

吉林西部地区第四系潜水水质
影响因素的 *R* 型因子分析

朱 琳, 苏小四

(吉林大学 水资源与环境研究所, 吉林 长春 130026)

[摘要] 利用 *R* 型因子分析法对吉林西部地区第四系潜水样的水化学数据进行分析, 识别出影响地下水化学组成的 4 个主因子。因子 1 以 Na^+ , HCO_3^- 和 F^- 为主, 揭示了土壤的溶滤作用对地下水化学成分的影响; 因子 2 以 Cl^- , SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 为主, 反映蒸发浓缩作用对地下水化学成分的影响; 因子 3 以 K^+ 和 pH 值为主, 代表地下水的弱碱环境地球化学背景; 因子 4 以 NO_3^- 为主, 反映了人类活动(化肥和农药的广泛施用、大中城市的生活污水和工业污水的污染)对地下水化学成分的影响作用。

[关键词] *R* 型因子分析; 西部地区; 吉林省; 地下水水质; 溶滤作用; 蒸发浓缩作用; 人类活动

[中图分类号] P641.3 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2006)01-0051-06

Application of *R* mode Analysis in Determining
Influencing Factors of Quaternary Unconfined
Groundwater Quality in West Area of Jilin Province

ZHU Lin, SU Xiao si

(Institute of Water and Environment, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China)

Abstract: This paper utilized *R* mode method to analyze hydrogeochemical data of 73 groundwater samples in Jilin province. Four main factors which affect the quality of groundwater are recognized. The first main factor mainly composed of Na^+ , HCO_3^- and F^- , it shows the influence of the leaching in soil. The second factor is made up of Cl^- , SO_4^{2-} and Ca^{2+} , which reflects the evaporation of groundwater. The third main factor is composed of K^+ and pH, which represents the chemical background of unconfined groundwater, for instance, water rock reaction and weak alkali environment. The forth main factor is NO_3^- and Fe^{3+} , which reflects the impacts of human activities such as the widely use of fertilizer and pesticide, the pollution of sewage from life and industry.

Key words: *R* mode analysis; West area of Jinlin Province; groundwater quality; leaching of soil; evaporation of groundwater; impacts of human activities

0 引言

地下水水质是地下水的重要特征之一,也是地下水资源评价的主要内容,其为制定地下水合理开

发利用方案提供重要依据。地下水化学成分的形成和分布是地形地貌、气象、地质和水文地质条件及人类活动共同作用的结果,有关地下水中化学成分的形成及其影响因素的研究一直是水文地球化学的研究重点。水文地球化学过程是一个复杂的

[收稿日期] 2005 04 02

[基金项目] 吉林省社会发展重点项目(20020401)

[作者简介] 朱琳(1980-),女,江苏泰兴人,博士研究生,从事水文地质与地下水信息系统研究。

动力学过程, 包括复杂的水岩作用, 涉及多种组分的迁移, 需要用许多变量才能全面地刻画所研究的地质现象。研究对象中涉及的变量越多, 就越难以揭示变量间的相互关系, 也不易识别出主要影响因素^[1]。作为统计分析方法中的因子分析法通过较少的具有代表性的变量组合因子来概括多变量所提供的信息, 找出影响观测数据的主要因素, 这样既减少因子数目, 又能够把握研究对象之间的相互关系, 为研究水化学形成的因素提供了很好的研究方法。

吉林省西部地域广阔, 自然条件和地质、水文地质条件复杂, 导致研究区内地下水化学类型复杂多样, 在自然和人类活动的影响下, 与地下水有关的生态和环境问题也十分复杂^[2]。因此, 准确了解该区地下水化学成分的影响因素及其分布特征, 对于地下水的保护和利用至关重要。笔者在对该地区第四系潜水水质数据进行分析研究的基础上, 利用 R 型因子分析法识别出影响地下水化学成分的主要因素。

1 研究区概况

研究区位于吉林省西部地区, 面积约 4.7×10^4 km², 是中国湿润的东部季风区和干旱的内陆之间的过渡地带, 也是中国重要的农牧交错带地区。自东部的半湿润气候, 逐渐过渡到西部、西南部的半干旱气候、干旱气候, 是中国重要的农牧业、商品粮基地和石油化工基地。

1.1 地质、水文地质概况

按地貌类型研究区划分为平原区(I)和低山

丘陵区(II), 总地势东南与西北高, 中央及东北低。平原区又可分为东部高平原(I₁)、松拉河间地块(I₂)、河谷平原(I₃)、中部低平原(I₄)和西部山前倾斜平原(I₅)5个地貌单元(图1)。本次以平原区内第四系潜水为主要研究对象, 该含水层分布范围广, 是地下水的主要赋存场所。松散岩层孔隙潜水主要赋存于中、上更新统及全新统细砂岩中(局部有砂砾石层), 上覆亚砂土, 透水性好, 受自然条件变化和人类活动影响较大。除山前倾斜平原(I₅)外, 整个平原区地形平缓, 区域地下水力坡度小, 地下水径流较为缓慢, 因而地下水运动以垂直运动为主, 水平运动为次。

1.2 环境地质问题

本区生态环境极其脆弱, 旱、涝、盐、沙、地方病等环境地质灾害严重。该区土壤盐碱化以苏打盐碱化为主, 碱化现象严重(图2), 近年来土地盐碱化呈加速发展趋势, 面积增大, 程度加重, 重度盐碱化土地占盐碱化总面积比例由1958年的26.9%增至1999年的43.7%^[3]。

1.3 地下水水化学特征

本区潜水水化学常量组分以Na⁺, HCO₃⁻为主, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁺次之, 水化学类型按苏林分类主要为NaHCO₃型水, 其次为CaCl₂型水和MgCl₂型水^[4]。东部高平原和西部山前平原区地下水交替作用强烈, 水化学作用以溶滤为主, 元素易分散且不易积累, 地下水贫碘缺氟。盆地中部的低平原区地下水运动滞缓, 潜水蒸发浓缩作用强烈, 地下水中元素易富集^[5], 形成高氟水(1~3 mg/L)和土壤盐渍化。河谷平原潜水由于其弱还原环境, 径流滞缓而铁含量普遍很高。由于人为污

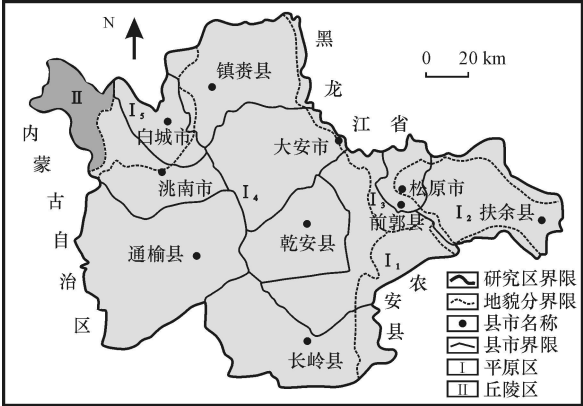


图1 研究区地貌分区

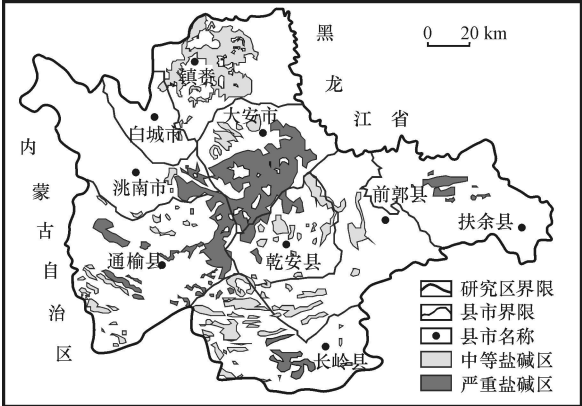


图2 土壤盐碱化分布

Fig.1 Physiognomic Distribution of the Study Area

Fig.2 Distribution of Soil Salinity with the Purple and Green Color Correspond to Heavier and Media Salinity, Respectively

染,一些大中城市正在改变着地下水的化学组分和水化学类型。

2 因子分析方法简介

因子分析是主成分分析的推广,是从研究相关矩阵内部的依赖关系出发,把一些具有错综复杂关系的变量归结为少数几个综合变量的一种多变量统计分析方法。该方法利用数学工具,用较少具有代表性的因子来概括多变量所提供的信息,找出影响观测数据的主要因素。因子分析包括 *R* 型因子分析和 *Q* 型因子分析,前者是研究变量(指标)间相互关系,后者则研究样品间组合、相似关系。做因子分析时,要提取的第一个公因子应是对总方差贡献最大的,去除因子 1 影响后,提取剩余因子中方差贡献最大的因子为第二公因子。照此直到把所有公因子方差都分解完为止。

文中应用 *R* 型因子分析,将原始数据中(表 1)的多个变量综合为少数几个因子,从而再现原始变量因子之间的相关关系^[6-9]。主要步骤包括:

- (1)将原始数据标准化。
- (2)建立变量的相关系数 *R*。
- (3)求 *R* 的特征根及其相应的单位特征向量。
- (4)对因子载荷阵施行方差极大旋转。
- (5)计算因子得分详见文献[1, 10-13]。

3 第四系潜水水质的 *R* 型因子分析

对本区 2001 年 73 个潜水样中 10 个化学变量进行 *R* 型因子分析,样品测试数据见表 1,依据文

献[14],吉林西部第四系潜水符合饮用水标准,但是有些水样化学成分的最大浓度值仍然超出国家标准,例如 NO₃⁻, F⁻ 的质量浓度最大值超过饮用水标准的 5 倍和 2.5 倍。

相关系数矩阵是因子分析的出发点,依据公式求出水化学成分间的相关系数见表 2。

据特征值方差累计贡献百分比确定选取主成分的个数(表 3)。本次选取主因子个数为 4,累积方差贡献可达 75.8%,即可反映样本总体 75.8% 的信息量,因子载荷矩阵见表 4。

由于因子载荷阵的不惟一性,采用方差极大旋转(varimax rotation)法对因子轴做适当旋转,使每个变量仅在一个公共因子上有较大的载荷,而在其余公共因子上的载荷比较小,从而方便对实际问题进行分析,相应的方差极大旋转因子荷载矩阵见表 5。

表 1 吉林省西部地区水化学成分统计
Tab. 1 Statistic of Hydrochemical Components in the West Area of Jilin Province

项目	平均	最小	最大	中位数	标准差
pH 值	7.59	7.00	8.30	7.60	0.32
Ca ²⁺	103.20	19.40	436.00	82.90	68.10
K ⁺	2.26	0.097	40.00	1.08	5.23
Na ⁺	98.85	4.90	517.00	73.00	90.25
Cl ⁻	76.35	0.00	373.00	50.80	84.34
SO ₄ ²⁻	70.62	0.00	265.00	53.50	65.63
HCO ₃ ⁻	439.18	121.00	1 270.00	377.00	256.67
Fe ³⁺	0.52	0.00	6.57	0.11	1.19
NO ₃ ⁻	7.78	0.06	111.00	2.57	15.62
F ⁻	0.94	0.16	2.57	0.82	0.56

表中为 73 个水样中 10 个化学变量 ρ_B/(mg·L⁻¹)。

表 2 吉林省西部地区水化学成分间的相关系数

Tab. 2 Correlation Coefficient of the Hydrochemical Components in the Area West of Jilin Province

项目	pH 值	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Fe ³⁺	NO ₃ ⁻	F ⁻
pH 值	1	0.061	0.317	-0.177	-0.155	-0.243	-0.152	-0.284	-0.263	0.027
Ca ²⁺		1	0.018	0.063	0.424	0.337	0.128	0.011	0.148	-0.097
K ⁺			1	-0.057	-0.082	-0.048	-0.075	-0.067	-0.107	-0.049
Na ⁺				1	0.698	0.569	0.766	0.388	0.129	0.592
Cl ⁻					1	0.488	0.444	0.257	0.486	0.361
SO ₄ ²⁻						1	0.473	0.500	0.044	0.294
HCO ₃ ⁻							1	0.367	-0.028	0.626
Fe ³⁺								1	-0.165	0.246
NO ₃ ⁻									1	0.001
F ⁻										1

表 3 水化学成分相关矩阵 R 的特征值及方差累计贡献率

Tab. 3 Eigenvalues and Cumulative Contribution Ratio of Variance of the Correlative Matrix of Hydrochemical Components

序号	特征值	方差贡献率 /%	累计贡献率 /%
1	3. 571 52	35. 715 22	35. 715 22
2	1. 546 21	15. 462 10	51. 177 32
3	1. 348 54	13. 485 38	64. 662 69
4	1. 109 25	11. 092 52	75. 755 22
5	0. 807 17	8. 071 69	83. 826 91
6	0. 506 64	5. 066 40	88. 893 31
7	0. 388 55	3. 885 46	92. 778 77
8	0. 370 70	3. 707 05	96. 485 82
9	0. 260 74	2. 607 41	99. 093 23
10	0. 090 68	0. 906 77	100

表 4 水化学成分的因子载荷矩阵

Tab. 4 Factor Load Matrix of Hydrochemical Elements

项目	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	共同度	特殊方差
pH 值	-0.315 97	0.359 09	0.706 71	-0.127 37	0.744 45	0.255 55
Ca ²⁺	0.270 01	-0.467 35	0.526 60	0.470 97	0.790 45	0.209 55
K ⁺	-0.154 77	0.282 16	0.627 28	0.100 90	0.507 23	0.492 77
Na ⁺	0.890 86	0.137 46	0.055 79	-0.195 26	0.853 76	0.146 24
Cl ⁻	0.777 60	-0.401 59	0.264 80	-0.110 59	0.848 29	0.151 71
SO ₄ ²⁻	0.747 04	-0.020 84	0.037 99	0.431 57	0.746 20	0.253 80
HCO ₃ ⁻	0.806 61	0.295 64	0.030 92	-0.136 6	0.757 64	0.242 36
Fe ³⁺	0.559 79	0.277 46	-0.312 97	0.485 0	0.723 52	0.276 48
NO ₃ ⁻	0.214 2	-0.778 81	0.039 29	-0.409 61	0.821 76	0.178 24
F ⁻	0.639 22	0.409 50	0.056 41	-0.450 28	0.782 22	0.217 78
特征值	3.571 52	1.546 21	1.348 54	1.109 25		
累计贡献率	0.357 15	0.511 77	0.646 63	0.757 55		

表 5 水化学成分的方差极大旋转因子荷载矩阵

Tab. 5 Maximal Variance Revolving of the Loaded Matrix of Hydrochemical Components

项目	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
pH 值	-0.040 23	0.091 85	0.855 12	-0.056 25
Ca ²⁺	-0.072 72	-0.869 47	0.154 15	-0.073 66
K ⁺	-0.028 57	-0.116 67	0.696 18	0.090 19
Na ⁺	0.884 88	-0.230 52	-0.127 45	0.036 79
Cl ⁻	0.595 48	-0.606 72	-0.148 63	-0.321 71
SO ₄ ²⁻	0.453 37	-0.605 37	-0.207 50	0.362 12
HCO ₃ ⁻	0.839 04	-0.132 75	-0.062 48	0.179 25
Fe ³⁺	0.341 10	-0.241 87	-0.335 77	0.660 25
NO ₃ ⁻	0.098 17	-0.286 84	-0.329 15	-0.788 36
F ⁻	0.864 66	0.171 07	0.072 38	0.009 31
方差贡献率	2.928 48	1.753 40	1.551 27	1.342 37
累计贡献率	0.292 85	0.468 19	0.623 32	0.757 55

4 R 型因子分析结果讨论

取方差贡献最大的 4 个因子作为主成分, 组成评判对象的因素集, 4 个因子所表达的信息量占总体信息量的 75.8%(表 6)。

表 6 吉林省西部地区水化学 R 型因子载荷

Tab. 6 Load of R mode Factor about Hydrogeochemical Data in the West Area of Jilin Province

变量	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
pH 值			0.855 12	
Ca ²⁺		-0.869 47		
K ⁺			0.696 18	
Na ⁺	0.884 88			
Cl ⁻	0.595 48	-0.606 72		
SO ₄ ²⁻		-0.605 37		
HCO ₃ ⁻	0.839 04			
Fe ³⁺				0.660 25
NO ₃ ⁻				-0.788 36
F ⁻	0.864 66			
累计贡献率 /%	29.3	46.8	62.3	75.8

主因子 1 中以 Na⁺, HCO₃⁻ 和 F⁻ 为主, 其贡献率为 29.3%, 表明土壤和岩石的溶滤作用对地下水化学成分的影响。从表 2 可以看出, Na⁺, HCO₃⁻ 与 F⁻ 的相关性较好。研究区四周的大兴安岭、小兴安岭和长白山广泛分布着年轻火山岩, 含铝硅酸盐火成岩风化, 溶解于地表和地下径流中, 汇集到平原或低洼地区, 从而形成了钙、镁、钾和钠等组分。此外, 由于区内普遍存在土壤盐碱化现象, 以苏打盐碱化为主, 碱化现象严重, 土壤中可溶性盐以 NaHCO₃ 为主^[15-16], 这些可溶性盐在溶滤过程中影响着地下水的化学成分, 从而出现水中化学成分以 Na⁺ 和 HCO₃⁻ 为主的苏打水。地下水碱性增强, 导致方解石溶解度降低、水中钙离子降低、地下水中 F⁻ 的累积。依据因子载荷强度, 也可以看出潜水含水层水化学类型以重碳酸型水为主, 局部分布有氯化物型水。

主因子 1 的得分空间分布图(图 3)与盐碱化程度间(图 2)有很好地对应性, 主因子得分越高, 土壤盐碱化越严重。吉林西部洮儿河最上游的丘陵地区到洪冲积扇(白城市)不发生盐碱化, 洮儿河冲积扇形地(I₅)前缘(镇赉县), 土壤盐碱化逐渐发育, 这主要因为地形变缓, 水循环交替较弱。由扇形地

前缘至低平原 (I₄), 由于沉积物岩相变为湖相, 潜水含水层主要由砂、亚砂组成, 水平运动减弱, 重度土壤盐碱化地区主要出现在通榆、大安和长岭局部地带, 在河谷平原 (I₃) 一带也出现土壤盐碱化, 但是发育程度相对小些。而东部高平原 I₁ (前郭) 和松拉河间地块 I₂ (扶余) 未发生盐碱化。对比已有的土壤盐碱化图 (见图 2), 图中深色部分为重度盐碱区, 次深色部分则为中轻度区, 因子得分图与之相近。

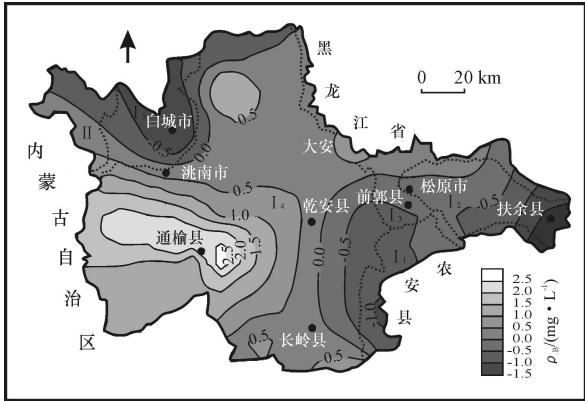


图 3 主因子 1 的因子得分

Fig. 3 Distribution of Scores for Factor 1; the Darker and Lighter Colors Correspond to Higher and Lower Values Respectively

图 4 显示在广大低平原区氟离子富集, 在低平原大部地区 (通榆和乾安) 和河间地块 (大安) 的局部地区含氟离子质量浓度为 (1~3) mg/L, 西部山前倾斜平原 I₅ (洮北区)、东部高平原 I₁ (前郭一带)、松拉河间地块 I₂ (扶余县) 则较低。主因子 1 的因子得分图和氟离子浓度空间分布 (见图 3, 图 4) 具有很好的相似性, 且 F⁻ 与 Na⁺ 和 HCO₃⁻ 的相关系数较大, 佐证了高氟水区的形成与土壤的盐碱化有关, 半干旱弱碱性沉积环境有利于氟离子的富集。

因子 2 以 Cl⁻, SO₄²⁻ 和 Ca²⁺ 为主, 贡献率为 13.5%, 表明蒸发浓缩作用对地下水化学成分的影响。研究区属于半干旱地区, 除山前倾斜平原外, 平原区地形平缓, 含水层岩性为冲湖积相的粉细砂及细砂, 水力坡度小, 地下水径流滞缓, 垂直蒸发作用显著增强, 是主要的排泄途径, 地下水盐分累积, 从而形成高矿化度咸水, 水质类型为氯化物硫酸盐型。

因子 3 以 K⁺ 和 pH 值为主, 贡献率为 15.5%, 两者的相关性不是十分紧密, 相关系数仅为 0.32,

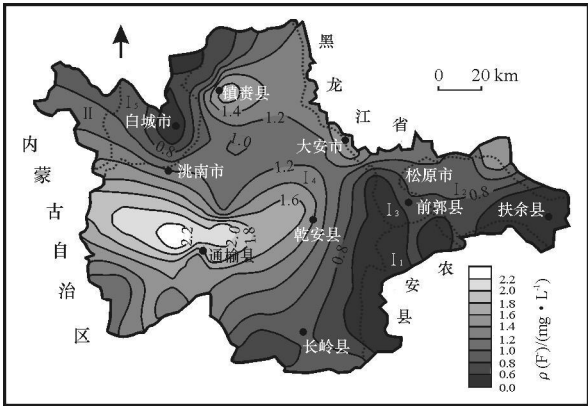


图 4 氟离子浓度空间分布

Fig. 4 Distribution of Florid Concentration; the Darker and Lighter Colors Correspond to Lower and Higher Values Respectively

代表地下潜水的地球化学背景, 周围火山岩中含 K 矿物是钾长石, 在水岩作用下 K⁺ 溶解于地下水中, 并随着地下径流汇集到研究区, 区内地下水 pH 值为 7~8.3, 平均值为 7.59, 显示弱碱性环境。

因子 4 以 NO₃⁻ 和 Fe³⁺ 为主, 占总变量的 13.5%, 反映人类活动对地下水化学成分的影响。化肥和农药的广泛施用为促进农作物增产的同时, 也导致水土出现严重的硝酸盐污染。实际上, 只有不超过 50% 的氮肥可被植物吸收, 其余绝大部分或滞留于土壤中, 或被农田排水和地表径流排到地下水中。同时, 生活污水的排放及大面积的污水灌溉也引起地下水中 NO₃⁻ 浓度升高^[17]。NO₃⁻ 离子浓度分布图 (图 5) 显示, 白城市和大安市局部地区地下水 NO₃⁻ 离子质量浓度超出饮用水标准 (大于 20 mg/L), 导致局部地区地下水出现硝酸盐污染。

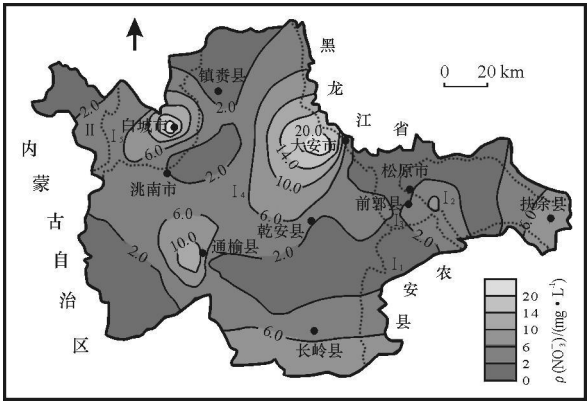


图 5 硝酸根离子浓度空间分布

Fig. 5 Distribution of Nitrate Concentration; the Darker and Lighter Colors Correspond to Lower and Higher Values Respectively

通常 N 循环中影响硝酸盐浓度的反应有硝化和反硝化作用,通常可留下一些说明发生反应及其程度的地球化学“印痕”,因子 4 中以 NO_3^- 和 Fe^{3+} 为主,表明地下水含水层可能处于氧化环境。

5 结论

通过对吉林西部地区第四系潜水的水化学数据进行 *R* 型主因子分析,得出以下结论:

(1)土壤和岩石的溶滤作用是形成区内地下水化学成分的主要影响因素,表现为地下水化学组分中 Na^+ , HCO_3^- 和 F^- 组合,该因子得分高低直接指示了盐碱化程度的严重程度,且高氟水的形成与土壤的盐碱化有关。

(2)高矿化度咸水的形成与本区的干旱半干旱气候条件、广大平原区地下水水平交替滞缓和蒸发浓缩作用密切相关。

(3)地下水中 NO_3^- 组分反映了人类活动(如化肥和农药的广泛施用、大中城市的生活污水和工业污水的污染)对地下水化学成分的影响。

[参 考 文 献]

- [1] 杨毅恒. 多维地学数据处理技术与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 王雁林, 王文科, 杨泽元, 等. 渭河流域陕西段水资源与生态环境保护[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 79 - 84.
- [3] 徐白山, 田 钢, 曾昭发, 等. 白城地区盐碱地分划界的地质雷达方法研究[J]. 长春科技大学学报, 2001, 22(2): 408 - 411.
- [4] 刘春国, 段长春, 曹玉清. 含氟初始风化水化学组成的模型研究[J]. 长春地质学院学报, 1995, 25(4): 423 - 427.
- [5] 周福俊, 李绪谦, 杜全友. 水文地球化学[M]. 长春: 吉林大学

出版社, 1993.

- [6] 王广才, 王秀辉, 李竞生, 等. 平顶山矿区矿井突(涌)水水源判别模式[J]. 煤田地质与勘探, 1998, 26(3): 47 - 50.
- [7] 李 锋, 李天杰. 南极长城站地区西湖水化学组成影响因子分析[J]. 极地研究, 1997, 9(4): 268 - 272.
- [8] 刘兴起, 蔡克勤, 余升松. 基于 Pitzer 模型的茶卡盐湖卤水及盐类矿物形成的地球化学模拟[J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33(3): 247 - 254.
- [9] 李贤庆, 侯读杰, 柳常青, 等. 鄂尔多斯中部气田下古生界水化学特征及天然气藏富集区判别[J]. 天然气工业, 2002, 22(4): 10 - 14.
- [10] Nicolaos Lambrakis, Andreas Antonakos, George Panagopoulos. The Use of Multicomponent Statistical Analysis in Hydrogeological Environment Research [J]. Water Research, 2004, 38(7): 1862 - 1872.
- [11] Juan Carlos Cerón, Rosario Jiménez Espinosa. Numerical Analysis of Hydrogeochemical Data: A Case Study (Alto Guadalupe, Southeast Spain) [J]. Applied Geochemistry, 2000, 15(7): 1053 - 1067.
- [12] Rajesh Reghunath, Sreedhara Murthy T R, Raghavan B R. The Utility of Multivariate Statistical Techniques in Hydrogeochemical Studies: An Example from Karnataka, India [J]. Water Research, 2002, 36(10): 2437 - 2442.
- [13] Liu C W, Lin K H, Yi M K. Application of Factor Analysis in the Assessment of Groundwater Quality in A Blackfoot Disease Area in Taiwan[J]. The Science of the Total Environment, 2003, 313(1/3): 77 - 89.
- [14] GB/T14848 93. 地下水质量分类指标[S].
- [15] 宋长春, 邓 伟. 吉林西部地下水特征及其与土壤盐渍化的关系[J]. 地理科学, 2000, 20(3): 246 - 250.
- [16] Dehaan R L, Taylor G R. Field derived Spectra of Salinized Soils and Vegetation as Indicators of Irrigation induced Soil Salinization[J]. Remote Sens Envir, 2002, 80(3): 406 - 417.
- [17] Nkotagu H. Origins of High Nitrate in Groundwater in Tanzania [J]. Journal of African Earth Science, 1996, 21(4): 471 - 478.