第 43 卷第 5 期　　水 生 态 学 杂 志　　Vol.43, No.5
2022 年　9 月　　Journal of Hydroecology　　Sep. 2022
DOI:10.15928/j.1674-3075.202103290085

西藏年楚河流域温泉水水化学特征及其环境意义

仁增拉姆,罗　珍,叶浠倩,德青曲桑,黄　香

(西藏大学理学院 高原流域环境化学实验室,西藏 拉萨　850000)

摘要:西藏年楚河沿断裂带发育,其流域内温泉出露分布广泛,但开发利用率较低。揭示流域温泉水的水化学变化特征及其影响因素,使这些温泉水化学特征信息得到更新,为年楚河流域温泉开发利用提供技术支撑。2019 年 10 月对该流域内 5 处温泉(金嘎温泉、康马察多温泉、查当微温泉、沙拉岗温泉和孟扎温泉)水化学特征及对特征组分的物源机制进行分析,并采用 SiO_2 温标法估算其热储温度。结果表明,研究区温泉水为中偏酸性水,水温在 17.9~42.3 ℃,热储温度在 61.8~110.1 ℃,属于低温地热系统。各温泉的电导率、矿化度和总溶解性固体分别在 1.00~4.09 mS/cm、0.49~2.48 g/L 和 0.71~2.87 g/L,属于淡水或微咸水。与流域地表水不同,Na^+ 和 HCO_3^- 分别是这些温泉水中的主导阳离子和阴离子。水化学类型,金嘎温泉为 Na-HCO_3·Cl 型,康马察多温泉 Ca·Na-HCO_3·Cl 型,查当微温泉 Ca-HCO_3 型,沙拉岗温泉 Na-HCO_3 型,孟扎温泉 Na·Ca-HCO_3 型。各温泉水的主要离子组分受流域内分布的长石、石英等硅酸盐岩的溶解影响显著。整体上金嘎温泉和察多温泉构造环境比较封闭,径流路径较长,受到浅层水的影响较小;而查当微温泉、孟扎温泉和沙拉岗温泉的构造开启性较好,储存环境较开放,一定程度上受到了浅层水的影响。除此之外,被测的 15 种微量元素(Ag、Al、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Hg、Mo、Mn、Ni、Pb、Se、Ti 和 Zn)以及 CO_3^{2-}、NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的含量均较低。总体而言,年楚河流域内这 5 处温泉水的水化学基本只受自然过程作用的控制,但温泉洗浴排放和泉水的季节性外泄对流域地表水生态环境的影响不容忽视。

关键词:年楚河流域温泉;水化学特征;物源机制;热储温度

中图分类号:X13　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1674-3075(2022)05-0033-09

温泉作为地热能的一种地表显示,其形成和出露都具有一定的特殊地质条件,即不同的地质背景形成不同类型、特点的温泉。温泉不仅具有资源丰富、可供发电采暖和养殖、对环境污染小、运营成本低等特点(刘明亮等,2020),同时还是宝贵的医疗热矿水和饮用矿泉水资源以及生活供水水源。对温泉水进行科学合理地开发利用(如地热发电、住房供暖、蔬菜温室、医疗保健、温泉洗浴等),具有十分可观的经济效益和环境效益。中国是一个地热资源和地热类型丰富的国家(王贵玲等,2020)。其中,西藏地处地中海–喜马拉雅地热带的中东部,构造断裂极为发育,岩浆活动和变质作用强烈,是全国乃至全球地热活动最强烈的地区之一(许鹏等,2018)。据不完全统计,西藏已知地热水点多达 800 处,约占全国总数(3 000 处)的 1/4 以上(姜鸿才等,1994)。然而,西藏除了著名的羊八井高温地热田和朗久地热田用于发电以外大部分温泉直接用于人体洗浴,其开发利用率较低。最早有关西藏地热温泉的相关研究始见于 20 世纪 70–80 年代(佟伟等,1981),但侧重于对这些地热资源量的调查研究(何世春,1983;张萌等,2014),个别西藏地热温泉水水化学的系统报道则始于近些年(刘昭等,2017;许鹏等,2018)。

位于喜马拉雅地质构造区中段的西藏年楚河流域内多处有温泉出露,流域内地热温泉资源开发利用情况较差,除用于洗浴外,多数直接排至临近的年楚河及其支流河道内,对这些河流的水生态环境造成一定的影响。本文以年楚河流域内典型的 5 处温泉(即金嘎温泉、查当微温泉、康马察多温泉、孟扎温泉和沙拉岗温泉)为研究对象,对这 5 处温泉水的主要组分及特征组分的物源机制开展相关分析,并采用 SiO_2 温标法估算其热储温度。研究结果不仅可以使这些温泉水化学特征信息得到更新,也可为区域内温泉水资源的可持续开发利用提供依据,为全面了解年楚河流域水生态环境影响因素提供科学参考。

1　材料与方法

1.1　区域概况

年楚河为雅鲁藏布江中游右岸最大支流,发源于喜马拉雅山脉中段北麓的雪山。河流长 223 km,流域面积 11 130 km²,覆盖日喀则一市三县(日喀则

收稿日期:2021-03-29　　**修回日期:**2022-07-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(22066022,21667027)。

作者简介:仁增拉姆,1994 年生,女,硕士研究生,主要研究方向为高原环境监测与生态安全。E-mail: 2519000857@ qq.com

通信作者:黄香,1974 年生,女,教授,研究方向为流域水环境化学。E-mail: xiang.huang@utibet.edu.cn

市、白朗县、江孜县、康马县）的全部或大部分，横跨东经88°35′~90°15′和北纬28°10′~29°20′，地处喜马拉雅地质构造区中段，平均海拔在3 800 m以上（钱成，2002）。年楚河流域属高原温带半干旱气候区，具有气温低、日温差大、太阳辐射强烈、空气干燥、风大、降水量少、蒸发量大等高原独特的气候特点（夏传清等，2001）。流域内年均降水量429 mm（班春广等，2019），降雪主要分布在海拔较高地区，常年可见终年积雪的山峰。流域内主要分布有沉积岩且具有不同程度的变质现象，其岩性以砂岩及泥质岩为主。砂岩大多数变质为石英岩，而泥质岩则为板状及片状岩层。其中在泥质和砂质岩石中还掺杂有钙质构成钙质板岩、钙质砂岩及泥灰岩等（中国科学院青藏高原综合考察队，1981）。由于年楚河沿断裂发育，流域内多处有温泉出露。《西藏温泉志》（佟伟等，2000）在该流域内记录有8处温泉，本研究选取了其中5处终年有水的典型温泉，其具体信息见表1。

表1 年楚河流域5处温泉基本信息

Tab. 1 Basic information on five hot springs in the Nyangqu River basin

温泉名称（样点）	经度	纬度	海拔/m	周边环境
金嘎温泉（JG）	28°47′17.78″	89°17′03.27″	4323	位于距岸线约500 m的河岸阶地及其底部，泉区遍及钙化沉积且有明显的硫磺味，简单开发利用，泉水南流汇入年楚河二级支流。
查当微温泉（CD）	28°40′54.20″	89°36′50.83″	4196	位于康马县少岗乡少岗村西约1.5 km处，泉水自年楚河二级支流康如普曲右岸碳质绢云母片岩之中流出，原生态环境，泉水外流汇入康如普曲。
察多温泉（KC）	28°34′32.89″	89°40′30.59″	4301	位于康马县城以北约1 km处的年楚河一级支流冲巴涌曲的左岸阶地，泉区及附近分布有钙华体，已开发利用，尾水直接排入冲巴涌曲。
孟扎温泉（MZ）	28°21′41.09″	89°32′33.81″	4449	位于康马县萨玛达乡孟扎村以东约1 km的年楚河一级支流冲巴涌曲左侧河漫滩。泉眼区为温水沼泽且周围地面分布有盐霜，有硫磺味，处于原生态环境。
沙拉岗温泉（SL）	28°51′04.96″	89°54′48.46″	4317	位于江孜县龙马乡境内、年楚河一级支流龙马河左岸沙拉岗村。已被用于商业洗浴。

1.2 样品采集与分析

于2019年10月对年楚河流域内的5处温泉进行水样采集（图1）。共设置8个样点，其中，金嘎温泉3个泉眼及康马察多温泉2个泉眼每个泉眼设1个采样点。8个采样点分别为：JG1（金嘎温泉上）、JG2（金嘎温泉中）和JG3（金嘎温泉下）、CD（查当微温泉）、KC（康马察多温泉内）、KC1（康马察多温泉外）、MZ（孟扎温泉）和SL（沙拉岗温泉）。水样的采集与处理严格按照《地热资源地质勘查规范》（GB/T 11615-2010）执行。水温、pH值、电导率（EC）、矿化度（Sal）、总溶解性固体（TDS）等5项理化参数采用水质多参数笔（PCSTestr35，新加坡EUTECH，精度分别为水温：0.1 ℃、pH：0.01、TDS和Sal：0.01 g/L、EC：0.01 mS/cm）测定；氧化还原电位（ROD）、浊度（Turb）和溶解氧（DO）则分别采用氧化还原度测定仪（ECO10，美国HACH，精度：1 mV/cm）、浊度仪（2100P，美国HACH，精度：0.01 NTU）和便携式溶解氧测定仪（HI98193，意大利HANNA）完成。

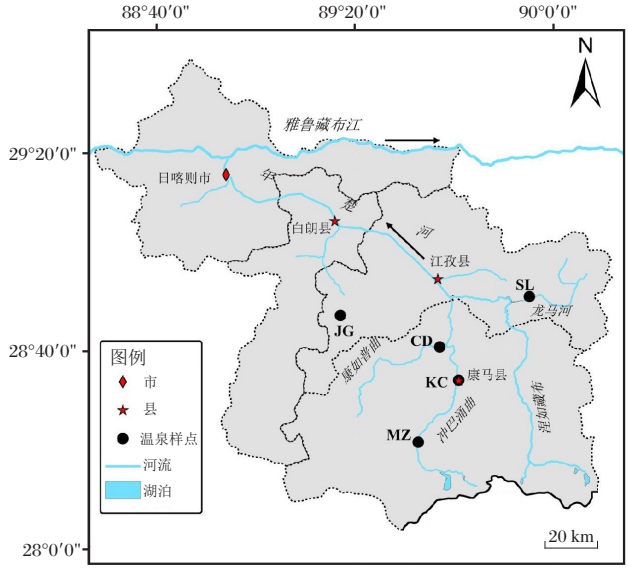

图1 年楚河流域5处温泉采样点示意

Fig.1 Location of the five hot springs in the Nyangqu River basin

各样点水样分别使用4 L聚丙烯材料（PP）的烧杯采集，并现场经0.45 μm聚醋酸纤维膜（美国密理博）过滤后，分别装入实验室酸洗（65%HNO_3）和去离子水预处理过的125 mL和250 mL无色带有螺旋盖的PP样品瓶中，加满盖紧，标记后装入清洁的自封式聚乙烯（PE）塑料袋中封口，于4℃便携式冷藏箱冷藏保存。所有样品瓶在收集水样之前用收集的滤液润洗2~3次。采集到的水样分别用于溶解相中各种微量元素和主要元素的测定。其中，主要离子（Ca^{2+}、K^+、Mg^{2+}、Na^+）和SiO_2以及Fe元素的测定采用电感耦合等离子体发射光谱仪（PerkinElmer，Optima 5300DV）完成，而Cu、Pb、Zn、Ni、Co、Ti、Al、Mo、Ag、Cd、Cr、Mn和Li元素的测定采用电感耦合等离子体质谱仪（PerkinElmer，NexION 300X）完成；Hg、As和Se采用原子荧光光度仪（北京吉天，AFS-820、AFS-830、AFS-220a）测定；阴离子（SO_4^{2-}、F^-、NO_3^-、Cl^-、PO_4^{3-}）采用离子色谱（DIONEX，ICS-1000）测定，HCO_3^-则采用容量法测定。

1.3 数据处理

所有统计计算均用Microsoft Excel 2010和SPSS 22.0进行。其中，对于一些低于仪器分析方法检出限的分析测试数据在计算时取方法检出限的一半值为参考值进行统计分析。实验结果图用ArcGIS10.5和OriginPro 2021制作。首先通过统计检验确定离子元素的含量均遵循正态分布，然后用Pearson相关分析评估离子元素浓度的相关关系。

2 结果与分析

2.1 年楚河流域温泉水水化学特性分析

本研究测定水温系指温泉水出露点即泉眼处的温度，是热矿水的重要指标。通常水温<25 ℃的温泉水被定义为常温温泉，水温25~40 ℃的温泉被定义为低温温泉，水温40~75 ℃的温泉被定义为中温温泉（周训等，2009）。从表2可以看出，本研究区温泉现场实测温度范围17.9~42.3 ℃。其中CD的温度最低，属于常温温泉，MZ和SL属于低温温泉，而JG 3个样点和KC两个样点均属于中温温泉。另采用无蒸汽损失的SiO_2温标来估算年楚河流域温泉地下热储温度，计算公式为T=1309/(5.19−lgSiO_2−273.15)。得出年楚河流域温泉的热储温度为61.8~110.1 ℃，属于低温地热系统（王贵玲等，2020）。年楚河流域温泉pH值为6.40~7.57（表2），为中偏酸性水。各温泉的EC和TDS分别为1.00~4.09 mS/cm和0.71~2.87 g/L。一般温泉水按矿化度又可被划分为淡水（Sal<1 g/L）、微咸水（Sal 1~3 g/L）、咸水（Sal 3~10 g/L）和卤水（Sal>50 g/L）（佟伟等，1981）。本研究区温泉水Sal范围在0.49~2.48 g/L，其中CD和SL属于淡水，KC两个样点、MZ和JG 3个样点属于微咸水。年楚河流域5处温泉的DO为0.80~4.66 mg/L，其中SL在全流域呈现最低值，MZ在全流域呈现最高值。而ROD除CD为正值之外其余均处于负值。研究区各温泉水体Turb变化较大。

表2　年楚河流域5处温泉水水化学基本特征

Tab.2　Hydrochemical characteristics of water at each site of the five hot springs in the Nyangqu River basin

样点编号	水温/℃	热储温度/℃	pH	EC /mS·cm^{-1}	TDS /g·L^{-1}	Sal /g·L^{-1}	ROD /mV	DO /mg·L^{-1}	Turb /NTU	Ca^{2+} /mg·L^{-1}	K^+ / mg·L^{-1}	Mg^{2+} / mg·L^{-1}	Na^+ / mg·L^{-1}	Cl^- / mg·L^{-1}	HCO_3^- / mg·L^{-1}	SO_4^{2-} / mg·L^{-1}
JG1	40.1	93.9	6.86	2.42	1.71	1.22	-327	1.89	14.80	135.75	35.83	16.95	425.75	357.30	1092.00	13.93
JG2	42.3	94.7	7.43	3.33	2.36	1.73	-21	2.01	31.50	83.50	89.16	17.57	619.50	743.40	810.50	7.85
JG3	40.8	90.1	6.40	4.09	2.87	2.48	-230	2.20	7.47	230.05	109.10	18.07	705.00	947.90	1168.00	0.10
CD	17.9	61.8	6.89	1.11	0.79	0.54	56	1.26	1.14	181.70	15.42	15.49	61.16	82.76	584.00	44.21
KC	41.7	105.5	6.47	2.76	1.91	1.38	-181	2.33	0.18	295.56	53.67	18.64	413.09	403.00	1338.00	19.96
KC1	38.6	95.5	6.60	2.87	2.03	1.48	-176	1.80	4.30	284.82	57.11	23.04	416.90	410.20	1344.00	28.01
MZ	33.6	76.3	6.55	2.17	1.54	1.11	-4	4.66	5.35	198.56	63.75	24.25	325.20	168.40	1213.00	94.86
SL	35.7	110.1	7.57	1.00	0.71	0.49	-85	0.80	0.69	18.92	8.83	5.73	249.95	4.16	561.70	62.58

由实验室仪器测得的各离子相关浓度计算出的$TDS_{计算}$和$EC_{计算}$分别与现场测定的$TDS_{实测}$和$EC_{实测}$表现出较好的相关性（R^2分别为0.9244和0.9993），说明本研究所得数据较为可靠。

从表2和三元相图（图2）可以看出，研究区温泉水，除CD样点以外，各样点水化学成分的主要阳离子均以Na^+为主，占阳离子总量的52.89%~88.19%。而温度最低的CD样点，其阳离子以Ca^{2+}为主，且占阳离子总量的66.37%。本研究温泉水阴离子均以HCO_3^-和Cl^-为主，分别占阴离子总量的73.35%和23.30%。Schoeller图（图3）有助于对比不同水样化学组分上的差异，可以看出，JG2和JG3的主要离子含量整体变化趋势基本一致，说明这2个泉眼热水经历了相同

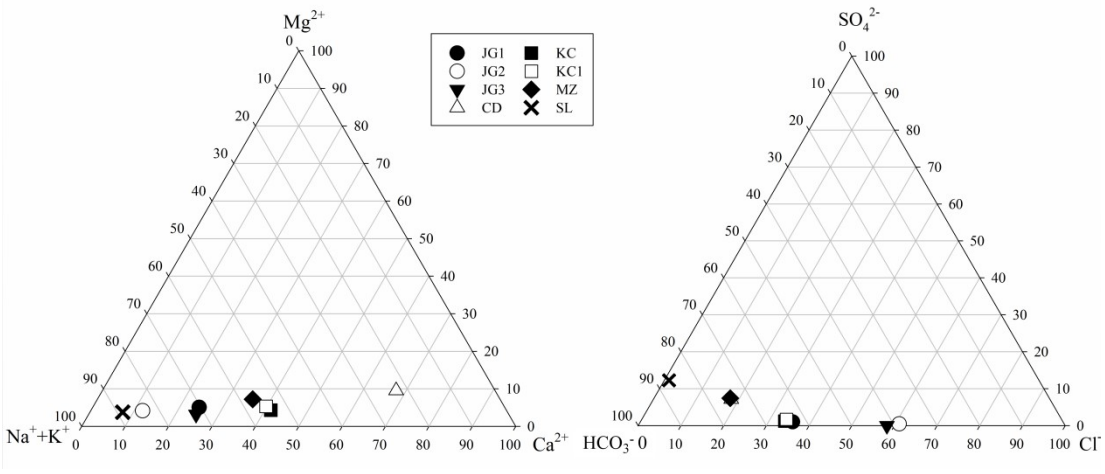

图2 年楚河流域5处温泉水样三元相图分析

Fig.2 Triangular diagrams of the five hot spring waters in the Nyangqu River basin

或相似的补给、径流和循环过程(Connolly et al,1990)。而其他6个样点,即JG1、KC和KC1,CD、MZ和SL分别形成2组情况,这2组样点水体在补给和循环模式上也分别具有相似性。值得注意的是,JG1、JG2和JG3虽是3个位于同一区域紧相邻的样点,但其水化学组分分布特征的影响因素有差别。而当地人认为理疗效果完全不同的2个泉眼KC和KC1,则具有完全相同的水化学特征及影响因素。

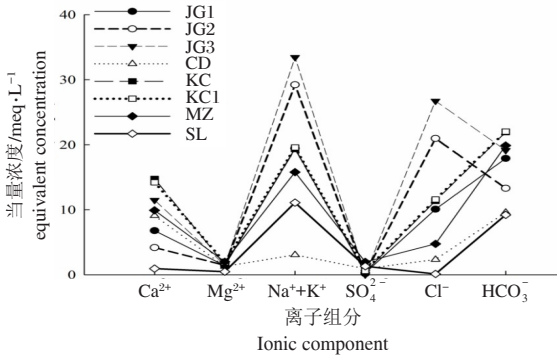

图3 年楚河流域5处温泉水样Schoeller分析

Fig.3 Schoeller diagram of the five hot spring waters of Nyangqu River basin

2.2 年楚河流域温泉水相关性分析

相关性分析常用来揭示离子的来源关系。通过对年楚河流域5处(8个样点)温泉水样中各主要离子的相关性分析(表3)得出,本研究温泉水中的Cl^-与Na^+、K^+间表现出显著正相关关系(相关系数为≥0.915),且TDS与这3种离子之间也表现出正相关性。表明这些温泉水中Cl^-与Na^+、K^+可能具有相似或相同的来源,且是这些温泉水TDS的主要贡献离子。此外,研究区温泉水体中的Mg^{2+}、HCO_3^-与Ca^{2+}之间也表现出显著的正相关关系。

2.3 年楚河流域温泉水特殊组分及微量组分分析

相比于地表水,地下热水(温泉水)中常含有较高浓度的As、F^-、Li和SiO_2等特殊组分。因此,温泉水常具有一定的理疗价值。西藏地热水中As属于非常特征性的元素(Guo et al,2015),其含量变化范围很大。如出露于特提斯喜马拉雅中生代沉积地层中的锡钦、哲古温泉中As含量分别为0.01 mg/L和0.03 mg/L,古堆温泉区的茶卡温泉As含量为0.02 mg/L,卡乌、曲参岗和查巴曲珍温泉As含量可达0.10 mg/L,布雄朗古、萨拉朗嘎和巴布的密温泉水中As含量甚至高于1.40 mg/L(许鹏等,2018),羊八井地热水中的As含量在3.00 mg/L左右(Guo et al,2007)。而年楚河流域温泉水中,SL和MZ样点的As含量仅分别为0.003 mg/L和0.08 mg/L,其余样点均未检出。本研究区温泉水中F^-、Li和SiO_2的含量情况见图4。

研究区温泉水中的F^-含量不高,为0.08~3.18 mg/L,其中JG2样点未检出(图4)。根据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006),JG1、KC1、MZ以及SL样点温泉水中的F^-含量超过了国家饮用水水质标准(>1 mg/L),因此,洗浴过程中应避免饮用。根据《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615-2010)中有关医疗热矿水水质标准,JG1(2.06 mg/L)和KC1(3.18 mg/L)温泉水中的F^-含量达到理疗价值浓度(>2 mg/L),可以命名为氟水,对治疗皮肤病和风湿有较好的疗效。本研究区温泉水中的SiO_2含量介于19.12~59.51 mg/L(图4)。根据《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615-2010)中有关医疗热矿水水质标准,KC(54.08 mg/L)和SL(59.51 mg/L)样点温泉水中的SiO_2含量达到了硅酸水理疗价值浓度(>50 mg/L),可以命名为硅水。Li在地壳中的丰度很低,仅为20 mg/kg。研究区温泉水体中Li的含量

表3　年楚河流域温泉各离子间相关系数分析

Tab.3　Correlation coefficients between ions in hot spring waters of Nyangqu River basin

因子	水温	Ca^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	SiO_2	TDS
水温	1									
Ca^{2+}	0.042	1								
Na^{+}	0.882**	0.136	1							
K^{+}	0.623	0.341	0.892**	1						
Mg^{2+}	0.134	0.736*	0.281	0.546	1					
HCO_3^-	0.524	0.801*	0.472	0.519	0.777*	1				
Cl^-	0.682	0.26	0.933**	0.915**	0.327	0.394	1			
SO_4^{2-}	-0.53	-0.187	-0.649	-0.462	-0.004	-0.185	0-.770*	1		
SiO_2	0.645	-0.209	0.3	-0.067	-0.46	0.098	0.067	-0.235	1	
TDS	0.753*	0.429	0.941**	0.940**	0.526	0.633	0.958**	-0.677	0.092	1

注：** 在 0.01 水平（双尾）相关性显著；* 在 0.05 水平（双尾）相关性显著。

Note: * * highly significant correlation (P<0.01, two tail); * significant correlation (P<0.05, two tail).

为0.66~22.37 mg/L（图4），根据《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615-2010)中有关医疗热矿水水质标准，本研究区温泉中除SL样点(0.66 mg/L)外其余均符合锂矿泉水的命名标准。年楚河流域5处温泉水体中18种（Ag、Al、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Hg、Mo、Mn、Ni、Pb、Se、Ti和Zn以及CO_3^{2-}、NO_3^-和PO_4^{3-}）微量组分含量均较低。

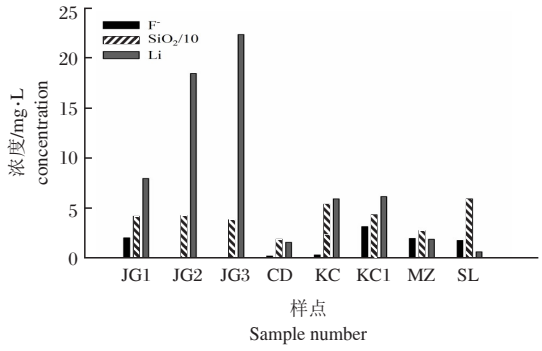

图4　年楚河流域5处温泉水样特殊组分F^-、SiO_2、Li含量

Fig.4　Concentrations of F^-, SiO_2 and Li at each sampling site of five hot springs in Nyangqu River basin

3　讨论

3.1　年楚河流域温泉水水化学特性

一般水体溶解氧易受温度、大气压、海拔和含盐量等的影响（奚旦立和孙裕生，2010）。温泉水体是由地壳内部的岩浆作用或地表水渗透循环作用所形成，是从地下自然涌出的泉水，因此水体的DO含量较低。此外，研究区5处温泉位于高海拔区（平均4 000 m以上）且水温和含盐量都明显高于流域地表水（仁增拉姆等，2021），加上青藏高原独特的地理位置和气候特性，因此本研究所测溶解氧值仅供参考。从ROD值可以看出，研究区水体处于还原环境，主要是因为温泉水蕴藏于地下，埋藏深，其赋存空间比较封闭，水力联系较弱，受地表影响较小（张庆等，2014；刘明亮等，2020）。而研究区CD样点与其他温泉相比，所处环境较开放，TDS、EC和Sal较低，温度在流域5处温泉中具有最低值，从而与其他温泉相比具有气体溶解度较大的特点。此外，CD样点的水量明显大于流域其他温泉且水流比较湍急，使水体交换程度较高而呈现出富氧状态（廖辉杰等，2021）。整体而言，年楚河流域为中低温地热系统，水体呈中偏酸性水，其中EC、TDS和Sal含量远远高于流域河流水体（EC 0.39 mS/cm、TDS 0.28 g/L、Sal 0.17 g/L）（仁增拉姆等，2021）。金嘎温泉和康马察多温泉的TDS平均值分别为2.31 g/L和1.97 g/L，与位于青藏高原活动构造带且水温和pH值都相近的昌都觉拥温泉的相关参数数值（2.06 g/L）（郭宁等，2020）相近。

根据舒卡列夫分类方法可知，JG1、JG2和JG3的水化学类型均为Na-HCO_3·Cl型。这与分布在北喜马拉雅穹隆构造带中的卡乌、曲参岗、查巴曲珍温泉以及谷露-当雄-羊八井断裂带中的谷露温泉水化学类型（许鹏等，2018）一致，拥有相似的水化学特征。CD的水化学类型为Ca-HCO_3，KC和KC1的水化学类型为Ca·Na-HCO_3·Cl，MZ的水化学类型为Na·Ca-HCO_3，而SL的水化学类型为Na-HCO_3。研究区温泉水表现不同的温度特征和水化学特征，与补给地热系统的冷水本身以及所处的围岩密切相关（许鹏等，2018）。水岩相互作用中的离子迁移，尤其是阳离子交换作用，导致地下水中钙离子含量降低，而钠离子大量富集。因此，地下水通常形成以Na^+为主要阳离子的水化学类型（李常锁等，2018）。

反之如温泉水的分布与地表水水流循环系统关系较密切，该温泉水水化学则表现出地表水化学特征。因此，研究区温泉水体阳离子以Na^+为主，这与Na^+的溶解度和迁移能力强有关，研究区岩石主要是花岗岩（中国科学院青藏高原综合考察队，1981），地下水在循环过程中发生了水岩作用以及围岩中的含钠矿物的溶解作用。另泉口温度较低的温泉在阳离子组成中具有更高的Ca^{2+}含量（许鹏等，2018），研究区温泉中，CD的水温最低、TDS、EC和Sal数值也较低，且表现出与位于该样点下游康如普曲相似的水化学类型（$Ca-HCO_3 \cdot SO_4$）（仁增拉姆等，2021），表明CD样点温泉水与区域地表水循环密切相关。整体上，年楚河流域温泉水化学类型指示了流域地质环境及岩石的风化和溶蚀作用是构成河流水化学类型的主要原因。

3.2 年楚河流域温泉水水化学组分的来源分析

一般不同条件下形成的地下水，其各组分之间的毫克当量浓度比值存在比较明显的差异，因此可以利用这类比值系数判断温泉水的水岩作用及构造环境等情况（沈照理等，1993）。为明确年楚河流域5处温泉水中水化学组分的来源，本研究通过温泉水中 $\gamma Na^+/\gamma Cl^-$、$\gamma Ca^{2+}/\gamma HCO_3^-$、$\gamma Ca^{2+}/\gamma SO_4^{2-}$、$\gamma Mg^{2+}/\gamma HCO_3^-$、$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma HCO_3^-$、$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})$关系图（图5），对该流域温泉水的水化学成因进行分析。分析结果表明，年楚河流域5处温泉水的$\gamma Na^+/\gamma Cl^-$系数为1.14~92.53。结合研究区出露的岩石及其相关性分析可以推断本研究区温泉水体中的Na^+和K^+主要来源于长石、石英等铝硅酸盐的溶解。另温泉水的Na^+和Cl^-浓度与地下热水的径流时间长短有关（张薇等，2021）。在本研究温泉水体中JG和KC样点的Na^+和Cl^-浓度较高，MZ、CD和SL样点的Na^+和Cl^-浓度较低。由此可以说明MZ、CD和SL的构造开启性相对较好，储存环境较开放，且其水化学特征受到一定程度浅层水的影响（李鹭，2018），而JG和KC构造环境比较封闭，受到浅层水的影响较小。值得注意的是，CD样点的Na^+和Cl^-浓度均较低，样点落在$\gamma Na^+/\gamma Cl^-$的1:1线上（图5-a），且CD样点具有最低的温度，说明盐岩的溶解是该样点水体中Na^+和Cl^-的主要来源（沈照理等，1993）。

由图5-b、5-c、5-d、5-e可以看出，年楚河流域温泉中，除CD之外，其余各样点均落在$\gamma Ca^{2+}/\gamma HCO_3^-$、$\gamma Mg^{2+}/\gamma HCO_3^-$、$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma HCO_3^-$、$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})$的1:1线下方，而相关性分析（表3）结果表明，流域温泉水体中的Ca^{2+}、Mg^{2+}和HCO_3^-具有同源性。说明这些温泉水中的Ca^{2+}、Mg^{2+}和HCO_3^- 3种离子除方解石和白云石等碳酸盐类和硫酸盐类矿物的溶解来源之外，还存在其他地球化学过程的控制（冯泽波等，2019；卢兆群等，2020）。尤其是研究区HCO_3^-和Ca^{2+}浓度较高，而Mg^{2+}浓度较低，说明较高浓度的HCO_3^-和Ca^{2+}主要来源可能为钙长石等长石类矿物的溶解作用。一般温泉水中的Ca^{2+}与地层中的Na^+发生阳离子交换，使得温泉水中的Na^+增多而Ca^{2+}减少，因此，除CD样点之外，研究区其余各样点由于离子交换作用使其Na^+浓度增加，Ca^{2+}浓度降低，致使$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})$依然无法平衡溶液中的$\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})$，即与$\gamma Ca^{2+}<\gamma HCO_3^-$、$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})<\gamma HCO_3^-$、$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})<\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})$的计算结果相符。相对而言，CD样点落在$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})$的1:1线上，说明CD样点的$Ca^{2+}$、$Mg^{2+}$、$HCO_3^-$和$SO_4^{2-}$主要来源于方解石和白云石等碳酸盐岩和硫酸盐岩的风化和溶解。由图5-f和5-h可以看出，SL样点落在图的1:1线上，MZ样点落在图5-g的1:1线上，说明SL的Ca^{2+}、SO_4^{2-}和MZ的Mg^{2+}、SO_4^{2-}主要来源于硬石膏等硫酸盐岩矿物。而研究区JG 3个样点和KC两个样点的ROD和SO_4^{2-}浓度都很低，可能是在缺氧的还原环境中发生脱硫酸作用（刘明亮等，2020），使水体中的SO_4^{2-}还原成H_2S，这也是研究区温泉具有不同程度的H_2S气味的原因。

不同的地质构造背景下，常形成不同类型、不同特点的温泉。近几年随着经济的不断发展，人们生活水平逐步提高，温泉等地热资源凭借其特殊功效，逐渐被开发和利用。温泉水过度开采不仅会因温泉水外泄和洗浴生活废水的外排导致流域地表水受到影响，还会引起溪水倒灌，从而污染流域地下水（栾光忠和范德江，1994）。青藏高原作为我国地热资源最丰富的地区，各种地热温泉几乎遍及整个区域，正因如此，青藏高原成为地热资源开发和勘测的热门地区。前期研究表明，高原地热资源已对相关流域的水环境产生了一定的影响（Huang et al，2011；李政等，2019）。本研究年楚河流域5处温泉水体溶解相中主要离子含量与其水温和pH值相近的西藏觉拥温泉相比较（郭宁等，2020），其Ca^{2+}浓度高出1倍，但SO_4^{2-}浓度远远低于觉拥温泉，且Na^+、Cl^-和HCO_3^-的来源与觉拥温泉相似；与位于西藏日喀则市仁布县境内水温70℃的查巴曲珍温泉相比较（许鹏等，2018），研究区温泉水体中的Ca^{2+}和Mg^{2+}浓度较高，其余主要离子浓度都低于查巴曲珍温泉水中主要离子浓度。另外，本研究流域内分

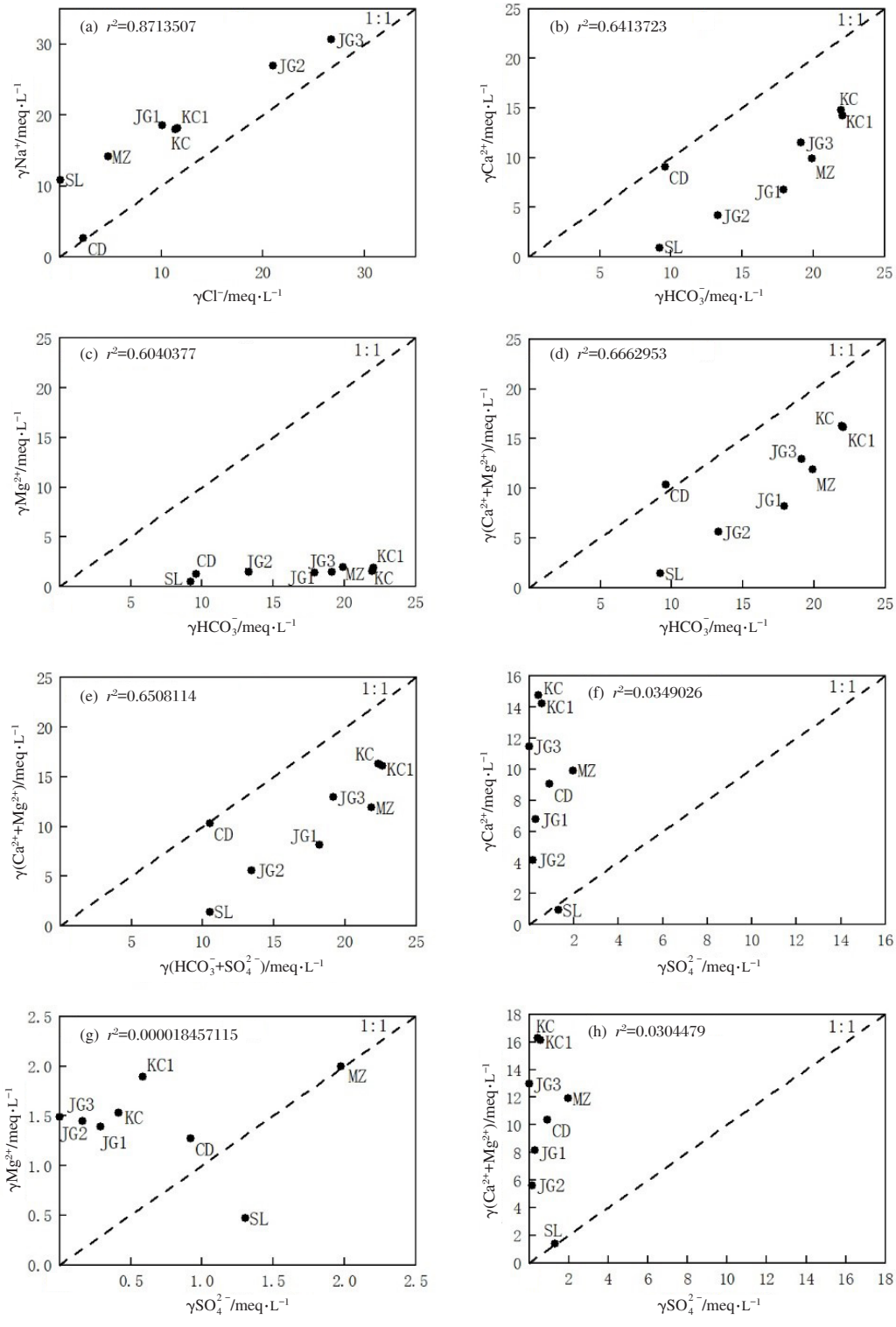

图5　年楚河流域5处温泉水主要离子关系

Fig.5　Relationships of major ions in the water of five hot springs in Nyangqu River basin

布的富含各种离子的温泉水对年楚河流域的生态环境产生一定的影响，尤其是温泉分布较集中的支流冲巴涌曲、康如普曲和龙马河等河流，具有较高浓度的 Na^+、HCO_3^- 和 Cl^-（仁增拉姆等，2021）。这种影响在温泉水量较高时期（如丰水期）因温泉水的外泄可能会更显著。未来系统开展不同水期的相关研究有助于更加全面地了解地热温泉水对流域周边地表水环境的影响程度。

参考文献

班春广,徐宗学,苟娇娇,等,2019.1973—2015年年楚河上游流域径流变化趋势及驱动因素分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),55(6):748-754.

沈照理,朱宛华,钟佐燊,1993.水文地球化学基础[M].北京:地质出版社:87-88.

冯泽波,史正涛,苏斌,等,2019.滇池主要入湖河流水化学特征及其环境意义[J].水生态学杂志,40(3):18-24.

郭宁,刘昭,男达瓦,等,2020.西藏昌都觉拥温泉水化学特征及热储温度估算[J].地质论评,66(2):499-509.

何世春,1983.羊八井地热田水文地球化学特征[J].中国地质,(6):8,19-21.

姜鸿才,周瑞良,1994.青藏高原构造体系控制下的地热水分布及找热方向[J].中国地质科学院562综合大队集刊:243-259.

李常锁,武显仓,孙斌,等,2018.济南北部地热水水化学特征及其形成机理[J].地球科学,43(S1):313-325.

李政,陈虎林,余璨,等,2019.拉萨河表层沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价[J].高原科学研究,3(1):58-70,113.

廖辉杰,范德江,逄悦,等,2021.河水与海水混合过程中Eh-pH的变化特征及影响因素[J].中国海洋大学学报(自然科学版),51(4):100-108.

刘明亮,何曈,吴启帆,等,2020.雄安新区地热水化学特征及其指示意义[J].地球科学,45(6):2221-2231.

刘昭,陈康,男达瓦,2017.西藏古堆地热田地下热水水化学特征[J].地质论评,63(S1): 353-354.

栾光忠,范德江,1994.开发胶东温泉地热水对环境的影响[J].青岛海洋大学学报,(S3):35-38.

卢兆群,成世才,陈刚,等,2020.山东平阴氡温泉水化学特征及成因分析[J].中国煤炭地质,32(11):65-72.

钱成,2002.西藏年楚河流域水土流失及生态重建研究[J].生态学杂志,(5):74-77.

仁增拉姆,罗珍,陈虎林,等,2021.西藏年楚河流域水化学特征分析[J].地球与环境,494(4):358-366.

佟伟,章铭陶,张知非,等,1981.西藏地热[M].北京:科学出版社.

佟伟,廖志杰,刘时彬,2000.西藏温泉志[M].北京:科学出版社.

王贵玲,刘彦广,朱喜,等,2020.中国地热资源现状及发展趋势[J].地学前缘,27(1):1-9.

奚旦立,孙裕生,2010.环境监测[M].4版.北京:高等教育出版社.

夏传清,刘志荣,刘焕珍,2001.浅析年楚河流域水文特性[J].东北水利水电,(2):29-30.

许鹏,谭红兵,张燕飞,等,2018.特提斯喜马拉雅带地热水化学特征与物源机制[J].中国地质,45(6):1142-1154.

张萌,蔺文静,刘昭,等,2014.西藏谷露高温地热系统水文地球化学特征及成因模式[J].成都理工大学学报(自然科学版),41(3):382-392.

张庆,谭红兵,渠涛,等,2014.西藏地热水中典型有害元素对河流水质的影响[J].水资源保护,30(4):23-29,77.

张薇,王贵玲,赵佳怡,等,2021.四川西部中高温地热流体地球化学特征及其地质意义[J].现代地质,35(1):188-198.

中国科学院青藏高原综合考察队,1981.青藏高原考察丛书:西藏水利[M].北京:科学出版社.

周训,胡伏生,何江涛,等,2009.地下水科学概论[M].北京:地质出版社.

Connolly C A, Walter L M, Baadsgaard H, et al, 1990. Origin and evolution of formation waters, Alberta Basin, Western Canada Sedimentary Basin. II. Isotope systematics and water mixing[J]. Applied geochemistry,5:397-413.

Guo Q H, Wang Y X, Liu W, 2007. Major hydrogeochemical processes in the two reservoirs of the Yangbajing geothermal Field, Tibet, China[J]. Journal of Volcanology & Geothermal Research,166:255-268.

Guo Q H, Cao Y W, Li J X, et al,2015. Natural Attenuation of Geothermal Arsenic from Yangbajain Power Plant Discharge in the Zangbo River, Tibet, China[J]. Applied Geochemistry, 62:164-170.

Huang X, Sillanp M, Gjessing E T, et al, 2011. Water quality in the southern Tibetan plateau: Chemical evaluation of the Yarlung Tsangpo(Brahamputra) [J]. River Research and Applications,27:113-121.

(责任编辑 郑金秀)

Hydrochemistry and Environmental Significance of Hot Springs in the Nyangqu River Basin, Tibet

RENZENG Lamu, LUO Zhen, YE Xi-qian, DEQING Qusang, HUANG Xiang

(School of Sciences, Tibet University, Laboratory of Environmental Chemistry in Plateau Basin, Lhasa 850000, P.R. China)

Abstract: The Nyangqu River lies along a fault zone in Southern Tibet and hot springs are widely distributed in the river basin. However, the exploitation and utilization rate of the hot springs are low and insufficient. In this study, we characterized the aquatic chemistry and identified the factors influencing hot spring water in the Nyangqu River basin. The objective was to revise basic chemical data on the hot springs and provide technical support for developing and using the hot springs. Five hot springs (Jinga, Kangmachaduo, Chadangwei, Mengzha and Shalagang) were selected for the study. In October 2019, water samples were collected at 8 sampling sites for determination of physicochemical parameters and identification of major ion sources. The thermal storage temperature of each hot spring was estimated based on the silica geothermometer. Results show that the water in the hot springs was neutral to slightly acidic. The water temperature range wa 17.9 ℃−42.3 ℃, and the thermal storage temperature range was 61.8 ℃−110.1℃, indicating that the hot springs are a low temperature geothermal system. The ranges of electrical conductivity, salinity and total dissolved solid (TDS) were, respectively, 1.00−4.09 mS/cm, 0.49−2.48 g/L and 0.71−2.87 g/L, indicating that the hot spring water is fresh but slightly salty. Sodium (Na^+) and bicarbonate (HCO_3^{2-}) were the dominate cation and anion in the hot spring waters, unlike surface waters in the region. The hydrochemical type of each hot spring was as follows: Jinga ($Na-HCO_3 \cdot Cl$), Kangmachaduo ($Ca \cdot Na-HCO_3 \cdot Cl$), Chadangwei ($Ca-HCO_3$), Shalagang ($Na-HCO_3$) and Mengzha ($Na \cdot Ca-HCO_3$). Weathering and dissolution of silicate rocks such as feldspar and quartz were the major controlling factors for the composition of water in these hot springs. In addition, the concentrations of 18 trace components were determined (Ag, Al, Cd, co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Se, Ti and Zn; CO_3^-, NO_3^- and PO_4^{3-}) and all were low. Jinga Hot Spring and Kangmachaduo Hot Spring have a relatively closed structural environment and a longer runoff path that is less affected by shallow waters. However, Chadangwei Hot Spring, Mengzha Hot Spring and Shalagang Hot Spring have a relatively open structure and higher storage capacity but could be affected by shallow waters. The hydrochemistry of the hot spring waters studied in this work is basically controlled by natural processes. Nevertheless, the impact of bathing water discharge and seasonal discharge from springs on regional surface water quality should be considered.

Key words: hot spring water in Nyangqu River basin; aquatic chemistry; source mechanism; thermal storage temperature