

西藏地区天然水的水化学性质和元素特征

田 原^{1,2}, 余成群¹, 雒昆利¹, 武建双¹, 张宪洲¹, 倪润祥^{1,2}, 田兴磊^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了调查西藏的水质和水资源特色, 2013年在西藏拉萨、那曲地区、阿里地区、日喀则地区36个县乡镇采集了60个水样(地下水35个, 地表水22个, 温泉水3个), 对其水化学性质与元素含量进行分析测定, 并与周边的青海西南部、新疆南部、四川西部与西藏东部等地水的水化学类型进行了对比, 讨论了不同地区内水化学类型的差异。总体上看西藏大部地区水质较好, 能够满足国家生活饮用水卫生标准。水样pH处于6.75~8.21范围内; 总溶解性固体(TDS)均值为225.54 mg/L; 阿里地区水中砷元素含量超标(超过10 $\mu\text{g/L}$), 双湖地区水中氟含量超标(超过1 mg/L); 水化学类型主要为Ca-HCO₃型; 由南向北水中阳离子由以Ca²⁺为主逐渐过渡到以Na⁺为主, 阴离子HCO₃⁻逐渐减少, Cl⁻与SO₄²⁻逐渐增多; 河流与冰川融水的成因类型主要为岩石风化型, 地下水成因受多种因素控制; 构造分区控制水中主要元素进而影响水化学类型。

关键词: 西藏; 区域水质对比; 水化学性质; 水中元素特征

DOI: 10.11821/dlxb201407009

1 引言

西藏自治区位于我国西南边陲, 地处世界上最大最高的青藏高原的西南部, 东经78°25'~99°06', 北纬26°44'~36°32'之间, 平均海拔4 km以上, 全区土地面积约为1.22×10⁶ km², 约占全国总面积的12.8%。西藏自治区自然地理地质构造和地层岩性等地质环境条件复杂, 环境地质问题和地质灾害的类型及其组合具有明显的区域性^[1]。

西藏自治区水资源和水能资源十分丰富, 据西藏自治区水利普查公报^[2], 西藏河流与湖泊的水源主要由雨水、冰雪融水和地下水组成, 流量丰富, 含沙量小, 水质好。全区多年平均地表水资源量达到4.394×10¹¹ m³, 约占全国地表水资源量的17%, 地下水资源总量约9.661×10¹⁰ m³。同时, 西藏还有大量的冰川, 其面积和储量分别占到了全国的48.2%和53.6%, 冰川水资源总量约3×10¹¹ m³^[2-3]。

张宪英等^[4]2011年对西藏林芝地区生活饮用水水质卫生进行了监测分析, 结果表明该地区水质合格率整体较低; 柳诚等^[5]用ICP-MS直接测定了西藏某矿区湖泊水中的痕量元

收稿日期: 2014-04-08; 修订日期: 2014-06-03

基金项目: 国家科技支撑项目(2011BAD17B05-4; 2011BAC09B03); 国家自然科学基金项目(41172310; 40171006); 国家重大基础专项(973) (2014CB238906) 资助 [Foundation: National Key Technologies R&D Program in the 12th Five-year Plan of China, No.2011BAD17B05-4; No.2011BAC09B03; National Natural Science Foundation of China, No.41172310; No.40171006; Major State Basic Research Development Program of China (973), No.2014CB238906; National Science and Technology Support Project of China, No.2011BAD17B05-4; No.2011BAC09B03]

作者简介: 田原 (1991-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事地质环境与健康、西藏区域可持续发展研究。

E-mail: tiany.13s@igsnr.ac.cn

通讯作者: 余成群 (1965-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事农业经济与区域发展规划的研究。

E-mail: yucq@igsnr.ac.cn

雒昆利 (1959-), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事地质环境与健康研究。luokl@igsnr.ac.cn

素,对比了四种不同方法的测试方法,得到了最优样品回收率;布多等^[6]对拉萨地区3个渔场水体重金属砷做了初步研究,发现曲水聂当渔场砷含量最高,超过60μg/L;聂立夏^[7]对西藏拉萨周边6县农村生活饮用水微生物指标进行了分析,发现水样微生物指标合格率较低;王君波等^[8]研究了西藏玛旁雍错和拉昂错的水质特征,发现湖水pH与溶解氧呈反相变化;郑必梅等^[9-11]对西藏那区与比如县相关部队驻区的水质进行了检测,水样合格率较低,尤其是砷元素超标情况较为普遍;张娜、李红静等^[12,13]分析了尼洋河与雅鲁藏布江的水质时空特征,对河水的基本数据进行了报道;刘先勇等^[14]2012年对西藏山南地区农村饮

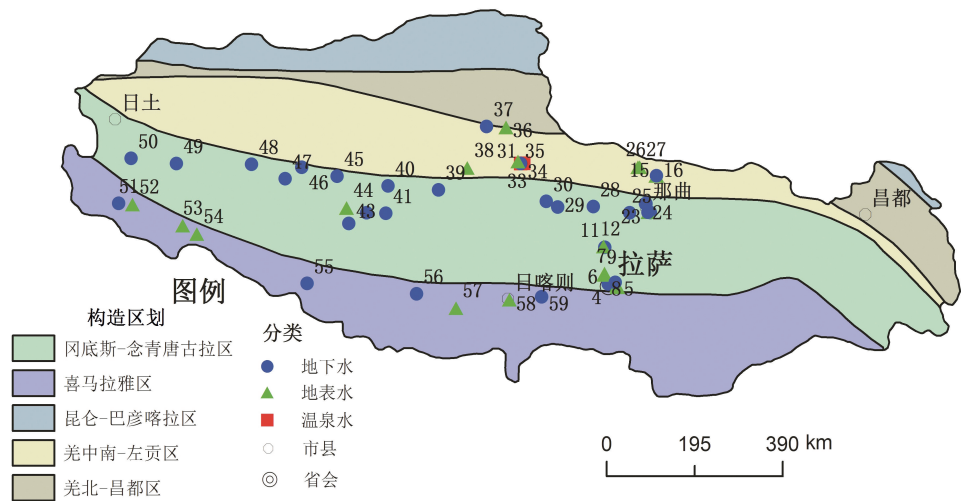


图1 西藏地理位置、构造区划^[17]及采样点分布
Fig. 1 Geographical location, tectonic division^[17] and distribution of sampling points in Tibet

表 1 西藏地表水采样点分布

Tab. 1 The distribution of surface water sampling points in Tibet						
编号	采样时间	纬度 (°)	经度 (°)	高程 (m)	采样地点	样品描述
1	2013.04.27	29.56639	91.40114	4196	达孜县新仓村7组	河流水
2	2013.04.27	29.57000	91.39306	4287	达孜县新仓村7组	冰川融水
5	2013.07.13	29.60417	91.38083	3970	新仓村6组	河流水
6	2013.07.20	29.87306	91.09333	3972	林周县白朗村	河流水
7	2013.07.20	29.87306	91.09333	3972	林周县白朗村	河流水
8	2013.07.20	29.87167	91.09250	3954	林周县白朗村	河流水
9	2013.07.20	29.85000	91.09222	4041	林周县白朗村	河流水
12	2013.07.24	30.49500	91.06917	4317	拉萨站当雄野外站	冰川融水
14	2013.08.04	32.10583	92.28528	4645	聂荣镇	河流水
15	2013.08.04	32.10972	92.30250	4634	聂荣镇	冰川融水
21	2013.08.05	31.27333	92.10278	4450	那曲罗马镇四村科马自然村	河流水
26	2013.08.08	32.30111	91.86806	4683	安多县	河流水
27	2013.08.08	32.30333	91.90694	4732	安多县申卡岗村	河流水
35	2013.08.11	32.43306	89.08111	4791	双湖县多玛乡	河流水
36	2013.08.11	33.20694	88.79861	4981	双湖县县城	冰川融水
38	2013.08.12	32.28694	87.90194	4754	查桑	河流水
44	2013.08.17	31.37000	85.09167	4728	改则县河流水	河流水
52	2013.08.21	31.45111	80.12056	4675	扎达县	河流水
53	2013.08.21	30.97028	81.28500	4679	普兰县巴嘎乡 (神山)	冰川融水
54	2013.08.22	30.77639	81.61361	4625	普兰县霍尔乡	冰川融水
57	2013.08.22	29.08861	87.63778	4048	拉孜县县城	河流水
58	2013.18.23	29.27889	88.87917	3777	日喀则地区	河流水

用水安全工程监测结果进行了分析,结果表明部分水样存在污染;罗丹等^[15]调查了西藏自治区城镇饮用水水源地140个并对水质现状与水质安全进行了评价,城镇饮用水合格率达到96.9%;赵伟等^[16]调查了驻藏边远部队的自备水源水质,结果表明水源卫生防护较差。

但是有关西藏自治区水质研究总体较少,大范围地表水与地下水的地球化学特征与元素含量的系统研究鲜有报道。2013年8月作者在西藏地区进行了水中元素含量和分布的调查工作,并在西藏采集水样(图1、表1、表2),同年9—10月在中国科学院地理科学与资源研究所对水中元素含量与物理化学性质进行分析化验,就此批水样的水化学性质和元素特征进行讨论,本文较为全面的揭示了西藏地区不同地质分区水中各元素的含量与分布规律。

表2 西藏地下水采样点分布
Tab. 2 The distribution of groundwater sampling points in Tibet

编号	采样时间	纬度 (°)	经度 (°)	高程 (m)	采样地点	地下深度 (m)
3	2013.04.28	29.64241	91.18073	3666	西藏大学新校区	-
4	2013.04.28	29.64295	91.18011	3666	西藏大学新校区	6
10	2013.07.23	30.47639	91.09972	4297	当雄县	5
11	2013.07.23	30.4775	91.10306	4281	当雄县	30
13	2013.08.03	31.47591	92.06209	4521	那曲镇	-
16	2013.08.04	32.11000	92.30361	4612	聂荣镇	10
17	2013.08.04	31.46556	92.06278	4508	那曲镇	10
18	2013.08.05	31.46861	92.05917	4534	那曲镇	-
19	2013.08.05	31.27194	92.15861	4471	那曲罗玛镇四村科马自然村	10
20	2013.08.05	31.27194	92.16000	4439	那曲罗玛镇四村科马自然村	5
22	2013.08.05	31.46917	92.04750	4523	那曲地区二十二区	27
23	2013.08.05	31.27583	92.10528	4459	青藏所那曲站	10
24	2013.08.06	31.47194	92.04750	4506	那曲县农牧局	-
25	2013.08.07	31.26167	91.68306	4641	安多县宾馆	-
28	2013.08.09	31.40528	90.835278	4606	班戈县百拉镇茶馆	6
29	2013.08.09	31.39500	90.00778	4703	班戈县那木错宾馆	15
30	2013.08.10	31.52333	89.74111	4576	班戈县门当乡三村	4
31	2013.08.10	32.39000	89.21889	4703	双湖县多玛乡 (温度40度)	-
32	2013.08.10	32.38667	89.14916	4701	双湖县多玛乡 (温泉水)	-
33	2013.08.10	32.38806	89.14972	4708	双湖县多玛乡 (温度60度)	-
34	2013.08.10	32.38444	89.14528	4705	双湖县多玛乡	15
37	2013.08.12	33.23306	88.35222	4811	双湖县嘎措乡	4
39	2013.08.13	31.78611	87.23472	4553	尼玛县武装部	-
40	2013.08.15	31.87694	86.06167	4797	尼玛县阿索乡乡政府	6
41	2013.08.15	31.25306	86.01472	4726	尼玛县军仓乡乡政府	8
42	2013.08.16	31.26333	85.56306	4690	措勤县磁石乡	10
43	2013.08.16	31.01806	85.15389	4649	措勤县成顺达招待所	10
45	2013.08.17	32.09861	84.87889	4433	洞措乡乡政府	-
46	2013.08.17	32.30000	84.05528	4447	改则县宾馆	11
47	2013.08.18	32.04069	83.66902	4398	改则县麻米乡乡政府	5
48	2013.08.19	32.37167	82.89111	4474	革吉县文布当桑乡	-
49	2013.08.19	32.38833	81.14333	4542	革吉县县城联通宾馆	5
50	2013.08.20	32.50333	80.09000	4308	阿里地区狮泉河陕西面馆	-
51	2013.08.21	31.48139	79.80111	3755	扎达县饭店	35
55	2013.08.22	29.65217	84.18146	4602	仲巴县老仲巴乡	6
56	2013.08.22	29.41901	86.72401	4632	昂仁县桑桑镇	10
59	2013.18.23	29.34667	89.63583	3752	日喀则大竹村	15
60	2013.08.24	29.67639	91.34472	3699	达孜县拉萨站	30

2 研究区域和方法

2.1 采样地点分布及样品类型

此次样品采集共采集水样 60 个(表1、表2)，采样点遍及西藏拉萨、那曲地区、阿里地区、日喀则地区大部分县乡镇。水样中包括了地下水 35 个、地表水 22 个、温泉水 3 个。实地采样发现，西藏地区居民生活用自来水也均为未经处理的浅井水、河流或冰川融水，因此此批样品能较为全面的揭示西藏大部地区天然水的类型与水的性质。样品中喜马拉雅区水样 9 个，冈底斯—念青唐古拉区水样 38 个，羌中南—左贡区水样 13 个(图1)。

西藏地区居民生活用自来水多为未经处理的浅井水、河流或冰川融水。因此本次调查较为全面地揭示了西藏大部地区天然水的类型与水的性质。

2.2 样品采集与分析方法

2.2.1 样品采集 作者于2013年8月在西藏采集水样，取样方法严格按照国家环境保护总局发布的《水和废水监测分析方法》^[18]进行。

2.2.2 分析方法 所取水样于2013年10月在中国科学院地理科学与资源研究所分析测定。其中pH值、EC值、RES值、SAL值、TDS值、温度(T)采用梅特勒公司生产的pH

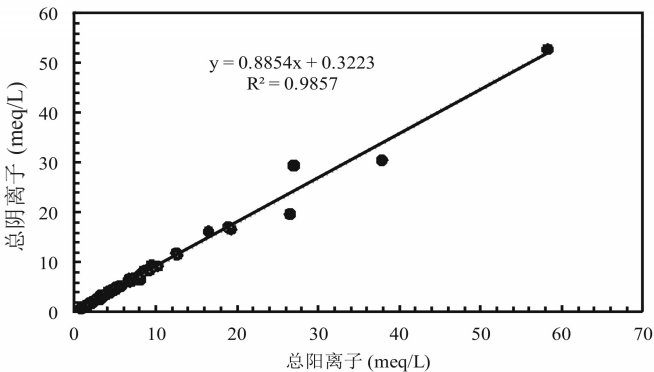


图2 西藏水样中总阳离子与总阴离子图
Fig. 2 Total cations versus total anions of the water samples in Tibet

表3 西藏地表水水样中常量元素指标检测结果

Tab. 3 The test result of major elements in surface water samples of Tibet

编号	pH	Eh (mV)	EC (μs/cm)	TDS (mg/L)	TH (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
1	7.6	336	179	90	84	28.9	2.8	2.2	0.7	39.7	32.6	11.0	6.8
2	7.3	293	197	99	105	40.2	1.2	1.9	0.3	91.5	10.6	6.1	10.2
5	7.3	220	151	76	77	26.6	2.6	2.4	0.4	54.9	3.2	12.8	12.6
6	7.45	224	96	48	44	13.6	2.4	2.7	0.7	15.3	12.0	8.7	6.5
7	7.38	217	80	40	37	11.3	2.0	1.4	0.5	9.2	11.5	9.0	5.7
8	7.29	235	95	47	44	13.6	2.4	2.8	0.7	21.4	12.2	10.1	6.6
9	7.31	227	76	38	36	11.2	1.9	1.4	0.5	10.7	11.9	6.6	5.8
12	7.15	226	133	66	68	21.5	3.5	1.3	0.8	39.7	21.5	8.8	4.5
14	7.77	202	263	131	133	38.3	9.0	9.7	1.5	122.0	7.8	7.2	9.1
15	7.55	209	348	174	186	53.0	12.8	9.7	1.2	155.6	12.6	34.3	10.4
21	7.37	213	187	93	78	20.8	6.3	13.9	1.6	73.2	12.3	10.0	8.8
26	7.65	185	529	265	268	67.1	24.1	27.1	3.0	268.5	59.8	14.4	7.6
27	7.81	175	401	200	217	69.8	10.1	14.6	2.0	253.2	8.6	9.6	11.0
35	7.80	185	1530	765	443	73.0	62.5	218.7	3.9	192.2	521.0	98.9	8.7
36	8.02	172	344	172	180	26.3	27.5	11.9	3.7	125.1	32.8	27.5	9.1
38	8.21	168	278	139	158	45.4	10.6	4.7	1.3	94.6	44.3	12.4	8.5
44	7.90	188	368	184	196	58.6	11.8	11.8	1.8	155.6	56.3	13.6	11.8
52	7.72	209	595	298	352	75.8	38.9	9.0	4.3	167.8	158.5	17.5	9.7
53	7.90	200	172	86	89	23.8	7.0	4.4	0.7	18.3	39.3	21.9	4.7
54	7.96	207	90	45	43	12.8	2.6	3.1	0.9	3.1	12.3	20.3	6.2
57	7.64	219	226	113	121	40.3	4.9	4.6	0.8	79.3	30.7	15.4	9.4
58	7.73	225	355	178	194	50.9	15.9	8.9	0.5	128.1	43.6	18.3	18.3

计 (SevenGo SG2) 和电导率测定仪 (SevenGo SG3) 测定, Eh 值采用上海三信公司生产的氧化还原电位测定仪 (SX712) 测定。重碳酸根 (HCO_3^-) 采用酸碱指示剂滴定法^[18-19]测定, 氯离子 (Cl^-) 采用氯离子选择电极法^[20-21]测定, 氟离子 (F^-) 采用氟离子选择电极法^[18-19]测定, 硒 (Se)、砷 (As) 使用氢化物发生原子荧光光度法 (HG-AFS)^[18-19]测定, ICP-OES (Perkin Elmer, Optima 5300 DV) 用于测定常量元素 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、P、Sr、B、 SiO_2), ICP-MS (Perkin Elmer, DRC-e) 用于测定微量元素 (Li、Zn、U、Rb、Ba、Bi、Co、Cs、Ga、In、Ti、V、Ag、Al、Be、Cd、Cr、Cu、Fe、Hg、Mn、Mo、Ni、Pb 和 Tl)。在测试水样过程中, 每测定 20 个水样, 进行一次平行样的测定, 以保证水样数据和仪器的稳定性。60 个水样中除温泉水外阴阳离子相对误差最高为 4.96%, 最低为

表 4 西藏地下水水样中常量元素指标检测结果
Tab. 4 The test result of major elements in groundwater samples of Tibet

编号	pH	Eh (mV)	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	TDS (mg/L)	TH (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	SiO_2 (mg/L)
3	7.28	262	250	125	119	38.1	5.6	7.0	1.3	91.5	21.3	8.5	12.7
4	7.31	244	261	131	124	38.6	6.5	7.4	1.5	85.4	27.2	9.5	9.6
10	6.95	245	279	139	134	39.9	8.1	10.5	1.5	103.7	10.4	15.8	16.9
11	7.11	233	161	81	83	24.3	5.3	3.2	1.0	64.1	6.4	10.0	11.1
13	7.10	252	1587	793	605	131.4	66.5	152.2	7.8	485.1	156.0	182.1	10.0
16	7.37	213	600	300	320	112.3	9.4	13.7	1.8	280.7	29.6	26.6	10.6
17	7.28	230	1399	699	563	102.4	73.8	112.0	4.0	515.6	143.7	152.8	9.0
18	7.81	205	404	202	165	31.7	20.6	33.7	3.7	155.6	44.1	16.3	6.8
19	7.37	220	467	233	237	69.1	15.4	19.7	3.2	192.2	35.3	18.1	25.5
20	6.93	235	458	229	227	61.9	17.4	18.6	4.1	167.8	46.0	16.2	33.1
22	7.07	243	2480	124	667	151.4	69.2	292.0	13.6	167.1	95.5	860.6	12.6
23	7.34	222	732	366	216	52.2	20.5	103.2	5.0	378.3	44.3	32.0	9.4
24	7.20	220	1055	528	445	134.0	26.4	77.6	5.4	387.5	94.5	89.7	15.4
25	7.37	207	554	277	282	69.2	26.1	23.3	2.9	259.3	49.5	17.2	9.6
28	7.86	191	337	168	169	33.2	20.6	15.8	1.5	198.3	12.0	10.5	10.6
29	7.56	210	804	402	389	126.2	17.5	34.5	3.6	405.8	52.7	15.6	15.4
30	7.79	195	307	154	148	32.6	15.9	16.7	2.5	61.0	19.3	65.0	10.1
31	6.75	245	1999	1000	472	144.4	26.7	363.3	20.8	970.2	86.4	35.3	25.9
32	7.46	226	4360	2180	182	48.7	14.5	1171.0	53.4	2785.6	196.3	57.5	31.5
33	7.19	220	2970	1487	183	57.3	9.5	732.3	33.8	1424.8	137.8	40.1	89.9
34	7.55	180	972	486	315	81.6	26.5	131.5	8.5	585.8	43.0	18.1	22.9
37	7.77	189	693	346	336	79.6	32.8	35.3	7.4	231.9	146.6	40.9	9.3
39	7.89	187	669	334	169	26.1	25.0	98.1	5.6	195.3	64.6	50.7	13.7
40	7.84	193	540	270	224	56.8	19.8	45.2	6.5	286.8	49.5	21.6	11.6
41	7.89	185	340	170	171	59.5	5.3	16.4	1.8	146.4	9.5	39.9	15.2
42	7.64	201	814	407	368	102.5	26.7	43.7	4.8	106.8	154.5	119.7	17.4
43	7.93	193	266	133	134	36.5	10.2	10.0	3.0	109.8	24.8	19.4	16.7
45	7.55	208	793	397	428	100.3	42.6	33.3	4.2	347.8	93.0	37.8	16.6
46	7.73	199	628	314	210	38.1	27.5	71.0	4.0	207.5	76.0	51.4	17.4
47	7.64	223	72	36	315	51.4	44.9	59.8	16.2	205.9	122.1	79.0	36.8
48	7.73	202	433	217	206	44.3	23.0	24.4	3.5	183.1	49.8	25.1	12.0
49	7.81	199	270	135	107	35.7	4.3	21.0	2.7	85.4	29.9	21.6	17.3
50	7.62	208	578	289	243	66.2	18.6	42.6	3.9	231.9	48.8	44.0	17.2
51	7.81	202	311	155	163	40.2	15.0	10.2	2.5	97.6	53.0	13.6	13.5
55	7.46	230	770	385	362	124.1	12.4	18.2	2.3	238.0	39.9	86.7	13.7
56	7.55	222	457	229	233	69.8	14.1	12.0	1.2	112.9	36.2	61.9	15.6
59	7.81	223	300	150	178	29.9	24.7	3.3	0.7	137.3	5.5	17.7	21.1
60	7.72	233	211	106	107	35.7	4.4	5.7	1.5	42.7	26.9	27.7	11.9

表 5 西藏地表水水样中微量元素指标检测结果

Tab. 5 The test result of trace elements in surface water samples of Tibet

编号	Li	Sr	B	Zn	Se	F	U	Rb	Ba	Co	Cs	Ga	V ^①
号	(μg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(μg/L)	(μg/L)	(mg/L)	(μg/L)	(μg/L)	(μg/L)	(μg/L)	(μg/L)	(μg/L)	(μg/L)
1	0.25	0.10	0.01	1.48	0.00	0.02	0.20	0.36	4.43	0.04	0.00	0.20	0.08
2	0.87	0.09	0.01	0.36	0.20	0.04	0.15	0.05	0.42	0.06	0.01	0.01	-0.11
5	0.16	0.07	0.01	7.77	0.00	0.04	0.24	0.28	1.56	0.03	0.46	0.08	0.77
6	2.29	0.05	0.09	3.48	0.00	0.04	0.03	0.62	3.16	0.06	0.10	0.17	0.11
7	0.33	0.04	0.01	2.16	0.00	0.04	0.02	0.31	1.86	0.04	0.03	0.10	-0.12
8	2.20	0.05	0.10	1.97	0.03	0.04	0.04	0.51	2.65	0.07	0.06	0.13	0.04
9	0.38	0.04	0.01	1.12	0.00	0.04	0.02	0.37	1.92	0.05	0.04	0.11	-0.06
12	0.92	0.06	0.01	1.86	0.00	0.06	0.71	0.77	3.26	0.03	0.03	0.17	-0.06
14	12.6	0.14	0.12	0.57	0.01	0.25	5.57	0.65	11.97	0.07	0.04	0.54	-0.07
15	10.2	0.49	0.09	1.17	0.08	0.36	3.28	1.99	7.77	0.07	0.83	0.38	-0.07
21	8.23	0.09	0.11	3.06	0.02	0.17	0.18	1.42	5.74	0.10	0.17	0.36	0.31
26	42.5	0.37	0.25	0.92	0.07	0.16	1.13	5.10	50.22	0.08	2.22	2.24	-0.30
27	14.4	0.26	0.22	0.55	0.01	0.16	3.37	0.57	25.26	0.10	0.03	1.10	-0.16
35	140	3.05	1.50	2.91	0.52	0.58	10.85	0.42	13.08	0.10	0.18	0.56	0.27
36	18.3	0.30	0.18	57.33	0.25	0.15	0.93	1.84	29.23	0.03	0.69	1.28	0.28
38	8.87	0.25	0.24	1.97	0.11	0.13	1.58	0.50	7.19	0.05	0.10	0.32	-0.23
44	162	0.24	0.52	1.72	0.18	0.18	1.20	6.96	16.13	0.05	18.83	0.69	-0.36
52	22.3	0.69	0.34	4.18	0.85	0.04	1.35	7.76	12.15	0.06	12.05	0.50	-0.43
53	2.48	0.18	0.07	5.80	0.13	0.15	0.31	0.66	13.27	0.09	0.28	0.60	-0.43
54	2.59	0.08	0.14	3.70	0.19	0.07	0.08	0.78	5.95	0.03	0.07	0.24	-0.36
57	2.67	0.12	0.10	2.46	0.22	0.24	0.52	0.17	1.29	0.04	0.03	0.05	-0.41
58	7.3	0.29	0.21	1.45	0.45	0.14	0.95	0.27	5.07	0.05	0.09	0.21	-0.09

表格中负值为被测样品浓度低于仪器检测限

0.19%，平均为3.33% (图2)，均小于5%，因此可保证此水样数据的可靠性和准确性^[22-23]。

3 结果

通过对水样的测试，得到西藏地区水样的常量元素指标、微量元素指标与限量元素指标。

3.1 常量元素指标检测结果

西藏水样水化学性质与感官性状良好，所采水样pH处于6.75~8.21范围内，平均值7.54，总溶解性固体(TDS)除温泉水外均值为225.54 mg/L，大部分水样硬度处于软-中硬区间(表3、4)，因为水样大多数为地表水或浅井水，补给来源主要为冰雪融水、降雨。

3.2 微量元素指标检测结果：

不同地质背景中元素的背景值不仅控制水中常量元素水化学特性，也控制微量元素的化学特性^[24-25]，现将西藏水样中微量元素的含量检测结果列于下表(表5、表6)中。微量元素中硒元素平均值0.154μg/L，最高值0.898μg/L。氟元素平均值0.44mg/L，最高值为7.24mg/L且温泉水中氟含量平均值4.62mg/L显著高于其它水样，双湖地区水样中氟含量较高，平均值达到2.31mg/L。

3.3 限量元素指标检测结果：

西藏自治区水样除温泉水外砷含量均值为8.66μg/L，但以藏北地区当雄县、双湖县、改则县、革吉县和狮泉河地区水中砷的含量明显较高，平均值达到113.23μg/L，超过国家生活饮用水卫生标准(10μg/L)11倍多(表7、表8)，不适宜饮用。

表6 西藏地下水水样中微量元素指标检测结果

Tab. 6 The test result of trace elements in groundwater samples of Tibet													
编号	Li (μg/L)	Sr (mg/L)	B (mg/L)	Zn (μg/L)	Se (μg/L)	F (mg/L)	U (μg/L)	Rb (μg/L)	Ba (μg/L)	Co (μg/L)	Cs (μg/L)	Ga (μg/L)	V (μg/L)
3	48.9	0.15	0.18	55.80	0.00	0.09	2.39	6.08	6.49	0.05	5.45	0.30	0.15
4	50.3	0.15	0.20	7.68	0.00	0.12	2.41	6.49	11.98	0.06	9.06	0.58	0.09
10	2.97	0.15	0.13	1.16	0.00	0.04	0.30	0.09	33.48	0.07	0.02	1.66	-0.08
11	1.15	0.09	0.02	21.54	0.00	0.06	0.21	0.07	25.74	0.04	0.16	1.33	-0.16
13	105	1.03	0.37	7.14	0.04	0.38	5.54	4.49	87.75	0.58	0.99	4.22	0.38
16	12.7	0.27	0.15	3.40	0.00	0.08	1.95	0.57	64.37	0.31	0.03	3.10	0.21
17	95.3	1.40	0.49	1.47	0.05	0.48	5.83	0.88	24.06	0.41	0.02	1.07	0.32
18	54.4	0.31	0.31	0.99	0.03	0.26	2.15	5.88	21.20	0.07	2.06	0.98	0.32
19	60.6	0.29	0.18	2.06	0.01	0.43	1.49	4.53	18.29	0.10	0.03	0.85	-0.27
20	85.0	0.27	0.18	10.43	0.00	0.27	0.24	5.68	53.84	0.65	0.02	2.54	-0.26
22	79.8	0.80	0.36	4.40	0.05	0.22	4.09	9.31	71.36	0.36	0.64	3.12	2.19
23	121.77	0.28	0.41	3.24	0.00	0.33	0.93	2.87	8.80	0.06	0.03	0.38	-0.04
24	24.6	0.45	0.32	2.00	0.03	0.10	2.93	1.01	60.78	0.34	0.01	2.70	0.20
25	39.9	0.88	0.22	4.79	0.08	0.19	1.65	2.14	73.71	0.09	0.04	3.24	-0.12
28	10.4	0.25	0.21	24.22	0.07	0.20	1.48	0.38	42.85	0.06	0.01	1.92	0.34
29	37.4	0.63	0.22	22.15	0.05	0.19	22.77	0.46	41.98	0.23	0.01	1.81	-0.06
30	35.7	0.26	0.31	2.90	0.05	0.33	1.44	1.19	26.70	0.05	0.04	1.18	0.13
31	745	1.64	2.92	18.34	0.04	3.05	0.42	82.40	94.15	0.28	85.13	4.50	-0.58
32	2658	1.96	8.61	1.94	0.13	7.24	0.06	190.64	75.57	0.10	428.09	3.33	0.10
33	1495	1.77	5.35	1.80	0.06	3.56	0.31	125.09	102.19	0.05	144.69	4.69	-0.22
34	295	0.86	1.18	2.47	0.15	1.34	1.45	33.29	104.00	0.11	48.34	4.75	0.81
37	29.9	0.47	0.60	6.76	0.75	0.27	13.46	2.93	33.63	0.10	15.38	1.44	-0.09
39	96.5	0.51	1.62	6.16	0.22	0.32	4.74	1.46	43.89	0.13	0.07	1.96	2.06
40	142	0.67	1.05	1.76	0.16	0.33	3.75	18.55	104.26	0.09	7.65	4.64	3.42
41	18.98	0.23	0.43	2.12	0.08	0.14	1.93	0.35	43.80	0.08	0.07	1.97	0.13
42	64.7	0.71	1.06	3.44	0.10	0.26	11.61	0.57	28.43	0.20	0.08	1.23	0.13
43	27.7	0.19	0.77	2.91	0.09	0.24	1.30	1.19	11.28	0.05	0.11	0.49	-0.23
45	55.0	0.79	0.60	2.59	0.24	0.39	2.71	3.17	25.84	0.09	1.66	1.11	-0.13
46	49.5	0.55	1.11	0.99	0.49	0.33	2.29	1.09	24.86	0.05	0.07	1.09	0.55
47	458	0.45	2.11	428.69	0.53	1.20	9.08	51.88	23.02	0.08	119.46	0.98	1.84
48	116	0.79	0.96	68.11	0.57	0.19	1.86	14.48	36.96	0.05	70.10	1.64	0.28
49	33.0	0.16	1.39	15.97	0.14	0.14	1.26	5.20	12.03	0.05	0.99	0.52	0.43
50	159	0.41	2.32	6.95	0.09	0.14	3.41	6.22	30.70	0.17	6.99	1.33	0.34
51	30.3	0.41	0.58	5.94	0.24	0.11	1.72	2.06	39.20	0.04	0.77	1.72	-0.01
55	14.2	0.46	0.07	3.80	0.11	0.04	2.27	0.25	9.52	0.15	0.04	0.39	-0.23
56	7.49	0.33	0.10	3.35	0.90	0.06	0.86	0.68	17.18	0.10	0.78	0.76	-0.25
59	3.12	0.12	0.09	1.19	0.18	0.07	0.43	0.43	6.84	0.04	0.45	0.28	-0.29
60	31.9	0.13	0.15	24.38	0.18	0.11	1.14	3.75	6.17	0.04	5.46	0.26	-0.47

4 讨论

通过分析样品得出水样中各元素的含量分布，下面分别从水化学性质、限量元素、水化学分类、水中元素的成因与同中国西部部分地区水中常量元素的含量对比测试结果进行讨论。

4.1 水的化学性质

除20号水样与31号水样(表3、表4)呈酸性外均呈弱碱性，符合国家生活饮用水卫生标准。西藏90%的天然水的TDS和TH符合饮用水卫生标准与世界卫生组织饮用水标准，

表 7 西藏地表水水样中限量元素指标检测结果

Tab. 7 The test result of harmful elements in surface water samples of Tibet

元素	Al (μg/L)	As (μg/L)	Be (μg/L)	Cr (μg/L)	Cu (μg/L)	Fe (μg/L)	Mn (μg/L)	Mo (μg/L)	Ni (μg/L)	Pb (μg/L)	Se (μg/L)
1	3.26	1.10	0.05	6.77	0.31	76.00	0.09	1.56	0.71	0.00	0.00
2	0.37	2.05	0.04	10.71	0.21	106.38	0.06	0.72	0.93	0.01	0.20
5	0.59	89.38	0.06	9.79	-0.05	66.10	0.04	0.21	0.57	0.00	0.00
6	87.74	0.90	0.03	4.90	0.64	68.68	0.65	0.23	0.55	0.06	0.00
7	16.93	0.30	0.03	2.96	0.54	36.31	0.13	0.23	0.53	0.02	0.00
8	60.61	0.76	0.09	3.10	0.57	60.99	2.44	0.24	0.54	0.05	0.03
9	26.73	0.31	0.04	2.58	0.51	43.60	0.41	0.25	0.44	0.04	0.00
12	3.57	10.59	0.01	4.97	0.09	51.28	0.11	0.61	0.50	0.00	0.00
14	1.34	0.68	0.05	5.65	0.94	97.90	1.45	0.71	2.08	0.02	0.01
15	0.80	1.74	0.03	4.83	0.16	121.11	0.36	1.58	1.19	0.04	0.08
21	385.72	0.86	-0.02	6.87	0.78	251.87	2.75	0.27	1.23	0.25	0.02
26	4.52	1.51	-0.06	2.42	0.26	134.14	0.04	0.33	1.54	0.01	0.07
27	2.00	1.36	-0.04	2.01	0.38	167.27	0.34	1.06	2.02	0.02	0.01
35	0.98	1.63	-0.04	2.39	1.52	140.65	0.09	2.80	1.95	0.01	0.52
36	0.30	2.22	-0.04	6.03	0.86	50.03	0.11	0.80	0.51	0.05	0.25
38	2.20	2.96	-0.01	1.18	0.18	87.86	0.05	0.58	0.91	0.00	0.11
44	0.99	3.44	-0.07	1.09	-0.02	109.53	0.16	0.64	1.02	0.01	0.18
52	1.45	1.81	0.00	1.91	-0.03	146.57	0.13	0.34	1.86	0.01	0.85
53	84.26	0.73	-0.02	0.67	0.37	75.09	6.62	0.52	1.06	0.05	0.13
54	42.07	6.97	0.02	0.62	0.13	44.11	0.55	1.51	0.54	0.07	0.19
57	1.08	1.20	-0.05	1.08	-0.07	75.46	0.27	0.88	0.73	0.01	0.22
58	0.70	2.00	-0.08	8.40	0.08	91.71	0.11	0.44	0.87	0.01	0.45

其中那曲地区罗马镇四村科马自然村、改则县麻米乡、普兰县八嘎乡等地水样还满足中国饮用矿泉水标准 (表9)。

4.2 限量元素

地方性砷中毒是一种较常见的地方病，患者除有胃肠功能障碍、肝功能障碍外，突出表现为皮肤损害，症状主要为皮肤色素沉着、皮肤角化过度、疣状增生及皮肤癌^[29]。有研究表明^[30]，水中砷的含量主要受岩性控制，基岩中砷含量低，则水中亦较低。当雄县、双湖县、改则县、革吉县和狮泉河等地的部分地区水中砷的含量明显较高 (表7、表8、表10) 有地方性饮水型砷中毒的可能，今后需要进行地方性砷中毒的流行病学调查，也需

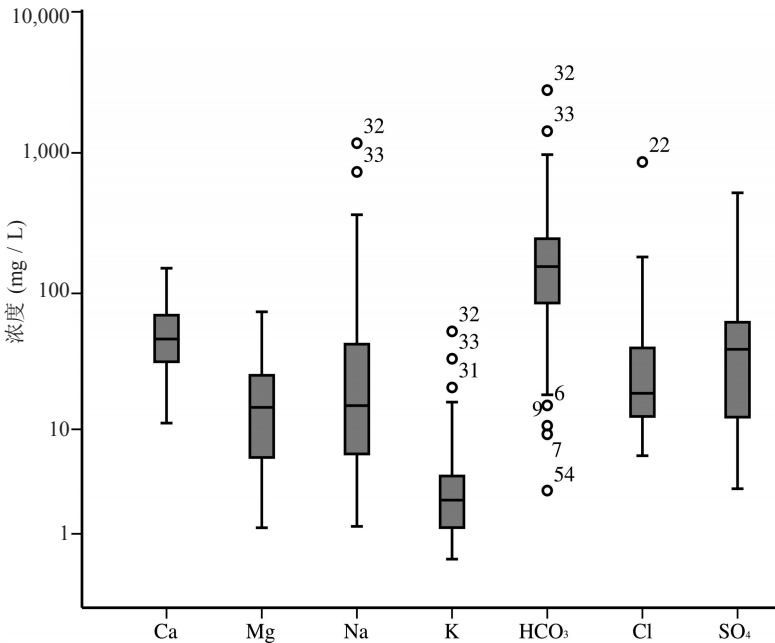


图3 西藏水中主要离子箱状图
Fig. 3 Box and whisker plots showing the variation of major ion concentrations in water samples of Tibet

表8 西藏地下水水样中限量元素指标检测结果
Tab. 8 The test result of harmful elements in groundwater samples of Tibet

元素	Al (μg/L)	As (μg/L)	Be (μg/L)	Cr (μg/L)	Cu (μg/L)	Fe (μg/L)	Mn (μg/L)	Mo (μg/L)	Ni (μg/L)	Pb (μg/L)	Se (μg/L)
3	0.19	1.96	-0.02	10.35	-0.04	98.39	0.07	0.96	0.77	0.01	0.00
4	0.46	3.10	-0.04	10.63	0.02	100.00	0.02	0.80	0.82	0.00	0.00
10	99.64	0.48	0.06	9.66	0.23	96.70	0.39	0.10	0.86	0.01	0.00
11	0.55	1.06	-0.04	8.46	-0.01	59.88	0.83	0.08	0.53	0.03	0.00
13	0.95	0.38	0.00	13.97	1.55	344.86	242.76	0.59	5.75	0.09	0.04
16	1.10	0.54	0.04	18.13	1.07	257.68	0.11	0.16	2.71	0.01	0.00
17	7.28	0.58	-0.01	12.06	0.88	238.17	0.09	0.39	2.61	0.01	0.05
18	33.97	5.09	0.05	3.48	0.62	78.13	0.30	0.67	1.60	0.02	0.03
19	0.75	0.64	-0.01	7.97	0.19	148.33	0.23	0.24	1.46	0.01	0.01
20	0.49	0.61	-0.07	16.32	0.04	143.27	514.97	0.21	1.84	0.01	0.00
22	1.15	1.05	-0.03	6.78	3.35	320.31	19.15	0.41	5.85	0.02	0.05
23	0.49	0.63	-0.03	4.62	0.50	112.17	0.55	0.15	1.13	0.01	0.00
24	0.30	0.47	0.02	4.87	0.84	269.51	0.11	0.10	3.46	0.01	0.03
25	0.26	1.20	-0.08	2.86	0.31	140.86	0.03	0.51	1.40	0.00	0.08
28	1.19	0.87	0.00	2.98	0.15	65.05	0.08	0.20	0.75	0.01	0.07
29	4.38	3.21	-0.08	3.77	0.59	246.08	0.55	0.91	2.45	0.02	0.05
30	0.44	1.54	-0.02	2.00	0.12	62.22	0.06	0.99	0.66	0.02	0.05
31	0.67	46.19	0.14	60.90	2.51	333.99	2.82	2.25	4.22	0.02	0.04
32	2.13	333.92	0.07	19.04	7.56	125.91	5.81	0.11	1.64	0.07	0.13
33	0.63	219.94	0.23	33.60	4.51	110.92	6.62	0.30	1.03	0.02	0.06
34	0.47	2.46	-0.03	9.48	0.82	155.70	0.20	0.58	1.60	0.02	0.15
37	0.45	1.29	0.00	3.63	0.94	156.06	0.06	2.19	1.79	0.01	0.75
39	0.62	6.81	-0.04	6.45	1.16	45.64	0.07	2.19	0.74	0.01	0.22
40	1.35	4.42	-0.05	1.84	0.53	107.69	0.04	0.59	1.25	0.01	0.16
41	1.27	3.77	-0.03	1.49	0.17	107.52	0.00	0.47	1.10	0.01	0.08
42	0.67	2.22	0.05	1.64	0.84	190.51	0.01	2.36	2.07	0.05	0.10
43	0.49	4.46	-0.04	1.20	0.13	65.08	0.01	0.54	0.65	0.01	0.09
45	0.47	1.28	0.04	3.68	0.04	188.20	0.04	1.06	1.89	0.01	0.24
46	0.43	3.03	-0.02	7.20	0.29	64.15	0.42	1.02	0.70	0.01	0.49
47	0.31	163.55	-0.06	1.50	0.74	89.59	0.94	6.02	0.98	0.02	0.53
48	0.68	57.96	-0.10	2.07	0.20	80.98	0.02	1.28	0.81	0.01	0.57
49	7.98	56.21	-0.03	0.81	0.06	64.30	0.00	0.98	0.65	0.01	0.14
50	0.91	17.48	0.02	1.61	0.30	122.64	0.13	0.59	1.82	0.01	0.09
51	0.63	1.09	-0.03	1.62	0.00	74.42	0.02	0.72	0.73	0.01	0.24
55	0.86	1.51	-0.04	5.66	0.12	238.44	0.11	0.36	2.18	0.01	0.11
56	21.45	3.56	-0.03	2.78	0.25	133.97	2.34	0.64	1.44	0.02	0.90
59	0.97	2.50	0.01	4.65	0.09	53.98	0.00	0.18	0.92	0.02	0.18
60	1.55	1.87	-0.03	1.02	0.00	65.49	0.62	1.34	0.75	0.01	0.18

要对高砷水的分布和成因进行进一步研究。双湖地区氟含量超标 (表9), 对其分布与成因需要进行进一步的研究。其它地区的分析水样的限量元素总体上能够满足国家生活饮用水的限量标准, 适于饮用。

4.3 水化学分类

依据舒卡列夫分类法所得的Piper三线图能很好的反应水中各主要离子的比例^[31], 因为主要离子所占的百分比决定水的化学类型^[22, 31-32]。西藏水样的水化学类型主要有: Ca-Mg-HCO₃ (8个); Ca-Mg-HCO₃-SO₄ (8个); Ca-HCO₃ (5个); Ca-HCO₃-Cl (3个); Ca-Na-Mg-HCO₃ (3个); Na-Ca-HCO₃ (3个); Ca-Mg-HCO₃-Cl (2个); Mg-Ca-HCO₃ (2个); Na-HCO₃ (2个)等 (图3、表3、表4)。

西藏水的水化学类型中 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 为占主导地位的离子。阳离子与阴离子浓度的排名顺序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 与 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ (图4)。各离子由南向北水中阳离子由 Ca^{2+} 为主逐渐过渡到 Na^+ 为主, 阴离子 HCO_3^- 逐渐减少, Cl^- 与 SO_4^{2-} 逐渐增多, 这与冰川融水、降雨等是西藏地表与地下水的主要补给来源相一致。

其中藏北、“一江三河”(即雅鲁藏布江、拉萨河、年楚河、尼洋河)流域与内流湖盆区多为松散岩类孔隙水; 基岩裂隙水主要分布于喜马拉雅山以北、冈底斯山以南的广大地区; 岩溶水主要分布于藏北羌塘高原的中部、西部。

4.4 成因初探

Gibbs^[33] 阐明了一种通过 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 与 TDS 的关系来反应水中元素的成因机制。他将水中元素的成因类型归为三类: 蒸发型、降水型、岩石风化型等。西藏地区水的成因分类为岩石风化型, 水中元素的成因主要受岩石风化控制 (图5)。

其中地表水成因类型主要为岩石风化型与长江、亚马逊河、恒河一致^[33]; 地下水坐标点较为分散, 可知其成因类型多样, 成因较为复杂; 温泉水温度较高, 水中各元素含量较高, 组分接近海洋型。

4.5 区域对比

为探讨不同区域水的水化学性质的差异, 现将昆仑山北麓新疆南部和田地区、青海西部通天河、青海湖流域、四川中西部(黄龙、茂县、壤塘)与藏东南地区(雅鲁藏布江拉萨—林芝段、色季拉山)的水样各平均值与西藏地区水样的平均值进行对比 (表11)。

新疆南部、通天河、青海湖流域、黄龙、茂县、壤塘、雅鲁藏布江拉萨—林芝段与色季拉山各地水化学类型依次为: Na-Mg-Cl-SO_4 , Na-Ca-Cl-HCO_3 , $\text{Ca-Na-Mg-HCO}_3\text{-Cl}$, Ca-HCO_3 , $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$, Ca-Mg-HCO_3 , $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ 与 $\text{Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$ 。可以看出, 地域不同导致水化学类型差异 (表11、图6)。

5 结论

西藏地区是一个人类活动较少涉及的净土, 因此本文数据能较好反映其原生状态水的

表9 各类水质常量与微量元素指标检测标准
Tab. 9 Test standards for water quality of major and trace elements

指标	国家生活饮用水卫生标准 ^[26]	世界卫生组织 ^[27]	中国饮用矿泉水标准 ^[28]
pH 值	6.5~8.5	6.5~9.5	-
TDS/(mg/L)	1 000	1 000	≥1 000
TH/(mg/L)	450	500	-
Na^+ /(mg/L)	200	200	-
SO_4^{2-} /(mg/L)	250	500	-
Cl^- /(mg/L)	250	250	-
H_2SiO_3 /(mg/L)	-	-	≥25.0
Li/(μg/L)	-	-	≥200
Sr/(mg/L)	-	-	≥0.2
B/(mg/L)	0.5	0.5	<5
Zn/(μg/L)	1 000	3 000	≥200
Se/(μg/L)	10	10	≥10
F/(mg/L)	1	1.5	<1.5
U/(μg/L)	-	15	-
Ba/(μg/L)	700	700	<700

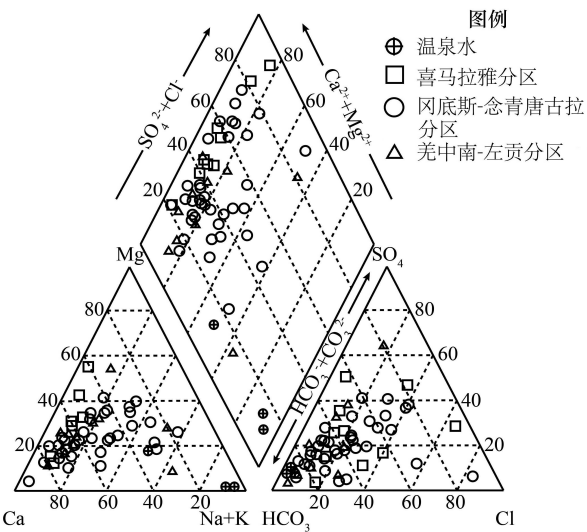


图4 西藏水样 Piper 图
Fig. 4 Piper diagram showing major ion composition of natural water samples in Tibet

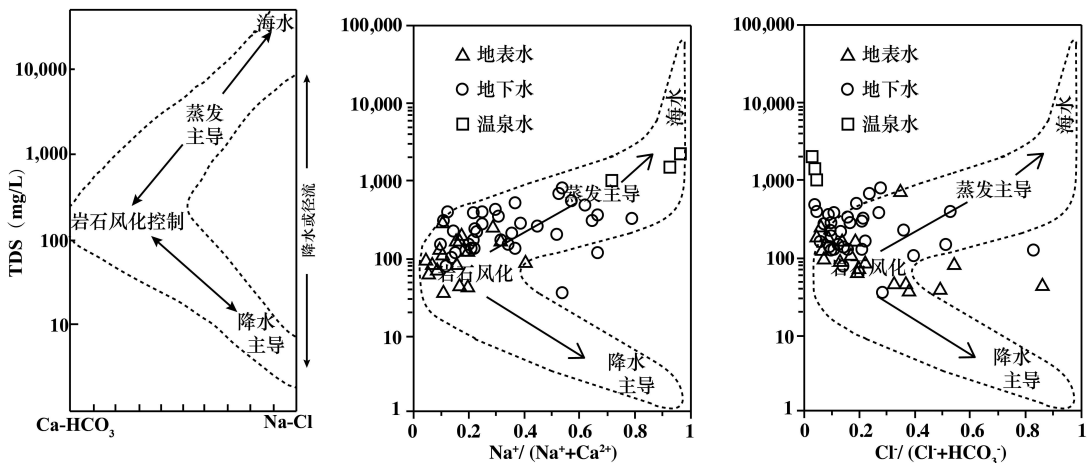


图5 西藏水样Gibbs图

Fig. 5 Plots of the major ions within the Gibbs boomerang envelope for water samples in Tibet

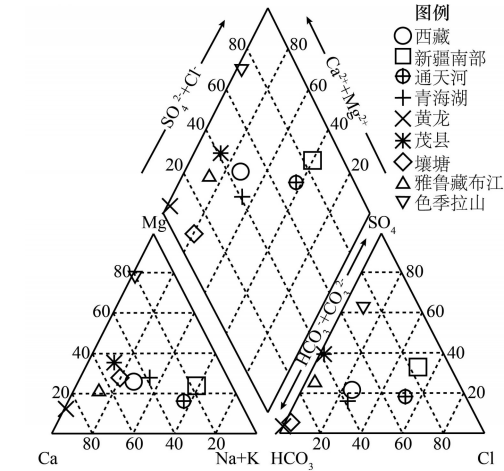


图6 不同区域水化学性质对比Piper图

Fig. 6 Piper diagram showing major ion composition of natural water samples in different regions

表 10 各类水质限量元素指标检测标准(μg/L)

Tab. 10 Test standards for water quality of harmful elements (μg/L)

元素	国家生活饮用水 卫生标准 ^[26]	世界卫生组织 ^[27]	中国饮用 矿泉水标准 ^[28]
Ag	50	100	<50
Al	200	200	-
As	10	10	<10
Be	2	-	-
Cd	5	3	<3
Cr	50	50	<50
Cu	1 000	2 00	<1 000
Fe	300	300	-
Hg	1	1	<1
Mn	100	400	<400
Mo	70	70	-
Ni	20	20	<20
Pb	10	10	<10
Se	10	10	<50
Tl	0.1	-	-

表 11 中国西部水化学性质区域对比

Tab. 11 Water chemistry in different regions of western China

地点	样本量	pH	K (mg/L)	Na (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)
西藏	57	7.55	3.09	34.93	55.25	18.69	47.67	54.68	169.67
新疆南部 ^[34-36]	154	7.64	17.87	336.97	90.1	73.78	509.41	429.08	260.28
通天河 ^[37]	9	8.09	6.77	118.02	51.77	18.82	179.88	83.34	170.63
青海湖流域 ^[38]	75	8.09	1.87	36.42	37.38	16.04	47	39.35	183.37
黄龙 ^[39]	9	6.59	0.4	3.14	253.78	20.94	0.73	23.2	777.44
茂县 ^[40]	63	7.7	2.36	19.12	70.36	28.38	7.37	119.6	226.27
壤塘 ^[41]	423	7.43	14.25	33.77	10.4	3.9	8.05	171.21	
雅鲁藏布江拉萨—林芝段 ^[42]	62	7.74	3.16	4.89	29.74	5.56	3.87	25.83	90.28
色季拉山 ^[43]	9	7.46	0.14	0.03	1.6	3.82	7.41	62.52	33.9

性质。总体上看西藏大部地区水质较好,能够满足国家生活饮用水卫生标准,部分指标甚至超过中国饮用矿泉水标准。但当雄县、双湖县、改则县、革吉县和狮泉河等地砷、氟等限量元素超标,至于成因和分布规律需要进一步的工作。

(1) 西藏水样pH处于6.75~8.21范围内,总体属于弱碱性水;

(2) 西藏水样中总溶解性固体(TDS)除温泉水外均值为225.54 mg/L,总溶解性固体总体较少,适宜饮用;

(3) 西藏阿里地区水中砷元素含量超标(超过10 $\mu\text{g/L}$),双湖地区水中氟含量超标(超过1 mg/L),成因和分布规律需要进一步的工作。同时,提示西藏有饮水型氟中毒和砷中毒症的发生,但缺乏流行病学调查工作,需要今后开展;

(4) 西藏水样中 Ca^{2+} 为水中主要阳离子,而水中主要的阴离子为 HCO_3^- ;水化学类型主要为Ca-Mg- HCO_3 、Ca-Mg- HCO_3 - SO_4 与Ca- HCO_3 型,且由南向北水中阳离子由以 Ca^{2+} 为主逐渐过渡到以 Na^+ 为主,阴离子 HCO_3^{2-} 逐渐减少, Cl^- 与 SO_4^{2-} 逐渐增多;

(5) 西藏地表水成因类型主要为岩石风化型,地下水坐标点较为分散,可知其成因类型多样成因较为复杂,温泉水中各元素含量较高,组分接近海洋型;

参考文献 (References)

- [1] Shen Yunlong, Zhou Mingwei. The environmental geological assessment in Tibet. *Sichuan Acta Geologica*, 2011, 31: 89-92. [沈云龙, 周明伟. 西藏自治区环境地质分区评价. *四川地质学报*, 2011, 31: 89-92.]
- [2] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China's Water Resource Report in 2007, 2009. [中华人民共和国水利部. 2007年中国水资源公报. 中华人民共和国水利部公报, 2009.]
- [3] Bian Duo, Bian Baciren, La Ba et al. The response of water level of Selin Co to climate change during 1975-2008. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(3): 313-319. [边多, 边巴次仁, 拉巴 等. 1975-2008年西藏色林错湖面变化对气候变化的响应. *地理学报*, 2010, 65(3): 313-319.]
- [4] Zhang Xianying, Li Xiaojun, Da Wa et al. Drinking water hygiene monitoring and analysis in 2011, Tibet Nyingchi. *Journal of Tibet Medicine*, 2013, 34(1): 62-64. [张宪英, 李晓菊, 达瓦 等. 2011年西藏林芝地区生活饮用水水质卫生监测分析. *西藏医药杂志*, 2013, 34(1): 62-64.]
- [5] Liu Cheng, Gesanguomu. Direct determination 22 kinds of trace elements of lake water in Tibet by ICP-MS. *Tibet's Science & Technology*, 2012, (2): 27-31. [柳诚, 格桑措姆. ICP-MS直接测定西藏湖泊水中22种痕量元素. *西藏科技*, 2012, (2): 27-31.]
- [6] Bu Duo, Jiang Dongsheng, Ren Jingyin et al. Preliminary study on the arsenic water of fisheries in Lhasa region. *Journal of Tibet University*, 2011, 26(1): 15-24. [布多, 姜东生, 任景印 等. 拉萨地区渔场水体重金属砷的初步研究. *西藏大学学报*, 2011, 26(1): 15-24.]
- [7] Nie Lixia. Drinking water microorganism index analysis of 6 counties in Tibet rural area. *Journal of Tibet Medicine*, 2011, 32(1): 56-57. [聂立夏. 西藏6县农村生活饮用水微生物指标分析. *西藏医药杂志*, 2011, 32(1): 56-57.]
- [8] Wang Junbo, Peng Ping, Ma Qingfeng et al. Investigation of water depth, water quality and modern sedimentation rate in Mapam Yumco and La'ang Co, Tibet. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(4): 609-616. [王君波, 彭萍, 马庆峰 等. 西藏玛旁雍错和拉昂错水深、水质特征及现代沉积速率. *湖泊科学*, 2013, 25(4): 609-616.]
- [9] Zheng Bimei, Li Suzhi, Zhou Xiaobo. The detection of 11 bathhouses' bathwater quality at certain part and habitat in Tibet Naqu. *Journal of Henan Preventive Medicine*, 2008, 19(3): 168-171. [郑必海, 李素之, 周小波. 西藏那曲某部驻地洗浴场所洗浴用水水质检测. *河南预防医学杂志*, 2008, 19(3): 168-171.]
- [10] Zheng Bimei, Li Suzhi, Ma Kuanjun et al. The investigation and analysis of the spring and well water of certain part halt in Tibet Biru County. *Journal of Henan Preventive Medicine*, 2007, 18(4): 245-246. [郑必海, 李素之, 马宽军 等. 驻西藏比如县某部泉水井水质调查分析. *河南预防医学杂志*, 2007, 18(4): 245-246.]
- [11] Zheng Bimei, Li Suzhi, Li Shangshi et al. The analysis and significance of water quality in certain department troops adopt the provide for oneself centered type water supply dwell in Tibet Naqu District. *Journal of Henan Preventive Medicine*, 2007, 18(5): 332-334. [郑必海, 李素之, 李尚师. 驻西藏那曲某部自备集中式供水水质分析及其意义. *河南预防医学杂志*, 2007, 18(5): 332-334.]
- [12] Zhang Na, Li Hongjing, Wen Zhenzhong et al. Spatio-temporal characteristics of Niyang River in Tibet. *Journal of Henan Normal University*, 2009, 37(6): 79-82. [张娜, 李红敬, 文祯中 等. 西藏尼洋河水质时空特征分析. *河南师范大学学报*, 2009, 37(6): 79-82.]

- [13] Li Hongjing, Zhang Na, Lin Xiaotao. Spatio-temporal characteristics of Yarlung Zangbo River in Tibet. *Journal of Henan Normal University*, 2010, 38(2): 126-130. [李红敬, 张娜, 林小涛. 西藏雅鲁藏布江水质时空特征分析. *河南师范大学学报*, 2010, 38(2): 126-130.]
- [14] Liu Xianrong, Shi Yan. Tibet Shannan rural drinking water safety project in 2012 water quality monitoring results. *Journal of Tibet Medicine*, 2013, 35(3): 54-55. [刘先勇, 石燕. 西藏山南地区2012年农村饮用水安全工程水质监测结果分析. *西藏医药杂志*, 2013, 35(3): 54-55.]
- [15] Luo Dan, Huang Chuanyou, Yin Tong. Assessment of water quality and water security on centralized drinking water sources in towns of Tibet. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2010, 16(4): 420-422. [罗丹, 黄川友, 殷彤. 西藏自治区城镇饮用水源地水质现状与水质安全评价. *水利科技与经济*, 2010, 16(4): 420-422.]
- [16] Zhao Wei, Liu Daohua, Zhang Huaping et al. Investigation of water quality on individual supply well in Tibet servicemen outstation. *Journal of PLA Preventive Medicine*, 2002, 20(6): 427-428. [赵伟, 刘道华, 张华平等. 驻藏边远部队自备水源水质调查. *解放军预防医学杂志*, 2002, 20(6): 427-428.]
- [17] Ma Guanqing, Yao Zongfu. The region geology of Tibet Autonomous Region. Bureau of Geology and Mineral Resources of Tibet Autonomous Region. [马冠卿, 姚宗富. 西藏自治区地质. 西藏自治区地质矿产局.]
- [18] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. *Methods for Chemical Analysis of Water and Wasted Water*. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [19] GB5750 85. Standards for Drinking Water Test, 1985. [GB5750 85. 生活饮用水标准检验法, 1985.]
- [20] Hirokazu Hara, Yoshiki Wakizaka, Satoshi Okazaki. Silver chloride pre-treatment for the direct potentiometric determination of chloride in stream waters using a solid-state chloride ion-selective electrode. *Analyst*, 1985, 110(9): 1087-1090.
- [21] Yu Changzhen, Fu Erhong. Determination of chloride in water by ion-selective electrode method. *Chemical Analysis and Meterage*, 2010, 19(1): 40-42. [于长珍, 付二红. 离子选择电极法测定水中氯含量. *化学分析计量*, 2010, 19(1): 40-42.]
- [22] Shen Zhaoli, Zhu Wanhua. *Hydrogeochemical Basis*. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 83-91. [沈照理, 朱宛华. 水文地球化学基础. 北京: 地质出版社, 1993: 83-91.]
- [23] Ji Qiguang, Wang Biquan. The data processing and application of groundwater chemical composition. *Land and Resources of Southern China*, 2007, (1): 31-33. [纪其光, 王碧泉. 地下水化学成分的数据处理及应用. *南方国土资源*, 2007, (1): 31-33.]
- [24] Harry V Warren. *Geology, trace elements and health*. *Social Science & Medicine*, 1989, 29(8): 923-926.
- [25] Webster J G, Brown K L, Vincent W F. Geochemical processes affecting meltwater chemistry and the formation of saline ponds in the Victoria Valley and Bull Pass Region, Antarctica. *Hydrobiologia*, 1994, 281(3): 171-186.
- [26] GB 5749-2006. Standards for Drinking Water Quality [S][D]. Ministry of Health of the People's Republic of China, 2006. [GB 5749-2006. 生活饮用水卫生标准 [S][D]. 中华人民共和国卫生部, 2006.]
- [27] World Health Organization (WHO). *Guidelines for Drinking-water Quality*. 3rd ed. Geneva, 2005.
- [28] GB 8537-2008. Drinking Natural Mineral Water [S][D]. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2008. [GB 8537-2008. 饮用天然矿泉水[S][D]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008.]
- [29] Zhao Sulian, Wang Lingfen, Liang Jinghui. The damage and remove measure of arsenic in drinking water. *Modern Preventive Medicine*, 2002, (5): 651-652. [赵素莲, 王玲芬, 梁京辉. 饮用水中砷的危害及除砷措施. *现代预防医学*, 2002, (5): 651-652.]
- [30] Qing Zhengyao, Jing Zhang, Ying Wu et al. Hydrochemical processes controlling arsenic and selenium in the Changjiang River (Yangtze River) System. *Science of the Total Environment*, 2007, 377(1): 93-104.
- [31] Arthur M Piper. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 1944, 25: 914-928.
- [32] Zhu Bingqi, Yang Xiaoping, Patrick Rioual et al. Hydrogeochemistry of three watersheds (the Erlqis, Zhungar and Yili) in northern Xinjiang, NW China. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(8): 1535-1548.
- [33] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 1970, 170: 1088-1090.
- [34] Liu Yonglin, Luo Kunli, Lin Xiaoxu et al. regional distribution of longevity population and chemical characteristics of natural water in Xinjiang, China. *Science of the Total Environment*, 2014(473/474): 54-62.
- [35] Pang Zhonghe, Huang Tianming, Chen Yaning. Diminished groundwater recharge and circulation relative to degrading riparian vegetation in the middle Tarim River, Xinjiang, western China. *Hydrol. Process*, 2010, 24: 147-59.
- [36] Zhang J, Takahashi K, Wushiki H et al. Water geochemistry of the rivers around the Taklimakan Desert (NW China): Crustal weathering and evaporation processes in arid land. *Chemical Geology*, 1995, 119: 225-37.

- [37] Su Chunjiang, Tang Bangxing. The hydrochemical characteristics of Tongtian River. *Mountain Research*, 1987, 5(3): 143-146. [苏春江, 唐邦兴. 通天河河水的水化学特征. *山地研究*, 1987, 5(3): 143-146.]
- [38] Xu Hai, Hou Zhaozhua, An Zhisheng et al. Major ion chemistry of waters in Lake Qinghai Catchments, NE Qinghai-Tibet Plateau, China. *Quaternary International*, 2010, 212: 35-43.
- [39] Wang Haijing, Liu Zaihua, Zheng Cheng. Hydrochemical variations of Huanglong Spring and the stream in Huanglong Ravine, Sichuan Province. *Geochimica*, 2009, 38(3): 307-314. [王海静, 刘再华, 曾成 等. 四川黄龙沟源头黄龙泉水及其下游溪水的水化学变化研究. *地球化学*, 2009, 38(3): 307-314.]
- [40] Du Jingting. Hydrogeochemical research of Kashin-Beck Disease [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. [杜锦婷. 茂县大骨节病病区水文地球化学研究. 成都: 成都理工大学, 2011.]
- [41] Cao Nan. An analysis of the characteristics of geological environment in the Kashin-Beck Disease (KBD) Area in the Rangtang County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. [曹楠. 壤塘县大骨节病区地质环境特征分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.]
- [42] Liu Zhao. The characterization of hydrochemistry and isotopic in the natural water of the Yarlung Tsangpo Lhasa-Nyingchi [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. [刘昭. 雅鲁藏布江拉萨—林芝段天然水水化学及同位素特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.]
- [43] Ren Qingshan, Wang Jingsheng, Zhang Bo et al. Different forms of water quality analysis in southeastern Tibetan Fir Forest. *Journal of Northeast Forestry University*, 2002, 30(2): 52-54. [任青山, 王景升, 张博 等. 藏东南冷杉原始林不同形态水的水质分析. *东北林业大学学报*, 2002, 30(2): 52-54.]

Water chemical properties and the element characteristics of natural water in Tibet, China

TIAN Yuan^{1,2}, YU Chengqun¹, LUO Kunli¹, WU Jianshuang¹,

ZHANG Xianzhou¹, NI Runxiang^{1,2}, TIAN Xinglei^{1,2}

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The water quality and the water feature in Tibet were studied in this article. In 2013, we collected 60 water samples (35 groundwater samples, 22 surface water samples and 3 hot spring water samples) from 36 counties, villages and towns in Lhasa, Nagqu, Ali and Shigatse of Tibet. The element contents of the water samples were tested and compared with other regions such as southeast Qinghai, south Xinjiang, east Sichuan and west Tibet. Moreover, hydrochemical types in different areas were discussed. Generally, the water in most parts of Tibet is of good quality and reaches the national standards for drinking water. The pH values of water samples range from 6.75 to 8.21; The mean value of TDS is 225.54 mg/L; The arsenic content in water in Ali exceeds the permitted amounts of the national standards for drinking water (10 $\mu\text{g/L}$); The fluorine content in water of Shuanghu exceeds the permitted values of the national standards for drinking water (1 mg/L); The main hydrochemical type of water in Tibet is Ca-HCO_3 . From south to north, the main cations in water change from Ca^{2+} to Na^+ , while the main anions in water change from HCO_3^- to Cl^- and SO_4^{2-} . The genetic type of river water and glacier melt water is rock dominance and the groundwater formation is affected by many factors. Tectonic division determines the water main elements and affects hydrochemical types of water.

Key words: Tibet; water quality; water chemistry; water element contents