

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.02.009

西藏萨迦县卡乌地热水的水环境效应

张庆, 谭红兵, 张文杰, 孔娜, 张燕飞

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210098)

摘要:对西藏萨迦县卡乌村高温地热水进行实地调查,发现该地区地热水中超标(GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅱ类与WHO《饮用水水质标准》(第二版))的有害元素主要有F、B、As、Sb、Tl、Be,放射性有毒元素主要为Th、U。借助折线图、内梅罗指数法,分析冲曲河在流经该地热区前后各超标有害元素的质量浓度变化情况。结果表明,地热水严重影响了冲曲河的水质。最后,对卡乌村高温地热水的利用提出了相关建议。

关键词:地热水;有害元素;水环境效应;折线图;内梅罗指数法;冲曲河;萨迦;西藏

中图分类号:X141 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)02-0045-05

Water environmental effects of Kawu geothermal water in Sajia County, Tibet

ZHANG Qing, TAN Hongbin, ZHANG Wenjie, KONG Na, ZHANG Yanfei

(School of Earth Science and engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: An investigation to high temperature geothermal water in Kawu Village of Sakya County, Tibet was made. We found that harmful elements in geothermal water whose concentrations were far higher than the limits of class II of “environmental quality standard of surface” (GB3838—2002) and the safety limits of “Drinking Water Quality Standards” (the second edition) were F, B, As, Sb, Tl, Be, while radioactive toxic elements are mainly Th, U. We analyzed the concentration variation of harmful elements before and after Chongqu River flows through the geothermal area with line charts and the Nemerow index method. The results show that geothermal water seriously affects the water quality of Chongqu River. In the end, some useful suggestions about the utilization of geothermal water were put forward.

Key words: geothermal water; harmful elements; water environmental effect; line charts; Nemerow index method; Chongqu River; Sajia County; Tibet

近年来,我国旅游业作为一种绿色产业迅速发展。在这样的大环境下,西藏的地热旅游资源已经受到越来越多的关注,亟待开发。卡乌村距西藏萨迦县城 18 km,是历代萨迦法王洗浴休闲的地方。该村可见数十眼温泉出露于河谷内,一年四季水流不断,热水出口温度超过当地沸点。这些沸泉喷涌出地热水,喷高 10 余 m,总流量超过 20L/s^[1],直接汇入临近的冲曲河。地热水中含有的大量有害元素,直接影响着冲曲河水质。冲曲河下游是著名的

旅游景点——萨迦县城。萨迦县曾经是西藏自治区的政治、经济和文化中心,同时也是“萨迦王朝”和“萨迦教”的发源地,拥有我国重点文物保护单位——“萨迦寺”。冲曲河是萨迦县最主要的河流,是当地居民与牲畜的主要饮水水源,冲曲河的水质将直接关系到当地居民的健康以及旅游业的发展。因此,在当下地热水尚未全面开发、旅游业日趋发展的情况下,探讨卡乌地热水对冲曲河水质的影响具有重要意义。

基金项目:国家自然科学基金(41173049; 41271041)

作者简介:张庆(1989—),女,硕士研究生,研究方向为环境污染。E-mail:994078843@qq.com

通信作者:谭红兵,教授。E-mail:zhanguy91716@163.com

1 研究区简况

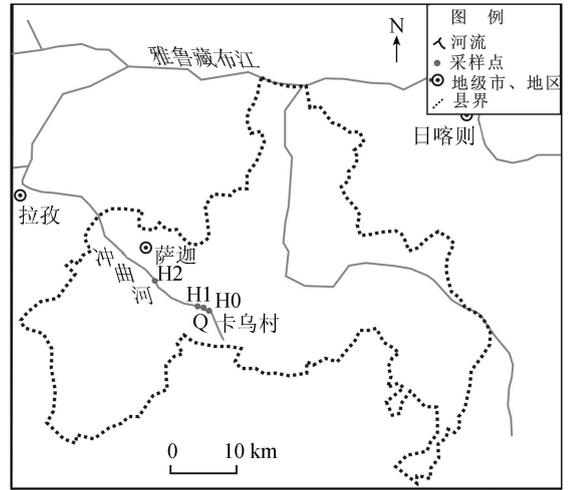
研究区位于西藏日喀则萨迦县境内,雅鲁藏布江南岸,是西藏典型的高温地热系统所在区之一。研究区位于西藏主中央断层和主边界断层的北侧,为断层上冲盘内,其岩体规模较小,岩性单一,以片麻状二云母二长花岗岩为主。由于南北向挤压力作用,藏南中段有许多规模小、延伸不远的南北向张断裂,这些张断裂的附近发育有众多第四纪的断堑盆地,而萨迦县的高温地热系统就位于这些断堑盆地中^[2]。西藏的高温地热系统分布于雅鲁藏布江缝合线附近,热源主要是陆陆碰撞产生的地壳重熔体。这些重熔体加热地下水,地下水沿着断裂带不断上升,形成泉水,直接汇入萨迦县重要的河流——冲曲河,对冲曲河水质的影响毋庸置疑。

萨迦县的气候同西藏其他地方一样,有垂直分布的特点,海拔较高地区寒冷,海拔较低处则较温暖湿润。当地年降雨量大约在 150~300 mm 左右,雨量多集中在 6—8 月;年均气温为 5~6℃,最高气温为 27℃,最低气温为 -20℃;冬季多西南风,干燥寒冷、风沙较多;夏季则多东南、西南风,较温暖,属于半干旱地带。萨迦主要为半农半牧状态,居民与牲畜的饮用水源多为当地河流与地下水。地热水多富含多种有害元素,且直接汇入当地河流,必然引起河水水质的变化,因而直接影响当地居民与牲畜的健康。

2 样品采集与分析

本次野外采样于 2012 年 5—6 月份完成,当时恰逢萨迦县旱季向雨季的过渡期,地表水化学成分类似于全年中值水平。本次采集样品均为水样,共 4 个,其中卡乌地热水样 1 个,冲曲河上游水样 1 个,下游水样 2 个,样品具体位置见图 1。所有样品均采用 350mL 的聚乙烯瓶收集。取样前,将聚乙烯瓶用蒸馏水清洗,再用所采水样润洗 2~3 次。装样前,用带 0.45 μm 微孔滤膜的过滤装置过滤水样,一份样品加入优级纯硝酸,将样品酸化至 pH 值小于 2,用于阳离子的测定;另一份样品保持原样作为阴离子测试样品。野外测试项目主要是水样的 pH

值、电导率(EC)和总固体溶解度(TDS);室内测试项目为水样中的 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻ 以及微量元素浓度。其中 4 大主要的阳离子浓度采用 ICP 等离子体发射光谱仪测定,误差优于 5.0%;三大主要阴离子浓度采用 ICS-2000 离子色谱仪测定,误差优于 2.0%;F、Br 浓度采用分光光度法测定,经标准控制误差优于 1.5%;其余微量元素浓度采用 ICP-MS 测定,误差优于 2%。所有测试项目在采样后 2 周内完成,具体测试结果见表 1 和表 2。



注:样品号 H0—H2 代表河流水;Q 代表地热水

图 1 研究区地表水系简图及样品采集位置

表 1 河水(H)和地热水(Q)的基本化学成分组成

类别	$\rho(\text{Na}^+)$	$\rho(\text{K}^+)$	$\rho(\text{Mg}^{2+})$	$\rho(\text{Ca}^{2+})$	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	$\rho(\text{HCO}_3^-)$
H0	34.9	1.80	0.781	6.88	20.0	27.4	51.1
Q	4089.0	190.00	1.320	46.80	611.0	29.5	441.0
H1	98.7	13.50	1.460	12.50	102.0	41.6	101.0
H2	72.6	7.14	2.450	15.70	65.7	53.0	83.5

3 结果与讨论

3.1 卡乌地热水特征

卡乌村众多地热水是萨迦县主要的高温地热水,其泉口温度超过当地沸点。根据地热水中的 Si 质量浓度(59.55 mg/L),利用石英温标计算热储层温度为 151.28℃^[3]。温泉群区,热雾腾腾,声响极大,并带有浓烈刺鼻的硫磺味。温泉群区还分布有

表 2 河水(H)和地热水(Q)的有害微量元素组成

类别	$\rho(\text{F})/$ (mg·L ⁻¹)	$\rho(\text{B})/$ (mg·L ⁻¹)	$\rho(\text{As})/$ (μg·L ⁻¹)	$\rho(\text{Cu})/$ (μg·L ⁻¹)	$\rho(\text{Ni})/$ (μg·L ⁻¹)	$\rho(\text{Sb})/$ (μg·L ⁻¹)	$\rho(\text{Ba})/$ (μg·L ⁻¹)	$\rho(\text{Be})/$ (μg·L ⁻¹)	$\rho(\text{Ti})/$ (μg·L ⁻¹)	$\rho(\text{Tl})/$ (ng·L ⁻¹)	$\rho(\text{Th})/$ (ng·L ⁻¹)	$\rho(\text{U})/$ (ng·L ⁻¹)
H0	1.568	4.39	2.23	0.295	0.699	0.433	2.924	0.095	0.757	23.7	0.940	275.3
Q	5.112	147.60	137.30	0.863	2.246	93.300	8.721	7.158	8.974	5709.0	5.691	8.5
H1	4.097	27.38	21.28	0.274	0.725	6.963	5.814	0.218	1.795	600.9	0.813	382.3
H2	2.638	16.49	10.03	0.319	0.912	3.568	3.505	0.027	1.197	268.5	0.491	665.5
标准 1	1.0	0.5	50	1000	20	5	700	2	100	100	—	—
标准 2	1.5	0.3	10	2000	20	5	700	—	—	—	—	—

注:“标准 1”指 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中 II 类标准,“标准 2”指 WHO《饮用水水质标准》(第二版),“—”表示相关标准中未提及。

大量硅华,且古硅华高出泉群口 10 m 之多。这些硅华有效地指示了地下高温地热系统的存在^[4]。现场测量地热水的 pH=8.7, TDS 值为 2 600.00 mg/L, EC 值为 5 213.00 μ S/cm。由此可知,卡乌村地热水呈碱性,这也是西藏地热水的特征。地热水由于温度高,不含有胶体,除 SiO₂ 之外,盐均以离子态存在,导致其电导率 EC 超过一般的地下水 EC 值,呈强电解质溶液。

地热水水化学类型为 Cl·HCO₃-Na,主要离子为 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻,并富含多种有害成分,如 F、As、B、Tl、U 等。这些有害元素的富集与当地分布的岩浆岩的成分和种类有直接的关系,如喜马拉雅的电气石白云母花岗岩中含有异常高的 B,直接导致藏南地热水中的 B 质量浓度极高^[5]。据调查,作为国内唯一利用高温地热发电的羊八井,由于地热水中高含量有害元素的排放,直接导致当地居民患有氟斑牙、色素沉着等地方病^[6]。在全球地热水中,各种有害元素也都出现不同程度的富集。因此,在利用这些地热水的过程中,这些有害元素对人类以及环境的危害值得深入研究。

3.2 地热水对河流的影响评价

卡乌地热水属于高温地热水,水中含有较多有害元素。这些有害元素大量排至冲曲河,导致当地的水环境受到污染。根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,对照表 2,得知卡乌地热水和冲曲河中超标的有害元素均为 F、B、As、Sb、Tl、Be。对于放射性元素 Th、U,GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中虽未提及,但是这两种放射性元素应得到重视。冲曲河不仅是当地重要的地表水,也是萨迦县重要的生产与生活水源,因此对地热水的水环境影响评价选用 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅱ类与 WHO《饮用水水质标准》(第二版)(以下简称两个标准)作为评价依据。以下通过几种方式对此污染问题进行阐述。

3.2.1 一般污染元素

地热水对河流产生的环境效应主要由 F、B、As、Sb、Tl、Be 这 6 种元素引起。图 2 为这 6 种元素在冲曲河上游、冲曲河所经地热水、冲曲河下游的质量浓度变化趋势。

由图 2(a)知,地热水和河水中的 F 质量浓度不仅超过了地表水环境标准,且超过了饮用水标准。这样的河水对人畜的健康会产生极大的威胁。羊八井地区的地方病在地热开发以前没有出现,但是地热开发后,当地百姓因为饮用藏布河河水而不同程度地患有氟斑牙、秃顶等疾病^[7]。因此在地热开发前,有必要对排至河流中的 F 元素进行处理,以免

出现类似于羊八井地区的地方病。

图 2(b)为 B 质量浓度的变化趋势图。在所有污染元素中,B 质量浓度是最高的,已经高达 147.6 mg/L,远远超过两个标准的标准值。B 质量浓度如此高的地热水在全球也是少见的。羊八井深部高温地热水中的 B 质量浓度为 119.0 mg/L^[8],意大利伊斯基亚岛地热水中 B 质量浓度为 18.951 mg/L^[9],土耳其 Cumali 泉水中 B 质量浓度为 16.600 mg/L^[10]。卡乌村的地热水分布区正好位于西藏富硼地带,此地带分布有富硼岩石。在较高的温度下,热水与岩石反应进而溶滤出含 B 物质,或者地热水得到岩浆分异的含 B 流体的补给。总之,地热水中富 B 与岩浆活动有较大关系^[11]。在冲曲河下游,B 浓度仍然很高,若当地居民长期直接以此河作为饮用水源,人体免疫系统将受到威胁。

图 2(c)为 As 质量浓度的变化趋势图。Guo 等^[6]在调查羊八井地区时,发现浅层地热水中的 As 质量浓度为 3.12 mg/L,并提到 ZK4001 热水中 As 质量浓度为 5.70 mg/L。卡乌地热水中 As 质量浓度相对较低,为 137.30 μ g/L。地热水中 As 质量浓度虽高于两个标准的标准值,但是冲曲河河水中 As 质量浓度只超过 WHO 提供的饮用水标准值,因此,冲曲河不宜作为直接饮用水水源。

图 2(d)为 Sb 质量浓度的变化趋势图。对于地热水中的 Sb,前人少有研究。Lima 等^[9]在研究伊斯基亚岛上的地热水时,发现 Sb 的质量浓度异常高,最高值为 131 μ g/L,平均值为 7 μ g/L。卡乌地热水中 Sb 的质量浓度为 93.3 μ g/L,冲曲河流经地热区后,Sb 的质量浓度增高近 15 倍。H1 点河水中 Sb 质量浓度是 H2 点河水中 Sb 质量浓度的 2 倍。相比于其他元素,Sb 在河流中的质量浓度降低程度较高。黏土矿物对 Sb 的吸附性较强^[12],因此 Sb 质量浓度的下降与河底黏土矿物的存在有极大关系。冲曲河下游中 Sb 质量浓度高于饮用水标准值,而 Sb 对人体的五官、心脏、肝脏等均有刺激,严重者将致人死亡。

Tl 是一种剧毒性元素,由图 2(e)知,卡乌地热水与冲曲河水中的 Tl 已经远远超过地表水环境质量标准值。H2 点河水中,Tl 质量浓度仍然很高,冲曲河河水明显不能作为健康的饮用水水源。在不同的岩浆岩中,花岗岩是含 Tl 量最高的岩石^[13]。当地地热水和河水中 Tl 质量浓度极高,是与藏南多分布花岗岩有密切关系的。

Be 是一种碱土金属,其单质及化合物均有剧毒,Be 的化合物毒性较大,是一种全身性毒物,可引起肺炎、癌症等。Be 的地表水环境质量标准值为

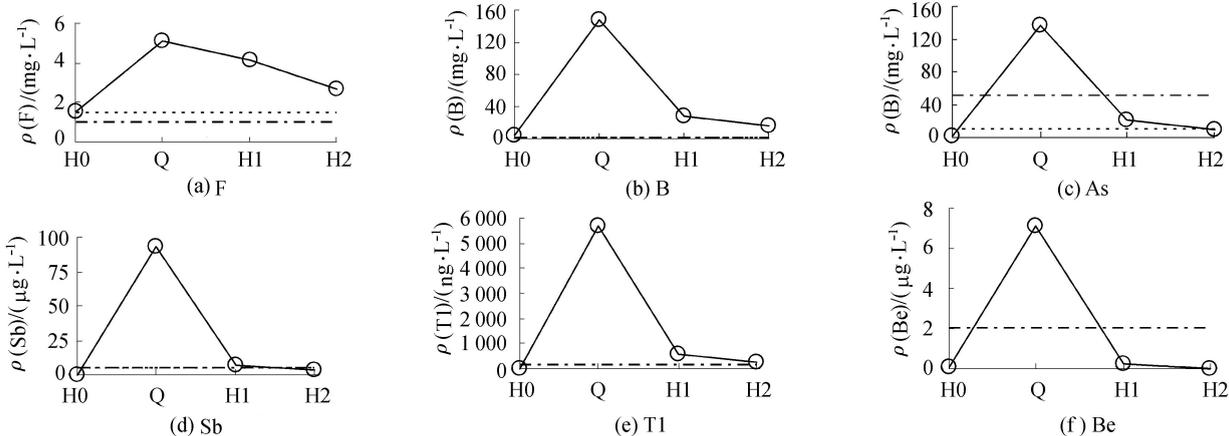


图2 冲曲河、地热水中超标有害元素质量浓度的变化

2 μg/L, 卡乌地热水中 Be 质量浓度是标准值的 3 倍之多。图 2(f) 表明, 在冲曲河下游段 H1、H2 处, Be 质量浓度已低于标准值。Be 的吸附性强、表生作用差, 冲曲河河水常年水流不断, 河底黏土矿物和有机质被不断冲刷而粒径变细, 随之对 Be 的吸附性也增强。冲曲河 H1 点河水的 pH=10.79, 这样碱性的条件极不利于 Be 化合物的存在。

由以上分析可知, 冲曲河在卡乌地热水的汇入后, 其水质急剧下降, 不符合本文选用的水质环境评价标准值。在这 6 种有害元素超标的情况下, 有必要运用单因子指数法和综合指数评价法对冲曲河水质进行综合评价。单因子指数法和综合指数评价法属于环境质量评价方法, 选用标准为 GB 3838—2002《地面水环境质量标准》。

单因子污染指数计算公式为

$$P_i = \frac{\rho_i}{\rho_{oi}} \quad (1)$$

式中: P_i 为单项指标污染指数, ρ_i 为某污染因子的实测质量浓度值, mg/L; ρ_{oi} 为某污染因子的排放质量浓度标准限值, mg/L。

利用式(1), 计算 6 种超标有害元素的 P_i 值, 见表 3。由表 3 得知, 冲曲河中, F、B 的质量浓度在上、下游均严重高于标准值, 而 Sb 和 Tl 的质量浓度在河流下游高于标准值, 且 Sb 在河流下游 H2 处的 P_i 值已经低于 1。F、B 是最严重的污染物, 如果当地居民继续饮用冲曲河河水, 需要对下游水中的 F、B、Sb 和 Tl 进行重点处理, 如利用生物和化学的方法净化水质。

表3 冲曲河中有害超标元素的 P_i 值

采样点	$P_i(F)$	$P_i(B)$	$P_i(As)$	$P_i(Sb)$	$P_i(Tl)$	$P_i(Be)$
H0	1.57	8.77	0.04	0.09	0.24	0.05
H1	4.10	54.76	0.43	1.39	6.01	0.11
H2	2.64	32.98	0.20	0.71	2.69	0.01

综合污染指数的计算方法有很多种, 本文为了突出易活化元素 As 对环境质量的影响和作用, 选用目前应用较多的最大值法, 并利用内梅罗指数计算式计算综合污染指数 P_{zi} :

$$P_{zi} = \sqrt{\frac{1}{2} \times \left[\left(\frac{\rho_i}{\rho_{oi}} \right)_{\max}^2 + \left(\frac{\rho_i}{\rho_{oi}} \right)_{\text{ave}}^2 \right]} \quad (2)$$

内梅罗指数法计算的综合污染指数结果: H0 为 1.27, 河水尚清洁; H1 为 7.88, 属于严重污染; H2 为 4.63, 属于中度污染(表 4)。由 P_{zi} 值可知, 在冲曲河未经主地热田区时, 地热田上游仍然有地热泉向河流排泄。在冲曲河流经地热区后, 河水的 P_{zi} 值增加 5 倍左右, 地热水的汇入对河流的严重影响极为突出; 在 H2 处, P_{zi} 值逐渐下降, 这与河床沉积物的吸附作用、微生物作用等有直接的关系, 但是仍然高于上游的 P_{zi} 值。冲曲河进入萨迦县城, 其水质仍然是令人担忧的, 相关部门必须高度重视。

表4 水质综合污染程度分级标准

P_{zi}	≤1	1-2	2-3	3-5	>5
水质	清洁	尚清洁	轻度污染	中度污染	严重污染

3.2.2 放射性元素

卡乌地热水中不仅一般性有毒元素质量浓度高, 具有放射性的 Th、U 质量浓度也极高。这两种元素均是放射性的金属元素, ^{232}Th 的半衰期为 140 亿年, ^{238}U 的半衰期为 45 亿年。由于这两种元素在一般地表水与饮用水中质量浓度极小, 因此本文选取的两个标准中均未提及。相比于 Th 来说, 冲曲河在流经地热区后, U 质量浓度变化更大, 而且下游 H2 比 H1 河水中 U 质量浓度更高, 说明 U 是一种易在河水中富集的元素。若在研究区内进行地热开发, 这两种放射性元素必须进行处理, 以免对人类、牲畜等产生长期毒害。

由前文述及卡乌总流量超过 20 L/s, 运用下式

计算以上 8 种有害元素每年输入冲曲河的量:

$$m_i = 10^{-6} Q \rho_i T \quad (3)$$

式中: m_i 为地热水中某有害元素向外环境排放的总

量, kg; Q 为某地热水的天然流量, 20 L/s; T 为时间, a。计算结果见表 5。

表 5 各类污染元素每年排向冲曲河中的总量

元素	F	B	As	Sb	Tl	Be	Th	U
排放总量	3 224. 24	93 094. 27	86. 59	58. 85	3. 6	4. 51	0. 003 6	0. 005 4

由表 5 可知, 多种有害元素每年直接排放到附近河流中, 降低了冲曲河的水质。纵使河流具有稀释有害元素的作用, 或沉积物对有害元素有吸附作用, 或当地冰川对河流进行大量补给, 但是, 有害元素的排放总量仍是不可忽视的。

地热水对冲曲河水质的影响不仅表现在流量、TDS、主量元素, 而且表现在有害元素对河流的影响上。从表 5 可知, 冲曲河下游中各有害元素排放的总量非常大。河流中的有害元素随着河流的流动不断减少, 但是沉积物对有害元素的吸附一直在进行。地热水的喷涌时时刻刻在进行, 有害元素在河床中的积累同时在不断增加, 但是河床沉积物对有害元素的吸附承载能力是有限的, 当吸附量达到一定值后, 河床沉积物吸附能力将降低。另外, 随着愈演愈烈的全球变暖, 当周围的冰川雪融水量突然增加, 从各个方面影响冲曲河, 极有可能使吸附物中的有害物质活化, 重新汇入河水中, 对河水造成再次严重的污染。冲曲河下游的旅游区萨迦县城的居民、牲畜以及旅游业都会受到严重的影响, 对萨迦文化也将间接产生严重的影响。1997 年 3 月, 智利发生洪水事件, 水力梯度极高的 Rio Loa 主要水体中 As 和重金属质量浓度骤然升高, 斯洛曼水库 As 质量浓度猛增至 30 mg/L^[14], 而此水体中有害物质同样来源于地热水。沉积物中的有害物质由于突发地质灾害而进入水体中, 将对水体产生较大污染。

4 结 论

a. 萨迦县是西藏境内重要的旅游景区之一, 其地热旅游资源日益发展。卡乌村分布有萨迦县最主要的地热水。这些地热水富含众多有害元素, 超标有害元素主要为 F、B、As、Sb、Tl、Be 以及放射性元素 Th、U。地热水在喷涌出地表后直接汇入当地最重要的河流中, 大量有害元素直接恶化了冲曲河的水质。

b. 本次采样为一年中干旱-多雨交替期, 河水化学组成成分代表中值水平。进入雨季后(7—9月), 河水受到雨水的稀释作用, 地热对河流污染的影响减轻。相反, 到了冬季, 降水、冰雪融水急剧减少, 地表径流减少, 地热势必会造成对地表水体更严重的污染。

c. 我国作为能源消耗大国, 青藏高原地热资源大规模开发势在必行, 但对富含有害元素的地热田开发之后, 需对废水进行严格处理, 以免影响周围水环境质量。

参考文献:

- [1] 佟伟, 廖志杰, 刘时彬, 等. 西藏温泉志[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 廖志杰, 张振国. 西藏南部地热[J]. 地质论评, 1989(4): 366-373. (LIAO Zhijie, ZHANG Zhenguo, Geothermics of southern Tibet[J]. Geological Review, 1989(4): 366-373. (in Chinese))
- [3] 张卫民. 应用 SiO₂ 地热温度计估算地热储温度: 以赣南横泾地区若干温泉为例[J]. 地球学报, 2001, 22(2): 185-188. (ZHANG Weimin. The application of SiO₂ geothermometer to estimating temperature of the geothermal reservoir; exemplified by some thermal springs in Hengjing Area, South Jiangxi[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2001, 22(2): 185-188. (in Chinese))
- [4] 刘时彬. 地热资源及其开发利用与保护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [5] 廖志杰, 赵平. 滇藏地热带: 地热资源和典型地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [6] GUO Q, WANG Y, LIU W. B, As, and F contamination of river water due to wastewater discharge of the Yangbajing geothermal power plant, Tibet, China[J]. Environmental geology, 2008, 56(1): 197-205.
- [7] LI Huixia, HE Xiaorong, HU Xiancai, et al. Environmental issues of geothermal development in Yangbajing, Tibet and the countermeasures[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2003, 8(3B): 965-974.
- [8] GUO Q. Hydrogeochemistry of high-temperature geothermal systems in China: a review[J]. Applied Geochemistry, 2012, 27(10): 1887-1898.
- [9] LIMA A, CICCHELLA D, DI F S. Natural contribution of harmful elements in thermal groundwaters of Ischia Island (southern Italy)[J]. Environmental Geology, 2003, 43(8): 930-940.
- [10] TARCAN G, GEMICI Ü. Water geochemistry of the Seferihisar geothermal area, Izmir, Turkey[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2003, 126(3/4): 225-242.

(下转第 54 页)

4 结 论

太湖水质在时间和空间上都存在差异性。竺山湖和梅梁湾水质最差(V类),而东太湖和东部湖区水质相对最好(II类)。这与太湖入湖河道主要分布在西北部且入湖水质较差有关,而东部湖区分布着主要的出湖河道,表明外源污染是导致太湖水质空间差异性的主要原因。对于不同的水质指标,氨氮浓度的空间差异性最大,表明城镇污水是太湖外源污染的主要成分。竺山湖和梅梁湾的水质随季节变化幅度较大,冬春季水质较差,夏秋季水质较好,其原因可能是北部湖湾区夏秋季藻类大量生长繁殖吸收了水体中的营养元素,从而降低了水体中污染物含量,而冬春季藻类等浮游植物处于冬眠期导致水体营养元素含量恢复高浓度的状态,这也很好地解释了其他湖区水质随季节变化幅度较小的原因。

参考文献:

- [1] 鄢回,郁建桥,徐洁,等.改进的模糊综合评价法在太湖水质类别判定中的应用[J].环境监控与预警,2012,4(2):39-44. (YAN Hui, YU Jianqiao, XU Jie, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method for water quality assessment in Taihu Lake, China [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2012, 4(2): 39-44. (in Chinese))
- [2] 朱广伟.太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系[J].长江流域资源与环境,2009,18(5):339-445. (ZHU Guangwei. Spatio temporal distribution pattern of water quality in Taihu Lake and its relation with cyanobacterial blooms[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(5): 339-445. (in Chinese))
- [3] 李一平,严莹,韩广毅.太湖水质时空相关性分析[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(5):505-508. (LI Yiping, YAN Ying, HAN Guangyi. Temporal-spatial correlation analysis of water quality for Taihu Lake [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(5): 505-508. (in Chinese))
- [4] 李森,丁贤荣,潘进,等.基于主成分分析的太湖水质时空分布特征研究[J].环境科技,2012,25(3):44-47. (LI Sen, DING Xianrong, PAN Jin, et al. The spatially

and temporally dynamic variation of water quality in Taihu Lake based on principle component analysis [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 25(3): 44-47. (in Chinese))

- [5] 安乐生,赵全升,刘贯群,等.代表性水质评价方法的比较研究[J].中国环境监测,2010,26(5):47-51. (AN Lesheng, ZHAO Quansheng, LIU Guanqun, et al. Comparative study on representative water quality assessment methods [J]. Environmental Monitoring in China, 2010, 26(5): 47-51. (in Chinese))
- [6] 叶巧文,张新政.基于灰色聚类的水质评价方法[J].五邑大学学报:自然科学版,2003,17(4):4-7. (YE Qiaowen, ZHANG Xinzheng. Water quality evaluation based on the grey clustering method [J]. Journal of Wuyi University: Natural Science Edition, 2003, 17(4): 4-7. (in Chinese))
- [7] 郑成德.水环境质量评价的灰色聚类法[J].水文,1998(4):23-27. (ZHENG Chengde. The grey clustering method of water environmental quality evaluation [J]. Journal of China Hydrology, 1998(4): 23-27. (in Chinese))
- [8] MA Huiqun, LIU Ling, CHEN Tao. Assessment model based on Markov chain [R]. Piscataway: IEEE Computer Society, 2008.
- [9] 张又,刘凌,姚秀岚,等.“引江济太”调水中望虞河水质变化的规律[J].水资源保护,2013,29(2):53-57. (ZHANG You, LIU Ling, YAO Xiulan, et al. Variation of water quality of Wangyu River during water diversion from Yangtze River to Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(2): 53-57. (in Chinese))
- [10] 李一平,唐春燕,余钟波,等.大型浅水湖泊水动力模型不确定性和敏感性分析[J].水科学进展,2012,23(2):271-277. (LI Yiping, TANG Chunyan, YU Zhongbo, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of large shallow lake hydrodynamic models [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 271-277. (in Chinese))
- [11] 庞博,李玉霞,童玲.基于灰色聚类法和模糊综合法的水质评价[J].环境科学与技术,2011,34(1):185-188. (PANG Bo, LI Yuxia, TONG Ling. Application of grey clustering method and fuzzy comprehensive assessment method to assess eutrophication level of water quality [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(1): 185-188. (in Chinese))

(收稿日期:2014-05-12 编辑:徐娟)

(上接第49页)

- [11] 佟伟,章铭陶,张知非,等.西藏地热[M].北京:科学出版社,1981:1-192.
- [12] 曹积飞,杨秋荣,李英杰,等.黏土矿物对重金属有害元素吸附性研究[J].环境科学与技术,2008,1(31):42-44. (CAO Jifei, YANG Qiurong, LI Yingjie, et al. Absorbability of clay minerals to harmful elements of heavy metal [J]. Environment Science & Technology, 2008, 1

(31): 42-44. (in Chinese))

- [13] 牟保磊.元素地球化学[M].北京:北京大学出版社,1999.
- [14] ROMERO L, ALONSO H, CAMPANO P, et al. Arsenic enrichment in waters and sediments of the Rio Loa (Second Region, Chile) [J]. Applied Geochemistry, 2003, 18(9):1399-1416.

(收稿日期:2014-05-04 编辑:彭桃英)