

延边州地下水环境质量空间变异性分析

刘春玲¹, 曹东平², 韩京龙³, 黄丽丽¹, 赵 坤²

(1. 吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130026; 2. 上海海洋石油局, 上海 200120; 3. 延边水文水资源勘测局, 吉林 延吉 133000)

摘要: 为分析延边州浅层地下水环境质量空间变异性, 选取 14 项监测指标, 运用 R 型主因子分析法得出相关系数矩阵, 分析出 4 个主因子及相应的因子得分, 主因子 1、2、3、4 的贡献率分别为 31.35%、23.58%、11.04%、10.27%, 主因子 1 是最有影响的因子, 代表色度、大肠菌群、细菌总数、Fe 四项指标; 主因子 2、3、4 分别代表 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 SO_4^{2-} 、Hd、溶解性总固体、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、Mn、 COD_{Mn} 、pH 值、 F^- 指标。对因子得分运用 Word 聚类法将该区域分为 A、B、C、D、E 5 个亚类区域空间和 I 类低污染、II 类高污染两大类空间。结果分析表明 敦化、珲春部分区域污染最严重, 和龙、安图、汪清部分区域污染严重, 属于 II 类高污染空间, 其他区域为 I 类低污染空间。

关键词: 地下水环境; R 型主因子分析; Word 聚类; 空间变异

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2007)01-0063-05

Spatial variability of groundwater environmental quality in Yanbian State

LIU Chun-ling¹, CAO Dong-ping², HAN Jing-long³, HUANG Li-li¹, ZHAO Kun²

(1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Shanghai Offshore Petroleum Bureau, Shanghai 200120, China; 3. Hydrology and Water Resources Reconnaissance Bureau of Yanbian, Yanji 133000, China)

Abstract: In order to analyze the spatial variability of groundwater environmental quality of Yanbian State, four main factors and their scores were obtained by using the R-type main factor analysis method and the relative coefficient matrix. The contribution rates of the factors were 31.35%, 23.58%, 11.04% and 10.27% respectively, among which the 1st factor is the most effective factor, including colourity, coliform group, total bacterium and Fe, while the 2nd factor refers to $\text{NO}_3\text{-N}$, SO_4^{2-} , Hd, and TDS, the 3rd factor refers to $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, Mn, and COD_{Mn} , and the 4th factor refers to pH and F^- , respectively. Then Word clustering method was used to divide this area into five subareas, A, B, C, D, E, and two pollution areas, i. e., slightly polluted area I and II seriously polluted area II. The result showed that Dunhua and Hunchun were the most seriously polluted areas, Helong, Antu and Wangqing were seriously polluted area of type II; and the other place belongs to type I.

Key words: groundwater environment; R type main factor analysis; Word clustering; spatial variability

区域地下水环境质量分布的空间变异性分析是区域地下水资源保护和环境管理的一个重要方面。地下水系统具有本身的复杂性和发展的变化性, 以及人类活动的影响作用在时空分布的非均衡性致使区域地下水环境质量的分布态势形成了空间变异的特点。开展区域地下水环境质量的时空变异性研究并对其污染特征作出规律性描述, 无论是对预测区

域地下水环境质量的时空变化态势, 还是对进一步开展的宏观控制与管理, 都具有重要的理论与实际意义^[1]。

吉林省延边州由于各方面原因地下水已受到不同程度的污染, 依据地下水环境监测资料建立区域地下水环境质量指标体系, 引入系统分析聚类中的 R 型主因子分析法^[1-4], 从研究环境指标体系的相关

系数矩阵的内部结构入手,把众多的变量综合为少数几个“主因子”并再现原始变量与“主因子”之间的相关关系,识别和量化区域地下水环境质量空间变异性。然后,以“主因子”的因子得分组成的新的数据集为基础,采用 Word 法^[5-6]进行系统聚类,建立研究区地下水环境质量的空变模式,对地下水环境的污染特征进行空间分类描述。进行地下水质量区域变异性分析对发展少数民族经济及社会的可持续发展具有重要意义。

1 研究区概况

延边州地处吉林省东部,位于北纬 $41^{\circ}59'47'' \sim 44^{\circ}30'42''$ 东经 $127^{\circ}27'43'' \sim 131^{\circ}18'33''$ 之间。本次研究对象为松散岩类孔隙水,分布在布尔哈通河、海兰河、嘎呀河、琿春河、牡丹江及其支流河谷中和一级阶地冲洪积砂砾石、卵石层中,冲洪积层具有二元结构特征,上部为亚黏土、亚砂土,厚度一般 $0.5 \sim 2.5 \text{ m}$,下部为砂、砂砾石、卵石层,厚度达 $1 \sim 16 \text{ m}$,

水位埋深 $0.5 \sim 3.5 \text{ m}$ 水位年变幅 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ 。大气降水是研究区松散岩类孔隙水的主要补给来源,灌溉回渗和山前侧向径流也是其补给来源,人工开采、蒸发以及泉的形式向河谷排泄为其主要排泄方式。

2 地下水水质监测

研究区布设水质监测井 45 眼(见图 1),主要分布在州内的布尔哈通河、海兰河、嘎呀河、琿春河、牡丹江及其支流流域,根据本区实际,选取的监测指标有色度、pH 值、大肠菌群、细菌总数、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、Mn、Fe、 F^- 、Hd、 COD_{Mn} 、 SO_4^{2-} 、溶解性总固体共 14 项,水质数据为 2004 年 5 月份资料。

3 计算分析

利用 SPSS 统计分析软件^[7]进行分析计算。

3.1 相关系数计算

将水质资料标准化,计算 14 个指标间的相关系数,列出 R 阵,为对称正定阵(见表 1)。

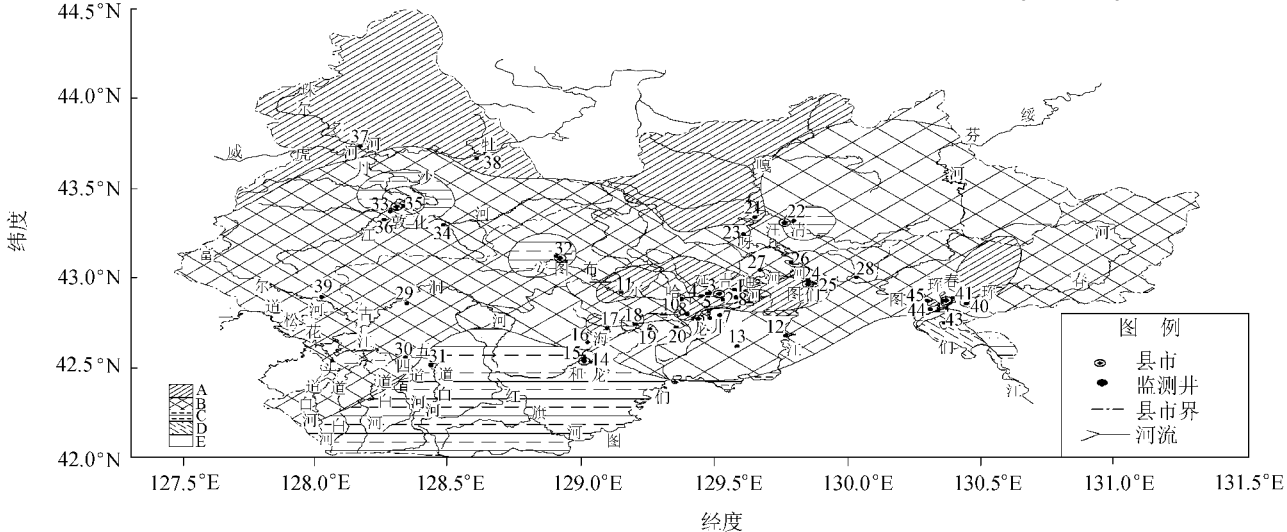


图 1 延边州地下水水质监测井分布及水环境污染空间变异特征

表 1 地下水环境监测指标相关系数矩阵

色度	pH 值	大肠菌群	细菌总数	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	Mn	Fe	F^-	Hd	COD_{Mn}	SO_4^{2-}	溶解性总固体
1.000													
0.093	1.000												
0.665	0.212	1.000											
0.790	0.384	0.841	1.000										
-0.204	-0.174	-0.186	-0.288	1.000									
-0.092	0.067	-0.212	-0.146	0.142	1.000								
0.384	0.050	0.189	0.287	0.138	0.390	1.000							
0.149	0.183	0.026	0.097	0.065	0.144	0.357	1.000						
0.934	0.046	0.649	0.783	-0.224	-0.083	0.303	0.130	1.000					
0.335	0.668	0.517	0.640	-0.079	0.246	0.224	0.140	0.327	1.000				
-0.163	-0.090	-0.165	-0.300	0.656	0.421	0.135	0.303	-0.175	0.011	1.000			
0.251	0.104	-0.027	0.048	-0.053	0.585	0.318	0.415	0.201	0.174	0.189	1.000		
-0.165	-0.023	-0.245	-0.256	0.423	0.299	-0.097	0.024	-0.167	-0.071	0.657	0.001	1.000	
-0.171	-0.058	-0.123	-0.257	0.660	0.432	0.182	0.312	-0.177	0.074	0.967	0.198	0.585	1.000

3.2 特征值分析

以相关系数矩阵为基础,通过特征值分析并采用 Jacobi 迭代法求得 R 的所有特征值^[8]、方差贡献率及累积贡献率(见表 2)。

表 2 相关矩阵特征值、贡献率、累积贡献率

主分量	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	主分量	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	4.39	31.35	31.35	8	0.41	2.90	94.74
2	3.30	23.58	54.93	9	0.24	1.69	96.43
3	1.55	11.04	65.97	10	0.23	1.62	98.05
4	1.44	10.27	76.24	11	0.13	0.95	98.99
5	0.90	6.41	82.65	12	0.07	0.48	99.47
6	0.78	5.56	88.21	13	0.05	0.36	99.83
7	0.51	3.63	91.85	14	0.02	0.17	100.00

表 3 方差极大化旋转主因子载荷矩阵因子

监测指标	1	2	3	4
色度	0.918	-0.137	0.201	-0.017
pH 值	0.030	-0.095	0.073	0.910
大肠菌群	0.834	-0.069	-0.123	0.284
细菌总数	0.862	-0.206	0.005	0.398
NO ₃ -N	-0.076	0.798	-0.020	-0.149
NO ₂ -N	-0.221	0.261	0.732	0.169
NH ₄ -N	0.361	0.073	0.634	-0.047
Mn	0.108	0.142	0.593	0.084
Fe	0.910	-0.140	0.158	-0.034
F ⁻	0.375	0.040	0.168	0.833
Hd	-0.103	0.922	0.260	-0.020
COD _{Mn}	0.030	-0.048	0.861	0.041
SO ₄ ²⁻	-0.158	0.750	-0.017	0.035
溶解性总固体	-0.087	0.906	0.281	0.028

特征值代表各主因子对诸环境指标总方差贡献的大小,由表 2 知,1~4 特征值累积贡献率达到 76.24%。取前 4 个特征值已能获取原数据变化的 75% 以上的信息,基本上较少损失原始信息且集中和代表了原始数据所反映的区域水环境污染的差异^[1]。故取前 4 个因子作为主因子,计算主因子载荷矩阵 A 。由于初始主因子载荷矩阵中有许多低、中等载荷,少有高载荷,载荷的分配不具有明显的向两极(±1 或 0)接近的趋势,不满足简单结构准则,因子解的效果不佳。需要再对初始主因子载荷矩阵进行方差极大化正交旋转^[9],取旋转收敛误差 $\epsilon = 10^{-6}$ 。经迭代运算,得到最终方差极大化旋转因子载荷矩阵因子(见表 3)。

利用表 3 的最终因子载荷矩阵和因子得分公式,求得 45 个监测点在 4 个主因子上的得分,结果见表 4。

依据载荷矩阵,选取载荷绝对值较大的为代表,把 14 个水质指标归为 4 个具有重要环境意义的环境指标组合的主因子,集中了全部信息的 76.24%。由表 2 和表 4 知,主因子 1 特征值为 4.39,贡献率为 31.35%,为最突出的一个综合因子,反映色度、大肠菌群、细菌总数、Fe 的信息和特征,它们均在主因子正轴方向具有高负载。主因子 2 特征值为 3.30,贡献率为 23.58%,主要代表 NO₃-N、Hd、SO₄²⁻、溶解性总固体的信息和特征,在正轴方向具有高负荷。主因子 3 特征值为 1.55,贡献率为 11.04%,主要代表

表 4 因子得分系数矩阵

监测点	F1	F2	F3	F4	监测点	F1	F2	F3	F4
1	0.550	1.173	-0.865	-0.015	24	0.125	2.080	-0.652	-0.367
2	-0.196	0.374	-0.428	-0.539	25	0.090	0.722	-0.248	-0.224
3	0.178	2.015	1.940	-0.181	26	-0.445	-0.763	-0.069	-0.595
4	0.688	1.135	-1.070	0.551	27	-0.402	-0.695	-0.481	-0.296
5	-0.281	-0.264	-0.457	-0.512	28	-0.436	-0.946	-0.281	-0.812
6	0.169	0.485	-0.753	-0.253	29	-0.208	-1.293	-0.365	-1.223
7	-0.375	-0.435	-0.459	-0.038	30	-0.456	-1.044	-0.097	-0.667
8	0.209	2.446	-1.048	-0.087	31	-0.644	-0.981	2.056	-0.010
9	-0.201	-0.822	-0.482	-0.670	32	-0.448	0.573	3.187	0.731
10	0.325	-0.265	-0.647	0.041	33	0.059	-0.192	1.721	-0.747
11	-0.155	0.255	-0.405	-1.114	34	-0.790	-1.162	-0.574	1.216
12	-0.240	-0.793	-0.307	-0.113	35	4.808	-0.675	1.193	0.075
13	0.666	-0.588	-0.624	0.371	36	-0.240	-0.277	-0.360	0.514
14	-0.495	-0.268	1.975	1.039	37	-0.368	0.229	0.052	-0.409
15	-0.852	-0.272	2.272	0.766	38	-0.166	1.061	-0.853	0.070
16	0.003	-0.528	-0.511	0.237	39	-0.427	-0.520	0.149	-0.551
17	-0.189	0.727	-0.239	-0.317	40	-0.349	-0.010	-0.460	-0.547
18	0.188	-0.870	-1.193	5.483	41	-0.367	-0.550	-0.357	-0.788
19	-0.350	0.289	0.082	-0.169	42	-0.491	2.813	0.243	1.037
20	-0.357	-1.338	-0.363	0.263	43	3.725	-0.527	0.149	-0.469
21	-0.393	-0.377	-0.445	-0.515	44	-0.152	1.104	-0.516	-0.097
22	-0.740	0.385	1.306	0.177	45	-0.124	-0.532	-0.534	0.117
23	-0.446	-0.881	-0.186	-0.363					

NO₂-N、NH₄-N、Mn、COD_{Mn} 4 项地下水指标,在主因子正轴上具有高负荷。主因子 4 特征值为 1.44,贡献率为 10.27%,主要代表了 pH 值、F⁻ 2 项地下水指标,在主因子正轴上具有高负荷。

3.3 因子得分

从表 3 和表 4 得出,如果某主因子所代表的水环境组合指标在因子正轴或者负轴上具有高负载,则因子得分的正值或者负值就越大,表明该因子代表的水环境指标超标愈严重。如果因子所代表的不同水环境指标分别在因子的正轴和负轴方向均有高载荷,那么因子得分正值或者负值越大,表明因子代表的正轴或者负轴高载荷的水环境指标超标愈严重。因子得分能够反映监测点污染的空间分布状况及程度。如表 4 中监测点 35 的主因子 1 的因子得分为 4.808,在因子正轴上显示高载荷,说明该监测点主因子 1 所代表的 4 项指标严重超标,水质污染严重;监测点 20 的主因子 2 的因子得分为 -1.338,在因子负轴上显示高载荷,说明该监测点主因子 2 所代表的 4 项指标超标严重,水质污染严重。

3.4 Ward 聚类

为了把握研究区地下水环境污染的空间变异规律,运用 Ward 聚类法对表 4 中因子得分数据集所包含的环境污染空间变化特征进行变异规律的聚类分析,经 44 步迭代运算,可以完成因子得分的聚类分析,并以此画出聚类谱系结构关系图(见图 2)。

4 结果分析

从图 2 可见,该区 45 个地下水环境质量单元可以划分为 5 个空间变化亚类(亚类 A、B、C、D、E),可将这 5 个亚类再归属于 I、II 两大类空间,下面具体分析该区域空间变异性的实际意义。

亚类 A:该类空间包括 18 个环境单元,即监测点 1、2、3、4、5、6、8、11、17、19、21、24、25、37、38、40、42、44,主要分布在该区的布尔哈通河、海兰河、琿春河、嘎呀河、珠尔多河、威虎河、牡丹江流域。该类区

域水环境特点是主因子 1 均处低值,说明该空间色度、大肠菌群、细菌总数、Fe 基本没有超标;主因子 2 在监测点 1、3、4、8、24、38、42、44 显示高值,说明该空间 NO₃-N、Hd、SO₄²⁻、溶解性总固体超标较严重;主因子 3 在监测点 3、4、8 显示高值,在监测点 1、6、38 也显示较高值,说明该空间 NO₂-N、NH₄-N、Mn、COD_{Mn} 有一定超标;主因子 4 只在监测点 11、42 显示高值,说明 pH 值、F⁻ 只在监测点 11、42 超标较多;该类空间综合为低污染空间区域。

亚类 B:该类空间包括 18 个环境单元,即监测点 7、9、10、12、13、16、20、23、26、27、28、29、30、34、36、39、41、45,在该区分布面积最广,主要分布在敦化、安图、龙井、延吉、汪清、图们、琿春、和龙的大部分地区。该类区域水环境特点是主因子 1、3 均低值,说明色度、大肠菌群、细菌总数、Fe、NO₂-N、NH₄-N、Mn、COD_{Mn} 基本没有超标;主因子 2 在监测点 20、28、29、30、34 显示高值,在监测点 9、12、23、26 值也不低,说明该类空间 NO₃-N、Hd、SO₄²⁻、溶解性总固体超标也较严重;主因子 4 只在监测点 28、29、34、41 显示较高值,其他监测点均为低值,说明该类空间 pH 值、F⁻ 只在个别监测点有污染,综合为较低污染空间。

亚类 C:该类空间环境包括 6 个环境单元,即监测点 14、15、22、31、32、33,主要分布在敦化、安图、汪清、和龙、琿春的局部地区。该类区域水环境特点是主因子 3 均处高值,说明该类空间环境 NO₂-N、NH₄-N、Mn、COD_{Mn} 超标严重;主因子 1 在监测点 15 和 22 显示较高值,表明色度、大肠菌群、细菌总数、Fe 超标偏高;主因子 2 只在监测点 31 显示较高值,表明 NO₃-N、Hd、SO₄²⁻、溶解性总固体超标偏高;主因子 4 只在监测点 22 和 31 显示低值,说明 pH 值、F⁻ 超标较严重;该类空间综合为较严重污染空间。

亚类 D:该类空间包括 1 个环境单元,即监测点 18,分布在龙井,面积不大。该类区域水环境特点是主因子 2、3、4 普遍高值;只有主因子 1 显示低值;可知 pH 值、F⁻ 超标最严重,NO₂-N、NH₄-N、Mn、COD_{Mn}

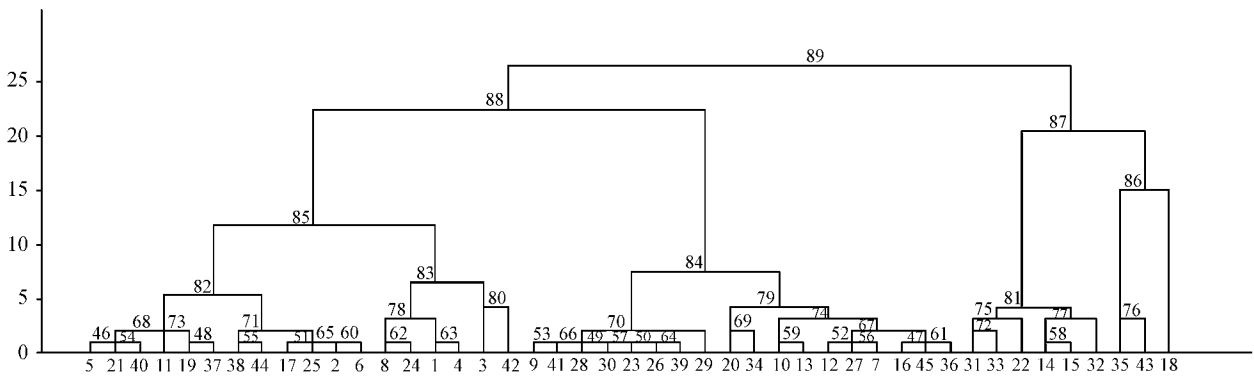


图 2 聚类谱系结构关系

超标也很严重, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 Hd 、 SO_4^{2-} 、溶解性总固体超标较严重, 综合为较严重高污染空间。

亚类 E: 该类空间包括 2 个环境单元, 即监测点 35、43, 分别分布在敦化和珲春, 所占面积不大。从图 1 可见, 该区域监测点单元的聚类距离水平值较大。该类区域水环境特点是主因子 1 均处高值, 表明色度、大肠菌群、细菌总数、 Fe 超标严重; 主因子 2 值也偏高, 说明 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 Hd 、 SO_4^{2-} 、溶解性总固体超标也较严重; 监测点 35 的主因子 3 显示高值, 说明该监测点的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 Mn 、 COD_{Mn} 超标严重, 综合为严重高污染空间。

根据上述分析, 亚类 A、B 可划入 I 类低污染空间区域, 亚类 C、D、E 归入 II 类高污染空间区域, 并绘制出区域地下水环境污染空间变异特征图 (见图 1)。

该区浅层地下水由于水位埋深较小易受污染。从图 1 可以看出该区浅层地下水有一部分污染严重, 呈零星状分布; 低污染区域在该区占主要份额。亚类 A 多分布于山区, 受人类活动影响较小, 色度、大肠菌群、细菌总数、 Fe 无超标。延吉及其周边地区 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、溶解性总固体超标。含氮溶解物含量超标的主要原因是有机化肥的大量使用间接污染了浅层地下水; 溶解性总固体超标主要是城市工业废水、生活污水和城市垃圾中生物降解的有机污染物及酸碱污染产生的 CO_2 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 F^- 等。从图 1 可见, 亚类 B 在该区分布最广, 该类中县市及其周边 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、总硬度、 SO_4^{2-} 、溶解性总固体超标, 原因同延吉及其周边地区。亚类 C、D、E 在该区分布相对面积较小。亚类 C 主要分布于城区, $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 Mn 、 COD_{Mn} 超标严重, 和生活污水、城市垃圾量大有关。亚类 D 和亚类 E 污染呈零星分布, 主要是由于敦化、珲春市局部工业污染源造成的。

5 结论及建议

5.1 结论

a. 通过上述分析可知, 延边州浅层地下水水质存在显著的空间变异性。亚类 A 多分布在山区、珲春部分地区、延吉及其周边地区; 亚类 B 在该区分布最广, 在 7 个县市均有大面积分布; 亚类 A、B 归属于 I 类低污染空间区域。亚类 C、D、E 在该区分布相对面积较小, 亚类 C 主要分布于城区; 亚类 D 和亚类 E 分别在敦化、珲春呈零星分布; 亚类 C、D、

E 归属于 II 类高污染空间区域。该区污染主要是由于城市工业废水、生活污水及城市垃圾所引起的污染。利用区域地下水质量空间变异性分析结果可为该区地下水环境整治与规划管理提供更充分的依据。

b. 本文根据现有资料结合实际选取的 45 个监测点的 14 项指标进行分析, 如监测点更多, 监测指标更全, 分析结果将更能反映实际。

c. 本次采用 R 型主因子分析法和 Ward 聚类法对研究区浅层地下水的水质进行分析, 地下水环境质量空间变异性明显, 结果可靠, 值得推广到其他地区。

5.2 建议

为防止该区地下水污染更加严重, 可以从加强地表水污染的防治工作、科学施肥、控制浅层地下水对深层地下水的污染、加强地下水水质动态监测工作等方面入手。此外, 积极预防也要与科学治理相结合, 除了积极预防水污染外, 更要对已污染的水资源进行治理, 加强水环境保护, 合理的水质目标和相应的地方水环境质量标准, 使水资源治理更加有效。

参考文献:

- [1] 夏军. 区域水环境及生态环境质量评价——多级关联评估理论与应用[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999: 99-121.
- [2] 陈上及, 姚混予. 中国近海海洋水文气候区划[J]. 海洋学报, 1995, 17(2): 1-11.
- [3] 徐海量, 宋郁东, 陈亚宁, 等. 应用因子分析研究塔里木河下游生态环境的退化[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 21-25.
- [4] 郭建辉, 杨磊, 程新宝. 上海市环境空气质量影响参数主成分分析[J]. 科技论坛, 2005(15): 36-41.
- [5] 方开泰, 潘恩沛. 聚类分析[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 60-69.
- [6] 廖翠萍, 颜涌捷, 吴创之. 生物质中元素分布特征的聚类分析研究[J]. 煤炭转化, 2004, 27(1): 89-95.
- [7] 郝黎仁, 樊元, 郝哲欧, 等. SPSS 实用统计分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 280-289, 304-315.
- [8] 陈上及, 王继瑞. 海洋数据处理分析方法及其应用[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 298-311.
- [9] 王学仁. 地质数据多变量统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 269-283.

(收稿日期 2006-03-20 编辑 徐娟)