

# 清水泉岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源

王潇媛<sup>1,2</sup>, 郭纯青<sup>1</sup>, 裴建国<sup>2</sup>, 卢 丽<sup>2</sup>

(1. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541006; 2. 中国地质科学院 岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 为了确定南宁市清水泉岩溶地下水中多环芳烃的组成、来源及污染特征, 沿该地下河上游、中游、下游布设5个采样点。经过采样送检, 检测了16种优控多环芳烃(PAHs)。结果表明, 丰水期地下水中 $\Sigma$ PAHs(PAHs总量)浓度为163.87~209.96 ng/L, 平均值为183.10 ng/L, 以2环和3环的PAHs物质(萘、菲和荧蒹)为主, 约占总量的52%。丰水期、平水期和枯水期的清水泉地下水中, PAHs浓度整体上分布规律为: 上游< 中游< 下游, 浓度增大的主要原因是沿途污染源的不断汇入。地下水中2环和3环PAHs、4环PAHs、5环和6环PAHs、PAHs总量的季节性浓度变化整体上呈现出相同的变化规律, 即枯水期> 平水期> 丰水期, 这与PAHs的物理化学性质有关。PAHs来源分析表明, 研究区下游地区PAHs来源为石油, 中上游地区来自燃料的高温燃烧。与其他地区比较, 清水泉地下水虽然出现了PAHs污染, 但污染程度较低。

**关键词:** 多环芳烃污染; 清水泉; 地下水; 污染来源; 岩溶地区

**中图分类号:** X523 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0274-05

## Pollution characteristics and source analysis of PAHs in the karst groundwater of Qingshui Spring

WANG Xiaoyuan<sup>1,2</sup>, GUO Chunqing<sup>1</sup>, PEI Jianguo<sup>2</sup>, LU Li<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;

2. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Science, Guilin 541004, China)

**Abstract:** To determine the components, source, and pollution characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons(PAHs) in the karst groundwater of Qingshui Spring, five sampling points were set along the upstream, midstream, and downstream of the river, and 16 priority PAHs were detected. The results showed that (1) the total PAHs concentration in the wet season is 163.87~209.96 ng/L with an average value of 183.10 ng/L, and 2~3 ring naphthalene, fluoranthene, phenanthrene account for 52% of the total PAHs; (2) the downstream of Qingshui Spring has the highest PAHs concentration in the dry, normal, and wet seasons, followed by the midstream, and the upstream has the lowest, which is caused by the continually increased pollution source along the river; (3) the concentrations of 2~3 ring PAHs, 4 ring PAHs, 5~6 ring PAHs, and total PAHs concentrations are the highest in the dry season and lowest in the wet season, which is related to the physicochemical properties of PAHs; and (4) the PAHs source is petroleum in the downstream and fuel combustion in the upper and middle streams. Compared to other regions, the PAHs pollution level of the karst groundwater in Qingshui Spring is low.

**Key words:** polycyclic aromatic hydrocarbons; Qingshui Spring; underground water; pollution source; karst area

多环芳烃(PAHs)具有难降解性、致癌性、环境累积性、强疏水性、高脂溶性和高辛醇水分配系数<sup>[1]</sup>, 可以通过大气沉降、城市污水排放以及雨水冲刷作用进入水体<sup>[2]</sup>, 危害极大。1979年, 美国环境保护署已将16种PAHs划定为优先监测有机污染物<sup>[3]</sup>, 而当前世界各国都将PAHs列为优先管理的典型持久性有机污染物。

随着国民经济的快节奏发展, 城市工业化水平不断提

高, 特别是钢铁水泥、石油化工、有色金属冶炼、人工合成有机物生产等高污染企业的增多, 以及城镇周边农业化肥和农药的施用, 大批有机污染物通过不同渠道混入地下水中, 导致地下水有机污染情况愈来愈严重, 给城市供水安全造成威胁。

本文对南宁市清水泉岩溶地下水进行多环芳烃污染物取样测试, 分析岩溶地下水中多环芳烃的污染特征及污染源, 为该岩溶地下水的保护和污染防治提供依据。

收稿日期: 2014-11-01 修回日期: 2015-03-05 网络出版时间: 2014-03-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150320.1628.004.html>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212011121164); 岩溶地质研究所基本科研业务费项目(201309)

作者简介: 王潇媛(1989), 女, 河南濮阳人, 主要从事水文与水资源方面的研究。E-mail: xyhappy2010@msn.cn

通讯作者: 郭纯青(1955), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 从事岩溶水文、水文地质研究。E-mail: guochunqing99@aliyun.com

## 1 区域自然地理背景

研究区位于南宁盆地西南部邕江江畔的冲积平原,该盆地状似橄榄,北东向延伸,盆地内沉积了60多米厚的第四系松散沉积物<sup>[4]</sup>。清水泉地下河位于南宁市邕宁区蒲庙镇城南4 km的低丘内,是南宁市区唯一的岩溶地下水源地,其出口建有一拦河坝,水面宽30~50 m,水深大于20 m,主要供应邕宁区和部分良庆区的工业和生活用水。

清水泉泉域以垄岗状丘陵谷地地貌为主,泉域出露的地层主要为泥盆系、石炭系、二叠系、白垩系、古近系和第四系(图1),岩性以灰岩、泥灰岩为主,夹有少量硅质岩。丘陵展布方向与褶皱方向一致,一般相对高差20~60 m,残存的高差在100 m以内,其西侧为八尺江二级阶地,北面为邕江二级、三级阶地,整个地形受褶皱构造运动的控制,经侵蚀作用形成。

清水泉泉域补给面积约220 km<sup>2</sup>,其中40 km<sup>2</sup>为灰岩裸露区,其余均被第三系和白垩系砾岩、砂岩、泥岩所覆盖,因而大部分补给区为碎屑岩分布区,构成埋藏型地下河。在灰岩裸露区,地下河天窗、岩溶洼地和落水洞发育。枯水期出口流量900 L/s,地下径流模数4.10 L/(s·km<sup>2</sup>),流程大于10 km<sup>[5]</sup>。

## 2 样品采集与分析

根据研究区的水文地质条件和区域地质背景,结合前人研究资料,采样地段布点。按照DD 2008-01《地下水污染调查评价规范》<sup>[6]</sup>的要求,在清水泉岩溶地下河系统的补给区、径流区、排泄区的典型地段确定了那邕NS203(泉)、郭村NS202(泉)、那银NS223(井)、敢怀ND007(天窗)、NS093(地下河出口)等五个水点为地下水采样点(图1、图2)。

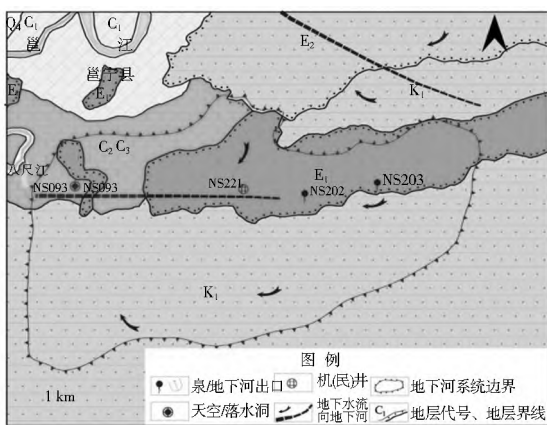


图1 清水泉地下河系统水文地质简图

Fig. 1 Hydrogeology in the underground river system of QingShui Spring

样品分为丰水期、平水期、枯水期三次集中采集,丰水期采样时间为2014年8月26日,平水期为2014年11月6日,枯水期为2014年12月18日。每批在五个采样点分别用EPA 1 000 mL有机棕色专用玻璃瓶采集平行水样,瓶口用锡箔纸包好。样品采集后立即放入车载冰箱4℃冷藏,尽快运至实验室并于7天内完成预处理。样品处理方法依照美国EPA 525.2的要求进行处理<sup>[7]</sup>。

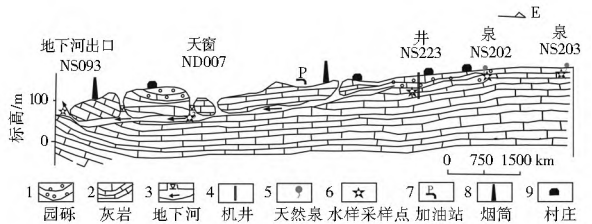


图2 清水泉地下河系统剖面图和采样点位置

Fig. 2 Underground river system profile and location of sampling sites

所有样品,均送往国家海洋局第三研究所进行测试分析,具体测试方法、质量控制保证和检出限等参见文献[8]。

## 3 结果与讨论

### 3.1 地下水中 PAHs 的浓度和组成

清水泉地下河不同时期地下水中 PAHs 的浓度和组成见表1。其中,丰水期地下水中 $\Sigma$ PAHs 浓度范围为163.87~209.96 ng/L,平均值为183.10 ng/L,以2环和3环的萘、菲和荧蒽为主,约占52.00%,检出率除茈和茛并[1,2,3 cd]芘外,其它多环芳烃均为100%。一般情况下,如果地下河未受污染或轻微污染时,水中 PAHs 以2环和3环的 PAHs 为主,但如果污染严重时则以4、5、6环的 PAHs 为主<sup>[9]</sup>,本研究与该现象基本吻合。同时,从表1中可以看出,平水期、枯水期、丰水期的岩溶地下水 PAHs 组成特征相似,只是在浓度含量、PAHs 百分比等方面略有不同,主要是由于2环和3环的 PAHs 正辛醇/水分配系数较小,而4、5、6环的正辛醇/水分配系数较大,使得前者较易随水迁移。从三个时期的16种 PAHs 成分谱中可以看出,除了芘(Pyr)值百分比出现了较大变化,其余15种 PAHs 的成分谱表现出较好的一致性。

与已有的研究相比,本研究地下水中的 PAHs 含量(231.95 ng/L)高于北京市东南郊灌区地下水<sup>[10]</sup>(9.73~487.38 ng/L,平均值115.71 ng/L)以及广西大石围天坑地下水<sup>[8]</sup>(54.7~192.0 ng/L,平均值为102.3 ng/L),与细河流域地下水<sup>[11]</sup> PAHs 值相近(159.1~483.7 ng/L,平均值为234.5 ng/L),但要低于太湖平原城近郊浅层地下水<sup>[12]</sup>(0.004~32.449 μg/L,中值为2.281 μg/L)。与其它地区地表水相比,本研究中 PAHs 的含量要明显低于闽江口<sup>[13]</sup>(9 900~474 000 ng/L)、九龙河口<sup>[14]</sup>(6 960~26 900 ng/L)和印度的 Gomti 河水<sup>[15]</sup>(1 033~199 40 ng/L)。说明研究区地下水虽然出现了污染,但污染程度较低。

### 3.2 地下水中 PAHs 的分布特征

从图3~图5的柱状图可以看出,不同水文期岩溶地下水中 PAHs 的分布特征具有如下规律。

(1) 丰水期。研究区中上游地区地下水 PAHs 浓度变化不大,差值仅为1.32 ng/L;当至下游 QS09 天窗时,PAHs 浓度突然增大,为182.24 ng/L。这主要是因为下游污染源较多,导致地下水 PAHs 浓度在下游地区时开始增大,至地下水出口处时(QS16),浓度增至209.96 ng/L。

(2) 平水期。与丰水期相似,中上游地区 PAHs 浓度相对稳定,差值为5.77 ng/L,而至下游地区地下水 PAHs 浓度开始增大,至地下水出口处时,其浓度比上游地区增大86.44 ng/L。

表 1 清水泉地下河不同时期地下水中 PAHs 的浓度

Tab. 1 Concentration of PAHs in underground river of QingShui Spring in different periods

PAHs 组成	丰水期地下水					平水期地下水					枯水期地下水				
	QS16	QS09	QS04	QS02	QS01	QS16	QS09	QS04	QS02	QS01	QS16	QS09	QS04	QS02	QS01
Nap	22.94	12.66	46.37	31.14	36.17	36.82	15.46	44.68	35.28	37.52	47.87	20.10	58.09	45.87	48.78
Acy	2.89	1.85	2.89	5.86	2.86	3.76	2.41	5.76	6.72	3.72	4.88	3.13	7.48	8.73	4.83
Ace	3.91	4.34	3.58	3.42	3.84	5.08	5.64	5.65	5.45	4.99	6.61	7.33	7.35	7.08	6.49
Flu	3.30	16.24	-	-	-	4.29	21.11	-	-	-	5.58	27.45	-	-	-
Phe	26.02	35.12	17.43	18.24	22.65	27.83	41.66	24.66	20.71	29.45	36.17	48.15	32.06	26.93	38.28
Ant	2.19	2.86	3.00	2.77	2.85	2.26	3.27	4.10	3.10	3.71	4.94	4.25	3.93	3.03	3.92
FlA	32.29	17.89	19.03	28.06	21.22	41.98	21.26	19.44	24.48	30.59	51.57	20.63	35.27	35.82	39.76
Pyr	38.54	29.16	24.45	31.17	22.53	53.10	37.91	26.99	28.02	13.69	72.03	49.28	32.08	27.43	17.80
BaA	11.04	5.06	6.80	12.54	11.76	16.35	7.58	8.84	16.30	15.29	17.26	9.85	14.49	21.19	23.87
Chr	26.44	24.18	12.32	9.95	10.18	34.37	31.43	16.02	12.94	13.23	49.68	43.86	20.82	14.82	15.20
BbF	11.39	5.53	7.75	6.91	9.92	14.81	7.19	10.08	10.28	12.90	19.25	9.35	13.10	13.37	16.76
BkF	7.23	7.23	5.07	4.28	6.40	9.40	9.40	6.59	6.86	8.32	12.22	12.22	8.57	8.92	10.82
BaP	9.20	9.28	6.21	4.98	5.94	11.96	11.16	8.07	7.77	7.72	15.55	14.51	10.49	10.11	10.04
InP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DaA	4.80	6.30	4.50	2.20	2.60	8.24	4.29	5.85	2.86	3.38	10.71	5.58	7.61	3.72	4.39
BgP	7.78	4.54	5.54	3.67	4.95	10.11	7.90	7.20	7.37	6.44	13.15	10.27	9.36	9.58	8.37
2~3 环	93.54	90.96	92.30	89.49	89.59	122.02	110.80	104.29	95.74	109.97	157.62	131.04	144.18	127.46	142.06
4 环	94.64	71.16	56.39	64.85	60.79	128.03	93.51	68.51	74.41	63.43	170.44	124.56	89.06	85.73	84.46
5~6 环	21.78	20.12	16.25	10.85	13.49	30.31	23.36	21.13	18.01	17.54	39.41	30.36	27.46	23.41	22.8
ΣPAHs	209.96	182.24	164.94	165.19	163.87	280.36	227.66	193.92	188.15	190.93	367.47	285.96	260.70	236.59	249.31

注: - 表示未检出。QS16 为地下河出口, QS09 为耿怀水点, QS04 为那银水点, QS02 为郭村水点, QS01 为那巴水点。

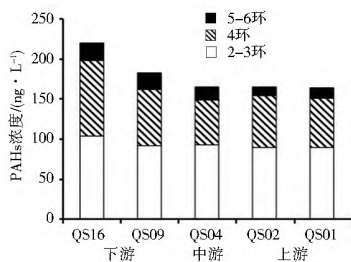


图 3 丰水期地下水 PAHs 分布

Fig. 3 Distribution of groundwater PAHs in the wet period

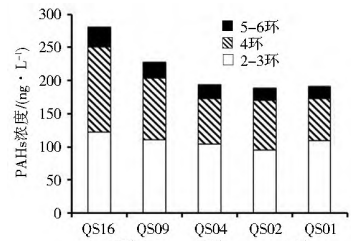


图 4 平水期地下水 PAHs 分布

Fig. 4 Distribution of groundwater PAHs in the normal period

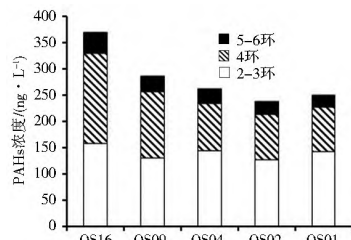


图 5 枯水期地下水 PAHs 分布

Fig. 5 Distribution of groundwater PAHs in the dry period

(3) 枯水期。与丰水期和平水期不同, 枯水期的中上游地区地下水 PAHs 浓度沿途出现了先减小后增大的现象。究其原因: 第一, 地下水流量沿途不断增加, 产生的稀释作用, 使得 QS01 至 QS02 段 PAHs 浓度减小; 第二, 污染源的汇入, 使得 QS02 至 QS04 段浓度增加, 虽然此时地下水流量也逐渐增大, 但由于采样期为枯水期, 因此该段污染物汇入量大于流量的稀释作用。

### 3.3 地下水中 PAHs 的季节性变化特征

从图 6 中可以看出地下水的 2 环和 3 环的 PAHs、4 环的 PAHs、5 环和 6 环的 PAHs、PAHs 总量的季节性浓度变化整体上呈现出相同的变化规律, 即枯水期 > 平水期 > 丰水期。地下水中 2 环和 3 环的 PAHs 增值最大, 为 53.34 ng/L, 4 环的次之, 为 41.28 ng/L, 5 环和 6 环的最小, 为 12.19 ng/L, 这与 PAHs 的物理化学性质有关。低环的正辛醇-水分配系数较小, 亲水性强, 更容易迁移, 因此 2 环和 3 环的 PAHs 增值最大。从不同时期的 PAHs 环数百分比变化图可以看出 (图 6), 地下水中的 PAHs 整体上变化不明显, 较为稳定。

### 3.4 地下水中 PAHs 异构体比值变化特征及污染源解析

环境中 PAHs 的来源包括天然源和人为源, 且以人为源为主, 人为源主要是生物和化石燃料的不完全燃烧、机动车尾气的排放以及石油开发、运输和石油化工过程的泄漏与排放。同分异构体比值法<sup>[16]</sup>是判断环境中 PAHs 来源的重要方法之一, 常用的有菲/蒽 (Phe/ Ant)、苯并[a]蒽/[苯并[a]蒽+屈] (BaA/(BaA+ Chr))、荧蒽/[荧蒽+芘] (FlA/(FlA+ Pyr))

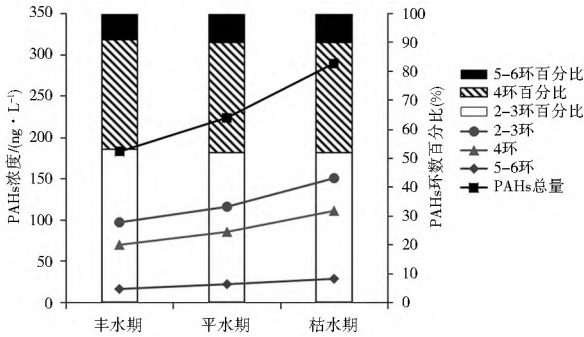


图6 地下水PAHs季节性变化

Fig. 6 Seasonal variation of groundwater PAHs

和茚并[1,2,3-cd]芘/[茚并[1,2,3-cd]芘+苯并[a]芘] (InP/(InP+BgP)) 四种指标。由于丰水期、平水期和枯水期中空气和地下水的InP均未检出,无法利用InP/(InP+BaP)比值对PAHs进行来源解析,因此本项目选择Phe/Ant、BaA/BaA+Chr和FlA/FlA+Pyr三个异构体比值对PAHs的来源进行分析。

地下水中Phe/Ant比值大于10时,指示PAHs主要来源于石油;小于10时,表明来源于燃料的高温燃烧。

地下水中BaA/(BaA+Chr)小于0.2时,表明为石油源;大于0.35时,为燃烧源;当介于0.2~0.35时,说明PAHs为石油和燃烧二者的混合源。

地下水中FlA/(FlA+Pyr)小于0.4时,表明PAHs来源为石油源;介于0.4~0.5时,为石油类物质燃烧源;大于0.5时,PAHs来源为草、木、煤炭燃烧源。

从表2中可以看出,丰水期、平水期和枯水期的大部分采样点的PAHs比值变化稳定,只有少数采样点出现了较大幅度的比值变化。以丰水期为例,Phe/Ant的范围为5.81~12.28,其中下游地区的QS16、QS09中PAHs来源于石油,其余中上游地区采样点中则来自燃料的高温燃烧。分析认为,虽然菲和蒽的分子量同为178 mol/g,菲和蒽的正辛醇水的分配系数(LogKow)分别为4.54和4.57,相差不大,但是它们的溶解度和饱和蒸气压却差别较大,菲分别为1.10 mg/L和 $2.0 \times 10^{-2}$  Pa,蒽分别为0.045 mg/L和 $1.0 \times 10^{-3}$  Pa,可见菲的物理化学性质比蒽活泼,两者在大气传输过程中容易发生分异现象, QS04、QS02和QS01在烟筒的下风向,距离烟筒分别约为750 m、2400 m和4300 m,分异导致Phe/Ant比值逐渐增大。

丰水期BaA/(BaA+Chr)比值范围为0.17~0.56,显示QS09中PAHs为石油来源, QS16为混合源,其余取样点均为燃烧源。分析发现, QS09位于敢怀村天窗内,其东北部加油站的汽油、柴油洒漏以及含油废水的直接排放是造成QS09显示石油源的主要原因; QS16位于地下河出口处,除了接受来自上游QS09天窗的含油地下水外,还受到地下河出口附近采石场、造纸厂烟筒等燃烧源的影响,因此表征为混合来源。表征为燃烧源的取样点均位于地下河系统的中上游,还与当地村民使用能源的方式密切相关,该地区远离县城,农业人口占绝大多数,村民家庭使用的燃料80%以上是草、木和煤炭,这种能源结构与上述比值推断的结果是相符的,同时造纸厂的烟筒位于其上风向,排放的污染气体也

会影响PAHs的来源。

表2 丰水期、平水期和枯水期地下水中PAHs的比值

Tab. 2 Ratio of groundwater PAHs in the dry, normal, and wet periods

PAHs 比值	地下水				
	QS16	QS09	QS04	QS02	QS01
丰水期					
Phe/Ant	11.88	12.28	5.81	6.58	7.95
FlA/FlA+Pyr	0.46	0.38	0.44	0.47	0.49
BaA/BaA+Chr	0.29	0.17	0.36	0.56	0.54
平水期					
Phe/Ant	12.31	12.75	6.01	6.68	7.95
FlA/FlA+Pyr	0.44	0.36	0.42	0.47	0.69
BaA/BaA+Chr	0.32	0.19	0.36	0.56	0.54
枯水期					
Phe/Ant	7.33	11.34	8.16	8.88	9.77
FlA/FlA+Pyr	0.42	0.30	0.52	0.57	0.69
BaA/BaA+Chr	0.26	0.18	0.41	0.59	0.61

丰水期FlA/(FlA+Pyr)的比值范围为0.38~0.49,显示QS09中PAHs为石油源,与前文结论一致。其余取样点FlA/(FlA+Pyr)的比值范围均处于0.4~0.5之间,显示为石油类物质的燃烧排放源,产生原因与车辆使用的汽油、柴油不完全燃烧排放及烟筒内含油气体排放有关。

综合判断, QS16中PAHs为混合燃烧源, QS09为石油源,其余中上游地下水中PAHs为燃烧源。

平水期和枯水期的PAHs异构体比值与丰水期的相比,整体变化相对较为稳定,但是部分取样点不同时期的PAHs异构体比值差异较大,这也说明不同时期的PAHs的来源不断变化。从图7中可以看出, QS04、QS02和QS01的FlA/(FlA+Pyr)比值在不同水文期均呈现出逐渐增大趋势,但是增长模式却各不相同: QS01的FlA/(FlA+Pyr)比值先急剧增大,而后稳定; QS04和QS02的FlA/(FlA+Pyr)比值先稳定变化,随后急剧增大。

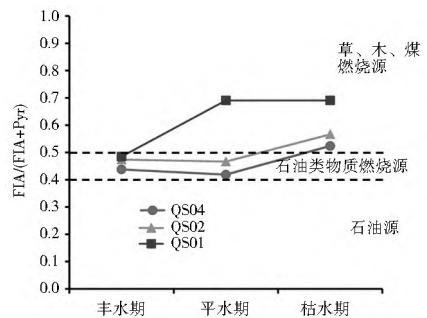


图7 不同时期QS01、QS02和QS04的FlA/(FlA+Pyr)比值变化

Fig. 7 Variations of FlA/(FlA+Pyr) ratios of QS01, QS02, and QS04 in different periods

QS04、QS02和QS01的FlA/(FlA+Pyr)比值急剧增长,使得PAHs的来源由石油类物质燃烧源转变为草、木、煤燃烧源,这与当地不同时期的能源结构有关。由于枯水期处于冬季,该地区村民使用草、木和煤炭燃料进行取暖、做饭等的需求量增大,导致枯水期的PAHs来源显示为草、木、煤燃烧源;而丰水期和平水期由于温度升高,草、木、煤等燃料需求减少,同时受到附近造纸厂烟筒排放的废气的影

## 4 结论

(1) 清水泉岩溶地下水中  $\Sigma$ PAHs 浓度范围在三个时期分别为: 丰水期 163.87~209.96 ng/L, 平均值为 183.10 ng/L; 平水期 188.15~280.36 ng/L, 平均值为 216.20 ng/L; 枯水期 236.59~367.47 ng/L, 平均值为 280.00 ng/L; 三个时期 PAHs 的组成以 2 环和 3 环的萘、菲和荧蒽为主。与其他地区相比, 清水泉地下水中 PAHs 污染程度较低。

(2) 丰水期、平水期、枯水期的清水泉岩溶地下水中 PAHs 浓度整体分布规律为: 上游 PAHs 值低于中游 PAHs 值, 中游 PAHs 低于下游 PAHs 值, 但枯水期中上游地区的变化规律与丰水期和枯水期不同, 这与地下水的流量变化和污染物汇存量消长关系有关。

(3) 清水泉岩溶地下水中 2 环和 3 环 PAHs、4 环 PAHs、5 环和 6 环 PAHs、PAHs 总量的季节性浓度变化整体上呈现出相同的变化规律, 即枯水期 PAHs 值高于平水期 PAHs 值, 平水期 PAHs 值高于丰水期 PAHs 值, 其中 2~3 环 PAHs 增值最大, 这与低环的正辛醇-水分配系数较小有关。

(4) 清水泉地下河的下游地区, 地下水中 PAHs 来源以石油类为主, 其东北部加油站汽油、柴油的洒漏以及含油废水的直接排放造成的; 中上游地区地下水中 PAHs 来源主要为草、木、煤燃烧源, 这是因为当地农业人口占绝大多数, 农村家庭使用的燃料 80% 以上是草、木和煤炭。

### 参考文献(References):

- [1] 田蕴, 郑天凌, 王新红. 厦门西港表层海水中多环芳烃(PAHs)的含量组成及来源[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1): 50-55. (TIAN Yun, ZHENG Tianling, WANG Xin hong. Concentration, composition and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water of Xiamen Harbor[J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 24(1): 50-55. (in Chinese))
- [2] Peter C. Van Metre, et al. Urban sprawl leaves its PAH signature. Environ. Sci. Technol., 2000, 34(19): 4064-4070.
- [3] M Boller, D Kobler, G Koch. Particle separation, solids budgets and headloss development in different biofilms[J]. Water Science and Technology, 1997, 36(4): 239-249.
- [4] 苗迎, 孔祥胜, 邹胜章, 等. 南宁市土壤中 PAHs 的环境地球化学特征[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(6): 95-101. (MIAO Ying, KONG Xiang sheng, ZOU Sheng zhang, et al. Environmental geochemical characteristics of PAHs in soils in Nanning City[J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(6): 95-101. (in Chinese))
- [5] 孔祥生, 苗迎. 大气干湿沉降: 地下河多环芳烃的重要来源[J]. 地球学报, 2014, 35(2): 239-247. (KONG Xiang sheng, MIAO Ying. Atmospheric depositions, PAHs sources of an underground river: a case study of the Qingshuiquan underground river[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(2): 239-247. (in Chinese))
- [6] DD 2008 01, 地下水污染调查评价规范[S]. (DD 2008 01, Specification for Investigation and Evaluation of Groundwater Pollution[S]. (in Chinese))
- [7] 姚焕炬. 基于逸度模型的持久性有机污染物多介质环境行为与生态风险研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009: 21-26. (YAO Huan ju. Modelling multimedia environmental behavior and ecological risk of persistent organic pollutants using fugacity models--take the study of semi arid Lanzhou area as an example[D]. Lan Zhou: Lan Zhou University, 2009: 21-26. (in Chinese))
- [8] 孔祥胜, 祁士华, Oramah IT, 等. 广西大石围天坑群地下水中多环芳烃的污染特征[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 1081-1087. (KONG Xiang sheng, QI Shi hua, Oramah IT, et al. Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water in underground river of Dashiwei tiankeng group in karst area, Guangxi[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 32(4): 1081-1087. (in Chinese))
- [9] 王喜龙, 徐福留, 王学军, 等. 天津灌溉区苯并(a)芘的分布和迁移通量模型[J]. 环境科学学报, 2003, 23(1): 88-93. (WANG Xi long, XU Fu liu, WANG Xue jun, et al. Fugacity modeling of benzo(a) pyrene in wastewater irrigated area of Tianjin[J]. Journal of Environmental Sciences, 2003, 23(1): 88-93. (in Chinese))
- [10] 李玮, 何江涛, 马文洁, 等. 北京市东南郊再生水灌区地下水多环芳烃污染风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 713-720. (LI Wei, HE Jiang tao, MA Wen jie, et al. Groundwater PAHs contamination risk assessment of reclaimed wastewater irrigation area, South east Part of Beijing, China[J]. Journal of Agror Environment Science, 2012, 31(4): 713-720. (in Chinese))
- [11] 罗庆, 孙丽娜, 张耀华. 细河流域地下水中多环芳烃污染健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 959-964. (LUO Qing, SUN Li na, ZHANG Yao hua. Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater from Xihe River area, China[J]. Journal of Agror Environment Science, 2011, 30(5): 959-964. (in Chinese))
- [12] 崔学慧, 李炳华, 陈鸿汉. 太湖平原城近郊区浅层地下水中多环芳烃污染特征及污染源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 48-52. (CUI Xue hui, LI Bing hu a, CHEN Hong han. Contamination characteristics and pollutant groundwater in suburb of Taihu Plain sources analysis on PAHs in shallow[J]. Environmental Science, 2008, 29(7): 48-52. (in Chinese))
- [13] Zhang ZL, Hong HS, Zhou JL, et al. Phase association of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Min jiang River Estuary, China[J]. The Science of the Total Environment, 2004, 323(1-3): 71-86.
- [14] Maskaouia K, Zhou JL, Hong HS, et al. Contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Jiulong River Estuary and Western Xiamen Sea, China[J]. Environmental Pollution, 2002, 118(1): 109-122.
- [15] Malik AI, Verma P, Singh AK, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and bed sediments of the Gomti River, India[J]. Environ Monit Assess, 2011, 172(1-4): 529-45.
- [16] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, et al. PAHs in the Fraser River Basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition[J]. Organic Geochemistry, 2002, 32: 489-515.