

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.002

# 地下水深循环研究进展

陈建生, 江巧宁

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**对自然界中地下水深循环的研究进展进行了综述。西藏内流区的湖泊与河流存在渗漏,水量呈现出巨大的不平衡,估算每年通过渗漏流出西藏高原的地下水超过了1 000亿 $\text{m}^3$ ;与此同时,中国北方的地下水也呈现出极大的不平衡,降水量较少的火山与裂谷地区有大量的泉水涌出形成了河流与湖泊,内蒙古高原与东北地区的河流与湖泊在北东方向上呈现出串珠状的分布。通过对长白山天池地下水补给源区的各项分析确定,补给天池的地下水来自于外源水,能够同时满足补给源区高程、降水同位素、渗漏等特征条件的地区只有西藏内流区。北方地下水中的锶、氦同位素特征关系揭示了深循环地下水与地幔玄武岩等发生了水岩反应。贝加尔与山西裂谷地区中地壳高导低速层可能是深循环地下水的导水通道,玄武岩孔洞构成了导水构造。深循环水在火山及裂谷附近向地表排泄形成河流与湖泊,河流源头附近的地温梯度偏低。西藏内流区的渗透水通过深循环方式补给内蒙古高原、鄂尔多斯、阿拉善、华北平原、东北平原、贝加尔湖、东海、南海等地区,地下水的年龄自西向东呈增加趋势,一般在20~40 a之间。

**关键词:**地下水深循环;水量平衡;同位素分析;导水构造;玄武岩孔洞;西藏内流区;长白山天池  
中图分类号:P641.2 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)06-0008-10

## Research progress of ground water deep circulation

CHEN Jiansheng, JIANG Qiaoning

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The research progress of ground water deep circulation was summarized. In the inner flow area of Tibet Plateau, the water resources present a huge imbalance, lakes and rivers have a strong leakage. The annual leakage of water is estimated to exceed 1 012  $\text{m}^3$ . Meanwhile, the groundwater in northern China is also showing a great imbalance. The volcano or rift valley areas, where the precipitation is very small, have a large number of springs gushing out into the rivers and lakes. Rivers and lakes in Inner Mongolia Plateau and Northeast China are beaded distribution in the north-east direction. By analyzing the groundwater supply source of Tianchi Lake in Changbai Mountains, it is determined that the main source of groundwater is from outside regions. The only area which can meet the altitude, isotope signature and others features like leakage at the same time is the inner flow area of Tibet plateau. Isotope signature of strontium and helium of groundwater in Northern China reveal the water rock interaction occurring between the deep-circle groundwater and mantle basalt. The high-conductivity and low-velocity layer in Baikal and Shanxi Rift Valley may be deep-circle groundwater pathways, wherein the basalt porous is conveyance structure. Deep-circle groundwater flowed out from the volcano and rift valley areas, springing water flowed into rivers and lakes. The geothermal gradient in the river source region is lower than the normal value. The leakage water of inner flow area of Tibet Plateau through the deep circulation transport to Inner Mongolia Plateau, Ordos, Alashan, North China Plain, Northeast China Plain, Lake Baikal, the East China Sea, South China Sea, etc. The age of groundwater is increasing, from west to east, generally between 20~40 a.

**Key words:** deep-circle groundwater; water balance; isotope signature analysis; conveyance structure; basalt porosity; inner flow area of Tibet Plateau; Tianchi Lake of Changbai Mountains

基金项目:国家自然科学基金(51578212);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2012CB417005)

作者简介:陈建生(1955—),男,教授,博士,主要从事地下水深循环研究。E-mail:jschen@hhu.edu.cn

2004年陈建生等<sup>[1]</sup>在《自然》杂志上发表了地下水维系沙山景观的文章,指出维系巴丹吉林沙漠沙山与湖泊的地下水来自于青藏高原北缘祁连山的冰川融雪,地下水可通过深大断裂带实现跨流域的补给。2009年6月,中国科协举办了第30期新观点新学说学术沙龙——“青藏高原冰川融水深循环及其地质环境效应”,陈建生等首次提出,地下水除了区域水文地质循环之外,还存在着一种深循环形式,地下水在水力梯度驱动下,可以在中地壳甚至地幔孔洞型导水构造中流动,青藏高原的冰川融水补给到了内蒙古高原、鄂尔多斯、阿拉善、华北平原、东北平原等东部地区,除此之外,深循环地下水还补给了塔里木盆地、贝加尔湖、东海、冲绳海沟、雷琼半岛、南海莺歌海盆地等<sup>[2-5]</sup>。中国北方干旱区的稳定河流与湖泊的主要补给源都来自于深循环地下水,而不是区域水文地质循环水。2013年Post等<sup>[6]</sup>在《自然》上发表论文指出,大陆架下存在的淡水资源量为50万km<sup>3</sup>,该水量是过去100年人类抽取地下水总量的100倍,这意味今后的水资源危机或将缓和。由此可见,地下水深循环可能是一种更为重要的水循环方式,控制着更为宏观的地下水平衡系统。

关于地下水深循环是真命题还是伪命题仍然存在争议:①缺少西藏的湖泊与河流存在渗漏的水量平衡证据;②缺少北方地区地下水来自于羌塘盆地渗漏水补给的观点的水力学证据;③经过地幔岩浆岩深循环地下水的高温特征;④同位素与地球化学分析具有多解性。近几年来针对上述质疑展开了深入的研究,获得了大量的除了氘(D)、氧(<sup>18</sup>O)同位素之外的重要证据,尤其是具有排他性的水力学证据,并通过深循环理论为阿拉善右旗找到了饮用水源。随着研究的深入,地下水深循环在地质演变过程中的重要作用将被逐渐揭示出来,其作用范围包括:湖泊、河流、油气运移、地震、成矿、黄土高原成因、沙漠、青藏高原隆升等,这项研究将推动地质学大统一理论的发展。

## 1 青藏高原内流区湖泊与河流存在渗漏

青藏高原面积120万km<sup>2</sup>,平均海拔超过5000m,年平均气温低于0℃。青藏高原根据天然的分水岭被分为内流区与外流区,内流区被冰川与雪山包围,冰川融水通过地表或地下径流汇集到羌塘盆地,形成河流与湖泊。西藏内流区的面积为61万km<sup>2</sup>,河流稀疏短小,径流量202亿m<sup>3</sup>;西藏外流区面积为59万km<sup>2</sup>,径流量为4280亿m<sup>3</sup><sup>[7]</sup>。西藏外流区是长江、黄河、雅鲁藏布江、塔里木河等的补给源区。野外考察与卫星遥感资料分析表明,内流区的河流

存在渗漏,例如,昆仑山卡拉米兰山口南坡几十条小河流汇集成的宽度超过1km的大型河流最终并未汇聚成一条更大的河流或形成尾间湖,仅流经了几十千米便在地表消失了。通过对比分析可以看出,内流区与外流区径流量存在巨大的差异,径流量相差达到21倍<sup>[8]</sup>。

西藏内流区最大的湖泊纳木错面积约2000km<sup>2</sup>,集水面积约1.061万km<sup>2</sup>。对纳木错盐分与水量的调查研究发现,湖水不同位置的TDS值虽然有一些波动,但基本上保持在1.7g/L左右,稍高于1960年前的TDS值<sup>[9]</sup>。该湖总容量为2280亿m<sup>3</sup>,可以得到湖泊盐分总量为0.388亿t。纳木错年入湖补给量为18亿m<sup>3</sup>,入湖河流TDS值在0.15~0.18g/L之间。若该湖不存在渗漏,湖泊蒸发量应该等于入湖水量,那么3万a以来流入纳木错总盐分的下限值为81亿t,比目前湖泊中的总盐量高出了200多倍,低盐度表明湖泊存在渗漏<sup>[5]</sup>。周石砾等<sup>[10]</sup>在2007—2011年间,对纳木错入湖河水流量、水位、降水、蒸发等进行了连续监测与水量平衡分析,研究表明,纳木错湖存在严重的渗漏,渗漏量达到了120~190m<sup>3</sup>/s。由于纳木错的集水区面积仅占西藏内流区的1.74%,还有98.26%面积的湖泊与河流的渗漏量是未知的。西藏内流区湖水TDS在0.3~1g/L之间的封闭湖泊有13个,总面积达到2700km<sup>2</sup><sup>[11]</sup>,显然,这些淡水湖泊存在着严重的渗漏。根据水量平衡关系估算出西藏内流区最小的年渗漏量超过100km<sup>3</sup><sup>[8]</sup>。

## 2 青藏高原周边地区地下水补给源调查

为了寻找西藏内流区渗漏水的排泄区,笔者对青藏高原周边地区的地下水进行了采样分析,通过同位素及水化学确定其补给源是否来自于西藏内流区。多年的调查发现,西藏内流区的渗漏水在青藏高原周边广泛的地区都有排泄,其中内蒙古高原、鄂尔多斯、华北平原及东北平原是渗漏水的主要排泄区。

1990年以来,河西走廊地下水的水位持续下降,张掖城区地下水的水位下降幅度超过了5m,但是2002年之后,河西走廊地下水出现了上升趋势,张掖城区的地下水位也快速上升,到了2005年,城区最大的上升幅度达到8m,造成2000多户居民被迫搬迁。研究表明,河西走廊的地下水来自于青藏高原北东断裂带,氦氡同位素异常表明地下水来自于深循环过程<sup>[12]</sup>,渗漏水通过断裂带补给到张掖盆地,温度上升使得融水量增加造成盆地地下水位上升<sup>[13]</sup>。塔克拉玛干沙漠东部的台特玛湖,在接近干涸30a之后,于2002年在泉水的补给下重现,湖水

面积最大达到了 300 km<sup>2</sup>, 湖泊群接受地下水补给, 湖泊重现的时间与河西走廊地下水位上升的时间相同<sup>[2]</sup>。2005 年以来, 阿拉善左旗巴彦浩特地下水位上升并溢出地表; 2010 年以来, 乌海市海南区地下水涌, 迄今为止已经在地表形成了诸多的水泡子。内蒙古高原的地下水位自西向东呈上升趋势。

成千上万的湖泊/水泡子呈北东走向分布在内蒙古高原与东北平原一带, 湖泊群集中分布地带位于内蒙古造山带与大兴安岭, 属于欧亚板块之间的缝合带。大型的湖泊包括乌梁素海、岱海、黄旗海、达里诺尔湖、月亮湖等呈现串珠状分布。水量平衡、环境同位素、地球化学研究证实, 岱海、达里诺尔湖、乌梁素海及周边的泉水、井水的  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  关系点与当地降水明显不同, 研究表明, 湖泊主要接受外源地下水的补给, 外源水具有  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  贫化的特征<sup>[14-20]</sup>。

在降水量稀少的鄂尔多斯西北的乌海地区发现了泉群与自流井群, 乌海的年平均降水量只有 159.8 mm, 6—9 月的降水量占全年的 70% 以上, 而年均蒸发量达到 3 279.7 mm, 约为降水量的 21 倍, 平均日蒸发量达到了 18 mm, 而平均日降水量只有 0.4 mm, 平均日蒸发量是平均日降水量的 45 倍<sup>[21]</sup>。乌海的泉水与自流井水的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  明显比当地降水贫化, 现场模拟试验表明, 降水不能入渗到地下水中, 地下水来源于鄂尔多斯高原以外的地区, 降水同位素具有贫化特征, 能够同时满足水力学与同位素特征的补给源区只有青藏高原<sup>[15]</sup>。中国地质调查局经过 10 多年的水文地质勘查发现鄂尔多斯是个大水盆, 通过钻孔抽水实验得出的年补给量达 105 亿 m<sup>3</sup><sup>[22]</sup>。通过对鄂尔多斯盆地的渭河、泾河、无定河、洛河等河水的同位素分析发现, 鄂尔多斯盆地的河水与泉水都接受外源地下水的补给, 当地降水对地下水基本上没有补给<sup>[14]</sup>。研究表明, 深循环地下水维系了风尘颗粒在鄂尔多斯高原的连续堆积, 黄土高原的形成亦与深循环地下水有关<sup>[16]</sup>。

华北平原的降水量从西北至东南呈现增加趋势, 从 200 ~ 800 mm; 但地下水的分布趋势却与降水量的分布完全相反, 降水量较少的西北山区地下水极为丰富, 而降水量偏多的东南地区地下水资源相对匮乏。华北地区每年抽取的地下水量超过 20 km<sup>3</sup>, 地下水曾被认为是接受了当地降水及农业灌溉水的入渗补给, 实际上, 主要抽取的地下水为深层承压水。以衡水地区的含水层为例, 目前揭露的含水层为 5 层, 潜水的 TDS 大于或等于 9 g/L, 而以下 4 层承压水的 TDS 小于 1 g/L, 高盐分的潜水显然不可能是低盐分承压水的补给源。承压水的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  比当地降水的加权平均值贫化, 这表明华北平原

的地下水主要来自于羌塘盆地的外源水<sup>[8]</sup>, 地下水的循环周期大约为 30 a<sup>[23]</sup>。

### 3 东部地区火山玄武岩地下水的来源

自 20 世纪 70 年代起, 在地矿部贾福海院士领导下, 开展了新生代玄武岩地下水的研究。调查发现, 长白山、黑龙江、嫩江、五大连池、达里诺尔、辽宁宽甸、河北平泉等火山玄武岩地区地下水极为丰富, 认为新生代玄武岩地下水的补给、径流与排泄方式完全不同于孔隙水、裂隙水与岩溶水, 属于一种特殊类型的地下水<sup>[24]</sup>。新生代玄武岩中的熔岩隧道、孔洞与孔隙发育, 90% 以上的孔洞、孔隙与微孔隙是相互连通的<sup>[25]</sup>。在大面积新生代玄武岩台地分布地区, 往往出现较大和特大泉水, 泉水在枯水季节的绝对流量仍然很大。

长白山火山属于新生代, 最早喷发于新近纪中新世, 经上新世和更新世直至全新世<sup>[26]</sup>。长白山区的径流量远远大于其他非火山玄武岩地区, 多年平均流量为 310 亿 m<sup>3</sup>, 占吉林省全省的 87%, 呈现出高度不对称的分布特点<sup>[27]</sup>。长白山天池火山锥体最高峰海拔 2 750 m, 锥体顶部的破火山口湖即长白山天池的湖面海拔 2 189.7 m, 南北长 4.4 km, 东西宽 3.37 km<sup>[28]</sup>。天池湖面 20 m 以下水温在 3.5 ~ 4℃ 之间, 但靠近将军峰的水温达到 10℃, 存在一处不冻水面, 表明补给天池的地下水为冷水, 地下水年补给天池的水量为 0.252 亿 m<sup>3</sup>, 占天池总水量的 65%<sup>[29]</sup>。补给天池的地下水属于大气降水, 地下水年龄为 40 a<sup>[30]</sup>。在天池火山锥体的玄武岩阶地上, 还发育着众多的呈放射状分布的河流, 松花江、图们江与鸭绿江都发源于此<sup>[31]</sup>。长白山天池及其周边地区的降水量与径流量呈现出极大的不平衡, 总排泄量远远大于降水量, 接受外源水补给<sup>[32]</sup>。

由于同位素具有多解性, 所以, 地下水深循环的同位素证据受到了强烈的质疑。因此, 要证实地下水存在深循环过程, 必须找到水力学证据。地下水存在跨流域补给的水动力学证据来自于长白山天池, 由于天池地下水的补给源区的高程必须高于 2 200 m, 天池周边 1 300 km 范围内找不到符合高程条件的补给源区, 地下水的补给源区应该在更远的区域。扩大寻找范围, 海拔高于 2 200 m 的区域包括青藏高原、五台山、秦岭、六盘山、贺兰山等地区, 但除了青藏高原的湖泊河流存在渗漏外, 其他高程大于 2 200 m 地区的面积较小, 基本上没有河流与湖泊发育。通过同位素对比分析发现<sup>[32]</sup>, 只有羌塘盆地降水的 D、<sup>18</sup>O 同位素与长白山等北方地区的相似, 这就是说, 只有羌塘盆地满足了补给源区所必备的条件。

## 4 岩石圈导水构造形成机制

众所周知,欧亚大陆板块是由很多的小板块拼接而成的,在青藏高原与长白山之间跨越了祁连山、阿拉善地块、鄂尔多斯地块、内蒙古造山带、华北地块、兴安地块等,这些地块之间的相对运动持续到今。考虑到五大连池火山喷发是在公元 1719—1721 年,距今只有短短的 270 多 a,由此看来,岩石圈中地下水深循环导水构造形成的时间不会很长。岩石圈中的导水构造与近代的火山活动有关,“岩浆”与“水”具有完全不能相容的两种属性,但二者却匪夷所思地联系到了一起,地下水在岩浆中开辟出了最为捷径的通道。研究发现,火山玄武岩中存在着大量相互连通的导水孔洞,地下水正是从这些孔洞中涌出<sup>[24-33]</sup>。连通青藏高原与东部地区的地下水深循环通道应该位于火山岩中,印度板块在与欧亚大陆板块的碰撞过程中引起的岩浆活动范围包括青藏高原及其东部地区<sup>[34]</sup>,沿着缝合带出现了一系列的火山喷发,岩浆活动将高原与平原联系起来,火山停息后,未喷发出的岩浆快速冷却成孔洞型玄武岩,形成了深循环导水构造,如图 1 所示(根据文献<sup>[34]</sup>图 5 修改)。

如果地下水深循环是客观存在的事实,那么在岩石圈中必然存在着集中导水的通道,这些通道应该具有高导电性与低密度,应该符合高导低速的地球物理特征。大地电磁测深表明,青藏高原到河西走廊、内蒙古高原、鄂尔多斯、太行山、大兴安岭一带的断裂带或缝合带中存在连续的高导层<sup>[35]</sup>。羌塘中部地区则广泛分布了低速物质,大范围的 Sn 波缺失<sup>[36]</sup>。存在强烈渗漏的纳木错湖位于嘉黎断裂上,嘉黎断裂带电性显示为高导性质,连续的高导性延伸到 100 km 以下,中间存在陡直向地幔延伸的低阻通道,电阻率  $10 \sim 16 \Omega \cdot \text{m}$ <sup>[37]</sup>;羌塘盆地的高导低速结构从 10 km 延伸到 400 km,电阻在  $10 \sim 30 \Omega$  之间<sup>[38-40]</sup>。羌塘盆地所有的高导层都与火山裂谷、断裂带相通,而这些裂谷与断裂带往往与河道或断陷

湖泊有密切联系<sup>[41]</sup>。西藏高原渗漏水接近垂向地进入地幔,在东部地区排出地表,地下水深循环造成导水构造附近的温度大幅度降低,西藏岩石圈成为“冷幔热壳”,而东部岩石圈成为“冷壳热幔”。

山西裂谷和贝加尔裂谷分别存在两个高导层,第一高导层在中地壳,第二高导层在上地幔,高导层在裂谷处都出现了上隆,山西裂谷中地壳 ( $15 \sim 20 \text{ km}$ ) 高导层的电阻率为  $4 \sim 18 \Omega \cdot \text{m}$ ,上地幔 ( $55 \sim 80 \text{ km}$ ) 高导层的电阻率为  $6 \sim 9 \Omega \cdot \text{m}$ <sup>[42]</sup>。中地壳与地幔高导层中的流体可能是液态水或超临界流体 (SCF),当温度和压力达到  $374.15^\circ\text{C}$  和  $22.1 \text{ MPa}$  时,液态或气态的水都变成超临界态水 (SCW),超临界态水萃取溶蚀了岩石中的铁、镁等元素,形成超临界流体,超临界流体也具有高导特性<sup>[43]</sup>。如果两层高导层都是超临界流体,那么中地壳高导层的电阻率应该远大于地幔高导层,因为超临界流体的导电性与离子积相关,压力、温度越高,离子积越大,导电性能越强。如果中地壳与地幔高导层中的流体都是超临界流体,由于地幔的温度、压力比中地壳更高,于是地幔高导层的电阻率应该比中地壳高导层更低。但实际上,地幔与地壳高导层的电阻率的差异不是很大,由此可知,至少中地壳高导层中应该是流动的液态水,因为只有流动的水才能保持低温的性质。据此推断,山西裂谷与贝加尔裂谷都应该是地下水集中排泄的区域。

Afanasjev 根据水量平衡提出了贝加尔湖中存在地下水的补给,1901—1955 占总量的 5% ( $3.12 \text{ km}^3/\text{a}$ ),1901—1976 占总量的 4.3%<sup>[44]</sup>。补给贝加尔湖河流同位素的加权平均值  $\delta^{18}\text{O}$  为  $-15.5\text{‰}$ 、 $\delta\text{D}$  为  $-117\text{‰}$ ,降水的加权平均值  $\delta^{18}\text{O}$  为  $-13.3\text{‰}$ 、 $\delta\text{D}$  为  $-103\text{‰}$ ;降水与河流输入湖同位素的加权平均值  $\delta^{18}\text{O}$  为  $-15.2\text{‰}$ 、 $\delta\text{D}$  为  $-116\text{‰}$ ;而湖水的同位素值  $\delta^{18}\text{O}$  为  $-15.8\text{‰}$ 、 $\delta\text{D}$  为  $-123\text{‰}$ ,比入湖水贫化<sup>[45]</sup>,同位素关系表明,更加贫化的地下水补给到了贝加尔湖,西藏内流区河流的渗漏水符合补给源区同位素贫化特征。Mats 等<sup>[46]</sup>发现贝加尔湖底附近的平均流速达到

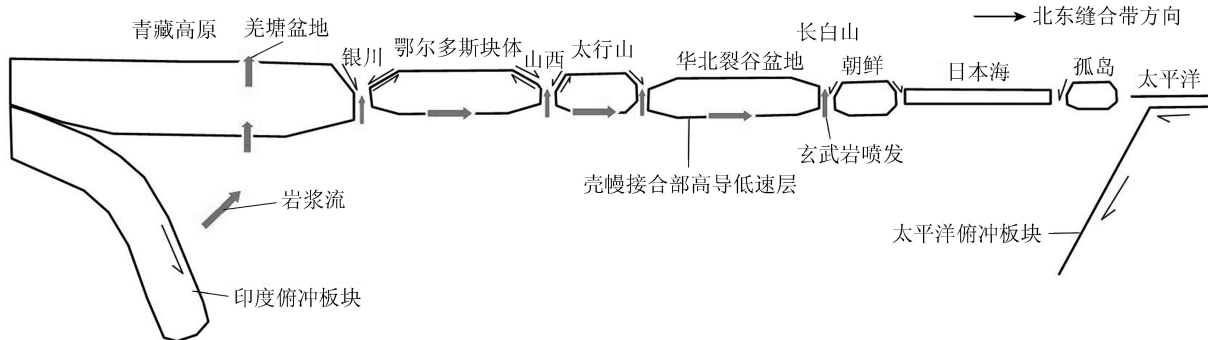


图 1 印度板块与欧亚大陆板块碰撞引起岩浆活动及火山喷发

5 cm/s,并没有观测到入湖的低温河水迅速沉入底部的现象,更多的观测结果是底部低温水向上的对流运动;上述现象表明,贝加尔湖接受深循环地下水的补给,补给湖泊的导水通道很可能就是高导低速层。

全世界最大的泉群出现在降水量只有 500 mm 的山西裂谷地区,遥感研究表明,太行山区强岩溶发育的径流带都是沿着裂谷方向分布,岩溶泉常出露于断陷盆地边缘与断裂带附近,构造控制着岩溶分布及泉群发育,灰岩裸露区透水性强<sup>[47]</sup>,这表明岩溶发育与地下水有关。仅太行山南部一带岩溶泉的数量就十分可观,其中天然流量在 1 m<sup>3</sup>/s 以上的大泉约 60 个,其流量超过了 200 m<sup>3</sup>/s<sup>[48]</sup>。泉群集中在降水量较低的地区显然不符合常理,泉群的出现可能与山西裂谷中的高导低速层有关。羌塘盆地双湖地区钻孔揭露了石灰岩中巨大的溶洞群,在钻孔过程中出现了井漏<sup>[49]</sup>,溶洞显然是在渗漏水的溶蚀下形成的。调查发现,山西裂谷地区发源的汾河、沁河、桑干河、滹沱河等河流的稳定补给源都来自于泉水,通过对泉水、河水与当地降水的  $\delta D-\delta^{18}O$  关系分析发现,当地降水不是泉水的补给源,泉水来自于同位素更为贫化的外源水地区,外源水的同位素特征与西藏羌塘盆地的地表水相同<sup>[32]</sup>,如图 2 所示。这就是说,山西裂谷泉群附近沉积的岩溶有可能是来自于羌塘盆地的石灰岩。

## 5 地下水与降水同位素分析

北方地区降水与地下水、泉水、河水中的  $\delta D-\delta^{18}O$  值存在明显差异,长白山天池地下水的  $\delta D-\delta^{18}O$  关系点落在全球雨水线 (GMWL) 上 (参见图 2),显然来自于大气降水,但是与东北地区 (长春、锦州、哈尔滨、齐齐哈尔) 降水同位素的加权平均值存在明显差异,排除了长白山本地降水入渗补给的可能性。另外,北方地区 (张掖、兰州、银川、石家庄、太

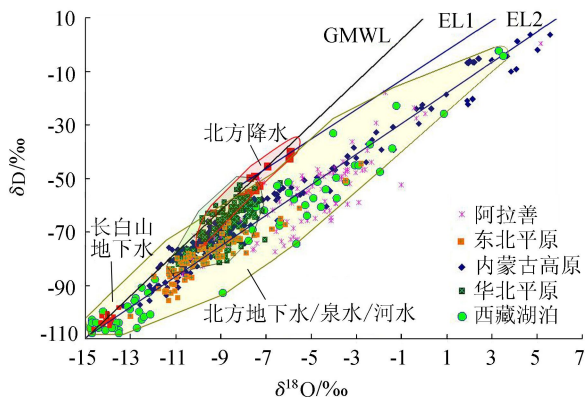


图 2 北方降水、河流、泉水、井水及西藏湖泊的  $\delta D-\delta^{18}O$  关系

原、天津、包头、西安、郑州) 降水加权平均值的  $\delta D-\delta^{18}O$  关系点分布在 GMWL 的右边,如果地表水或地下水来自于北方降水,则  $\delta D-\delta^{18}O$  关系点应该沿着蒸发线 EL1 分布,但在图 2 中,北方降水线 EL1 附近的  $\delta D-\delta^{18}O$  关系点很少,这表明北方地下水与地表水的主要补给源并非来自于当地的降水,由于北方降水同位素比东北地区的降水还要富集,所以,海拔高于 2 200 m 的北方地区不可能是长白山天池及东北地下水的补给源区。通过对比发现,东北及北方地区地下水、泉水与河水的  $\delta D-\delta^{18}O$  关系点落在 EL2 蒸发线附近,EL2 与 GMWL 的交点正好是长白山天池地下水的  $\delta D-\delta^{18}O$  关系点所在位置,这表明北方地区地下水与地表水的补给源区是相同或相近的,与西藏湖泊的  $\delta D-\delta^{18}O$  关系点落在了相同的区域内,所以,降水  $\delta D-\delta^{18}O$  关系点满足北方地下水来自于西藏内流区河流、湖泊补给的条件。

如果地下水经过了地壳或上地幔岩石圈的深循环,则岩石圈中的氦将溶于地下水中,所以氦可用来作为地下水的示踪剂。大气的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值  $R_a = 1.4 \times 10^{-6}$ ,由于地壳中富集铀、钍,它们可衰变产生  $^4\text{He}$ ,所以陆壳具有较低的比率 ( $^3\text{He}/^4\text{He}$  为  $0.01R_a$ ),而亏损地幔 (MORB) 具有高比值 ( $8 \pm 1$ )  $R_a$ <sup>[50]</sup>。对于  $R/R_a > 1$  的地下水而言,地下水中存在来自地幔的  $^3\text{He}$ 。长白山泉水 (14 个样) 的  $R/R_a$  值在 3.91 ~ 6.32 之间,均值为 5.61,五大连池泉水 (9 个样) 的  $R/R_a$  值在 1.46 ~ 4.55 之间,均值为 2.88<sup>[51]</sup>。五大连池火山岩 (7 个样) 包裹体中  $R/R_a$  均值为 4.61<sup>[52]</sup>,接近泉水值,而在松辽盆地火山岩包裹体 (37 个样) 中的  $R/R_a$  范围在 0.2 ~ 5.24 之间,均值为 1.79<sup>[53]</sup>,明显小于火山岩泉水。由于地壳及沉积地层中的  $R/R_a$  值远小于 1,如果泉水经过了地表沉积层,水中的  $R/R_a$  值将受到污染。由此也可以判断,东部火山地区的泉水经历了地幔火山岩地层。典型例子来自于浑善达克沙漠的锡林河,锡林河发源于沙漠腹地的火山口,河水的  $R/R_a$  为 1.265,明显具有幔源性质, $\delta D-\delta^{18}O$  关系确认河水的补给源为贫化的外源水,据此判断,外源水经过了孔洞型火山玄武岩导水构造。

水中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  可以用来判定地下水是否经过了地幔循环,由于锶同位素不发生分馏,大气降水中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值接近海水 (0.709 073),降水入渗岩石圈后,岩石中的锶溶入水中,富集的  $^{87}\text{Sr}$  来自于风化地壳,而贫乏的  $^{87}\text{Sr}$  来自于地幔<sup>[54]</sup>。地下水中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值自西向东逐渐减小。西藏河流中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值自西南向东北逐渐增加,藏南河流中的比值最小达到 0.705 534<sup>[55]</sup>。五大连池泉水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值在 0.706 44 ~ 0.707 98 之间,平均值为

0.706 817 1,而含水介质的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在0.711 80~0.71751之间<sup>[56]</sup>。长白山火山玄武岩中(8个样)的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在0.704 95~0.710 387之间,均值为0.705 786<sup>[57]</sup>;长白山发源的河水中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(18个样)在0.706 029~0.708 061之间,均值为0.707 252 7,河水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值略高于火山岩的均值。降水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为0.709,如果长白山的地下水来自于大气降水的补给,那么地下水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值低于0.709只有两种可能性,其一,混入了其他来源低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值水——地幔水(0.705 786);其二,入渗降水经过了地幔岩浆岩,岩浆岩中低值的锶被溶解进入到地下水中。因为补给天池的地下水为低温性质,不可能是地幔水,第一种可能性被排除,表明补给天池的地下水可能是来自于羌塘盆地的降水,在流经玄武岩孔洞的过程中发生了水岩反应,地幔岩浆岩中的锶融入了地下水中。松辽盆地含水层介质岩样的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在0.706 52~0.713 24之间,均值为0.709 67;而深层地下水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在0.706 62~0.707 04之间,低于地壳含水层介质。这表明水岩反应主要发生在地幔物质中,地下水更多地受到高浓度低比值( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )火山-地热水等幔源水的补给<sup>[58]</sup>。

鄂尔多斯盆地的河水氡值在7~27 TU之间,平均氡值17.2 TU;泉水氡值在2~55 TU之间,平均氡值13.7 TU<sup>[59]</sup>;地下水的CFC<sub>s</sub>年龄主要集中在20~40 a之间<sup>[60]</sup>。阿拉善沙漠地下水的年龄在20~30 a之间<sup>[1,61]</sup>,太行山东部地区地下水的年龄大于30 a<sup>[23]</sup>,采用氡测定的长白山地下水年龄约40 a<sup>[30]</sup>。东北三江平原的浅水年龄大于40 a<sup>[62]</sup>。北方地下水的年龄自西向东呈增大趋势,符合深循环地下水的补给、径流与排泄特征。

## 6 阿拉善找水取得的突破

位于内蒙古高原的阿拉善右旗自建旗以来始终没有找到生活水源,人畜饮水非常困难。阿拉善是一个古老独立的板块,全区广泛分布的花岗岩多集中于早二叠世<sup>[63]</sup>,野外考察发现,在阿拉善沙漠中存在第四纪火山,大部分的火山口被沙山掩埋。如果维系沙山的地下水来自火山通道,那么,在部分沙山中可能存在涌水的火山口,类似于长白山、五大连池等火山岩地区。新生代以来的岩浆活动将阿拉善花岗岩基底隆起,火山喷发停息后,地下水通过火山通道中的玄武岩孔洞涌入到火山口中形成火山湖,风尘颗粒在火山湖中沉积形成了沙山,从火山口中涌出的水经过潜流进入到盆地中。通过沙山周围的火山岩碎屑、根管结核、钙质胶结及沙山顶部附近

的植被发育,判断出沙山中存在着导水的火山口,钻孔揭示出的沙山与盆地的结构见图3。

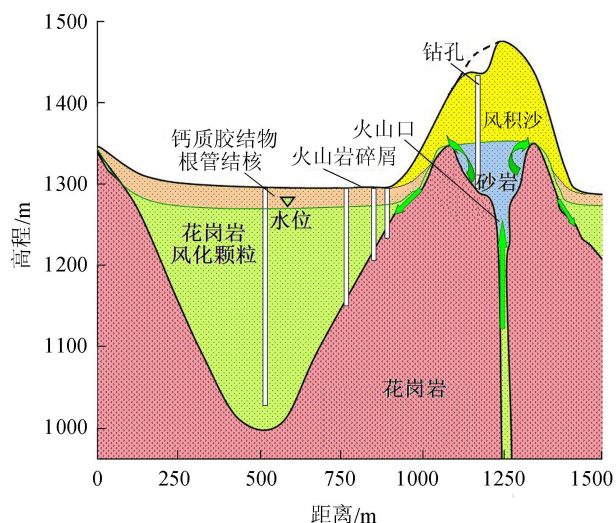


图3 阿拉善右旗沙山中的火山口构造及深循环地下水排泄示意图

根据深循环理论布置了勘探孔,8个钻孔都分布在疑似存在火山口的沙山周围,地貌特征见图3,在盆地中都找到火山岩碎屑与根管结核,符合深循环特征。钻孔揭示盆地的沉积物主要为风化的花岗岩颗粒,颗粒没有经过磨圆过程,距离沙山越近颗粒越粗,盆地表面的风积沙厚度在0~2 m之间,平均小于1 m。8个水源井的深度分别在90~260 m,水位埋深30~120 m,井间距最近的为0.9 km,最远的相距45 km。每一口井都位于一个独立的小盆地,8口井的静水位高程分布在1215.5~1298 m之间,井水位之间错落无序,最东边(1215.5 m)与最西边(1218.5 m)是两个最低值。抽水试验表明,8口井总水量接近1万 $\text{m}^3$ ,其中有3口井的涌水量达到80 $\text{m}^3/\text{h}$ ,盆地与盆地之间没有水力联系,也不符合断裂带导水特征。地下水具有较高的水温(18~19 $^{\circ}\text{C}$ ),其中含有大量的 $^{13}\text{C}$ 富集的 $\text{CO}_2$ 气体,符合深循环特征;地下水的TDS在0.6~1.7 g/L之间,其中6口井的TDS小于或等于1 g/L,达到了富锶型矿泉水标准,TDS小于或等于1 g/L的优质水源位于井群中部。地下水中的 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 贫化,符合青藏高原地表水特征,与当地降水存在明显差异,氡测定的地下水年龄大约为50 a。示踪测井证实,补给盆地的地下水来自于沙山中的火山口。

## 7 讨论

通过上述分析可知,鄂尔多斯、华北平原、内蒙古高原、东北平原等地的地下水的补给源不是当地的降水,在这些串珠状的河流与湖泊的下部可能存在着导水通道,岩石圈中的高导低速层可能就是远距离

输水的导水通道。地温梯度较低的地区主要分布在华北平原、鄂尔多斯、内蒙古高原、青藏高原北缘一带,河流与湖泊的源头都属于低温带,例如,渭河、泾河、桑干河、永定河、洛河、西拉木伦河、滦河、滹沱河、陡河、大沙河等河流源头的地温梯度在  $7.1 \sim 13.0^{\circ}\text{C}/\text{km}$  之间,远低于  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$  的平均地温梯度<sup>[8]</sup>。

研究表明,在深循环通道的形成演变过程中,玄武岩孔洞曾被超临界态水强烈的萃取溶蚀,而且还经历了从高温到低温的降温过程。孔洞构造中大量的铁、镁、锰等被超临界态流体萃取带出,在地表附近成岩、成矿,被溶蚀的孔洞逐渐发展成为导水通道。研究发现,在地下水丰富的内蒙古高原一带存在热液矿藏与白云岩,在热液矿藏中存在淡水白云岩,表明热液经历了从高温到低温的过程<sup>[64-65]</sup>。北方地下水丰富的地区,广泛分布着红色风化壳;六盘山南边发现了最早的红土,从 0.22 亿 ~ 0.62 亿 a 的红土呈现连续的堆积<sup>[66]</sup>,但在空间上为点状或带状分布,例如,分布在火山口附近,河流或湖泊附近。青藏高原曾经蕴藏着丰富的油气资源,但是在羌塘盆地的钻探中仅发现沥青脉或干沥青,在盖层完好的情况下,流动的油气缺失了<sup>[49]</sup>。但在大庆、新疆、鄂尔多斯等油气藏研究中却发现了来自地幔的物质,在沥青包裹体中检测到了来自地幔的铷、镍、钒等成分,铷被公认为地球核幔成分,沥青包裹体中的钐-钐同位素得出,这些来自地幔的深部物质可能与大陆高原玄武岩有关<sup>[67-69]</sup>;石油、沥青中的铅、锶、钍同位素示踪与定年则显示原油特别是甲烷与氢气均具有深源特征,这表明,砂岩型铀矿的沉淀与成矿是由于深部油气的还原作用所造成的<sup>[70]</sup>。

## 8 结 语

研究证实,地下水的补给、径流、排泄形式除了区域水文地质水循环之外,还存在着一种深循环形式——地下水经过中地壳或上地幔岩石圈中的导水构造实现跨流域循环。根据水量平衡估算出的深循环水量超过  $100 \text{ km}^3$ ,深循环水成为北方地区的地下水、河流、湖泊及海沟中的上升泉的主要补给源。西藏内流区的渗漏水自西向东排泄,循环周期一般为 20 ~ 40 a。

地下水深循环究竟是真命题还是伪命题的问题曾在学术界引起了争议,质疑的焦点聚集在北方地区地下水的  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  具有多解性。调查发现,长白山周边  $1300 \text{ km}$  之内的地表高程都低于天池水位,符合补给源区所有条件的仅有西藏内流区。在山西与贝加尔裂谷地区中地壳与上地幔低电阻率层的存在提供了低温地下水在中地壳中循环的可靠证据。

东北地下水与河水的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值远低于降水值,低的锶同位素比值意味着地下水与地幔岩浆岩发生了水岩反应。白云岩化与红土堆积都表明深循环地下水经历了从高温到低温的过程,含有镁、铁等的热液矿物都来自于超临界态水萃取的地幔物质。

羌塘盆地的渗漏水经过深循环通道输送到了鄂尔多斯、华北、东北、贝加尔湖、东海、南海等地区,所以,西藏地区降水量、冰川、冻土层的增加与减少,都将影响到未来北方干旱区的生态与环境。地下水深循环的方式的发现表明,我们对北方等地区地下水的补给、径流与排泄的认知程度还较低,许多相关的地质学问题都与地下水的深循环过程有关,目前所揭示的地下水深循环过程仅是冰山一角。

## 参考文献:

- [1] CHEN Jiansheng, LI Ling, WANG Jiyang, et al. Groundwater maintains dune landscape[J]. Nature, 2004, 432:459-460.
- [2] CHEN Jiansheng, WANG Qiyong, TAN Hongbing, et al. New lakes in the Taklamakan Desert [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(22): 22402-5.
- [3] 陈建生,李孝泽. 青藏高原南北向断裂带向阿拉善高原/贝加尔湖输水的同位素证据(摘要)[C]//地质力学专业委员会与第四纪地质专业委员会. 青藏高原地质过程与环境灾害效应文集. 北京:地震出版社, 2005: 155.
- [4] ZHANG Z Z, ZOU L, CUI R Y, et al. Study of the storage conditions of submarine freshwater resources and the submarine freshwater resources at north Zhoushan sea area [J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(1): 47-52.
- [5] 陈建生,饶文波,丁宏伟,等. 青藏高原冰川融水深循环及其地质环境效应[J]. 科学导报, 2009, 27(14): 118-119. (CHEN Jiansheng, RAO Wenbo, DING Hongwei, et al. Glacial melt water deep-cycle in the Tibetan Plateau and its geological environmental effect [J]. Science & Technology Review, 2009, 27(14): 118-119. (in Chinese))
- [6] POST V E A, GROEN J, KOOI H, et al. Offshore fresh groundwater reserves as a global phenomenon[J]. Nature, 2013, 504: 71-78.
- [7] 陈传友,关志华. 羌塘高原水资源及其开发利用[J]. 自然资源学报, 1989(4): 298-307. (CHEN Chuanyou, GUAN Zhihua. The water resources of the Qiang-Tang Plateau and their development and use [J]. Journal of Natural Resources, 1989(4): 298-307. (in Chinese))
- [8] 陈建生,王庆庆. 北方干旱区地下水补给源问题讨论[J]. 水资源保护, 2012, 28(3): 1-8. (CHEN Jiansheng, WANG Qingqing. A discussion of groundwater recharge sources in arid areas of North China[J]. Water Resources

- Protection,2012,28(3):1-8. (in Chinese))
- [9] 王荣,羊向东,朱立平. 西藏纳木错过去 200 年来的环境变化[J]. 第四纪研究,2006,26(5):791-798. (WANG Rong, YANG Xiangdong, ZHU Liping. Environmental changes of Namuco, Xizang during the past 200 years[J]. Quaternary Sciences,2006,26(5):791-798. (in Chinese))
- [10] ZHOU S, KANG S, CHEN F, et al. Water balance observations reveal significant subsurface water seepage from Lake Nam Co, south-central Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology,2013,491(11):89-99.
- [11] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京:科学出版社,1998:398-480.
- [12] CHEN Jiansheng, LIU Xiaoyan, SUN Xiaoxu, et al. The origin of groundwater in Zhangye Basin, Northwestern China, using isotopic signature[J]. Hydrogeology Journal, 2014,22(2):411-424.
- [13] CHEN Jingsheng WANG Qiyong. Rising springs along the Silk Road[J]. Geology,2009,37(3):243-246.
- [14] CHEN Jiansheng, LIU Xiaoyan, WANG Qiyong, et al. Isotopic constraints on the origin of groundwater in the Ordos Basin of Northern China[J]. Environmental Earth Sciences,2012,66(2):505-517.
- [15] 陈建生,杨光亮,王婷,等. 内蒙古鄂尔多斯西北土壤水流动示踪实验及自流井群补给源讨论[J]. 地球学报,2014,35(3):365-374. (CHEN Jiansheng, YANG Guangliang, WANG Ting, et al. Soil water flow tracer test in northwest Ordos Basin, Inner Mongolia and discussion on recharge resources of artesian wells [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(3):365-374. (in Chinese))
- [16] 陈建生,刘震,刘晓艳. 深循环地下水维系黄土高原风尘颗粒连续沉积[J]. 地质学报,2013,87(2):278-287. (CHEN Jiansheng, LIU Zhen, LIU Xiaoyan, et al. Deep-circulation groundwater maintains continuous deposition of dusty particles in loess plateau [J]. Acta Geologica Sinica,2013,87(2):278-287. (in Chinese))
- [17] 陈建生,季弼宸,刘震,等. 内蒙古高原岱海接受远程深循环地下水补给的环境同位素及水化学证据[J]. 湖泊科学,2013,25(4):521-530. (CHEN Jiansheng, JI Bichen, LIU Zhen, et al. Isotopic and hydro-chemical evidence on the origin of groundwater through deep-circulation ways in Lake Daihai region, Inner Mongolia Plateau[J]. Journal of Lake Sciences,2013,25(4):521-530. (in Chinese))
- [18] 马景健,陈建生,彭靖,等. 基于 TM/ETM+遥感影像的达里湖补给源研究[J]. 河南科学,2014,32(11):2303-2308. (MA Jingjian, CHEN Jiansheng, PENG Jing, et al. Study of Dali Lake recharge source based on TM/ETM+ remote sensing[J]. Henan Science,2014,32(11):2303-2308. (in Chinese))
- [19] 陈建生,张志伟,刘震,等. 乌梁素海及其周边地区水源补给关系同位素研究[J]. 水资源保护,2013,29(4):12-18. (CHEN Jiansheng, ZHANG Zhiwei, LIU Zhen, et al. Isotope study of recharge relationships of water sources in Wuliangsuhai Lake and its surrounding areas[J]. Water Resources Protection,2013,29(4):12-18. (in Chinese))
- [20] 陈建生,陈茜茜,王婷. 阿拉善沙漠湿沙层水分来源同位素示踪[J]. 水科学进展,2014,25(2):196-206. (CHEN Jiansheng, CHEN Xixi, WANG Ting. Isotopes tracer research of wet sand layer water sources in Alxa Desert[J]. Advances in Water Science,2014,25(2):196-206. (in Chinese))
- [21] 赵旭春,王澄海,张永生,等. 两种干旱指标在乌海地区干旱分析中的应用比较研究[J]. 气象科学,2007,27(增刊1):162-168. (ZHAO Xiuchun, WANG Denghai, ZHANG Yongsheng, et al. Application, comparison and research of two kinds of grade indices of drought analysis in Wuhai Area[J]. Scientia Meteorologica Sinica,2007,27(Sup1):162-168. (in Chinese))
- [22] 侯光才,林学钰,苏小四,等. 鄂尔多斯白垩系盆地地下水系统研究[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2006,36(3):391-398. (HOU Guangcai, LIN Xueyu, SU Xiaosi, et al. Groundwater system in Ordos Cretaceous artisan basin (CAB) [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition,2006,36(3):391-398. (in Chinese))
- [23] 石旭飞,董维红,李满洲,等. 河南平原浅层地下水年龄[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2012,42(1):190-197. (SHI Xufei, DONG Weihong, LI Manzhou, et al. The age of shallow groundwater in Henan Plain[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition,2012,42(1):190-197. (in Chinese))
- [24] 贾福海,秦志学,韩子夜. 对我国新生代玄武岩地下水的初步认识[J]. 中国地质,1988(3):20-22. (JIA Fuhai, QIN Zhixue, HAN Ziyue. Preliminary understandings of the Cenozoic basalt groundwater[J]. Chinese Geology, 1988(3):20-22. (in Chinese))
- [25] 韩子夜. 我国新生代玄武岩地下水资源及其开发利用[J]. 勘察科学技术,1989(3):26-29. (HAN Ziyue. Cenozoic basalts of groundwater resources and their exploitation [J]. Site Investigation Science and Technology,1989(3):26-29. (in Chinese))
- [26] 刘若新,魏海泉,仇士华,等. 长白山天池火山最近一次大喷发年代研究及其意义[J]. 中国科学:D辑,1997,27(5):437-441. (LIU Rouxin, WEI Haiquan, QIU Shihua, et al. Tianchi volcano's last major eruption and its significance[J]. Science in China: Ser D,1997,27(5):437-441. (in Chinese))
- [27] 张勃夫. 长白山区地下水资源评价与合理利用[J]. 自然资源学报,1987,2(4):321-336. (ZHANG Bofu. Groundwater resource and its rational utilization in Changbai Mountainous district [J]. Journal of Natural



- Resources, 1987, 2(4): 321-336. (in Chinese))
- [28] 崔钟燮, 张三焕, 安在律. 长白山火山活动的现状和未来展望[J]. 国际地震动态, 1999(3): 1-5. (CUI Zhongxie, ZHANG Sanhuan, AN Zailu. Volcanic activities of the Changbai Mountain: present and future[J]. Recent Developments in World Seismology, 1999(3): 1-5. (in Chinese))
- [29] 张兴库, 朴观熙. 长白山天池水文特性分析[J]. 水文, 1991(2): 49-51. (ZHANG Xingku, PIAO Guanxi. Analysis on hydrologic characteristics of Changbai Tianchi [J]. Journal of China Hydrology, 1991(2): 49-51. (in Chinese))
- [30] 林元武, 高请武, 于清桐. 长山天池火山区长白聚龙泉热水氢氧稳定同位素组成与氡分布规律[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊1): 236-240. (LIN Yuanwu, GAO Qingwu, YU Qingtong. Hydrogen and oxygen stable isotopic compositions and distribution of tritium contents in hot water of the changbaijulongquan spring in the Tianchi volcanic region, Changbai Mountains [J]. Geological Review, 1999, 45(Sup1): 236-240. (in Chinese))
- [31] 张勃夫. 吉林省地下水资源形成与分布的基本特点[J]. 长春地质学院学报, 1981(4): 47-52. (ZHANG Bofu. The formation and distribution characteristics of groundwater in Jinlin Province [J]. Journal of Changchun Geology College, 1981(4): 47-52. (in Chinese))
- [32] 江巧宁, 陈建生. 深循环地下水补给长白山天池的水量平衡分析[J]. 水资源保护, 2015, 31(5): 55-62. (JIANG Qiaoning, CHEN Jiansheng. Analysis on water balance of deep cycle groundwater supplying Tianchi Lake of Changbai Mountain [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(5): 55-62. (in Chinese))
- [33] 张希友, 李国政. 长白山地热田地质及地球化学特征[J]. 吉林地质, 2006, 25(1): 25-30. (ZHANG Xiyu, LI Guozheng. The geologic and geochemical characteristics of the Changbai Mountain geothermal field [J]. Jilin Geology, 2006, 25(1): 25-30. (in Chinese))
- [34] 邓晋福, 肖庆辉, 邱瑞照, 等. 华北地区新生代岩石圈伸展减薄的机制与过程[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 751-761. (DENG Jinfu, XIAO Qinghui, QIU Ruizhao, et al. Cenozoic lithospheric extension and thinning of North China: mechanism and process [J]. Geology in China, 2006, 33(4): 751-761. (in Chinese))
- [35] 徐常芳. 中国大陆地壳上地幔电性结构及地震分布规律(一)[J]. 地震学报, 1996, 18(2): 254-261. (XU Changfang. Structure and distribution of the earthquake on the Chinese continental crust mantle electrical [J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(2): 254-261. (in Chinese))
- [36] TAPPONNIER P, MOLNAR P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics [J]. Nature, 1976, 264: 319-324.
- [37] 魏文博, 金胜, 叶高峰, 等. 藏北高原地壳及上地幔导电性结构: 超宽频带大地电磁测深研究结果[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1215-1225. (WEI Wenbo, JIN Sheng, YE Gaofeng, et al. Conductivity structure of crust and upper mantle beneath the northern Tibetan Plateau: results of super-wide band magnetotelluric sounding [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1215-1225. (in Chinese))
- [38] WEI W, UNSWORTH M, JONES A, et al. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies [J]. Science, 2001, 292: 716-718.
- [39] ZHAO W, MECHIE J, BROWN L D, et al. Crustal structure of central Tibet as derived from project indepth wide-angle seismic data [J]. Geophysical Journal International, 2001, 145(2): 486-498.
- [40] UNSWORTH M, WENBO W, JONES A G, et al. Crustal and upper mantle structure of northern Tibet imaged with magnetotelluric data [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2004, 109(2): 543-543.
- [41] 金胜, 叶高峰, 魏文博, 等. 青藏高原西缘壳幔电性结构与断裂构造: 札达-泉水湖剖面大地电磁探测提供的依据[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2007, 32(4): 474-480. (JIN Sheng, YE Gaofeng, WEI Wenbo, et al. The electrical structure and fault feature of crust and mantle of western Tibet Plateau: based on results of magnetotelluric survey along profile Zhada-Quanshuihu [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(4): 474-480. (in Chinese))
- [42] 李立. 大地电磁测深(MTS)用于研究地壳上地幔的初步成果[J]. 物探与化探, 1997, 21(6): 460-467. (LI Li. The preliminary achievements of magnetotelluric sounding in the study of the crust and upper mantle [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 21(6): 460-467. (in Chinese))
- [43] SHAW R W, THOMAS B B, ANTONY A C, et al. Supercritical water: a medium for chemistry [J]. Chem Eng News, 1991, 69: 26-38.
- [44] GRANINA L. The chemical budget of Lake Baikal: a review [J]. Limnology & Oceanography, 1997, 42(2): 373-379.
- [45] SEAL R R, SHANKS W C. Oxygen and hydrogen isotope systematics of Lake Baikal, Siberia: implications for paleoclimate studies [J]. Limnology & Oceanography, 1998, 43(6): 1251-1261.
- [46] MATS V D, FUJII S, MASHIKO K, et al. Changes in lake Baikal water levels and runoff direction in the Quaternary period [C]// MINOURA K. Lake Baikal. Amsterdam: Elsevier Science B V, 2000: 15-34.
- [47] 朱严林, 张延安. 太行山地区岩溶发育特征分析[J]. 江苏煤炭, 1999(1) 14-15. (ZHU Yanlin, ZHANG Tingan. Analysis of karst development characteristics in Taihang

- Mountain[J]. *Jiangsu Journal of Coal*, 1999 (1): 14-15. (in Chinese))
- [48] 韩行瑞,张凤岐,李博涛. 中国北方岩溶泉[J]. *工程勘察*, 1985 (4): 65-68. (HAN Xingrui, ZHANG Fengqi, LI Botao. Karst spring in Northern China[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 1985 (4): 65-68. (in Chinese))
- [49] 李忠雄,杜佰伟,汪正江,等. 藏北羌塘盆地中侏罗统石油地质特征[J]. *石油学报*, 2008, 29 (6): 787-803. (LI Zhongxiong, DU Baiwei, WANG Zhengjiang, et al. Petroleum geologic characteristics of the Middle Jurassic strata in Qiangtang Basin of Northern Xizang area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29 (6): 797-803. (in Chinese))
- [50] SHANGGUAN Z, SUN M. Mantle-derived rare-gas releasing features at the Tianchi volcanic area, Changbaishan Mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(9): 768-771.
- [51] 杜建国,李圣强,刘连柱,等. 五大连池火山区气体地球化学特征[J]. *地球化学*, 1999, 28 (2): 171-176. (DU Jianguo, LI Shengqiang, LIU Lianzhu, et al. Geochemistry of gases from Wudalianchi volcanic district, Northeastern China[J]. *Geochimica*, 1999, 28 (2): 171-176. (in Chinese))
- [52] 赖勇,刘玉琳,黄宝玲,等. 五大连池和宽甸地幔包体的惰性气体同位素特征: MORB 型地幔和交代型地幔[J]. *岩石学报*, 2005, 21 (5): 1373-1381. (LAI Yong, LIU Yulin, HUANG Baoling, et al. The character is ties of noble gases in mantle-derived xenoliths in Wudalianchi and Kuandian, NE China: MORB-like mantle and metasomated mantle[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21 (5): 1373-1381. (in Chinese))
- [53] 陶士振,戴金星,邹才能,等. 松辽盆地火山岩包裹体稀有气体同位素与天然气成因成藏示踪[J]. *岩石学报*, 2012, 28 (3): 927-938. (TAO Shizhen, DAI Jinxing, ZHOU Caineng, et al. The trace of genesis, formation and mineral resources of natural gas and rare gas isotope existing in volcanic inclusion of Songliao Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 927-938. (in Chinese))
- [54] DAVISSON M L, CRISS R E. Na-Ca-Cl relations in basinal fluid [J] *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60 (15): 2743-2752.
- [55] 赵继昌,李文鹏,彭建华,等. 唐古拉山发源的河水主要元素与锶同位素来源及环境意义[J]. *现代地质*, 2007, 21 (4): 591-599. (ZHAO Jichang, LI Wenpeng, PENG Jianhua, et al. Origin and environmental significance of major elements and sr isotope ratios in rivers originating from Tanggula Mountains[J]. *Geoscience*, 2007, 21 (4): 591-599. (in Chinese))
- [56] 钱丽萍. 五大连池药泉山矿水锶元素水文地球化学特征[J]. *资源开发与市场*, 2007, 23 (10): 865-867. (QIAN Liping. Hydrographic geochemistry characteristic of strontium element in Yaoquan mineral water in Wudalianchi[J]. *Resource Development & Market*, 2007, 23(10): 865-867. (in Chinese))
- [57] 解广轰,王俊文, BASU A R, 等. 长白山地区新生代火山岩的岩石化学及 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 1988, 4 (4): 1-13. (XIE Guanghong, WANG Junwen, BASU A R, et al. Petrochemistry and Sr, Nd, Pb-isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks, Changbaishan area, Northeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1988, 4(4): 1-13. (in Chinese))
- [58] 史婷婷,成建梅,解习农,等. 松辽盆地北部地层水同位素特征及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2012, 30 (2): 399-404. (SHI Tingting, CHENG Jianmei, XIE Xinong, et al. Isotopic characteristics of formation waters in the north of Songliao Basin and its geological significances[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30 (2): 399-404. (in Chinese))
- [59] 陈茜茜,陈建生,王婷. 我国北方地下水年龄测定问题讨论[J]. *水资源保护*, 2014, 30 (2): 1-5. (CHEN Xixi, CHEN Jiansheng, WANG Ting. A discussion of groundwater dating in Northern China [J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30(2): 1-5. (in Chinese))
- [60] 柳富田,苏小四,侯光才,等. CFC\_S 法在鄂尔多斯白垩系地下水盆地浅层地下水年龄研究中的应用[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37 (2): 298-302. (LIU Futian, SU Xiaosi, HOU Guangcai, et al. Application of CFC\_S methods in dating shallow groundwater in the Ordos cretaceous groundwater basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2007, 37 (2): 298-302. (in Chinese))
- [61] CHEN Jiansheng, ZHAO Xia, SHENG Xuefen, et al. Formation mechanisms of megadunes and lakes in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(24): 3026-3034.
- [62] 张兵,宋献方,张应华,等. 基于氦同位素和 CFCs 的三江平原浅层地下水更新能力估算[J]. *自然资源学报*, 2014, 29 (11): 1859-1868. (ZHANG Bing, SONG Xianfang, ZHANG Yinghua, et al. Estimation of groundwater renewal rate by tritium and chlorofluorocarbons in Sanjiang Plain [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29 (11): 1860-1868. (in Chinese))
- [63] 刘治博,张维杰. 内蒙古阿拉善右旗杭嘎勒中二叠世石英闪长岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. *地质学报*, 2014, 88 (2): 198-207. (LIU Zhibo, ZHANG Weijie. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the middle permian quartz diorite in Hanggale, Alax Right Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(2): 198-207. (in Chinese))

pollutants by Ru/TiO<sub>2</sub>-catalyzed permanganate oxidation [J]. *Water Research*, 2014, 63: 262-270.

[19] ZHANG J, SUN B, GUAN X. Oxidative removal of bisphenol A by permanganate: Kinetics, pathways and influences of co-existing chemicals [J]. *Separation & Purification Technology*, 2013, 107: 48-53.

[20] 何颀. 腐殖酸对高锰酸钾氧化酚类化合物的影响及机理探讨[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[21] HE D, GUAN X, MA J. et al. Influence of different nominal molecular weight fractions of humic acids on phenol oxidation by permanganate [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(21): 8332-8337.

[22] HE D, GUAN X, Ma J, et al. Influence of humic acids of different origins on oxidation of phenol and chlorophenols by permanganate [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 182(1/2/3): 681-688.

[23] SUN B, ZHANG J, DU J, et al. Reinvestigation of the role of humic acid in the oxidation of phenols by permanganate [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(24): 14332-14340.

[24] JIANG J, PANG S, MA J. Oxidation of triclosan by permanganate (Mn(VII)): importance of ligands and in situ formed manganese oxides [J]. *Environmental Science*

& Technology, 2009, 43(21): 8326-8331.

[25] SONG Y, JIANG J, MA J, et al. ABTS (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline)-6-sulfonate) as an electron shuttle to enhance the oxidation kinetics of substituted phenols by aqueous permanganate (Mn(VII)) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, Accepted.

[26] 庞素艳, 江进, 马军, 等. MnO<sub>2</sub> 催化 KMnO<sub>4</sub> 氧化降解酚类化合物 [J]. *环境科学*, 2010, 31(10): 2331-2335. (PANG Suyan, JIANG Jin, MA Jun, et al. Oxidation of phenolic compounds with permanganate catalyzed by manganese [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(10): 2331-2335. (in Chinese))

[27] 孙波. 腐植酸对高锰酸钾氧化酚类化合物的影响机理探究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[28] 唐凯, 贾佳, 邓靖, 等. 超声及高锰酸钾-超声协同降解水中 17β-雌二醇的影响因素分析 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2014: 1132-1140. (TANG Kai, JIA Jia, DENG Jing, et al. Influencing factors analysis of 17β-estradiol degradation in aqueous system by ultrasound and KMnO<sub>4</sub> combined with ultrasound [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2014: 1132-1140. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-10-05 编辑: 彭桃英)

(上接第 17 页)

[64] 姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞. 地幔流体与铀成矿作用 [J]. *地质前缘*, 2004, 11(2): 491-499. (JIANG Yaohui, JIANG Shouyong, LING Hongfei. Mantle-derived fluids and uranium mineralization [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(2): 491-499. (in Chinese))

[65] YANG X Y, SUN W D, ZHANG Y X, et al. Geochemical constraints on the genesis of the Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit in Inner Mongolia, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(5): 1417-1435.

[66] GUO Z T, RUDDIMAN W F, HAO Q Z, et al. Onset of Asia desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416: 159-163.

[67] 郭占谦, 杨兴科. 中国含油气盆地的多种生烃机制 [J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(1): 50-52. (ZHANG Xinjian, YANG Xingke. Analysis of oil-gas pool characteristics in baiyinchagan depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(1): 50-52. (in Chinese))

[68] 郭占谦. 关于松辽盆地北部油气勘探如何突破的思考 [J]. *大庆石油地质与开发*, 1998, 17(5): 1-7. (GUO Zhanqian. Reflect on how to make a breakthrough in hydrocarbon exploration in north part of songliao basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 1998, 17(5): 1-7. (in Chinese))

[69] 潘爱芳, 赫英. 鄂尔多斯盆地石油的稀土元素地球化学特征 [J]. *中国稀土学报*, 2008, 26(3): 374-380. (PAN

Aifang, HE Ying. Rare earth element geochemical characteristics of oil in the Ordos Basin [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2008, 26(3): 374-380. (in Chinese))

[70] 张景廉, 卫平生, 张虎权, 等. 再论石油与砂岩型铀矿床的相互关系: 四论油气与金属(非金属)矿床的相互关系 [J]. *新疆石油地质*, 2006, 27(4): 493-497. (ZHANG Jinglian, WEI Pingsheng, ZHANG Huquan, et al. Re-discussion of relationship between petroleum and sand-type uranium deposit [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(4): 493-497. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-08-20 编辑: 熊水斌)

