

文章编号:1001-4810(2004)04-0277-06

# 巴丹吉林沙漠湖泊钙华与根状结核的发现对研究湖泊水补给的意义<sup>①</sup>

陈建生<sup>1</sup>, 赵霞<sup>1</sup>, 汪集旻<sup>2,1</sup>, 顾慰祖<sup>1,3</sup>, 盛雪芬<sup>1</sup>, 苏治国<sup>1</sup>

(1. 河海大学, 江苏 南京 210098; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101;

3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:**巴丹吉林沙漠湖泊中的钙华和根状结核的存在证实这些沙丘和湖泊形成的时间约3万年,而且基本上没有发生大的改变。同位素和水化学研究结果证实湖泊水与祁连山深大断裂中的地下水有关,湖泊群正好位于阿尔金断裂东端,祁连山断裂与阿尔金断裂在玉门一带相交,祁连山断裂的地下水汇入阿尔金断裂后最终补到巴丹吉林沙漠的湖泊群中;而钙华与根状结核是地下水通过碳酸盐岩地层后形成的。

**关键词:**断裂;钙华;根状结核;环境同位素;地下水

**中图分类号:**P641.3 **文献标识码:**A

## 0 前言

巴丹吉林沙漠位于内蒙古境内,面积约5万km<sup>2</sup>,高程在1150~1700m之间。沙漠东部高大沙丘与湖泊共存,高大沙丘都是固定的,平均高度为330m,最高达到500m。沙丘之间存在144个湖泊。由于该区降雨稀少,年平均降水量仅为39mm,年蒸发量在4000~4500mm之间,湖泊总水域面积达到33km<sup>2</sup>左右,一半的湖泊已经干涸,其中最大的湖是诺日图,面积为1.5km<sup>2</sup>,水深16m<sup>[1]</sup>。古日乃草原位于沙漠西北部,地面高程900~1000m,曾经为古日乃湖,面积达到800km<sup>2</sup>。沙漠边缘北部的拐子湖,地面高程为900m左右,大湖泊已经干涸,留下200多个小湖泊,见图1。

## 1 沙漠中的钙华与植物根管根状结核

巴丹吉林沙漠湖泊群东部的诺尔图(Nuoertu)和苏木巴润吉林(Sumubarunjaran)湖泊中发现钙华;西部的伊和吉格德(Yihejigede)湖泊中也发现钙华,其位于湖中心,直径3~10m,高出湖面1m左右,

钙华中间存在上升泉,水量超过1L/s;并在呼贲吉浪(Hulaijilang)已经干涸的湖泊中发现大量的根状结核,厚度约1~2m,说明在一定的时期内该地区生长过很多植物,根茎被埋藏后,有机质部分被降解并由碳酸钙充填而形成。对以上采集的样品进行X射线衍射(XRD)测试,结果显示,钙华的主要成分为文石,为典型湖泊相碳酸钙沉积;不同地点的根状结核的主要成分基本相同,主要为方解石,均由地下水带来的碳酸钙在各自的沉淀地点重结晶而成,其它的矿物还有石英、长石及极少量的伊利石等。

在沙丘较为低洼处找到散落的根管根状结核和叠在一起的植物叶片结核(参见图2)。根状结核都是在迎风面发现的,分布高程为1150~1400m。根管胶结的硬度与高程有关,高程越高胶结的硬度越小;高程越高根管越细,胶结程度越差。在呼贲吉浪干涸湖底发现根状结核沉积层,厚度达1~2m,且根管胶结的强度更高;<sup>14</sup>C测得其根状结核的年龄为8386±106a(表1)。考虑到在碳酸盐岩地区<sup>14</sup>C可能与岩石中的死碳发生交换使测定的年龄偏大,故在大约8000a前湖底高程为1167m的呼贲吉浪应该还是个湖泊。

① 基金项目:国际原子能机构TC项目(CPR/08/015)、河海大学院士基金项目

第一作者陈建生(1955-),教授,博导,主要从事同位素水文学、渗流理论与示踪探测技术研究。

收稿日期:2004-08-10

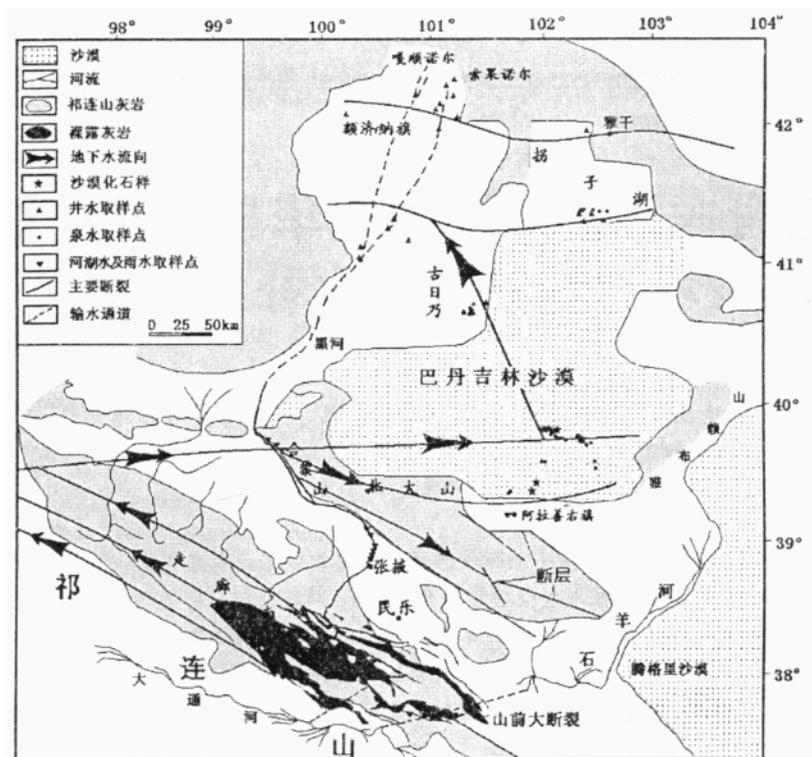


图1 祁连山西段降水通过断裂渗漏通道补给巴丹吉林沙漠湖泊群示意图

Fig. 1 Sketch map showing that precipitation water in western Qilian Mountain recharges the lakes in Badain Jaran Desert by seepage through the fault

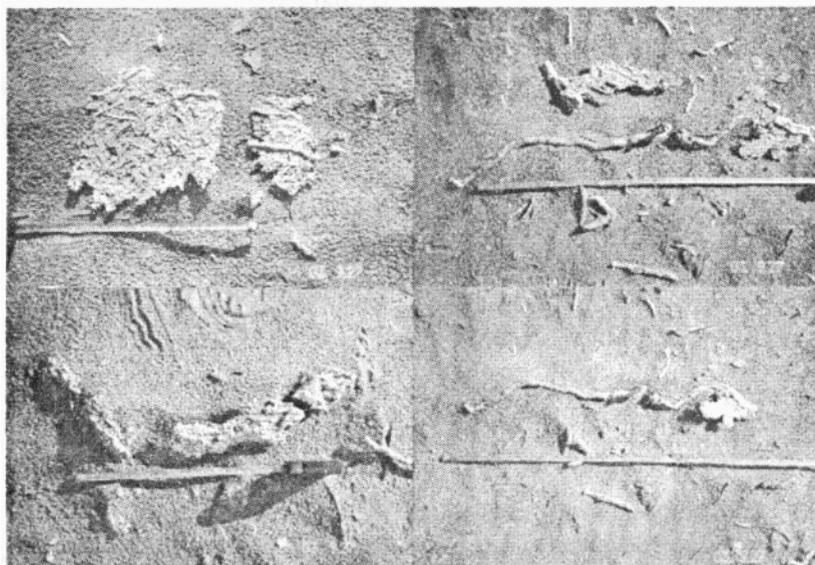


图2 在沙丘上发现的植物叶片和根状结核

Fig. 2 Leaves of plant and root-shaped nodule found in sand dunes

令人不解的是,高大沙丘内部是潮湿的。在潮湿的沙丘中粗细不同的砂粒呈层状分布,这应是由于风力分选而造成的。在这种潮湿沙丘中,可找得到根状结核,如在伊和吉格德 1160m 高程的沙丘上挖掘出的根状结核(参见图 3),用 $^{14}\text{C}$ 测定,其无机碳年龄为

$4753 \pm 60\text{a}$ (参见表 1),说明这座沙丘已经有约 4000a 的历史,且 4000a 来始终都是潮湿的,否则在降雨量不到  $40\text{mm/a}$  的极干旱地区,降水是不可能形成钙华和根状结核的。

沙漠泉水中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 在  $1.10 \times 10^{-6} \sim 6.7 \times$

$10^{-8}$  之间,小于大气中的值( $1.4 \times 10^{-6}$ ), $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  在  $0.32 \sim 42$  之间,远大于大气值  $0.318$ ,由于岩层中不存在 $^{20}\text{Ne}$ ,由此证实气体来自地壳深部。钙华中 $\delta^{13}\text{C}$  的值很高( $3.175\%$ ),在排除了气体来自大气和土壤后, $\text{CO}_2$  来源于地壳深部,并与深大断裂构造有关。类似地,四川黄龙沟的钙华沉积中的 $\delta^{13}\text{C}$  也很高( $\delta^{13}\text{C}$  为 $2.03\% \sim 3.657\%$ ),刘再华等研究后认为是起源于地层深部的 $\text{CO}_2$  造成的结果<sup>[2]</sup>。在距离伊和吉格德湖泊西部边缘  $200\text{m}$  的沙丘边坡上挖了一个  $1\text{m}$  深的井,有地下水渗出,该井水位高程比湖泊水位高约  $17\text{m}$ ,其中 $\delta\text{D} = -53.3\%$ 、 $\delta^{18}\text{O} = -2.3\%$ 、 $T = 30.02 \pm 3.07(\text{TU})$ 。该点远离雨水线,正好落在蒸发曲线上,由此可以看出沙丘的蒸发作用十分明显。但在植被和沙漠表面没有发现凝结水。

表1 巴丹吉林沙漠沙丘上的根状结核与湖泊中钙华的 $^{14}\text{C}$  年龄及 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  测试结果

Tab. 1 Results tested by  $^{14}\text{C}$  age,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of the root-shaped nodule and the lacustrine travertine on sand dunes in Badain Jaran Desert

地点	类型	高程	年龄(aBP)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	误差
伊和吉格德沙丘	根状结核	1151	$4420 \pm 66$	$-2.273$	$0.711378$	$0.000009$
	根管胶结	1156	$4633 \pm 45$	$-1.135$	$0.711661$	$0.00001$
	根管胶结	1160	$4753 \pm 60$	$-6.132$	$0.713207$	$0.000036$
	根管胶结	1172	$27877 \pm 285$	$3.175$	$0.711371$	$0.000007$
呼费吉浪干涸湖底	根管胶结	1167	$8386 \pm 106$	$-5.782$	$0.711659$	$0.000014$
伊和吉格德湖泊	钙华	1143	$8543 \pm 172$	$-3.063$	$0.710345$	$0.000011$

( $^{14}\text{C}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  由中科院南京地理与湖泊研究所测定、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  由南京大学分析中心测定)

## 2 水中同位素分析

调查发现,祁连山顶部的山峰由于风化剥蚀作用早已经被削平,使寒武纪等古老的灰岩裸露于地表。祁连山的隆起使地层发生断裂,在走廊南山顶部附近存在数条深大断裂构造,延伸上百公里,深度达到数公里。研究发现,这些深大断裂仍然活动<sup>[3]</sup>。正是由于这种特定的地质构造,大断裂以上山顶的雪水并没有汇入地表径流,而是顺着断裂或裸露的破碎地层直接渗入灰岩渗漏带中<sup>[4]</sup>。

阿尔金断裂带是印度板块向欧亚板块俯冲而造成青藏高原隆起并向东滑移形成的,是一条活动断层。调查发现,在祁连山断层与阿尔金断裂相交的地表破裂处玉门宽滩山附近存在着大量的上升泉,泉的海拔为  $1700\text{m}$ ,而在赤金镇附近的祁连山断裂带上部泉水的海拔超过  $1800\text{m}$ <sup>[5]</sup>。

锶在海水中完全混合需  $103\text{a}$ ,而在海水中存留的时间为  $1.9 \times 10^4\text{a}$ 。因此,古海洋中锶同位素组成全球基本一致。祁连山岩层属于海相沉积,其中的碳酸盐



图3 沙丘中的根状结核

Fig. 3 Root-shaped nodule in sand dunes

岩的年代在  $600 \sim 250\text{Ma}$  之间,这个时期 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  的比值为  $0.708 \sim 0.709$ 。 $^{87}\text{Sr}$  是 $^{87}\text{Rr}$  衰变的产物, $^{87}\text{Rr}$  的半衰期为  $4 \times 10^{10}\text{a}$ 。当海相地层隆起成为大陆后, $^{87}\text{Sr}$  的含量增加,造成 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值也增大,在长英质岩石中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  的比值为  $0.718^{[6,7]}$ 。钙华与根状结核样品中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值为  $0.710345 \sim 0.713207$ (参见表1),这是由于冰川融水和降水渗入地层后首先进入陆相的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  含量高的地层,然后汇入山前深大断裂,进入海相的碳酸盐岩地层,顺着断层由东向西补给到阿尔金断裂。阿尔金断层呈西高东低,断层中的地下水也是由西补到东。阿尔金断裂在巴丹吉林沙漠东南部存在地表破裂带,大量的泉水涌出在沙漠中形成了  $144$  个湖泊。<sup>[5]</sup> 由于补给湖泊的泉水经历的途径不同,造成钙华与根状结核样品中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值存在较大的偏差。

对巴丹吉林沙漠周围的泉水、井水、河水进行取样分析(图4)可以看出,黑河河水的 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  值最高;祁连山与龙首山的泉水次之;右旗水源地、巴丹吉林沙漠湖泊、拐子湖、古日乃、额济纳盆地的 $\delta\text{D}$  和 $\delta^{18}\text{O}$

最低,根据降雨同位素分馏的高程效应,它们的补给高程最高,应该是来自祁连山冰川融雪的补给。古日乃的个别点落在蒸发线的右下方是由于发生了水岩相互作用,水中的<sup>16</sup>O与岩石中的<sup>18</sup>O发生了同位素

分馏的结果。巴丹吉林沙漠中的降雨落在全球雨水线的下方,这是由于在极干旱地区空气很干燥,雨水在下降过程中发生了同位素分馏。

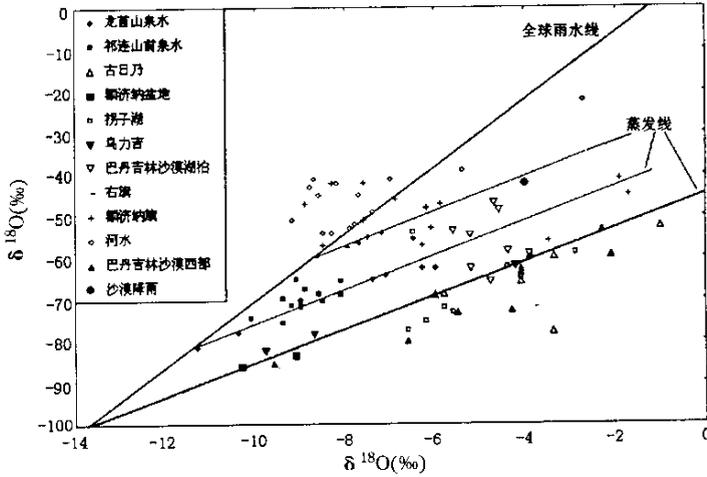


图4 巴丹吉林沙漠及其周边地区泉水、河水、地下水中δD、δ<sup>18</sup>O关系

Fig. 4 Relationship between δD and δ<sup>18</sup>O of the spring water, the river water and the groundwater in Badain Jaran Desert and the surrounding areas

### 3 水化学分析

巴丹吉林沙漠湖泊的水位高程在1150~1200m左右,拐子湖、古日乃地下水位的高程在900m以上,额济纳盆地地下水位最低。以上各等地的水化学分析结果见图5。巴丹吉林沙漠湖泊泉水中的Cl<sup>-</sup>离子含量为47.96~80.86mg/l,古日乃为127.8~141.48 mg/l,拐子湖127.8~306.3 mg/l,雅干264.2 mg/l,索果诺尔自流井417.6 mg/l。从离子的浓度逐渐增大的趋势和分布特征,可以看出地下水是从巴丹吉林沙漠补给到古日乃和拐子湖,最终补到额济纳盆地。对比分析TDS值、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等其他离子浓度的变化规律也可以得出相同的结论。由图5可以看出,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和Ca<sup>2+</sup>的浓度很低,而大部分泉水中pH都小于8,在这种条件下,近期形成钙华的可能性较小。由此分析,现代地下水的成分较历史上已经发生了较大的变化。

巴丹吉林沙漠、湖泊、拐子湖、古日乃、额济纳盆地都存在上升泉。在巴丹吉林沙漠采样的10个湖泊中大部分都存在着上升泉,其中5个未受湖水混合的泉水中的电导率在501~707μs/cm,小于古日乃(955~1232μs/cm)、拐子湖(920~1176μs/cm)和额济纳盆地(2650μs/cm)的泉水或未受污染的井水,见图5。

### 4 <sup>3</sup>H、CFC及<sup>14</sup>C测定地下水的年龄

虽然现今地下水中<sup>3</sup>H浓度受核试验的影响已经很小,但在西部地区地表水中的<sup>3</sup>H值仍然很高。<sup>3</sup>H计算出祁连山、龙首山、巴丹吉林沙漠、古日乃、拐子湖及额济纳盆地泉水及地下水的年龄在11~62a年之间,甜水井(E100°29.431,N39°06.931)、北大山山泉、古日乃浅水、拐子湖浅水和苏南巴润吉林(见图1)等地下水的年龄超过82a,是由于这些水样都来自浅层水,冲洪积层中有很多层渗透性很小的粘土层,深层越流补给到浅层的速度非常慢。

索果诺尔自流井中的<sup>3</sup>H从上世纪90年代的4TU上升到2002年7月的7.6TU和2003年7月的16.4TU,而雅干的<sup>3</sup>H值达到56.4TU,这种增加的趋势显然与核试验期间的降水补给密切相关,如此说来地下水的年龄应在40a左右。

本文亦用CFC(氟里昂)作为事件示踪剂测定地下水的年龄。CFC是一种人工合成的有机化合物,无自然形成物,有CFC11、CFC12和CFC13三种类型,1920年后开始向大气层中释放,它们在大气中出现的时间和释放到大气中的浓度各不相同,某一定时刻三种CFC的浓度也不同,因而可用以测定地下水的年龄。在额济纳盆地、古日乃及中游地区测定到的地下水年龄与<sup>3</sup>H基本相同,某些情况下CFC的年龄偏

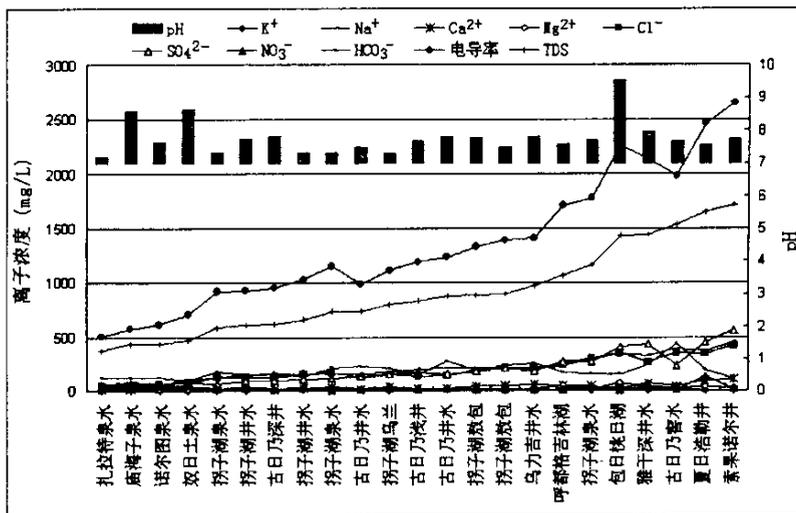


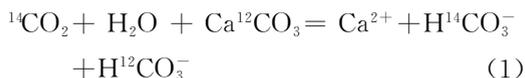
图5 巴丹吉林沙漠、古日乃草原、拐子湖、额济纳盆地泉水(湖水)或井水中水化学分析(2003年7月)

Fig. 5 Hydro-chemistry analysis of spring water (lake water) or groundwater from well in Badain Jaran Desert, Gurinai Grassland, Guaizi Lake and Ejina Basin (July, 2003)

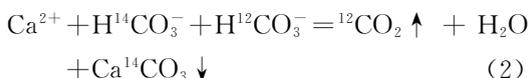
大,尤其是在索果诺尔自流井中仅测到一种CFC11,地下水的补给年龄在50~60a之间,这个结果比采用<sup>3</sup>H测定的年龄长,这是由于地层对CFC有弱吸附作用,CFC的运动速度要滞后于<sup>3</sup>H;但如假定该水是古老水与年轻水的混合,则测定出的几种CFC应该符合现代大气中的比例关系,即可同时测出CFC12和CFC13。

巴丹吉林沙漠泉水的年龄一般为10~30a,而且深层水的<sup>3</sup>H值比浅层水的高,说明浅层水是由深层水补给的。杨小平对巴丹吉林沙漠湖泊水中的<sup>3</sup>H值也进行过测定,得出地下水的年龄分布主要集中在30a<sup>[1]</sup>,与本文测定的结果相符。

<sup>14</sup>C也是一种自发衰变产生β射线的放射性物质,半衰期为5730a,一般用<sup>14</sup>C测定年龄较长的地下水。理想的示踪剂应该是在运动过程中不发生水化学反应,但在碳酸盐岩地区,CO<sub>2</sub>溶解碳酸盐岩后将发生如下反应:



这个反应是可逆的,当地下水压力降低或温度升高时,可能发生如下逆反应(同位素分馏):



在逆反应时<sup>12</sup>CO<sub>2</sub>比<sup>14</sup>CO<sub>2</sub>更容易形成,由此造成水中<sup>14</sup>C的减少,在巴丹吉林沙漠湖泊中发现的钙华就是这种逆反应的产物。所以,在碳酸盐岩地层中<sup>14</sup>C不是测定地下水年龄的理想示踪剂,结果可能

偏大;而且在强渗漏的碳酸盐岩含水层中地下水处于非平衡状态,不确定的因素很多,很难采用模型进行年龄校正。

在黑河上游水库中测到的<sup>14</sup>C平均值为62pmc,但在下游额济纳盆地地下水中的<sup>14</sup>C计算出的地下水的年龄为3000~10000a,与<sup>3</sup>H的结果相差2~3个数量级,显然是不可信的。

## 5 结 论

(1)巴丹吉林沙漠湖泊中首次发现钙华,<sup>14</sup>C测定样品的年龄为8543±172a;呼费吉浪已经干涸的湖泊底部发现植物根管根状结核沉积层,<sup>14</sup>C测定的年龄为8386±106a;伊和吉格德沙丘迎风面发现大量散落的根管根状结核残片,年龄为4420~27877a;胶结物的年龄与高程有关,高程越高年龄越大。

(2)钙华和根管根状结核中的δ<sup>13</sup>C值在-6.132‰~3.175‰之间变化,说明4000~27000a间巴丹吉林沙漠中的环境发生了很大改变,包括断层活动性、气候变化、植被发育等;首次发现高达300~500m的固定沙丘内部呈潮湿状,表明高大沙丘的形成与承压地下水的关系密切。

(3)钙华和根状结核都来自地下水中的碳酸钙沉积,沙漠湖泊泉水中的δD和δ<sup>18</sup>O落在蒸发曲线上;钙华和根状结核中的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr为0.711~0.713,高于同期海相沉积岩中的0.708~0.709,说明来自融雪的地下水经过了祁连山山前的活动深大断层;在祁连山顶

走廊南山冰川下部发现大量裸露的寒武纪、志留纪灰岩地层,推测祁连山上的冰川(平均高程5000m)雪水融化后渗入了山前的深大构造,汇入阿尔金断层并流入巴丹吉林沙漠后以泉水的形式出露,形成湖泊群。

(4) $^3\text{H}$ 和CFC测定地下水补给到巴丹吉林沙漠及其下游的年龄10~40a;因水岩相互作用,在碳酸盐岩地区采用 $^{14}\text{C}$ 测定的地下水年龄可能偏大,且不易进行年龄校正。

#### 参考文献

[1] 杨小平. 巴丹吉林沙漠腹地湖泊的水化学特征及其全新世以来的演变[J]. 第四纪研究, 2002, 22(2).

- [2] 刘再华,袁道先,何师意,等. 地热 $\text{CO}_2$ -水-碳酸盐岩系统的地球化学特征及其 $\text{CO}_2$ 来源——以四川黄龙沟、康定和云南中甸下给为例[J]. 中国科学, 2000, 30(2).
- [3] 史基安,王先彬,王填,等. 地下水补给、循环和混合作用的氡同位素证据——以石羊河、黑河流域为例[J]. 沉积学报, 1999, 17(增刊).
- [4] 伍光和. 祁连山的自然地理特征及冰川资源[A]. 见:中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊[C]. 科学出版社, 1984.
- [5] 陈建生,汪集旸. 试论阿尔金断层的导水性对西部水资源与经济的影响[J]. 水利经济, 2004, 22(4).
- [6] 黄思静,石和,张萌,等. 上扬子石炭—二叠纪海相碳酸盐的锶同位素演化与全球海平面变化[J]. 沉积学报, 2001, 19(4).
- [7] 董军社. 古海洋学中锶稳定同位素研究进展[J]. 大自然探索, 1995, 14(53).

## MEANING OF THE DISCOVERY OF LACUSTRINE TUFA AND ROOT-SHAPED NODULE IN BADAIN JARAN DESERT FOR THE STUDY ON LAKE RECHARGE

CHEN Jian-sheng<sup>1</sup>, ZHAO Xia<sup>1</sup>, WANG Ji-yang<sup>2,1</sup>, GU Wei-zu<sup>1,3</sup>, SHENG Xue-fen<sup>1</sup>, SU Zhi-guo<sup>1</sup>

(1. *Hehai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;*

2. *Institute of Physical Geography Prospecting & Geology of CAS, Beijing 100101, China;*

3. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China)*

**Abstract:** The existence of lacustrine tufa and root-shaped nodule in Badain Jaran Desert proves that the sand dunes and lakes were formed 30 ka ago, and have remained basically unchanged. Results from isotopes and water chemistry studies prove that the water in the lakes has something to do with the groundwater in the deep fault of Qilian Mountain. The lake group is just situated at the east end of the Altun fault. The deep fault of Qilian Mountain joins with the Altun fault in Yumen. The groundwater in the deep fault of Qilian Mountain converges into the Altun fault and at last to the Badain Jaran Desert. The tufa and root-shaped nodule should be formed by the groundwater that running through carbonate rocks.

**Key words:** Fault; Tufa; Root-shaped nodule; Environmental isotope; Groundwater