

金佛山地区地下水硝态氮污染时空变异性研究

伍坤宇, 王鹏, 沈立成*, 肖琼

(西南大学地理科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要:根据 1976~1977 年、2004~2006 年和 2009 年金佛山地区 23 处地下水排泄点水中硝态氮的质量浓度, 采用地球化学、统计学与 GIS 相结合的方法确定了区内地下水中硝态氮的地球化学背景值, 分析了硝态氮污染的时空变异特征. 结果表明, 区内地下水中硝态氮的地球化学背景值为 $0.72 \sim 2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 正异常下限为 $3.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 2004~2006 年和 2009 年金佛山自然保护区内地下水硝态氮平均质量浓度为: 2.08 、 2.67 、 2.59 和 $3.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 保护区外为: 39.08 、 25.46 、 17.99 和 $13.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 平均超标率(标准规定 $\text{NO}_3^- - \text{N} \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)为: 451.64% 、 478.61% 、 331.85% 和 145.67% ; 最高浓度为: 157.58 、 118.04 、 63.82 和 $46.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 最大超标率为: 1475.81% 、 1080.39% 、 538.20% 和 361.78% . 插值分析结果显示, 区内地下水中硝态氮高值中心随时间而变化, 低值区沿金佛山自然保护区分布. 当地合理的环境保护政策和产业结构调整, 对环境保护工作起到了积极作用.

关键词:硝态氮污染; 地下水; 时空变异; 环保政策; 金佛山

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3247-08

Spatial and Temporal Variability of Nitrate Contaminant in Groundwater in Jinfo Mt. Area, Chongqing, China

WU Kun-yu, WANG Peng, SHEN Li-cheng, XIAO Qiong

(Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The geochemical background of nitrate in groundwater in Jinfo Mt. area was determined, and spatial and temporal variability of nitrate contaminant was analyzed using geochemical, statistical and GIS methods. Twenty-three samples were collected from groundwater discharge points in the study area during 1976-1977, 2004-2006 and 2009, and mass concentration of nitrate in groundwater was tested. The results showed that the geochemical background of nitrate in groundwater in study area was in the range of $0.72 \sim 2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the threshold of anomaly was $3.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. During 2004-2006 and 2009, the average values of nitrate concentration in groundwater in Jinfo Mt. natural reserve were 2.08 , 2.67 , 2.59 and $3.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; and were 39.08 , 25.46 , 17.99 and $13.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the groundwater out of the reserve; the average over-limit rates (standard limit $\text{NO}_3^- - \text{N} \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) were 451.64% , 478.61% , 331.85% and 145.67% ; the maximum over-limit rates were 1475.81% , 1080.39% , 538.20% and 361.78% . Results of interpolation showed that the high value centers of nitrate concentration in groundwater in study area were changing over time, but districts with low nitrate concentration in groundwater in study area were distributed along Jinfo Mt. natural reserve. The application of environmental policy measures and industrial restructuring implemented were reasonable and successful, which had a positive effect to environmental protection.

Key words: nitrate contaminant; groundwater; spatial and temporal variability; environmental policy measures; Jinfo Mt. area

人类活动将产生的活性氮(包括 N_2O 、 NO_x 、 NH_3 等)释放到空气、水和土壤中,引起了一连串的环境和健康问题^[1~3]. 一些学者认为,过剩的活性氮,已经成为继生物多样性减少和气候变化之后,当今世界所面临的第三大威胁^[4]. 有研究表明,许多地区癌症发病率的升高与饮水的硝态氮污染之间存在密切的关系^[5,6]. 为此,我国将饮用水中硝态氮浓度限定为不超过 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[7]. 一般情况下,地下水中的硝态氮浓度非常低^[8],但近年来有研究表明,我国许多地区的地下水存在硝态氮污染问题,且污染状况日趋严重^[9~13]. 这些研究主要通过模型预测^[8,13]、地学统计^[9~13]和空间插值分析^[11,12]等方法报道了硝态氮在

非饱和带、饱水带和承压含水层中的运移、分布和变异规律. 但针对岩溶区的相关研究和报道却不多见,由于岩溶地下含水系统抗污染能力极差,其自然状态极易受到破坏乃至水质受到污染^[14]. 因此,加强岩溶

收稿日期: 2011-01-08; 修订日期: 2011-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072192); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20100182120029); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(XDJK2010B006); 西南大学博士基金项目(SWUB2008013); 重庆市科委院士专项(CSTS, 2010BC7004); 西南大学研究生创新基金项目(KY2010002)

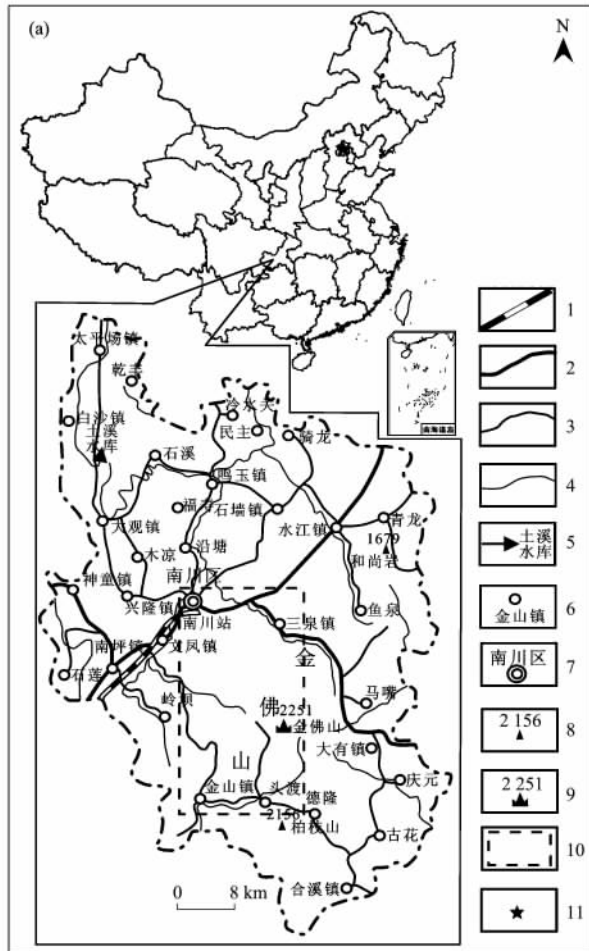
作者简介: 伍坤宇(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水文地球化学、地质碳循环以及地热学, E-mail: wukunyu1986@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xqimei@swu.edu.cn, xqimei@126.com

区的相关研究,对于保障区内人民的饮水安全显得尤为重要.近年来已有部分学者对岩溶区地下水的硝态氮污染问题开展了相关研究^[15,16],这些研究主要是通过同位素示踪的方法对硝态氮的来源及变化特征进行了相关分析,并未对岩溶区地下水中硝态氮的时空变异特征进行探讨.本研究利用课题组多年积累的数据采用地球化学、统计学与 GIS 相结合的方法,首次确定了金佛山地区地下水中硝态氮浓度的地球化学背景值,并对多年来区内地下水中硝态氮浓度的时空变异特征进行了详细地分析.这将有助于了解岩溶区地下水中硝态氮污染的变化特征,并对保障该地区居民饮水安全,及环境保护政策的制定和实施起到积极作用;同时,对区内产业结构调整 and 可持续发展起到一定的指导作用.

1 金佛山地区概况

1.1 地理概况

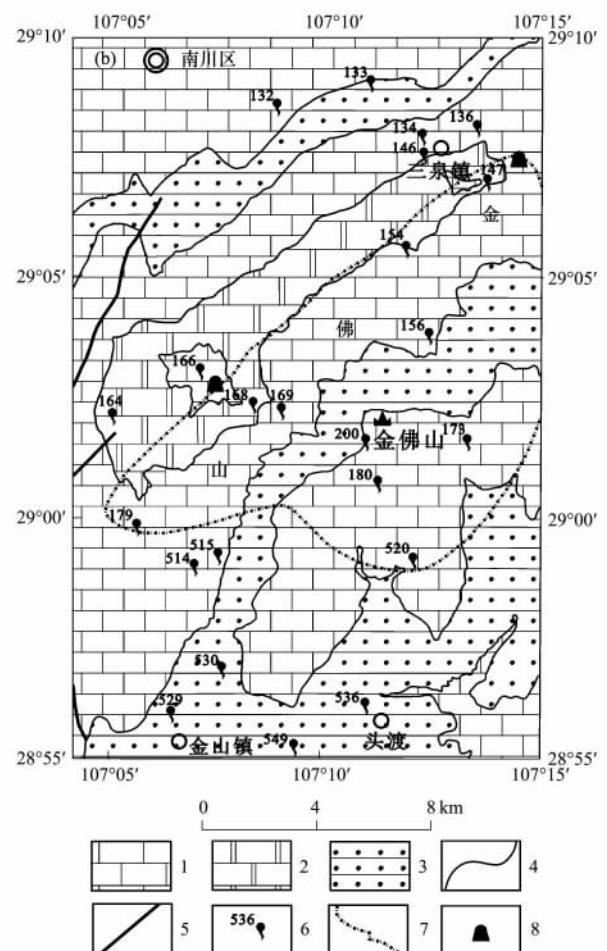


金佛山位于重庆市南川区境内[图 1(a)],属于大娄山东段的一部分,由金佛、箐坝、柏枝三山等 108 峰组成,属典型的喀斯特地貌^[17].地理坐标北纬 $28^{\circ}50' \sim 29^{\circ}20'$,东经 $107^{\circ}00' \sim 107^{\circ}15'$,为国家级森林公园和自然保护区.本研究区涵盖了金佛山地区的大部,坐标范围为北纬 $28^{\circ}55' \sim 29^{\circ}10'$,东经 $107^{\circ}04' \sim 107^{\circ}15'$.

该区气候类型属亚热带湿润季风气候,多云雾、少日照,气温垂直变化明显,山脚与山顶温差达 $5 \sim 6^{\circ}\text{C}$,山体下部年平均气温 16.6°C ,年降水量 1287 mm ,集中分布于每年的 $4 \sim 10$ 月,占全年降水的 83% ^[16,17].

1.2 研究区水文地质背景及土地利用方式

研究区构造上为一宽缓向斜,断裂构造发育较弱,主要构造线走向为北东南西向[图 1(b)].区内出露地层主要为寒武系白云岩,奥陶、二叠系灰岩和一套志留系砂、页岩[图 1(b)].碳酸盐岩出露面积约占整个研究区面积的 $2/3$,以灰岩为主,白云岩



(a)1. 铁路; 2. 高速公路/国道; 3. 省道; 4. 水系; 5. 水库及名称; 6. 镇/乡级行政单位; 7. 南川区; 8. 山峰及高程; 9. 金佛山主峰及高程; 10. 研究区范围; 11. 北京; (b)1. 灰岩; 2. 白云岩; 3. 碎屑岩; 4. 岩性界线; 5. 断层; 6. 取样点及编号; 7. 保护区边界; 8. 保护区大门

图 1 研究区交通位置及地质概况
Fig. 1 Location traffic overview and geological setting of the study area

在研究区中部呈条带状产出. 区内含水系统受岩性控制明显,主要为碳酸盐类裂隙、溶洞型含水层,碎屑岩构成了区域相对隔水层. 区内表层岩溶带极为发育,加之植被覆盖较好,为典型的覆盖型表层岩溶含水系统^[18]. 表层带岩溶水补给来源为大气降水,补给方式主要是通过裂隙以面状分散的形式补给;饱水带岩溶水主要由降水及部分表层带岩溶地下水经漏斗、消(落)水洞、地下河天窗、深大溶隙等以集中注入的形式补给. 岩溶地下水排泄以表层岩溶泉、地下河出口为主要形式,头渡-金山镇一线河谷为地下水排泄基准面. 碎屑岩区有部分裂隙泉出露,水量和泉域范围都不大,主要补给源为大气降水,补给方式是通过基岩原生和构造裂隙以面状分散形式补给.

金佛山为国家级“森林公园”及“自然保护区”,区内主要土地利用方式为林地,其次为保护区外围的耕地,以及部分工矿、商业用地和少量草地.

2 样品采集与测试

早在 20 世纪 70 年代原西南师范大学地理系(现为西南大学地理科学学院)就对金佛山地区大部分地下水排泄点进行过考察,并检测了水中的硝态氮浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 测试方法为紫外分光光度法,仪器为国产 722 型紫外分光光度计,精度为 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表 1 中 1976~1977 年的数据即为 2 a 数据的加权平均值. 笔者所在的课题组自 2004 年起至今,多次对金佛山地区 23 个地下水排泄点进行了采样分析;现场取样时用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤水样,用洁净聚四氟乙烯瓶收集水样封装,加冰冷藏保存,运回实验室. 采用紫外分光光度法测定水中硝态氮浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),测试仪器为日本岛津公司生产的 UV2450 型紫外-可见光分光光度计,测试精度为 $0.001\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 1 金佛山地区地下水硝态氮浓度测试结果¹⁾
Table 1 Results of the nitrate mass concentration of groundwater samples in Jinfo Mt. area

编号	排泄形式	泉域内土地利用变化情况		$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				
		2004 年	2009 年	1976~1977 年	2004 年	2005 年	2006 年	2009 年
132	表层带岩溶泉	旱地	旱地	1.20	46.94	37.60	63.82	17.56
133	地下河出口	旱地	林地	2.80	21.50	6.81	9.41	7.99
134	表层带岩溶泉	林地	林地	0.70	14.55	7.78	8.57	4.10
136	表层带岩溶泉	林地	林地	0.60	3.45	2.11	—	—
146	表层带岩溶泉	林地	林地	0.00	1.08	1.55	2.24	0.93
147	表层带岩溶泉	林地	林地	1.92	1.04	0.93	0.84	1.14
154	地下河出口	林地	林地	0.80	3.85	3.16	3.13	3.95
156	表层带岩溶泉	林地	林地	1.10	5.01	3.76	3.59	4.47
164	地下河出口	水稻田	林地	0.90	83.28	6.95	0.55	10.50
166	表层带岩溶泉	旱地	林地	1.60	22.43	11.17	20.62	9.20
168	表层带岩溶泉	林地	林地	—	—	3.12	3.95	5.49
169	表层带岩溶泉	林地	林地	1.20	2.16	1.96	0.91	1.34
173	地下河出口	林地	林地	0.72	1.12	2.84	3.68	—
179	表层带岩溶泉	林地	林地	0.00	0.63	0.74	0.00	0.22
180	表层带岩溶泉	林地	林地	0.00	3.16	2.54	2.76	3.26
200	表层带岩溶泉	林地	林地	—	—	3.16	3.61	7.22
514	地下河出口	林地	林地	2.40	3.37	1.94	1.92	3.56
515	表层带岩溶泉	旱地	旱地	1.80	43.27	63.29	61.86	46.18
520	地下河出口	林地	林地	0.80	5.26	4.48	3.47	8.16
529	砂岩裂隙泉	居民点	居民点	8.00	87.39	118.04	5.92	6.37
530	砂岩裂隙泉	旱地	旱地	2.00	3.70	8.48	7.14	15.81
536	砂岩裂隙泉	居民点工厂	居民点工厂	6.40	157.58	32.77	26.44	32.78
549	砂岩裂隙泉	旱地	林地	3.20	19.52	6.03	7.36	9.73

1) “—” 未采集到样品,“0.00” 样品硝态氮浓度低于仪器检测下限

3 结果与讨论

3.1 地下水硝态氮污染状况

由表 1 数据可以看出,20 世纪 70 年代(1976~1977 年)金佛山地区地下水硝态氮浓度最高值仅为

$8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,不存在硝态氮污染问题. 但由 2004~2009 年的数据可以看出,研究区地下水的硝态氮浓度整体上有明显的升高,且部分地下水排泄点水中的硝态氮浓度已经严重超标(远大于文献[7]所规定的不大于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的限值). $\delta^{15}\text{N}$ 示踪表明,区

内地下水硝态氮污染源主要为:粪肥、化肥、工业废弃物和生活污水^[16].

取文献[7]所规定的硝态氮浓度不大于 10 mg·L⁻¹为限值,统计研究区地下水的污染状况,由表 1 和表 2 可以看出,位于金佛山自然保护区内的 147、154、156、168、169、173、179、180、200 和 520 号取样点水中的硝态氮浓度虽然变化率较大,但均未出现超标的现象.水中硝态氮浓度出现超标的取样点均位于保护区外(图 2),虽然区内硝态氮污染物大都与人类活动有关,但由于岩溶区地下水水质受流经地层岩性、水文地质条件和人类活动等因素共同影响,因此,各采样点污染状况及特征仍存在一些差别.2004 年研究区地下水中硝态氮浓度整体较高,各种排泄形式的地下水均存在污染的情况,132、164、515、529 和 536 这 5 个取样点硝态氮污染较为严重.但 2004 年以后,研究区地下水中硝态氮最高浓度、平均超标率和最大超标率

3 项指标都呈现出明显的下降趋势.总的来看,表层带岩溶泉和砂岩裂隙泉的污染情况较地下河严重,这主要是由地下水的补给形式和补给量决定的,表层带岩溶泉主要依靠表层岩溶带补给,砂岩裂隙泉则多为上层滞水,其泉域范围和补给量都较小,对水中溶解成分的稀释作用较小,自净能力较弱.而地下河通常发育在饱水带,流域范围广,水量大;加之区内地下河主要为南北向,穿越金佛山自然保护区,雨水和保护区内未受污染的表层岩溶水均可补给地下河,稀释进入地下河中的硝态氮,其自净能力相对较强.

应当引起注意的是,虽然整体上看金佛山自然保护区内的泉点硝态氮浓度并不高,但将 2004 ~ 2009 年数据与 1976 ~ 1977 年数据进行对比,便可以发现,20 世纪 70 年代至 2009 年,保护区内地下水中硝态氮浓度总体呈现一种上升趋势,这可能与保护区内旅游业的发展密切相关.

表 2 金佛山地区地下水硝态氮污染状况统计

时间(年)	NO ₃ ⁻ -N 平均质量浓度/ mg·L ⁻¹		超标样品数/个		NO ₃ ⁻ -N 最高浓度 /mg·L ⁻¹	平均超标 /%	最大超标 /%	保护区内升高 /%
	保护区内	保护区外	保护区内	保护区外				
1976 ~ 1977	0.82	2.43	0	0	8.00	—	—	—
2004	2.08	39.08	0	9	157.58	451.64	1475.81	92.09
2005	2.67	25.46	0	5	118.04	478.61	1080.39	146.48
2006	2.59	17.99	0	4	63.82	331.85	538.2	137.31
2009	3.92	13.73	0	5	46.18	145.67	361.78	251.22

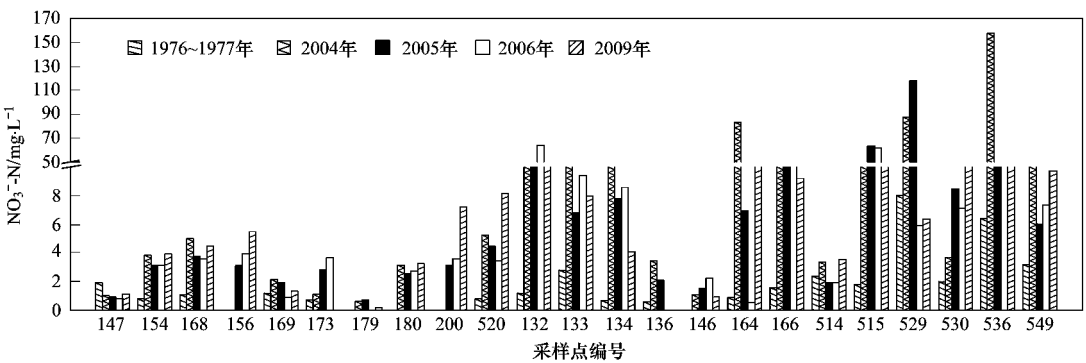


图 2 硝态氮质量浓度

Fig. 2 Nitrate mass concentration of samples

3.2 地下水硝态氮浓度时空变异性

3.2.1 硝态氮地球化学异常下限的确定

由研究区 1976 ~ 1977 年地下水中硝态氮浓度数据(表 1)可以看出,区内地下水中硝态氮浓度接近于自然值,均低于文献[7]所限制的 10 mg·L⁻¹,保护区内、外差别也不大.因此,在研究该地区地下

水硝态氮浓度在时间和空间上的变异性时,采用 1976 ~ 1977 年数据为基准来确定区域内地下水硝态氮浓度的地球化学异常下限,并将其作为区分地下水硝态氮地球化学背景值和异常值的标准.

由于采样点数量有限,所以确定区内地下水中硝态氮地球化学异常下限之前应对样本进行正态检

验(图3).由图3(a)可以看出样本频率的峰值发生了负偏移,图3(b)显示所有样品点并未均匀地贴近直线分布,正态检验图解显示研究区地下水中硝态氮浓度不服从正态分布.因此,不能采用传统的概率

格纸法确定研究区地下水中硝态氮的地球化学异常下限,本研究采用基于 EDA (exploratory data analysis) 的子区中值衬值滤波法确定研究区地下硝态氮的地球化学背景值和异常下限.

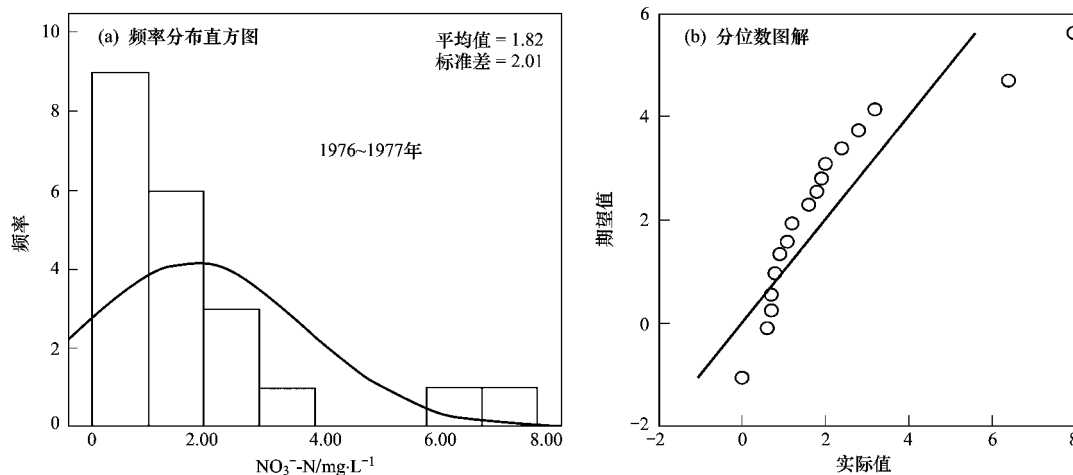


图3 样本正态检验

Fig. 3 Normal test for samples

子区中值衬值滤波法根据数据本身所固有的特性来识别异常点,确定背景总体和异常总体,且不需要预先对原始数据作任何数学处理. EDA 技术中的一套统计参数是数据集的中位数,2 个极值点和上下四分点. 它利用下式来识别异常^[19,20]:

$$Fu = Qu + 1.5Sh \quad (1)$$

$$F1 = Q1 - 1.5Sh \quad (2)$$

式中, Fu 和 $F1$ 为异常界限值, Fu 相当于异常下限, $F1$ 相当于异常上限, Qu 为上四分点, $Q1$ 为下四分点, Sh 为内散度.

由子区中值衬值滤波法计算出金佛山地区地下水中硝态氮浓度中值为 $1.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 正异常下限为 $3.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高背景值区间为 $2.00 \sim 3.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 背景值区间为 $0.72 \sim 2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $< 0.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为低背景值.

3.2.2 地下水中硝态氮的时空变异性

由于本研究选取的研究区面积不大,所涉及地下水均为非承压水,地下水之间存在一定的水力联系,其补给、流向和排泄点分布等主要受到地形和岩溶含水层的控制. 因此,各地下水排泄点水中的硝态氮浓度变化可以反映研究区地下水中硝态氮浓度的变异性特征.

本研究基于 GIS 平台,采用的空间插值分析法对金佛山地区地下水中不同年份的硝态氮浓度数据进行处理. 最常用的空间差值分析方法主要是反距

离权重法和普通克里金插值法,由于普通克里金法建模效果以及各项统计指标均优于距离加权反比法的效果和指标^[21]. 因此,本研究采用普通克里金法对数据进行空间插值分析,其数学原理为:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad i = 1, 2, 3 \cdots n \quad (3)$$

式中, $Z(x_0)$ 为待估点变量的估计值, λ_i 为克里金权重值, n 为给定范围内实测点的个数, $Z(x_i)$ 为各实测数据点值.

插值分析结果见图4,其直观地展示了研究区地下水硝态氮地球化学异常的时空变异性特征. 1976~1977年,研究区所有采样点水中的硝态氮浓度均未出现超标的现象(图4中1976~1977年),区内2/3以上面积的硝态氮浓度仅仅相当于区域背景值或高背景值,低值中心位于金佛山主峰附近,这主要是由于主峰附近相对丰富的降水对地下水中的硝态氮浓度有稀释效应,加之植被的发育消耗掉了大量的硝态氮. 区内主要的硝态氮浓度正异常区分布在研究区南部金山镇-头渡镇一线的河谷中,这些地区都是当时主要的人口聚居地,家禽、畜排泄物和一些生活污水是当时地下水中氮素的主要来源,也是产生正异常的主要原因. 但当时来自工、农业和人口的压力不大,进入浅层地下水的硝态氮污染物不多,所以产生的正异常水平不高.

到2004年整个金佛山地区地下水硝态氮污染

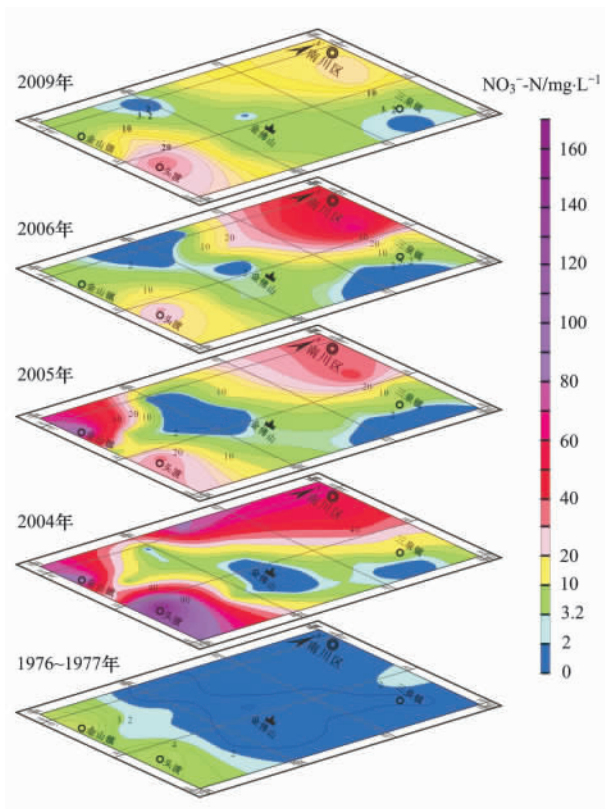


图 4 金佛山地区硝态氮污染时空变化
Fig. 4 Spatial and temporal variability of nitrate contamination

情况较为严重,区内绝大部分地区都受到了不同程度的硝态氮污染,仅金佛山主峰及其周围少部分地区还保持着 20 世纪 70 年代的状态.地下水硝态氮异常最强的地区依然位于研究区的南部,以东南部头渡镇附近的 536 号点为高值中心,最高浓度达 $157.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,次高值出现在了研究区西南部的金山镇附近.这些地区均位于山区河谷中,地势相对平缓,为当地主要的居民点和农耕区,20 世纪 80 年代以来区内人口的快速增长、农业生产中化肥的大量使用以及工业的发展,使得来自工业废弃物、生活污水以及化肥中的氮素大量进入到地下水系统中造成了区内大面积的正异常区.

到 2005 年研究区地下水硝态氮浓度正异常高值中心从东南部转移到了西南部,高值中心位于 2004 年次高值点的金山镇附近,最高值达 $118.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.而作为 2004 年的高值中心的头渡镇 536 号点,地下水中硝态氮浓度下降明显,其原因是头渡酒厂利用 536 号泉点流出的水进行生产,因此将泉域内堆放的垃圾进行了大规模的清理,使得泉域内硝态氮污染物的输入量减少.整体上看,区内地下水硝态氮污染状况大大减轻,污染面积也大为减小.

2006 年整个区域内地下水硝态氮浓度较上年成倍数降低,由图 4 中 2006 年和图 5 可以看出高值中心位于南川区附近,整个金佛山地区已无硝态氮浓度超过 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的高浓集区,大部分地下水硝态氮超标的地区水质明显好转.同时,金佛山自然保护区内地下水硝态氮浓度也有所降低,部分地区地下水中硝态氮浓度已接近区域地球化学背景值.

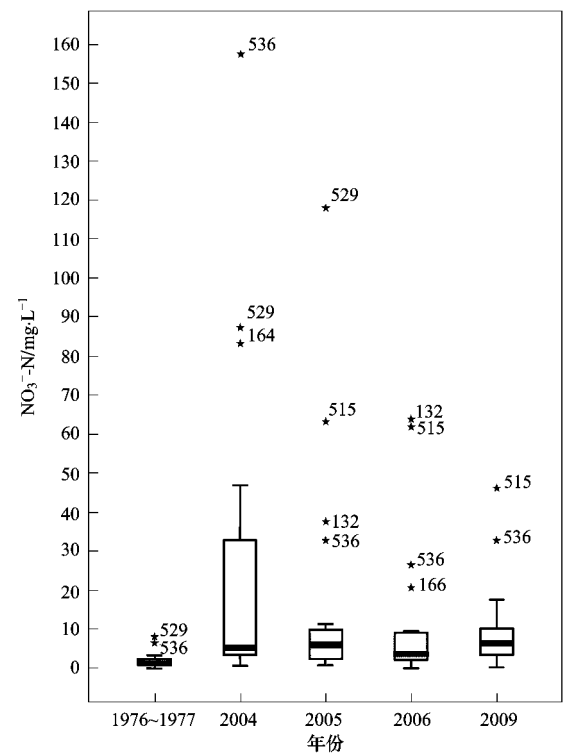


图 5 金佛山地区硝态氮质量浓度箱型分布
Fig. 5 Box-plot for nitrate mass concentration

2009 年整个金佛山地区地下水中硝态氮浓度进一步降低,研究区地下水水质明显好转,已基本达到安全饮用水标准.但值得注意的是,虽研究区地下水水质整体上正在改善,但金佛山自然保护区内地下水的硝态氮浓度却表现出升高的趋势,这主要是由于 2006 年以后政府大力投资开发当地旅游业,使得相关产业快速发展,来自旅游业的压力导致保护区内地下水中硝态氮浓度有所升高.虽然升高的绝对值不大,但就该地区背景值而言这些上升值还是应当给予足够的重视.

通过对金佛山地区地下水中硝态氮的时空变异性研究发现,自 2004 ~ 2009 年,区内地下水硝态氮污染状况逐步改善,尤其是原来污染严重的人口密集区和农耕区,这与当地产业结构的调整和环保政

策的施行是密不可分的. 农业部门从 2005 年起, 以部分国家优质粮工程县为重点, 由政府提供部分财政补贴资金, 开展测土配方施肥工作^[22]. 次年, 重庆南川区也开始实行测土配方施肥工作, 并取得了显著成效. 同时, 多年来持续大面积的退耕还林, 使得区内已经被污染的地区得到修复, 这从实践上印证了硝态氮污染的“植物修复”假说^[23]. 加之近年来, 当地政府大力发展生态旅游和林业, 使原来以工、农业为主体的产业结构发生了很大的改变, 进一步减少了污染物的产生.

研究区地下水中硝态氮浓度的高值中心随时间呈现出一种摆动的特征, 而低值中心一直较为稳定, 其分布范围主要沿金佛山呈北东南西向展布. 采用箱型图解(图 5)分析, 可以看出区内地下水中硝态氮浓度中值波动不明显, 但总体上呈现出一种上升趋势. 这反映出由于人类活动的影响, 已导致研究区地下水中硝态氮的地球化学背景值有所升高. 图 5 中出现的特高值主要出现在金佛山自然保护区的南、北两侧, 这从一个侧面反映出建立自然保护区对环境保护起到了积极作用.

4 结论

(1) 自然状态下, 金佛山地区地下水中硝态氮浓度背景值为 $0.72 \sim 2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 正正常下限为 $3.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由于人类活动的影响, 区内地下水硝态氮浓度显著增加, 到 2004 年, 区内地下水硝态氮污染已较为严重. 自 2005 年开始, 区内地下水硝态氮污染情况开始好转, 到 2009 年, 区内地下水硝态氮污染状况已明显改善.

(2) 由于补给来源、方式和地质条件的差异, 表层带岩溶泉和砂岩裂隙泉的硝态氮污染状况较地下河严重. 不同年份地下水硝态氮高值中心不同, 但低值区一直沿金佛山自然保护区呈北东南西向展布, 说明建立自然保护区对保护地下水资源起到了积极作用.

(3) 环境保护政策的制定和落实, 对于区内地下水硝态氮污染的修复起到了重要作用. 另外, 因地制宜地进行产业结构调整, 不仅有利于区内经济发展, 对环境保护工作也有积极作用.

(4) 金佛山保护区内地下水中硝态氮浓度较之 20 世纪 70 年代显著升高, 虽然升高的绝对值并不大, 但仍应当给予足够重视.

致谢: 感谢西南大学地理科学学院孙玉川、汪智军在野外、实验和文章撰写过程中的帮助!

参考文献:

- [1] Galloway J N, Townsend A R, Erismann J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, **320**(5878): 889-892.
- [2] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, *et al.* Nutrient imbalances in agricultural development[J]. *Science*, 2009, **324**(5934): 1519-1520.
- [3] Nie S, Gao W, Chen Y, *et al.* Review of current status and research approaches to nitrogen pollution in farmlands[J]. *Agriculture Sciences in China*, 2009, **8**(7): 843-849.
- [4] Giles J. Nitrogen study fertilizes fears of pollution[J]. *Nature*, 2005, **433**(7028): 791.
- [5] 邓熙, 林秋奇, 顾继光. 广州市饮用水源中硝酸盐亚硝酸盐含量与癌症死亡率联系[J]. *生态科学*, 2004, **23**(1): 38-411.
- [6] 张秀兰, 张祥宏, 王凤荣, 等. 赞皇县胃癌与饮水关系的研究概况[J]. *中国肿瘤*, 2002, **11**(7): 386-388.
- [7] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [8] Debernardi L, De Luca D A, Lasagna M. Correlation between nitrate concentration in groundwater and parameters affecting aquifer intrinsic vulnerability[J]. *Environmental Geology*, 2008, **55**(3): 539-558.
- [9] Chen J Y, Taniguchi M, Liu G Q, *et al.* Nitrate pollution of groundwater in the Yellow River Delta China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2007, **15**: 1605-1614.
- [10] 赵新峰, 杨丽蓉, 施茜, 等. 东北海伦地区农村地下饮用水硝态氮污染特征及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 2993-2998.
- [11] 陈淑峰, 李帷, 胡克林, 等. 基于 GIS 的华北高产粮区地下水硝态氮含量时空变异特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3541-3547.
- [12] Li J, Lu W, Zeng X, *et al.* Analysis of spatial-temporal distributions of nitrate-N concentration in shitoukoumen catchment in Northeast China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **169**(1-4): 335-345.
- [13] 陈淑峰, 胡克林, 刘仲兰, 等. 华北平原桓台县地下水硝态氮含量的空间变异规律及其成因分析[J]. *水科学进展*, 2008, **19**(4): 581-586.
- [14] 袁道先, 朱德浩, 翁金桃, 等. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1993. 127-164.
- [15] 汪智军, 杨平恒, 旷颖仑, 等. 基于¹⁵N 同位素示踪技术的地下河硝态氮来源时空变化特征分析[J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3549-3554.
- [16] 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.
- [17] 王必浓, 王瑛. 国家重点风景名胜区——金佛山[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1990. 1-4.
- [18] 劳文科, 祁晓凡, 刘慧敏, 等. 广西果化龙何地区表层带岩溶水系统及其水资源特征[J]. *中国岩溶*, 2008, **27**(2): 122-128.
- [19] 史长义. 勘查数据分析(EDA)技术的应用[J]. *地质与勘探*,

1993, **29** (11): 52.

- [20] 费光春, 李佑国, 温春齐, 等. 子区中位数衬值滤波法在川西斑岩型铜矿区地球化学异常的筛选与查证中的应用[J]. 物探与化探, 2008, **32** (1): 66-69.
- [21] 靳国栋, 刘衍聪, 牛文杰. 距离加权反比插值法和克里金插值

法的比较[J]. 长春工业大学学报, 2003, **24** (3): 53-57.

- [22] 龙文军. 2007 年化肥国内市场分析 & 2008 年趋势展望[J]. 磷肥与复肥, 2008, **23** (2): 1-5.
- [23] Cunningham S D, Ow D W. Promises and prospects of phytoremediation[J]. Plant Physiology, 1996, **110**(3): 715-719.