.509
Ca <sup>2+</sup>	<b>0.900</b>	0.261	0.088	0.070	<b>0.825</b>	0.476	-0.051	-0.205
Na <sup>+</sup>	<b>0.870</b>	0.093	0.149	-0.195	<b>0.816</b>	-0.193	0.329	-0.051
Mg <sup>2+</sup>	<b>0.885</b>	0.119	0.219	-0.057	<b>0.741</b>	0.052	-0.277	0.467
Cl <sup>-</sup>	<b>0.764</b>	0.446	-0.150	0.211	<b>0.914</b>	-0.003	0.216	-0.126
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>0.801</b>	0.431	-0.127	0.202	0.330	<b>0.841</b>	0.005	-0.073
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.820</b>	-0.341	0.410	-0.090	<b>0.649</b>	0.156	-0.605	0.186
TDS	<b>0.702</b>	0.611	0.027	0.048	<b>0.924</b>	0.290	0.127	-0.133
TH	<b>0.781</b>	0.192	0.068	0.256	<b>0.886</b>	0.415	-0.096	-0.098
Fe <sup>3+</sup>	0.220	<b>0.624</b>	0.258	0.200	-0.114	<b>0.785</b>	-0.114	0.030
Mn <sup>2+</sup>	0.582	<b>0.578</b>	0.063	0.078	0.182	<b>0.746</b>	-0.075	0.301
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.043	0.004	<b>0.969</b>	0.042	-0.090	0.068	<b>-0.670</b>	0.633
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.131	0.104	-0.150	-0.338	0.153	-0.170	<b>0.610</b>	0.033
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.158	0.261	<b>0.777</b>	-0.172	0.468	-0.519	<b>0.628</b>	-0.200
高锰酸盐指数	0.034	0.021	-0.035	<b>0.921</b>	-0.004	0.154	0.095	<b>0.815</b>

1) 黑体数值为与公因子相关性最强的主要指标离子

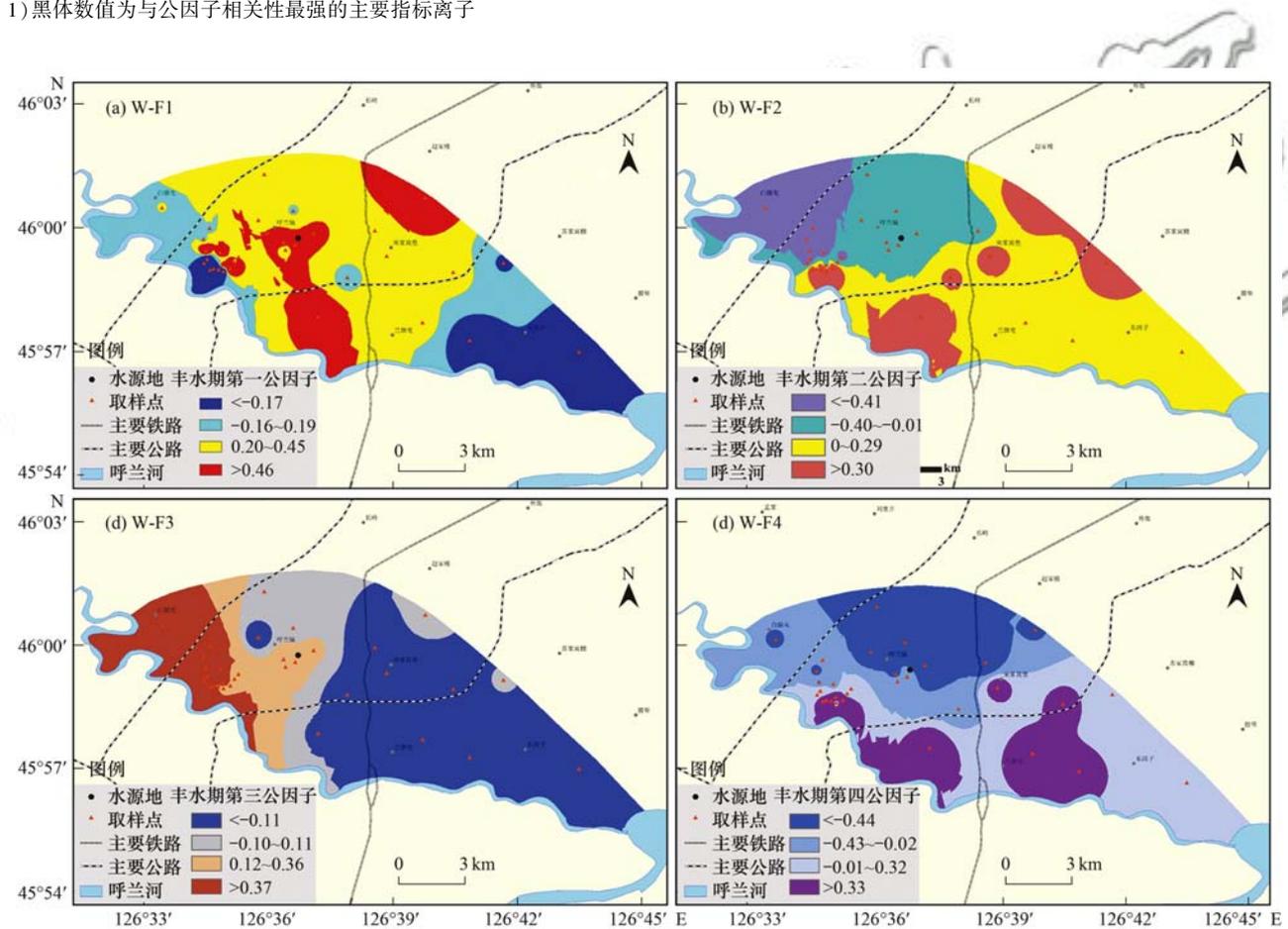


图 3 丰水期公因子及污染源解析空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of principal components during wet season

丰水期第二公因子(W-F2)特征值为 3.545, 贡献率为 20.851%, 主要荷载因子为 Fe<sup>3+</sup>、Mn<sup>2+</sup> 两项. 研究区埋藏有较厚的第四系全新统及上更新统的砂、砂砾石层, 富含铁锰质结核, 含有丰富的

Fe、Mn 元素. 在河水入侵及降雨入渗等过程中, Fe、Mn 氧化物与有机物发生氧化还原反应, 由岩石进入地下水中<sup>[25]</sup>, 为原生地质条件形成的典型污染.

丰水期第三公因子(W-F3)的特征值为 1.819, 贡献率为 10.697%,  $K^+$ 、 $NH_4^+$ 、 $NO_3^-$  为主要荷载变量, 高分区域位于研究区西部, 为典型农灌区. 农用肥料中的 N、K 元素在降雨及灌溉等作用下, 随入渗进入地下水<sup>[26, 27]</sup>. 因此, 该因子为人类农业活动造成的外源营养盐污染.

丰水期第四公因子(W-F4)的特征值为 1.348, 其贡献率相比于前 3 个公因子较低, 仅为 7.931%,

主要包含高锰酸盐指数, 高分区域沿呼兰河岸附近及东部工厂所在地分布. 高锰酸盐指数可体现微生物在降解有机物时与化学需氧量之间的关系<sup>[28]</sup>, 来自河流上游的污染及工厂废水为主要有机污染源.

### 2.1.2 枯水期污染源解析

通过污染源解析计算过程确定区内丰水期主要的污染因子和分布, 如图 4 所示.

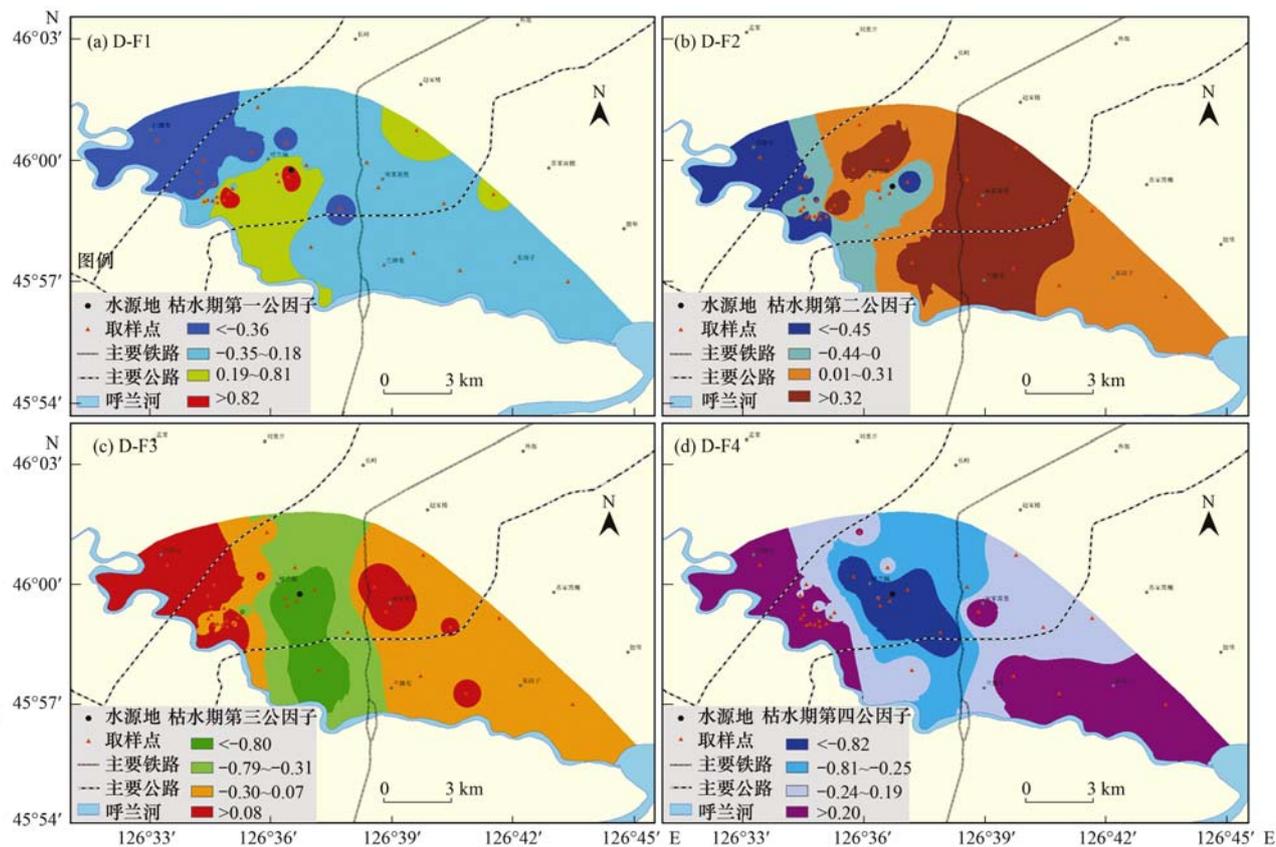


图 4 枯水期公因子及污染源解析空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of principal components during dry season

枯水期第一公因子(D-F1)的特征值为 6.008, 对总体方差的贡献率为 37.551%, 表现出强烈相关的荷载因子主要有  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、TH 和 TDS 这 8 项水质指标, 高分区域集中于水源地附近并延伸向呼兰河. 枯水期降雨补给少, 水源地附近地下水漏斗降深增加, 使得矿物盐溶滤速率加大. 因此, 主要反映开采条件下局部水-岩溶滤作用加剧对地下水环境质量的影响.

枯水期第二公因子(D-F2)的特征值为 3.389, 贡献率占到了 21.181%, 主要荷载因子包括  $SO_4^{2-}$ 、 $Fe^{3+}$ 、 $Mn^{2+}$ , 高分区域广泛分布于水源地东部乡镇、工业区. 研究区原生地质富含铁锰质结核, 在生活及工业废水中有机酸的化学溶滤作用下, 向地

下水中转移; 主要来源于原生岩石矿物, 因此属地质环境因子.

枯水期第三公因子(D-F3)特征值为 1.724, 贡献率为 10.773%, 主要荷载因子为  $NH_4^+$ 、 $NO_3^-$ 、 $NO_2^-$ , 高分区域主要分布于西部农灌区和东部乡镇、工业区. 农田停止施肥后, 对地下水造成的氮污染并不会很快减少<sup>[26]</sup>, 而乡镇及工厂区的垃圾填埋、污水管网泄漏或直接排放等, 都会造成地下水中的氮污染<sup>[29]</sup>. 因此, 该因子可归结为人类活动造成的氮污染.

枯水期第四公因子 D-F4 的特征值为 1.526, 贡献率为 9.760%, 主要包括高锰酸盐指数, 高分区域分布于呼兰河岸及工厂、火电厂附近区域. 研

究区枯水期河流补给地下水, 地下水受到来自地表水的污染加剧, 工业产生的有机污染也随入渗进入地下水, 造成这些地区的有机污染。

### 2.1.3 枯丰水期污染源对比

通过枯丰水期的污染源分析, 可以看出枯丰水

期各自的第一、二、三、四公因子呈现出类似的表征原因, 但存在一些细微差异; 符合研究区基本污染模式确定的情况下, 因季节变化导致略有变化的一般认识. 将上述 4 类因子的污染分布叠加, 可以得到研究区总体的污染源解析分布(图 5)。

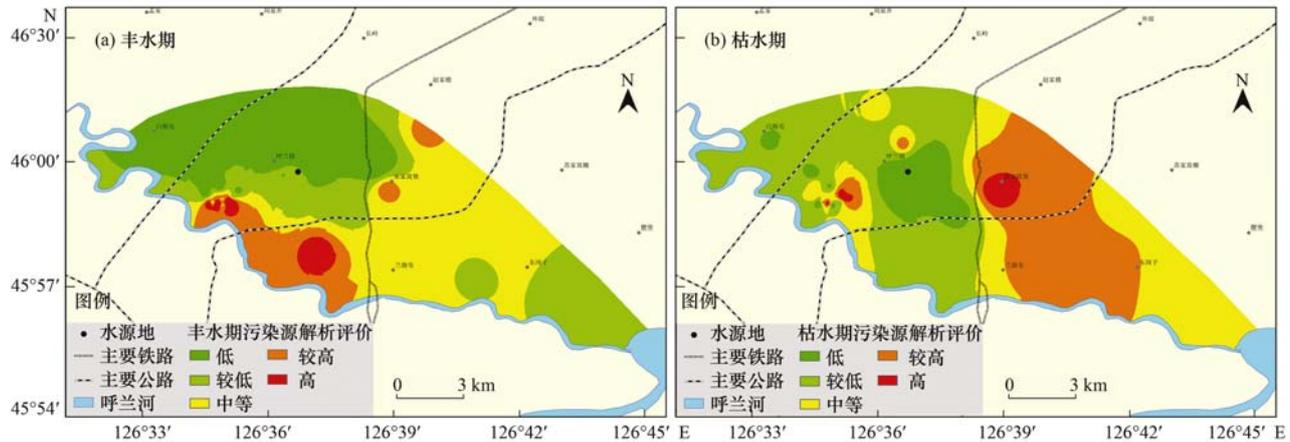


图 5 枯丰水期污染源空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of pollution sources during wet season and dry seasons

可以看出, 研究区枯丰两季的污染负荷呈现出很大的差别. 丰水期的高污染区主要分布在城区附近沿呼兰河岸区域, 而枯水期高污染区点状分布于水源地附近北部及西部城区, 大面积分布于东部乡镇、工业区. 结合前面的公因子分析可知, 丰水期的高污染区域的污染来源与地表水、地下水之间的交互作用密切相关, 而枯水期从高污染区的分布来看, 主要在人类活动密集区域. 由于枯水期降水减少, 地下水整体水量下降且受到地表水补给, 使得高污染区的分布范围比丰水期更广泛. 综上分析, 污染源分布的变化原因由枯丰水期水量变动造成的地表地下水水力联系变化, 和人类活动行为变化共同构成。

### 2.2 DRASTIC 模型

根据土地利用调查及呼兰区钻孔数据绘制呼兰区 DRASTIC 模型, 获得研究区地下水脆弱性分布状况(图 6). 可以看出, 研究区低脆弱性区主要分布在水源地及靠北区域, 由于河漫滩广泛分布较大颗粒的含水层介质以及地下水埋深较低, 沿呼兰河岸地区的地下水脆弱性最高。

### 2.3 风险受体

水源地地下水作为特殊受体, 需要对“开采价值”和“原位价值”两方面进行综合考虑<sup>[19]</sup>. 这里主要从供水意义和地下水水质两方面评价研究区的地下水价值, 作为整个风险评价的受体. 地下水水质状况根据《地下水质量标准》(GB/T 14848-93)中推

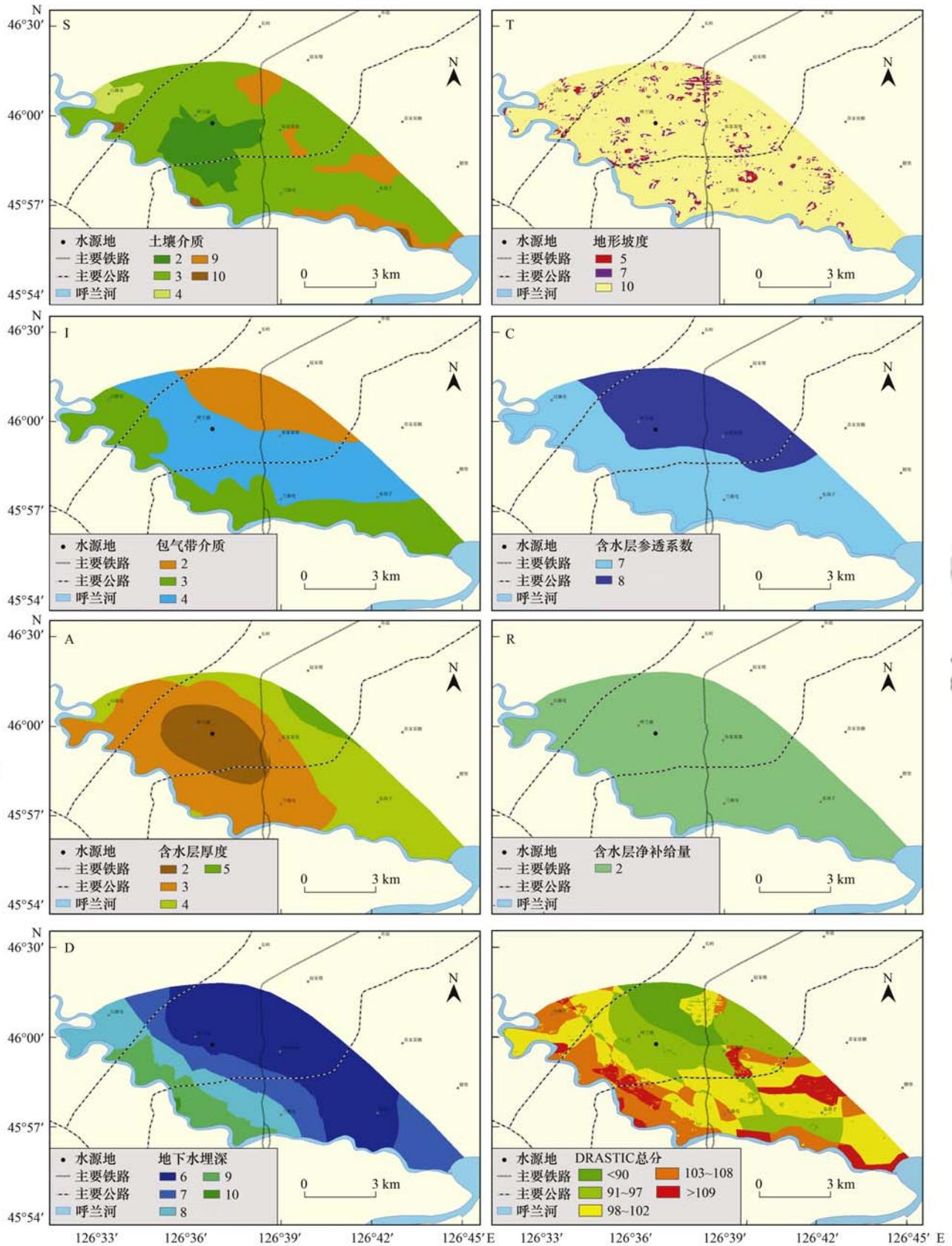
荐的内梅罗综合评价方法, 进行综合评分计算. 供水意义方面则考虑饮用水水源地保护区划分, 依水厂划分一级、二级和准保护区. 将地下水保护区的范围与地下水水质分布进行叠加, 可以得出研究区地下水价值分布(图 7), 并可以看出地下水价值较高部分主要包括饮用水保护区的二级范围及水质较好区域。

### 2.4 地下水污染风险计算及分析

将研究区总体源解析、DRASTIC 地下水脆弱性评价、地下水受体三者相叠加, 得到研究区枯丰两季地下水污染风险分布图(图 8)。

从表 2 中可以看出, 丰水期的高风险区及较高风险区的面积占全部研究区的 6.16% 和 15.76%, 主要分布于呼兰河沿岸地区. 河漫滩地区的含水层多为大颗粒的砂卵石, 地下水埋深较浅, 使得来自地表上的污染容易通过入渗进入到地下含水层. 同时, 来自呼兰河上游的污染物, 在地表水与地下水的交互过程中侵入地下水, 使得污染风险增大. 低风险区及较低风险区分别占据了 17.28% 和 26.32% 的面积, 主要分布于研究区的北部, 呼兰区水源地也处于这一范围; 这部分地区离城区以及乡镇较远, 周围也没有大型工厂等污染源, 因此地下水受污染风险相对其他地区较小. 地下水污染风险总体上呈现出从北至南, 离呼兰河越近越严重的趋势。

枯水期高风险及较高风险区的面积分别占



(S)土壤介质; (T)地形坡度; (I)包气带介质; (C)含水层渗透系数; (A)含水层厚度; (R)含水层净补给量; (D)地下水埋深

图 6 研究区地下水脆弱性 DRASTIC 评分

Fig. 6 DRASTIC grades of the study area

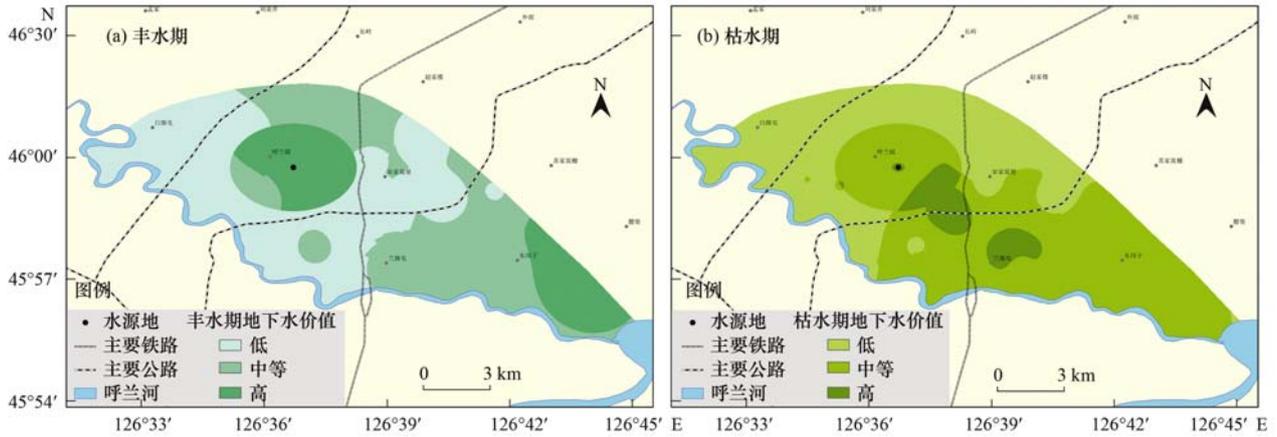


图 7 地下水价值分布

Fig. 7 Distribution of groundwater value

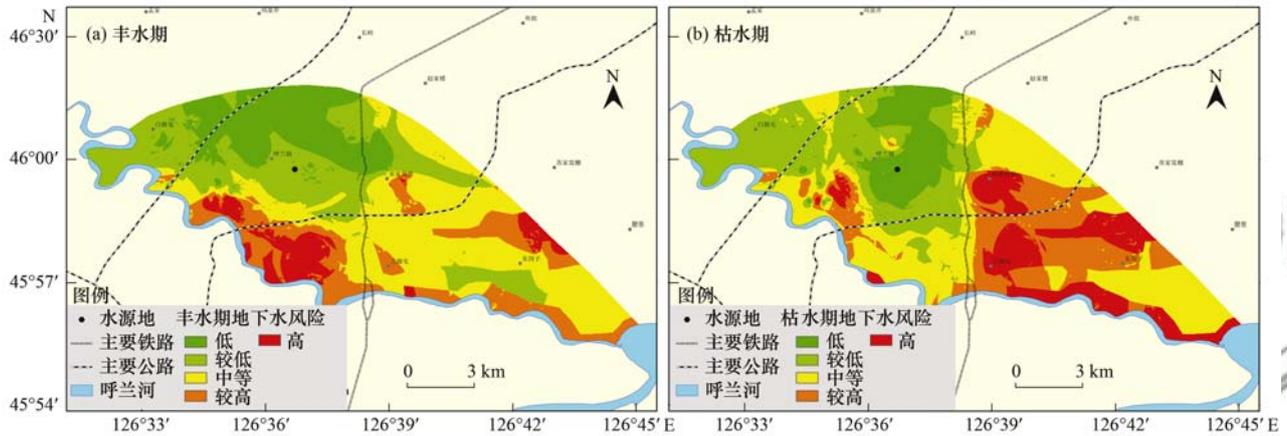


图 8 枯丰水期地下水风险评价

Fig. 8 Map of groundwater pollution risk assessment

表 2 地下水污染风险评价结果表征及面积比

Table 2 Groundwater pollution risk assessment results characterization and area ratio

风险级别分区	风险含义	丰水期面积比/%	枯水期面积比/%
低风险区	污染程度低, 地下水受污染风险小	17.28	10.73
较低风险区	污染程度一般, 地下水受污染风险较小	26.32	24.38
中等风险区	存在一定程度污染, 地下水受污染风险一般, 应对污染物加强管理	34.48	32.61
较高风险区	污染程度较高, 地下水受污染风险较高, 需开展污染治理以保障地下水安全	15.76	18.33
高风险区	污染严重, 污染物危害地下水安全, 应加强水质监测与治理	6.16	13.96

据 13.96% 和 18.33%，主要分布于呼兰河河漫滩并延伸向研究区东部地区。这些地区分布有城区、乡镇、工厂及火电厂，是人类活动的密集区；说明枯水期地下水水质受到人类活动的影响很大。水源地处于低风险区的范围内，周边地区人类活动较轻微。地下水污染风险分布规律总体呈现出离人类活动区越远，风险越小的趋势。

对比枯丰水期的地下水污染风险，可以看出，整体上枯水期的污染风险要比丰水期高出很多；中等及较低风险区的面积均小于丰水期，低风险区更

是远远小于丰水期。丰水期的污染风险主要受到河水与河岸周边地下水之间的交互影响。枯水期地下水不仅受到来自于河水补给过程中带来的污染；而且人类活动对地下水的影响显得更为强烈，使得枯水期的地下水污染风险的形势更加严峻。

地下水污染风险评价指出了地下水受到污染的可能性大小及危害程度，而且在分级过程中趋向于研究区内不同地区的横向对比，水源地在枯丰两季均处于低风险区，说明受到污染的可能性较低。但是由于人类活动影响强烈，可以看到枯水期水源地的

周边分布有小面积的较高风险区。

### 3 结论

(1)以典型傍河水源地为研究对象,采用主成分分析方法解析了由于季节性变化要素作用引起的地下水污染源的变化,解析结果显示水-岩相互作用、原生地质影响、人类活动下的氮污染及有机污染等4类作用为水源地所在区域的主要污染因子。

(2)采用污染源-途径-受体控制模型,突出水源地保护区划分后的功能价值差异性作为受体特征,基于 ArcGIS 平台对水源地枯丰两季地下水污染风险进行评价。结果表现出的风险分布特征为,在丰水期高污染风险主要分布于水源地南部傍呼兰河区域,受河水与地下水交互作用大,枯水期高污染风险主要分布于人类活动密集区,受人类活动影响剧烈。

(3)由于受傍河影响,河漫滩区域会受到地表水污染的影响,针对水源地开采井区域,由于距离呼兰河较远,水源地地下水整体上呈现枯丰两季污染风险均较小的特征,但要关注受外围高污染风险逐步影响的过程控制。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Hiscock K M, Grischek T. Attenuation of groundwater pollution by bank filtration[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, **266**(3-4): 139-144.
- [ 2 ] Maeng S K, Ameda E, Sharma S K, *et al.* Organic micropollutant removal from wastewater effluent-impacted drinking water sources during bank filtration and artificial recharge[J]. *Water Research*, 2010, **44**(14): 4003-4014.
- [ 3 ] Doussan C, Poitevin G, Ledoux E, *et al.* River bank filtration: modelling of the changes in water chemistry with emphasis on nitrogen species[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1997, **25**(1-2): 129-156.
- [ 4 ] 李铎, 宋雪琳, 张燕君. 傍河地下水水源地污染模式研究[J]. *地球学报*, 2000, **21**(2): 202-206.  
Li D, Song X L, Zhang Y J. A study on the pollution model of groundwater supply source beside the river[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2000, **21**(2): 202-206.
- [ 5 ] 郭学茹, 左锐, 闫俊岭, 等. 基于傍河水源地污染特征的水质安全控制技术分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2015, **51**(3): 267-273.  
Guo X R, Zuo R, Yan J L, *et al.* Control technology for the security of water quality based on pollution characteristics in riverbank groundwater resource area [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2015, **51**(3): 267-273.
- [ 6 ] 郑尚, 刘国东, 王亮, 等. 傍河水源地地下水污染风险评价[J]. *中国农村水利水电*, 2017, (2): 82-85.
- [ 7 ] Zhang D L, Liu J Q, Jiang X J, *et al.* Distribution, sources and ecological risk assessment of PAHs in surface sediments from the Luan River Estuary, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **102**(1): 223-229.
- [ 8 ] 陈海洋, 滕彦国, 王金生, 等. 基于 NMF 与 CMB 耦合应用的水体污染源解析方法[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(2): 316-321.  
Chen H Y, Teng Y G, Wang J S, *et al.* Apportionment techniques of water pollution sources by coupling the model of chemical mass balance and the procedure of nonnegative matrix factorization[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(2): 316-321.
- [ 9 ] 金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 等. 沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1423-1430.  
Jin Z F, Gong J L, Shi Y L, *et al.* Nitrate source identification and nitrification-denitrification at the sediment-water interface [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1423-1430.
- [ 10 ] 苏丹, 唐大元, 刘兰岚, 等. 水环境污染源解析研究进展[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(2): 749-755.  
Su D, Tang D Y, Liu L L, *et al.* Reviews on source apportionment of pollutions in water environment [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(2): 749-755.
- [ 11 ] 崔璇, 武亮. 主成分分析(PCA)在地质研究中的应用进展[J]. *中山大学研究生学刊(自然科学、医学版)*, 2009, **30**(4): 41-48.  
Cui X, Wu L. Applications of principal component analysis to geosciences: review and prospect [J]. *Journal of the Graduates Sun Yat-Sen University (Natural Sciences, Medicine)*, 2009, **30**(4): 41-48.
- [ 12 ] 孟利, 左锐, 王金生, 等. 基于 PCA-APCS-MLR 的地下水污染源定量解析研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(10): 3773-3786.  
Meng L, Zuo R, Wang J S, *et al.* Quantitative source apportionment of groundwater pollution based on PCA-APCS-MLR [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3773-3786.
- [ 13 ] 滕彦国, 苏洁, 翟远征, 等. 地下水污染风险评价的迭置指数法研究综述[J]. *地球科学进展*, 2012, **27**(10): 1140-1147.  
Teng Y G, Su J, Zhai Y Z, *et al.* A review on the overlay and index method for groundwater pollution risk assessment [J]. *Advances in Earth Sciences*, 2012, **27**(10): 1140-1147.
- [ 14 ] 王红娜, 何江涛, 马文洁, 等. 两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 186-193.  
Wang H N, He J T, Ma W J, *et al.* Comparative analysis of two different methods for risk assessment of groundwater pollution: a case study in Beijing plain [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 186-193.
- [ 15 ] 滕彦国, 左锐, 苏小四, 等. 区域地下水环境风险评价技术方法[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(12): 1532-1539.  
Teng Y G, Zuo R, Su X S, *et al.* Technique for assessing environmental risk of regional groundwater [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(12): 1532-1539.
- [ 16 ] 赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 等. 地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2754-2762.  
Zhao P, He J T, Wang M L, *et al.* Comparison and analysis of the quantitative methods for pollutant sources load in groundwater

- contamination risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2754-2762.
- [17] 陈克亮, 朱晓东, 朱波, 等. 川中小流域地下水硝态氮的时空变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(4): 1060-1064.
- Chen K L, Zhu X D, Zhu B, *et al.* Temporal and spatial variation of no-3-n pollution in groundwater in small watershed of central Sichuan basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(4): 1060-1064.
- [18] 陆海燕, 辛宝东, 孙颖, 等. 北京市平原区地下水有机污染时空分布特征[J]. *水文地质工程地质*, 2014, **41**(1): 34-40.
- Lu H Y, Xin B D, Sun Y, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of organic contamination in groundwater in the Beijing plain [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2014, **41**(1): 34-40.
- [19] 孙才志, 陈相涛, 陈雪姣, 等. 地下水污染风险评价研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2015, **35**(5): 152-161.
- Sun C Z, Chen X T, Chen X J, *et al.* Recent advances in groundwater contamination risk assessment [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, **35**(5): 152-161.
- [20] 郜托娅, 王金生, 王业耀, 等. 我国地下水污染风险评价方法研究进展[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2012, **48**(6): 648-653.
- Tai T Y, Wang J S, Wang Y Y, *et al.* Groundwater pollution risk assessments in China [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2012, **48**(6): 648-653.
- [21] 孙国敏, 王春雷, 张淑霞. 黑龙江省地表水铁锰超标成因分析[J]. *东北水利水电*, 2013, **31**(4): 34-35, 40.
- Sun G M, Wang C L, Zhang S X. Causes analyze of over-standard iron and manganese in surface water in Heilongjiang province [J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2013, **31**(4): 34-35, 40.
- [22] 申利娜, 李广贺. 地下水污染风险区划方法研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 918-923.
- Shen L N, Li G H. Groundwater pollution risk mapping method [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 918-923.
- [23] 江剑, 董殿伟, 杨冠宁, 等. 北京市海淀区地下水污染风险性评价[J]. *城市地质*, 2010, **5**(2): 14-18.
- Jiang J, Dong D W, Yang G N, *et al.* Risk assessment of groundwater pollution of Haidian district of Beijing [J]. *Urban Geology*, 2010, **5**(2): 14-18.
- [24] 马金珠, 魏红. 民勤地下水资源开发引起的生态与环境问题[J]. *干旱区研究*, 2003, **20**(4): 261-265.
- Ma J Z, Wei H. The ecological and environmental problems caused by the excessive exploitation and utilization of groundwater resources in the Minqin basin, Gansu province [J]. *Arid Zone Research*, 2003, **20**(4): 261-265.
- [25] Zhang B, Song X F, Zhang Y H, *et al.* Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen plain, Northeast China [J]. *Water Research*, 2012, **46**(8): 2737-2748.
- [26] Amano H, Nakagawa K, Berndtsson R. Groundwater geochemistry of a nitrate-contaminated agricultural site [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(15): 4145.
- [27] 崔健, 都基众, 马宏伟, 等. 基于因子分析的浑河冲洪积扇地浅层地下水水质影响因素辨析[J]. *中国农村水利水电*, 2011, (7): 45-48, 51.
- Cui J, Du J Z, Ma H W, *et al.* Distinguishing significant factors for shallow groundwater quality in the Hunhe river alluvial fan based on factor analysis [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2011, (7): 45-48, 51.
- [28] Chen H Y, Teng Y G, Yue W F, *et al.* Characterization and source apportionment of water pollution in Jinjiang River, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(11): 9639-9650.
- [29] Wakida F T, Lerner D N. Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study [J]. *Water Research*, 2005, **39**(1): 3-16.

## CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China .....	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province .....	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai .....	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province .....	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing .....	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Summer and Winter in Ji'nan City .....	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM <sub>2.5</sub> Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City .....	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer .....	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng .....	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing .....	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City .....	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face .....	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing .....	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment .....	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads .....	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River .....	ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions .....	XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring .....	LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin .....	WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO <sub>3</sub> Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin .....	XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution .....	ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir .....	ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment .....	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment .....	HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin .....	LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-jiang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China .....	NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu .....	CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater .....	WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China .....	HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes .....	HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification .....	ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network .....	YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process .....	WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate .....	HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O <sup>2</sup> and A/O/H/O Processes .....	WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extract on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System .....	YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A <sup>2</sup> /O Process .....	ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process .....	CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB) .....	SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification .....	AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage .....	LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi .....	SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar .....	LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System .....	LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite .....	XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves .....	ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms .....	HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment .....	LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis .....	JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)