

干旱区高山—盆地系统深部水资源的赋存和估算 ——以河西走廊西段为例

姚足金, 陈德华, 姚 洪

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061)

摘要: 现行西北地区水资源评价, 是基于下列水文地质概念模型: (1) 作为主要补给源地的山区, 其与盆地之间存在“阻水屏障”; (2) 山区形成的地下水基本上已全部汇入出山河谷, 流向盆地绿洲, 经实地勘察水化学同位素分析与资料研究, 认为现行“模型”不符合地质实际。在引用国外高山区产流数值模拟成果的基础上, 采用比拟法估算出研究区, 由山区通过基岩向盆地绿洲作侧向补给的大致数量。新概念模型的建立, 意味着西北高山—盆地系统的绿洲基岩不深处, 赋存着相当数量以前未被计入的、可供开发的水资源。

关键词: 高山—盆地系统; 水资源; 侧向补给; 河西走廊。

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)03-0291-06

作者简介: 姚足金(1935), 男, 研究员, 1956年毕业于北京地质学院, 长期从事地热能研究。

1 问题的提出

几十年来, 河西走廊水资源研究中, 对山区与盆地之间的关系认识是明确的, 不同研究者之间的认识也是一致的。“盆地南缘沿着祁连山麓大断层带可见由冲断层组成的叠瓦构造, 这个压性大断裂带及其派生的山麓中新界褶皱, 构成一条阻水屏障, 使大部分地段祁连山区的地下径流不能直接流入盆地”^①。“山区河流多数是山区基岩裂隙水的排泄通道, 地下水在河流出山之前几乎全部转化为地表水, 经河道流出山外…”^[1]。这里涉及3个问题:

(1) 是否存在“阻水屏障”? “阻水屏障”的认识基本上是建立在祁连山麓大断裂带的构造力学属性的基础上。众所周知, 许多大型、超大型断裂带在漫长地质进程中, 其力学属性在不断变换, 由于地下水系统补径排的水文交替周期一般小于几万年, 因此, 如果用断裂带力学属性来论证其水理性, 那么, 重要的应是断裂带最近几十万年(全新世—更新世晚期)以来的表现。另外, 大型断裂带总是由许多不同序次

的小构造组合而成, 这些不同序次构造的力学属性往往各不相同, 而恰恰是这些小构造的开启性, 对地下水赋存、流动起着决定性作用。地质学家研究地质问题时, 用逆断层、逆掩断层带来表示祁连山前大型断裂带, 这是完全正确的, 水文地质学家由之作水理性的演绎就可能导致谬误。

(2) 补给源地的地下径流是否绝大部分已由河系排出? 通常是把水文网切割深度作为地下水交替带的下限, 但这不等于说, 在该深度之下都属调节储量或静储量范畴, 不存在值得考虑的、具有开发价值的径流活动, 因为, 一定深度以浅的地下径流活动仅受地形重力驱动, 是与水文网切割深度不相干而大体上服从达西定律的流体运动。

(3) 山区和盆地, 无论从地质构造、地貌发育还是水文地质上, 都是有内在联系的一个系统的两个组成部分, 但是与盆地相比, 我们对山区——尤其是高山区, 缺乏水文地质常规观测、测试, 对地下径流的产流过程、流动机制、径流流向, 很难进行具体的讨论, 这种实践活动中的不平衡导致现今理论上的缺陷, 是否需要把“山—盆”作为一个系统, 重新认识盆地水资源的形成、赋存和分布?

祁连山前基岩侧向补给问题, 在实践上提出一个河西走廊有无可能存在一种潜藏的可供开发的水

收稿日期: 2000-08-29

基金项目: 原地质矿产部“九五”资源与环境科技攻关项目 (No. 95-02-017)。

①甘肃省地质局地质研究所. 河西走廊地下水分布规律及井灌区合理配置, 1979.

资源的科学猜想;在理论上提出一个认识“活动构造山区地下径流系统特征”的学术命题。

2 山前断裂带输水的可能性

2.1 逆冲断层和流体

祁连山前,河西走廊地区逆冲断层及由之组成的叠瓦构造,是十分突出的构造现象,老地层逆冲于下更新统之上,推覆距离约 10 km^[2]。逆冲断层发生的条件是:底部流体压力等于或大于整个推覆体的负荷压力^②。毫无疑问,这里涉及的流体是与岩石变质、矿物晶格变化相联系的流体,我们还不清楚参与地质活动的流体,与参与大气环流的地下水,两者间是否存在直接的补给、均衡联系。稳定同位素研究表明,在有些情况下,大气降水可直接环流至地壳 15 km 深处^[3],造山过程和构造驱动,可以使流体发生大规模水平运移,距离达数百 km^[4]。事实上原苏联科拉超深钻在 9 km 处还发现了重力水和高渗透性破碎带。似乎可以这样说:逆掩断层面的底部存在流体活动,不排除部分大气成因地下水的参与。

2.2 活断裂带断层泥中的地下水溶蚀现象

由于断层面上存在地下水的活动,断层泥中的石英颗粒表面被溶蚀,国家地震局地质所、兰州地震所对河西走廊一些主要断层作了取样研究^[5],我们从而获知昌马断裂、阿尔金断裂等断层面中都发生了地下水溶蚀,值得注意的是许多样品取自通常认为的压性断层面上,有些取自通常认为起阻水作用的糜棱岩。阿尔金断裂带断层泥含水量(质量分数)为 3.8%~5.6%^[6],后面将要提到的昌马峡中的昌马断裂带断层泥含水量为 1.5%~12.2%^③。

2.3 大型断裂带力学属性的转换

力学属性的转换,包含分属时、空两种范畴的涵义。当今地质学家对阿尔金断裂带的地球动力学属性有三种相互分歧的认识,但在有关第四纪以来构造力学属性的认识是一致的,上新世末、早更新世为强烈挤压,中更新世转为挤压兼平移,晚更新世晚期以来以走滑为主^[7]。昌马断裂带,第三纪末为挤压逆冲,中更新世晚期至晚更新世转化为以走滑为主,晚更新世以来为具有倾滑分量的左旋走滑运动^[7]。

阿尔金断裂破碎带总体宽 1~2 km,由一系列

低序次的伸展构造和挤压构造组合成,前者表现为以正断层为边界的盆地或断陷,一般长 0.5~1 km,宽 100~300 m,地面有时形成 1.3 m 高的断崖,后者除了叠瓦状逆冲断层外,还可见到断错冲沟,水平错距 20~30 m。昌马断裂带(指石包城至大泉口,全长 120 km 这段),由 15 条不连续的次级剪切断层按一定的几何形式呈雁列组成,不同阶区内形成力学属性或为张或为压的岩桥区^[7]。对 1932 年昌马地震破碎带的研究表明:一万年以来断层左旋滑动水平距离 55 m,北盘相应的上升量 27 m,沿倾向拉张的距离达 7.7 m;1932 年地震活动是在小的时间尺度上重现全新世的断层活动,左旋水平位移(6.2±0.6) m,垂向位移大于 1 m^[8]。

综上所述:中更新世以来,两大断裂带可以视为是由一系列构造位移空间组合而成,岩体张裂尺度之大,足以使地下水从中流动。

2.4 昌马峡山前断裂带基岩中的承压水

昌马峡谷长 7.5 km,位于阿尔金断裂系与昌马断裂系的复合处。可见古生界由南向北逆掩在下更新统砾岩之上,该砾岩又被断层切成向北斜掀的地貌。水利工程勘测表明^④:坝区(1.5 km×0.8 km)范围内共有断层 315 条,基本上都未胶结,灰岩岩溶发育深度大于 80 m,最大洞径 1~2 m。右岸距河 60~100 m 处,由于岩溶发育,导致宽 10~50 m 范围的地下水位较河水面低 2.0~3.5 m。“1991 年 5 月在右岸钻进 18 号孔,于孔深 136.20 m 在凝灰质砾岩底部见裂隙承压水,压力水头 102.94 m,高出河面约 6 m,涌水量 10~20 L/s,水质为 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Cl}^- - \text{Mg}^{2+}-\text{Ca}^{2+}$ 型,矿化度为 6.04 g/L, pH 值为 7.2,永久硬度为 144.98 度”。1966 年水文地质普查报告^④中有如下记录:“昌马总队在昌马峡右岸钻进中,于孔深 137 m 的凝灰质砾岩底部见有承压裂隙水,压力水头 105 m,超过河水面约 6 m,钻孔涌水量达 10~20 L/s,说明山区尚有深层脉状承压水分布”。

我们不知道这 2 个钻孔的确切位置,根据相隔 25 年得出水文参数完全相同的钻探结果来看,无疑,在主要由奥陶系厚层灰岩组成的右岸,存在一股相当稳定的自成系统的大流量、高矿化地下水,鉴于其高矿化特征,不大可能是单纯的岩溶水,更多可能是与深部断裂裂隙有联系的地下水。整个峡谷区都可看作“山前断裂带”的上盘,在断层如此密集的岩

② William S Fyfe. 流体活动与板块构造. 地质参考资料, 1984.

③ 甘肃省水利水电勘测设计院. 甘肃省疏勒河昌马水库工程可行性研究阶段工程地质勘察报告, 1991.

④ 甘肃省地质局水文地质工程地质队. 河西走廊疏勒河中游地区水文地质普查报告书(1:20 万), 1966.

块上,很难根据 2 个一百多米的钻孔判断是否进入主断裂. 18 号孔至少表明了这一点:现今水文网并没有把山区地下水基本上都已排泄携出,山区基岩——尤其是碳酸盐岩中,可能发育着大流量的地下水系统.

3 山区“侧向补给”的水化学迹象

我们从敦煌到玉门镇;从野马山北麓一直到疏勒河谷,取了 43 个地下水样(极少数为河水)作 H, O 同位素和水化学全分析,其中 6 个作 C^{14} 测年. 研究区的井都位于绿洲区,深度绝大多数小于 80 m,只有 3 口机井深为 120~150 m,一口为 200 m. 广大荒漠、山区地下水样取自基岩中的上升泉.

利用环境同位素论证“侧向补给”问题,我们提出这样的思路:首先,寻找山区地下水在“三水转化”之前的相对原始组成;随后考虑绿洲地下水组分中能否发现这种相对原始组成.

3.1 地下水的补给源区和流动径迹

把 43 个水样作成常规的 $\delta(D)-\delta(O^{18})$ 关系图,用最小二乘法求出雨水线方程,得: $\delta(D)=7.02\times\delta(O^{18})-1.30$,相关系数为 0.88. 所得方程斜率小于 8,符合世界干旱区雨水线的普遍规律(视干旱程度,变化于 4~6),表明所测数据总体上是可信的.

根据水样点的地理位置联系其在雨水线上分布情况,由坐标系上的低值至高值,可明显区分为 I, II, III(III₁, III₂)和 IV 4 个区. 地下水同位素组成的这种分区,记录着它们在补给源区和流动历程上的差异.

I 区,由 3 个泉样组成,都出自山前断裂带的基岩:朱家大山北沿断层的 41 号(泉点高程 2 418 m);南截山南沿的 46 号(泉点 1 640 m)和野马山北麓的 44 号(泉点 3 160 m). I 区同位素组成最轻,反映的是最少经受蒸发作用和混合作用影响的地下水,是可代表“三水转化”前、相对初始态的地下水. II 区主要为敦煌绿洲地下水,在研究区的绿洲中,其同位素组成最轻,这明显是受补给源高程较高的影响. 党河源自党河南山,雪线高度为 4 800 m,疏勒河源自大雪山,雪线高度 4 600 m,两者相差 200 m,两个水系的绿洲地下水,其平均 $\delta(O^{18})$ 值相差 -1.5×10^{-3} ,按 $\delta(O^{18})$ 高度效应计算,与之基本吻合. III₁ 区是沿昌马河从野马山(43 号泉),经总干渠至黄花、饮马农场,由于沿程流速较快,较少蒸发影响,基本上没

有支流汇入,地下水同位素组成相对为轻;III₂ 区为昌马扇的前缘汇入河谷部分,经“三水转化”蒸发影响增大,大量支流汇入,使该区同位素组成较重. IV 区主要为疏勒河谷的双塔水库至安西段,处在安西总干渠的影响范围,由于长期持续蒸发,同位素组成最重. 从 III₁, III₂ 到 IV 区,同位素组成顺河流向越来越重.

3.2 未经“三水转化”的地下水类型

采用同属大雪山补给源区的水样作 $\delta(O^{18})-\rho(TDS)$ 散点图,并标示测年数据(图 1). 从散点分布,可以看出两种统计趋势,分别标以“蒸发线”和“混合线”. 结合测年数据可知研究区大致存在 4 类未经三水转化的地下水:基岩新淡水;基岩老淡水;基岩新咸水和表生咸水(白垩系溶滤水等). 基岩新咸水与第四系中的咸水相比,同位素组成显著为轻. 昌马峡谷钻孔揭示出的高矿化水,是否属于基岩老咸水,缺乏资料我们只能存疑.

3.3 绿洲地下水形成中蕴含深部基岩水的混入

选昌马绿洲大致处在同一径流方向上的水样点,疏 2,9,6,7 作混合作用图解. 以基岩新淡水 43 号和基岩新咸水 41 号为两端元,作 6 水点的 Cl^{-}, SO_4^{2-} 与矿化度的关系线. 为了表明端元咸水不能采用“表生咸水”,把后者(12 号)亦标示于图上(图 2),它明显与关系线偏离. 混合图解的直线性很清楚,可以根据线段比例得出两端元水份各占混合比.

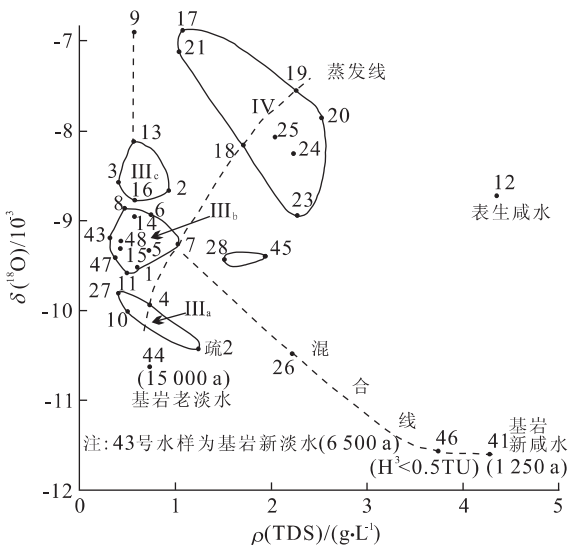


图 1 大雪山—祁连山—疏勒河谷地下水类型分析

Fig. 1 Analysis of groundwater type based on chemistry and isotope, samples from Qilian mountain to Changma basin

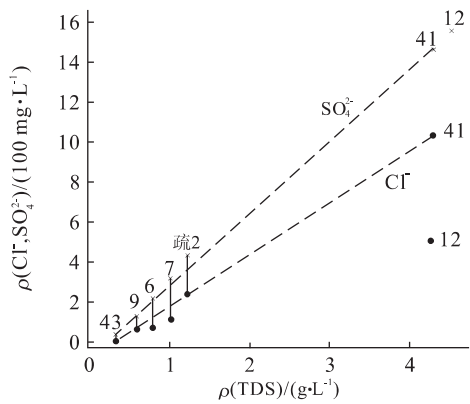


图 2 昌马扇绿洲地下水中浅部水与深部水的混合作用
Fig. 2 Diagram showing mixing deep water into the shallow water within Changma fan

从疏 2 井到 7 号井发生的混合作用,当然不会是该两端元水远程而来的混合,43 号水样代表的是以地表径流形式出现的淡地下水,而 41 号水样代表的是绿洲底部就近基岩中的咸水.从 9 号井到疏 2 井,基岩咸水的份额由 5% 增为 22%,这或者可作这样的解释:疏 2 井相对最深,离基岩相对最近,淡水的侧向混合作用相对为弱.

综上所述,基岩山区水文网切割深度下,仍赋存地下径流,在地形高差 2~3 km 的重力驱动下,从山区流向 50 km 外的盆地,这股地下径流有咸水;亦有淡水.水化学资料似乎不支持“山前阻水屏障”的存在.

4 山区基岩侧向补给量的估算

我们在完全缺乏山区水位、地下流体压力、地层

渗透性、深部水温等实测数据情况下,引用国外有关的数值模拟成果^[9,10],选用其地质、地形、气候条件和相关参数与研究区相近的模型,把该模型的产流量比拟为本区的产流量.用类比法得出山区产流总量后,扣除进入水文网的径流量,就可用达西定律计算水文网切割深度下,有多少径流流向绿洲基岩不深处.

4.1 高山区产地下径流的数值模拟方法简介

概念模型——地形起伏:在 6 km 距离内有 2 km 垂直高差(参见图 3),斜坡按凸形、凹性分别模拟;图中 2 条垂直边界线为隔水边界,分别代表山顶和谷底的中心线;山体由渗透性不同的 2 层组成,上层渗透性(K_u)高,下层(K_b)低,分界面在谷底下 2 km 深处,谷底下 4 km 深处为隔水、导热的底界;有效入渗量(I_z)为该气候、地质、地貌条件下的最大补给量;地面温度和大地热流都取区域平均值.

数学模型——用 2 个相耦合的偏微分方程描述流体流动和与之同时的热量传输,耦合求解用有限元法,用迭代法对每一个特定模型求出:单位宽度二维垂向剖面中的水位高程,等温线分布和产流总量.

4.2 侧向补给量的半定量估算

我们选用文献^[9,10]中的 C4 模型代表昌马河上游的高山产流区,为了便于探讨某些问题,把 C3、B7 两模型亦一并列出(图 3).

C4 模型与位于海拔 4 000 m 以上基本产流区的大雪山、香毛山,在地形轮廓、山坡高度、斜度上都近似(参考图 4).由于我们并不清楚“猜想”中的深部径流系统,它的大致埋深,不清楚它赋存处的确切的岩性组成,这给确定渗透系数带来困难.文献

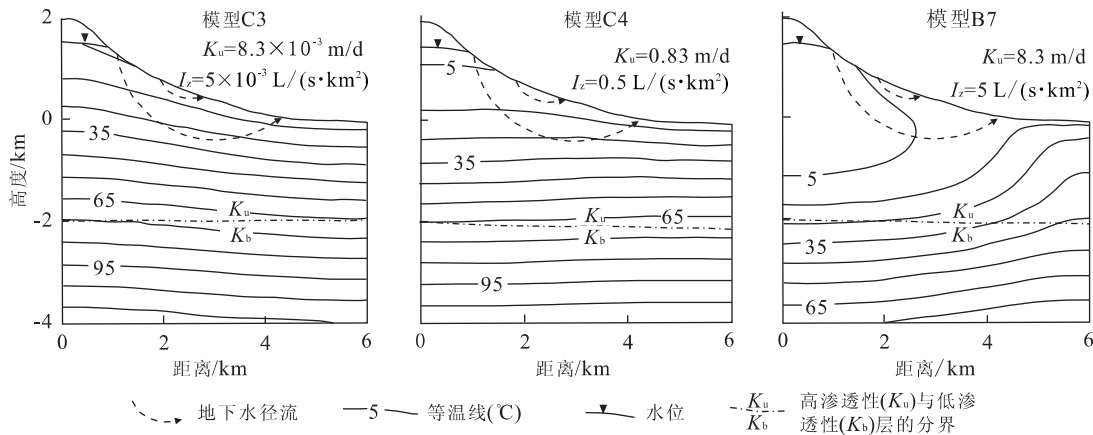


图 3 不同渗透系数(K_u, K_b),入渗补给量(I_z)参数的山区产流数值模拟模型^[9,10]

Fig. 3 Numerical simulation models for generating runoff in mountain area with different parameters (K_u, K_b, I_z)

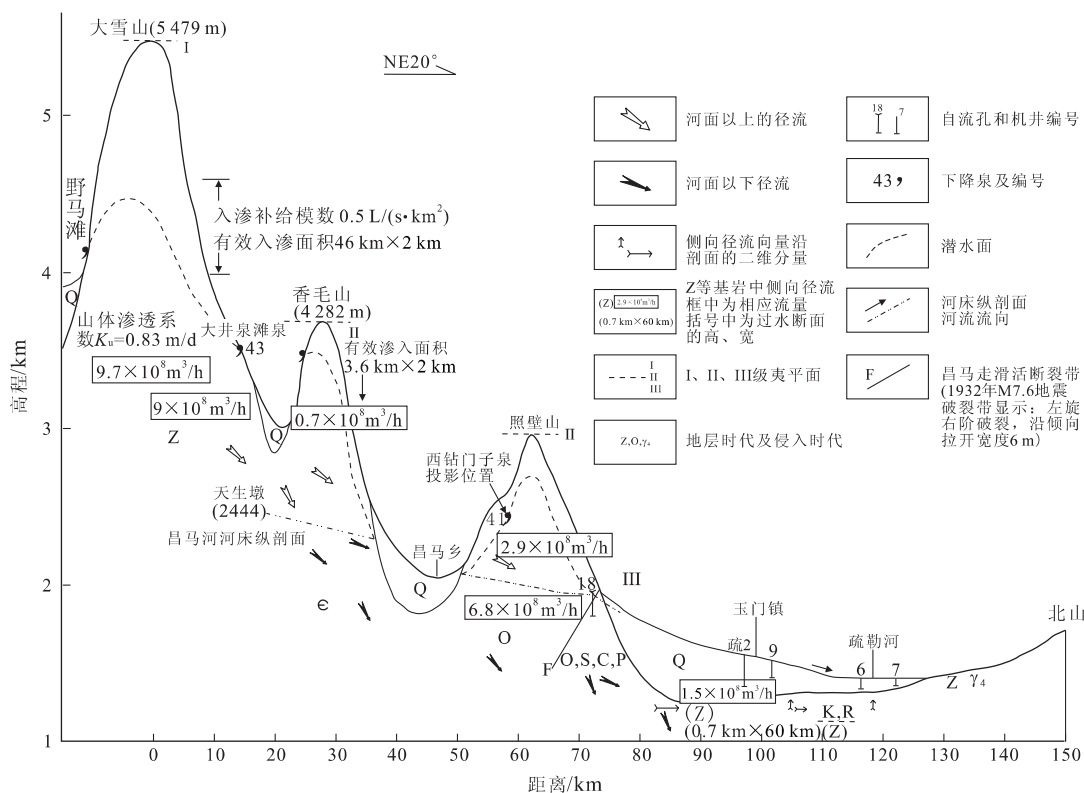


图 4 祁连山北坡—昌马河流域基岩地下水侧向补给示意

Fig. 4 Schematic map showing groundwater recharge laterally from north slope of Qilian mountain to Changma basin through base rock

[3]报道,在 km 级尺度上,2~3 km 以浅的大陆地壳结晶岩石的平均渗透率为8.3 m/d,我们选用 $K_u=0.83\text{ m/d}$ 的C4模型,应该说是偏保守的.有效入渗量 I_z ,根据《祁连山北坡地下径流模数等值线图》^⑤所示 $1.0\sim0.1\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$,取大致的中值 $0.5\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$,符合C4模型.为了把C4模型得出的单宽产流量转换为补给源区的实际流量,需要确定“模型宽度”,在二维剖面模拟中,模型宽度等于入渗补给区的宽度,这可从1:20万地形图上量得,昌马河源区4000 m高程至冰川底界之间的斜坡(呈北西走向,向北东倾)宽度,约为46 km.

将C4模型的总流量 $19.55\times10^6\text{ m}^3/\text{a}$,乘46 km $\times$ 1 km,得大雪山区产地下径流量为 $9\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$,用同样方法可求出香毛山的产流量为 $0.7\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$,这样,昌马河上游高山区的地下径流总量为 $9.7\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$.

昌马堡水文站以上河段在平水年份的河流出山径流量平均为 $8.29\times10^8\text{ m}^3$,其中地下水占 $2.9\times$

$10^8\text{ m}^3/\text{a}$ ^[11],把总产量减去这部分数量,即可得昌马河源山区水文切割网之下的径流量,为 $6.8\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$.

水文网下的这股径流,将在地形重力驱动下,按达西定律向盆地基底运移,从照壁山到疏勒河的水平距取50 km(图4),水头差700 m,得 $J=0.014$,从地形图量出照壁山—朱家大山北坡的宽度约为60 km,按700 m充水高度计算,得地下水过水断面为 $0.7\text{ km}\times60\text{ km}$.渗透系数(m/d)(据文献^[10]):裂隙性侵入岩、变质岩为 $0.83\sim8.3\times10^4\text{ m/d}$;喀斯特灰岩为 $8.3\times10^2\sim8.3\times10^6\text{ m/d}$,我们取该两类岩石的中间值,得 $K=0.83\text{ m/d}$.代入达西定律可算得昌马河山区通过基岩向绿洲作侧向补给的数量为 $1.5\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$.

可以把该山—盆系统的水资源分配作出概括:设大气降水年补给量为1,则1/3成为地表径流,2/3成为地下水;地下水中1/3由水文网进入出山河谷,其余2/3呈潜流运移;潜流中的1/4(即 $1.5\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$)通过侧向运移进入绿洲底部基岩不深处,其余3/4赋存的层位相对较深.或者换一种表述:参

⑤甘肃省地质矿产局地质研究所.甘肃省河西走廊地下水分布规律与合理开发利用研究,1983.

与三水转化的地下水只占年产地下径流总量的1/3, 绿洲基岩中存在潜在的水资源开发前景.

4.3 有关绿洲基岩中潜在水资源的讨论

(1)基于水文小周期的现行水均衡计算,测不准受控于水文大周期的均衡变化.“估算”得出的径流量,要比传统均衡法计算结果高出许多,从现行水均衡原则上似乎不能接受这一结果.我们认为,现行水均衡法中的参数,描述的是本年度或最长为 20 多年中的水文、气候环境,而地下水年龄通常都在距今 $10^3 \sim 10^4$ a 的数量级,众所周知我国水文气候在这数量级的年代中曾有过不可忽略的干湿冷暖变化.就地表径流来说,干旱区温度升高 1°C ,降水增加 10%,会使地表径流量增加 50%;升温 1°C ,降水减少 10%,会使径流减少 50%^[12].气候变化对地下径流无疑应有类似的水文效应.(2)就寻找大型水源地来说,盆地水资源勘察的重点,应是包括岩溶水在内的深部基岩水.(3)盆地存在低温地热水赋存的前景.图 3 三模型所示等温线表明,从模型 C3, C4 到 B7,随 K 值增大,温度场由传导传热转变为对流传热为主,以 B7 模型为例,在“谷底线”的地面上打一口千米孔,设地面年均气温为 7°C 或 9°C ,则该井可得 $42 \sim 44^\circ\text{C}$ 的热水.河西地区构造活动剧烈,发现 K 值增大的含水部位是完全有可能的.这里提出一种新的区域水资源开发策略——着眼于区域经济的整体发展,在部署冷水资源勘察研究的同时,启动热水资源勘察.

参考文献:

[1] 陈隆亨,曲耀光.河西地区水土资源及其合理开发利用

[M].北京:科学出版社,1992. 69.

- [2] 李玉龙.河西走廊地质构造基本特征以及榆木山北麓与黑河口上龙王断层研究[J].西北地震学报,1988, 10(2): 8—11.
- [3] David Deming.大陆地壳中热和流体的灾变性释放[J].Geology,1992, 20(1): 83—86.
- [4] Torgerson T.地壳规模的流体运移——量级和机制[J].地质科技动态,1990, (18): 24—26.
- [5] 国家地震局地质研究所,兰州地震研究所.祁连山—河西走廊活动断裂系[M].北京:地震出版社,1993. 146.
- [6] 国家地震局.阿尔金活动断裂带[M].北京:地震出版社,1992. 28, 31, 86—93.
- [7] 国家地震局兰州地震研究所.昌马活动断裂带[M].北京:地震出版社,1992. 16, 44, 46.
- [8] Peltzer G, Tapponnier P, Gaudemer Y, et al. Offsets of Late Quaternary morphology, rate of slip, and recurrence of large earthquakes on the Changma fault (Gansu, China) [J]. JGRV, 1988, 93(B7): 7793—7812.
- [9] Forster C, Smith L. Groundwater flow systems in mountainous terrain. 1. Numerical modeling technique; 2. Controlling factors [J]. WRR, 1988, 24(7): 999—1023.
- [10] Forster C, Smith L. Fluid flow in tectonic regimes: fluids in tectonically active regimes of the continental crust [M]. Vancouver: Mineralogical Association of Canada, 1990. 1—42.
- [11] 赖祖铭.祁连山区河流的补给及径流量随高度的变化[J].中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊,1984, (5): 124—130.
- [12] 赖祖铭.气候变化的水文效应[J].干旱区地理,1989, 12(2): 52—53.

OCCURRENCE AND ESTIMATE OF DEPTH GROUNDWATER -RESOURCES WITHIN HIGH MOUNTAIN-BASIN SYSTEMS IN ARID REGIONS: A CASE STUDY OF WESTERN HEXI CORRIDOR, GANSU PROVINCE

Yao Zujin, Chen Dehua, Yao Hong

(Institute of Hydrogeology & Environmental Geology, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: The present water-resources assessment for northwestern China is based on such hydro-geological concept model: (1) A barrier resisting water exists between mountains as a main source of runoff and basin ; (2) Almost all groundwaters generated in mountain area are converged into the river

(下转 327 页)