

王福刚, 王耀辉, 姜明, 等. 长白山天池水循环条件分析与水量平衡计算 [J]. 地理科学, 2023, 43(7): 1291-1298. [Wang Fugang, Wang Yaohui, Jiang Ming et al. Water circulation condition and calculation of water balance in Tianchi Lake of the Changbai Mountains. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(7): 1291-1298.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2023.07.016

长白山天池水循环条件分析与水量平衡计算

王福刚¹, 王耀辉¹, 姜明², 王贺¹, 盘惠林¹, 吴铭杰¹, 曹玉清¹

(1. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130021;

2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘要: 长白山天池区是松花江、鸭绿江、图们江的发源地, 也是全国著名的旅游胜地。研究结合天池区地形地貌条件以及特殊的地质岩性和环状-放射状断裂构造特征, 分析了天池水循环条件和水动力特征, 明确了环状断裂构造的水力“消峰”作用和放射状断裂的导水作用, 论证了天池补给区的地下水分水岭外扩的可能性。在天池区水循环与水动力条件分析的基础上, 基于天池区 2003—2020 年气象水文监测数据, 利用水均衡法对天池水量平衡进行了计算分析, 结果显示, 天池区的降水条件可以维持天池的水量平衡, 距离环天池地表分水岭外侧高程 850~2 200 m 范围内的大气降水可以维持天池年排泄量 3 600 万 m³ 的水量平衡, 水量平衡区对应的地表高程平均高于天池水面 (2 189.7 m) 约 125 m。

关键词: 长白山; 天池; 水量平衡; 水循环条件; 地下水分水岭

中图分类号: X37 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2023)07-1291-08

长白山天池区是松花江、鸭绿江、图们江的发源地^[1-2], 也是全国著名的旅游胜地。探讨天池区的水循环和水量平衡对天池区水资源和生态环境保护具有重要意义。

20 世纪 70 年代以来, 长白山地区开展了大量地质、水文地质调查, 完成了白头山幅、抚松县幅和靖宇县幅 1:20 万区域地质调查。2019 年在吉林省地质勘查基金的资助下, 开展了吉林省长白山玄武岩覆盖区及周边矿产资源调查成矿地质背景调查。以上研究基本查清了天池及周边区域的地质体分布特征, 以及玄武岩盖层厚度及基底类型。20 世纪 80 年代以来, 学者们对天池火山的形成过程、天池水系及水文地质特征进行了研究, 对长白山天池区域具有潜在喷发的复式火山机构有了深入系统的认识^[3-4]。根据不同时期学者们对天池周边不同类型水体(地下水、地表水)的同位素、水化学等多角度研究^[5-10]和本次调查, 都一致性认为天池周边不同类型水体补给来源的同源性特征, 即大气降水为这些

水体的主要补给来源。针对长白山地区的地热水, 学者们通过同位素组成和水化学特征分析, 也得出了其主要来源于当地大气降水补给的认识^[5-7]。

天池是长白山区地表水体中的地势最高的水体。关于长白山天池水补给来源, 目前尚存在争议。对于天池水循环条件及水量平衡问题仍不清楚。一些研究认为天池水来源于大气降水和地下水补给^[11-12], 其中于大气降水占 29%~35%, 地下水补给占 42%~65%^[13-14]; 也有学者基于区域水量平衡分析的结果, 认为天池接受长白山以外地区远源地下水补给^[15]。鉴于天池在长白山地区的重要性, 对天池水量平衡问题进行深入分析, 不但对该区水资源开发利用和生态环境保护有着重要意义, 同时也是对天池旅游资源科学认识的客观要求。本次研究充分利用前期的地质、水文地质资料, 分析天池水的水循环和水动力条件, 然后采用水均衡法进行天池水量平衡分析, 确定天池可能补给区的范围和对应的地表高程, 为天池区的水资源和生态环境保护提供

收稿日期: 2022-02-11; **修订日期:** 2022-06-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0409103)资助。[Foundation: National Program on Key Research and Development Project (2019YFC0409103).]

作者简介: 王福刚(1975—), 男, 辽宁普兰店人, 博士研究生, 教授, 主要从事地下水资源形成演化与可持续利用以及二氧化碳地质封存及其环境效应方面的研究。E-mail: wangfugang@jlu.edu.cn

科学依据。

1 天池可能补给区的水循环及水动力条件分析

长白山天池位于吉林省延边朝鲜族自治州安图县二道白河镇长白山主峰火山锥体顶部,地处吉林省东南部长白山自然保护区,是中国和朝鲜的界湖,也是松花江、鸭绿江以及图们江的源头区,素有“三江之源”的雅称。长白山天池区属于温带大陆性山地气候,多年平均气温 -7.3°C ,降水量 1376.4 mm ,水面蒸发量 $450\text{ mm}^{[1-2]}$,是辽东地区气温最低,水面蒸发量最小,降水量最大的地方^[2]。天池在天文峰与龙门峰之间的缺口出流,形成长白瀑布,湖面高程 2189.7 m ,年变幅 2 m ,水深达 373 m ,面积 9.82 km^2 ,天池总蓄水量 $20.04\text{ 亿 m}^3^{[1-2]}$ 。

1.1 水循环条件分析

在天池水量平衡分析之前,需要对天池可能补给区的水循环和水动力条件进行论证,为天池水量平衡分析区的确定提供科学依据。天池区整体地貌形态以长白山天池为中心,以环状台地形态向四周逐渐降低。天池周边环绕天池共有 16 座山峰,高程 $2500\sim 2700\text{ m}$,主要地貌类型包括火山熔岩地貌和流水地貌 2 种。火山熔岩地貌分布范围较广,由玄武岩台地、玄武岩高原、火山锥体 3 部分构成^[16],是天池区主要地貌类型。

天池区地质构造条件对地下水循环过程起到了控制作用。由图1可见,天池区存在多个环状断裂($F_1\sim F_4$)和放射状断裂^[17-18]($F_5\sim F_{11}$),其中 F_1 、 F_2 分布于天池周边 16 座山峰构成的地表分水岭圈闭的区域以内(图2),大部分露于天池水下; F_3 环状断裂与环天池地表分水岭大致重合; F_4 在 2300 m 地表等高线圈闭区域以内。以上断裂均为张性断裂。 $F_1\sim F_4$ 环状断裂均倾向天池^[19],这些环状断裂为环天池周边地下水补给天池提供了条件保障。这些环状断裂的存在,会从水的循环角度形成优势渗流通道,客观上起到降低局部地下水水位的作用(图3中虚线所示),这使得地下水的分水岭外扩成为可能。

天池为一火山口湖,天池区火山形成过程可分 3 个阶段。早期造盾阶段以岩浆型喷发为主,中期造锥阶段以蒸气型-岩浆混合型喷发为主,晚期造渣阶段的以蒸气型喷发为主。火山下部盾形基座由早期喷发玄武岩构成^[16,20-21],上部截顶火山锥体由第四纪中晚期喷发物构成,主要为碱性粗面岩^[22-23],顶

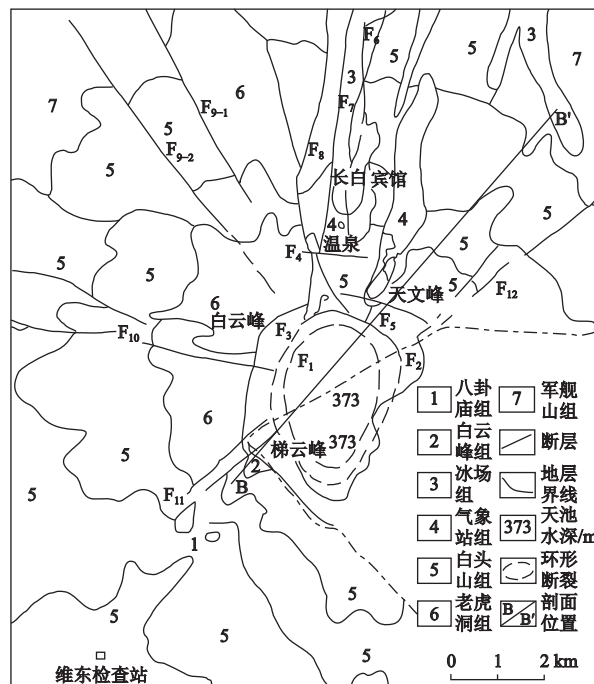


图1 长白山天池区断裂分布(根据参考文献[17]修改)

Fig.1 Fault distribution of the Tianchi area (modified based on reference [17])

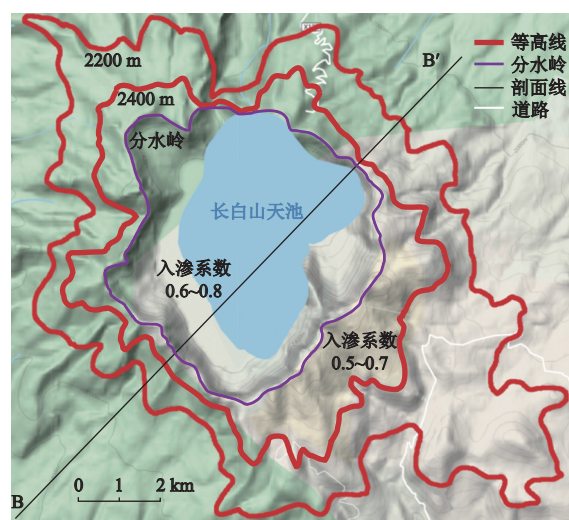


图2 天池区遥感图及可能地下汇水区范围(基于谷歌遥感影像修改)

Fig.2 Remote sensing map of the Tianchi area and extent of possible underground catchment area (modified by Google remote sensing image)

部覆以灰白色碱性浮岩及粗面质、含气孔碱流质火山碎屑岩^[24-26](图3)。天池地区 1700 m 高程以上地层岩性主要为浮岩和火山碎屑岩,多为气孔状构造,深部为多孔玄武岩,渗透性强^[13-14]。根据长白山站

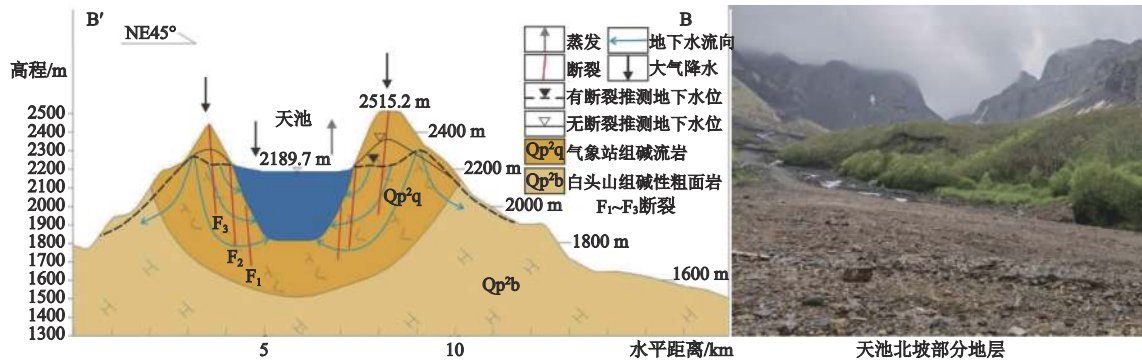


图3 天池地区地质结构与地下水流动剖面示意

Fig.3 Schematic diagram of geological structure and groundwater flow profile in the Tianchi area

2005—2008 年气象及土壤含水量数据(国家生态科学数据中心, www.cnern.org.cn), 天池地区年日照天数约 160 d, 近 200 d 为雨雾天气, 土壤含水量最高达 90.3%, 蒸发量极少, 这些条件为大气降水快速入渗补给地下水提供了有利条件。

1.2 水动力条件分析

地下水流域有闭合、非闭合之分。当地表分水岭与地下分水岭在水平投影上重合时, 为闭合流域, 否则为非闭合流域^[27]。地表分水岭控制着地表径流的方向, 地下水分水岭控制着地下水的径流方向和均衡区划分。一般来说, 地下水的流域划分也主要受控于地形势, 但由于天池地区存在渗透性好的张性环状断裂构造(图 1), 且 F_3 环状断裂位置恰好位于环天池 16 座山峰形成的地表分水岭下部, 构成了良好的导水通道, 这将使得断裂位置的地下水能够快速下渗, 进而消减掉由于该部位对应地表高地形而形成的地下水高势区, 使得断裂发育部位地下潜水面保持在低势位置, 起到“削峰”作用(图 3 中虚线所示)。这种环形高渗透断裂的“削峰”作用, 以及放射性断裂的导水作用使天池地区地下分水岭在水平方向上可以超越地表分水岭, 向外扩展。这意味着, 环天池地表分水岭外侧的地下水可以跨越地表分水岭的限制, 补给到天池。

基于以上分析, 从地下水流动系统理论出发, 将天池周边高于天池湖面高程(2200 m)范围设定为可能补给天池的补给区, 对其进行水量平衡分析。

2 天池水量平衡分析

探究区域水量平衡常用方法包括水均衡法和数值模拟法等^[28-31]。水均衡法用于源、汇明确、系统结构清晰地区水量平衡分析时简单高效。基于天池

区前期工作基础, 以及研究区丰富的气象、水文监测数据, 本次采用均衡法进行天池水量平衡分析。

2.1 水量平衡计算过程

2.1.1 均衡区的划分与均衡期的选择

均衡区(即可能补给天池的区域)划分考虑以下 2 点: ① 补给区地下水与被补给水体具有水力连通性; ② 补给区水体与被补给水体天池之间具备水流流动的驱动力。基于以上原则, 结合前面天池地区水循环条件分析结果, 设计 5 种方案进行天池水量均衡分析。5 种方案的差别主要体现在补给区高程的变化上, 具体如下:

方案 1 的均衡区为环天池地表分水岭以内区域, 方案 2~5 的均衡区依次为环天池地表分水岭外侧 2500 m、2400 m、2300 m、2200 m 地形等高线圈闭的区域(图 2)。5 种方案计算区面积分别为 21.37 km²、25.12 km²、28.87 km²、41.41 km²、53.94 km²; 对应的陆地面积分别为 11.55 km²、15.30 km²、19.05 km²、31.59 km²、44.12 km²。方案 2~5 的边界距离方案 1 的边界距离分别为 240~1200 m、480~1460 m、850~2200 m 和 1200~4600 m。根据天池区域的气象监测数据, 本次研究均衡区选择以年为均衡期, 以多年平均年降水量数据为基础数据进行计算。

2.1.2 均衡要素的确定

根据天池地区气象水文、地形地貌、地质条件分析, 天池水系统的补给项包括直接降落到天池水面上的水量、周边均衡区地下水的补给量, 以及天池地区可能存在的凝结水量(天池区雨雾天气近 200 d/a, 气温变化大)。天池水系统的排泄项包括天池水面蒸发量、天池瀑布流出量。由于均衡区高程高(大于 2200 m), 气温低(多年平均气温 -7.3℃^[1-2]),

地表植被为苔原,地下水埋深大,忽略地下水直接蒸发和经植物蒸散发的影响。

根据以上补给与排泄项分析,确定天池的水均衡计算公式如下:

$$Q_{\text{均衡}} = Q_{\text{降}} + Q_{\text{凝}} + Q_{\text{地}} - Q_{\text{湖出}} - E_{\text{湖}} \quad (1)$$

式中, $Q_{\text{降}}$ 为直接降落到天池湖面的大气降水补给量 (m^3/a); $Q_{\text{凝}}$ 为凝结水补给量 (m^3/a); $Q_{\text{地}}$ 为天池周边地下水补给天池水量 (m^3/a); $Q_{\text{湖出}}$ 为天池经天池瀑布的排泄量 (m^3/a); $E_{\text{湖}}$ 为天池湖面蒸发量 (m^3/a); $Q_{\text{均衡}}$ 为补给项与排泄项的差值 (m^3/a)。

1) 大气降水补给量。大气降水补给量计算公式为:

$$Q_{\text{降}} = F_1 P \quad (2)$$

式中, $Q_{\text{降}}$ 为湖面大气降水补给量 (m^3/a), P 为年降水量 (m/a); F_1 为天池面积 (m^2)。

根据天池气象站 2003—2020 年的降水观测数据,长白山天池多年平均降水量为 1 364.3 mm。

2) 地下水补给量。均衡区地下水补给量采用降水入渗系数法计算,计算公式为:

$$Q_{\text{地}} = \alpha F_2 P \quad (3)$$

式中, $Q_{\text{地}}$ 为地下水补给量 (m^3/a), P 为年降水量 (m/a); F_2 为计算区的陆地面积 (m^2); α 为降水入渗系数。

天池地区山势陡峭,坡面地层岩性主要为浮岩和火山碎屑岩,深部为多孔玄武岩^[20-22],地表覆盖土壤为火山灰土,渗透性极强^[13]。林琳^[14]根据长白山区的地质条件,设定入渗系数为 0.5~0.8。黄锡昌等^[32]在海南省琼山县龙桥玄武岩水源地研究中,对于气孔状玄武岩节理、裂隙、气泡洞穴发育的岩体分布区,入渗系数采用值为 0.4~0.7。结合长白山天池区域火山岩地层气孔、断裂发育情况和气象特点,将地表分水岭外侧降水入渗系数设置为 0.5~0.7,平均值 0.6;对于天池地表分水岭内测汇水区,入渗系

数取值为 0.6~0.8,平均 0.7。这样处理的理由是,天池地区降水量大,虽然该区渗透性强^[13-14],但该范围内降雨形成地表径流可直接补给到天池湖中^[14],由于该内流区没有地表径流监测数据,因此,方案 1 对应的该区域 (11.55 km^2) 降水入渗系数设置稍大于地表分水岭外侧的陆地区域。各均衡区降雨入渗系数分布见图 2。

3) 凝结水入渗补给量。基于 2020 年 6—10 月在长白山森林生态系统站内开展的露水收集实验。在实验期 (7—10 月) 4 个月内观测到了露水。根据实验结果,在实验期内共观测了 67 d,露水总量为 48.53 mm,平均 0.73 mm/d。计算出长白山凝结水补给期 120 d 露水总量为 87.6 mm。本次研究在计算凝结水补给量时,将凝结水补给期设置为 4 个月。在计算凝结水时,考虑到不确定性,将凝结水量按照 0%, 50%, 100% 的贡献率列入均衡补给项。

4) 天池瀑布流出量。长白瀑布是天池唯一地表出水口。根据 2003—2020 年白头山水文站数据,长白瀑布多年平均年径流量为 3 616 万 m^3 。也有学者通过计算得出天池年泄水量 3 566 万 m^3 的结果^[13]。综合以上,本次研究将天池年排泄量设为 3 600 万 m^3/a 。

5) 天池水面蒸发量。根据天池气象站资料和人研究资料^[2,25],长白山天池多年平均湖面蒸发量为 310~450 mm,本次研究取最大值 450 mm。即天池湖面年蒸发量 440 万 m^3/a 。

综上,均衡要素涉及的排泄量均与地下水汇水区面积无关,因此本次计算 5 个方案的总排泄量均为 4 040 万 m^3/a 。

2.2 天池水量平衡结果分析与讨论

天池水均衡计算结果见表 1。表 1 中补给量的最小值、最大值、平均值分别对应着各补给项最小、最大和平均状态时得到的数据。均衡差的最小值、

表 1 天池水均衡计算结果

Table 1 Calculation results of Tianchi water balance

方案 编号	高程/m	面积/ km^2	陆地面积/ km^2	总补给量/(万 m^3/a)			均衡差/(万 m^3/a)		
				最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
1	地表分水岭内	21.37	11.55	2297.06	2713.39	2505.23	-1742.94	-1326.61	-1534.77
2	≥ 2500	25.12	15.30	2552.87	3104.37	2828.62	-1487.13	-935.63	-1211.38
3	≥ 2400	28.87	19.05	2808.67	3495.35	3152.01	-1231.33	-544.65	-887.99
4	≥ 2300	41.41	31.59	3663.75	4802.26	4233.00	-376.25	762.26	193.00
5	≥ 2200	53.94	44.12	4518.82	6109.17	5314.00	478.82	2069.17	1274.00

最大值、平均值分别为总补给量最小值、最大值、平均值减去总排泄量得到的。根据表 1 数据, 方案 1~3 为负均衡, 说明该 3 种方案天池水系统水量不能平衡。方案 4 均衡差平均值为 193 万 m^3/a , 说明方案 4 对应的均衡区域(2300 m 等高线圈闭区域)能够维持天池水系统平衡。方案 5 水均衡计算结果均为正均衡, 说明方案 5(2200 m 等高线圈闭区域)均衡区的面积超过实际的天池补给区的面积。

为了探究均衡区相对明确的边界位置, 根据计算结果, 绘制均衡差与均衡区面积关系图 4。由图 4 不同方案均衡差与均衡区面积的对应关系, 可以推求天池水系统均衡差为 0 时(即天池水系统处于水量均衡状态时)均衡区的面积。根据图 4 中的直线与横轴的交点, 获得天池水系统的地下水实际均衡区面积范围为 33.46~45.98 km^2 , 平均 38.41 km^2 ; 边界对应的地表高程为 2260~2355 m, 平均 2315 m, 高于天池水面(2189.7 m)约 125 m。在该区域内天池水量能够在现有条件下保持平衡。进一步假定该边界位置地下水位埋深为 50 m, 则地下水位仍高于天池水位 75 m, 该水头差保证了地下水向天池流动足够的驱动力。地表高程 2315 m 对应的地下水补给区边界距天池地表分水岭距离小于 850~2200 m (即 2300 m 地面高程对应的距离)。

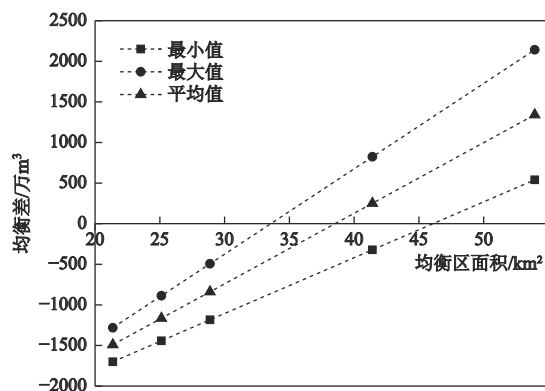


图 4 均衡差与均衡区面积的相关关系

Fig.4 Correlation diagram between equalization difference and equalization area

3 计算结果的不确定性分析

3.1 降水量的不确定性

天池气象站 2003—2020 年仅在 6—9 月对天池区降水量进行了观测, 实测 6—9 月总降水量最大为 2013 年的 1486 mm, 最小为 2006 年的 552 mm,

平均 990 mm, 缺少全年数据。但根据该气象站 1980—1988 年全时段监测数据, 天池区 6—9 月降水量占全年的 61.5%~80.7%, 平均 72.6%, 根据该占比推测 2003—2020 年的多年平均降水量为 1364.3 mm, 该数据与前人^[13-14]采用的 1376.4 mm 相近。因此, 降水量引起计算结果的不确定性可以忽略。

3.2 天池瀑布径流量变化的不确定性

根据白头山水文站 2003—2020 年 6—9 月长白瀑布径流量观测数据, 6—9 月总流量最大为 2013 年的 3171 万 m^3 , 最小为 2008 年的 711 万 m^3 , 平均 1786 万 m^3 , 缺少全年数据。但该水文站 1980—1991 年进行了全年流量监测, 期间长白瀑布 6—9 月径流量占年径流量的 45.3%~55.1%, 平均 49.4%, 根据该占比计算 2003—2020 年的多年平均径流量为 3616 万 m^3 , 该数据本次采用数据 3600 万 m^3 几乎相同。

由于径流量数据年际变化较大, 将其与天池区年降水量进行对比(图 5)发现, 除 1995 年和 2000—2002 年异常外, 径流量与降水量年变化具有较好的一致性。因此, 可以认定本次研究的天池地表排泄量数据可信。

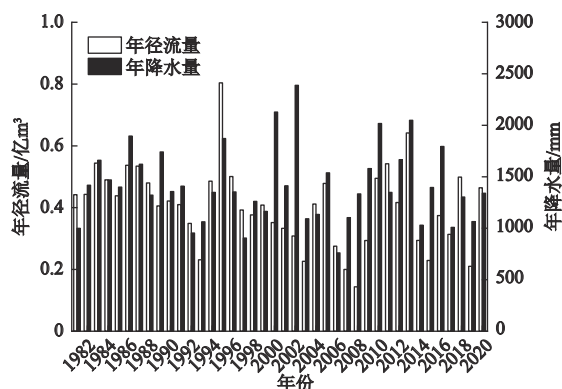


图 5 天池年降水量与年径流量的相关关系

Fig.5 Correlation between annual rainfall and annual runoff in the Tianchi area

3.3 计算参数选择的不确定性

在计算地下水补给量时, 地表分水岭内侧区域入渗系数最小值设定为 0.6, 考虑到天池附近全年近 200 d 为雨雾天气, 蒸发量极少, 参考已有类似的研究^[13-14], 结合天池区的特殊地理和地质环境特点, 可以认定本次采用的入渗系数数值可能偏小, 对于水均衡计算来说, 补给量结果是偏保守的。

3.4 关于凝结水补给的不确定性

本次均衡计算中凝结水补给量数据是采用露水平板收集器放置在地面以上获取的,露水采集位置高程远低于天池,因此,天池区的实际土壤凝结水量很大可能大于本次采用的数值。本次凝结水补给量计算结果是偏保守的。关于凝结水的补给占比问题,苏联学者捷尔普戈里兹在北极圈的叶尼塞河的扇形地的地下水均衡研究中^[33]发现,凝结水的贡献量不少于全年总降水量的 20%。综合分析,本次研究区的凝结水量与实际的补给相比很大可能偏少,因此本次计算的均衡结果是偏保守的。

3.5 天池蒸发量的不确定性

本次天池蒸发量取已有实际观测的最大值(450 mm),因此,水均衡计算中排泄量的计算是偏大的,对于整体水均衡来说,计算结果是偏保守的。

4 结论

基于天池区的地质构造和地层岩性特征,分析了天池区水循环和水动力条件,采用均衡法对天池水量平衡进行分析,主要结论如下:

1)天池地区特殊的地质构造条件和地层岩性特征使得环天池周边的地表分水岭与天池地下水补给区的地下分水岭不重合。环天池断裂构造的优势渗流条件,构成了地下水势能的“消峰”作用,环状放射状的断裂构造及天池区的渗透性好的地层岩性特征,使得地下水分水岭外扩成为可能。

2)水量平衡分析结果表明,天池水均衡区边界距离环天池地表分水岭外侧距离不超过 850~2200 m,该区域以内的大气降水足以维持天池水量平衡。水量平衡区对应的地表高程为 2260~2355 m,平均高程为 2315 m,高于天池水面(2189.7 m)约 125 m。

参考文献(References):

[1] Wang Hanxi, Xu Jianling, Sheng Lianxi et al. Study on the characteristics of climate change in Changbai Mountain National Natural Reserve from 1958 to 2017[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(16): 576-592.

[2] 凌思宁, 陈卫, 陆日宇, 等. 夏季长白山天池站降水量年际变化特征及其对应的环流异常[J]. *大气科学*, 2021, 45(3): 499-512. [Ling Sining, Chen Wei, Lu Riyu et al. Interannual variation of summer rainfall at the Tianchi Station in the Changbai Mountains and its associated circulation anomalies. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2021, 45(3): 499-512.]

[3] 衣健, 王璞珺, 单玄龙, 等. 长白山天池火山千年大喷发火山碎屑流堆积相特征[J]. *岩石学报*, 2020, 36(11): 3346-3362. [Yi Jian, Wang Pujun, Shan Xuanlong et al. Facies variations in the pyroclastic density currents (PDCs) produced by the Millennium Eruption of the Changbaishan Tianchi volcano, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(11): 3346-3362.]

[4] 许建东, 万园, 王新茹, 等. 中国火山灾害区划研究历史回顾与未来展望[J]. *地质与资源*, 2022, 31(3): 426-433. [Xu Jiandong, Wan Yuan, Wang Xinru et al. Review on the development of volcanic hazard zonation in China. *Geology and Resources*, 2022, 31(3): 426-433.]

[5] 李玥, 吴珍汉, 杨智. 长白山天池水系常量离子和氢氧同位素地球化学示踪[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(6): 16-20. [Li Yue, Wu Zhenhan, Yang Zhi. Geochemical tracer of major ions, Hydrogen and Oxygen isotopes for waters of Tianchi Lake in Changbai Mountain. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(6): 16-20.]

[6] 林元武, 高清武, 于清桐. 长白山天池火山区地下热流体化学特征研究[J]. *地质论评*, 1999, 45(S1): 241-247. [Lin Yuanwu, Gao Qingwu, Yu Qingtong. A study of chemical characteristics of geothermal fluid in Tianchi Volcanic region, Changbai Mountains. *Geological Review*, 1999, 45(S1): 241-247.]

[7] 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(S1): 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. *Geological Review*, 1999, 45(S1): 236-240.]

[8] Jin Na, Baizhong Yan, Baoming Chi et al. The estimation of reservoir temperature for thermal springs using the integrated multicomponent geothermometry method at Changbai Mountain, Northeastern Songliao Basin, China[J]. *Geofluids*, 2020, 2020: 1-12.

[9] Feng Mingming, Zhang Wenguang, Zhang Shaoqing et al. The role of snowmelt discharge to runoff of an alpine watershed: Evidence from water stable isotopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 12: 604-617.

[10] Yu Yexiang, Bian Jianmin, Ma Yuxi et al. Formation mechanism of hydrogeochemical characterization of mineral water in Antu County, Changbai Mountain area[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 20: 380-396.

[11] 方展, 卞建民, 孙晓庆, 等. 吉林省抚松县矿泉水形成机理及过程模拟[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(14): 39-44. [Fang Zhan, Bian Jianmin, Sun Xiaoping et al. Mineral water formation mechanism and process modeling in Fusong County. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(14): 39-44.]

[12] 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): 58-65. [Zhu Yanming, She Zhongsheng, Fu Deyi et al. The hydrochemistry of Tianchi (Crater) Lake of the Changbai Mountains. *Scientia Geographica Sinica*, 1981(1): 58-65.]

- [13] 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 of hydrological characteristics of Tianchi in Changbai Mountain. *Hydrology*, 1991 (2): 49-51.]
- [14] 林琳, 王屹林. 长白山天池水资源综合研究[J]. 吉林地质, 2019, 38(1): 60-66+101. [Lin Lin, Wang Yilin. Comprehensive study on Tianchi water resources in Changbai Mountain. *Jilin Geology*, 2019, 38(1): 60-66+101.]
- [15] 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): 7-13. [Jiang Qiaoning, Chen Jiansheng. Analysis on water balance of deep cycle groundwater supplying Tianchi Lake of Changbai Mountain. *Water Resources Protection*, 2015, 31(5): 7-13.]
- [16] 刘若新, 樊祺诚, 郑祥身, 等. 长白山天池火山的岩浆演化[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1998(3): 226-231. [Liu Ruoxin, Fan Qicheng, Zheng Xiangshen et al. Magmatic evolution of Tianchi volcano in Changbai Mountain. *Science in China (Series D)*, 1998(3): 226-231.]
- [17] 金伯禄, 张希友. 长白山火山地质研究[M]. 延吉: 东北朝鲜民族教育出版社, 1994. [Jin Bolu, Zhang Xiyu. Researching volcanic geology in Mount Changbai. Yanji: Northeast Korean Ethnic Education Press, 1994.]
- [18] 阮帅, 汤吉, 董泽义, 等. 基于三维大地电磁AR-QN反演的长白山天池火山区电性结构[J]. 地震地质, 2020, 42(6): 1282-1300. [Ruan Shuai, Tang Ji, Dong Zeyi et al. Electric structure model of Tianchi volcano in Changbai Mountains based on three-dimensional AR-QN magnetotelluric inversion. *Seismology and Geology*, 2020, 42(6): 1282-1300.]
- [19] 李霓, 刘若新, 魏海泉, 等. 长白山天池火山近代喷发中气象站组熔岩—碎屑岩流研究[J]. 地质论评, 1999, 45(S1): 272-277. [Li Ni, Liu Ruoxin, Wei Haiquan et al. Study of modern Erupted Lava-Pyroclastic flow of Qixiangzhan formation of Tianchi Volcano, Changbai Mountain. *Geological Review*, 1999, 45(S1): 272-277.]
- [20] 潘波, 樊祺诚, 许建东, 等. 长白山天池火山千年大喷发的岩浆过程[J]. 岩石学报, 2017, 33(1): 163-172. [Pan Bo, Fan Qicheng, Xu Jiandong et al. Magmatic process of thousand-year eruption of Tianchi volcano in Changbai Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(1): 163-172.]
- [21] 钱程, 崔天日, 唐振, 等. 长白山天池火山造锥阶段玄武质火山活动期次划分及成因探讨[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 1963-1976. [Qian Cheng, Cui Tianri, Tang Zhen et al. Stage division and genesis discussion of basaltic volcanism during the cone-forming stage of Tianchi volcano in Changbaishan region. *Geology in China*, 2016, 43(6): 1963-1976.]
- [22] 刘嘉麒. 中国东北地区新生代火山岩的年代学研究[J]. 岩石学报, 1987(4): 21-31. [Liu Jiaqi. Study on geochronology of the genozoic volcanic rocks in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 1987(4): 21-31.]
- [23] 郭文峰, 刘永顺, 吴才来, 等. 长白山天池火山气象站期碱流岩辉石环带混沌吸引子的发现及意义[J]. 科学通报, 2017, 62(30): 3470-3478. [Guo Wenfeng, Liu Yongshun, Wu Cailai et al. Discovery and implications of the chaotic attractor from zoned pyroxene in Qixiangzhan comenditic lava, Tianchi volcano, Northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(30): 3470-3478.]
- [24] 潘波, 程滔, 徐丹, 等. 长白山天池火山天文峰期黄色浮岩成因研究[J]. 岩石学报, 2020, 36(7): 2067-2080. [Pan Bo, Cheng Tao, Xu Dan et al. Formation mechanism of yellow pumice in the deposition of Tianwenfeng eruption at Changbaishan-Tianchi volcano. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(7): 2067-2080.]
- [25] 王璞珺, 许伟东, 陈海潮, 等. 长白山天池火山千年大喷发期后火山泥石流沉积特征及其源-汇响应关系[J]. 岩石学报, 2020, 36(9): 2893-2911. [Wang Pujun, Xu Weidong, Chen Haichao et al. Characteristics and source-sink response of the Lahar deposits in Changbaishan-Tianchi volcano and adjacent area following the Millennium Eruption. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(9): 2893-2911.]
- [26] 王禹钦, 于红梅, 许建东, 等. 长白山天池火山千年大喷发2期空降浮岩对比[J]. 地震地质, 2019, 41(1): 208-224. [Wang Yuqin, Yu Hongmei, Xu Jiandong et al. A comparative study on the characteristics of two stages of fallout pumices deposits from the millennium eruption of Tianchi volcano in Changbaishan area. *Seismology and Geology*, 2019, 41(1): 208-224.]
- [27] 缪韧. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. [Miu Ren. Principle of Hydrology. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2007: 14-15.]
- [28] 左其亭, 吴青松, 金君良, 等. 区域水平衡基本原理及理论体系[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 165-173. [Zuo Qiting, Wu Qingsong, Jin Junliang et al. The basic principle and theoretical system of regional water balance. *Advances in Water Science*, 2022, 33(2): 165-173.]
- [29] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2011. [Zhang Renquan, Liang Xing, Jin Menggui et al. Fundamentals of Hydrogeology. Beijing: Geological Publishing House, 2011.]
- [30] Wang Hanxi, Xu Jianling, Sheng Lianxi et al. Time-space analysis of groundwater in China plain area and its water quantity balance analysis[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(12): 60-63.
- [31] Zhang Xu, Dong Qianjin, Zhang Quan et al. A unified framework of water balance models for monthly, annual, and mean annual timescales[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589(prepublish): 125186.
- [32] 黄锡昌, 汪武精, 梁新南. 海南省琼山县龙桥玄武岩水源地调查报告[R]. 海口: 海南大学, 1991. [Huang Xichang, Wang Wujing, Liang Xinnan. Investigation report of Longqiao Basalt water Source in Qiongzhan County, Hainan Province. Haikou: Hainan University, 1991.]
- [33] 捷尔普戈里兹 B Ф. 水的世界[M]. 北京: 科学出版社, 1983. [Gergporitz B Ф. Water world. Beijing: Science Press, 1983.]

Water circulation condition and calculation of water balance in Tianchi Lake of the Changbai Mountains

Wang Fugang¹, Wang Yaohui¹, Jiang Ming², Wang He¹, Pan Huilin¹, Wu Mingjie¹, Cao Yuqing¹

(1. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, Jilin, China; 2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, China)

Abstract: It is of great significance to explore the formation of water resources and the water balance in Tianchi area for the protection of water resources and ecological environment. Based on the topographic and geomorphologic conditions, the special geological lithology and ring-radial fault structure characteristics of Tianchi area, the water circulation conditions and hydrodynamic characteristics of Tianchi Lake were analyzed. The "hydraulic peak elimination" effect of the ring fault structure and the water conduction effect of the radial fault are clarified, and the possibility of groundwater divide expansion in Tianchi recharge area is demonstrated. Based on the analysis of water circulation and hydrodynamic conditions in Tianchi area, and meteorological and hydrological monitoring data of Tianchi area from 2003 to 2020, the water balance of Tianchi Lake was calculated and analyzed based on the water balance method. The results show that the precipitation conditions in Tianchi area can maintain the water level balance of Tianchi Lake. The water balance of annual excretion of $3.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ of Tianchi Lake can be maintained when the precipitation is within 850-2 200 m from the outside of the surface watershed around Tianchi Lake. The average surface elevation of the water balance area is 125 m higher than that of Tianchi water surface (2 189.7 m). many ring faults and radial faults in Tianchi area. All the above faults are tensile faults. The ring faults all inclined to Tianchi which provided favorable conditions for groundwater recharge to Tianchi Lake. The formation above 1 700 m in Tianchi area is mainly composed of pumice rock and pyroclastic rock, mostly of porosity structure and strong permeability. The special geological structure conditions and stratigraphic lithology in Tianchi area make the surface divide around Tianchi not coincide with the underground watershed in the groundwater recharge area. The dominant seepage conditions of the fault structure around Tianchi constitute the "peak elimination" effect of groundwater potential energy. The ring-radial fault structure and the good permeability of the stratum lithology in Tianchi area make it possible to expand the groundwater watershed. Combined the synthetic analysis result of the of water circulation and hydrodynamic conditions in Tianchi area, and meteorological and hydrological monitoring data of Tianchi area from 2003 to 2020, the water balance of Tianchi Lake was calculated and analyzed based on the water balance method. The results show that the precipitation conditions in Tianchi area can maintain the water balance of annual excretion of $3.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ of Tianchi Lake. The distance of the water balance zone boundary is within 850-2 200 m from the outside of the surface watershed around Tianchi Lake. The average surface elevation of the water balance area is 125 m higher than that of Tianchi Lake water surface (2 189.7 m). The factors that may affect the calculation result of water balance, such as precipitation, runoff of Tianchi Lake water, calculation parameter value, condensation water amount and evaporation amount, are analyzed and discussed.

Key words: the Changbai Mountains; Tianchi Lake; water balance; water circulation condition; groundwater divide