

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)

北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)

利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)

兰州城区大气 PM_{2.5} 污染特征及来源解析 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)

成都市西南郊区春季大气 PM_{2.5} 的污染水平及来源解析 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)

中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)

固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 陈强,吴焕波(1646)

北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)

南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金霞(1662)

CoCuMnO₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)

大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)

典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)

利用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)

柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)

三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)

亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)

平原河网典型污染物生物降解系数的研究 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)

沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)

苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)

河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)

顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)

台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)

乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)

岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)

广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)

基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(*Bacteroides*) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)

典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)

钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)

天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)

臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 董秉直,张佳丽,何畅(1837)

污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)

HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 郭俊元,王彬(1852)

放射性废水处理中吸附剂的势优势筛选 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)

微米 Fe₃O₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 钱旭,王毅力,赵丽(1864)

间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)

不同灌溉方式对华北平原冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)

卫河新乡市区段春季溶解 CH₄ 与 N₂O 浓度特征 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)

模拟气沉降对内蒙古克氏针茅草原 N₂O 排放的影响 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)

土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)

黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)

耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)

北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)

准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)

纳米 TiO₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)

纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学 马少云,祝方,商执峰(1953)

低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)

粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)

萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 王亚男,程立娟,周启星(1978)

高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓阳,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)

磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)

《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)

柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析

王贺, 谷洪彪*, 迟宝明, 李海君, 姜海宁

(防灾科技学院, 三河 065201)

摘要: 以秦皇岛柳江盆地浅层地下水硝酸盐为研究对象, 在地下水污染源调查的基础上, 于 2014 年 7 月丰水期、2015 年 4 月枯水期共采取浅层地下水样 215 组。基于变异函数模型和 ArcGIS 地统计模块, 分析了浅层地下水中硝酸盐含量时空分布特征, 并利用因子分析方法探讨了硝酸盐污染成因。结果表明, 无论丰水期还是枯水期, 研究区东南部均为硝酸盐主要污染区域, 含量达 30 ~ 120 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 但枯水期硝酸盐污染面积约为丰水期的 1.4 倍; 硝酸盐空间分布受人类活动和地质条件影响显著, 其次为 Eh、DO、pH 和地形地貌条件。北部浅层地下水硝酸盐含量小于 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 中部主要来源于人类活动及农业种植中氮肥的流失, 局部污染较严重; 南部受隔水边界阻隔作用, 表现为硝酸盐累积效应, 污染严重。

关键词: 硝酸盐; 分布特征; 因子分析; 浅层地下水; 柳江盆地

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1699-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.05.014

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin

WANG He, GU Hong-biao*, CHI Bao-ming, LI Hai-jun, JIANG Hai-ning

(Institute of Disaster of Prevention, Sanhe 065201, China)

Abstract: Taking the nitrate in shallow groundwater of Liujiang basin as the research object, a total of 215 groups of shallow groundwater samples were collected during the wet period in July 2014 and the drought period in April 2015 on the basis of groundwater pollution investigation. The characteristics of spatial and temporal variability and the account of nitrate pollution were analyzed based on the model of semivariogram, the geostatistics of ArcGIS and factor analysis, respectively. The results showed that the study region in the southeast was the main nitrate-polluted area, with concentrations of up to 30-120 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, in both wet and drought periods, while the nitrate-contaminated area in drought period was about 1.4 times higher than that in wet period. The spatial distribution of nitrate was primarily influenced by human activities and the geological conditions, and secondarily by Eh, DO, pH and landform conditions. The nitrate concentration was less than 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in north. Pollution in local middle area was rather serious, due to human activities and the loss of nitrogen fertilizer in agricultural cultivation; the area to the south, which was confined by impervious boundary, was seriously contaminated, as indicated by the nitrate accumulation effects.

Key words: nitrate; distribution characteristics; factor analysis; shallow groundwater; Liujiang basin

地下水硝酸盐污染是全球面临的一个日益严重的问题。硝酸盐污染不仅破坏生态平衡, 还会对人体的健康造成直接或间接的危害^[1], 过量摄取硝酸盐可导致人体缺氧, 致使呼吸急促, 也可引发胃癌等消化系统癌症^[2,3]。因此, 世界卫生组织(WHO)颁布的饮用水质标准规定硝酸盐含量的最大允许浓度为 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 欧洲为 11.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[4], 我国 GB/T 14848-93 地下水水质 III 类饮用水标准中规定硝酸盐含量不得超过 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

20 世纪 70 年代以来, 欧洲、美国等国家和地区相继报道过地下水硝酸盐污染情况, 结果表明硝酸盐浓度在逐年增加^[5,6]。80 年代初, 我国被列为国家级环境考核的 32 座城市中, 包括北京、石家庄等在内的 17 座城市地下水已受到硝酸盐污染^[7]。2004 ~ 2009 年, 我国生态系统研究网络对农田、绿洲农田和城市生态系统浅层地下水井中 NO_3^- -N 的监

测表明, 农田及城市生态系统地下水 NO_3^- -N 污染较为严重^[8]。2012 年, 文冬光等对我国东部平原进行了地下水污染调查, 结果表明地下水中“三氮”普遍呈面状污染^[9]。目前, 我国对地下水硝酸盐污染的研究主要以污染来源^[10,11]、影响因素^[12,13]、治理技术^[14]等方面为主, 还有学者采用克里格法描述了硝酸盐空间分布特征^[15~17]。但在小区域、多样本尺度上根据地下水硝酸盐空间分布特征分析硝酸盐污染成因的研究较少。秦皇岛柳江盆地作为独立的小型水文地质单元, 丰富的浅层地下水成为居民主要的饮用水源, 且东南部建有石河水库集中供水水源地, 硝酸盐污染将直接危害到居民的身体健康。因

收稿日期: 2015-11-03; 修订日期: 2015-12-15

基金项目: 2014 年度河北省普通高等学校青年拔尖人才计划项目 (BJ201403)

作者简介: 王贺(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水工程与地震地下流体, E-mail: whnuo2009@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hongbiaosw@126.com

此,本文选取柳江盆地作为研究对象,在实地水文地质调查的基础上,采用地学统计方法中的变异函数和克里格插值工具,以小区域、多样本提高精确度,对浅层地下水中硝酸盐含量进行了空间差值. 不仅分析了其空间分布规律,还揭示了时间变化特征,并根据空间分布特征及因子分析方法详细的探讨了硝酸盐污染成因,以期为其他区域调查及合理有效的控制硝酸盐污染提供借鉴意义.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

柳江盆地位于秦皇岛市抚宁县境内,地处燕山山脉东段,南临华北平原、渤海湾,北至义院口长城脚下,是一个西翼陡、东翼缓的向斜构造,总面积约 400 km². 研究区总体地貌特征表现为西北高东南低:北部和西部为低山区,平均海拔在 200

~300 m 之间;东部为丘陵区,海拔在 160 ~ 300 m 之间;盆地中部以低缓丘陵为主,分布有大石河冲积平原. 研究区地处中纬度地带,属于暖温带半湿润大陆型季风气候. 历年平均气温 15℃,夏季平均气温 25.7℃;年平均降雨 695.5 mm,主要集中于 7~8 月,占全年降雨量 70%~75%;平均蒸发量 1 646.8 mm. 区内发育的地表水体主要有大石河、东宫河.

柳江盆地自形成一个补给、径流、排泄过程完整以及具有丰富含水介质的地下水系统. 地质条件见图 1,区内东、西、南三面均有大片中元古界花岗岩分布,为天然隔水边界;北部出露寒武-奥陶系碳酸盐岩含水层,为补给边界;地下水整体流向为自西北向东南. 盆地内第四系覆盖物厚度小于 50 m,丰富的孔隙介质为地下水的赋存与运移提供了有利条件,成为居民饮用水的重要来源.

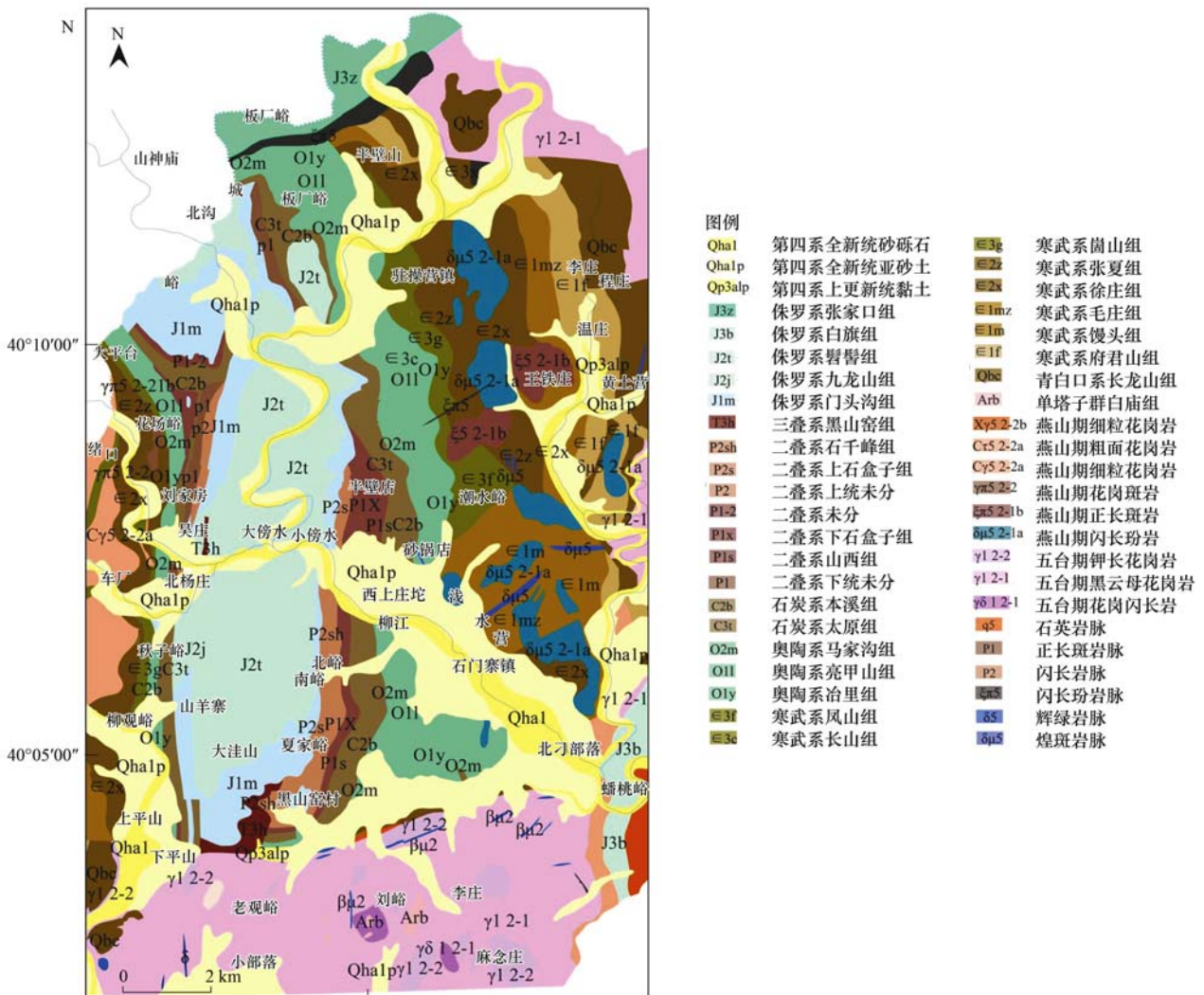


图 1 研究区地质示意

Fig. 1 Geological map of the study area

1.2 样品的采集和分析

本次地下水取样工作在水文地质调查的基础上共采集水样 215 组(图 2),其中于 2014 年 7 月丰水期采集水样 123 组、2015 年 4 月枯水期采集水样 92 组,取样深度均在 40 m 以内,目标含水层为潜水含水层. 采样前抽取地下水 1~3 min,采样时取 100 mL 水样 2 个,用于重碳酸根的测定和水化学的分析. 现场采用便携式多参数水质仪测试温度、pH、Eh、DO、TDS、EC 等指标. 水样送达实验室后,采用水化学分析仪测定 NO₃⁻;离子色谱仪(ICS-2100, Thermo)测定 Cl⁻、SO₄²⁻;电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺;用盐酸-甲基橙滴定法测定 HCO₃⁻.

本研究采用 IBM SPSS Statistics 19 软件对测试数据进行描述性统计分析. 确定数据的统计特征后,利用 GS + 7.0 软件对数据进行半方差函数的模型拟合. 计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中, $\gamma(h)$ 为半方差函数; $N(h)$ 是间距为 h 时的样

点对数; h 为步长. 半方差函数有 3 个重要参数:块金值 C_0 、基台值 $C + C_0$ 和变程 a . C_0 是间距 h 为 0 时的半方差,受测量误差和自然因素变异性的共同作用; $C + C_0$ 是半方差函数随间距增到一定程度后出现的平稳值,表示系统内的总变异; a 是半方差达到基台值时的样本间距,代表了该差数的相关距离^[18].

将所得到的变异函数模型参数导入 ArcGIS 10.0 软件,运用普通克里格差值法对硝酸盐原始数据进行插值,得到硝酸盐含量的空间分布. 该方法是利用原始数据和半方差函数的结构性,对区域性变量的采样点位置进行无偏估值的插值方法.

本研究采用因子分析法进行硝酸盐污染成因分析. 因子分析法在水质分析中,主要用来提取污染因子和识别污染成因^[19,20].

2 结果与分析

2.1 数据分析

2.1.1 描述性统计分析

研究区浅层地下水中硝酸盐统计特征值见表 1.

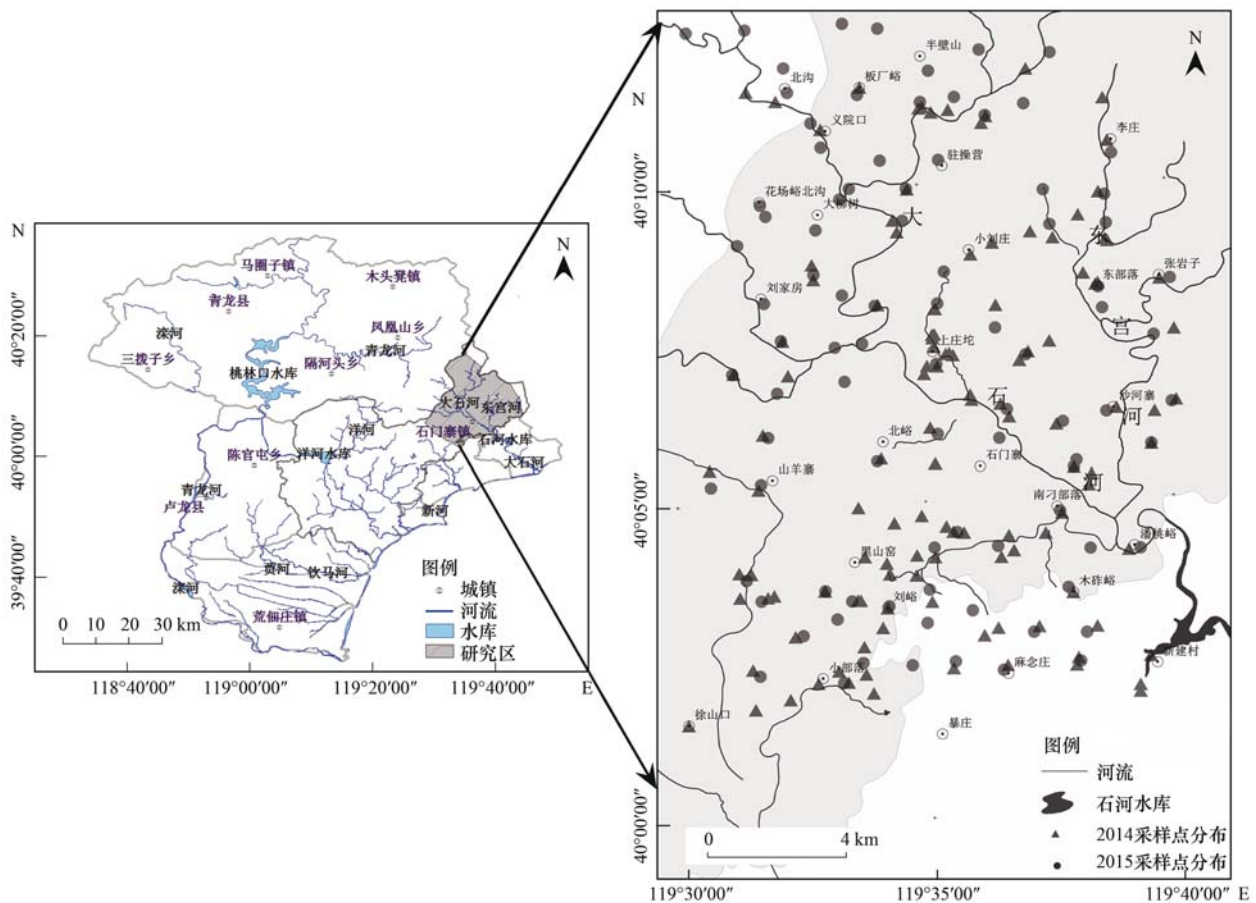


图 2 研究区地理位置及采样点分布示意

Fig. 2 Location of the study area and distribution of sampling points

表 1 浅层地下水硝酸盐统计特征值

Table 1 Statistical characteristics of nitrate in shallow groundwater

时间	样本数	最小值 /mg·L ⁻¹	最大值 /mg·L ⁻¹	平均值 /mg·L ⁻¹	标准差	变异系数 /%
丰水期	129	0.32	121.30	18.80	21.07	112.07
枯水期	92	0.41	135.57	21.97	21.75	101.01

2014年7月丰水期采集的123组水样中硝酸盐含量为0.32~121.30 mg·L⁻¹,平均值为18.80 mg·L⁻¹;2015年4月枯水期采集的92组水样中硝酸盐含量为0.41~135.57 mg·L⁻¹,平均值为21.97 mg·L⁻¹.丰水期和枯水期硝酸盐含量超出地下水质量Ⅲ类水标准20 mg·L⁻¹的分别有37组、35组,超标率分别为30.08%和38.04%.

2.1.2 变异函数分析

变异函数的计算要求数据符合正态分布,否则可能会使变异函数产生比例效应,抬高基台值和块金值,增大估计误差^[18].本文通过SPSS软件对原始硝酸盐数据进行对数转换,转换后P值分别为0.339、0.608,均大于给定的显著性水平0.05,服从正态分布,符合变异函数的计算要求.

利用GS+软件分别计算两期硝酸盐的变异函数,并将半方差函数拟合成理论变异函数模型.采用交叉验证法对变异函数进行交叉验证,计算出估计值和观察值的回归曲线,得到交叉验证精度评价统计量(见表2),以此确定选取高斯模型作为普通克里格差值的理论变异函数^[19].

利用高斯模型拟合得到的相关参数见表3.在

各向同性条件下,丰水期拟合度 r^2 (相关系数)和RSS(最小残差平方和)为0.801、0.007,枯水期拟合度 r^2 和RSS为0.810、0.009. r^2 和RSS分别趋近于1和0,表示理论模型的曲线与实际接近^[20],可较好地反映出硝酸盐的空间变异性.

块金值与基台值之比表明变量的空间相关性程度,即为块金效应.块金效应小于0.25时,空间自相关性强;介于0.25~0.75之间,呈中等空间相关性;大于0.75时,空间相关性弱^[21,22].由表3可知,丰水期与枯水期的块金效应分别为0.249和0.262,表明丰水期时硝酸盐分布空间自相关性较强,而枯水期时呈中等空间相关性.

表 2 交叉验证精度评价

Table 2 Cross validation for precision evaluation

时间	模型	SE ¹⁾	r^2	SE Prediction ²⁾
丰水期	高斯模型	0.137	0.210	0.496
	球状模型	0.133	0.207	0.497
	指数模型	0.142	0.202	0.499
枯水期	高斯模型	0.192	0.112	0.403
	球状模型	0.191	0.100	0.406
	指数模型	0.198	0.099	0.406

1)SE为回归系数标准误差;2)标准误差预测值

表 3 硝酸盐变异函数特征值

Table 3 Functional characteristics of nitrate variability

时间	模型	r^2	RSS	变程 /km	块金值 (C_0)	基台值 ($C + C_0$)	块金效应 ($C_0/C + C_0$)
丰水期	高斯模型	0.801	0.007	1.472	0.076	0.305	0.249
枯水期	高斯模型	0.810	0.009	1.593	0.045	0.172	0.262

2.2 硝酸盐时空分布特征

利用已获取的模型参数及ArcGIS 10.0软件对浅层地下水中硝酸盐含量进行普通克里格插值,分别得到丰水期、枯水期硝酸盐含量空间分布规律,见图3.空间上,硝酸盐含量沿地下水流向呈逐渐升高趋势.西北区域硝酸盐含量总体上小于20 mg·L⁻¹,沿大石河呈带状分布小于5 mg·L⁻¹的低浓度硝酸盐,但局部污染较严重,如车厂、大傍水、驻操营及李庄一带,硝酸盐含量达20~30 mg·L⁻¹;东南区域为硝酸盐富集区,其含量大于20 mg·L⁻¹,至小部落-潘桃峪一带,硝酸盐含量已

达30~100 mg·L⁻¹,污染严重.时间上,遭受硝酸盐污染的区域呈扩大趋势.丰水期时硝酸盐含量介于20~30 mg·L⁻¹之间的约有35 km²,大于30 mg·L⁻¹的约有25 km²,而枯水期时分别扩大到38 km²、46 km²,枯水期污染面积约为丰水期的1.4倍;沿大石河流向硝酸盐含量小于5 mg·L⁻¹的增加到5~20 mg·L⁻¹,尤其大傍水一带,硝酸盐含量上升显著.

丰水期时,大面积地下水接受地表水补给,硝酸盐含量存在稀释作用;随时间延长,枯水期时地下水补给源减少,硝酸盐存在累积效应,含量升高、污

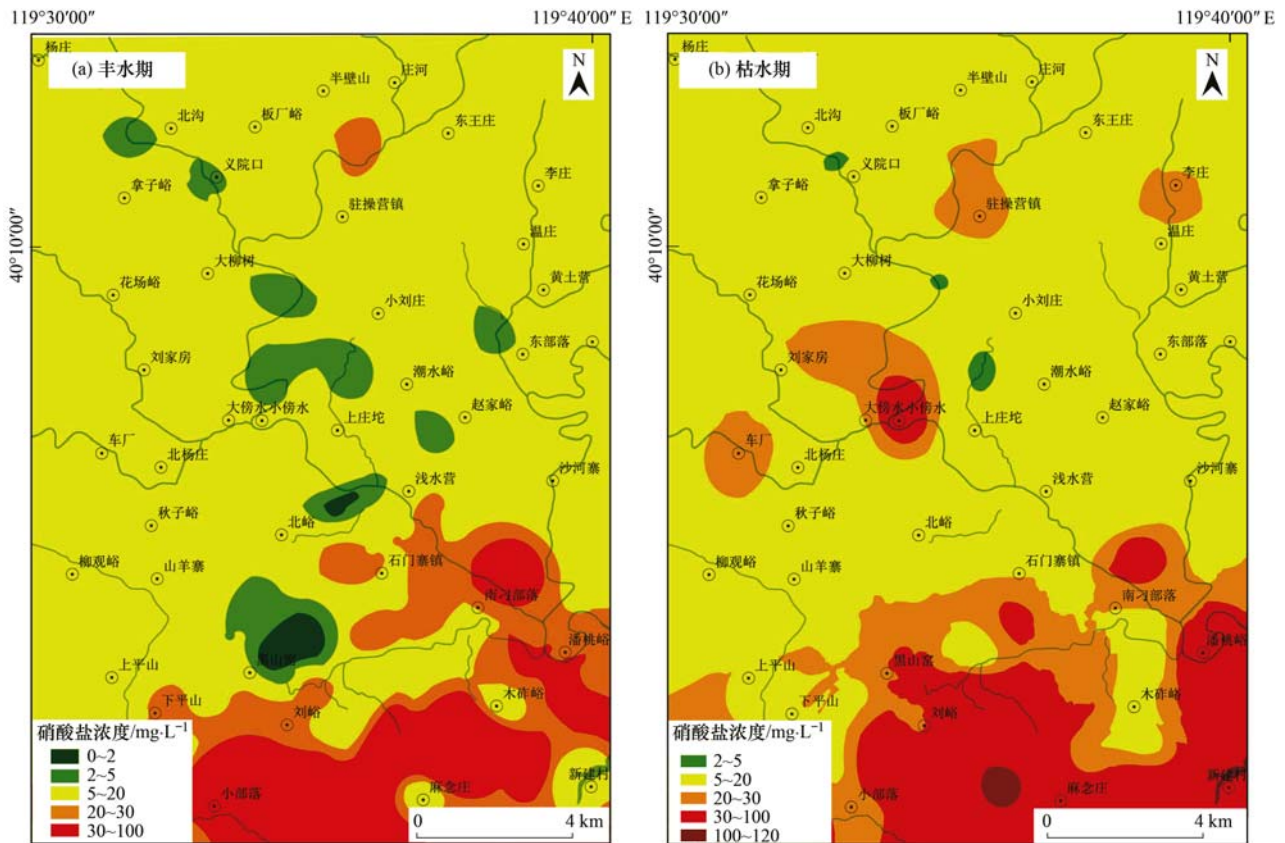


图3 柳江盆地浅层地下水硝酸盐含量空间分布示意

Fig. 3 Spatial distribution map of nitrate concentration in shallow groundwater of Liujiang basin

染面积扩大,且枯水期和丰水期硝酸盐空间分布一致;因此选取硝酸盐含量较高的枯水期进行污染成因分析.

3 讨论

3.1 因子分析

本研究选取水位埋深、温度、pH、Eh、DO、TDS、EC、常规离子及NO₃⁻-N元素作为原始分析指标.对数据标准化处理后,利用SPSS软件进行因子

分析.根据特征值大于1的原则,共抽取5个因子,其特征值、占方差百分数及累加值见表4.5个因子的解释方差占总方差的79.378%,且旋转前后的计贡献率没有发生变化,无信息量损失,因此能较全面地反映基本信息.由表4可知,旋转后,F1和F2的方差贡献率分别为26.712%、21.478%,F3、F4及F5的方差贡献率均在10%左右.由此表明,F1、F2可能为硝酸盐污染的重要影响因素,因子F3、F4及F5对硝酸盐污染有较重要的贡献.

表4 指标变量总方差解释表

Table 4 Total variance explanation table of index variable

成分	抽取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差/%	累计/%	合计	方差/%	累计/%
F1	6.087	40.582	40.582	4.007	26.712	26.712
F2	2.157	14.377	54.960	3.222	21.478	48.190
F3	1.397	9.315	64.275	1.887	12.577	60.767
F4	1.240	8.265	72.539	1.512	10.079	70.847
F5	1.026	6.839	79.378	1.280	8.532	79.378

采用正交方差最大旋转法进行因子旋转得到因子载荷矩阵(表5),旋转后的因子载荷矩阵两端集中,能更好地对主因子进行解释^[23].由表5可知,F1为TDS、EC、Na、Ca、Mg、HCO₃⁻和SO₄²⁻的组合,

且均呈正载荷,因此F1代表含水层含盐量水平,可近似看作地质条件影响因子;F2与Cl⁻、NO₃⁻关系紧密,呈正载荷,表明NO₃⁻的来源与Cl⁻基本一致,而NO₃⁻和Cl⁻均受人类活动影响显著,因此F2可看作

人为污染影响因子; F3 为 Eh 和 pH 的组合, Eh 呈负载荷, pH 呈正载荷, 且 NO_3^- 也呈负载荷, 则 F3 主要为 Eh 影响因子; F4 为水位埋深和温度的组合,

呈正载荷, 水位埋深又受地形地貌因素影响显著, 因此 F4 可看作地形地貌影响因子; F5 与 DO 关系紧密, 呈正载荷, F5 可看作 DO 影响因子。

表 5 正交方差最大旋转后因子载荷矩阵

Table 5 Factor loading matrix after orthogonal rotation of great variance

指标	成分				
	F1	F2	F3	F4	F5
水位埋深	0.012	0.053	0.106	0.829	0.070
温度	0.193	0.081	0.057	0.766	-0.025
pH	0.094	-0.315	0.799	0.027	0.217
Eh	0.129	-0.126	-0.825	-0.105	0.074
DO	-0.105	-0.205	-0.036	0.094	0.862
TDS	0.748	0.637	0.110	0.072	-0.100
EC	0.736	0.626	0.110	0.163	-0.108
K	0.124	0.207	0.202	-0.355	0.395
Na	0.829	0.179	-0.099	0.055	0.189
Ca	0.620	0.581	0.244	0.168	-0.270
Mg	0.651	0.522	0.075	-0.116	-0.217
HCO_3^-	0.652	-0.087	0.593	0.033	-0.291
SO_4^{2-}	0.890	0.104	-0.086	0.105	0.000
Cl	0.298	0.851	-0.054	0.043	-0.203
NO_3^-	0.118	0.911	-0.226	0.028	0.137

3.2 硝酸盐污染成因探讨

通过各样点在 5 个主因子上的得分进行普通克里格差值, 得到各因子在空间上的等值线分布 (见图 4)。由图 4(a) 可知, F1 影响点位主要集中于研究区南部刘峪-麻念庄一带。该区域出露大片中元古界花岗岩, 裂隙发育程度低, 相对中部灰岩沉积层为隔水边界。硝酸盐溶解性较好, 沿地下水径流方向迁移到南部区域, 由于边界阻水作用, 致使硝酸盐富集, 含量达 $30 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 局部高达 $100 \sim 120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超出地下水质量 III 类水标准的 4~6 倍。随着径流途径的增加, 长时间的水岩相互作用导致水中含盐量逐渐增加, 矿化度达 $400 \sim 800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为全区平均水平的 2~4 倍, 由此表明, 高含盐量含水层有利于硝酸盐的富集。

F2 影响点位主要集中于研究区北部基岩山区、中部大石河冲积平原区。根据现场调查可知, 半壁山-庄河一带无集中生活、农业污染源, 地下水中硝酸盐主要来源于基岩山区, 含量较小, 以 $5 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为主; 驻操营镇为人口集中居住地, 且以北为大面积农业种植区, 约 8.0 km^2 。人类生活污水、垃圾不合理的排放以及农业含氮肥料的使用和流失, 形成硝酸盐局部污染严重带; 中部石炭岩地层为全区主要含水层, 在地下水对流弥散作用下, 扩散降低了硝酸盐浓度, 为 $5 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 到石门寨镇一带, 又为人口集中居住地, 硝酸盐含量大于 20

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。且研究区浅层地下水中硝酸盐本底值仅为 $8.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 由此判断, 硝酸盐主要来源于人类活动及农业种植, 人为污染影响显著。

F3 贡献率为 12.577%, 判断为 Eh 和 pH 影响因子。由图 4(c) 可知, F3 影响点位主要集中于中部灰岩含水层。Eh 变化范围为 $120 \sim 150 \text{ mV}$, pH 介于 $7.6 \sim 7.9$ 之间, 处于弱碱性氧化环境。硝酸细菌适宜在弱碱性环境中生长, 且为好氧微生物, 含水层所处环境为硝酸细菌的生长和繁殖提供了有利条件。

F4 贡献率为 10.079%, 看作水位埋深和温度影响因子, 影响点位主要集中于研究区东部东宫河流域。东宫河流域为一小型山间盆地, 其补给、径流、排泄条件具有一定的相对独立性。东宫河上游出露有花岗岩, 裂隙发育, 在李庄形成自流区, 导致局部区域硝酸盐含量达 $20 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 中游西侧为花岗岩岩脉侵入体, 东侧为花岗岩岩体, 均为天然隔水边界, 地下水位埋深在 $3.3 \sim 3.8 \text{ m}$ 之间, 硝酸盐含量为 $5 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 下游为地下水排泄区域, 水位埋深增加到 $4.3 \sim 4.8 \text{ m}$, 含水层由砂砾石层组成, 通气性好, DO 为 $9.96 \sim 10.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为硝化作用提供了良好的氧气来源, 硝酸盐含量均大于 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为污染严重区域。浅层地下水温度自北向南由 9°C 逐渐升高至 14°C , 与水位埋深变化趋势相同, 硝酸盐含量随水位埋深和温度的增大而增大。

F5 贡献率为 8.532%, 为 DO 影响因子, 影响点

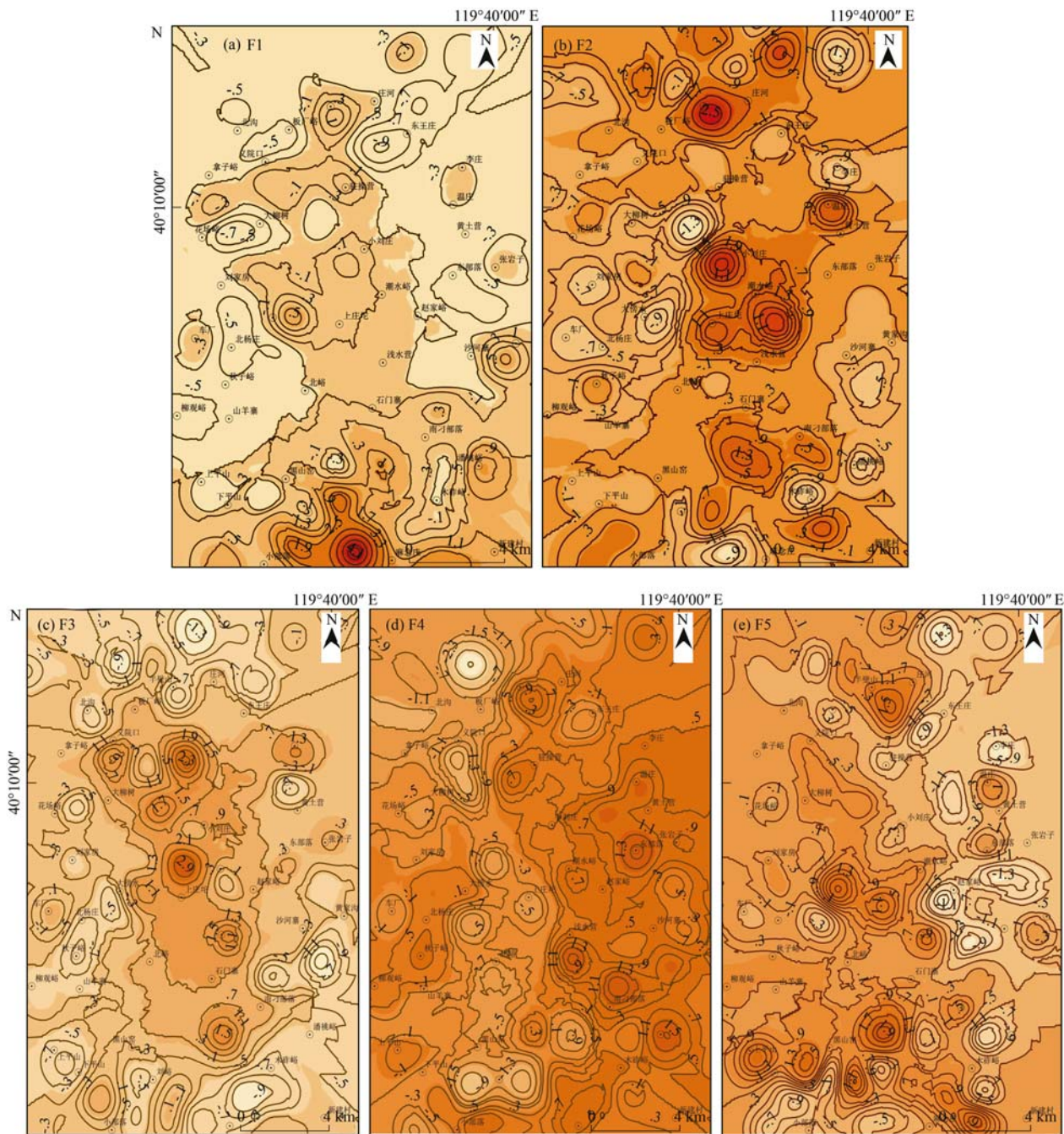


图 4 主因子空间等值线分布示意
 Fig. 4 Space contour map of the main factor

位主要集中于研究区中部,与 F3 对应. 北沟-拿子峪一带浅层地下水 DO 为 7~9 mg·L⁻¹,硝酸盐含量介于 5~20 mg·L⁻¹之间;车厂-大傍水一带为居民集中区,浅层地下水中 DO 为 10~11 mg·L⁻¹,硝酸盐含量为 20~30 mg·L⁻¹;柳观峪-山羊寨一带浅层地下水中 DO 为 8~9 mg·L⁻¹,硝酸盐含量降低到 5~20 mg·L⁻¹. 车厂-大傍水以南出露大面积火山集块岩,裂隙不发育,成为天然分水岭,由于阻隔作用,柳观峪-下平山区域硝酸盐含量较车厂-大傍水区域低. 整

体趋势表现为,含氧量较高区域硝酸盐含量高.

由因子分析可知,研究区浅层地下水中硝酸盐主要来源于人类活动及农业种植中氮肥的流失,空间分布受人为污染因素和地质条件影响显著,其次为水文地球化学及地形地貌条件.

4 结论

(1) 丰水期和枯水期浅层地下水中硝酸盐数据超标率均为 30%左右. 变异函数分析表明,丰水期

时,硝酸盐含量分布呈强空间相关性,受自然因素控制,如地质条件、水文地球化学特征及地形地貌条件等;而枯水期时,硝酸盐含量分布呈中等空间相关性,由自然因素和人为污染等随机性因素共同控制。

(2)研究区东南部为硝酸盐主要富集区,其含量超出地下水质量Ⅲ类水标准 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,污染严重。整体趋势表现为沿地下水径流方向硝酸盐含量逐渐升高;硝酸盐污染面积随时间呈扩大趋势,枯水期污染面积约为丰水期的 1.4 倍。

(3)因子分析结果表明,硝酸盐空间分布受人类活动和地质条件影响显著,其次为 Eh、DO、pH 和地形地貌条件。北部区域浅层地下水硝酸盐含量与本底值相当,未受污染;中部主要来源于人类活动及农业种植中氮肥的流失,局部污染较严重;南部受隔水边界阻隔作用,表现为硝酸盐累积效应,污染严重。西部区域表现为硝酸盐含量随溶解氧含量升高而升高,而东部区域表现为硝酸盐含量随水位埋深和温度的增大而增大。

(4)本文主要以浅层地下水为研究对象,但未进行基岩裂隙水、岩溶水及第四系孔隙水的区分,局部地下水流向也存在差异,导致分析精度降低。因此,在今后的研究中需要对这些方面继续进行探讨,以完善硝酸盐污染特征及成因分析。

参考文献:

- [1] 吴雨华. 欧美国家地下水硝酸盐污染防治研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(8): 284-290.
- [2] 方晶晶. 河北平原邯郸地区地下水硝酸盐污染源及迁移转化过程的多元素同位素及微生物(*E. coli*)示踪[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- [3] 毕晶晶, 彭昌盛, 胥慧真. 地下水硝酸盐污染与治理研究进展综述[J]. 地下水, 2010, **32**(1): 97-102.
- [4] 刘兴权, 许晶玉, 江丽华, 等. 山东省种植区地下水硝酸盐污染空间变异及分布规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(6): 1172-1179.
- [5] Goss M J, Barry D A J, Rudolph D L. Contamination in Ontario farmstead domestic wells and its association with agriculture: 1. results from drinking water wells[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2005, **32**(3-4): 267-293.
- [6] Ridley A M, Mele P M, Beverly C R. Legume-based farming in southern Australia: developing sustainable systems to meet environmental challenges[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, **36**(8): 1213-1221.
- [7] 李庆诚. 全国重点环境考核城市地下水污染概况与防治对策[J]. 地下水, 1992, **14**(1): 2-5.
- [8] 徐志伟, 张心昱, 孙晓敏, 等. 2004~2009年我国典型陆地生态系统地下水硝态氮评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 2827-2833.
- [9] 文冬光, 林良俊, 孙继朝, 等. 中国东部主要平原地下水量与污染评价[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, **37**(2): 220-228.
- [10] 黄强盛, 李清光, 卢玮琦, 等. 滇池流域地下水、河水硝酸盐污染及来源[J]. 地球与环境, 2014, **42**(5): 589-596.
- [11] 赵解春, 李玉中, Ichiji Y, 等. 地下水硝酸盐污染来源的推断与溯源方法概述[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(18): 374-378.
- [12] 董维红, 林学钰. 浅层地下水氮污染的影响因素分析——以松嫩盆地松花江北部高平原为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, **34**(2): 231-235.
- [13] 邹环, 王金生, 赖德胜. 松花江吉林段沿岸浅层地下水硝酸盐污染特征和影响因素分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, **12**(6): 6-11.
- [14] 姜烈, 何江涛, 姜永海, 等. 地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2572-2578.
- [15] 王正祥, 高贤彪, 李明悦, 等. 天津市水体硝酸盐污染调查与空间分布研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(3): 592-596.
- [16] 邓林, 王文科, 杨晓婷. 关中盆地地下水硝酸盐含量的空间变异特征[J]. 干旱区资源与环境, 2008, **22**(10): 152-155.
- [17] 潘田, 张幼宽. 太湖流域长兴县浅层地下水氮污染特征及影响因素研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, **40**(4): 7-12.
- [18] 孟瑞芳, 宋乐, 张翼龙, 等. 浅层含水层导水系数空间变异分析——以河套平原呼和浩特为例[J]. 水文地质工程地质, 2014, **41**(2): 24-28.
- [19] Singh K P, Malik A, Sinha S. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti River (India) using multivariate statistical techniques—a case study[J]. Analytica Chimica Acta, 2005, **538**(1-2): 355-374.
- [20] 李俊霞, 苏春利, 谢先军, 等. 多元统计方法在地下水环境研究中的应用——以山西大同盆地为例[J]. 地质科技情报, 2010, **29**(6): 94-100.
- [21] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, et al. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence[J]. Ecological Monographs, 1992, **62**(2): 277-314.
- [22] 吴学文, 晏路明. 普通 Kriging 法的参数设置及变异函数模型选择方法——以福建省一月均温空间内插为例[J]. 地球信息科学, 2007, **9**(3): 104-108.
- [23] 左锐, 谷鹏, 滕彦国, 等. 下辽河平原高氟地下水空间分布及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, **42**(3): 135-141.
- [24] 李海滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报, 1998, **9**(6): 651-657.
- [25] Zheng Z, Zhang F R, Ma F Y, et al. Spatiotemporal changes in soil salinity in a drip-irrigated field[J]. Geoderma, 2009, **149**(3-4): 243-248.
- [26] 王雄军, 赖健清, 鲁艳红. 基于因子分析法研究太原市土壤重金属污染的主要来源[J]. 生态环境, 2008, **17**(2): 671-676.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojingong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorfii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

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@reces. 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@reces. 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行