

利用因子分析确定岩溶地下河系统水质的影响因素

蒋勇军^{1,2}, 吴月霞¹, Chris Groves², 袁道先^{1,3}, Pat Kambesis², 李林立¹, 张 贵⁴

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715;

2. Department of Geography and Geology, Western Kentucky University, Bowling Green 42101;

3. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部岩溶动力学开放研究实验室, 桂林 541004;

4. 云南省地质调查院, 昆明 650041)

摘要: 根据云南南洞地下河系统 2008 年旱季的水化学分析结果, 利用因子分析方法探讨地下水水质的影响因素及程度, 结果表明: 流域地下水成分变动范围较大, 具有明显的空间变异性; 地下水水质受人类活动、水岩作用过程和土壤等自然因素的共同影响, 三个因素能够解释地下水水质形成的 79%, 其中人类活动是主要影响因素; 地下水中的 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 主要受人类活动特别是农业和生活废水等因素的控制, Ca^{2+} 主要是水-岩作用的产物, 但也受人类活动的影响, pH 值、电导率受水岩作用过程和人类活动的影响, Mg^{2+} 、 HCO_3^- 受土壤 CO_2 含量和水-岩作用过程的共同影响。

关键词: 地下水水质; 地下河; 人类活动; 自然过程; 因子分析

中图分类号: P641.3; X142

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2009)04-0001-07

地下水水质受水岩作用过程、大气和土壤的输入以及人类活动等因素的共同影响^[1~12]。岩溶水文系统是一个发育于可溶岩含水层中的脆弱水文系统, 含水层类型、水-岩作用等地球化学过程及人类活动对其地下水水质产生深刻的影响。然而要区分地球化学过程等自然因素和土地利用等人文因素对地下水水质的影响十分困难, 一直是水文地质学、环境学等领域研究的热点和前沿领域^[6, 13]。

因子分析方法是通过对地下水化学数据的分类、降维处理, 提取主要的影响因子, 根据因子在各离子上的载荷来区分自然过程和人类活动等对地下水水质的影响以及影响强度^[2, 14~17]。

本文以云南南洞岩溶地下河系统为研究对象, 利用水化学数据和因子分析方法探讨地下水水质的影响因素及影响强度, 为岩溶区水资源的合理开发利用与保护以及土地利用规划提供科学依据。

1 研究区概况

南洞地下河流域位于云南省东南部, 地理位置为 $103^{\circ}12' \sim 104^{\circ}43' \text{E}$, $23^{\circ}22' \sim 23^{\circ}44' \text{N}$, 流域面积 1618 km^2 , 气候为旱、雨两季分明的亚热带高原季风气候, 多年平均气温 19.8°C , 多年平均降水量 830 mm ; 出露地层以三叠系的地层为主, 其中碳酸盐岩面积 950 km^2 , 占流域面积的 58.7% ; 鸣就石洞至南洞为地下河主干道, 全长 75 km (图 1), 平均流量 $9.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2 数据来源与研究方法

2008 年 1 月在流域取得 42 个地下水样和 15 个地表水样(地表河、水库) (图 1~2), 野外用 Multiline P3 pH/LF 和碱度硬度计测定地表水和地下水 pH、EC 和 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 的浓度, 然后取 2 瓶 1000 mL 的水样, 带回实验室后分析 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Cl^- 成分, Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 用 ICP 分析仪完成, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Cl^- 用离子色谱分析仪完成, 分析方法采用国家水质分析的标准方法, 估计误差为 5% 。

土地利用数据根据《全国土地利用现状调查技术规程》规定的土地利用分类系统, 解译流域 2006 年的 TM 影像, 并经过野外的详细调查得到(图 2)。水文地质数据于 2006 年 3~12 月通过 15 万野外详细调查得到。统计分析和因子分析在 SPSS11.0 软件中完成; 空间插值分析利用 ArcGIS 的地统计分析模块完成, 插值方法为普通 Kriging。

收稿日期: 2008-05-12; **修订日期:** 2008-10-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2008CB417208); 中美合作项目“ The China Environmental Health Project ”; 岩溶动力系统开放实验室开放项目(kdl2008-06); 桂科能项目(0842008)联合资助

作者简介: 蒋勇军(1968-), 男, 博士后, 副教授, 主要从事资源环境与 GIS 应用等方面的研究。

E-mail: jiangyj@swu.edu.cn

包括含钠盐的海相沉积物和岩盐矿床的溶解、离子置换、生活废水、化肥以及大气降水^[5,6,15,19]。

地下水中 K^+ 的含量为 $0.1 \sim 66.4 \text{ mg/L}$, 变异系数很大(131%), 表现出强烈的空间变异性。 K^+ 的来源主要是含钠岩石的溶解^[1], 此外, 离子置换、化肥、生活废水以及大气降水也是 K^+ 的重要来源^[20]。

地下水中 HCO_3^- 含量的变动范围为 $140 \sim 439.1 \text{ mg/L}$, 变异系数较小(24.5%), 表现出较小的空间变异性。 HCO_3^- 的主要来源是各种碳酸盐岩的溶解和土壤、大气中 CO_2 的溶解。

地下水中 Cl^- 的含量为 $1 \sim 131.9 \text{ mg/L}$, 变异系数

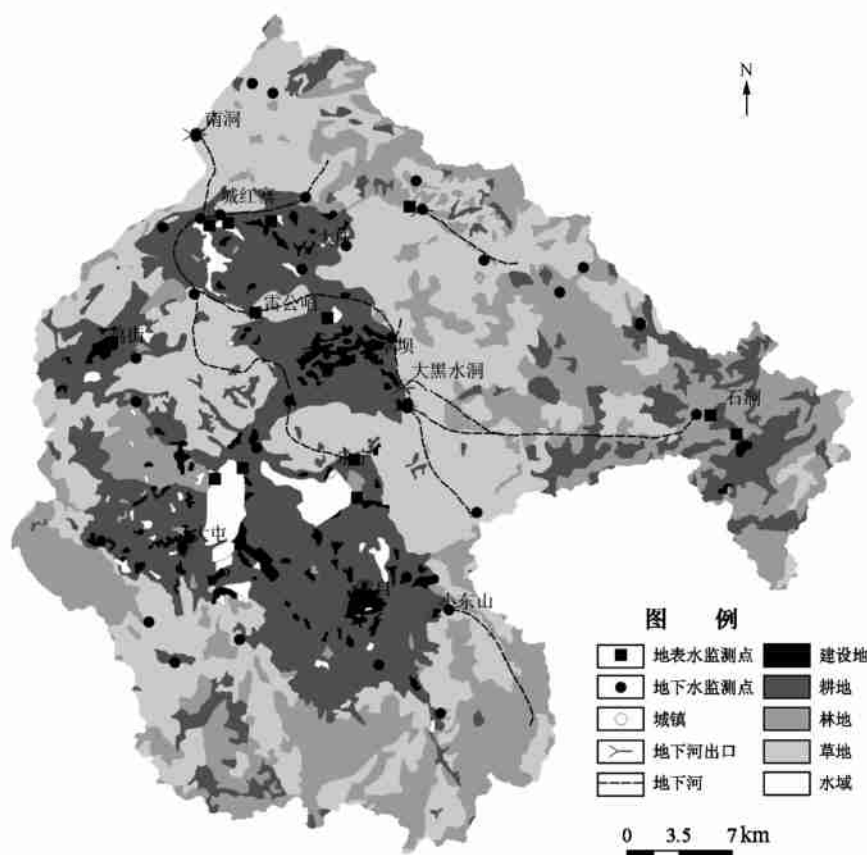


图2 南洞地下河系统水质监测点和土地利用类型分布图

Fig.2 Distribution of monitoring points of groundwater and land use types in the Nandong underground river system

很大(114.8%), 表现出强烈的空间变异性。其主要来源可分为两大类, 即无机来源和有机来源。无机来源主要是自然源, 包括岩盐矿床和其他氯化物沉积物的溶解以及雨水中海盐、含 HCl 工业废气的溶解; 有机来源主要是污染源, 包括化肥的使用、生活和工农业废水、动物和人类排泄物等^[5,18~19]。

流域地下水中 NO_3^- 含量的变动范围在 $1.2 \sim 104.1 \text{ mg/L}$, 变异系数很大(104.1%), 表现出强烈的空间变异性。地下水中的 NO_3^- 主要来源于人为活动的输入, 特别是农业中化肥的使用、生活废水、动物和人类排泄物等是其影响因素^[5,15,19]。

流域地下水中 SO_4^{2-} 含量的变动范围在 $1.8 \sim$

174 mg/L , 变异系数较大(90.5%), 表现出较强的空间变异性。 SO_4^{2-} 主要来源是含硫酸盐矿物的溶解、含硫酸盐化肥的使用以及工业废气的排放等^[5,13,19]。

3.2 因子分析

因子分析用来确定地下水各成分到底是自然过程的产物, 还是人类活动带来的污染。

从表2可看出, 第一因子的贡献率达47%, 第二因子贡献率为18%, 第三因子贡献率为14%, 3个因子对流域地下水水质形成的贡献率达79%。因此, 流域地下水水质主要受3种不同因素的影响。正如前面分析的, 地下水中 NO_3^- 主要来源于是化肥、生活废水、动物和人类排泄物等, Ca^{2+} 的主要来源是碳酸盐岩的溶

解, HCO_3^- 主要受碳酸盐岩的溶解以及土壤、大气中 CO_2 的影响。因此, 第一因子可以命名为人类活动, 第二因子为水-岩作用, 第三因子为土壤等自然因素。

表2 地下水化学成分因子分析的因子载荷阵和共同度

变量	因子1	因子2	因子3	共同度
pH	0.53	-0.56	-0.01	0.59
EC	0.44	0.66	-0.12	0.64
Ca^{2+}	0.29	0.87	0.10	0.85
Mg^{2+}	0.11	0.44	0.81	0.86
HCO_3^-	-0.13	0.40	0.85	0.90
Cl^-	0.95	0.13	-0.11	0.92
NO_3^-	0.87	-0.017	-0.10	0.77
SO_4^{2-}	0.88	0.19	0.09	0.81
Na^+	0.93	0.11	-0.01	0.87
K^+	0.82	0.21	0.10	0.72
初始特征值	4.71	1.79	1.43	
变量的百分数 (%)	47.12	17.92	14.33	
变量百分数的累积 (%)	47.12	65.04	79.37	

4 讨论

4.1 人类活动对流域地下水水质的影响

人类活动因子在地下水 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 上有很高的载荷, 在 pH 和 EC 上也有较高的载荷; 从

地下水化学成分的相关矩阵中可知, Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 之间有很好的相关性, 这意味着这些离子可能有相同的来源。

流域地表水的 pH 值、电导率及 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 的含量均高(表3), 并明显高于地下水中相应成分的值, 而流域地表水主要受流域农业活动以及生活废水排放的影响。

表3 地表水水质分析结果

	平均值	最小值	最大值	标准方差
pH	8.4	8.0	9.0	0.3
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	568.0	273.0	975.0	197.5
Ca^{2+} (mg/L)	59.8	32.8	121.0	22.2
Mg^{2+} (mg/L)	17.8	14.2	29.9	4.1
Na^+ (mg/L)	25.5	0.4	95.6	22.6
K^+ (mg/L)	20.2	1.0	63.5	17.8
HCO_3^- (mg/L)	179.2	52.1	366.0	74.3
Cl^- (mg/L)	55.8	1.3	138.6	39.0
NO_3^- (mg/L)	43.4	1.7	106.6	28.7
SO_4^{2-} (mg/L)	88.9	2.2	185.6	48.6

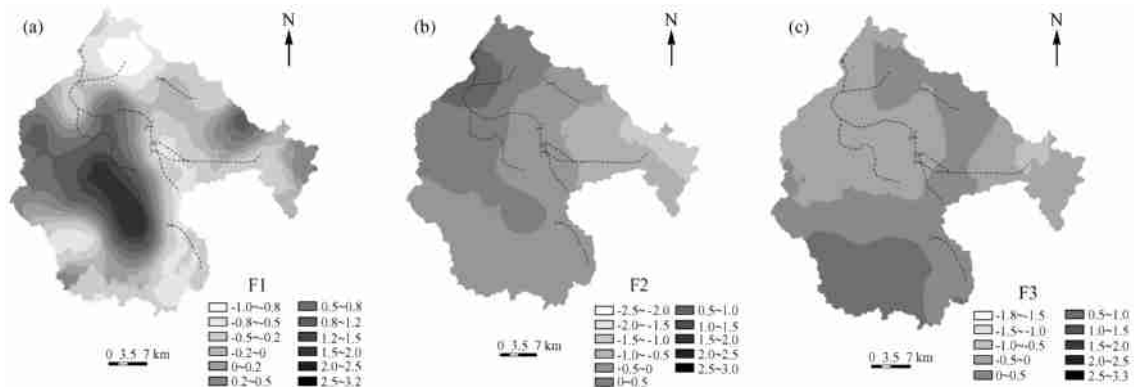


图3 因子得分空间分布图

Fig. 3 Distribution maps of factor scores of the 3 factors in Nandong underground river system

从不同土地利用方式地下水水质的统计分析中(表4)发现, 人类活动强烈的建设地、耕地利用方式下地下水的 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 和 K^+ 浓度明显高于林地和草地利用方式下相应离子的浓度; 同时, 因子1得分值与地下水 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 和 K^+ 的空间分布具有高度的一致性, 在流域建设地、耕地集中分布处呈现出明显的高值区。因此, 流域地下水中的 Cl^- 、

NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 和 K^+ 主要是人类活动的产物。同时, 建设地、耕地利用方式下地下水的 pH 值、EC 也明显高于受人类活动影响小的林地和草地利用方式下的(表4), 因子1得分值与地下水 pH 值、EC 的空间分布也有较高的一致性, 这表明流域土地利用也是影响地下水 pH、EC 的重要因素。

因此, 地下水中的 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 主要

来源于农业污染以及生活污水的排放,同时强烈的人类活动也影响到地下水的 pH 值和 EC。

4.2 水 - 岩作用对流域地下水水质的影响

从因子 2 得分值的空间分布来看(图 3b),从地下

河系统上游到下游其值逐渐增大,反映了地下河流量大小以及水 - 岩之间相互作用的时间长短对水 - 岩作用的影响,意味着在因子 2 上具有高载荷的离子主要受到水 - 岩作用时间长短以及流量大小的控制。

表 4 不同土地利用方式、地质背景下地下水的化学成分

Table 4 Chemistry of groundwater under different land uses and strata in the Nandong underground river system

土地利用 方式(样品数)	岩性 (样品数)		pH	EC (μS/cm)	Ca ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)
林地(6)	白云岩(2)	平均值	7.9	266.5	78.1	356.7	1.5	3.5	23.0	24.1	8.4	7.1
		最小值	7.5	215.0	74.7	301.2	1.4	1.3	2.6	13.7	5.4	1.3
		最大值	8.3	318.0	81.5	412.2	1.5	5.6	43.4	34.5	11.3	12.9
		标准方差	0.4	51.5	3.4	55.5	0.1	2.1	20.4	10.4	2.9	5.7
	石灰岩(4)	平均值	7.7	316.5	93.0	349.5	2.1	3.0	9.7	14.2	2.6	1.4
		最小值	7.3	245.0	80.0	189.1	1.3	1.2	2.3	6.7	1.2	0.1
		最大值	8.4	382.0	102.3	439.1	3.5	5.6	26.6	26.7	5.6	1.9
		标准方差	0.5	52.5	9.2	95.5	0.8	1.6	9.9	7.7	1.7	0.7
草地(14)	白云岩(7)	平均值	7.7	349.7	80.6	303.9	3.1	3.0	12.7	21.1	2.2	1.8
		最小值	7.3	245.0	60.0	168.3	1.0	1.2	1.8	4.4	1.5	1.2
		最大值	8.0	498.0	98.2	386.6	5.3	6.3	19.0	38.8	3.2	2.8
		标准方差	0.2	82.9	10.6	73.6	1.2	1.7	5.2	12.3	0.6	0.5
	石灰岩(7)	平均值	7.4	421.9	93.4	313.7	2.9	6.9	17.4	15.4	2.1	1.8
		最小值	7.2	264.0	66.3	274.0	1.5	1.6	2.4	5.7	1.6	1.1
		最大值	7.5	520.0	116.0	383.4	5.6	26.3	25.6	30.2	2.3	2.5
		标准方差	0.1	91.1	15.7	42.4	1.4	8.0	8.0	7.8	0.2	0.4
建设用地(9)	白云岩(4)	平均值	8.4	357.2	72.9	198.3	64.0	57.2	53.5	16.0	30.5	13.8
		最小值	7.8	311.0	63.6	140.0	27.9	32.5	14.2	4.4	3.4	1.8
		最大值	9.3	425.0	90.0	295.0	78.2	75.3	69.5	28.3	40.8	31.6
		标准方差	0.6	44.4	10.7	58.6	21.0	18.4	22.8	8.5	15.7	10.9
	第四系(5)	平均值	7.9	578.2	111.1	296.2	64.2	62.4	115.5	17.7	34.3	24.3
		最小值	7.4	418.0	74.9	216.3	23.4	30.0	56.3	10.6	16.3	7.5
		最大值	8.6	789.0	156.0	373.5	131.9	104.1	174.0	24.0	92.0	58.9
		标准方差	0.4	129.7	30.3	62.6	36.8	27.2	42.8	5.0	29.0	17.8
耕地(13)	白云岩(3)	平均值	8.1	446.3	90.5	273.3	33.5	39.8	80.3	17.3	20.1	6.9
		最小值	7.9	369.0	85.6	268.7	11.7	27.6	58.0	14.9	9.6	3.4
		最大值	8.3	495.0	100.0	281.8	50.0	63.6	108.8	19.0	33.8	11.8
		标准方差	0.2	55.3	6.7	6.0	16.1	16.8	21.2	1.7	10.0	3.6
	石灰岩(5)	平均值	7.8	575.8	115.8	323.5	30.7	30.2	62.3	12.7	14.9	14.1
		最小值	7.2	337.0	92.0	249.0	15.9	14.4	16.3	2.2	11.8	11.1
		最大值	8.2	869.0	158.0	427.0	45.7	59.4	94.0	21.3	23.0	18.9
		标准方差	0.4	180.2	23.4	64.3	11.4	15.3	28.9	7.3	4.2	3.1
	第四系(5)	平均值	7.8	376.6	88.0	322.4	54.0	38.9	60.4	24.3	34.0	34.0
		最小值	7.1	296.0	78.1	268.4	24.3	15.3	22.7	6.1	20.7	13.3
		最大值	8.4	482.0	99.3	439.0	103.5	64.6	104.5	59.5	16.0	66.4
		标准方差	0.4	61.2	7.1	61.7	27.1	19.1	31.2	19.2	16.4	20.4

地下水 Ca^{2+} 的空间分布从地下河上游到下游逐渐增大,与因子 2 得分值的空间分布有较高的一致性;同时从表 4 看到,白云岩地质背景的草地、林地利用方式下 Ca^{2+} 的浓度要大于建设地利用方式下 Ca^{2+} 的浓度,但要小于耕地利用方式下 Ca^{2+} 的浓度,并在耕地集中分布处形成高值中心,反映了地下水中 Ca^{2+} 主要受水岩作用过程的控制,但人类活动对其有重要影响。

地下水 EC 的空间分布从地下河上游到下游逐渐增大,与因子 2 得分值的空间分布有较高的一致性;但在耕地、建设用地集中分布处形成高值中心,反映了地下水中 EC 主要受水岩作用过程的控制,但人类活动对其有重要影响。

pH 的空间分布则与 F2 因子得分值的空间分布呈现明显的负相关,这与水 - 岩作用过程中消耗 H^+ 有

关,同时也与系统上游主要为林地、草地分布有关。

因此,水岩作用过程是影响地下水中 Ca^{2+} 的最主要因素,也是影响地下水中 EC、pH 的重要因素。

4.3 土壤等自然因素对流域地下水水质的影响

因子3得分值(图3c)与地下水 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 的空间分布具有较高的一致性,其高值区与林地、草地分布格局基本一致;同时从表4也看到,林地、草地利用方式下的地下水中 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 含量大于建设用地、耕地利用方式下的含量,这与林地、草地利用方式下土壤 CO_2 含量较高密切相关,因此土壤 CO_2 含量是影响流域地下水中 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 的主要因素。

5 结论

(1) 因子分析方法能够很好地解释地下水水质的影响因素及各因素的影响强度,为区分人类因素和自然因素的影响提供科学依据。

(2) 南洞地下河流域地下水水质受人类活动、水岩作用过程和土壤等自然因素的共同影响,3个因素可以解释地下水水质形成的79%,其中人类活动因子可以解释地下水水质形成的47%,是影响流域地下水水质最重要的因素。人类活动是影响地下水 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 的最主要因素;水-岩作用过程是影响地下水 Ca^{2+} 、pH、EC 的主要因素,但不是唯一因素,人类活动对地下水 Ca^{2+} 、pH、EC 也具有重要的影响;土壤是影响地下水 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 的主要因素,同时水岩作用过程也是其重要影响因素。

(3) 自然因素、人类活动对水质的影响存在季节性差异,而本文只是根据旱季一次地下水化学数据利用因子分析法来确定其影响因素,因此还存在不足,地下水水质的季节变化与影响因素和影响强度的确定是今后研究的内容。

参考文献:

- [1] Helena B, Pardo R, Vega M, *et al.* Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial (Pisuerga river, Spain) by principal component analysis [J]. *Water Research*, 2000, 34(3): 807 - 816.
- [2] Chan H J. Effect of land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 253(1 - 4): 194 - 210.
- [3] Rowden R D, Liu H, Libra R D. Results from the Big Spring basin water quality monitoring and demonstration projects, IOWA, USA[J]. *Hydrogeology Journal*, 2001, 9(5): 487 - 497.
- [4] Jiang Y, Yuan D, Xie S, *et al.* Groundwater quality and land use change in a typical karst agricultural region[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2006, 16(4): 405 - 414.
- [5] Valdes D, Dupont J P, Laignel B, *et al.* A spatial analysis of structural controls on Karst groundwater geochemistry at a regional scale [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(1 - 4): 244 - 255.
- [6] Brenot A, Baran N, Petelet-Graud E, *et al.* Interaction between different water bodies in a small catchment in the Paris basin (Brevilles, France): Tracing of multiple Sr sources through Sr isotopes coupled with Mg/Sr and Ca/Sr ratios[J]. *Applied Geochemistry*, 2008, 23(1): 58 - 75.
- [7] Liu Z, Li Q, Sun H, *et al.* Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: Soil CO_2 and dilution effects[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 337(1 - 2): 207 - 223.
- [8] Jiang Y, Yuan D, Zhang C, *et al.* Impact of land use change on groundwater quality in a typical karst watershed of southwest China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2008, 16(4): 727 - 735.
- [9] Evans C D, Reynolds B, Curtis C J, *et al.* A conceptual model of spatially heterogeneous nitrogen leaching from a Welsh moorland catchment [J]. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 2005, 4(6): 97 - 105.
- [10] Hinkle S R, Bohlke J K, Duff J H, *et al.* Aquifer-scale controls on the distribution of nitrate and ammonium in ground water near La Pine, Oregon, USA[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2 - 4): 486 - 503.
- [11] Mills P C, Kolpin D W, Scribner E A, *et al.* Herbicides and degradates in shallow aquifers of Illinois: spatial and temporal trends[J]. *Journal of American Water Resources Association*, 2005, 41(3): 537 - 547.
- [12] Jones A L, Smart P L. Spatial and temporal changes in the structure of groundwater nitrate concentration time series (1935 - 1999) as demonstrated by autoregressive modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 310(1 - 4): 201 - 215.
- [13] Negrel P, Petelet-Graud E. Strontium isotopes as tracers of groundwater-induced floods: the Somme case study (France) [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 305(1 - 4): 99 - 119.
- [14] Wunderlin D A, Diaz M P, Ame M V, *et al.* Pattern

- recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquia river basin (Cordoba-Argentina) [J]. Water research, 2001, 35(12): 2881 - 2894.
- [15] Aiuppa A, Bellomo S, Brusca L, *et al.* Natural and anthropogenic factors affecting groundwater quality of an active volcano (Mt. Etna, Italy) [J]. Applied Geochemistry, 2003, 18(6): 863 - 882.
- [16] Liu C W, Lin K H, Kuo Y M. Application of factor analysis in the assessment of ground water quality in a blackfoot disease area in Taiwan[J]. Science of the Total Environment, 2003, 313(1 - 3): 77 - 89.
- [17] Fetouani S, Shaa M, Vanclooster M, *et al.* Assessing ground water quality in the irrigated plain of Triffa (north-east Morocco) [J]. Agricultural water management, 2008, 95(2): 133 - 142.
- [18] Negrel P, Pauwels H. Interaction between the different water bodies in catchments in Brittany (France): characterizing multiple sources in waters through isotopic tracing[J]. Water, Air and Soil Pollution: Focus, 2003, 3(3): 261 - 285.
- [19] Edmunds W M, Shand P, Hart P, *et al.* The natural (baseline) quality of groundwater: a UK pilot study[J]. Science of the Total Environment, 2003, 310 (1 - 3): 25 - 35.
- [20] Conrad, J E, Colvin C, Sililo O, *et al.* Assessment of the impact of agricultural practices on the quality of groundwater resources in South Africa [R]. Water Research Commission Report. 1999, 641/1/99.

Identification of influencing factors of groundwater quality variation using factor analysis

JIANG Yong-jun^{1,2}, WU Yue-xia¹, Chris Groves², YUAN Dao-xian^{1,3}, Pat Kambes², LI Lin-li¹, ZHANG Gui⁴

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Department of Geography and Geology, Western Kentucky University, Bowling Green 42101, USA;

3. Institute of Karst Geology, CAGS/ Karst Dynamics Laboratory, MLR, Guilin 541004, China;

4. Institute of Geology Investigation in Yunnan Province, Kunming 650041, China)

Abstract: An attempt was made to distinguish the natural and anthropogenic processes and factors responsible for groundwater quality. R-mode factor analysis was applied for the sets of chemical data, i. e. pH, EC, HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- and Cl^- in the Nandong underground river system. Groundwater samples and surface water samples were collected at 42 and 15 locations in 2008, respectively. Analytical results of these groundwater samples show that the Nandong underground river system has very variable chemical compositions and spatial variability. By applying the R-mode factor analysis, three factors were obtained, which explained the characterization of groundwater quality and identified the sources for the presence of ions and their geochemical processes. It was found that the anthropogenic contribution is responsible for Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ and K^+ in groundwater. The natural dissolution of existing rocks of carbonate is the common influencing source for Ca^{2+} in groundwater. However, the anthropogenic contribution is also responsible for Ca^{2+} in groundwater. The natural and human-influenced processes are responsible for pH, EC of groundwater. Mg^{2+} , HCO_3^- are influenced by the factors of soil and water-rock interactions, respectively. The concentrations of CO_2 in soil and the water-rock interactions are responsible for Mg^{2+} , HCO_3^- in the groundwater. The anthropogenic processes are the most important influencing factors for groundwater quality in the Nandong underground river system.

Key words: groundwater quality; underground river; anthropogenic processes; natural processes; factor analysis

责任编辑:汪美华