

南水北调中线水源地丹江口水库水化学特征研究

李思悦^{1, 2}, 程晓莉¹, 顾胜^{1, 2}, 李佳^{1, 2}, 张全发^{1*}

(1. 中国科学院武汉植物园流域生态中心, 武汉 430074; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 丹江口水库是南水北调中线工程的水源地, 对水库中的 5 个点位进行了 3 a 的动态监测. 对水化学类型和水化学特征进行了系统分析, 运用相关分析及方差分析, 对水化学时间、空间分布特征进行了研究. 结果表明, TDS 介于 149.9 ~ 291.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 属于弱矿化度水. 总硬度(以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度和计)介于 40 ~ 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 属于极软水. HCO_3^- 及 Ca^{2+} 分别介于 122.5 ~ 170.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、37.1 ~ 43.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 分别占主要阴、阳离子组成的 77.54% ~ 77.87% 和 70.66% ~ 77.93%, 按照 O. A. 阿列金分类法, 丹江口库区水质为 HCO_3^- -Ca 型水. 主要离子呈现一致的空间变化, 在丹江库区沿水流方向逐渐降低, 至汉江库区达到最小值. 水化学特征的季节及时间变化表明, 主要离子的浓度在枯季比在雨季大. 丹江口水库水化学特征主要由岩石风化决定, 高浓度的 HCO_3^- 及 Ca^{2+} 主要来源于方解石和白云岩, 但是上游及库区周边人为活动对 NO_3^- 产生了一定的影响. 最后, 提出了流域水资源保护的建议和措施.

关键词: 丹江口水库; 水化学特征; 时空分布; 人类活动

中图分类号: X131.2; X832 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2111-06

Hydro-chemical Characteristics in the Danjiangkou Reservoir (Water Source Area of the Middle Route of the South to North Water Transfer Project), China

LI Si-yue^{1, 2}, CHENG Xiao-li¹, GU Sheng^{1, 2}, LI Jia^{1, 2}, ZHANG Quan-fa¹

(1. Center for Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: TDS, pH and major ions in the Danjiangkou Reservoir, the water source area of the Middle Route of the South to North Water Transfer Project of China were monitored during the period of 2004-2006 to systemically analyze hydro-chemical characteristics and water chemistry type. Analysis of variance (ANOVA) and correlation analysis were performed to explore their spatio-temporal pattern. The results show that the water is of low mineralized degree with a total dissolved solid ranging from 149.9-291.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and soft water with a total hardness ranging from 40-50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. HCO_3^- accounts for 77.54%-77.87% of the total major anions with a content of 122.5-170.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, while Ca^{2+} accounts for 70.66%-77.93% of the total major cations with a content of 37.1-43.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the water is of a HCO_3^- -Ca type. Major ions show similar spatial variations, decreasing downstream in the Danjiang Reservoir, and reaching the lowest values in the Hanjiang Reservoir. The temporal and seasonal variations of the hydro-chemical characteristics show that the concentrations of major ions in the dry season are larger than those in the wet season. Hydro-chemical characteristics in the reservoir are mainly determined by the rock weatherization, while and anthropogenic activities in the upper-stream and the reservoir region have been influencing the NO_3^- concentration. Finally, conservation strategies of water resource in the reservoir and its upper stream are discussed.

Key words: Danjiangkou Reservoir; hydro-chemical characteristics; spatio-temporal pattern; anthropogenic activities

流域水化学反映流域岩性、大气沉降、气候以及人类活动等重要因素对流域的影响, 量化这些影响是流域土地及水资源管理的重要部分^[1]. 水化学研究是水资源质量评价的重要内容, 它对流域水资源利用方式、可持续发展、管理及生态环境的保护与建设都具有重要的意义. 国外学者在流域水化学方面进行了大量研究^[2~5], 表明流域水化学主要受水文情势及土壤与地下水的相互作用的影响. 国内学者也对流域^[6]、湖泊^[7]、水库^[8]及湿地^[9]等的水化学特性进行了研究, 水化学组成表现出明显的空间异质性. 流域土壤和岩石化学和矿物组成基本上控制流域水化学的基本组成^[7], 水化学组成也成为研究近期化学风化作用过程的主要手段.

在我国, 受人类活动影响, 流域普遍存在水质恶化现象^[10], 而水质优劣直接影响流域整体生态环境状况和社会经济的发展. 目前, 水资源成为制约我国西北及华北地区社会经济可持续发展与生态环境建设最重要的因素^[11]. 2002 年我国政府实施了南水北调工程(西线、中线及东线), 中线工程从丹江口水库引水至华北, 将在很大程度上缓解华北的水资源短缺^[12]. 丹江口水库承接汉江上游及丹江来水, 自 20 世纪 80 年代以来, 汉江流域点源污染及由人类

收稿日期: 2007-08-06; 修订日期: 2007-09-14

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目(0629221C01); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAC10B020)

作者简介: 李思悦(1978 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为流域生态学与水环境, E-mail: lisiyue@wbcas.cn

* 通讯联系人, E-mail: qzhang@wbcas.cn

活动引起的非点源污染快速增长^[13], 汉江流域已成为长江流域营养物质污染的主要支流之一^[14]. 许多学者对其进行了大量的研究工作, 主要集中在水资源与水源区生态环境^[12, 15, 16]及水质^[17, 18]方面, 但对该区域系统的水化学的研究目前还比较薄弱. 本研究运用水化学及统计学方法, 系统分析了丹江口水库水化学特征及其时、空分布规律, 并试图对水化学成因进行了初步探讨, 以为流域水资源可持续开发利用和管理提供依据.

1 区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

丹江口库区 (32°36' ~ 33°48'N, 110°59' ~ 111°49'E) 位于湖北省丹江口市汉江干流与其支流丹江交汇处下游 0.8 km 处 (图 1), 属于我国北亚热带季风气候区, 具有显著的过渡性气候特征. 年平均气温 15 ~ 16℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的活动积温 4 500 ~ 5 100℃, 无霜期 230 ~ 250 d^[15]; 年平均降水量 800 ~ 1 000 mm, 多集中在 5 ~ 10 月, 约占全年降雨量的 80%. 径流年内分布与降水相似, 但年际变化较大, 最大最小年径流量约差 6 倍^[19]. 现状条件下水库正常蓄水位为 157 m, 相应库面积及库容分别为 745 km² 和 17.45 × 10⁹ m³ (其中: 汉江库区占 53.9%, 丹江库区占 46.1%). 丹江口水库承接汉江流域上游来水, 年径流量为 41.1 × 10⁹ m³. 自然植被为温性常绿针叶林、暖性常绿针叶林、落叶阔叶林、常绿阔叶林、针阔叶混交林、灌丛和草丛等. 主要土壤类型有黄棕壤、山地黄棕壤、水稻土、潮土、黄褐土等^[20]. 近年来, 库区出现包括局部富营养化及重金属污染的水质问题以及诸如植被毁损、水土流失等生态环境问题^[16].

本研究是“丹江口库区水化学元素和水质时空变化及成因”的部分研究成果. 目的是了解库区水化学时空变化情况, 并探索他们的成因及可能的来源. 选点时主要考虑在丹江及汉江库区选取代表性的点 [丹江库区中心 (D2) 及汉江库区中心 (D4)], 同时结合我国大型的水利工程 (南水北调工程) 的取水处 [陶岔 (D3)]; 选取大坝下游 (D5) 是为了比较水经库区长时间停留后和库区水化学情况; 而选取接近丹江入库口的小山峡 (D1), 可以较好地说明上游流域水化学在库区的变化情况. 在了解基本情况后, 在后续的研究中将会增加点位 (例如丹江大坝前、浪河口附近及汉江入库口等). 点位示意图 1.

1.2 研究方法

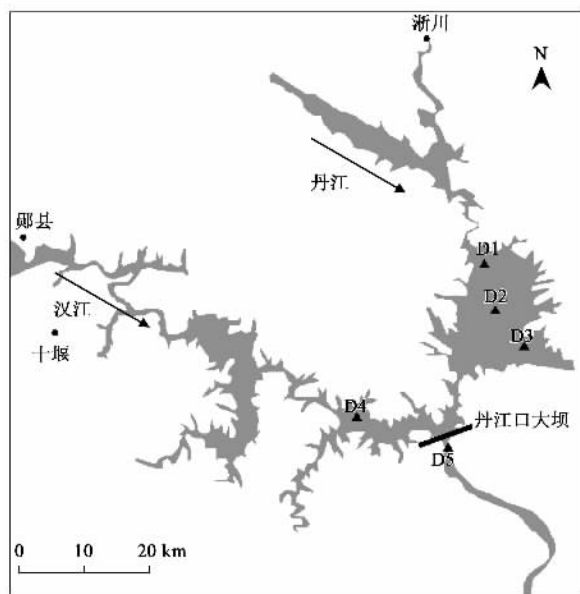


图 1 采样位置

Fig. 1 Sampling sites in the Danjiangkou Reservoir, China

1.2.1 样品采集

按照水文节律 (枯、丰水季) 对 D1、D2、D3、D4、D5 进行采样, 水样取表面水下 50 cm. 采样时间为 2004 年的 11 月, 2005 年的 1、4、6、8 和 11 月, 以及 2006 年 4 月和 7 月. 按照当年的水文情势, 属于雨季的为 2005 年的 8 月和 11 月.

1.2.2 分析

YSI 6920 现场测定 pH 和 TDS (总溶解性固体), HCO₃⁻ 采用标准酸甲基橙指示剂滴定法. 样品采集后现场用孔径为 0.45 μm, 直径为 47 mm 的 Millipore 硝酸纤维滤膜过滤, 滤液用 100 mL 的聚乙烯瓶分装成 2 分, 其中用于阳离子测定的水样加超纯硝酸至 pH < 2 后密封保存. 所有实验室测试工作在中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室完成. SO₄²⁻、Cl⁻、NO₃⁻ 采用离子色谱法测定 (Dionex Corporation, Sunnyvale, CA, USA), 它们的检出限分别为 0.1、0.04 和 0.1 mg·L⁻¹. Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺ 采用电感耦合等离子发射光谱法测定 (IRIS Intrepid II XSP DUO, USA), 其检出限分别为 5、5、10 和 16 μg·L⁻¹. 阴阳离子的误差控制在 ± 10% 以内.

2 结果与讨论

2.1 主要离子特征

pH、TDS 及主要离子的时空变化见表 1 及图 2. pH 介于 7.64 ~ 8.7, 呈碱性, 且枯季比雨季大, 说明雨季水质有恶化趋势. TDS 介于 149.9 ~ 291.2

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 高于世界平均值 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[21], 属弱矿化度水. 总硬度(以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度和计)介于 $40\sim 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 属极软水. HCO_3^- 及 Ca^{2+} 分别占主要阴、阳离子组成的 $77.54\%\sim 77.87\%$ 和 $70.66\%\sim 77.93\%$, 且 $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, 按照 O. A. 阿列金

分类法^[22], 丹江口库区水质为 HCO_3^- -Ca 型水. 阳离子中 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, 与长江南通站河水中的研究结果($\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$)^[23] 及天然水中的主要离子不一致^[22], 其原因是汉江流域含镁矿物白云石 [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] 以及菱镁矿

表 1 丹江口水库主要离子季节变化/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

离子	D1		D2		D3		D4		D5	
	雨季	枯季	雨季	枯季	雨季	枯季	雨季	枯季	雨季	枯季
Cl^-	5.58	7.73	5.50	6.12	5.52	5.90	5.17	4.85	4.09	4.96
	0.06	2.85	0.37	1.48	0.33	1.11	2.46	1.12	0.06	1.15
NO_3^-	5.79	6.44	5.83	6.02	5.11	5.59	5.66	4.97	6.34	5.56
	1.77	2.44	1.83	1.03	2.63	0.74	0.75	0.99	0.78	0.64
SO_4^{2-}	29.80	36.55	36.40	35.41	35.55	32.90	23.15	29.76	30.50	30.90
	0.42	6.11	9.33	7.85	10.54	7.83	0.78	6.99	9.48	7.11
HCO_3^-	143.35	178.96	143.35	148.23	149.45	144.37	115.90	124.64	128.10	137.45
	12.94	22.73	4.31	11.80	12.94	10.08	0.00	17.40	0.00	8.58
Ca^{2+}	34.34	46.10	33.80	41.51	33.83	40.83	31.39	38.95	34.26	41.87
	0.30	5.66	0.05	6.70	0.83	6.59	2.57	6.72	2.58	5.14
Mg^{2+}	10.12	13.01	10.12	10.07	10.31	9.69	6.47	7.20	7.68	7.69
	0.02	2.82	0.01	1.67	0.12	1.78	0.08	1.40	0.61	0.99
K^+	0.88	1.50	0.91	1.34	0.90	1.33	0.61	0.94	0.72	1.09
	0.15	0.57	0.19	0.62	0.17	0.57	0.03	0.43	0.10	0.48
Na^+	3.36	4.59	3.39	4.00	3.41	3.95	2.11	2.79	2.48	2.98
	1.57	1.84	1.67	1.90	1.65	1.92	0.88	1.26	1.03	1.31

(MgCO_3) 的化学风化以及与镁相关的工业.

2.2 水化学时间变化特征

主要阴、阳离子在季节上均表现出了一定的差异性,除了汉江(D4)的 Cl^- 和 NO_3^- 以及坝下游(D5)的 NO_3^- 外,其余参数的浓度均呈现出枯季比雨季大(表 1). 其原因是枯水季节水流速度缓慢,上游流域水体与岩石接触时间长,同时地下水的补给也增加了地表水中的主要离子,而雨季则相反. NO_3^- 由于受人类活动影响显著,雨季由于径流作用产生了大量的非点源 NO_3^- ,即使库区水体有很强的稀释作用,仍出现了雨季大于枯季的情况,主要表现在汉江和丹江口水库下游(D4 和 D5). 另外一个原因是库区周边的人为活动及雨季来水对库区底质的扰动,引起 NO_3^- 的释放.

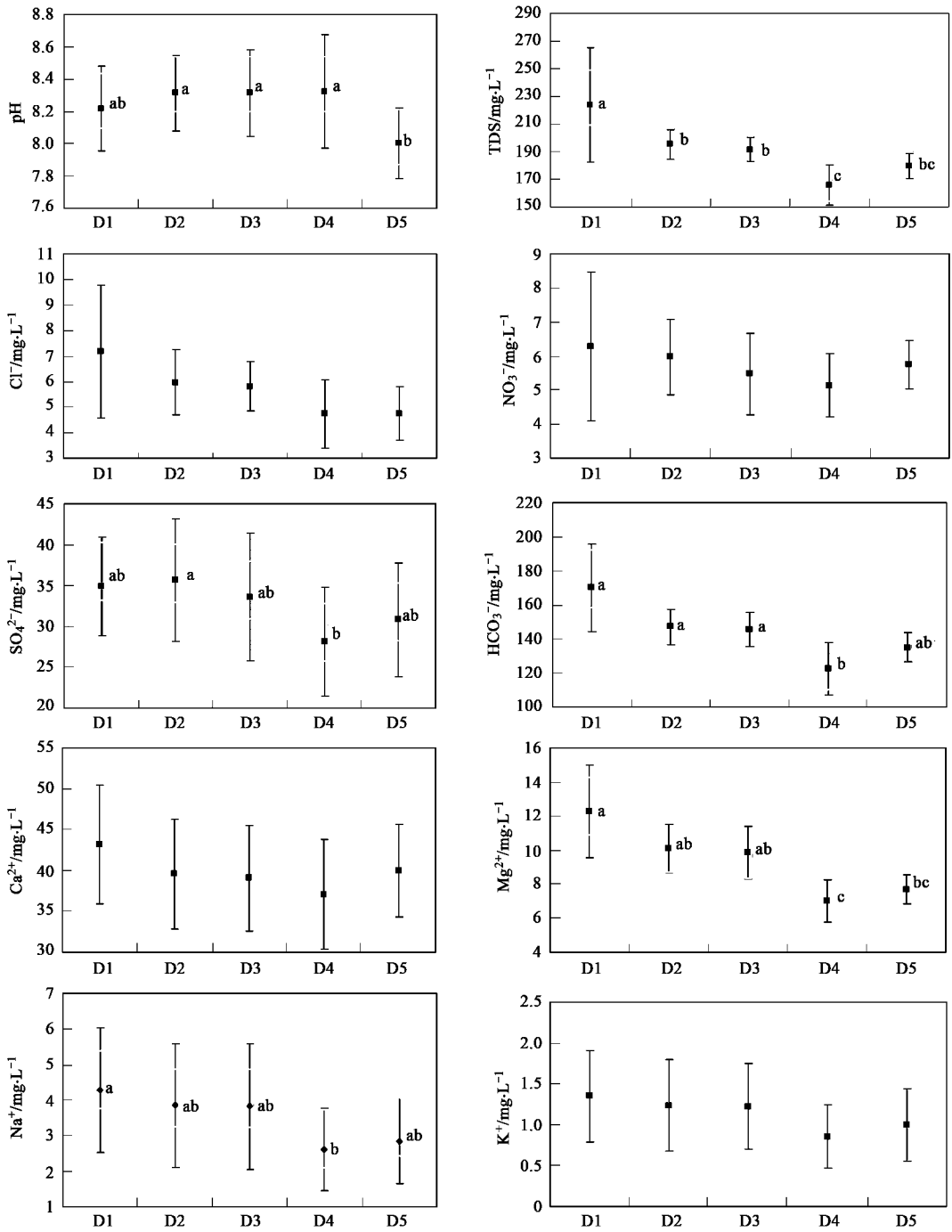
枯水期水质主要反映点源的污染情况,而丰水期水质主要受到面源污染的影响,是点源和面源共同作用的结果^[24]. 较大的标准偏差说明时间变化对水化学特征影响明显(图 2). 为了比较具体月份对水化学特征的影响,本研究选取 2004-11、2005-06、2005-08、2005-11 以及 2007-06 月作为 5 个水平进行方差分析. 结果表明 Cl^- 、 HCO_3^- 及 Mg^{2+} 在各月份无显著性差异. 采样时间对 NO_3^- 和 SO_4^{2+} 影响很大,且

最大值均出现在 2005-11(雨季),说明 NO_3^- 和 SO_4^{2+} 主要受降雨引起的非点源污染影响,2004-11 和 2005-06 的明显差异同时也说明在枯季,人为活动强烈影响着 NO_3^- 和 SO_4^{2+} . Ca^{2+} 和 Na^+ 均只表现出在枯季(2004-11)与雨季(2005-11)有显著性差异,说明主要受水文情势影响. K^+ 在枯季与雨季(2005-06 和 2005-11)以及枯季和枯季(2005-06 和 2006-07)均存在显著性差异,说明受到降雨及人为输入的影响.

2.3 水化学空间分布特征

除 pH 及 Cl^- 外,其余参数呈现出一致的空间变化(图 2). 都是从丹江入库沿着水流方向减小(D1 ~ D3),在汉库中心(D4)达到最小值. 表 2 分析了各点位离子平均浓度的相关性,结果表明各阴离子之间并未出现明显的相关性, Ca^{2+} 也未表现出和其他阳离子有显著的相关关系.

为了进一步说明主要离子的空间变化是否存在显著性差异,本研究运用了单因素方差分析(ANOVA),结果见图 2. Cl^- 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 及 K^+ 在空间上不存在显著差异, SO_4^{2-} 只在丹库(D2)和汉库(D4) ($p < 0.05$)之间存在显著差异, Na^+ 在 D1(丹库)和 D4(汉库) ($p < 0.05$)之间有显著差异性,汉江(D4)的 HCO_3^- 和丹库的 D1 ($p < 0.01$)、D2 及 D3 ($p <$



不同的字母表示空间差异显著($p < 0.05$)

图2 丹江口水库 pH、TDS 及主要离子空间变化(平均值 ± 标准偏差)

Fig.2 Spatial variation of pH, TDS and the major ions (Mean ± SD) in the Danjiangkou Reservoir during the period of 2004-2006

0.05)的 HCO_3^- 差异显著。 Mg^{2+} 表现出了明显的空间差异性, 具体为汉江(D4)分别和丹江的 D1($p < 0.01$)、D2($p < 0.01$)、D3($p < 0.05$)以及坝下游(D5)和丹江(D1)($p < 0.05$)、D2($p < 0.05$)之间。这主要是由汉江流域上游及丹江流域不同地质及人类活动造成, 而丹江口水库坝下(D5)和丹库的水化学不同

则是因为汉江来水与丹江来水的混合, 以及随水流方向水化学离子的沉积。主要离子在丹江库区的 3 个点位间并未表现出显著性不同, 因此, 库区水体的水化学特征主要由上游水体决定, 而库区的人为活动并未明显改变主要离子的浓度。

研究表明 Ca^{2+} 一般为地方来源^[25], 库区周围及

上游的地层主要为碳酸盐岩,因此可以认为 Ca^{2+} 主要来源于人为活动及碳酸盐岩风化。 NO_3^- 及 HCO_3^- 与 Ca^{2+} 有显著的正相关性(表 2),表明他们有相同的来源。 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 均表现出和 Cl^- 、 SO_4^{2-} 以及

HCO_3^- 有显著的正相关性(表 2),表明它们有类似的来源。 Na^+ 与 Cl^- 的摩尔比为 0.94,反映它们主要来源为自然矿物的分解^[23]。

2.4 水化学形成与岩石风化初步分析

表 2 库区各离子浓度空间变化相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis on spatial variation of major ions in the Reservoir

	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Ca	Mg^{2+}	Na^+	K^+	TDS	pH
Cl^-	1									
NO_3^-	0.749	1								
SO_4^{2-}	0.777	0.789	1							
HCO_3^-	0.947*	0.876	0.834	1						
Ca^{2+}	0.796	0.929*	0.665	0.926*	1					
Mg^{2+}	0.978**	0.811	0.873	0.981**	0.838	1				
Na^+	0.933*	0.744	0.930*	0.934*	0.739	0.979**	1			
K^+	0.897*	0.797	0.953*	0.943*	0.783	0.967**	0.990**	1		
TDS	0.955*	0.883*	0.824	0.999**	0.928*	0.980**	0.927*	0.933*	1	
pH	0.310	-0.275	0.183	0.023	-0.328	0.211	0.299	0.174	0.033	1

1) *表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$

流域河水中的主要离子除了来自岩石风化外,还有雨水、大气输入以及人为输入.研究表明主要化学离子受水文影响较大, SO_4^{2-} 主要来源于大气沉降^[26], NO_3^- 与 Ca^{2+} 在雨季大,而 Na^+ 与 HCO_3^- 在枯季大^[5].但随着工业活动的加强,大气酸性降水表现在 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 含量的增高^[7].本研究区域的主要离子并未出现在雨季比枯季大的情况(除 NO_3^- 外),这说明水化学离子的复杂性,同时受到水文、土壤与地下水的相互作用、地质、人为输入等影响^[27],另一方面,这也表明雨季的径流是 NO_3^- 的一个重要来源^[1].

长江流域主要风化过程研究表明 HCO_3^- 及 Ca^{2+} 主要来源于白云岩及方解石的风化溶解^[22]. HCO_3^- 与 Ca^{2+} 的摩尔比为(2.2~2.6):1(表 1),说明方解石水解是流域上游主要的风化反应,同时 HCO_3^- 与 Mg^{2+} 比 HCO_3^- 与 Ca^{2+} 更相关(表 2),暗示存在白云岩的风化^[23]. Na^+ 与主要阴离子 Cl^- 、 HCO_3^- 及 SO_4^{2-} 有显著的正相关关系(表 2),应该是来源于芒硝和岩盐以及钠长石^[23].而 Na^+ 与 Cl^- 的摩尔比为 0.94,说明 Cl^- 还有其它来源.

3 流域水资源保护策略

丹江口水库水化学组成及变化趋势反映上游流域岩石风化及人为活动强度.研究表明 HCO_3^- 几乎不受人为活动影响,而 Na^+ 和 Cl^- 的 90%源于人为排放^[7],说明人类活动正强烈地改变着水化学主要离子的组成.大气降水在降雨量丰富的地区是控制

地表水化学的重要机制^[28].丹江口库区及其上游流域降雨充沛,随着工业发展及人类活动加剧,降雨对该地区水化学组成的影响将逐渐显现出来.必须加强酸雨控制及土地利用等人类活动的合理规划.

丹江口大坝的加高将增加库区面积约 300 km²,原有的水库流域生态将被破坏,具体表现为气温、温度和风速等小气候要素的改变^[29],研究表明气候变化已引起湖泊水体组成的变化^[30].同时被淹没区域土壤及岩石的溶解及风化将加快,这些均将引起库区水化学组成特征的改变.因此,针对上游流域植被毁损及水土流失严重等生态环境问题,应大力提倡退耕还林,增加植被面积以改善流域的小气候状况.此外,有必要进行湿地扩展,扩展的范围应涉及到水源区整个区域和周边地区.具体在蒸发量较大的北部和水源区比邻的南部,例如西峡县西部川地、商丹盆地、洛南盆地、淅川、内乡等.加强库区及汉江上游流域,尤其是受污染小流域的河岸植被带的恢复和重建研究.河岸植被缓冲带对人为及自然干扰水质的过程有着强烈的缓冲和过滤作用,同样,对控制工业地区的水污染,以及对草原、农业地区因放牧和施肥引起的河水富营养化等生态效益方面也有极为重要的作用^[31].

4 结论

(1)丹江口水库的主要离子组成表明, Ca^{2+} 占主要阳离子组成的 70.66%~77.93%, HCO_3^- 占主要阴离子组成的 77.54%~77.87%.按照 O.A.阿列金

分类法,丹江口库区水质为 HCO_3^- -Ca 型水.

(2)汉江库区的水化学离子浓度明显低于丹江库区.库区水化学特征并未受库区人类活动影响,主要由上游岩石风化及地质决定.

(3)水化学时间、空间变化表明, NO_3^- 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 主要来源于人为活动与碳酸盐岩风化, Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 均表现出和 Cl^- 、 SO_4^{2-} 有显著的正相关性,他们主要来源于自然矿物风化,而人为输入对他们贡献很小.

(4)主要离子组成间的相关分析得到库区上游流域主要风化类型是白云岩、方解石等碳酸盐类的风化溶解,是水体中高浓度 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 的主要来源.岩盐、芒硝对 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的影响较大.

致谢:王宜平、李连发、盛果等参加了野外调查,中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室韩鸿印、杨惠参加了主要离子的分析,在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] Markich S J, Brown P L. Relative importance of natural and anthropogenic influences on the fresh surface water chemistry of the Hawkesbury-Nepean River, south-eastern Australia [J]. *Sci Total Environ*, 1998, **217**(3): 201-230.
- [2] Hill T, Neal C. Spatial and temporal variation in pH, alkalinity and conductivity in surface runoff and groundwater for the Upper River Severn catchment [J]. *Hydrol Earth System Sci*, 1997, **1**(3): 697-716.
- [3] Jarvie H P, Neal C, Leach D V, *et al.* Major ion concentrations and inorganic carbon chemistry of the Humber Rivers [J]. *Sci Total Environ*, 1997, **194/195**: 285-302.
- [4] Neal C, Robson A J, Harrow M, *et al.* Major, minor, trace element and suspended sediment variations in the River Tweed: results from the LOIS core monitoring programme [J]. *Sci Total Environ*, 1997, **194/195**: 193-205.
- [5] Ohnri K, Mitchell M J. Stream water chemistry in Japanese forested watersheds and its variability on a small regional scale [J]. *Water Resour Res*, 1998, **34**(6): 1553-1561.
- [6] 陈永金,陈亚宁,李卫红,等.塔里木河下游地下水化学特征对生态输水的响应[J].*地理学报*,2005,**60**(2):309-318.
- [7] 吴丰昌,万国江,蔡玉蓉,等.控制湖泊水体化学组成的地球化学原理研究[J].*水科学进展*,1997,**8**(2):169-175.
- [8] 张水元,刘瑞秋.三湖连江水库水化学特征[J].*水生生物学报*,2000, **24**(2):521-529.
- [9] 张芸,吕宪国,杨青.三江平原典型湿地水化学性质研究[J].*水土保持学报*,2005,**19**(2):184-187.
- [10] Wang Q, Shi J A, Chen G J, *et al.* Environmental effects induced by

- human activities in arid Shiyang River basin, Gansu province, northwest China [J]. *Environ Geol*, 2002, **43**(1-2):219-227.
- [11] Shao M, Tang X Y, Zhang Y H, *et al.* City clusters in China: air and surface water pollution [J]. *Front Ecol Environ*, 2006, **4**(7): 353-361.
- [12] 李思悦,张全发.对南水北调工程解决中国北方用水问题的分析[J].*人民黄河*,2005,**27**(8):28-29,43.
- [13] 王佳宁,晏维金,贾晓栋.长江流域点源氮磷营养盐的排放、模型及预测[J].*环境科学学报*,2006,**26**(4):658-666.
- [14] Liu S, Zhang J, Chen H, *et al.* Nutrients in the Changjiang and its tributaries [J]. *Biogeochemistry*, 2003, **62**(1): 1-18.
- [15] 李仁东,李劲峰,黄进良,等.南水北调对湖北丹江口水库区土地资源的影响[J].*长江流域资源与环境*,1998,**7**(2):109-114.
- [16] 李思悦,张全发.南水北调中线丹江口库区主要生态环境问题及植被恢复[J].*中国农村水利水电*,2008,(3):1-4.
- [17] 陈绪强.南水北调中线工程供水水质[J].*人民长江*,1994, **25**(2):16-19.
- [18] 成庆利,张杰.丹江口水库水质现状分析与评价[J].*环境与可持续发展*,2007,(1):12-13.
- [19] 封光寅,段文超,魏运明.南水北调中线水源区湿地扩展与环境保护[J].*人民黄河*,2005,**27**(9):12-14.
- [20] 金义兴,沈泽昊,江明喜,等.南水北调中线工程对陆生植物的影响及其对策初步研究[J].*长江流域资源与环境*,1995, **4**(4):154-162.
- [21] Gaillardet J, Dupre B, Lourat P, *et al.* Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. *Chem Geol*, 1999, **159**: 3-30.
- [22] 陈静生.水环境化学[M].北京:高等教育出版社,1987.40-69.
- [23] 李晶莹,张经.长江南通站含沙量及水化学变化与流域的风化过程[J].*长江流域资源与环境*,2003,**12**(4):363-369.
- [24] 赵佩伦,申献辰,夏军,等.泥沙对黄河水质影响及重点河段水污染控制[M].郑州:黄河水利出版社,1998.
- [25] 韩贵琳,刘从强.贵阳地区雨水化学与 Sr 同位素地球化学[J].*环境化学*,2005,**24**(2):213-218.
- [26] Hornbeck J W, Baily S W, Buso D C, *et al.* Streamwater chemistry and nutrient budgets for forested watersheds in New England: variability and management implications [J]. *For Ecol Manage*, 1997, **93**: 73-89.
- [27] 周长进,董锁成,李岱.疏勒河流域水化学特征及其保护[J].*水利水电科技进展*,2004,**24**(2):16-18.
- [28] Benens R J. The geochemical character of upland waters of northeast New South Wales [J]. *Limnol Oceanogr*, 1987, **32**(6): 1291-1306.
- [29] 赵欣,张中旺,刘超,等.南水北调中线工程水源区的环境评价与预测[J].*安全与环境工程*,2003,**10**(4):5-8.
- [30] 秦伯强.气候变化对内陆湖泊影响分析[J].*地理科学*,1993, **13**(31):212-215.
- [31] Peterjohn W T, Correl D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest [J]. *Ecology*, 1984, **65**(5): 1466-1475.