

相似优先比法研究巴丹吉林沙漠及周边地区地下水补给*

赵霞¹, 陈建生^{1,2}

(1: 河海大学土木工程学院岩土工程研究所, 南京 210098)

(2: 河海大学同位素水文研究所, 南京 210098)

摘要: 位于中国内蒙古西部的巴丹吉林沙漠东部存在高大固定沙丘与湖泊共存的景观, 湖泊中存在上升泉, 且沙丘内部潮湿. 沙漠以北的拐子湖和古日乃草原也有上升泉的出现. 本文采用聚类分析中的相似优先比法结合水化学因素对巴丹吉林沙漠及其周边地区不同地点的水样进行分析, 由此得出祁连山上的冰川融水与沙漠湖泊及以北地区的地下水相关性良好.

关键词: 相似优先比; 地下水; 水化学; 祁连山冰川融水; 巴丹吉林沙漠

Application of similarity priority ratio on resources of groundwater in Badain Jaran Desert and its surrounding areas

ZHAO Xia¹ & CHEN Jiansheng^{1,2}

(1: *Geotechnical Research Institute of Hohai University, Address, Nanjing 210098, P. R. China*)

(2: *Institute of Isotope Hydrology Research Academy of Hohai University, Address, Nanjing 210098, P. R. China*)

Abstract: Badain Jaran desert lies in the northwest of Mongolia. In the eastern desert, the coexistence of lots of lakes surrounding big immovable sand dunes, the peculiar influences of wateriness inside the sand dunes and ascending springs in the lakes have been found. Similar conditions occur in its north and northwest areas. In this paper, combined with hydro chemistry factors, a method similarity priority ratio is firstly applied to analyze some water samples of different positions in Badert Jaran desert and its surrounding areas. And a result that it has a good hydraulic relation on the snow water of Qilian Mountain and lakes in the desert and ground water in some surrounding areas has been given.

Keywords: Similarity priority ratio; groundwater; hydro chemistry; snow water of Qilian Mountains; Badain Jaran desert

巴丹吉林沙漠位于内蒙古西部, 是中国第三大沙漠, 拥有世界上最高的沙丘, 其间存在 144 个湖泊. 令人费解的是, 尽管沙漠终年气候干旱, 年降雨量约 40 mm, 蒸发能力达到 4000–4500 mm/a, 但至今仍然有 72 个湖泊终年有水, 其中 12 个湖泊为淡水, 现有湖泊面积超过 20 km², 湖泊中存在上升泉湖泊边缘有下降泉向湖中补给. 沙漠中的高大沙丘是固定的, 高大沙丘内部潮湿, 沙丘表层 0.2–2 m 的体积含水量在 2%–20% 之间^[1], 并且湖泊和沙丘中普遍存在钙华, 根管结核和钙质胶结层^[2–5]. 在巴丹吉林沙漠以北的古日乃草原和拐子湖等地区的湖泊中也发现为数不少的上升泉. 对这些现象的解释, 前人持不同的观点. Yang et al. 认为巴丹吉林沙漠地区历史上曾出现过 3 次温暖湿润期, 湖泊和沙丘即是由当时丰沛的降雨形成的^[4,5]. Zhang, et al., Pachur 和 Wünnemann 通过对腾格里沙漠过去 4 万年来的湖相沉积研究也认为古湖泊高水位事件 (大湖期) 是气候变暖、降雨量增加的结果^[6–9]. 且大湖期事件在北方其他部分地区同样存在, 可能是对那时全球气候变暖的响应^[10–12]. 顾恩祖等连续七年的沙丘孔隙水观测结果显示, 高大沙丘 2 m 深度

* 国际原子能机构 TC 项目 (CPR/08/15) 和国家自然科学基金 (40442001) 共同资助. 2005–08–22 收稿; 2005–09–19 收修改稿. 赵霞, 女, 1979 年生, 博士研究生; E-mail: oldbump@163.com.

处的孔隙水含水量接近最大持水量,当地年降水量和凝结量不足以对此作出解释,怀疑另有大尺度地下水系统补给沙漠^[1].最近研究表明,祁连山雪水通过深大断裂流经碳酸盐地层补给到了巴丹吉林沙漠,并维系其中的湖泊和地下水^[13].本文旨在进一步求证该结论的可靠性,并结合相似优先比法从水化学这一角度予以论证.

1 巴丹吉林沙漠地区地质背景

我国西北地区具有大型中、新生代盆地,以及在此基础上发展而成的第四纪盆地,具体表现为继承型的新构造运动,尤其在盆地边缘地段最为强烈,而盆地边界主要受一组与山脉走向一致的 NWW-SEE 向深大断裂的控制,这些断裂长期处于活动状态.河西走廊即为一个典型,由东向西可分为民勤盆地、武威盆地、张掖盆地、临泽-高台盆地、额济纳盆地、酒泉盆地及安西敦煌盆地^[14].数十年来河西地区已成为关注的焦点,一些规模巨大的断裂带^[15,16]亦得到重视并被学者不断深入地研究.河西走廊和祁连山地区,中生代以后发育了一组北北西向的构造,使得北西向褶皱带被分解为许多菱形地块或断块,其中既有隆起的地块,也有沉降的断陷盆地.北东向构造显示晚更新世以后具有强烈活动的特征,其中包括横穿青藏高原的日喀则-狼山断裂带(隐伏)和杂多-都兰-阿右旗-雅布赖断裂带,沿着断裂带地热田与温泉大量分布、地震频发^[16].地质文献以往多把北西向或北西西向构造放在重要的位置上,而对北东向构造的活动性论述甚少,根据祁连山北西向断裂带两边存在的 100-200 m 的跌水认为断裂带是阻水的^[17],而事实上在北东向断裂带附近地下水位基本上是连续分布的.研究发现地下水等水位线的梯度方向正是沿着这两条穿过河西走廊并连接到巴丹吉林沙漠的北东向断裂带分布的.

祁连山是青藏高原东北部一个巨大的边缘山系,位于东经 94°-104°和北纬 36°-39°之间达到甘肃、青海两省边界上.此巨大山系主要由前寒武纪变质岩系、早古生代变质岩系、以及这两个时期的各种火山岩系构成.祁连山脉在保留中新界以前许多重大的造山运动形成的构造基础上,经过上升幅度大千米以上的强烈隆升,逐步形成数条巨大的 NWW-SEE 向的块段山^[18].祁连山地势高亢,海拔 4500 m 以上终年积雪,4800 m 以上有现代冰川分布,该特殊的地理位置使得降水相对丰富,是河西走廊的水源供给区.广泛分布古生界-中生界地层,构造裂隙发育,所形成的基岩裂隙水甚为丰富.北部的山前平原是中新界大幅度沉降带,其间沉积数百米乃至上千米厚的第四系半胶结-疏松的山麓相、冰水相颗粒物质,是地下水运移和储存的良好场所.

巴丹吉林沙漠位于阿拉善荒漠中心,面积约 $4.92 \times 10^4 \text{ km}^2$.阿拉善高原是一个长期稳定隆升的剥蚀区,燕山运动以来,在高原南部边缘形成了一些断裂山地和盆地,多呈 NWW-SEE 和 NEE-SWW 向断续分布.受断裂构造控制,在断陷盆地中发育了巴丹吉林沙漠,在盆地边缘出露有侏罗系、白垩系及第三纪湖相层组成的丘陵^[19].研究表明,巴丹吉林地区可划分为三个构造单元:一是阿拉善地块,一个古老稳定的刚性地块,被阿尔金、贺兰山西缘与龙首山南缘三条大断裂所围限,变质基底由前震旦纪变质岩系组成,中生界较发育;二是河西走廊过渡带,夹持于龙首山南缘断裂与祁连山北缘断裂之间,东西各以贺兰山西缘断裂和阿尔金断裂为界,基底为祁连山加里东褶皱带;三是北山构造带,位于阿尔金断裂带内,呈 NEE 向伸展,基底为前震旦纪变质岩系^[20].

沙漠以北的古日乃和拐子湖一带发育有河湖相与风沙相交替沉积构成的台地,且多被风蚀雅丹所取代,河湖相以细砂、粉砂和砂粘土为主,可见厚度在 0.2-1.2m;风沙相为风成交错层清晰的钙质胶结,可测层厚 0.4-1.0m,多在河湖相之下^[19].

2 相似优先比模型的基本原理

聚类分析是一种对事物按一定要求进行分类的数学方法.相似优先比法能对多个样本和某个样本的相似性进行综合评价,其结果客观全面,已广泛应用于天气预报、地质勘探、环境保护、图像识别和农林业部门、生物医药化学等学科的理论和应用研究中,并取得了可喜的成果^[21].

相似优先比,即在所考虑的样品集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中,首先选定一个固定样品 $x_k (1 \leq k \leq n)$,然后想法找出在其余 $n-1$ 个样品中,哪些跟 x_k 最相似,哪些次之.寻找的方法,首先是以成对的样品 $x_i, x_j \in$

X 与固定样品 x_k 作比较,当 x_i 跟 x_k 的相似程度高于 x_j 跟 x_k 的相似程度时,即 x_i 比 x_j 优先.具体地说,即定义 $r_{ij} = \frac{|x_k - x_j|}{|x_k - x_i| + |x_k - x_j|}$,并令 $r_{ii} = 1, r_{ij} + r_{ji} = 1$;如果 r_{ij} 在 $(0.5, 1)$ 之间,表示 x_i 比 x_j 优先,如在 $(0, 0.5)$ 之间,则 x_j 比 x_i 优先^[21].下面结合巴丹吉林沙漠地区地下水补给问题,来说明如何应用相似优先比.

3 应用实例

3.1 数据资料

陆地水主要是从岩石圈、大气圈溶液混合中获得各种物质成分,在运移过程中经过不同温度、压力及氧化还原等复杂的地质环境,发生了化学、物理化学及生物化学反应,成分不断发生变化.水化学成分的形成与区域气候和地质环境有密切联系.水化学成分聚类分析一定程度上反映水的来源、水力联系、运移规律及其与周围环境相互作用的特征,是进行区域水资源综合利用的前提和基础.本文拟选取一个主要样本祁连山冰川融水,并选取了沙漠周边地区的 28 个地点的水样作为样本,其水化学成分都是用特定仪器测定同位素成分时一并分析的,所选水样为上升泉、自流井、湖泊水和正在使用的抽水井等,结果由地质矿产部水文地质专业实验测试中心分析得出,安全可靠,尽可能得保证了水样的质量.文中用模糊相似优先比的方法,考虑了 9 个水化学因素,分别分析这 28 个样本与主要样本的水质相似程度和优先次序,来判断它们与祁连山冰川融水的相关性(表 1).

表 1 样本及其水化学组分
Tab. 1 Hydrochemistry compositions of water samples

样本	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
	K^+ (mg/L)	Na^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	TDS(mg/L)	pH
A_{01} 祁连山冰川融水	1.8	10.2	45.3	31.4	187.9	11.3	98.3	395.7	8.0
A_1 大青山民宅	31.95	1131	531.3	103.6	86.11	1108	2472	5487.93	7.37
A_2 甜水井	9.84	633	71.15	31.64	178	733	386.5	2086.12	7.65
A_3 石岗墩	2.03	14.98	33.77	17.49	175.1	11.93	35.02	306.1	7.65
A_4 位奇东湾村水井	3.08	94.69	55.02	34.52	275.5	76.71	134.2	694.23	7.92
A_5 张掖观测井	7.46	306.4	115.7	119.7	269.8	393.8	532.1	1796.79	7.53
A_6 张肃公路泉	10.54	595.2	132.8	26.46	83.24	639.2	627.6	2193.07	9.28
A_7 白杨沟门	1.31	7.47	42.69	17.26	166.5	7.84	50.02	302.14	8.19
A_8 老洼泉	18.72	1059	371.9	150.15	269.2	1730	1050	4744.98	7.39
A_9 新华农场水井	7.32	142.4	77.79	79.39	287	64.77	493.4	1185.17	7.95
A_{10} 北武当山泉	12	824.2	26.56	32.68	722.2	571	570.9	2772.34	7.75
A_{11} 罗城黑河水	8.6	164.2	62.23	78.47	307.1	144.89	366.07	1143.67	8.23
A_{12} 古日乃井水	29.96	386.9	44.78	27.5	435.7	349.44	234.2	1533.54	7.65
A_{13} 古日乃农家	894	23710	16.7	24.51	4544	14318	18326	67938.11	9.97
A_{14} 古日乃泉水	16.8	164	18.59	19.9	229.62	127.8	133.7	737.76	7.47
A_{15} 古日乃湖泊	24.9	1587	18.97	11.51	909.9	1006	909.5	4773.03	9.76
A_{16} 雅干	4.82	325.5	74.95	39.23	241.7	264.2	432	1440.33	7.93
A_{17} 拐子湖	2.69	622	28.46	7.48	178	673.31	351.5	1914.45	8.07
A_{18} 拐子湖自流井	28.36	892.3	51.42	50.74	357.06	934.1	524.32	2887.6	7.71
A_{19} 拐子湖阿拉滕敖包	7.76	198	51.23	23.01	153.8	215.3	214.64	896.25	7.47
A_{20} 拐子湖泉	8.22	173.6	41.74	20.94	209.5	148.8	154.2	798.47	7.28
A_{21} 依克尔呼都格井	27.4	141.6	40.22	29.91	229.6	118	186.5	796.32	7.95
A_{22} 呼都格吉林井	19.25	228.3	50.66	50.85	170.5	245	275.1	1064.21	7.57
A_{23} 梧桐图泉	7.46	61.74	18.97	13.12	123.42	47.96	50.93	372.62	7.18
A_{24} 圣泉	8.02	210.5	20.87	14.96	220.4	115.52	177.4	816.9	9
A_{25} 诺尔图海子(泉)	8.24	92.11	25.24	17.26	95.29	80.86	78.22	468.77	8.66
A_{26} 右旗水库面	6.08	347	85.76	33.37	169.9	360.56	372.4	1434.52	7.67
A_{27} 庙沟水库水	6.11	508.5	50.28	52.24	207.2	399.1	565.3	1868.1	7.72
A_{28} 金昌	3.62	70.02	81.97	42.57	194.6	92.77	203.7	740.82	7.66

3.2 计算步骤

第一步, 确定相似因子. 本文拟选定祁连山冰川融水^[22]作为固定样本并用 A_{01} 表示; 其余 28 个地点依次用 A_1, A_2, \dots, A_{28} 来表示. 再把所选定的 9 个因素 $K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, TDS$ 及 PH 值作为相似因子分别用 C_1, C_2, \dots, C_9 来表示 (图 1).

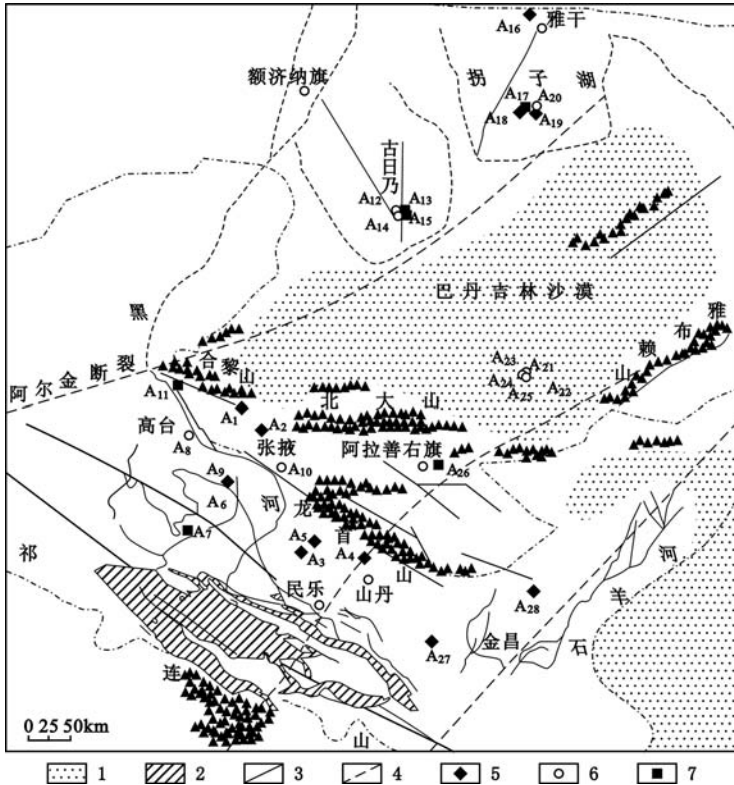


图 1 样本分布示意图

1: 沙漠区; 2: 裸露灰岩区; 3: 主要断层; 4: 推测断层; 5: 井水取样点; 6: 泉水取样点; 7: 河湖水取样点

Fig. 1 Location of water samples within the study areas

1: Desert; 2: naked limestone; 3: big fault; 4: predicted fault; 5: well samples;
6: spring samples; 7: river and lake samples

第二步, 建立相似优先比和关系矩阵. 采用相似优先比公式来建立关系矩阵, 先用祁连山冰川融水作为固定样本 A_{01} , 用 K^+ 浓度 C_1 作为例子, 那么大青山民宅 A_1 和甜水井 A_2 对 A_{01} 的相似优先比分别为

$$r_{12} = \frac{|1.8 - 9.84|}{|1.8 - 9.84| + |1.8 - 31.95|} = 0.21$$

$$r_{21} = 1 - 0.21 = 0.79$$

可见 A_2 比 A_1 更相似于 A_{01} . 用类似的方法, 算出有关 C_1 的所有 r_{ij} , 就得到模糊关系矩阵 R_{C_1} . 由于矩阵篇幅过大, 此处暂不列出. 同理, 对于其他相似因子也可以算出模糊关系矩阵 $R_{C_2}, R_{C_3}, \dots, R_{C_9}$.

第三步, 由 λ 水平评出相似程度. 根据实际情况由大到小选定 λ 值, 做出相应的矩阵 R_λ . 首先达到除对角的元素外全行都是 1 的那一行所属的地点最相似^[23]. 按全行都是 1 出现的先后, 可排成相似程度的大小顺序, 早出现的行, 表示相似程度大.

现在选 R_{C_1} 为例, λ 值分别可取除 0 和 1 以外该矩阵中所有不重复的数, 如当 $\lambda = \lambda_1$ 时, 矩阵里大于或

等于 λ_1 的元素都变成 1, 小于 λ_1 的元素都变成 0, 就得到矩阵 $R_{\lambda=\lambda_1}$, 找出除对角线外其余元素都是 1 的样本号, 并删除这些样本所对应的行列得到新的矩阵. 而这些样本即作为第一号排在与固定样本 A_{01} 最相似的位置上.

再降低 λ 水平, 即依次取小于 λ_1 的值分别用同样的方法得到新的相似样本, 切记每得到一组新的相似样本需将对应的行列删去, 然后按固定样本相似的顺序从大到小排列: 第一号: A_3 (石岗墩); 第二号: A_7 ; 第三号: A_{17} ; 第四号: A_4 ; 第五号: A_{28} ; 第六号: A_{16} ; 第七号: A_{26}, A_{27} ; 剩余样本为第八号. 同理, 考虑其他八组相似因子可得另八组相似顺序, 编号见下表 2.

表 2 28 个地点 10 个相似因子相似顺序
Tab. 2 Sequence of 10 similarity components from 28 samples

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	综合 结论 ¹⁾	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	综合 结论 ¹⁾	
A_1	8	4	7	9	14	3	16	7	12	9.391	A_{15}	8	4	7	9	16	3	16	7	16	10.123
A_2	8	4	7	1	2	3	13	7	8	6.347	A_{16}	6	4	7	8	10	3	14	7	2	6.95
A_3	1	1	7	9	3	1	6	7	8	5.076	A_{17}	3	4	7	9	2	3	13	7	2	5.937
A_4	4	4	6	5	13	3	2	4	3	4.501	A_{18}	8	4	5	9	16	3	15	7	7	8.449
A_5	8	4	7	9	12	3	16	7	9	8.803	A_{19}	8	4	5	8	8	3	10	7	10	7.344
A_6	8	4	7	7	14	3	16	7	15	9.557	A_{20}	8	4	3	9	7	3	5	6	13	6.762
A_7	2	2	2	9	7	2	4	7	4	4.256	A_{21}	8	4	4	3	9	3	8	6	1	4.971
A_8	8	4	7	9	12	3	16	7	11	9.091	A_{22}	8	4	4	9	4	3	12	7	9	7.222
A_9	8	4	7	9	14	3	15	7	1	7.651	A_{23}	8	3	7	9	11	3	3	1	13	6.782
A_{10}	8	4	7	2	16	3	16	7	6	7.752	A_{24}	8	4	7	9	8	3	7	6	14	7.74
A_{11}	8	4	7	9	15	3	13	7	5	7.993	A_{25}	8	4	7	9	8	3	1	2	12	6.248
A_{12}	8	4	1	6	16	3	11	7	8	7.126	A_{26}	7	4	7	4	5	3	13	7	8	6.858
A_{13}	8	4	7	8	16	3	16	7	16	9.99	A_{27}	7	4	4	9	6	3	16	7	8	7.736
A_{14}	8	4	7	9	9	3	2	5	10	6.395	A_{28}	5	4	7	9	1	3	9	5	8	6.209

1) 上表最后一列显示的是乘以权数的最终结果.

3.3 考虑权数

从上表各列的顺序数可以看出各个因素跟祁连山冰川融水同一因素的相似程度, 但严格地说, 各个因素对水质的影响不尽相同, 因此应给各因素一定的"权数"来考虑它们的综合因素.

由表 1 可看出, 褶皱山区潜水中的矿化度一般都很低, 而干旱地区恰恰相反, 故 TDS 的变化幅度应当很大; pH 值变化不大, 可乘较小的权数; 离子电荷越高, 阳离子交换能力越强, 同价离子哪个半径大, 交换能力也强, 阴离子若与胶体微粒或水中阳离子形成难溶性沉淀就会被强烈吸附, 且土壤胶体多带负电荷, 另考虑到祁连山顶多裸露的灰岩和活动断层, 同位素结果也证实了雪水与碳酸盐类岩石发生过相互作用^[2], 而在碳酸盐类岩石里, 离子交换多在岩石吸附体与重碳酸钙水或重碳酸镁水之间进行, 祁连山顶裸露灰岩中白云岩与方解石成分颇多, 故 $Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, Cl^-$ 交换频率最高^[24,25], 故稳定性也差; 因此各因素的稳定性可排列如下: $SO_4^{2-} > pH > Mg^{2+} > K^+ > Ca^{2+} > Cl^- > HCO_3^- > TDS$, 离子越稳定说明相似程度越接近, 权数值应当越大. 此处权数用 $\alpha_n (1 \leq n \leq 10)$ 表示, 分别赋值为 0.156、0.144、0.133、0.122、0.111、0.1、0.089、0.078、0.067 后, 按顺序乘上各自的顺序数上叠加得总和, 见表 2. 顺序数的总和越小, 跟固定样本 A_{01} 越相似, 与祁连山积雪融水的联系也越紧密.

3.4 综合评价

参考表 2 与图 2 可知, 白杨沟门 (A_7)、山丹位奇东湾村水井 (A_4) 和石岗墩 (A_3) 与祁连山融水最为接近, 原因是这些取样点皆位于祁连山脚下 (图 1), 人为干扰少, 水或是雪水经历的地质路径短, 和岩石土体等外界发生物质交换的时间短, 空间少, 基本可代表祁连山冰川的原始水化学组分, 也说明了祁连山融水本

身化学成分的稳定性;金昌(A_{28})和庙沟水库水(A_{27})的相似值比之前者偏大,分析应是受山区径流补给的影响,融水经历了一定地质体,化学成分较祁连山融水有所改变,同位素方法得出金昌和庙沟水库水两处水样是来自石羊河流域^[26],由于石羊河亦发源于祁连山,故两者验证结果基本一致;雅干、依克尔呼都格井、呼都格吉林井、拐子湖阿拉滕敖包、拐子湖自流井、古日乃牧民家井水(图2中 $A_{21} - A_{12}$)六个井水水质相仿,然相距甚远,且气候干旱均无河流补给,若为降雨不可能水质如此接近祁连山融水,怀疑有极为密切的水力联系存在其中;同理可说明这几个地区的泉水样($A_{20} - A_{14}$);古日乃和拐子湖的湖水样($A_{17} - A_{15}$)的值比井水样和泉水样大很多估计与强烈的蒸发作用有关,或长时间与周围岩土体发生离子交换变化所致;另外黑河虽然也发源于祁连山,但受自然环境及地质条件的多重影响,其水质与天然的冰川融水已大不相同,图2中黑河(A_{11})的值甚至大于巴丹吉林沙漠和下游古日乃、拐子湖等地区的井水泉水样的值,如果沙漠及其周边地区的地下水是由黑河补给的,不可能黑河样的值反而大于这些地区的值。

环境同位素分析证实巴丹吉林沙漠及其下游地区的地下水均来源于祁连山山顶冰川融水与降水的补给^[26],与本文的结论不谋而合,唯一有差异的是,甜水井(A_2)的相似值较小,同位素结果却认为其源于当地降雨,是偶然亦或另有原因还需要进一步考察和证明。

4 结语

相似优先比模型法是初步分析广阔干旱地区地下水宏观运移特征的有效方法,可为进一步具体工作指明方向。由于该地区降雨稀少蒸发量极大,降雨对地下水基本没有补给,对离子浓度影响不大;而且计算结果只与相对浓度有关。水化学成分主要与水补给来源和渗透路径有关系,如果地下渗流通道在地质时期早已经形成,则补给水与围岩化学离子交换稳定下来,渗透过程中离子交换引起的化学成分变化与地表混合引起的相比是微弱的。所以本文在缺乏沙漠腹地充分的水文地质条件基础上,应用相似优先比法对巴丹吉林沙漠湖泊及以北地区地下水补给源进行初步定性研究是可行的。该地区地下水水力联系已经被同位素研究方法所初步证实,水化学和同位素两种不同因素均得出一致的结论,即巴丹吉林沙漠湖泊及以北地区地下水与祁连山冰川融水之间的水力联系紧密。

致谢 感谢导师陈建生教授对本文提出宝贵意见。顾慰祖老师的支持与鼓励,其在巴丹吉林沙漠水现象问题研究工作中有卓越贡献。

5 参考文献

- [1] 顾慰祖,陈建生,汪集旻等. 巴丹吉林高大沙山表层孔隙水现象的疑义. 水科学进展, 2004, **15**(6): 695 - 699.
- [2] 杨小平. 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, 2000, **45**(4): 428 - 434.
- [3] 杨小平. 巴丹吉林沙漠地区钙质胶结层的发现及其古气候意义. 第四纪研究, 2000, **20**(3): 295.
- [4] Yang X P, Liu T S, Xiao H L. Evolution of megadunes and lakes in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China during the last 31000 years. *Quaternary International*, 2003, **104**: 99 - 112.
- [5] Yang X P, Williams M A J. The ion chemistry of lakes and late Holocene desiccation in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China. *Catena*, 2003, **51**: 45 - 60.
- [6] Zhang H C, Ma Y Z, Wünnemann B, et al. A Holocene climatic record from arid northwestern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, **162**: 389 - 401.
- [7] Zhang H C, Wünnemann B, Ma Y Z, et al. Lake level and climate changes between 42000 and 18000¹⁴C yr B. P. in the Tengger desert, Northwestern China. *Quaternary Research*, 2002, **58**: 62 - 72.
- [8] Zhang H C, Peng J L, Ma Y Z, et al. Late Quaternary palaeolake levels in Tengger Desert, NW China.

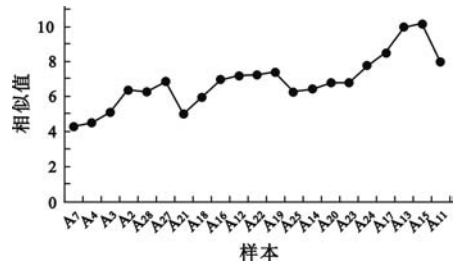


图2 主要样本相似程度变化
Fig. 2 Variation of similarity extent of main samples

- Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, **211**: 45 – 58.
- [9] Pachur H J, Wünnemann B. Lake evolution in the Tengger desert, Northwestern China, during the last 40000 years. *Quaternary Research*, 1995, **44**: 171 – 180.
- [10] Yang B, Shi Y F, Braeuning A, *et al.* Evidence for a warm – humid climate in arid northwestern China during 40 – 30 ka BP. *Quaternary Science Reviews*, 2004, **23**: 2537 – 2548.
- [11] Lehmkühl F, Haselein F. Quaternary paleoenvironmental change on the Tibetan Plateau and adjacent areas (Western China and Western Mongolia). *Quaternary International*, 2000, **65/66**: 121 – 145. .
- [12] Rhodes T E, Gasse F, Ruifen L, *et al.* A late Pleistocene-Holocene lacustrine record from lake Manas, Zhunggar (northern Xinjiang, western China). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **120**: 105 – 121.
- [13] Chen J S, Li L, Wang J Y, *et al.* Groundwater maintains dune landscape. *Nature*, 2004, **432**:459.
- [14] 陈梦熊. 西北干旱区水资源与第四纪盆地系统. 第四纪研究, 1997, **2**:97 – 104.
- [15] 高 锐,成湘洲,丁 谦. 格尔木 – 额济纳旗地质断面地球动力学模型初探. 地球物理学报, 1995, **38** (增刊):3 – 14.
- [16] 向光中,吕德徽. 青藏块体内北东向构造及其地震活动(以陕甘宁地区为例). 西北地震学报, 1987, **9** (1):62 – 68.
- [17] 丁宏伟,姚兴荣,闫成云等. 河西走廊祁连山山前缺水地区找水方向. 水文地质工程地质, 2002, **6**:17 – 20.
- [18] 伍光和. 祁连山自然地理特性与冰川资源. 中国科学院兰州冰川冻土研究所编. 兰州冰川冻土研究所集刊第 5 号(祁连山冰川变化及利用),北京:科学出版社, 1985:1 – 2.
- [19] 闫满存,王光谦李保生等. 巴丹吉林沙漠高大沙山的形成发育研究. 地理学报, 2001, **56**(1):83 – 91.
- [20] 孙跃武,段吉业,程立人. 巴丹吉林地区中生代地层区划. 长春科技大学学报, 1999, **29**(4):324 – 329.
- [21] 黄健元主编. 模糊集及其应用. 银川:宁夏人民教育出版社, 1999:111.
- [22] 聂振龙,陈宗宇,程旭学等. 黑河干流浅层地下水与地表水相互转化的水化学特性. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, **35**(1):48 – 53.
- [23] 张 跃,邹寿平,塑 芬主编. 模糊数学方法及其应用. 北京:煤炭工业出版社, 1992:274 – 285.
- [24] (苏)比契叶娃 KE 主编. 水文地球化学——地下水化学成分的形成. 北京:地质出版社, 1981:189 – 258.
- [25] 钱家欢,殷宗泽主编. 土工原理与计算. 北京:中国水利水电出版社, 1996:15 – 16 .
- [26] 陈建生,樊哲超,汪集旻等. 巴丹吉林沙漠湖泊及其地下水同位素分析. 地球学报, 2003, **24**(6):497 – 504.