

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.05.002

柴达木盆地那棱格勒河流域的水资源与矿源意义

谭红兵¹, 陆是成¹, 拓万全², 饶文波¹, 郭宏业³

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;
3. 青海省水文地质工程地质环境地质调查院, 青海 西宁 810008)

摘要: 通过分析那棱格勒河流域水循环及水化学演化特征, 对区域水资源及携带的矿产资源地质意义或潜在价值进行探讨。结果表明, 那棱格勒河水循环特征表现为时空异质性大, 径流主要集中于山区, 四季变化很大。地下水动态年际或季节性波动明显异于一般干旱盆地, 丰水期表现为水位显著上涨趋势, 表明水循环条件优越, 补给更新周期快。流域中下游地表水、地下水含有高背景浓度的硼、锂、钾等元素, 且具有来自深源流体源源不断的补充, 径流年输入总量至少数千上万吨, 仅洪积扇带 150 m 以上地下水储存总量也在 10 万 t 级以上。流域水资源丰富, 上游支流适当调水, 既可增加其中溶解的硼、锂、钾等矿产元素总量, 又保证了青藏线的安全, 同时补充出山口调走的水量, 保持动态平衡。

关键词: 水循环; 水资源; 矿产资源; 战略意义; 柴达木盆地; 那棱格勒河流域

中图分类号: P964 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2020)05-0392-06

Water resource and mineral source significances of Nalenggele River Catchment in Qaidam Basin

TAN Hongbing¹, LU Shicheng¹, TUO Wanquan², RAO Wenbo¹, GUO Hongye³

(1. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
3. Hydrogeology and Engineering Geology Environmental Geology Prospecting Institute of Qinghai Province, Xining 810008, China)

Abstract: The characteristics of hydro-logical cycle and hydro-chemical evolution of Nalenggele River Catchment were summarized and the programs of the regional water resources exploration and diversion were comprehensively proposed. Results show that the spatial-temporal difference of the hydro-logical cycle is distinct in the Nalenggele River. The runoff is mainly concentrated in the mountain area and varies greatly throughout the year. Besides, the dynamic inter annual or seasonal fluctuation of groundwater level is larger than ordinary arid basin and exhibits an increasing trend in wet season, which means that the water circulation conditions are ideal and water resources are abundant in wet season. More typically, both the surface water and groundwater contain unusual enriched elements of B, Li and K in the middle and lower reaches of the basin. The enriched elements are of continuous deep-source supply with annual runoff of at least several thousand tons, and the total amount of groundwater about 150 m in the alluvial fan is beyond 100-thousand tons. The conclusion can be deduced that the water transfer from the upper tributaries can not only increase the total amount of dissolved mineral elements such as B, Li and K, but also ensure the safety of the Qinghai-Tibet line for the leakage water from lakes in the source area. Finally, it is of great

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0406601); 国家自然科学基金(41872074)
作者简介: 谭红兵(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文地质学研究。E-mail: tan815@ sina. com
引用本文: 谭红兵, 陆是成, 拓万全, 等. 柴达木盆地那棱格勒河流域的水资源与矿源意义[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 392-397.
TAN Hongbing, LU Shicheng, TUO Wanquan, et al. Water resource and mineral source significances of Nalenggele River Catchment in Qaidam Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(5): 392-397.

strategic significance to maintain dynamic water resource balance in the Nalenggele River .

Key words: water cycle; water resources; mineral resources; strategic significance; Qaidam Basin; Nalenggele River Catchment

那棱格勒河是柴达木盆地第一大河,流域内水源补给充足,地表水和地下水资源都很丰富,水质优良。世界大江大河众多,但很少有类似那棱格勒河的独特性:流域内地表/地下水系统虽然 TDS 很低,但其中的 B、Li、K 等元素质量浓度很高,远高于一般河流,B、Li 质量浓度甚至高于海水相应浓度,而 TDS 仅为海水的 1%。

那棱格勒河几乎整个流域地处高寒无人区,水资源开发利用程度低,地表水/地下水中高背景异常的矿产元素更是未引起世人重视。朱允涛等^[1-2]曾推断那棱格勒河源区与火山、断裂活动有关的温泉排泄,是尾间盐湖 B、Li 的主要物源。基于此,Tan 等^[3]开展了那棱格勒河水化学季节变化分析,并评估了自地史时期以来那棱格勒河输入湖盆的 B、Li 资源总量,认为仅这条河流源源不断输入的 B、Li 量就足以形成目前探明的盐湖资源总量。后来,Yu 等^[4]对该流域水体 B、Li 富集的原因进行了综合评述,认为那棱格勒河高浓度的 B、Li 等元素为尾间盐湖资源提供了重要物源。面临气候急剧变化的大格局^[5-7],对这一源区冰雪广布,尾间盐湖资源正在大规模开发的高寒流域,首先从宏观和不同时空尺度开展战略性先导研究十分必要。让这条世界罕见的既具有水源意义、又富含矿产资源价值的大河流域得到科学开发与合理保护,才能使大自然所赐的特色资源(水、矿)实现可持续发展,长久造福于人类。

1 区域概况及研究方法

1.1 区域水文地质及盐湖资源概况

柴达木盆地水系的分布受地形及新构造运动制约,大体呈向心状辐射分布。较大的河流多分布于东昆仑山北麓及其东部地区,补给水源主要是高山冰雪融水,受季节影响较大。一般河流在出山口即消失于山前砂砾岩层中,变为潜流;较大的河流在盆地内部各低洼地区形成湖泊,大多数经强烈蒸发演化为盐湖。发源于东昆仑的大河主要有那棱格勒河(初步估算径流量可能在 10 亿 m³ 以上)和格尔木河(多年径流量为 7.98 亿 m³)^[8],它们分别是柴达木盆地第一、第二大河流。乌图美仁河发源于乌图美仁乡附近的沼泽与泉水,由西向东延伸,中途不断有泉水供给,多年平均径流量为 0.84 亿 m³^[8]。柴达木盆地一里坪、西台吉乃尔、东台吉乃尔盐湖是那棱格勒河的尾间湖,涩聂盐湖是乌图美仁河的终端湖(图 1)。位于柴达木盆地中部的一里坪湖、西台吉乃尔湖和东台吉乃尔湖,卤水中的 Li 含量在柴达木盆地为最高,B 含量也比较高,是世界上最极为典型的富 B、Li 资源盐湖。

那棱格勒河源区位于东昆仑与阿尔金断裂碰撞交汇地带,高海拔山间盆地发育很多盐湖,如勒斜武旦湖、西金乌兰湖、太阳湖、可可西里湖、库塞湖等。这些湖的 B、Li 质量浓度都很高(>50 mg/L)^[9],湖区及外围有许多正在活动的地热泉,如新青峰^[9]、布喀达坂^[1]、太阳湖都有高温地热活动或者有大量古火山活动遗迹,许多温泉 B、Li 质量浓度也很高。前期研究表明,这些高海拔区的盐湖外泄或地热水排泄,使其富含的 B、Li 等被源源不断带入尾间盐湖,最终在那棱格勒河尾间形成罕见的 B、Li 等矿产资源盐湖^[3]。这些盐湖矿产资源成为支撑地方经济发展的主要和极具特色的矿种,创造了十分可观的社会经济效益。

1.2 研究方法

笔者于 2019 年 4 月对基流条件下的那棱格勒河开展了一次系统野外考察取样,同时以格尔木河流域作为对比也采集了样品。地下水主要集中于两大流域洪积扇带大厚度含水层,钻孔深度以 150~250 m 为主,也包括洪积扇前缘一些自流井或泉水。那棱格勒河地下水样品多为潜水,格尔木河流域则既有潜水也有洪积扇前缘深层承压水。除了承压自流井,所有钻孔地下水样品采样前均抽水 1~2 h,尽可能采取新鲜水体。每个样品采集 500 mL,现场测定电导率、pH、溶解氧、滴定碱度等基本参数并做好记录后过滤,然后封装于 2 个小瓶分别作为基本阴离子及阳离子测定样品,其中阳离子酸化至 pH 小于 2。水动态监测除对重点钻孔安装自动水位计,每 12 h 自动记录一次并储存于自带储存卡外,从 2019 年 4 月开始逐月实测一次并检查导出自动水位计数据,确保不被外界扰动。

基本水化学离子 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺采用 ICP 等离子体发射光谱仪测定,经内插标准样品控制,误差<5%;SO₄²⁻、Cl⁻、NO₃⁻采用 ICS-2000 离子色谱仪测定,误差<2%;HCO₃⁻采样后 24 h 内采用容量法测定。

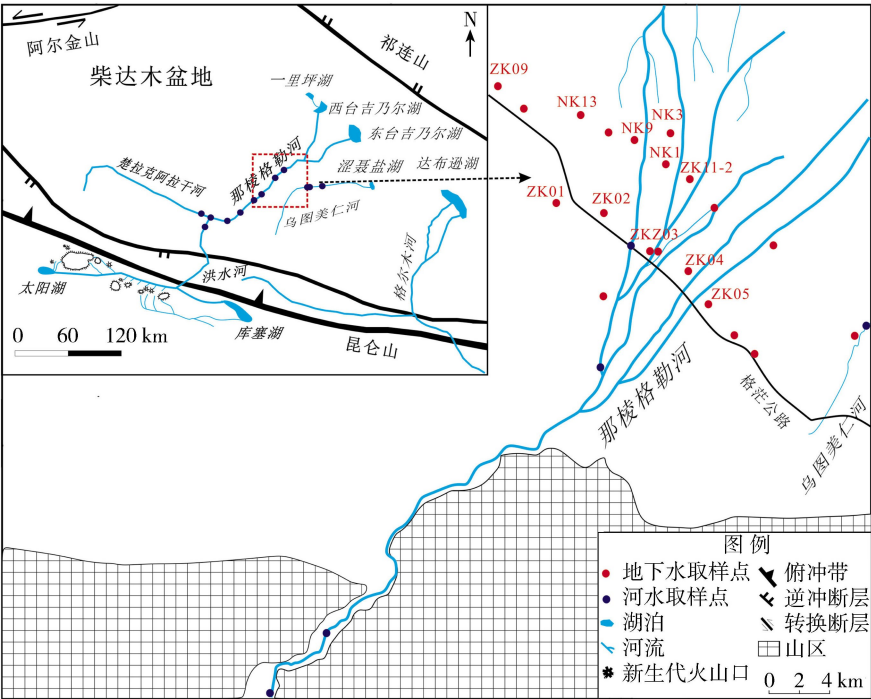


图1 研究区域和采样点分布

Fig.1 Study area and sampling locations

2 流域地表水/地下水循环与水化学典型特征

2.1 流域水循环基本特征

大量监测资料表明,那棱格勒河径流四季变化大,春汛期间以冰雪融水为主,6—9月雨季期间则既有冰雪融水又有实时降水^[10]。2019年多次野外考察发现,夏季7—8月那棱格勒河洪水频发,几乎每天下午山区都有降水事件,径流时空变化非常大,但由于没有水文监测站,很难准确获取径流信息。无人机配合地面监测流量显示,那棱格勒河上游两大支流(洪水河与楚拉克阿拉干河)4月枯水期时流量相当,但7月丰水期时楚拉克阿拉干河流量明显大于洪水河。出山口后,河流径流量的70%以上渗漏地下,河水四处漫溢,河道宽浅散乱,枯水期无固定河道。冲洪积扇前缘溢出带有大量泉水溢出,甚至集流成河,如乌图美仁河完全由地下水泄出成河,流量较大,最终河流全部汇入盐湖而消失。那棱格勒河总体属于地表水与地下水存在频繁转化关系的河流,但出山口处以地下水补给河水为主,山区则是河水渗漏补给地下水为主。近期笔者调研发现那棱格勒河上游新构造运动强烈,发育很多深大断裂,地表水垂直入渗参与深部循环也是该流域一种特殊的水循环方式。

不同于一般干旱盆地,那棱格勒河流域冲洪积扇为大厚度含水层,地下水位不仅存在较大的年际变化,且由2019年实测的不同月份地下水位数据可知,大部分钻孔水位存在较大的月变化甚至日变化(图2,图中2019年数据为笔者实测数据,其他数据来自青海省水文地质工程地质环

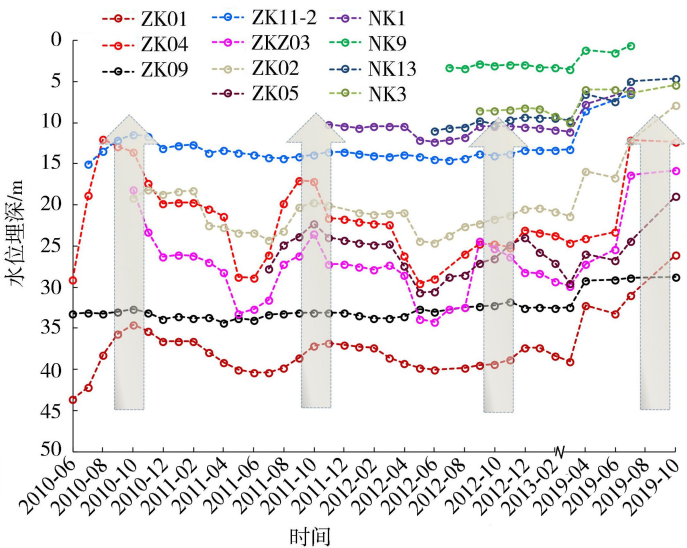


图2 那棱格勒河流域冲洪积扇带
地下水位月平均动态

Fig.2 Monthly average changes of groundwater levels
in the alluvial-diluvial fan of Nalenggele River Catchment

境地质调查院搜集资料整理,灰色条块表示水位上升月份)。每年 6 月水位开始上升,9—10 月水位最高,然后开始下降,亦即丰水期存在显著的补给。另外,在年际尺度上,近年来水位也表现出显著的上升趋势,如 ZK01 钻孔 2019 年 6 月水位相对 2010—2013 年 6 月上升幅度超过 10 m,其他钻孔也总体表现为数米幅度的上升趋势,表明 2019 年相对于 2013 年及其之前流域地下水储水量有显著增加。这与 Grace 重力卫星数据揭示柴达木盆地地下水储量增加显著的结论一致^[6]。那棱格勒河流域目前地下水开发程度比较低,水位变化主要受控于自然补给与排泄。即使对于井深超过 150 m、水位埋深大于 10 m,甚至 20 m 以上的含水层,丰水期也可以监测到明显的季节性补给,表明水循环条件良好,更新周期快,从水资源开发角度而言具有重大意义。

2.2 流域水化学典型特征

3 月底至 4 月初为那棱格勒河流域最枯水季,冰雪融化尚未大规模开始,山区降水也很稀少。为讨论基流状态下那棱格勒河流域的水化学特征,笔者采集了上游两大支流至中下游地区的河水、地下水样品进行水化学分析。结果发现(表 1),与邻区格尔木河相比,虽然都源于东昆仑北坡,以冰雪融水及夏季降水为源,但两河流域不论地表水还是地下水,具有完全不同的水化学特征。最典型特征:那棱格勒河流域地表水、地下水的 B、Li、K 等元素显著富集,比格尔木河流域的水体高一个数量级,特别是 Li 的富集程度更为显著,B、Li 质量浓度甚至比自然界最大的储库海水高数倍。这些元素的显著富集并非蒸发浓缩作用所致,因为两大流域水体电导率或 TDS 都不高,且与富集的元素浓度之间没有显著相关性。洪水河汇入前,那棱格勒河源自西北支流(又名楚拉克阿拉干河),此时这些元素质量浓度与格尔木河基本接近,但当来自正南的洪水河汇入后,干流向下游约 10 km 段水样的 B、Li、K 浓度突增了近 10 倍。洪水河($\rho(\text{Li})=0.48\text{ mg/L}$, $\rho(\text{B})=1.90\text{ mg/L}$, $\rho(\text{K})=10.87\text{ mg/L}$)本身比另一支流楚拉克阿拉干河($\rho(\text{Li})=0.04\text{ mg/L}$, $\rho(\text{B})=0.64\text{ mg/L}$, $\rho(\text{K})=5.48\text{ mg/L}$)高近一个数量级。那棱格勒河流域冲洪积扇带地下水虽然 TDS 低于河水,但具有比那棱格勒河更高的 Li、B、K 质量浓度,而且几乎所有地下水样品都显示这一特征。相比之下,格尔木河流域除个别井水(宝库村居民饮用水井)的 B 质量浓度较高外,其他地下水 B、Li、K 质量浓度与河水基本接近。在自然界,一般天然淡水很难出现如那棱格勒河流域这样 B、Li 等元素的异常富集现象。世界大江大河 B、Li 质量浓度都很低,B 质量浓度一般变化范围为 0.007~0.5 mg/L,Li 质量浓度范围为 0.002~0.023 mg/L^[11]。即使同样发源于青藏高原的长江,Li 质量浓度(0.004 mg/L)仅为那棱格勒河的 1/100^[12]。由此可见,那棱格勒河流域水体 B、Li 等元素异常富集是不争的事实,作为淡水资源的大河或地下水系统,出现这类元素的超常富集在世界上也很罕见,虽然目前尚未查明富集成因机制,但肯定与深源流体活动密切相关。

表 1 那棱格勒河及周边不同水样的 B、Li、K 质量浓度,TDS 变化与资源量估算

Table 1 Concentration ranges, TDS changes and resource amount estimations of B, Li and K in samples in and around the Nalenggele River Basin

水样	$\rho(\text{B})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		B_2O_3		$\rho(\text{Li})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		LiCl		$\rho(\text{K})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		KCl		$\text{TDS}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	
	变化范围	平均值	输入量/ ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)	储量/t	变化范围	平均值	输入量/ ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)	储量/t	变化范围	平均值	输入量/ ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)	储量/t	变化范围	平均值
楚拉克阿拉干河		0.64				0.04				5.41				548
洪水河		1.90				0.48				10.87				667
那棱格勒河	1.14~1.41	1.27	1.1×10^4		0.26~0.35	0.29	2.5×10^3		7.57~11.48	9.25	2.4×10^4		537~1062	693
那棱格勒河地下水	0.46~1.87	1.48		2.8×10^5	0.31~0.63	0.54		1.1×10^5	10.18~16.87	13.80		8.3×10^5	441~909	558
乌图美仁河	2.03~3.67	2.81	1811		0.46~0.93	0.66	448		12.32~36.94	22.05	4452		719~1790	1291
格尔木河水	0.18~1.95	0.74	3815		0.02~0.09	0.04	217		1.98~14.18	4.92	7967		128~1434	462
格尔木河地下水	0.36~1.73	0.77			0.03~0.08	0.04			2.71~15.72	5.68			254~963	449
西藏地热水	0.03~124.36	15.47			0.01~20	2.78			0.52~76.70	28.25			71~1785	704

注:海水的 $\rho(\text{B})$ 、 $\rho(\text{Li})$ 、 $\rho(\text{K})$ 、TDS 平均值分别为 4.5 mg/L、0.17 mg/L、399 mg/L、34690 mg/L^[13]。河流每年输入盆地以及地下水蕴藏的 B、Li、K 总量为最保守估算。

3 水资源意义

那棱格勒河是柴达木盆地第一大河,监测资料显示,那棱格勒河流域水循环规律及水资源现状与格尔木河流域差异显著,前者流域面积大($21\,898\text{ km}^2$),河长 435 km。在建水利枢纽前,流域水动态基本表现为自然状态,地表水—地下水转换频繁,特别是地下水以潜水为主,埋深浅,雨季水位显著上升暗示循环更新速率快,具有良好的开发利用潜力。作为那棱格勒河的邻区,格尔木河流域今后面临的不是继续开发而是重点保

护^[14],其中那棱格勒河调水解决察尔汗及格尔木水资源问题经过多年论证认为是可行、且已经付诸实施的方案。另外,那棱格勒河源区分布大规模冰川冻土,随着柴达木盆地及其周围山区成为青藏高原气候变暖幅度最大的地区之一^[5-6],2013年以来大多数钻孔地下水位持续上升,初步预测气候变暖背景下地下水储量将大幅度增加。地下水以出山口前山区补给为主,季节补给效应显著,出山口前的那棱格勒河水利枢纽建成蓄水之后,必然引起地下水位大幅度上升。综上,无论是地表水还是地下水,那棱格勒河流域均具有比格尔木河流域更丰富的水资源可供开发利用。出山口的径流可以考虑外调格尔木河流域或者北上调往更为缺水的茫崖、冷湖等地的油田和矿区。虽然尚需慎重论证,但据笔者正在进行的监测表明,出山口附近河水外调对地下水的补给可能影响不大。相反,不论气候变暖、山区降水增加还是中上游蓄水,都会引起洪积扇带地下水位上升,对于干旱沙漠地带,开发利用地下水也是防止水位过度上涨、发生盐碱化等灾害的措施之一。

那棱格勒河出山口的水外调之后,可以考虑从上游洪水河源区实施跨流域调水方案补充外调的水量。最近为保护青藏线的安全,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所提出从库塞河调水到洪水河,然后补给那棱格勒河的方案,有实际意义。可可西里盐湖面积持续性扩大,严重威胁青藏公路和青藏铁路运营安全。如果在库塞河中游掘开库塞河与洪水河连通,或者直接与正在扩张的盐湖连通,可以起到一石多鸟的效果:(a)可以把高海拔山区难以开发利用的盐湖矿质元素通过调水输入那棱格勒河下游盐湖作为矿源补充;(b)防止一些盐湖水位持续上涨,以至溃堤淹没青藏线;(c)补充那棱格勒河出山口后外调走的水量,实现动态调节平衡。当然,这一调水方案需要充分考虑可能对可可西里等地区生态环境的及对那棱格勒河水质的影响,虽然富含 B、Li 等矿产元素,但那棱格勒河第一任务仍然应是承当水资源功能。初步估算,如果以洪水河混合之前的那棱格勒河上游楚拉克阿拉干河 TDS 为背景,洪水河汇合之后的那棱格勒河干流 TDS 为参照,库塞湖作为高 TDS(28.54 g/L)^[15]的另一混合端元,只要保证输入洪水河的水量不超过洪水河现今流量的 17.2%,到出山口因多条支流汇合稀释后的那棱格勒河干流 TDS 就不会超过 1g/L,而且在出山口后 TDS 更低的地下淡水排泄会进一步稀释河水,所以可以保证干旱盆地淡水资源的要求。

4 流域地表水/地下水系统蕴藏的矿产资源潜在价值与地质意义

除那棱格勒河除上游支流楚拉克阿拉干河外,整个流域无论地表水还是地下水都具有富集 B、Li 等元素的显著特征,下游尾间盐湖形成举世罕见的锂矿资源,显然与整个流域 Li 的高背景异常密切相关。目前,虽然那棱格勒河缺少水文站及长期观测资料,准确的地表径流量难以获得,地下水资源量也只能估算冲洪积扇带目前钻孔所及的 150 m 深度以上储量,但按已有资料保守估算(表 1),每年那棱格勒河包括下游支流乌图美仁河输入湖盆的 B(B₂O₃)、Li(LiCl)、K(KCl)资源总量,以及冲洪积扇带初步勘查的 150 m 以上地下水中储存的这些元素总量都十分可观。这只是一种战略性的总量估算,一定时期内并不能作为矿产资源储量来衡量其经济价值。但那棱格勒河几乎整个流域 B、Li、K 元素的背景异常所蕴含的矿产资源潜在价值,特别是地质科学意义值得重视和关注。由于那棱格勒河流域河水、地下水都具有良好的水循环条件,意味着有源源不断来自深部流体的物源供给^[3]。如果将来有条件从库塞湖或其他高海拔山间盆地调水到那棱格勒河,如勒斜武旦湖等 Li 的质量浓度(68.5 mg/L)^[9]很高,那么这些水体中富含的 B、Li、K 也会自然输入盆地,进一步增加矿产元素的总量,这一总量预计将远高于表 1 保守估算的总量。从地质演化的理论角度讲,只要进入湖盆这么多资源元素而没有出口,最终都会演化成为卤水资源,其总量将会十分可观。虽然地表水/地下水中 B、Li、K 质量浓度当前远达不到工业直接开采利用的富集程度,但对无法作为水资源直接利用的洪水或溢出带泉水完全可以考虑输入干盐滩蒸发浓缩,日积月累自然也会成矿或者浓缩之后补充盐湖,矿源意义重大。

随着战略性紧缺矿产资源开采工艺技术的发展,世界各地都在试图从任何富锂水体中提取锂。那棱格勒河输入湖盆这么多总量的锂元素,如果对其开展长期攻关研究,有可能在工艺技术方面实现直接从一定程度富集的淡水中提取锂元素。如羊八井热电厂废水一直认为没有矿产资源价值,但近年来已经建厂提取硼矿资源即是成功的先例。另外,海水提锂也被认为是可行的,国内外在这一领域都已取得突破性进展^[16]。那棱格勒河流域水体 Li 浓度比海水还高很多倍,如果浓缩到海水程度(约 100 倍),Li 浓度将比海水高数百倍,有一定开发利用的远景。只是因为这一流域人迹罕至又是极度干旱区,首先考虑的是水资源功能,至今并没有人从宏观战略角度评估其矿产元素利用价值。

5 结论与建议

- a. 那棱格勒河流域水循环条件优越,水资源丰富,水质优良,目前基本处于自然水循环状态,随着源区气候变暖及降水量增加,地表/地下水储量也会相应增加,开发利用潜力巨大。
- b. 那棱格勒河中下游(洪水河支流汇入后)不论地表水或地下水,都含有高背景浓度的 B、Li、K 等元素,而且具有来自深源流体的补充,这些矿产元素源源不断补给尾间盐湖,随着技术日益成熟也有可能直接开发利用,潜在价值或地质意义重大。
- c. 那棱格勒河上游支流洪水河源区从库塞河,甚至一些富 B、Li 矿的盐湖调水,如果比例适当,调水后会因另一支流的稀释水质不会发生大的变化,但会增加其中溶解的 B、Li、K 等矿产元素总量,既保证了青藏线的安全,又增加了那棱格勒河的水源与矿源。

参考文献:

[1] 朱允铸,李文生,吴必豪,等. 青海省柴达木盆地一里平和东、西台吉乃尔湖地质新认识[J]. 地质论评,1989,35 (6) : 558-565. (ZHU Yunzhu, LI Wensheng, WU Bihao, et al. New recognition on the geology of the Yiliping Lake and the east and west Taijnar Lakes in the Qaidam Basin, Qinghai Province[J]. Geological Review,1989,35 (6) : 558-565. (in Chinese))

[2] 朱允铸,李争艳,吴必豪,等. 从新构造运动看察尔汗盐湖的形成[J]. 地质学报,1990,64 (1) : 13-21. (ZHU Yunzhu, LI Zhengyan, WU Bihao, et al. The formation of the Qarhan Saline Lakes as viewed from the Neotectonics movement[J]. Acta Geologica Sinica, 1990,64 (1) : 13-21. (in Chinese))

[3] TAN Hongbing, CHEN Jun, RAO Wenbo, et al. Geothermal constraints on enrichment of boron and lithium in salt lakes: an example from a river-salt lake system on the northern slope of the eastern Kunlun Mountains, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012,51: 21-29.

[4] YU Junqing, GAO Chunliang, CHENG Aiyang, et al. Geomorphic, hydroclimatic and hydrothermal controls on the formation of lithium brine deposits in the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau, China[J]. Ore Geology Reviews, 2013, 50: 171-183.

[5] ZHANG Geli, DONG Jinwei, ZHOU Caiping, et al. Increasing cropping intensity in response to climate warming in Tibetan Plateau, China[J]. Field Crops Research,2013, 142:36-46.

[6] JIAO J J, ZHANG Xiaotao, LIU Yi, et al. Increased waters storage in the Qaidam Basin, the North Tibet Plateau from GRACE gravity data[J]. PLOS One, 2015, 10(10): e0141442.

[7] 王洋,魏加华,解宏伟. 基于 GRACE 的柴达木盆地水储量变化[J]. 南水北调与水利科技,2018,16 (1) : 75-82. (WANG Yang, WEI Jiahua, XIE Hongwei. The variation of terrestrial water storage in the Qaidam Basin based on GRACE data[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1):75-82. (in Chinese))

[8] 王永贵,郭宏业,李健,等. 柴达木盆地地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京:地质出版社, 2008.

[9] 马茹莹,韩风清,马海州,等. 青海可可西里盐湖水化学及硼同位素地球化学特征[J]. 地球学报, 2015, 36 (1) : 60-66. (MA Ruying, HAN Fengqing, MA Haizhou, et al. Hydrochemical characteristics and boron isotope geochemistry of brine in Hoh Xil, Qinghai Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36 (1) : 60-66. (in Chinese))

[10] XU Wei, SU Xiaosi, DAI Zhenxue, et al. Multi-tracer investigation of river and groundwater interactions: a case study in Nalenggele River Basin, northwest China[J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25(7): 2015-2029.

[11] HUH Y, CHAN L H, ZHANG Libo, et al. Lithium and its isotopes in major world rivers: implications for weathering and the oceanic budget[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(12): 2039-2051.

[12] LIU Congqiang, ZHAO Zhiqi, WANG Qilian, et al. Isotope compositions of dissolved lithium in the rivers Jinshajiang, Lancangjiang, and Nujiang: implications for weathering in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Applied Geochemistry, 2011, 26(Sup): 357-359.

[13] 冯士筴. 海洋科学导论[M]. 北京:高等教育出版社,1999.

[14] 肖勇. 柴达木盆地南缘地下水循环演化模式及其变化趋势研究[D]. 北京:中国地质大学, 2018.

[15] 王永波,刘兴起,羊向东,等. 可可西里库赛湖揭示的青藏高原北部近 4 000 年来的干湿变化[J]. 湖泊科学, 2008, 20 (5) : 605-612. (WANG Yongbo, LIU Xingqi, YANG Xiangdong, et al. A 4000-year moisture evolution recorded by sediments of Lake Kusai in the Hoh Xil area, northern Tibetan Plateau[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(5): 605-612. (in Chinese))

[16] YANG Sixie, ZHANG Fan, DING Huaiping, et al. Lithium metal extraction from seawater[J]. Joule,2018,2: 1648-1651.