

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2017.01.002

基于同位素水化学分析的松嫩平原大布苏湖 流域地下水补给源研究

张文卿¹, 陈建生², 姜淑坤³, 徐焱²

(1. 吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130021;

2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 3. 吉林省水文水资源局, 吉林 长春 130021)

摘要:采用同位素与水化学分析方法研究了大布苏湖湖水的补给源,结果表明,大布苏湖水主要来自地下水的补给。大布苏湖水、地下水与松花江中游的江水同位素 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系点分布在相同的区域,且受到了一定程度的蒸发。泉水中的氟-砷关系表明,补给湖泊的地下径流主要发生在20~30m的粉细砂层,火山岩风化物细颗粒沉积层构成了主要的透水层,火山岩细颗粒中的砷通过氧化还原反应溶解到地下水中,形成了高砷含水层。据此推断,大布苏湖水来自于松花江等周边河流的渗漏,渗漏水通过黄土层下伏的高砷粉细砂层向大布苏湖中排泄。湖心钙华表明同时存在深层承压水的越流补给。

关键词:地下水;同位素分析;水化学分析;氟;砷;补给源;大布苏湖

中图分类号:P641 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2017)01-0009-06

Study of recharge source of Dabusu Lake in Songnen Plain based on isotopic and hydrochemical analysis

ZHANG Wenqing¹, CHEN Jiansheng², JIANG Shukun³, XU Yi²

(1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Jilin Province Hydrology and Water Resources Bureau, Changchun 130021, China)

Abstract: The recharge source of Dabusu Lake was investigated through isotopic and hydrochemical analysis. The results show that Dabusu Lake was mainly recharged by groundwater. $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ curves for the lake water, groundwater, and river water in the middle reaches of the Songhua River occurred in the same zone, and the water evaporated to a certain extent. Analysis of the relationship between fluorine and arsenic in the spring water shows that the subsurface runoff that recharged the lake mainly occurred in the fine sand layer 20 m to 30 m under the surface. The volcanic weathering fine particle deposited layer composed the main percolation layer. Arsenic in the volcanic fine particles was dissolved in the groundwater through oxidation-reduction reaction, and an aquifer with a high concentration of arsenic was formed. On these bases, it can be inferred that the lake water comes from the seepage of the Songhua River and surrounding rivers, and the seepage water flows through the fine sand layer with a high concentration of arsenic and then discharges into Dabusu Lake. The travertine in the lake center indicates that there is also leakage recharge of deep confined water.

Key words: groundwater; isotope analysis; hydrochemical analysis; fluorine; arsenic; recharge source; Dabusu Lake

基金项目:国家自然科学基金(51578212);吉林省水利厅原始创新项目(吉林省西北部深循环地下水补给径流排泄量调查研究)

作者简介:张文卿(1964—),女,副教授,博士,主要从事地下水资源与环境方面的研究。E-mail:zhangwenqing1966@yahoo.co.jp

通信作者:陈建生,教授,博士生导师。E-mail:jschen@hhu.edu.cn

1 大布苏湖概况与研究背景

大布苏湖是一个封闭的断陷构造,位于松嫩平原南部,泥林位于大布苏湖东侧。大布苏在大地构造上为松嫩盆地中央凹陷的一部分,中新世以来持续沉降,堆积了巨厚的中新世沉积而形成的盆地式平原。大布苏湖所在的松嫩湖积平原基底为前侏罗纪的变质岩系,盖层为中新世沉积,厚达4000~5000 m。根据¹⁴C定年数据,大布苏湖形成于晚更新世晚期,湖泊形成的早期曾经历了深湖的发育阶段,全新世以来,湖泊发生了两次规模较大的扩张与收缩,形成了两个完整的湖进、湖退沉积旋回。晚全新世以来,湖面明显萎缩,形成了东北地区极为罕见的盐湖^[1-4]。

全新世以来,在地下潜流作用下形成了独特的泥林与狼牙坝貌,并且快速向湖岸东部发展,已经成为地质灾害。该地区地表分布着大量湖泊(水泡子),大布苏湖是众多湖泊中最大的一个。大布苏湖位于松嫩平原南部的吉林省乾安县,属于全新世上升区封闭的构造断陷湖。大布苏湖流域的集水面积230 km²,湖盆面积56 km²,湖水面积约37 km²,湖面海拔122 m,丰水期水深1.5 m,枯水期水深0.5 m。湖水的pH在10~11之间,TDS在62.34~347.34 g/L之间,属于Na⁺-CO₃²⁻-Cl⁻-SO₄²⁻卤水,是我国东部地区罕见的盐湖。湖区地处中温带湿润大

陆性季风气候区,年均气温4.6℃,年均降水量404.2 mm,年均水面蒸发量1243 mm^[1-3]。

大布苏泥林与狼牙坝地貌主要分布在湖泊东岸,这种特殊的地质地貌景观是新构造运动、地层岩性、地下水、风力及地形等多种地质因素综合作用的结果^[4]。大布苏流域没有稳定的河流,在靠近湖岸及湖底有大量的上升泉,泉水汇集形成的溪流以及上升泉成为湖泊的主要补给源。泥林与狼牙坝构造主要发育在湖东岸的坡洪积台上,见图1。洪积台高程约160 m,由顾乡屯组河湖相地层和其上覆的黄土组成^[5]。大布苏泥林与狼牙坝地貌的形成来自潜流的侵蚀破坏。在地下水潜流的侵蚀作用下,土层中形成了空洞,在重力作用下,顶部土层塌落,形成了落水洞,随着落水洞的不断垮塌、扩大,相连成片,便形成了大布苏湖东岸“狼牙坝”地形^[6]。

但是,关于地下水潜流的形成存在两种不同观点。第一种观点认为,地下水潜流来自降水入渗,降水通过垂直节理入渗,土层中易溶盐含量较高,在土层中发育着垂直节理和大孔隙,土层中的可溶性盐淋溶后使土层中的节理缝隙增大,溶隙在溶蚀作用下形成了溶洞,而溶洞在集水后形成了具有一定能量的潜流^[6]。第二种观点认为,地下水可能来自周边松花江等河流的渗漏水,当地的降水几乎对地下水没有补给作用^[7]。研究表明,长白山天池及其周边的泉水与河水来自外源水补给,外源水的补给周

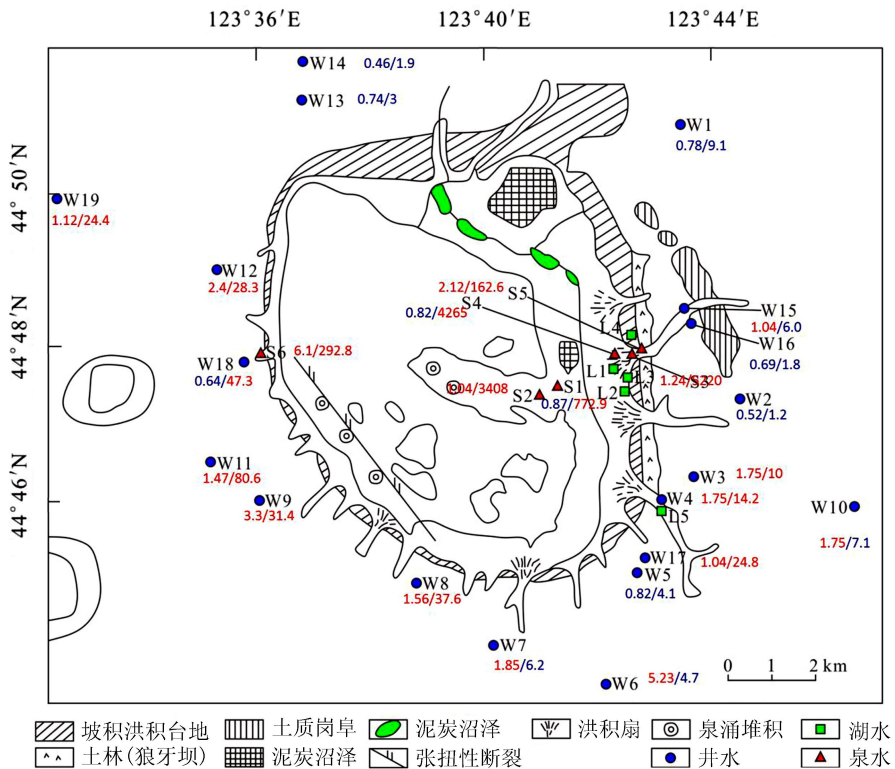


图1 大布苏湖泥林狼牙坝地貌及采样点位置分布

期约为 40 a^[8-9]。水量平衡研究证实,研究西藏内流区的河流与湖泊存在渗漏^[10-11]。重力卫星研究表明,2003—2009 年间,西藏羌塘盆地、长江源头、黄河源头等地区地下水每年增加 $1.86 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[12],西藏羌塘盆地满足长白山泉水补给源区的条件。

地下潜流产生的原因对于大布苏湖东岸土体垮塌的治理有着重要的意义,并且与治理方案密切相关。笔者通过分析大布苏流域泉水、井水、湖水与降水的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系,结合水化学方法,揭示破坏性潜流产生的原因与补给来源,搞清大布苏流域地下水的补给、径流与排泄方式,旨在为下一步的工程治理提供科学依据。

2 研究区水文地质情况与采样分析

大布苏所在的松嫩平原位于东北地区中西部,位于华夏系第二沉降带,是在中生代断陷盆地的基础上发展起来的冲积和湖积平原,松嫩平原及周边,如五大连池、长白山、大兴安岭等,新生代以来出现过大规模火山活动。松嫩平原总面积 $1.76 \times 10^5 \text{ km}^2$,虽然多年平均降水量只有 500 多 mm,却分布着 7000 多个较大的湖泊(水泡子),湖泊总面积 2 570 km^2 ,湖泊率达到 6%;湿地面积为 25 420 km^2 ,湿地率大于 20%^[13];松嫩平原的森林覆盖率 42% 左右,耕地面积 21 000 km^2 ,是国家大型商品粮和油料基地。降水量相对较少的地区存在大量的水泡子、湿地、森林与耕地,仅蒸散发作用就可消耗掉大部分降水量。

大布苏湖位于松嫩平原的南部,湖岸地层由阶地平原和坡洪积台地构成,阶地平原高程 160 m,由河湖相地层和其上覆的黄土状土组成,黄土层为风积土。通过对黄土下伏浅黄色细砂层进行粒度、重矿物和石英砂表面扫描电镜分析,发现细砂既有风成特点,又保留了水冲积特征,说明其来源于松嫩平原冲积沙并经风力吹扬、搬运、堆积而成^[14]。碳酸盐沉积以黄土中的碳酸钙结核和钙质菌丝体为主,钙结核直径约 1 cm,主要集中在距地表 50~250 cm 处,黄土底部有钙质菌丝体发育^[5]。在湖蚀崖的表面常有一层碳酸钙盐壳披覆,厚度可达 3 cm 左右,阶地平原的碳酸盐含量在 5% 左右^[15],碳酸钙的沉积与地下水的的作用有关^[16]。

迄今为止,关于潜流形成原因的探究都是基于概念模型,降水是否能通过黄土裂隙入渗到地下水中形成潜流,目前没有相应的地球化学证据。为了解湖区的泉水、湖水与地下水、降水之间的关系,笔者于 2016 年 9 月采集了大布苏流域的地下水与地表水样共计 32 个,其中井水样 21 个(W20、W21 超出了图 1 范围),泉水 6 个,湖水 5 个(图 1)。

3 氕氧同位素与地球化学分析

大布苏流域位于长春、哈尔滨与齐齐哈尔三地的中部,这 3 个地区降水同位素的按月加权平均值基本上代表了松嫩平原降水同位素特征。图 2 中降水同位素数据来自全球大气降水同位素监测网(GNIP)。从氕氧同位素分布情况可以看出,松嫩平原 5—10 月的降水主要来自太平洋季风,降水同位素较为富集, $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均值分别为 -73‰ 与 -9.4‰ ,具有明显的亚洲季风特征,降水量占全年降水总量的 88.6%。3—4 月与 11—12 月间的降水受到冬季风与太平洋季风的共同影响,只有 1—2 月的降水基本上来自冬季风,氕氧同位素较为贫化。冬季风带来的降水量很小,仅占全年降水量的 1.4%。大布苏位于松嫩平原南部高程最低处,降水量约 400 mm,小于松嫩平原的均值。

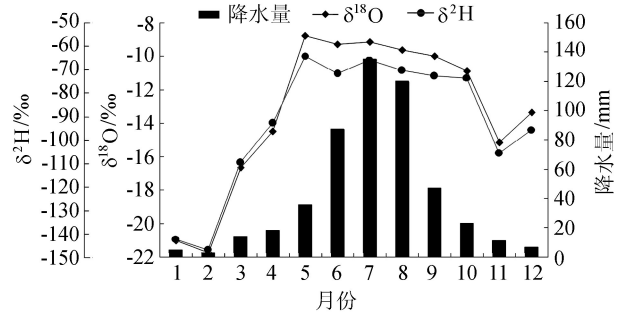


图 2 松嫩平原按月降水量与 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素加权平均值分布

大布苏湖及其周边河流、泉水、水泡子的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系见图 3。大布苏流域的降水主要集中在汛期,5—9 月的降水量占到了全年降水量的 84%,主要降水季节的同位素都落在蒸发线(EL)的上部,EL 是通过大布苏湖地表水与地下水的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系点拟合得到的。通过对比分析可以发现,大布苏的泉水、井水与湖水的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系点介于当地降

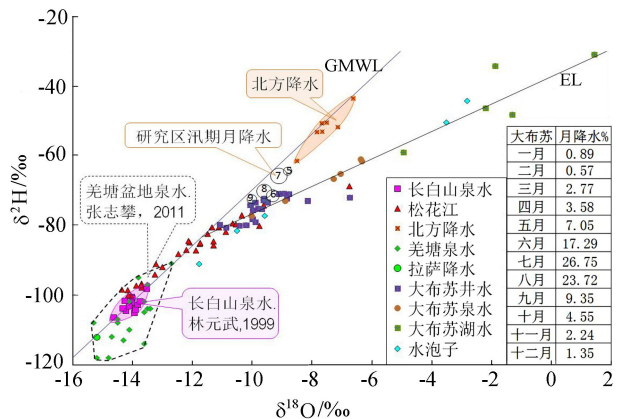


图 3 大布苏湖水、泉水、井水、降水与长白山泉水、河水、北方降水的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系

水与长白山泉水之间,表明泉水与井水是外源水与当地降水的混合,并且在入渗之前曾经受到过蒸发。

松花江的源头位于长白山天池,长白山泉水的氧同位素比当地降水贫化^[17]。通过同位素对比发现,长白山天池泉水的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系点与羌塘盆地泉水的落在了相同的区域^[18]。长白山天池接受地下水的补给,天池水位 2 189.7 m^[19],通过水量平衡关系确认,长白山天池周边 2.3 万 km² 地区接受外源水的补给量超过 23.25 亿 m³/a^[7],能够完全满足水力梯度、同位素关系、河流湖泊渗漏特征条件的补给源地只有西藏高原的羌塘盆地,而通过锶、氮、氟、碳等同位素对比分析确定地下水的确经历了深循环过程^[8]。由于松花江中下游不断接受降水补给,同位素越来越富集,江水受到蒸发后发生了同位素分馏,江水的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系点逐渐偏离全球雨水线(GMWL),并沿着蒸发线 EL 分布,越靠近松花江的下游,江水受到的蒸发程度越大(图 3)。

通过同位素分析发现,大布苏流域井水、泉水与湖水的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系点落在当地降水的下部,见图 3。大布苏水体的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系既不同于当地降水,也不同于外源水,显然是外源水与降水混合后又受到了蒸发作用,因而与周边松花江等河水的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系点相同。松花江上游的 TDS 在 36 ~ 214 mg/L 之间(26 个水样),均值为 85 mg/L;大布苏周边流域井水的 TDS 在 135 ~ 631 mg/L 之间(10 个水样),均值为 322 mg/L;大布苏周边流域水泡子中的 TDS 在 172 ~ 1 020 mg/L 之间(5 个水样),均值为 555 mg/L。松花江上游水中的盐分最低,井水中的盐分介于河水与水泡子之间。大布苏流域井水 TDS 在 260 ~ 153 6mg/L 之间(21 个水样),均值为 518 mg/L;泉水的 TDS 在 357 ~ 2 100 mg/L 之间(6 个水样),均值为 926 mg/L;地表水的 TDS 在 1 360 ~ 10 470 mg/L 之间(5 个水样),TDS 均值为 5 330 mg/L。由此推断,大布苏湖区的地下水来自周边松花江等河流的渗漏补给。

大布苏流域的井水、泉水与湖水中主要的阳离子与阴离子分布可以做出 Piper 三角图(图 4)。从图 4 可以看到,井水与泉水几乎分布在相同的区域,表明它们的来源相同。湖水的分布范围与井水、泉水并不完全相同,湖水中的氯离子所占的比例分别是井水的 3.1 倍和泉水的 2.2 倍,镁与钙离子含量的比例分别是井水的 25% 与 32%,湖水中的碳酸根与硫酸根比例低于井水与泉水,表明湖水中出现了 CaCO_3 、 MgCO_3 与 CaSO_4 等的沉淀。

大布苏湖及周边地下水与地表水中氟与砷质量浓度较高。前人的研究成果^[20]表明,氟与砷主要来自玄武岩等风化物。氟与砷等主要是玄武岩等火山

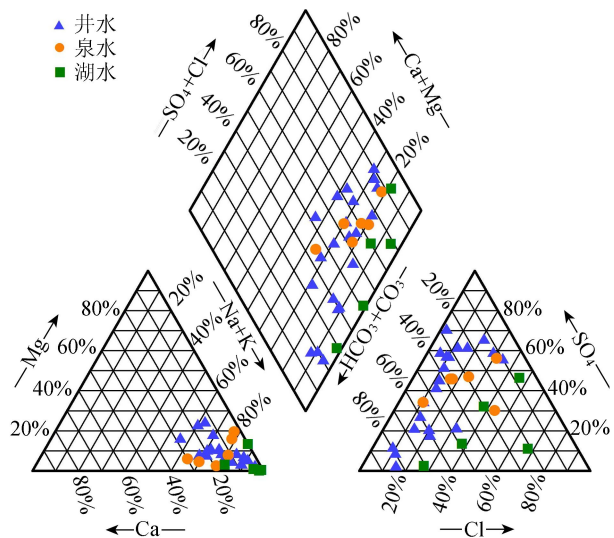


图 4 大布苏流域井水、泉水与湖水的 Piper 图

岩风化的产物,火山岩颗粒越细,从火山岩碎屑中溶解出来的氟含量越高。火山岩细颗粒在水流冲刷作用下向湖泊汇聚,这是高氟与砷地区分布在大布苏等水泡子的粉细砂层中的原因。大布苏湖及周边大部分井水与泉水中氟质量浓度超过饮水标准(1 mg/L),21 个井水中 12 个水样超标,6 个泉水中有 4 个水样超标(图 1)。松嫩平原地下水中氟与砷浓度的分布具有明显的分带性,即从盆地中心到盆地边缘,从潜水到承压水,氟质量浓度普遍存在着由高变低的规律。

大布苏地下水中的砷富集现象出现在具有特殊地质环境特征的局部地区,超标水样全部处于 20 ~ 30 m 的深度^[21]。6 个泉水中的砷质量浓度在 162.6 ~ 5 220 $\mu\text{g}/\text{L}$ 之间,平均值为 2 354 $\mu\text{g}/\text{L}$,远远高于井水中的砷质量浓度均值 368 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。显然,泉水流经的含水层应该具有富砷特征。由于砷主要分布在地表以下 20 ~ 30 m,这表明潜流主要分布在 20 ~ 30 m 的粉砂层中,这个结论与氧同位素结果高度一致。井水、泉水与湖水中的氟-砷关系见图 5。从图 5 可以看出,有两个湖水的氟与砷呈正相关,显然是受到蒸发作用的结果。另外有两个湖水的氟-砷关系点表现为高砷低氟,这两个点的湖水显然接受泉水的补给。井水的氟-砷关系没有呈现规律性,这与井的结

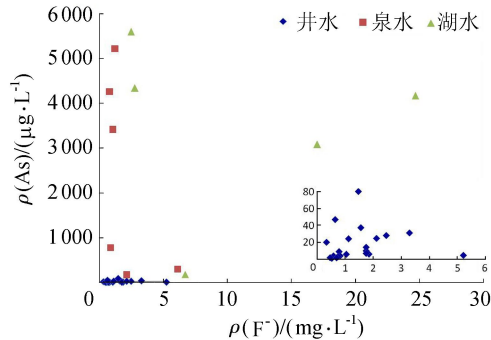


图 5 井水、泉水与湖水中的 F-As 关系

构有关,深井没有将 20~30 m 的含水层封堵,造成高矿水进入井中。

4 地下潜流形成机制探讨

大布苏东岸浅层地下水位基本上保持在 150 m 高程左右,泥林与狼牙坝的形成是地下潜流造成土体渗透破坏的结果。过去的研究普遍认为,地下潜流的形成源于当地降水^[6]。如果浅层地下水源自降水通过黄土入渗,那么黄土中的盐分将被入渗的降水溶解并带到地下水中。研究表明,井水与泉水中的 TDS 在 260~2 100 mg/L 之间,均值为 609 mg/L。大布苏湖岸非饱和的黄土及沙土中含有大量的盐分,而且盐分的含量自下而上呈线性增加,表层附近的黄土中盐分最高,达到 0.51%,地下水位以上的沙层的含盐量为 0.07%^[6]。表层黄土的含水率大约为 10%,土壤水的 TDS 约为 5.1 g/L,比地下水的 TDS 大了一个数量级。如果地下水潜流来自降水入渗,非饱和土壤中的盐分将被降水带到地下水中,深部非饱和层的含盐量应该大于浅部。如果地下水是降水入渗补给的,应该具有高盐度特征,而且 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系应该落在降水蒸发线上,即位于蒸发线 EL 的上部。

开展针对黄土进行的降水入渗试验,发现模拟一次性降水强度 150 mm 的降水入渗黄土的深度不超过 1 m,而且随着降水向下入渗,地层中的盐分也同时向下运动^[22]。而水文观测资料显示,松嫩平原单次的最大降水量小于 100 mm,所以,降水在大布苏湖岸黄土中的入渗深度不会超过 1 m。另外一种观点认为,降水可以通过黄土中的裂隙快速入渗到地下水中。为了验证黄土裂隙的导水性能,独仲德等^[23]在非饱和黄土中进行连续降水入渗试验,每天喷淋 15 mm 水并用塑料布覆盖以防止蒸发,连续喷淋 26 d,结果表明,黄土裂隙或大孔隙对下渗水起着阻水作用,模拟降水下渗黄土的深度不超过 2 m。显然,黄土中的裂隙不是降水快速入渗地下水的通道。

可见,非饱和黄土中的水分主要来自地下水,地下水通过薄膜水形式向地表运动,并在地表排泄,水

分在地表蒸发后,盐分保留在土壤中,越靠近地表,土壤中的含盐量越高^[22]。由此可知,大布苏湖岸的降水没有入渗到地下水中,破坏性潜流来自周边河流的渗漏补给。在黄土层之下分布着渗透系数较大的粉细砂层,粉细砂层的分布范围包括周边的松花江等河流,河流的渗漏水通过粉细砂层向低洼的大布苏等水泡子中排泄。

通过 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 与 TDS 对比分析可知,大布苏湖水的补给源区应该是松花江等河流。河水渗漏到河床下的透水层中形成了地下径流,地下径流补给到很多水泡子中。海拔较高的水泡子可以通过粉细砂层继续向大布苏湖排泄,因为大布苏湖的地表高程在松嫩平原南部是最低的。图 6(e) 显示在大布苏湖盆边缘打出了自流井。地下水通过潜流补给到大布苏湖后只有通过蒸发进行排泄,湖水蒸发后盐分累积成为盐湖,湖水中钙、镁离子比例降低而氯离子比例升高,表明湖水中有蒸发盐沉淀。大布苏周围的水泡子的水面高程都高于大布苏湖水位,这些湖泊中的 TDS 一般小于 1 g/L,表明这些湖水通过地下潜流向大布苏湖排泄,由于这些湖泊的水可通过地下潜流向大布苏等低洼的湖泊中排泄,所以它们仍然是淡水或微咸水湖泊。大布苏湖泊中出现一些钙华(图 6(c)),冬季湖面部分水面没有结冰,冬季湖面的水汽使周边的树木形成了雾凇(图 6(d))。

岩性分析证实,碳酸盐中含有白云岩,而白云岩化一般发生在高温条件下^[24],白云岩中的镁来自地幔^[25],由此推断,大布苏湖心的温泉来自深循环地下水的直接补给^[8]。

5 结论

a. 同位素与水化学特征表明,大布苏湖的主要补给来自松花江及周边河流、水泡子的渗漏补给,在河床下部存在透水层,河水通过 20~30 m 粉细砂层向大布苏湖及周边的水泡子中排泄。

b. 当地降水对地下水几乎没有补给,降水入渗不会对土体产生破坏作用,造成大布苏泥林破坏的

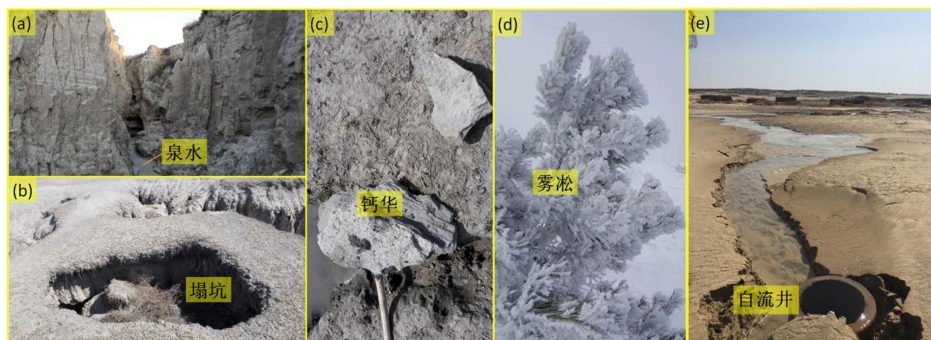


图 6 大布苏湖岸沟壑、塌坑、雾凇与湖心的钙华

潜流来自松花江等周边河流的渗漏水。

c. 大布苏湖水同时接受外源地下水补给。大布苏湖泊中心存在碳酸盐,尤其是存在白云岩等碳酸盐。淡水白云岩中的镁可能来自玄武岩,白云岩岩化过程发生在高温下,表明地下水经历了深循环过程。

致谢:在调查大布苏湖-泥林采样期间,得到了吉林大布苏国家级自然保护区的田野、尹勇前等给予的大力支持,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 王景祥. 吉林大布苏自然保护区现状分析与保护对策研究[D]. 长春:东北师范大学,2011.

[2] 李志民,吕金福,冷雪天,等. 大布苏湖全新世沉积岩芯的粒度特征与湖面波动[J]. 东北师大学报(自然科学版),2000,32(2):117-122. (LI Zhimin, LYU Jinfu, LENG Xuetian, et al. The grain size characteristics and the fluctuation of lakes of surface of the core in Holocene in Dabusu lake[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2000, 32(2):117-122. (in Chinese))

[3] 吴德云,张国防,刘崇禧. 从大布苏湖近代地球化学特征探讨我国含盐湖盆的沉积模式与油气关系[J]. 石油实验地质,1988(3):268-276. (WU Deyun, ZHANG Guofang, LIU Chongxi. Study on relations of sedimentary model of salt lake basins to oil/gas exemplified by the geochemical characteristics of the recent sediments of Dabusu Lake[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1988(3):268-276. (in Chinese))

[4] 周绪春,王成,任光,等. 大布苏泥林成因特征与保护开发建议[J]. 吉林地质,2003,22(3):62-67. (ZHOU Xuchun, WANG Cheng, REN Guang, et al. The genetic characteristics of the Dabusu mud forest, and its protection and development suggestions[J]. Jilin Geology, 2003, 22(3):62-67. (in Chinese))

[5] 介冬梅,吕金福,李志民,等. 大布苏湖全新世沉积岩芯的碳酸盐含量与湖面波动[J]. 海洋地质与第四纪地质,2001,21(2):77-82. (JIE Dongmei, LYU Jinfu, LI Zhimin, et al. Carbonate content of sedimentary core and holocene lake-level fluctuation of Dabusu Lake [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(2):77-82. (in Chinese))

[6] 朱庆革,梁秀娟. 大布苏湖东岸“狼牙坝”地形成因探讨[J]. 吉林地质,1991(1):75-78. (ZHU Qingge, LIANG Xiujian. Probe on the forming cause of Langya dam in the east of Dabusu Lake[J]. Jilin Geology, 1991(1):75-78. (in Chinese))

[7] 江巧宁,陈建生. 深循环地下水补给长白山天池的水量平衡分析[J]. 水资源保护,2015,31(5):55-62. (JIANG Qiaoning, CHEN Jiansheng. Analysis on water balance of deep cycle groundwater supplying Tianchi Lake of Changbai Mountain [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(5):55-62. (in Chinese))

[8] 陈建生,江巧宁. 地下水深循环研究进展[J]. 水资源保护,2015,31(6):8-17. (CHEN Jiansheng, JIANG Qiaoning. Research progress of ground water deep circulation [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6):8-17. (in Chinese))

[9] 张兵,宋献方,张应华,等. 基于氚同位素和 CFCs 的三江平原浅层地下水更新能力估算[J]. 自然资源学报,2014,29(11):1859-1868. (ZHANG Bing, SONG Xianfang, ZHANG Yinghua, et al. Estimation of groundwater renewal rate by Tritium and Chlorofluorocarbons in Sanjiang Plain [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(11):1859-1868. (in Chinese))

[10] ZHOU S, KANG S, CHEN F, et al. Water balance observations reveal significant subsurface water seepage from Lake Nam Co, south-central Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2013, 491(11):89-99.

[11] 陈建生,王庆庆. 北方干旱区地下水补给源问题讨论[J]. 水资源保护,2012,28(3):5-12. (CHEN Jiansheng, WANG Qingqing. A discussion of groundwater recharge sources in arid areas of North China [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(3):5-12. (in Chinese))

[12] XIANG Longwei, WANG Hansheng, STEFFEN H, et al. Corrigendum to “Groundwater storage changes in the Tibetan Plateau and adjacent areas revealed from GRACE satellite gravity data” [J]. Earth & Planetary Science Letters, 2016, 449:228-239.

[13] 栾兆擎,章光新,邓伟,等. 松嫩平原 50 年来气温及降水变化分析[J]. 中国农业气象,2007,28(4):355-358. (LUAN Zhaoqing, ZHANG Guangxin, DENG Wei, et al. Studies on changes of air temperature and precipitation for last 50 years in Songnen Plain [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(4):355-358. (in Chinese))

[14] 李取生. 松嫩沙地历史演变的初步研究[J]. 科学通报,1990,35(11):854-856. (LI Qusheng. Primary study on the changes of Songnen Plain [J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(11):854-856. (in Chinese))

[15] 沈吉,吴瑞金,羊向东,等. 大布苏湖沉积剖面碳酸盐含量、氧同位素特征的古气候意义[J]. 湖泊科学,1997,9(3):217-221. (SHEN Ji, WU Ruijin, YANG Xiangdong, et al. Paleoclimatic change inferred from $\delta^{18}\text{O}$ and carbonate content of the section in dabusu Lake [J]. Journal of Lake Science, 1997, 9(3):217-221. (in Chinese))

[16] CHEN Jiansheng, LI Ling, WANG Jiyang, et al. Groundwater maintains dune landscape [J]. Nature, 2004, 432:459-460.

[17] 林元武,高清武,于清桐. 长白山天池火山区长白聚龙泉热水氢氧稳定同位素组成与氡分布规律[J]. 地质论评,1999,45(增刊1):236-240. (LIN Yuanwu, GAO Qingwu, YU Qingtong. Hydrogen and oxygen stable isotopic compositions and distribution of Tritium contents in hot water of the Changbaijulongquan spring in the Tianchi volcanic region, Changbai Mountains [J]. Geological Review, 1999, 45(sup1):236-240. (in Chinese))

(下转第 16 页)

污染控制好。其实,我国水功能区划及各区水质目标都已经通过国家批复,还为了协调上游水质对下游用水的影响,在省界设立了缓冲区,缓冲区内的断面设置也都经过跨界省界行政主管部门包括环保部门的共同认定。难道为了一个部门的权力诉求还要再成立另外一个流域机构吗?

四是进一步明确行业之间的协调机制。一些人总强调行业协调难度大。这个问题确实存在,但要分析清楚为什么部门间行政协调效率不高。根本原因是责任、权利、义务的关系没理顺、不明确,更深层次的原因是权力背后利益的驱动。以资源和环境部门为例,水利负责水资源的安全保障及供应,但所供应的水资源到底质量如何,是好是坏,水利部门居然没有权力发布信息,要听环保的。环保一手抓治污,一手发布水质信息,集运动员裁判员于一身,这样效率就高了吗?恐怕恰恰相反,也许问题更多被掩盖了,因为数据造假更有主观能动性了。美国对江河和地下水的水质、流量等的监测大都由美国内务部的地质调查局负责,并向社会公开。美国环境保护局也好,一个普通公民也罢,都可以随时查看并获得水质与流量的数据。美国西雅图市水质监测化验200多项,网上都可以看到。只要客观真实,谁负责发布水质信息没有任何差别。抓权不抓事,责任、权利、义务相互脱节。权力背后的利益(如财政资金

使用、部门与下属庞大的企业事业群体的利益关联性等)更是需要考虑的因素,政、企、事之间的利益链需要逐步剥离。

我国目前处于转型期,资源和环境之间、产业和资源环境之间、社会各阶层之间、行业部门之间乃至地区之间的关系更加紧密,深层次的矛盾冲突更加尖锐。在这种情况下,一定要强调上述几个维度的良性合作互动机制的建立,而不是把权力都归到一个部门,却把责任都分散到各个地区和各行业。权力、责任、义务要高度协调一致。不仅对政府,对个人也一样。如北京的居民喝着北京的水,就有义务节约水并交水费以支付制水成本,也有义务支付所排污水的处理成本,哪怕为了改善污水处理出水水质而提高收费标准,居民也有义务支付。但不能仅强调居民的责任和义务,居民也应该有知道106项水质指标值的权利。居民不仅要有知情权,如知道制水、污水处理过程的成本控制等信息,还应该有更多其他权利,甚至一些决策权。

总之,我国水污染治理深层次问题确实很多,要全面厘清上面4方面问题,建立良性机制,最核心的是依法治污,不要片面强调行政力量的作用,不能强化行政色彩,应该让集权思维早日淡出社会治理体系。

(收稿日期:2016-10-20 编辑:彭桃英)

(上接第14页)

[18] 张志攀,祝有海,苏新. 羌塘盆地泉水地球化学特征及其意义[J]. 地质学报, 2011, 85(7): 1233-1238. (ZHANG Zhipan, ZHU Youhai, SU Xin. Chemical characteristic of fountains in the Qiangtang Basin, Qinghai-Tibet Plateau and its implications [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(7): 1233-1238. (in Chinese))

[19] 张兴库,朴观熙. 长白山天池水文特性分析[J]. 水文, 1991(2): 49-51. (ZHANG Xingku, PIAO Guanxi. Analysis of hydrological features of Tianchi, Changbai Mountains [J]. Journal of China Hydrology, 1991(2): 49-51. (in Chinese))

[20] 蔡贺,郭常来,张梅桂,等. 中国东北松嫩平原土壤和地下水中的氟[J]. 农业科学与技术(英文版), 2013, 14(2): 376-383. (CAI He, GUO Changlai, ZHANG Meigui, et al. Fluorine content in soil and groundwater of Songnen Plain in Northeast China [J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(2): 376-383. (in English))

[21] 邴智武. 松嫩平原地下水氟、砷的富集规律及影响因素研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.

[22] 陈建生,杨光亮,王婷,等. 内蒙古鄂尔多斯西北土壤水流动示踪实验及自流井群补给源讨论[J]. 地球学报,

2014(3): 365-374. (CHEN Jiansheng, YANG Guangliang, WANG Ting, et al. Soil water flow tracer test in Northwest Ordos Basin, Inner Mongolia and discussion on recharge resources of artesian wells [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2014(3): 365-374. (in Chinese))

[23] 独仲德,赵英杰,程金茹. 黄土非饱和渗流试验研究[J]. 水文地质工程地质, 1997(2): 50-52. (DU Zhongde, ZHAO Yingjie, CHENG Jinru. Experimental study on loss unsaturated seepage [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1997(2): 50-52. (in Chinese))

[24] 张景廉,曹正林,于均民. 白云岩成因初探[J]. 海相油气地质, 2003, 8(1): 109-115. (ZHANG Jinglian, CAO Zhenglin, YU Junmin. Genesis of dolomite [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2003, 8(1): 109-115. (in Chinese))

[25] 陈建生,王婷,陈茜茜,等. 鄂尔多斯自流盆地地下水来源争议问题讨论[J]. 地质论评, 2013, 59(5): 900-908. (CHEN Jiansheng, WANG Ting, CHEN Xiqi, et al. Discussion on the origin of groundwater in the Oros Basin [J]. Geological Review, 2013, 59(5): 900-908. (in Chinese))

(收稿日期:2016-10-31 编辑:彭桃英)