

doi:10.3799/dqkx.2012.029

关于巴丹吉林沙漠湖泊形成机制的初步看法

郭永海,王海龙,董建楠,刘淑芬,李亚伟,季瑞利

核工业北京地质研究院,北京 100029

摘要: 巴丹吉林沙漠以湖泊众多和沙山高大而闻名于世. 到目前为止,关于湖泊和沙山的成因问题尚存在不同的观点. 实际上,巴丹吉林沙漠湖泊和沙山的形成与该地区地下水的循环交替问题直接相关. 参照前人研究成果,结合开展的巴丹吉林沙漠水文地质调查,探讨了湖泊和沙山的形成问题,初步认为巴丹吉林沙漠湖泊主要接受来自东部雅布赖山区区域地下水侧向补给和沙山地下水补给而形成;高大沙山的形成与降水和地下水关系密切;高大沙山与湖泊的形成和共存关系是先有沙山,而后才形成湖泊,沙山是形成巴丹吉林沙漠湖泊的必备条件.

关键词: 高大沙山;湖泊;形成;巴丹吉林沙漠;环境影响;水文地质.

中图分类号: X141

文章编号: 1000-2383(2012)02-0276-07

收稿日期: 2011-09-15

The Primary Opinion on the Formation Mechanisms of Megadunes and Lakes in the Badain Jaran Desert

GUO Yong-hai, WANG Hai-long, DONG Jian-nan, LIU Shu-fen, LI Ya-wei, JI Rui-li

Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

Abstract: Badain Jaran desert is well-known for its distribution of many megadunes and lakes. However, opinions about the formation of these megadunes and lakes vary from person to person until recently. Actually, their formation is directly related to the circulation and alternation of the groundwater in this area. According to the previous research, combining with the current hydro-geological investigation in the study area, this article discusses the formation mechanisms of megadunes and lakes in Badain Jaran desert. It is found that lakes in the desert formed mainly as a result of the lateral recharge of groundwater both from Yabulai Mountain and megadunes. The formation of megadunes is closely related with the rainfall and groundwater in the area. The formation and coexistent relationship between megadunes and lakes are as follows: the megadunes formed firstly, and then the lakes appeared. That means megadunes are a necessary condition for the formation of lakes there.

Key words: megadune; lake; formation; Badain Jaran desert; environmental impact; hydrogeology.

近年来,从高放废物处置库选址的角度,笔者在甘肃北山地区开展了多年的水文地质调查和研究工作,从地面调查到钻孔水文地质勘探和研究,获得关于北山地区水文地质特征的一些一手资料,对于北山地区地下水形成机制和循环过程、流场特征、水化学及同位素特征有了初步认识,并认为北山地区地下水主要来源于当地大气降水入渗补给. 但有研究者认为,由祁连山深大断裂、阿尔金深大断裂、古日乃深大断裂构成的 500 km“地下河”,以每天 $2 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{d}$ 的流量,补给巴丹吉林沙漠、额济纳盆地地

下水;同时,沿途也补给了北山地区,且地下水循环周期在 30 年左右(Chen *et al.*, 2004; 陈建生和汪集旻, 2004, 2005). 如果这种观点成立,则甘肃北山地区作为高放废物处置库场址显然是不合适的,而巴丹吉林沙漠、额济纳盆地地下水资源的丰富程度将大幅提高.

巴丹吉林沙漠是黑河流域的组成部分,其地下水的形成不仅关系到正确认识巴丹吉林沙漠地下水循环过程,也关系到黑河流域水资源构成和正确评价等一系列重大问题. 因此,带着上述研究者文章中

提出的问题,同时考虑到巴丹吉林沙漠隔黑河与北山地区相望,自然地理特别是气候特征极为相似,在地下水形成机理方面可能会存在一定的可比性;我们对巴丹吉林这片神秘的沙漠开展了初步调查,在前人研究基础上,结合在调查中获得的认识,对诸多研究者关注的巴丹吉林沙漠高大沙山和湖泊形成问题提出一些带有推测性的初步看法,希望达到抛砖引玉、与大家商榷的目的。

1 巴丹吉林沙漠自然地理及水文地质背景

巴丹吉林沙漠分布于弱水东岸的古日乃湖以东,宗乃山和雅布赖山以西,拐子湖以南,北大山以北的地区,面积 49 200 km² (朱震达等,1980)。在行政区划上属内蒙古的额济纳旗和阿拉善右旗。在自然地带带上已处于阿拉善荒漠的中心。巴丹吉林沙漠区内海拔高度总的变化规律是南高北低,东高西低,南部的北大山海拔 1 800~2 300 m,东部的宗乃山、雅布赖山海拔 1 300~2 200 m,向北、向西海拔高度逐渐变低,至拐

子湖和东戈壁一带,海拔高度 970~1 200 m。

根据阿拉善右旗、中泉子及巴彦诺尔气象站降水资料分析,沙漠区及雅布赖山区降水具有山区高于沙漠区的特征,雅布赖山区降水量多年平均为 125~145 mm。细土平原,多年平均为 80~90 mm。降水量随地势降低而减少,至古日乃湖和拐子湖降至 30~50 mm。从中泉子气象站统计资料来看,每隔 3~4 年就出现一个丰水年和一个枯水年,丰水年降水量 100~110 mm,枯水年仅为 30~50 mm。一般 7~9 月份降水占全年降水量的 60% 以上,常呈片状或带状分布。降水多呈暴雨或雷阵雨出现。据中泉子气象站多年降水量统计,大于 10 mm 的日降水量平均每年两次,占全年降水量的 45.8%;大于 5 mm 的降水量平均每年 6 次,占全年降水量的 70% (黄天明和庞忠和,2007)。中泉子气象站多年平均蒸发量为 3 525 mm,最小年蒸发量为 3 190 mm,最高年蒸发量为 3 947 mm。5~8 月蒸发强烈,1 月最低。一般山区蒸发量小于平原区 (黄天明和庞忠和,2007)。巴丹吉林沙漠以湖泊众多而闻名。湖泊主要集中在沙漠的南部地区,这里也是高大沙山的主要分布区 (图 1)。

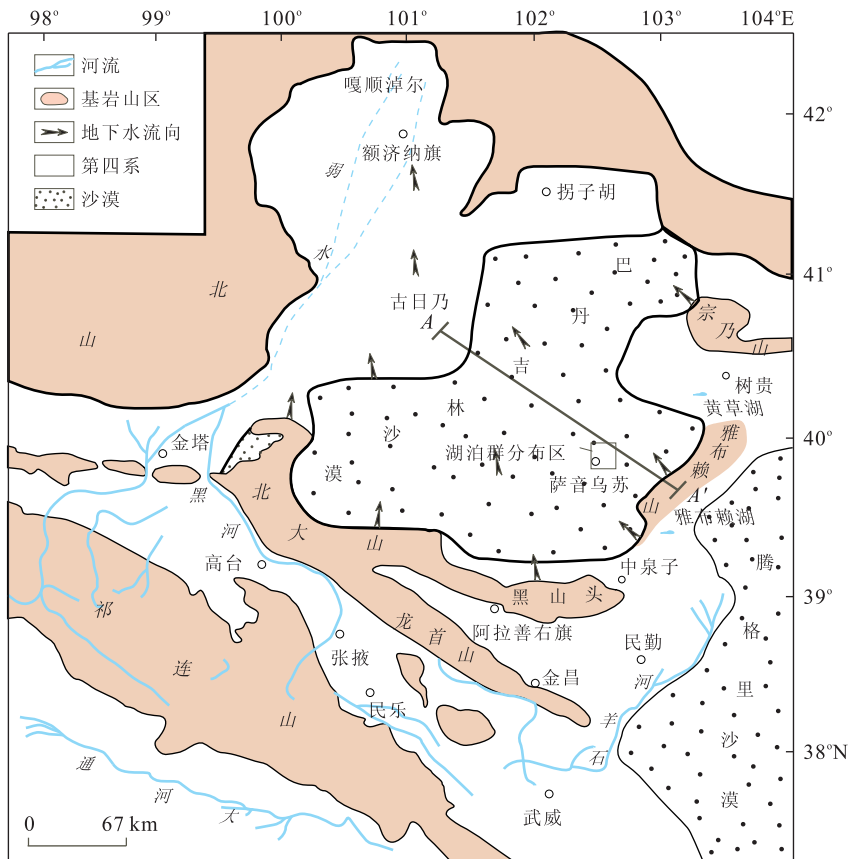


图 1 巴丹吉林沙漠及周边地区水文地质简图

Fig. 1 Sketch showing hydrogeology of Badain Jaran desert and its vicinity

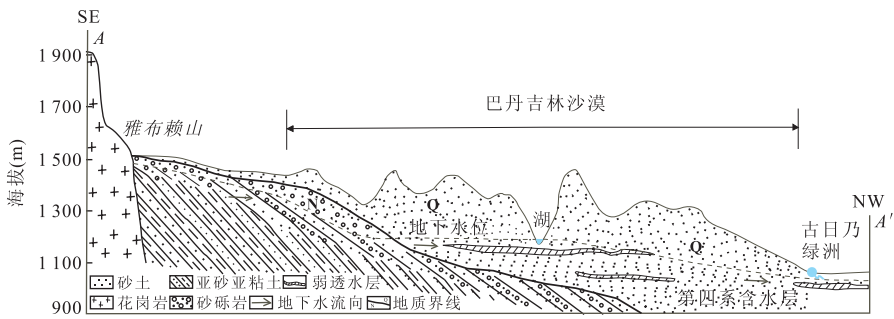


图 2 巴丹吉林沙漠区水文地质剖面示意

Fig. 2 Sketch showing hydrogeological section of Badain Jaran desert

湖泊共有 144 个之多,其中约半数永久性湖泊,目前有水的湖泊仍有 72 个,湖泊面积达 23 km²。

巴丹吉林沙漠属于阿拉善台地的拗陷盆地,自早更新世以来,地壳总体表现为大幅度下沉,堆积了厚达 150 m 以上的第四系沉积物。而盆地边缘的山区则长期处于强烈的剥蚀状态,形成了今天的准平原地貌。从水文地质条件方面看,巴丹吉林沙漠覆盖在古湖相地层及冲积—冲积物之上,有潜水和承压水分布,局部覆盖在基岩山地上。巴丹吉林沙漠潜水主要为全新统风积砂层潜水,几乎分布在整个巴丹吉林沙漠区;含水层岩性主要是松散的细砂,其厚度变化极大,由小于 5 m 到 100~200 m。此外,在古日乃湖及其周围地区缝补有全新统湖积层潜水,含水层岩性为细砂和亚砂土,含水层厚度为 3~10 m,单位涌水量 0.1~0.5 L/(s·m),潜水埋藏深度在中部小于 1 m,并有溢出,在外围一般是 1~3 m,矿化度一般为 1~3 g/L,局部小于 1 g/L,水化学类型为 Cl-Na 型(李宝兴,1964;黄天明和庞忠和,2007)。

孙培善(1964)研究了巴丹吉林沙漠承压水的形成及分布。新第三系承压水含水层岩性为砂岩,自山前的粗砂岩过渡到盆地内的细砂岩,属孔隙裂隙含水层。以地下径流方式补给中、下更新统的承压水。下更新统冲积—湖积层浅层承压水分布范围较广,南起北大山北麓,北到东歌德一带,东起雅布赖山、宗乃山,西至古日乃湖,共有 2 个承压含水层:第一层,岩性为中砂岩,裂隙较发育,地下水赋存在孔隙裂隙中。在丘间低地边缘隔水顶板粘土层常被剥蚀,使含水层直接出露并与风积沙层构成统一含水层;第二层,岩性为细砂岩,属孔隙裂隙水,分布不如前者广,仅在湖盆中心(如陶来吐)有分布;可作隔水顶板的粘土岩呈不连续的透镜体(图 2)。

该区地下水的总体流向受地形控制。沙漠西南部地下水主要接受大黑山地区地下水的侧向补给,

地下水流向主要为自南向北;沙漠东南部地下水主要接受来自雅布赖山和黑山头地下水侧向补给,地下水主要为自东南流向西北;泉群分布区地下水流向亦为自东南流向西北。

2 关于湖泊形成问题

巴丹吉林沙漠以湖泊众多而闻名。在沙漠的东南部高大沙山间分布的湖泊总计达 144 个,目前有水的湖泊仍有 72 个,湖泊面积达 23 km²。这种独特的沙漠景观吸引许多中外学者到这里考察研究,其目的之一便是揭开湖泊形成的奥秘。实际上,解决了巴丹吉林沙漠湖泊的形成问题,也就在很大程度上揭示了该地区地下水的循环交替问题。到目前为止,对湖泊的成因尚存在许多不同的观点:其一为沙山间负地形理论,湖泊是沙山间的低洼地带因沙山汇水而成。湖水的来源有两种解释,一是沙山潜水来自大气降水(Edmunds and Wright, 1979; Ma *et al.*, 2003);二是泉水,泉水主要是沙漠东南缘雅布赖山区降水沿沙漠下伏冲积扇砾岩层潜流形成。其二为断裂构造导水理论,认为深大断裂将祁连山的冰雪融水或青藏高原之水补给到沙漠洼地所形成(Chen *et al.*, 2004; 陈建生和汪集暘, 2004; 陈建生等, 2004, 2006);其三是古水系残留理论,认为更新世以前乃至第三纪地质历史时期巴丹吉林沙漠地区存在大湖期,推测目前的沙漠湖泊可能是大湖期古水系的残留。而目前这些湖泊不同程度地萎缩或者干涸,其原因可能是全新世夏季风的衰退导致降水减少,也可能是温度的升高或降低所致(Guo *et al.*, 2000; Yang, 2001; Yang *et al.*, 2003)。

揭示沙漠湖泊的成因也是我们本次开展沙漠调查的主要目的,由于初次进入沙漠,未能深入腹地,只在东南部的巴丹湖一带开展了初步调查,并进行

表1 巴丹吉林沙漠湖水、地下水取样点

Table 1 Location of sampling points in Badain Jaran desert

编号	取样点	坐标	取样时间	标高(m)
1	巴丹湖	39°57.008'N,102°33.120'E	2009-09-18	1 170
2	SUS-1	39°57.100'N,102°33.001'E	2009-09-18	1 160
3	SUS-2	39°57.100'N,102°33.001'E	2009-09-18	1 160
4	SUS-3	39°57.100'N,102°33.001'E	2009-09-18	1 160
5	TXH-1	39°57.100'N,102°33.001'E	2009-09-18	1 152

了湖水、地下水取样,取样点情况如表1所示。其中巴丹湖样品取自靠近沙漠东部边缘的巴丹湖,SUS-1样品取自巴丹湖西部的萨音乌苏湖,SUS-2、SUS-3样品取自萨音乌苏湖东岸距离湖水分别为1 m和2.2 m处,TXH-1样品取自萨音乌苏湖东侧20多米距离的条形湖。

样品的水化学测试结果示于表2。由测试结果可以看出,靠近沙漠东部边缘的巴丹湖水TDS仅为1 536 mg/L,接近淡水的TDS;萨音乌苏湖和TXH湖水的TDS分别为14 955.2 mg/L和20 652.8 mg/L;巴丹湖与萨音乌苏湖和TXH湖的直线距离在4 km之内,但湖水的TDS却相差10倍左右,这毫无疑问与湖水的成因和循环交替特征有关。

巴丹湖靠近沙漠东部边缘,湖水TDS仅为1 536 mg/L,水化学类型为Cl·HCO₃-Na,说明湖水的侧向循环交替是很积极的;否则,在漫长的地质岁月中,强烈的蒸发作用绝不可能使湖水的TDS保持在较低的程度。

沙漠东部边缘与北东走向的雅布赖山相接。根据前人研究成果,湖水面高度由东向西逐渐降低,湖面代表了地下水面,即地下水的主流方向是自东向西(Gates *et al.*, 2008),说明东部是地下水的补给区,巴丹湖靠近地下水的补给区,水循环交替积极;地下水从湖的东部流进湖中,经过短暂的停留,便在湖的西侧重新补给地下水。因此,湖水的水质没有在强烈蒸发作用下发生明显浓缩而使TDS显著增加。

根据前人资料,巴丹湖北侧几十米的位置曾在

2005年施工了一个80 m深的钻孔(WBD5),该孔地下水的TDS为0.81 g/L,为水质良好的淡水。它可以代表补给巴丹湖地下水的化学特征。可见,巴丹湖水的蒸发浓缩作用是微弱的(Gates *et al.*, 2008)。

那么,沙漠东部地下水的补给来源是什么呢?由巴丹吉林沙漠外围地区降水量分布可以看出,沙漠东部和东南部的雅布赖山和黑山头一带,年降水量在80.3~113.6 mm之间。这样的降水量比北山地区明显偏高,而沙漠与山区接触地带入渗条件良好,有利于降水的入渗,即沙漠东部地下水主要来源于当地降水入渗。

此外,巴丹湖周围的沙山高度较小,因此,沙山地下水对湖水的补给量有限;就是说,对巴丹湖而言,湖水主要接受区域地下水的侧向补给,周围沙山地下水补给次之;湖水以侧向排泄为主,蒸发排泄次之,即巴丹湖东侧接受地下水补给,西侧排泄湖水而补给地下水,且补给量和排泄量基本保持平衡状态。这种水的循环交替方式,导致该湖水始终保持TDS较低水平。

萨音乌苏湖和TXH湖位于巴丹湖西部,湖水面较巴丹湖低10 m左右,但周围沙山高度明显增高。萨音乌苏湖水TDS高达14 955.2 mg/L,水化学类型为Cl·SO₄-Na型,而相距湖水只有1 m和2.2 m的地下水分别为2 632.67 mg/L(SUS-2)和982.01 mg/L(SUS-3),水化学类型变为SO₄·Cl-Na·Ca型和HCO₃·SO₄·Cl-Ca型。这种显著差别是萨音乌苏湖水受沙山地下水补给的直接证据,距离湖水越远,沙山地下水TDS越低,直至稳定在背景值之内。沙山地下水源源不断地补给湖水,继而在湖中接受蒸发浓缩,使水的矿化度不断升高。或者是湖水以沙山地下水补给湖水为主,以区域地下水补给为辅,同时湖水也可能通过侧向排泄一部分湖水;但湖水所接受的侧向补给量大于其侧向排泄量,这种情况下,同样能达到使湖水的矿化度不断升高效果。

表2 巴丹吉林沙漠湖水、地下水化学分析结果

Table 2 Water chemical analysis results in Badain Jaran desert

序号	地点	测试结果(mg/L)											pH
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	TDS	
1	巴丹湖	3.3	376	—	217	68.3	622	432	40.5	72.1	15.8	1 536.0	8.73
2	SUS-1	7.2	4 827	—	3 357	495	1 353	4 403	516	647	27.0	14 955.2	8.92
3	SUS-2	4.27	515	—	874	—	644	430	94.4	107	286	2 632.7	7.44
4	SUS-3	5.21	159	—	218	—	483	96.2	34.4	41.7	186	982.0	7.35
5	TXH-1	15.8	6 248	3.6	5 343	522	1 676	6 394	679	591	18.4	20 652.8	8.79

那么,沙山地下水又是怎样形成的?对此,许多研究者做了大量研究工作,巴丹吉林沙漠内部无实测降水量资料,其年平均降水量只能根据其周围水文和气象台站估计,杨小平(2000)认为在现代气候状况下,巴丹吉林沙漠地区的多年平均降水量在东南部约 80 mm 左右,西北部不足 50 mm. 考虑包气带水中的 Cl 主要来源于大气降水的输入,因此,有研究者根据氯质量平衡原理,估算了降水对包气带(地下水)的平均补给率. 根据巴丹吉林沙漠的 3 个剖面得出降水补给率平均值为 1.12 mm/a(黄天明和庞忠和,2007);由此形成沙山地下水.

实际上,巴丹吉林沙漠区的年降水量在 50~80 mm 之间,与北山地区相近,且降水的特点也极为相似,即主要集中在 6~9 月份,多以暴雨出现,这样相对集中的降水特点,有利于对地下水的补给,而沙山的入渗条件无疑是非常好的. 因此,降水入渗形成沙山地下水的观点是可信的,至于补给量是否为 1.12 mm/a,则有待更多的研究工作加以验证.

综上所述,根据本次野外调查结果,参照前人研究成果,笔者认为巴丹吉林沙漠地下水主要接受区域地下水侧向补给和沙漠地区降水入渗补给而形成. 区域地下水补给主要是指来自沙漠东部和东南部的雅布赖山和黑山头地区的地下水的侧向补给. 巴丹吉林沙漠地下水形成与祁连山地下水或青藏高原地下水无密切关系.

沙漠湖水主要由地下水补给而形成并维系湖泊的存在,湖水面基本可代表地下水水面高度(Gates *et al.*, 2008). 按照补给方式的不同,沙漠湖泊可主要分为两种类型:(1)沙山地下水补给型. 这种湖泊主要接受周围沙山地下水侧向补给,来自沙漠东部和东南部的雅布赖山和黑山头地区的地下水的侧向补给为辅,这种湖泊占沙漠湖泊的多数.(2)区域地下水补给型. 这种湖泊主要接受来自沙漠东部和东南部的雅布赖山和黑山头地区的地下水的侧向补给为主,周围沙山地下水侧向补给为辅,这种湖泊占沙漠湖泊的少数.

按照排泄方式的不同,沙漠湖泊可主要分为两种类型:(1)蒸发排泄型. 这种湖泊所接受的侧向补给量明显大于侧向排泄量,多余的水量遭受强烈蒸发,使湖水的总溶解固体(TDS)很高,这种湖泊占沙漠湖泊的多数.(2)径流排泄型. 这种湖泊所接受的侧向补给量接近于侧向排泄量,即地下水从一侧补给湖泊,湖水又从另一侧返回地下,湖水的 TDS 较低,但一般略高于周围地下水,这种湖泊占沙漠湖

泊的少数.

由以上分析可见,沙山地下水补给型湖泊一般属于蒸发排泄型湖泊;区域地下水补给型湖泊则多为径流排泄型湖泊. 但是,巴丹吉林沙漠中发育的湖泊多达 144 个,最大湖深 16 m,最大面积 1.5 km². 本次调查的湖泊是极其有限的,与前人的研究相比,笔者的工作仅仅是开始,因此,难免在认识上存在片面性和局限性. 据前人调查研究成果,沙漠中还有少数湖泊由湖中央泉水补给,这说明沙漠湖泊还存在其他补给的方式,或接受断裂带深部地下水补给,或接受目前尚不知晓的其他途径的补给,这些都需要投入更多的工作加以破解.

3 关于高大沙山的形成问题

高大沙山是巴丹吉林沙漠较为典型的地貌单元,是世界上少有的,主要分布在中、东部,也就是湖泊分布较为密集的地区,一般高 200~300 m,最高接近 500 m. 作为世界上规模最宏大的沙丘系统——高大沙山是怎样形成的?与地形、气候、降水、地质构造、地下水有怎样的关系?这也一直是困惑地学界尤其是沙漠界的世界性难题. 根据沙山形成因素的影响程度,研究者对高大沙山形成机理的认识大致可归纳以下两种观点:

(1)多因素成因说:多因素成因说认为高大沙山形成发育受沙源、风况、基底和植被等多因素的综合影响而形成,尤其受环境演变的影响较大. 受西风环流的控制,沙山下伏地形的起伏不仅能够改变近地表风的运行方式,而且是风沙流运行的障碍. 气候湿润期(间冰期)沙丘主要通过钙胶结层固定沙丘表面,气候干冷期(冰期)在钙胶结层又发育次一级的沙丘. 经过钙胶结固定—加积—再钙胶结固定循环的演化模式,最终发育成高大的复合型沙山. 末次冰期以来的气候波动对高大沙丘的发育起着关键作用,在气候湿润的时期发育的沙丘灌草植被通过抑制风蚀、扑捉风沙等作用加速了沙山的发育(阎满存等,2001;张伟民和王涛,2005).

(2)地下水成因说:地下水成因说认为受下伏深大断裂中地下水涌影响,沙山体内部湿度增大,水汽蒸发引起沙丘表面湿度增大、固定性增强,进而维持形成高大沙山,而非钙结层和植物的固定作用形成(Chen *et al.*, 2004;顾慰祖等,2004).

由此可见,关于巴丹吉林沙漠高大沙山的形成机理目前尚存在较大分歧,或者说远未定论. 笔者认

为,多因素成因说对于沙漠的形成是通用的,任何沙漠的形成都与气候、沙源、风况、基底和植被等多因素相关。但是,巴丹吉林沙漠是独特的,其独特在于高大沙山与众多湖泊交相辉映,这是世界上少有的奇观,因此,必然有它成因上的特殊性,即对高大沙山的形成起关键作用的因素,只有抓住了关键因素,才能破解高大沙山成因之谜。

从 Google 地球不难看出,高大沙山主要分布在巴丹吉林沙漠的中、东部地区,也就是湖泊分布较为密集的地区,实际上也是靠近雅布赖山区地下水补给水源最近和降水量较大的地区。因此,高大沙山与水应该存在密切的联系。一方面,水有固沙的功能;另一方面,与基岩相比,沙有优越的降水入渗条件和良好的蓄水功能,就是说,在相同的气候条件和降水条件下,沙山与基岩相比将更容易赋存地下水。实际上,沙山除了具有储水功能外,还兼具保水功能,由于沙山的覆盖,大大减少了下部基岩地下水的蒸发消耗,其效果等于增加了雅布赖山区的侧向来水量。因此,可以初步认为,沙山的形成与水的存在关系密切。这里所说的水,既包括地下水,也包括降水。

4 高大沙山与湖泊的共存关系

与基岩覆盖的北山地区相比,巴丹吉林沙漠区的气候特征、降水量、降水季节特征和降水的形式是相似的;然而,巴丹吉林沙漠区有众多湖泊分布,而北山地区几乎没有,其中的原因可能相当复杂,但与覆盖层的不同是否有着更直接的关系呢?笔者认为关系密切。试想,如果巴丹吉林沙漠不是被厚厚的沙层覆盖,还会有湖泊存在吗?

笔者投入的研究甚少,难以对已有的理论进行评说。但笔者认为,湖水主要由沙漠东南缘雅布赖山区靠降水形成的砾岩层地下水和湖泊周围沙山地下水补给而形成。通过与北山地区对比,笔者还认为,在两种补给源中,如果缺少了沙山地下水的补给,巴丹吉林沙漠就会与北山地区一样,不会有湖泊存在。正是有了沙山,才使降水能够充分转化为地下水,又增加了一个关键的补给途径,才有了形成湖泊的足够的水源,才形成了今日的湖泊,才能维系湖泊千百年不枯。也就是说,先有沙山,而后才有湖泊。当然,高大沙山不可能一天形成,它必然经历由低变高、由小变大的成长过程,当高大沙山的雏形——低矮的沙山形成到一定高度和规模后,便具备了储水功能,于是“沙山蓄水,水助山长,山长水丰”的过程便开始

循环往复;当低矮的沙山发展到一定高度和规模时,沙山补给水加上雅布赖山区侧向来水便达到了湖泊形成所需水量的阈值,于是,沙漠湖泊形成了。如上所述,沙山既具有储水功能,还兼具保水功能,由于沙山的覆盖,大大减少了基岩地下水的蒸发消耗,其效果也就等于增加了湖泊形成的水源。由此可见,沙山是形成巴丹吉林沙漠湖泊的必备条件。

当然,巴丹吉林沙漠高大沙山与湖泊共存绝不可能仅仅是二者互为因果的必然产物,二者共存需要多方面因素的配合,如上面所提到的气象、水文、沙源、风况、地形、地貌、地质、水文地质、基底构造和植被等都是重要的相关因素,只有当这些因素达到某种特定的组合状态,才能使高大沙山与湖泊共存。并且,巴丹吉林沙漠面积广大,地质条件、气象条件差别也很大,所分布的 140 多个湖泊,不可能是简单的一、两种形成模式。但必须认清,水是高大沙山的形成的关键,高大沙山又是沙漠湖泊形成的重要根源。有学者认为,沙漠湖泊主要由南部祁连山区地下水补给而形成和维系。从地下水流动系统的角度分析,不排除祁连山地下水可能通过某种方式和途径对巴丹吉林沙漠区地下水构成补给,但补给的地下水必须穿过河西走廊,越过龙首山和北大山,才能到达巴丹吉林沙漠,根据地下水流动系统理论,考虑沿途的地质、地形、地貌条件,这种地下水的流动一定是深部的、极其缓慢的。因此,这种补给水流即使存在,在水量上能否支付巴丹吉林沙漠区的水量消耗,存在较大疑问。并且,这种补给是否存在,本身也缺乏地质、水文地质依据。

5 认识和结论

参照前人研究成果,结合开展的巴丹吉林沙漠水文地质调查,笔者初步认为,巴丹吉林沙漠湖泊主要接受来自东部雅布赖山区区域地下水侧向补给和沙山地下水补给而形成;高大沙山的形成与降水和地下水关系密切;高大沙山与湖泊的形成关系是先有沙山,而后才形成湖泊,沙山是形成巴丹吉林沙漠湖泊的必备条件。

References

- Chen, J. S., Li, L., Wang, J. Y., et al., 2004. Groundwater maintains dune landscape. *Nature*, 432 (7016): 459 - 460. doi:10.1038/432459a
- Chen, J. S., Wang, J. Y., 2004. The impact of a underground

- reservoir found in Badain Jaran desert on the water transferring plan in Northwest China. *Journal of Economics of Water Resources*, 22(3): 28—32 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. S., Wang, J. Y., 2005. Adverse impact of Altun fault's strong water delivery on nuclear disposal field of Beishan Mount. *Journal of Economics of Water Resources*, 23(1): 9—13 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. S., Wang, J. Y., Zhao, X., et al., 2004. Study of groundwater supply of the confined aquifers in the Ejin basin based on isotopic methods. *Geological Review*, 50(6): 649—658 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. S., Zhao, X., Sheng, X. F., et al., 2006. Formation mechanisms of megadunes and lakes in the Badain Jaran desert, Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 51(23): 2789—2796 (in Chinese with English abstract).
- Edmunds, W. M., Wright, E. P., 1979. Groundwater recharge and paleoclimate in the Sirte and Kufra basins, Libya. *Journal of Hydrology*, 40(3—4): 215—241. doi: 10.1016/0022-1694(79)90032-5
- Gates, J. B., Edmunds, W. M., Darling, W. G., et al., 2008. Conceptual model of recharge to southeastern Badain Jaran desert groundwater and lakes from environmental tracers. *Applied Geochemistry*, 23(12): 3519—3534. doi: 10.1016/j.apgeochem.2008.07.019
- Gu, W. Z., Chen, J. S., Wang, J. Y., et al., 2004. Challenge from the appearance of vadose water within the surface iayer of megadunes, Badain-Jaran dune desert, Inner Mongolia. *Advances in Water Science*, 15(6): 695—699 (in Chinese with English abstract).
- Guo, H. D., Liu, H., Wang, X. Y., et al., 2000. Subsurface old drainage detection and paleoenvironment analysis using spaceborne radar images in Alxa plateau. *Science in China (Ser. D)*, 43(4): 439—448. doi: 10.1007/BF02959455
- Huang, T. M., Pang, Z. H., 2007. Groundwater recharge in Badain Jaran desert and Gurinai Oasis based on environmental tracers. *Geoscience*, 21(4): 624—631 (in Chinese with English abstract).
- Li, B. X., 1964. The hydrogeological characteristics of drought and desert regions in China. Research on treatment to desert (6th). Science Press, Beijing, 1—32 (in Chinese).
- Ma, J. Z., Li, D. Zhang, J. W., et al., 2003. Groundwater recharge and climatic change during the last 1 000 years from unsaturated zone of SE Badain Jaran desert. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1469—1474. doi: 10.1360/02wd0262
- Sun, P. S., Sun, D. Q., 1964. The study on hydrogeology in the west area in Inner Mongolian. Research on treatment to desert (6th). Science Press, Beijing, 245—317 (in Chinese).
- Yan, M. C., Wang, G. Q., Dong, G. R., et al., 2001. Study on mega dunes development and environmental change in Badain Jaran desert. *Journal of Desert Research*, 21(4): 361—366 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X., 2001. Late quarterary evolution and paleoclimates, western Alashan plateau, Inner Mongolia, China. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 45(1): 1—16.
- Yang, X. P., 2000. Landscape evolution and precipitation changes in the Badain Jaran desert during the last 30000 years. *Chinese Science Bulletin*, 45(4): 428—434 (in Chinese).
- Yang, X. P., Liu, T. S., Xiao, H. L., 2003. Evolution of megadunes and lakes in the Badain Jaran desert, Inner Mongolia, China during the last 31, 000 years. *Quaternary International*, 104: 99—112. doi: 10.1016/S1040-6182(02)00138-6
- Zhang, W. M., Wang, T., 2005. Approach to formation and evolution of megadunes in Badain Jaran desert. *Journal of Desert Research*, 25(2): 281—286 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈建生, 汪集旸, 2004. 试论巴丹吉林沙漠地下水库的发现对西部调水计划的影响. *水利经济*, 22(3): 28—32.
- 陈建生, 汪集旸, 2005. 阿尔金断裂中地下河对北山修建核废物库的不利影响. *水利经济*, 23(1): 9—13.
- 陈建生, 汪集旸, 赵霞, 等, 2004. 用同位素方法研究额济纳盆地承压含水层地下水的补给. *地质论评*, 50(6): 649—658.
- 陈建生, 赵霞, 盛雪芬, 等, 2006. 巴丹吉林沙漠湖泊群与沙山形成机理研究. *科学通报*, 51(23): 2789—2796.
- 顾慰祖, 陈建生, 汪集旸, 等, 2004. 巴丹吉林高大沙山表层孔隙水现象的疑义. *水科学进展*, 15(6): 695—699.
- 黄天明, 庞忠和, 2007. 应用环境示踪剂探讨巴丹吉林沙漠及古日乃绿洲地下水补给. *现代地质*, 21(4): 624—631.
- 李宝兴, 1964. 中国干旱—沙漠地区水文地质特征. *治沙研究* (6). 北京: 科学出版社, 1—32.
- 孙培善, 孙德钦, 1964. 内蒙古高原西部水文地质初步研究. *治沙研究* (6). 北京: 科学出版社, 245—317.
- 阎满存, 王光谦, 董光荣, 等, 2001. 巴丹吉林沙漠沙山发育与环境演变研究. *中国沙漠*, 21(4): 361—366.
- 杨小平, 2000. 近 3 万年来巴丹吉林沙漠的景观发育与雨量变化. *科学通报*, 45(4): 428—434.
- 张伟民, 王涛, 2005. 巴丹吉林沙漠高大沙山形成演化初步探讨. *中国沙漠*, 25(2): 281—286.
- 朱震达, 吴正, 刘恕, 等, 1980. 中国沙漠概论. 北京: 科学出版社, 73—78.