

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.05.002

深循环地下水补给长白山天池的水量平衡分析

江巧宁¹, 陈建生^{1,2}

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用水量平衡方法研究天池集水区以外海拔高于天池水位地区是否能形成地下水补给到天池, 通过对8个流域的水量平衡分析, 发现天池周边流域的水量出现了较大的不平衡, 多年平均的总排泄量大于降水量, 外源水对研究区的年补给量达到23.25亿m³。研究表明补给天池的地下水不可能来自于天池集水区以外长白山降水的入渗补给。由于天池周边1300 km范围内没有海拔高于天池水位的高原地区, 据此推断, 天池接受远源地下水补给, 考虑到补给区存在强渗漏与同位素特征, 推测补给天池的地下水来自于西藏高原河流的渗漏, 地下水以一种特殊深循环方式完成了补给、径流与排泄过程。

关键词: 深循环地下水; 水量平衡; 同位素特征; 天池; 长白山

中图分类号: P641 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2015)05-0007-07

Analysis on water balance of deep cycle groundwater supplying Tianchi Lake of Changbai Mountain

JIANG Qiaoning¹, CHEN Jiansheng^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Researches are conducted over the problem whether the area out of Tianchi catchment with the altitude higher than Tianchi's water level can infiltrate as groundwater supplying Tianchi Lake with the approach of water balance method. By analyzing the water balance in 8 basins, conclusions are drawn that there are much unbalance in water around Tianchi basin; Years of average water output is larger than the precipitation; Exotic water recharge $23 \times 10^8 \text{ m}^3$ of water to the research area every year. Research shows that groundwater supplying Tianchi cannot come from infiltration of areas out of Tianchi catchment with the altitude higher than the water level. For there are no land higher than Tianchi water level in 1300 km around, it can be inferred that Tianchi receive remote groundwater supplement. Considering recharge area having large leakage and its isotope feature, it can be speculated that groundwater recharging Tianchi is from leakage of Tibetan rivers. There is a special deep cycle of groundwater to complete the supply, runoff and drainage processes.

Key words: deep cycle groundwater; water balance; isotope feature; Tianchi Lake; Changbai Mountains

长白山天池火山地处中国吉林省东部, 与朝鲜接壤, 天池位于长白山主峰白头山之巅, 不仅是中国最深的湖泊, 也是中国东北地区最高的湖泊。长白山天池火山水资源丰富, 松花江、鸭绿江与图们江均发源于此。探究长白山地区的水资源情况对东北地

区的生态建设有重要意义。长白山天池瀑布是天池唯一出水口, 也是松花江的源头, 瀑布从不断流, 最小流量为0.8 m³/s, 许多学者对长白山天池地区水资源情况的研究证实, 天池除接受集水区内部的降水补给外, 还接受地下水的补给^[1-2], 大气降水以雪

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划(KYZZ_0141)

作者简介: 江巧宁(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为同位素水文地质。E-mail: jqn_hhu@163.com

通信作者: 陈建生, 教授。E-mail: jschen@ hhu. edu. cn

水和雨水的形式补给,地下水以温泉水和裂隙水的形式补给。其中大气降水补给占 35%,地下水补给占 65%^[3]。

天池位于中国东北地区的最高山脉,其水位高程为 2 189.7 m。除长白山天池主峰外,在中国东北地区没有比天池更高的山脉,因此,理论上补给天池的地下水存在 4 种可能性:①天池周围海拔高于天池水位的外流区降水入渗成为地下水后,通过地下径流补给到天池中(图 1)^[3-6];②存在含水层中的“古水”在受到挤压变形后压力升高涌入天池^[7-8];③地下水来自于地幔岩浆水;④地下水来源于长白山以外的高原地区的河流或湖泊渗漏。

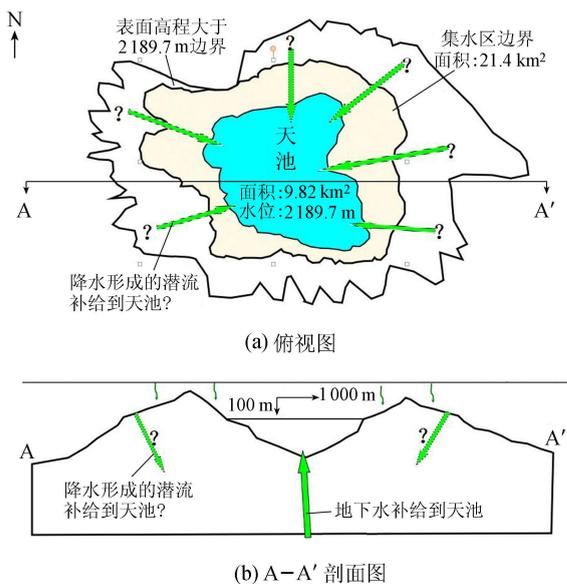


图 1 长白山天池降水入渗形成潜流补给湖泊示意图

由于天池瀑布的年流量基本稳定,而且根据氡计算出的循环周期约为 40 a^[2,9-11],所以可以排除天池水是古水的可能性。另外,补给天池的地下水只有 10 ℃,而地幔岩浆水应该具有高温特性,且湖水与地幔岩浆水存在明显差别^[12],所以,也可以排除天池水来自于地幔岩浆水的可能性。于是,补给天池的地下水来源只存在两种可能性,即①与④。近几年,水量平衡方法被应用在内陆湖泊、水库、泛滥平原和灌溉区等的水资源情况研究^[13-16]。笔者通过天池周边流域的水量平衡关系,研究天池地下水的来源是否符合前人提出的假设,从而确定补给天池的地下水究竟是来自于当地的降水,还是来自于外源水。如果天池的地下水接受了集水区以外降水的补给,天池周边流域的降水量将大于排泄量;反之,如果天池周围流域的降水量小于或等于排泄量,则表明有外源地下水补给到天池地区。所以,水量平衡关系是确定天池地下水是否接受外源水补给的关键证据。

1 天池地下水来源概述

长白山天池位于东经 128°02′~128°05′、北纬 41°59′~42°02′之间。长白山山脉由新生代多期的火山活动所形成,火山活动频繁。16 世纪以来,长白山天池就曾有过 3 次火山喷发,天池就是多次火山活动形成的典型火山口湖。天池周围有 16 座海拔超过 2 500 m 的山峰,山峰的背池侧较缓,向池侧陡峭。在天池周围,是火山熔岩寒冻风化后崩塌下来的大小石块形成的石流倒石堆^[3]。天池位于长白山脉的主峰——将军峰,高程为 2 749 m,是中国东北地区最高的山峰。长白山天池火山湖四面环山,唯其北坡有一出口,形成高达 68 m 的长白山瀑布,南北长 4 850 m,东西宽 3 350 m,周长 13 110 m,湖水面积为 9.82 km²,集水面积为 21.4 km²,湖水位 2 189.7 m^[2],天池平均水深 204 m,最深达 373 m,总蓄水量为 20.04 亿 m³。有学者认为,天池集水面积以外海拔高于 2 189.7 m 以上的地区都可能是天池地下水的补给区,认为天池水面以上地下水最大可能集水面积为 50.57 km²,降水入渗玄武岩孔洞结构形成地下潜流,最终补给到湖泊中^[3]。根据前人的研究结果,笔者做出了降水补给天池的示意图(图 1),补给天池的降水范围扩大到了集水区之外海拔高于天池水位的区域,图 1(a)为俯视图,箭头表示海拔高于天池水位的降水都可能补给到湖泊中;图 1(b)为 A—A′剖面图,示意海拔高于天池水位的降水入渗成为地下水后补给到了湖泊中。

迄今为止,图 1 所示的补给方式并没有被水量平衡关系所证实。天池周边存在大规模热水活动,遍布温泉^[5-6],天池集水区以外的降水形成的径流也可能补给周边的泉水与河流,那么是否还有足够的降水补给到天池中?由于温泉必须经过地下深循环才可能被加热,这就是说,天池周边的温泉必须经过深循环过程(图 1(b)所示的补给、径流、排泄过程),即降水→入渗→深循环加热→返回到 2 155 m 高程以温泉形式排泄,地下径流经过了 40 a,降水区的地表高程所施加的水压力为什么不衰减?水压力还能否将深循环热水驱动至 2 155 m 高程?天池外流区降水入渗循环的这个过程可能存在吗?实际上,这些疑问都没有得到解决。

通过研究天池外流区的水量平衡关系,可以半定量或定性得出天池地下水是否来自于当地降水的结论。为了研究天池外围的水量平衡关系,在天池周围划分出 4 个大流域:高丽城子(4 728 km²)、汉阳屯(8 532 km²)、长白(2 211 km²)与南坪(6 745 km²),总面积为 22 216 km²。在高丽城子流域内又选择了九

公里(253 km²)与漫江(586 km²)两个小流域;在汉阳屯流域内又选择了二道白河(210 km²)与松江(1900 km²)两个小流域。4 个小流域的特点是面积小,但径流量大,河流源区都是天池周边的火山岩锥体坡面上稳定的泉群。8 个流域都各有位于其下游的水文观测站,在所选择的流域内还分布有雨量站。长白山天池周边流域示意图见图 2。

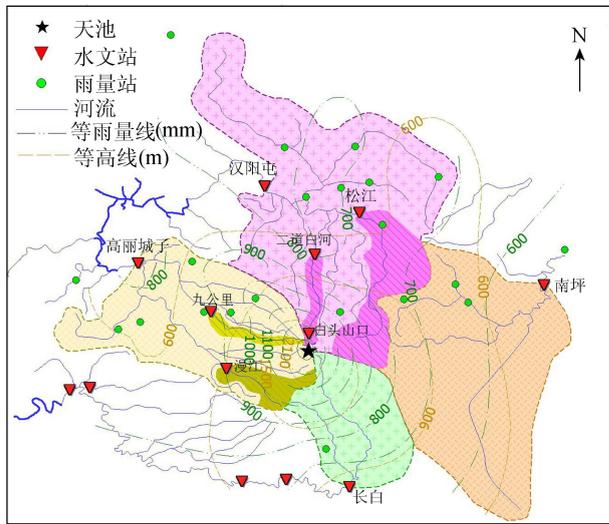


图 2 长白山天池周边流域示意图

2 研究数据与方法

8 个流域完整覆盖了长白山天池火山的周边区域(图 2),为探究区域水量平衡问题提供了良好的前提条件。由于长白山天池地区海拔高,是中国东北地区的制高点,周围是平坦的东北平原,同时也基于上文提到的关于长白山地下水来源的第一个观点,即长白山天池地下水来源于高于天池海拔地区的当地降水入渗,首先假设长白山天池地区水资源的输入量就只有降水。若长白山天池地区的地下水由当地降水入渗补给而来,那么长白山天池地区周边流域的降水量应远大于径流量和蒸散发量之和,反之,此假设不成立。

长白山天池地区气候条件随季节性变化大,夏季降水量大,植物覆盖率高,植被类型复杂,从山顶到山脚呈带状垂直分布,依次是高山草甸、针叶林、红松阔叶林^[17-18],蒸腾作用旺盛,植物的蒸散发是水资源消耗的一大组成部分;而冬季大雪覆盖,虽然雪面蒸发速率小,但由于雪面覆盖面积大,积雪时间长(170 d 以上),所以其雪面蒸发总量较大。长白山红松阔叶林 2002—2005 年的积雪期雪面蒸发量分别为 27.6 mm、25.52 mm 和 22.9 mm,占冬季降雪量的 37.9%、19.5% 和 30.0%^[19]。因此在计算水量平衡过程中,径流量,植物蒸散发量,河流、湖泊、泉水及雪面蒸发量为其主要的水资源输出因素。综

合水资源输入因素和输出因素列出的水量平衡公式为

$$P - R - E_p - E_w = 0 \quad (1)$$

式中: P 为降水量,mm; R 为径流深,mm; E_p 为植物蒸散发量,mm; E_w 为河流、湖泊、泉水及雪面蒸发量,mm。

在研究区内分布着 8 个水文站与 21 个雨量站(图 2),选用 2006—2012 年《中国水文年鉴》^[17](以下简称《年鉴》)所载 8 个水文站的降水、径流数据以及 21 个雨量站的降水统计数据作为计算水量平衡的基本数据。利用加权平均法计算流域的平均降水量计算每个水文站和雨量站降水数据的多年平均值,根据每个站点的多年降水平均值绘制等雨量线,利用下式计算流域平均降水量:

$$\bar{H} = \frac{1}{F} \sum f_i h_i \quad (2)$$

式中: \bar{H} 为流域平均降水量,mm; F 为流域总面积,km²; f_i 为相邻两等雨量线间的面积,km²; h_i 为相对应的 f_i 上的平均降水量,mm。

长白山地区的植物蒸散发量主要选用国际上常用的 Penman-Monteich 模型进行计算^[20-25],计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R - G) + \gamma \frac{900u_2(e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量,mm/d; R 为植物冠层表面净辐射量,MJ/(m²·d); G 为土壤热通量,MJ/(m²·d); e_s 为饱和水气压,kPa; e_a 为实际水气压,kPa; Δ 为饱和水气压与温度曲线斜率,kPa/°C; γ 为湿度表常数,kPa/°C; T 为空气平均温度,°C; u_2 为地面以上 2 m 高处的风速,m/s。

Penman-Monteich 模型计算所用的温度、水气压、风速等各项参数来自中国生态系统研究网络(CERN, www.cerndata.ac.cn)2006—2012 年的多年平均值。计算过程中,根据各流域主要树种、平均海拔等因素的不同,调整各项参数,计算各流域蒸散发量。

径流量取的是《年鉴》所载 8 个水文站实测值的多年平均值,并换算成各流域内以毫米为单位的径流深进行对比分析。由于通过降水量、径流量和植物蒸散发量 3 类数据已经能够说明之前假设的水量不平衡问题,因此在本文中并未涉及各流域河流、湖泊、泉水以及雪面蒸发量的计算和分析。

3 结果与分析

从图 2 可见,长白山天池火山周边区域的降水

量分布以天池为中心呈放射状逐渐降低,天池的降水量最高,达 1 376.4 mm,降水量与高程有密切关系,高程高的地区,降水量相对较高。就地形地势来看,长白山天池火山周边区域的降水量呈现西高东低的现象。以流域而言,西边的高丽城子、漫江、二道白河和九公里等 4 个流域的降水量都高于其他流域。

从图 3 中可以清晰地分辨各流域每月的降水量和径流量。8 个流域的降水量都呈现季节性变化,6—8 月这 3 个月是降水最丰沛的时间段,冬季降水明显小于夏季降水。8 个流域径流深的峰值基本上都出现在 6—8 月,高丽城子、汉阳屯、松江、漫江和九公里流域的径流深在 4 月、5 月出现一个很明显的跳跃,且 5 月的径流深高于降水量充沛的 6 月。笔者认为这是 4 月气温开始转暖,积雪融化汇入河流所致。8 个流域在 12 月和 1 月均有径流,且九公里、漫江、二道白河和长白这 4 个流域在 12 月和 1 月的径流量大于等于当月降水量,但 1 月和 12 月的

长白山处于冬季,平均气温低于零下 10℃,水面结冰,降水以雪的形式基本上不参与径流,因此可认为 12 月和 1 月的径流量主要是地下水补给。

综合表 1 的蒸散发量结果和图 2 等高线可以发现,海拔高的流域年均蒸散发量较低。二道白河、长白、漫江、九公里 4 个流域的平均海拔较高,均在 700 m 以上,主要树种是针叶林和高山草甸,其多年平均蒸散发量分别 420.52 mm、467.71 mm、412.4 mm、487.02 mm,介于 400 mm 与 500 mm 之间,与陈仁生等^[26-29]的研究结果一致。南坪、松江、汉阳屯和高丽城子 4 个流域的平均海拔较低,海拔 700 m 以下的面积占流域比例较大,红松阔叶林的覆盖面积大,其蒸散发量也相对较大。其蒸散发量介于 520 mm 与 570 mm 之间,结果与张淑杰等^[30-31]的研究结果一致。

表 1 长白山天池地区附近水文站 2006—2011 年年均降水量、径流深、蒸散发量

流域	流域面积/km ²	P/mm	R/mm	E_p/mm	$P-E_p-R/mm$	外源水量/亿 m ³
南坪	6745	620.62	137.92	561.99	-79.29	5.35
长白	2211	806.25	509.33	467.71	-170.79	3.78
高丽城子	4728	930.20	474.86	568.79	-113.45	5.36
汉阳屯	8532	779.02	308.39	573.36	-102.73	8.76
二道白河	210	1033.30	866.81	420.52	-254.03	0.53
松江	1900	804.33	307.89	528.92	-32.52	0.62
漫江	586	1019.41	632.56	412.4	-25.55	0.15
九公里	253	989.90	731.76	487.02	-228.88	0.58

由于在计算流域降水量、径流量时采用的是各水文站、雨量站的实测数据;植物蒸散发量虽然使用 Penman-Monteich 模型计算,但计算结果与其他研究者用生态学方法观测和其他模型计算的结果基本一致,因此,所用的水量平衡要素数据均较为可靠。

在不考虑河流、湖泊、泉水以及雪面蒸发量的情况下,将每个流域多年平均降水量减去径流深、植被蒸散发量,得到的结果见表 1 的 $P-E_p-R$ 项。从表 1 可以看出 8 个流域的多年平均降水量均小于径流深与植被蒸散发量之和。4 大流域(南坪、高丽城子、汉阳屯和长白)的 $P-E_p-R$ 值均为负,其中二道白河流域的 $P-E_p-R$ 值最低,达到 -254.03 mm,漫江流域的 $P-E_p-R$ 值最高,为 -25.55 mm。长白山周边各个流域均存在不平衡的情况,因此可以推断,长白山天池地区的水资源补给并非只有降水这一途径,地下水也是这一地区水资源的重要补给源;而且基于流域内多年平均降水量小于多年平均径流深和多年平均植被蒸散发量这一事实,笔者排除了地下水来源于当地降水的可能性,认为长白山天池地区的地下水是由外源水补给的。

由表 1 可知,天池集水区以外地区的水量也呈

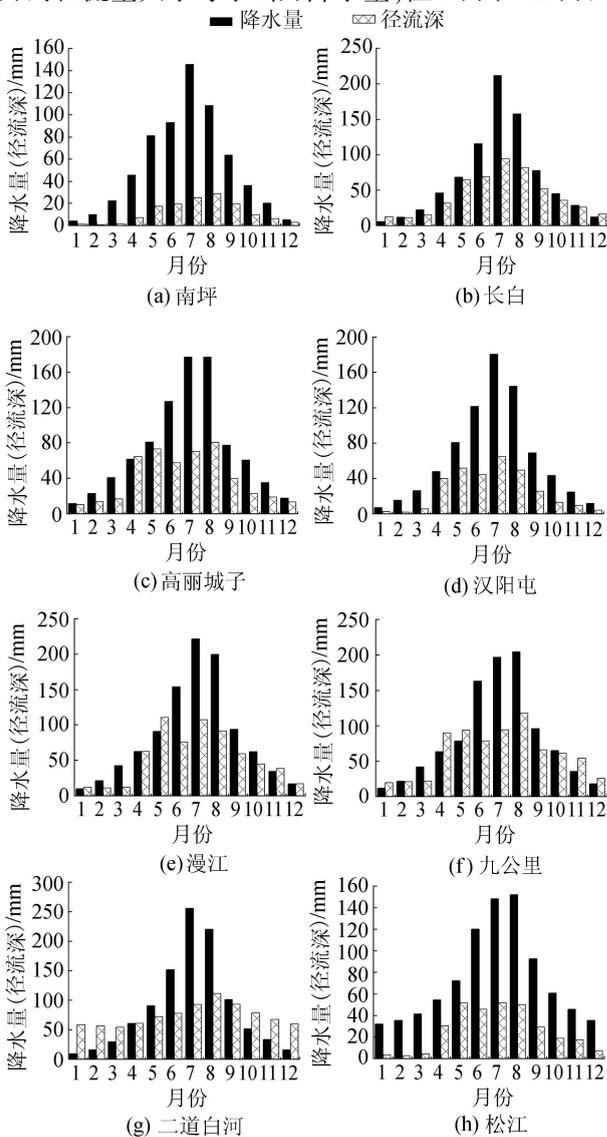


图 3 各流域 2006—2012 年逐月多年平均降水量、径流深

现出不平衡,根据表 1 提供的水量平衡关系可计算出外源水对天池周边 4 个流域的补给量分别为:南坪 5.35 亿 m^3 、长白 3.78 亿 m^3 、高丽城子 5.36 亿 m^3 、汉阳屯 8.76 亿 m^3 ,总补给量为 23.25 亿 m^3 。由此可知,天池的地下水并非来自于集水区以外的降水入渗,外源水是通过火山通道向天池及火山口向外溢出,越靠近火山口,地下水的涌水量越大。

4 讨论

前人关于长白山天池地下水来自于当地降水补给的观点来自于 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分析,天池附近泉水中的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值与天池雪水的基本相同,于是认为天池附近的热泉与冷泉的补给源都是当地的降水^[6]。东北地区降水的 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 月平均值分布范围较宽泛(图 4(a)),天池雪水的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值不能代表当地的降水同位素值,这是因为东北地区的主要降水受到太平洋季风的影响,4—10 月由季风带来的降水具有富集的同位素特征,降水量占到全年降水的 95%;而冬季的降雪则具有贫化的同位素特征,11—3 月的降水量仅占全年降水量的 5%(图 4(b))。天池泉水的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值应该接近东北地区多年降水的加权平均值(-70.4‰、-9.7‰),与夏季的降水同位素值相近,参见图 4(b)。这就是说,如果天池地下水的补给源是当地的降水,那么应该具有较为富集的同位素特征,泉水的 $\delta\text{D} \sim \delta^{18}\text{O}$ 关系点应该接近夏季的降水值,而不是靠近冬季的降水值。由此可知,

天池的地下水应该来自于外源水,与当地的降水并没有关系,图 1 所给出的径流途径是不存在的。

水量平衡关系表明,天池周边流域多年平均的径流量与蒸散发量远远大于降水量,外源地下水每年补给到研究区 4 个大流域的水量达到了 23.25 亿 m^3 。由于在中国东北地区长白山天池位于最高的山脉,天池地下水的补给源区的海拔至少要高于天池水位,调查发现,中国中东部地区,几乎没有满足补给高程要求的高原与山脉,地表高程大于 2 189.7 m 的最近地区是山西的五台山区,距离研究区 1 300 km,属于典型的干旱区,山区面积很小,不存在稳定的河流与湖泊,而且降水同位素明显富集^[32],不可能成为天池及其周边的补给源区。而地表高程高于天池水位的其他几个山脉,如六盘山、秦岭等的情况都类似,也不符合天池地下水补给源区的水量与同位素特征。

根据天池泉水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值贫化的特征,只有青藏高原能够满足补给区降水同位素特征^[34],研究表明,西藏内流区的河流与湖泊存在强烈的渗漏^[9,13],水量平衡关系研究证实,青藏高原最大的湖泊纳木错存在渗漏,渗漏量为 120 ~ 190 m^3/s 之间,青藏高原的平均海拔为 5 000 m,符合渗漏水流动所需要的水力梯度要求。青藏高原在水文上被分为外流区(59 万 km^2)与内流区(61 万 km^2),外流区年均径流量为 4 280 亿 m^3 ^[12];但内流区通过湖泊与河流的蒸发量换算得到的排泄量仅为 202 亿 m^3 ^[11],外流区与内流区的水量呈现出巨大的差异。由于在天池周边地区不存在高于天池水位的区域,根据水量平衡与同位素特征可知,只有青藏高原内流区完全符合天池地下水补给源区的要求。

长白山区的径流量远远大于其他非火山玄武岩地区,长白山区多年平均流量为 310 亿 m^3 ,占吉林省全省的 87%,呈现出高度不对称的分布特点^[4]。研究表明,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,玄武岩地下水是一种特殊类型的地下水,其补给、径流与排泄方式完全不同于孔隙水、裂隙水与岩溶水^[7-8]。虽然尚不清楚深循环地下水的导水构造的形成机制,但是,根据火山玄武岩地下水富水性特征推断,深循环地下水导水构造的形成与火山岩浆活动有关,岩浆岩中的孔洞结构可能是深循环地下水的导水构造特征。

5 结论

a. 水量平衡分析表明,天池集水区以外的降水形成的地下径流没有补给湖泊及泉水,外源水经过天池及周边的火山口涌出地表,形成湖泊与河流,越

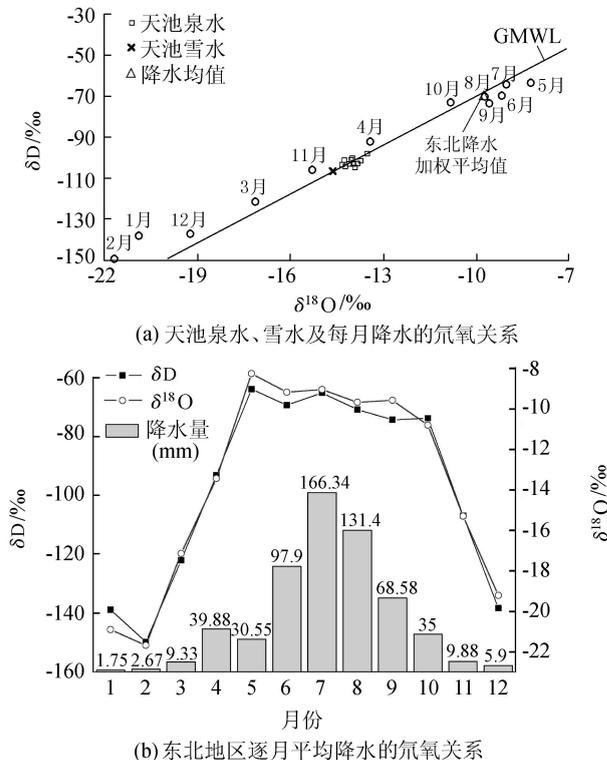


图 4 天池温泉、雪水与东北地区按月降水的氕氧关系

靠近火山口涌水量越大。在研究区 22 216 km² 范围内,外源水的补给流量达到 74 m³/s。

b. 东北降水受到太平洋季风的影响,夏季的降水同位素富集,通过按月降水同位素分析证实,天池泉水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值比东北地区的降水的加权平均值贫化。冬季降雪的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值虽然贫化,但是冬季的降雪仅占到总降水量的 5%,冬季雪水对降水的加权平均值影响很小,降水同位素不支持天池地下水来自于当地降水的推断。

c. 考虑到天池地下水补给源区的海拔必须高于天池水位的水力学基本条件,能够满足补给源区的只有青藏高原,由于在西藏内流区的河流与湖泊中观测到渗漏,所以,基本上可以锁定天池及周边地下水的补给源区在西藏内流区。

d. 外源水通过火山通道向天池补给,在火山岩中存在着深循环地下水的导水构造,新生代玄武岩地区地下水丰富,深循环地下水年龄自西向东逐渐增大,天池地下水的年龄约为 40 a。

参考文献:

[1] 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))

[2] 朱颜明, 余中盛, 富德义, 等. 长白山天池水化学 [J]. 地理科学, 1981, 1 (1): 58-65. (ZHU Yanming, SHE Zhongsheng, FU Deyi, et al. The hydrochemistry of Tianchi (Crater) lake of the Changbai Mountains [J]. Scientia Geographica Sinica, 1981, 1(1): 58-65. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 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))

[5] 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 Xiyou, LI Guozheng. The geologic and geochemical characteristics of the Changbai Mountain geothermal field [J]. Jilin Geology, 2006, 25(1): 25-30. (in Chinese))

[6] 林元武, 高清武, 于清桐. 长白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))

[7] 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 Ziye. Preliminary understandings of the cenozoic basalt groundwater [J]. Chinese Geology, 1988(3): 20-22. (in Chinese))

[8] 陈振东, 张宝柱. 长白山地区玄武岩地下水基本特征 [J]. 阜新矿业学院学报: 自然科学版, 1994, 13 (4): 26-29. (CHEN Zhendong, ZHANG Baozhu. Basic characteristics of groundwater in basalt in the changbai mountain area [J]. Journal of Fuxin Mining Institute: Natural Science, 1994, 13(4): 26-29. (in Chinese))

[9] 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))

[10] 张兵, 宋献方, 张应华, 等. 基于氚同位素和 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): 1860-1868. (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))

[11] 陈建生. 新观点新学说学术沙龙文集 30: 青藏高原冰川融水深循环及其地质环境效应 [M]. 南京: 中国科学技术协会学会学术部, 2009.

[12] ROLLINSON H R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation (Longman Science and Technical) [M]. New York: United States with John Wiley and Sons, 1993.

[13] ZHOU Shiqiao, KANG Shichang, CHEN Feng, et al. Water balance observations reveal significant subsurface water seepage from Lake Nam Co, south-central Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2013, 491: 89-99.

[14] MEKETE D, NIKO E C V, VALENTIJN R N, et al. Water balance of a lake with floodplain buffering: Lake Tana, Blue Nile Basin, Ethiopia [J]. Journal of Hydrology, 2015, 522: 174-186.

[15] FOWE T, KARAMBIRI H, PATUREL J E, et al. Water balance of small reservoirs in the Volta Basin: a case study of Boura Reservoir in Burkina Faso [J]. Agricultural Water Management, 2015, 152: 99-109.

[16] 龙爱华, 邓铭江, 谢蕾, 等. 巴尔喀什湖水量平衡研究 [J]. 冰川冻土, 2011, 33 (6): 1341-1352. (LONG Aihua, DENG Mingjiang, XIE Lei, et al. A study of the water balance of lake balkhansh [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1341-1352. (in Chinese))

[17] 南颖, 刘志锋, 董叶辉, 等. 2000—2008 年长白山地区

- 植被覆盖变化对气候的响应研究[J]. 地理科学, 2012, 30(6): 921-928. (NAN Ying, LIU Zhifeng, DONG Yehui, et al. The responses of vegetation cover to climate change in the Changbai Mountain area from 2000 to 2008 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 30(6): 921-928. (in Chinese))
- [18] 徐文铎, 何兴元, 陈玮, 等. 长白山植被类型特征与演替规律的研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 162-174. (XU Wenduo, HE Xingyuan, CHEN Wei, et al. Characteristics and succession rules of vegetation types in Changbai Mountain [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 162-174. (in Chinese))
- [19] 李辉东, 关德新, 王安志, 等. 长白山阔叶红松林冬季雪面蒸发特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1039-1046. (LI Huidong, GUAN Dexin, WANG Anzhi, et al. Characteristics of evaporation over broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountains, Northeast China during snow cover period in winter [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(4): 1039-1046. (in Chinese))
- [20] 南纪琴, 肖俊夫, 刘战东. 东北地区参考作物蒸发蒸腾量随时间变化的研究[J]. 节水灌溉, 2012(1): 15-18. (NAN Jiqin, XIAO Junfu, LIU Zhandong. Research on reference crop evaporation's variation with time series in Northeast Region [J]. Water Saving Irrigation, 2012(1): 15-18. (in Chinese))
- [21] 吴家兵, 关德新, 赵晓松, 等. 东北阔叶红松林能量平衡特征[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2520-2526. (WU Jiabing, GUAN Dexin, ZHAO Xiaosong, et al. Characteristic of the energy balance in broad-leaved Korean pine forest of Northeastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2520-2526. (in Chinese))
- [22] 周林飞, 许化龙, 董福君, 等. 石佛寺人工湿地芦苇群落蒸散发计算与分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(4): 50-54. (ZHOU Linfei, XU Hualong, DONG Fujun, et al. Calculation and analysis on evapotranspiration of phragmites communis in constructed wetland in Shifosi area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(4): 50-54. (in Chinese))
- [23] ZHANG Yinsheng, OHATA T, ERSI K, et al. Observation and estimation of evaporation from the ground surface of the cryosphere in Eastern Asia [J]. Hydrology Process, 2003, 17: 1135-1147.
- [24] 张文毅, 党进谦, 赵璐. Penman-Monteith 公式与 Penman 修正式在计算 ET_0 中的比较研究[J]. 节水灌溉, 2010(12): 54-59. (ZHANG Wenyi, DANG Jinqian, ZHAO Lu. Comparison of ET_0 estimated by Penman-Monteith and Modified Penman methods [J]. Water Saving Irrigation, 2010(12): 54-59. (in Chinese))
- [25] 李孝广, 毕华兴, 刘胜, 等. Penman-Monteith 蒸散模型及其在森林下垫面中参数的确定[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 257-261. (LI Xiaoguang, BI Huaxing, LIU Sheng, et al. Penman-Monteith evapotranspiration model and calculations of its parameters in forest underlying surface [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(6): 257-261. (in Chinese))
- [26] 陈仁升, 康尔泗, 吉喜斌, 等. 黑河源区高山草甸的冻土及水文过程初步研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 387-396. (CHEN Rensheng, KANG Ersi, JI Xibin, et al. Preliminary study of the hydrological processes in the alpine meadow and permafrost regions at the headwaters of Heihe River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 387-396. (in Chinese))
- [27] 阳勇, 陈仁升, 宋耀, 等. 黑河上游山区草地蒸散发观测与估算[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1055-1062. (YANG Yong, CHEN Rensheng, SONG Yao, et al. Measurement and estimation of grassland evapotranspiration in a mountainous region at the upper reach of Heihe River Basin, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(4): 1055-1062. (in Chinese))
- [28] 贺淑霞, 李叙勇, 莫菲, 等. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3285-3295. (HE Shuxia, LI Xuyong, MO Fei, et al. The water conservation study of typical forest ecosystems in the forest transect of Eastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3285-3295. (in Chinese))
- [29] 刘世荣, 孙鹏森, 王金锡, 等. 长江上游森林植被水文功能研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 451-456. (LIU Shirong, SUN Pengsen, WANG Jinxi, et al. Hydrological functions of forest vegetation in upper reaches of the Yantze River [J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(5): 451-456. (in Chinese))
- [30] 张淑杰, 张玉书, 隋东, 等. 东北地区参考蒸散量的变化特征及其成因分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(10): 1750-1761. (ZHANG Shujie, ZHANG Yushu, SUI Dong, et al. Changes in reference evapotranspiration and its causes in Northeast China [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(10): 1750-1761. (in Chinese))
- [31] 郭瑞萍, 莫兴国. 森林、草地、农田典型植被蒸散量的差异[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1751-1757. (GUO Ruiping, MO Xingguo. Differences of evapotranspiration on forest, grassland and farmland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(8): 1751-1757. (in Chinese))
- [32] IAEA/WMO. Global network of isotopes in precipitation [EB/OL]. [2015-04-11]. <http://nds121.iaea.org/wiser/>.

(收稿日期: 2015-02-26 编辑: 徐娟)