

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.02.020

利用环境同位素识别共和盆地地下水补给特征及其环境指示意义

刘春雷^{1,2}, 杨会峰^{1,*}, 曹文庚¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 自然资源部地下水科学与工程重点实验室, 河北 石家庄 050061)

摘要:共和盆地地处黄河流域生态保护“一带五区多点”空间布局的水土保持区,地下水是盆地的主要供水水源,也是维持盆地脆弱生态系统的关键因子。针对该区域地下水补给路径不清、深层与浅层地下水相互作用机理认识不够深入的问题,笔者利用氢、氧同位素与¹⁴C同位素,探讨了区域地下水补给机理及其对生态环境的指示作用。研究表明,盆地地下水补给源主要为哇洪山和青海南山山区河流侧向入渗补给;潜水主要为1952年以后降雨入渗补给,循环交替较快。承压水¹⁴C年龄最高达19384.7 a,盆地西部边界和东部排泄区地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 特征相似,¹⁴C测年年龄相近,其补给来源主要为形成于距今10000~60000 a冰期时古水,反映共和盆地与西部茶卡盆地没有明显的水力联系。中部承压水受山区降雨侧向入渗和沙珠玉河入渗补给,地下水年龄较盆地西部边界和东部排泄区年轻。该研究揭示了共和盆地地表水、潜水和承压水之间的补给-排泄相互转化关系,对盆地水资源开发和生态环境保护具有重要意义。

关键词:同位素;地下水年龄;地下水循环;共和盆地

中图分类号:P641

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)02-0227-10

Identify Groundwater Recharge Characteristics and Environmental Implications in Gonghe Basin Using Environmental Isotopes in Gonghe Basin

LIU Chunlei^{1,2}, YANG Huifeng^{1,*}, CAO Wengeng¹

(1. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Science, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, Hebei, China)

Abstract: Gonghe basin is located in the soil and water conservation zone of the Yellow river basin ecological reserve. Groundwater is the main water supply source and also the key factor for maintaining the fragile ecosystem in this basin. However, the path of regional groundwater recharge and the mechanism of deep and shallow groundwater interaction are still unclear. Using hydrogen, oxygen and ¹⁴C isotopes, the mechanism of regional groundwater recharge and its indicative

收稿日期:2021-05-01;修回日期:2021-12-01;网络发表日期:2022-05-10;责任编辑:姜寒冰

基金项目:中国地质调查局“共和盆地水文地质环境地质调查评价”(1212011220944)。

作者简介:刘春雷(1984-),男,安徽省颍上县人,助理研究员,硕士,主要从事水文地质、环境地质研究。E-mail:chunleiliu-dn@163.com。

*通讯简介:杨会峰(1977-),男,高级工程师,主要从事水文地质与水资源研究。E-mail:yanghuifeng@mail.cgs.gov.cn。

effect on ecological environment are discussed in this paper. Results show that lateral infiltration recharge of rivers from Wahong Mountain and Qinghai South Mountain is the main groundwater recharge. The recharge of unconfined groundwater is mainly from infiltration of rainfall after the year 1952 with rapid cyclic alternation and the ^{14}C age of the confined groundwater is up to 19384.7a. The groundwater characteristics of $\delta^{18}\text{O}$, δD and the ^{14}C age are similar both in the western boundary of the basin and the eastern drainage area, and its recharge source is mainly from ancient water formed during the ice age of 10 000—60 000a ago, which reflecting that there is no obvious hydraulic connection between the Gonghe Basin and the western Chaka Basin. The age of the confined groundwater in the middle of the basin is younger than that in the western boundary and the eastern drainage area. For the middle part of the basin, rainfall and Shazhuyu river infiltration are the main recharge. This study reveals the mutual transformation of recharge-discharge among surface water, unconfined groundwater and confined groundwater in Gonghe basin and is of significance for developing and managing groundwater in this area.

Keywords: isotopes; groundwater age; groundwater circulation; Gonghe basin

共和盆地位于黄河流域上游,地下水是盆地内重要的供水水源,是维系盆地生态系统安全的重要因素,水资源短缺与不合理利用是区域经济社会和可持续发展面临的严峻问题(崔亚莉等,2001;汤奇成,2001;王晓玮,2020)。目前,部分地区地下水与地表水之间的转化关系不清,潜水与承压水之间的相互转化关系不明,制约着地下水资源评价和水资源可持续利用(沈振荣,1992)。1950年,在共和盆地开展了1:20万综合地质-水文地质普查及农业区1:10万农田供水水文地质勘查;1980年,进行了1:20万水文地质普查,在重点矿区进行了多次物探和化探工作;开展了共和盆地南缘山前平原地下水资源研究;采用断面径流量法和补给量总和法计算了研究区地下水天然资源量(权国苍,2015);运用地下水化学同位素方法研究地下热水水文地球化学特征及地热成因分析(李永革,2016;侯兆云,2019;马月花等,2020;朱贵麟等,2021)。以往工作通过传统水文地质调查的手段,形成对共和盆地地质、水文地质条件的基本认识,但无法满足黄河流域生态保护的需求。现阶段生态保护的首要任务是降低水资源开发利用强度;控制社会水循环对自然水循环的干扰;查明盆地区域水循环特征对维持盆地生态系统安全至关重要。

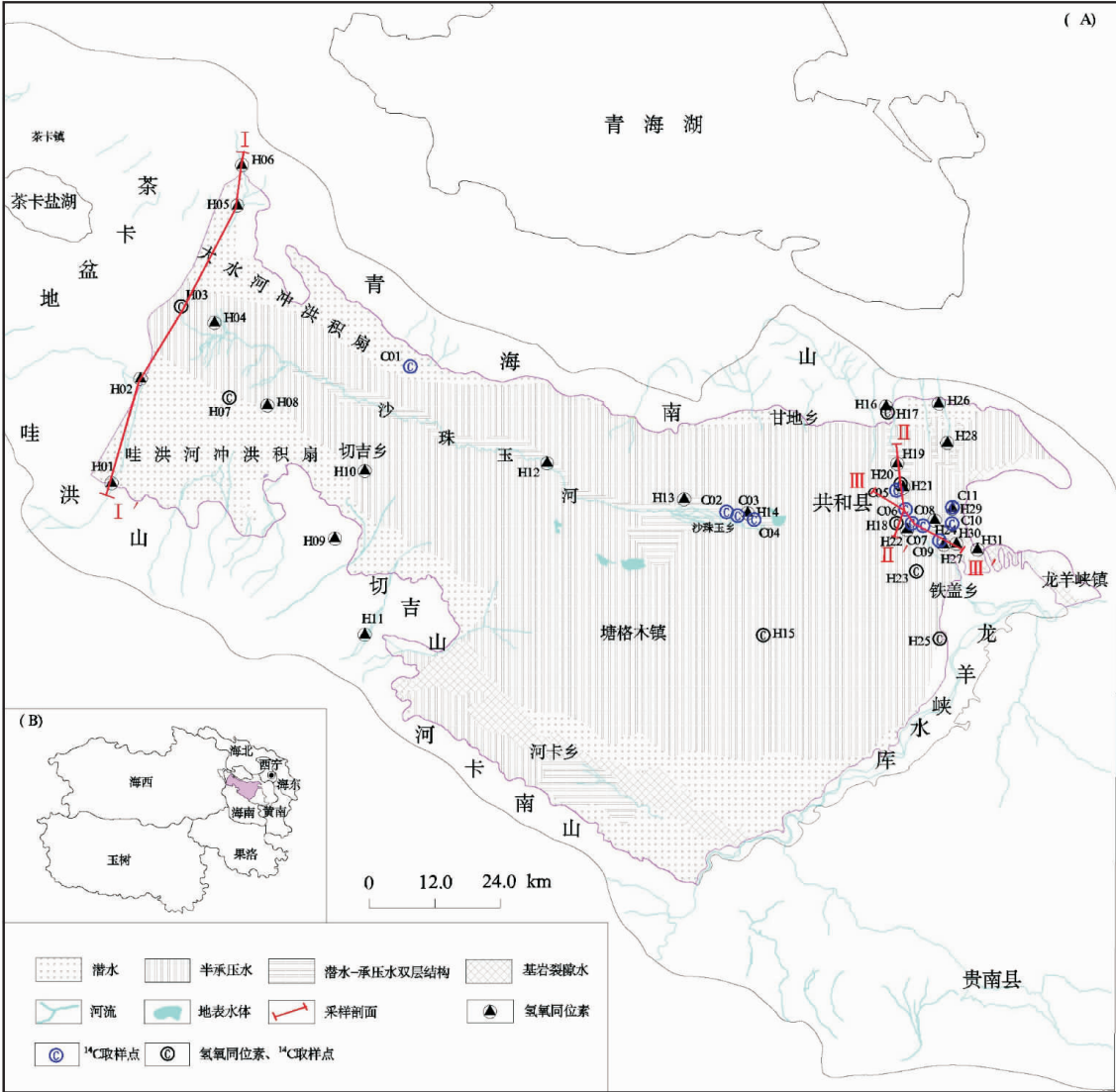
环境同位素可以用来有效地示踪水循环、指示水来源和不同环境状况下水的运移状态(Mahlknech, 2004;黄小琴,2014)。目前,环境同位素方法已被广泛用来研究地下水补给来源(Duzgoren. et al.,

2002)、年龄(Mokrik. et al., 2009; Gillon. et al., 2009)、地下水系统演化及地下水与地表水之间的相互作用等。共和盆地尚未开展地下水环境同位素的相关研究(张宗祜等,2000;甄志磊等,2014)。针对研究程度低的盆地,运用易于采集、易于储存、易于测试的地下水氢、氧同位素及 ^{14}C 同位素研究方法,分析研究盆地地下水补给与更新能力,为深入认识水资源的形成、运动及其成分变化机制提供重要依据,为合理利用和有效保护水资源提供正确的理论导向。

1 研究区概况

共和盆地位于青藏高原的东部,处于祁连及昆仑复合山系与秦岭山脉的交汇处(图1);盆地南北分布高山,中部呈菱形凹地,盆地西部西邻茶卡盆地,两盆地无明显天然边界,东部为龙羊峡水库;断陷盆地内部主要为冲洪积平原。多年平均降水量为310.5 mm,5~9月降水占全年降水量的88%。降水量除了年际间的正常波动外,近年来呈现出略有增加之势。盆地地表水主要由南部、北部山区河流、盆地西部的茶卡盐湖和盆地中部的沙珠玉河内陆水系构成,盆地东缘为黄河外流水系。盆地南部山区河流主要有哇洪河、切吉河、直亥实河和叉叉河等;盆地北部河流主要有大水河、曲合尔河、沟后河和大东河等。山区河水在山前渗入补给后经地下径流最终在黄河排泄。

盆地内第四系分布广、厚度大。下更新统主要为冲湖积相地层,岩性为亚砂、亚黏土夹砂砾石层。



A. 取样点位置图;B. 共和盆地区域位置图
图 1 共和盆地位置及研究区水样位置图

Fig. 1 Sampling location of environmental isotopes in Gonghe west basin

中更新统广泛出露于盆地山前倾斜平原、南戈壁,岩性为冰期冰碛物和间冰期洪积物,以砂砾石为主。上更新统不发育,主要为冰期冰碛物,分布于山区沟谷、山前倾斜平原及山间断陷盆地;间冰期的洪积物,分布于山前倾斜平原的低平原及山区沟谷中。全新统成因类型较复杂,山区有冰缘堆积,沟谷中有洪积物堆积,盆地中央有冲洪积、沼泽堆积和化学沉积;沙珠玉河谷内有冲积物堆积,沙珠玉河下游浪娘和沙立岗折玉一带有风积沙丘堆积。河谷沉积物具有二元结构,表层为细粒亚砂土,下部为粗砂含砾石。

盆地内地下水类型主要有潜水、半承压水、潜水-承压水双层含水层及基岩裂隙水(图 1)。地下水主要补给来源为南、北部山区降水及基岩裂隙水。山前含水层为单层结构潜水,盆地中心具有连续性较好的隔水层,为潜水-承压水双层结构。山前潜水单一结构区至盆地中心潜水-承压水双层结构区之间存在一个过渡带,该地区存在连续性较差的隔水层,地下水局部承压,承压水和潜水具有明显的水力联系,统称为半承压水。盆地部分地下水以泉的形式排泄,形成内陆河——沙珠玉河,后再入渗到东部径流,最终以泉的形式排泄于黄河上游龙羊峡水库。

盆地地下水资源开发利用量较小,但地下水开发利用相对集中,主要分布在恰卜恰河谷、沙珠玉乡、贵南县和茶卡镇等人口聚集和农业区,其他地区地下水极少。

2 试验方法与材料

2.1 样品采集

据研究区承压水井(孔)的分布特点,结合多条水文地质剖面布置采样点,在补给、径流和排泄区都有采样。共采集地下水样品 32 件,其中潜水 10 件,承压水 18 件,泉水 4 件;地表河水样品 5 件(图 1)。补给区取样点分布于盆地内流量较大的大水河、哇洪河山前冲洪积扇;径流区取样点分布于盆地中心沙珠玉地区;排泄区取样点分布于恰卜恰河谷和龙羊峡水库。地下水样品直接从井采集,采样前先抽 1~3 min 的水, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 ^3H 测试样品共 31 件,每个样品采集 100 mL。18 件承压水和 1 个泉水样品测试了 ^{14}C 同位素。利用沉淀罐制备样品,在水样中分别加入氯化钡、硫酸亚铁和饱和氢氧化钠,制备充足的 CaCO_3 沉淀,采用聚乙烯瓶保存。所有水样测试前在 4℃ 冷藏。用便携式测试仪现场测定水的 pH 值、溶解氧浓度、电导率和水温。

2.2 同位素测试

氢、氧同位素水样由自然资源部地下水科学与

工程重点实验室分析测试。 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 及 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 采用 MAT253 型质谱仪测定,其值用 δ 值表示,以维也纳标准平均海洋水(VSMOW)为标准。 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的精度分别为 $\pm 1.0\text{‰}$ 和 $\pm 1.0\text{‰}$ 。 ^3H 样品电解富集后利用超低本底液闪仪测定(Q1220),分析误差一般为 $\pm 1\text{ TU}$ 。 ^{14}C 采用 PE1220 QUANTULUS 型超低本底液体闪烁谱仪测定,以现代碳百分(pmc)表示,分析误差为 0.3 pmc。测试结果见表 1 和表 2。

2.3 稳定同位素对地下水补给指示原理

大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间存在密切相关的线性关系,被称为大气降水线,各地大气降水氢、氧同位素组成的线性关系因各地自然环境及气候条件的差异而表现出不同的斜率和截距(Craig,1961)。在不同的地质环境中,地下水中稳定同位素会发生质量分馏效应,由此可反映地下水成因及补径排条件(马洪云等,2019)。水体年龄是评价其更新能力的一项重要指标。一般年龄越小,更新速度就越快,再生性也越好(文冬光,2002)。放射性同位素 ^3H 则可用于识别核爆前后补给的地下水, ^{14}C 方法测年只适用于较古老的地下水,其测年上限为 35~40 ka,下限为 500~1 000 a(顾慰祖,2001;卫文等,2011),通过 ^3H 和 ^{14}C 对水体年龄进行测试,评估地下水更新能力。

表 1 研究区水样氢、氧同位素结果表
Tab. 1 Hydrogen and oxygen isotopes of water samples in the study area

编号	地貌单元	类型	$\delta\text{D}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	编号	地貌单元	类型	$\delta\text{D}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$
H01	哇洪河冲洪积扇扇顶	河水	-64	-10.1	H04	大水河冲洪积扇前缘	深层地下水	-78	-11.4
H06	大水河冲洪积扇扇顶	河水	-50	-7.9	H07	哇洪河冲洪积扇前缘	深层地下水	-68	-10.4
H11	直亥买河冲洪积扇扇顶	河水	-64	-9.8	H14	沙珠玉河下游	深层地下水	-61	-8.6
H12	盆地中心沙珠玉河中游	河水	-65	-9	H15	塔拉台地	深层地下水	-55	-8.3
H22	恰卜恰河中游	河水	-57	-8.4	H17	恰卜恰河上游	深层地下水	-75	-10.2
H28	阿乙亥沟上游	浅层地下水	-63	-8.5	H18	恰卜恰河中游	深层地下水	-64	-9.4
H02	哇洪河冲洪积扇扇中	浅层地下水	-66	-9.6	H20	恰卜恰河中游	深层地下水	-73	-10.1
H03	大水桥冲洪积扇前缘	浅层地下水	-55	-8.2	H23	塔拉台地	深层地下水	-74	-9.8
H05	大水河出山口	浅层地下水	-53	-8.1	H24	恰卜恰河中游	深层地下水	-75	-10.4
H08	哇洪河冲洪积扇前缘	浅层地下水	-69	-10.2	H29	阿乙亥沟中游	深层地下水	-65	-10
H09	叉叉陇哇冲洪积扇扇顶	浅层地下水	-66	-9.2	H30	阿乙亥沟下游	深层地下水	-79	-10.3
H10	叉叉陇哇冲洪积扇扇中	浅层地下水	-58	-8.9	H16	恰卜恰河上游	泉水	-65	-8.5
H13	沙珠玉河下游	浅层地下水	-53	-6.9	H25	龙羊峡水库西侧	泉水	-78	-10.7
H19	恰卜恰河上游	浅层地下水	-52	-7.8	H26	阿乙亥沟上游	泉水	-56	-8.5
H21	恰卜恰河中游	浅层地下水	-60	-8.5	H31	恰卜恰河下游	泉水	-76	-9.7
H27	恰卜恰河中游	浅层地下水	-72	-9.9					

表 2 研究区水样¹⁴C 结果表

Tab. 2 Carbon-14 composition of water samples in the study area

编号	水文地质单元	取样类型	表观年龄(a)	校正年龄(a)
H04	盆地中部沙珠河上游	深层地下水	21.99±0.58	14 836
H07	哇洪河冲洪积扇前缘	深层地下水	2.89±0.26	现代水
C01	青海南山山前	深层地下水	3.18±0.29	现代水
C02	沙珠玉下游平原	深层地下水	9.56±0.27	2 817.3
C03	沙珠玉下游平原	深层地下水	2.27±0.17	现代水
C04	沙珠玉下游平原	深层地下水	3.42±0.19	现代水
H15	塔拉台地	深层地下水	13.10±1.00	5 609.1
H17	恰卜恰河下游	深层地下水	11.04±0.28	3 888.8
H18	恰卜恰河中游	深层地下水	5.72±0.20	现代水
C05	恰卜恰河中游	深层地下水	4.92±0.18	现代水
H20	恰卜恰河中游	深层地下水	13.96±0.38	7 044.4
C06	恰卜恰河中游	深层地下水	12.45±0.37	6 009.7
C07	恰卜恰河下游	深层地下水(自流)	18.45±0.86	11 229.2
H23	塔拉台地	深层地下水(自流)	23.96±0.62	19 384.7
C08	恰卜恰河下游	深层地下水	22.30±0.46	15 674.7
H25	龙羊峡水库	泉水	19.02±0.63	11 576.1
C09	恰卜恰河下游	深层地下水(自流)	24.01±2.02	17 881.2
C10	阿乙亥沟	深层地下水	12.06±0.32	5 044.9
C11	阿乙亥沟	深层地下水(自流)	5.65±0.22	现代水

3 结果与分析

3.1 氢、氧同位素特征及其地下水补给识别

共和盆地缺乏降雨氢、氧同位素监测数据,笔者采用共和盆地北部青海湖流域降雨 $\delta D - \delta^{18}O$ 曲线为本地降雨线(LMWL)(吴华武等,2014)。降水输入³H 参考盆地北部邻近的青海湖地区³H 的分布特征(黄麒等,1989)。

本次研究地表河水样品中的 δD 值介于-65‰~-50‰,平均值为-60‰; $\delta^{18}O$ 值介于-10.1‰~-7.9‰,平均值为-9.06‰。地下水中的 δD 值介于-79‰~-52‰,平均值为-64.8‰; $\delta^{18}O$ 值介于-11.4‰~-6.9‰,平均值为-9.27‰。地下水 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值两者之间的关系特征为(图 2):水样基本分布于大气降水线附近,盆地的潜水氢、氧同位素相对深层承压水偏正。空间分布上大沙河冲洪积扇地下水同位素最偏正,其次为切吉河-直亥买河冲洪积扇,哇洪河冲洪积扇。该地区地下水主要为盆地

南北山区河流及降雨入渗补给,同位素的差异可能受补给时期的季节效应影响或受到一定程度的蒸发作用;盆地东部恰卜恰河谷、龙羊峡泉水及深层承压水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 贫化特征明显, $\delta^{18}O$ 值平均比现在低 10%左右,显示为非近期降雨入渗补给。

盆地周边山区出山口河水的³H 值介于 22.4~37.6TU,接近于目前降水³H 含量;潜水的³H 值介于 1.1~66.1TU(表 1),表明盆地潜水均为现代水,地下水更新性较好。由河水样品 $\delta^{18}O$ 和 δD 值与当地降水线的对比可以看出, $\delta^{18}O$ 和 δD 值分布于本地降雨线左上侧(图 2),哇洪河河水富集轻同位素,切吉河-直亥买河次之,大水桥相对富集重同位素。

盆地山前冲洪积扇顶部岩性以砂砾石为主,大部分河水迅速下渗补给潜水,冲洪积扇潜水 $\delta D - \delta^{18}O$ 值落在本地降雨线(LMWL)左上方(图 2),与山前河水的同位素分布相近。结合水文地质条件可知,盆地地下水主要来源于河流出山口入渗补给。冲洪积扇扇顶、扇中及扇前缘轴部潜水(H02、H03、H05)³H 值为 22.8~46.9TU,³H 值与山区河流的³

H 值浓度接近,为 1952 年以后降雨入渗补给。冲洪积扇前缘右翼潜水(H08) ^3H 值接近天然 ^3H 的本底值,推断应为 1952 年之前降雨入渗补给。大水河冲洪积扇扇中及前缘 ^3H 值均低于大气降水。冲洪积扇前缘和沙珠玉河上游承压水 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 值在本地降雨线左上侧(图 2),与河流 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 值相近,表明承压水主要接收山前河流入渗补给。盆地西部边界加什科一带(H04)的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 贫化特征明显。

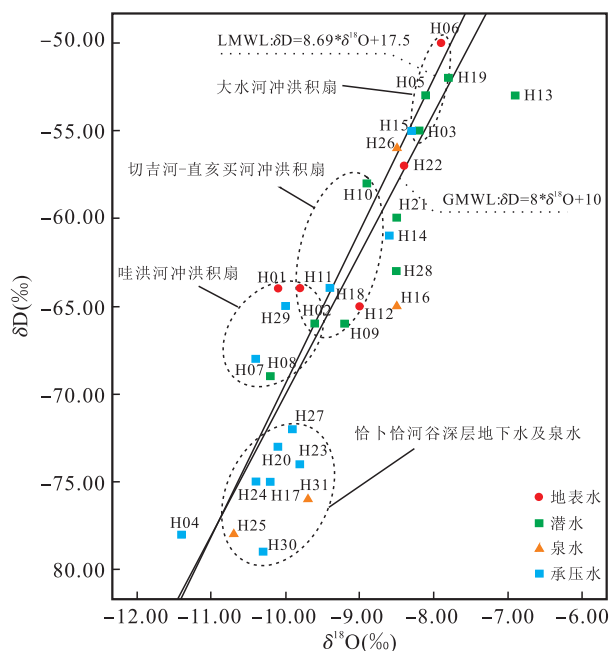


图 2 共和盆地不同水体 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 曲线图

Fig. 2 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ curves of different water bodies in Gonghe west basin

沙珠玉河中游河水(H12) δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值落在大水河和哇洪河冲洪积扇值之间,但其值落在本地降雨线(LMWL)右下侧(图 2),反映河水补给来源于大水河和哇洪河冲洪积扇,在径流过程中可能发生同位素分馏作用,导致 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 偏离当地降雨线。沙珠玉河中游河水 ^3H 值为 (27.9 ± 1.5) TU,明显低于近期大气降水的 ^3H 值,结合水文地质条件可知,河水源于周边潜水溢出和承压水自流的补给,并混合了部分近期降水所致。盆地中心沙珠玉河河谷平原中下游潜水(H13) δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显高于中游河水,且偏离当地降雨线较远, ^3H 值为 (66.1 ± 2.2) TU,反映河谷平原潜水主要来源于近期大气降水补给,且降雨入渗补给潜水的过程中经过了较强的同位素分馏作用。沙珠玉河下游承压水(H14) δD 、

$\delta^{18}\text{O}$ 值靠近本地降雨线, ^3H 值为 (6.3 ± 1.0) TU,承压水主要来自四周半承压的侧向补给,且承压水与潜水有一定水力联系,同时接受潜水补给。

恰卜恰河谷(H19、H21)和阿乙亥沟潜水(H28) $\delta\text{D}-\delta\text{O}$ 落在本地降雨线(LMWL)右下侧(图 2),靠近本地降雨线,与山前河水或泉水的同位素分布相近。河谷潜水 ^3H 值为 $15.6 \sim 36.3$ TU,反映补给源于山前河流入渗,且补给过程中发生了同位素分馏作用,径流路径较短,地下水循环交替较快。河谷中下游潜水(H27) ^3H 值为 (1.7 ± 0.8) TU,恰卜恰下游河谷潜水受人工揭露承压自流水的越流补给。

河谷承压水(H17、H20、H23、H24、H27、H30) δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏离本地降雨线较远,重同位素含量较低,远低于盆地地下水补给区 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值,同位素贫化特征明显(图 2)。从水文地质条件分析,河谷承压水主要源自塔拉台地半承压-承压水的侧向补给;龙羊峡水库西侧泉水(H25) $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 显著远离本地降雨线(LMWL)(图 2),重同位素富集,表明河谷中下游及龙羊峡库区泉水源自盆地西部承压水补给;地下水年龄普遍很老,反映出地下水径流路径长,径流速度缓慢,更新能力很差。恰卜恰河谷中游上塔买三社(H18)和阿乙亥二社(H29),取样井深在 130~190 m, $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 特征明显与本区深层承压水不同,与本地降雨线同位素组成相近,富集重同位素,承压水 ^3H 值 $< (3.8 \pm 0.9)$ TU,补给主要来源于周围塔拉台地降雨入渗补给。

3.2 ^{14}C 同位素特征及其地下水补给识别

^{14}C 年龄采用较适宜干旱-半干旱地区的 Tamers 模型进行校正(Tamers, 1975),承压水 ^{14}C 校正年龄为 2 817.3~19 384.7 a,总体由盆地西北至东南承压水年龄呈增大趋势,表明盆地承压水总体流向是由盆地西部径流至东部,承压水循环较慢,更新性较差。仅沙珠玉河下游、下塔买三社及阿乙亥沟下游承压水 ^{14}C 校正年龄限时承压水年龄小于 1 000 a。

山前冲洪积扇前缘及沙珠玉河上游地下水 ^{14}C 校正年龄明显大于盆地中部承压水,为 14.836 ka;地下水的补给环境与现代气候条件有较大不同,补给温度远低于现代气温,且地下水交换更替速度较慢,反映出共和盆地与西部茶卡盆地之间不存在明显的水力联系,盆地西部边界地下水基本处于滞留状态,推断该处为冰期时形成的古水(图 3)。沙珠

玉河下游承压水¹⁴C校正年龄为 2.82 ka,承压水主要来自四周半承压的侧向补给,且承压水与潜水有一定水力联系,同时接受潜水补给。

恰卜恰河谷承压水¹⁴C校正年龄为 11.23 ~ 17.88 ka,地下水年龄普遍较老(图 4、图 5)。中部塔拉台地年龄为 5.0~6.0 ka,从水文地质条件分析,河谷承压水主要源自塔拉台地半承压-承压水的侧向补给。恰卜恰河谷中游上塔买三社(H18)和阿乙亥二社(H29),取样井深在 130~190 m,¹⁴C校正年龄小于 1 000 a,补给主要来源于周围塔拉台地降雨入渗补给。

3.3 基于区域地下水补给的环境同位素指示意义

(1)冲洪积扇扇顶、扇中及扇前缘轴部潜水 δD、δ¹⁸O 和³H 含量接近现代降雨,表明该区域地下水更新性较好;冲洪积扇前缘承压水 δD、δ¹⁸O 贫化特征明显,δ¹⁸O 值平均比现在低 10%左右,地下水年龄为 14.836 ka,地下水补给来源应为距今 10 000~60 000 a 的最后一次冰期内形成的古水(Ozanskik, 1985;崔亚莉等,2015),地下水循环更替速度较慢。共和盆地和茶卡盆地之间不具有明显的地表分水岭,浅层地下水等水位线显示该地区存在一个天然的

分水岭。但针对盆地之间深层承压水流场研究尚属空白,盆地深层承压含水层之间是否存在明显的水力联系尚不明确。笔者运用环境同位素研究表明,盆地西部深层承压水与盆地中东部深层承压水无明显水力联系,进一步证明共和盆地地下水补给主要来自盆地南部哇洪山和北部青海南山降雨入渗补给。

(2)沙珠玉河上游为地下水排泄区。河流受山前河流、冲洪积扇前缘潜水补给和深层承压水补给;沙珠玉河中下游潜水(H13)δD、δ¹⁸O 值明显高于中游河水,³H 值为(66.1±2.2)TU,反映河谷平原潜水主要来源于近期大气降水补给;承压水(H14)δD、δ¹⁸O 值靠近本地降雨线,³H 值为(6.3±1.0)TU,¹⁴C校正年龄为 2.82 ka,承压水主要来自四周半承压的侧向补给,且承压水与潜水有一定水力联系,同时接受潜水补给。

(3)盆地东部恰卜恰河谷和龙羊峡泉水、深层承压水 δD、δ¹⁸O 贫化特征明显,δ¹⁸O 值平均比现在低 10%左右,显示为非近期降雨入渗补给,表明该位置地下水的补给环境与现代气候条件有较大不同,补给温度远低于现代气温。承压水¹⁴C校正年龄为 11.23~17.88 ka,地下水补给来源应为距今 10 000~60 000 a

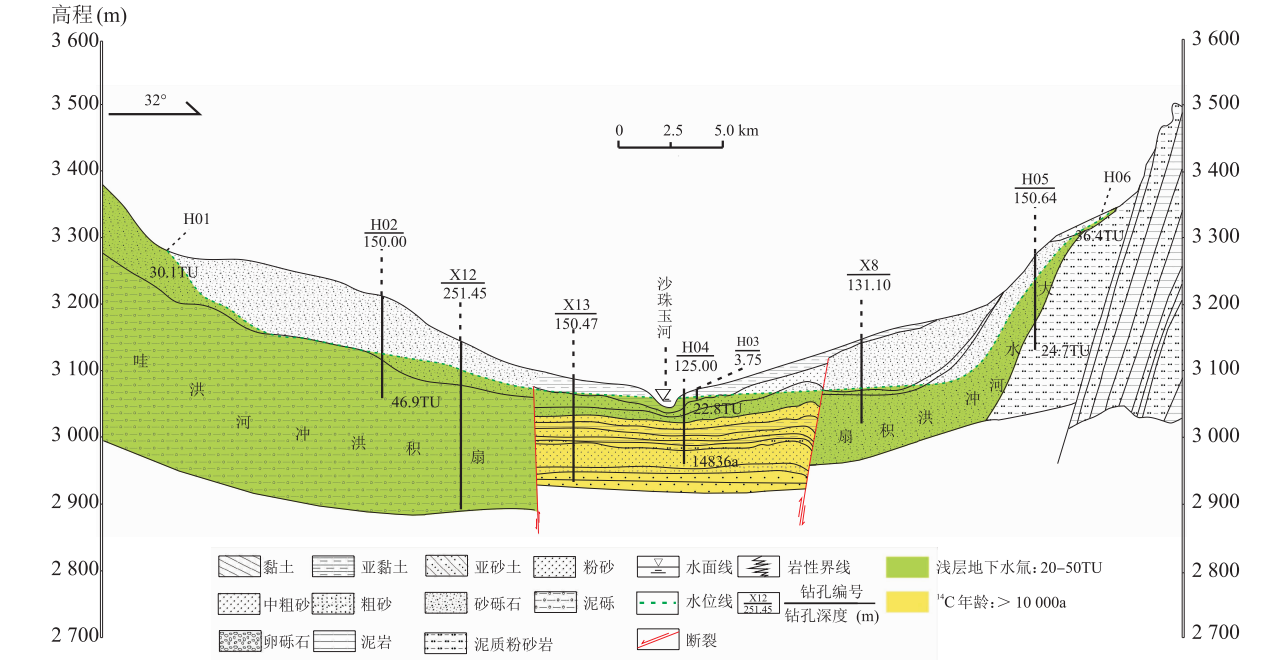


图 3 哇洪河冲洪积扇-大水河冲洪积扇(I-I')地下水年龄分布图
Fig. 3 Groundwater age in alluvial-proluvial fans of Wahong river-Dashui river(I-I')

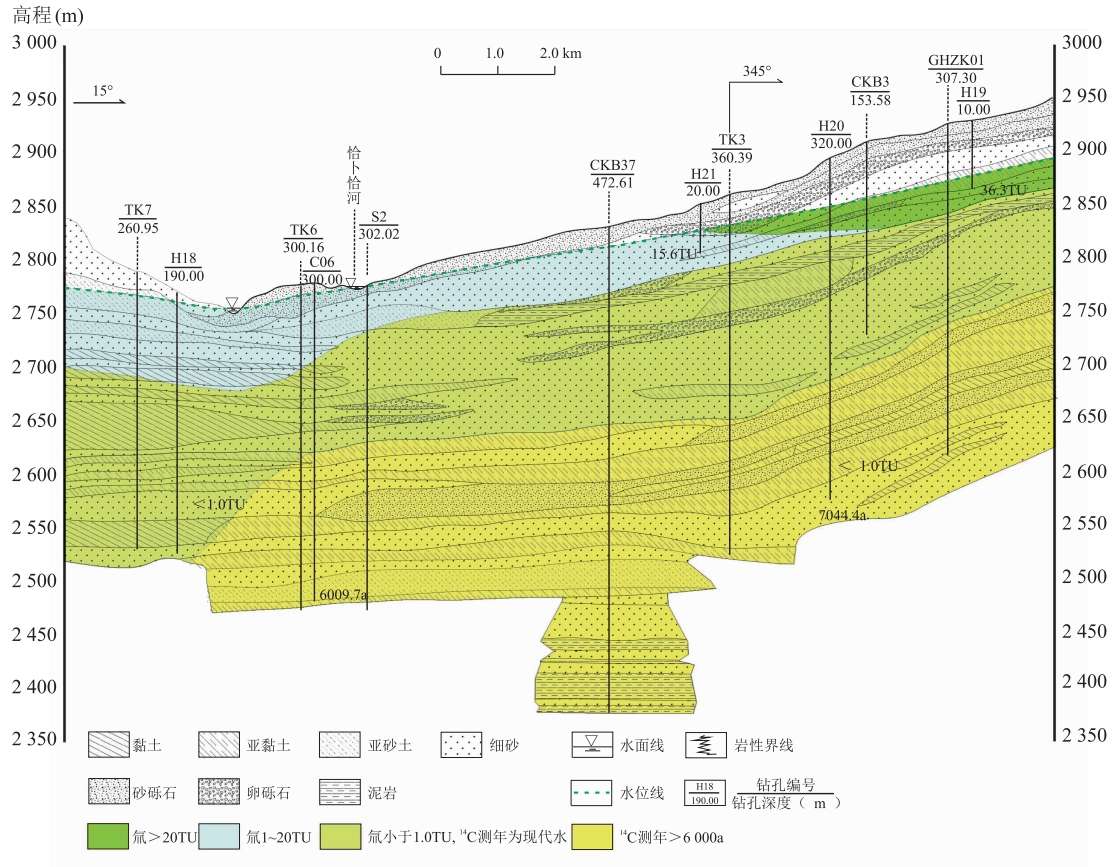


图 4 恰卜恰河谷中上游(Ⅱ-Ⅱ')地下水年龄分布图

Fig. 4 Groundwater age in middle and upper reaches of Qaboqa river valley (Ⅱ-Ⅱ')

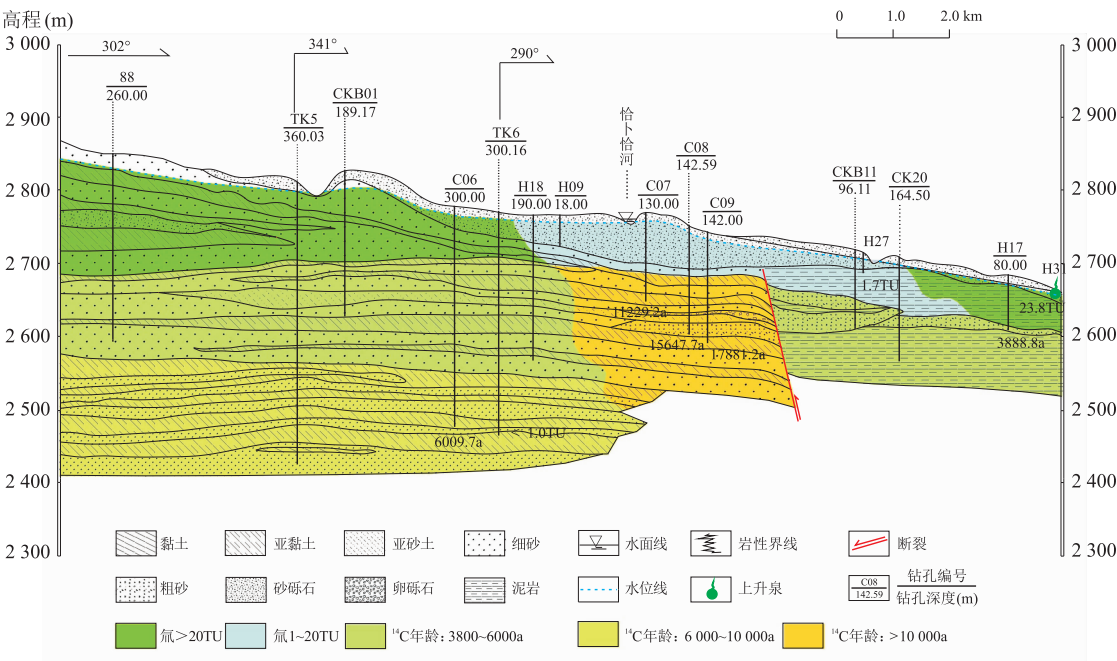


图 5 恰卜恰河谷中下游(Ⅲ-Ⅲ')地下水年龄分布图

Fig. 5 Groundwater age in middle and lower reaches of Qaboqa river valley(Ⅲ-Ⅲ')

的最后一次冰期内形成的古水,地下水循环更替速度较慢。恰卜恰河谷是盆地地下水集中开采区,以开采深层承压水为主,开采强度存在不同程度的超采现象,地下水的超采影响上游补给区地下水位,对盆地脆弱的生态系统安全构成威胁。同时,深层承压水超采导致盆地对黄河上游龙羊峡水库天然排泄量减少,对黄河流域生态保护和高质量发展产生不利影响。

4 结论

(1)共和盆地地下水补给源自盆地南部和北部山区,由山前向盆地中心径流,部分地下水以泉的形式排泄形成沙珠玉河。盆地潜水主要接受现代降雨入渗补给,地下水循环交替速度较快。承压水补给主要来自盆地南部哇洪山和青海南山降雨入渗补给;盆地中部地表水不发育,地下水由西向东径流,至盆地东部恰卜恰河谷及龙羊峡水库,以泉的形式排泄,地下水循环交替速度较慢。

(2)共和盆地西部边界地下水补给环境与现代气候条件差异较大,补给温度远低于现代气温,且地下水 ^{14}C 年龄达14.836 ka,基本处于滞留状态,推断该处地下水为冰期降雨入渗补给成因,进一步证明共和盆地与西部茶卡盆地之间存在天然边界。

(3)恰卜恰河谷中上游地区潜水补给主要源自山前恰卜恰河河水入渗补给,恰卜恰河谷中下游潜水受人工揭露深层承压水自流入渗补给。恰卜恰河谷含水层埋深在130~190 m的承压水补给主要源自周围塔拉台地降雨入渗补给;含水层埋深大于190 m的承压水及龙羊峡水库西侧泉水补给来源主要为盆地西部山前冰期时降雨入渗补给,与上层潜水无水力联系;在恰卜恰河谷及龙羊峡水库以泉或人工开采的形式排泄。

参考文献(References):

崔亚莉,邵景力,韩双平. 西北地区地下水的地质生态环境调节作用研究[J]. 地学前缘,2001,8(1):191-196.

CUI Yali, SHAO Jingli, HAN Shuangping. Ecological environment adjustment by groundwater in Northwest China [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(1):191-196.

汤奇成,张捷斌. 西北干旱地区水资源与生态环境保护[J].

地理科学进展,2001,20(3):227-233.

TANG Qicheng, ZHANG Jiebin. Water Resources and Eco-environment Protection in the Arid Regions in Northwest of China[J]. Progress in Geography, 2001, 20(3):227-233.

王晓玮,邵景力,王卓然,等. 西北地区地下水水量-水位双控指标确定研究——以民勤盆地为例[J]. 水文地质工程地质,2020,47(2):17-24.

WANG Xiaowei, SHAO Jingli, WANG Zhuoran, et al. A study of the determination of indicators of dual control of groundwater abstraction amount and water table in northwest China: a case study of the Minqin Basin[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2020, 47(2): 17-24.

沈振荣. 水资源科学实验与研究——大气水、地表水、土壤水、地下水相互转化关系[M]. 北京:中国科学技术出版社,1992.

SHEN Zhenrong. Water resources scientific experiment and research: Atmospheric, surface, soil and ground water interactions [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 1992.

权国苍. 青海省共和盆地南缘山前平原地下水资源研究 [D]. 北京:中国地质大学(北京),2015.

QUAN Guocang. Groundwater Resources Study at the southern margin in the piedmont of Gonghe west basin Qinghai province[D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2015.

侯兆云. 基于流体渗流-化学(同位素)耦合模拟的共和-贵德地热储层特征分析[D]. 吉林:吉林大学,2019.

HOU Zhaoyun. Characterizing the geothermal system in the Gonghe Guide Basin by coupled fluid-heat-chemical (isotope) transport modeling[D]. Jinlin: Jilin University, 2019.

马月花,唐保春,苏生云,等. 青海共和盆地地热流体地球化学特征及热储水-岩相互作用过程[J]. 地学前缘,2020, 27(1):123-133.

MA Yuehua, TANG Baochun, SU Shengyun, et al. Geochemical characteristics of geothermal fluids and water-rock interaction in geothermal reservoirs in and around the Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1):123-133.

李永革. 青海省共和盆地恰卜恰地区地下热水水文地球化学特征及成因分析[D]. 抚州:东华理工大学, 2016.

LI Yongge. Hydrogeochemical Characteristics and its Origin Analysis of Geothermal water in the Qiabuqia Area, Gonghe Basin, Qinghai Province[D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2016.

朱贵麟,张林友,李旭峰,等. 青海共和盆地地下水演化特征

- 及成因机制[J]. 人民黄河, 2021, 51(S2): 36-39+75.
- ZHU Guilin, ZHANG Linyou, LI Xufeng, et al. Evolution characteristics and genetic mechanism of groundwater in Gonghe basin, Qinghai Province [J]. Yellow River, 2021, 51(S2): 36-39+75.
- 黄小琴, 柳青, 薛忠岐. 宁夏固原地区地下水同位素特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(2): 143-148.
- HUANG Xiaoqin, LIU Qing, XUE Zhongqi. The characteristics of groundwater isotopes in upper reach plain of Qingshui River, Ningxia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(2): 143-148.
- 张宗祜, 沈照理, 薛禹群, 等. 华北平原地下水环境演化[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- ZHANG Zonghu, SHEN Zhaoli, XUE Yuqun, et al. Evolution of groundwater environment of the Northern China Great Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.
- 甄志磊, 李畅游, 李文宝, 等. 内蒙古达里诺尔湖流域地表水和地下水环境同位素特征及补给关系[J]. 湖泊科学, 2014, 26(6): 916-922.
- ZHEN Zhilei, LI Changyou, LI Wenbao, et al. Characteristics of environmental isotopes of surface water and groundwater and their recharge relationships in Lake Dali basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(6): 916-922.
- 马洪云, 李成柱, 王化齐, 等. 银川盆地水体氢氧稳定同位素特征分析[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 218-226.
- MA Hongyun, LI Chengzhu, WANG Huaqi, et al. Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Water Bodies at Yinchuan Basin, China[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 218-226.
- 文冬光. 用环境同位素论区域地下水资源属性[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2002, 27(2): 141-147.
- WEN Dongguang. Groundwater Resources Attribute Based on Environmental Isotopes[J]. Journal of Earth Science, 2002, 27(2): 141-147.
- 卫文, 陈宗宇, 赵红梅, 等. 河北平原第四系承压水⁴He与¹⁴C测年对比[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(4): 1144-1150.
- WEI Wen, CHEN Congyu, ZHAO Hongmei, et al. Comparison of ⁴He and ¹⁴C Dating of Groundwater from Quaternary Confined Aquifers in Hebei Plain[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(4): 1144-1150.
- 顾慰祖, 庞忠和, 王全九, 等. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- GU Weizu, PANG Zhonghe, WANG Quanjiu, et al. Isotope Hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- 吴华武, 李小雁, 赵国琴, 等. 青海湖流域降水和河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1552-1564.
- WU Huanwu, LI Xiaoyan, ZHAO Guoqin, et al. The Variation Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in Precipitation and River Water, Qinghai Lake Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(9): 1552-1564.
- 黄麒, 梁青生. 青海湖地区氡的分布特征[J]. 核技术, 1989, 12(11): 679-683.
- HUANG Qi, LIANG Qingsheng. Distribution Characteristics of Tritium in Qinghai Lake[J]. Nuclear Technique, 1989, 12(11): 679-683.
- 崔亚莉, 刘峰, 郝奇琛, 等. 诺木洪冲洪积扇地下水氢氧同位素特征及更新能力研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 1-7.
- CUI Yali, LIU Feng, HAO Qichen, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes and renewability of groundwater in the Nuomuhong alluvial fan[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(6): 1-7.
- Mahlknecht J, Schneider J F, Merkel B J, et al. Groundwater recharge in a sedimentary basin in semi-arid Mexico [J]. Hydrogeology Journal, 2004, 12: 511-530.
- Duzgoren Aydin N S, Aydin A, Malpas J. Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong [J]. Engineering Geology, 2002, 63: 99-119.
- RMokrik J, Maeika A, Baublyt, et al. The groundwater age in the Middle-Upper Devonian aquifer system. Lithuania [J]. Hydrogeology Journal, 2009, 17: 871-889.
- Gillon M, Barbecot F, Gibert E, et al. Open to closed system transition traced through the TDIC isotopic signature at the aquifer recharge stage, implications for groundwater ¹⁴C dating [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73: 6488-6501.
- Craig H. Isotopic variations with meteoric water [J]. Science, 1961, 133: 1702-1703.
- Tamers MA. Validity of radiocarbon dates on groundwater [J]. Geophysical Survey, 1975, 2(2): 217-239.
- Ozanski K. Deuterium and oxygen-18 in European groundwater-links to atmospheric circulation in the past [J]. Chemical Geology: Isotope Geosciences Section, 1985, 52: 349-363.