

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008039

承德坝上高原东部月亮湖湖面萎缩原因及应对建议

殷志强¹, 赵磊², 刘文波¹, 李瑞敏¹, 邵海¹, 彭超³, 田钰琛³

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 河北省地矿局第四地质大队, 河北承德 067000;
3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:承德坝上高原位于我国北方生态脆弱区,近年来正面临着自然湖泊面积萎缩和局部地下水位下降等问题。为查明坝上高原东部月亮湖萎缩原因,更好服务生态环境支撑区建设,笔者在野外调查和资料收集分析基础上,对坝上高原地区的生态环境变化和月亮湖萎缩原因进行了详细研究,初步认为:(1)1975—1993年为月亮湖水面积较快增长期,1993年湖面面积最大,为0.43 km²;1993—2013年为缓慢萎缩期,2013年之后为较快萎缩期;(2)年际尺度上月亮湖区降水量和蒸发量都呈增加趋势,但因温度升高和下垫面条件改变引起的蒸发量增加趋势更明显;(3)人类活动对湖泊面积影响作用也不容忽视,人工林面积增加、旅游开发后的道路硬化、地下水开采和牲畜饮水增多可能也是湖泊快速萎缩的重要原因。建议坝上高原地区未来发展节水型生态旅游,同时实施湖区及周边地区地下水禁限采,强化水源涵养保护。

关键词:湖面萎缩;生态环境;月亮湖;坝上高原;生态脆弱区

中图分类号: P931.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)06-0057-08

Shrinkage reasons and countermeasures of Moon Lake area in the eastern part of Bashang Plateau, Chengde City

YIN Zhiqiang¹, ZHAO Lei², LIU Wenbo¹, LI Ruimin¹, SHAO Hai¹, PENG Chao³, TIAN Yuchen³

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 2. The 4th Geological Team, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Chengde, Hebei 067000, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Bashang Plateau of Chengde City is located in an ecologically fragile area in the north of China. In recent years, it is facing the problems of natural lake shrinking and local groundwater level declining. In order to find out the reason of the shrinkage of Moon Lake in the eastern part of the Bashang Plateau, and to better serve the ecological environment supporting capacity construction, the authors had systematically analyzed the ecological environment changes in the region and the reasons for the shrinkage of Moon Lake based on field investigation and detailed data analysis. We found that: (1) The water surface area of Moon Lake was a period of rapid growth from 1975 to 1993, and the largest area in 1993 at 0.43 km², it was a slow shrinkage period from 1993 to 2013 and a faster shrinkage period after 2013. (2) On the interannual scale, rainfall and evaporation are all increasing in the Moon Lake area, however, the increase in evaporation caused by temperature rise and changes in underlying surface conditions is more obvious. (3) The impact of human activities on the lake area cannot be ignored, and the area of artificial forests has increased, the road hardening after tourist, groundwater extraction and increased drinking water for horses after tourism development that may be the important reasons for the rapid shrinkage of the lake. (4) It is recommended that

收稿日期: 2020-08-15; 修订日期: 2020-09-01

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190310)

第一作者: 殷志强(1980-),男,高级工程师,主要从事第四纪环境演变研究。E-mail: yinzq@cigem.cn

the Bashang Plateau area develops water-saving eco-tourism in the future, and at the same time, implements some restrictions on groundwater extraction to strengthen water conservation and protection. in the lake and surrounding areas.

Keywords: lake shrinkage; eco-environment; Moon Lake; Bashang plateau; ecologically fragile area

坝上高原位于浑善达克沙地边缘,是京津冀最近的沙源区和生态环境脆弱敏感区,范围包括承德市围场县、丰宁县的部分地区和张家口市的康保、尚义、沽源和张北县的绝大部分地区^[1]。这里属于我们北方内蒙古高原与燕山山地农牧交错带、季风与非季风交汇区、生态脆弱区和环境过渡带^[2],是京津冀重要的水源涵养区和生态环境支撑区^[3]。历史时期这里经历了湿润-冷干等多期次环境恶化和反转事件^[4-5]。近年来,随着大规模人工林种植、农业种植面积扩张、旅游开发强度提高,坝上高原逐渐出现了土地沙化、草地退化、自然湖泊面积萎缩、地下水位下降等趋势^[6-10]。关于这些问题,多位专家学者开展了深入研究,如鲁晨曦等^[10]研究认为人工林的蒸散量要普遍高于当地自然植被的蒸散量,大规模的人工造林活动会降低地下水位高度。Huang 等^[11]评估了干旱半干旱地区植树造林对地下水补给的影响。高素改^[12]研究认为坝上高原地区在 1984—1996 年间湖沼面积扩大,但在 1996—2015 年间,湖泊面积明显萎缩,两个时段湖面面积波动分别受控于气候变化和人类活动影响。

坝上高原地区的湖泊具有涵养水源、发展自然旅游的重要意义,但伴随着全球气候暖干与人类活动加剧,该地区的湖泊面积严重萎缩,直接制约了其生态功能的发挥和当地经济的可持续发展^[13-17]。

月亮湖是承德坝上高原东部较典型的湖泊之一,关于该湖泊的湖面面积变化及成因机制,前人缺乏专门研究。本文在区域生态环境演变分析的基础上,以月亮湖及周边环境为例,结合收集的温度降水数据和植树造林、旅游开发等人类活动数据,探讨近年来湖泊面积快速萎缩的原因,研究湖泊萎缩的主要驱动力,提出生态平衡、科学保护湖泊资源的对策建议。

1 月亮湖区及周边环境

位于承德坝上高原东部的月亮湖是该地区最大的高原型湖泊,该湖原名“沙脑泡子”,是一处因地形低洼汇水而成的封闭型咸水湖,具有高生态价值和高脆弱性特征。月亮湖所处的位置恰好位于坝上高原与燕山山地的过渡带(图 1),也是冬季风与夏季风的交汇区^[1]。冬季风搬运的粉尘沉降到坝上高原和燕山山地,

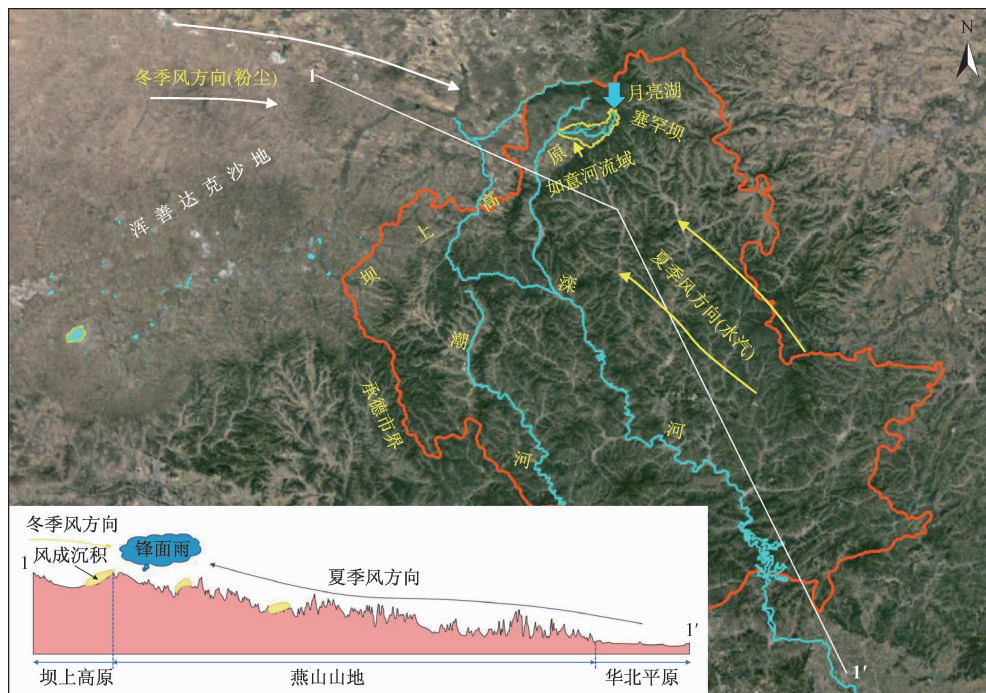


图 1 承德坝上高原地势剖面及月亮湖位置图

Fig. 1 The terrain and its profile of Bashang Plateau with Moon Lake locations in Chengde

而来自太平洋的夏季风携带的水汽在地形影响下降落到坝上高原和燕山山地过渡带形成锋面雨,为湖区提供了丰富的大气降水。整个湖区汇水面积约为 2.48 km^2 ,主要靠大气降水补给,其原为小滦河支流如意河的源头,但现因湖面萎缩不再为下游补给水源。

月亮湖所处的坝上高原,地势较平坦,流水侵蚀微弱,风蚀强烈,多风蚀洼地,地表呈波状起伏。由地形地貌可知,月亮湖、桃山湖、安固里淖^[17-18]等坝上高原的湖泊所处地理位置海拔都属于高原湖泊,具有高生

态价值和脆弱性特征(图2)。湖区周边表层的第四系砂质地层主要为 $0.8 \sim 1.0 \text{ m}$ 的松散腐殖土, $2.0 \sim 12.9 \text{ m}$ 的黑褐色中-细砂层;再下部为中新世汉诺坝灰黑色玄武岩,孔洞发育,微风化层厚 $1.0 \sim 3.0 \text{ m}$ 。砂层的含水率为 $12.6\% \sim 40.1\%$,比重平均 2.65 ,黏聚力平均 10.32 MPa ,摩擦角平均值 26.08° ;新鲜玄武岩的抗压强度 $5.87 \sim 11.67 \text{ MPa}$,岩石质量等级Ⅲ级,工程地质条件较好。



图2 月亮湖区周边地貌、植被及湖面特征

Fig. 2 Landform, vegetation and other features around Moon Lake in Bashang Plateau

2 月亮湖面积变化及补给特征

2.1 月亮湖水域面积变化

多期次7—11月份的遥感影像解译数据显示:1975年以来,月亮湖湖泊面积先增大后减小,湖面面积在1993年为最大,后逐渐萎缩减小;2018年与1993年同期相比,月亮湖水域面积减少了93%。近40年来,湖泊面积由1975年的 0.21 km^2 增加到1993年的 0.43 km^2 ,然后又减少到2018年的 0.03 km^2 。综合分析认为:1975—1993年为湖面较快增长期,1993—2013年为缓慢萎缩期,之后为较快萎缩期(图3)。

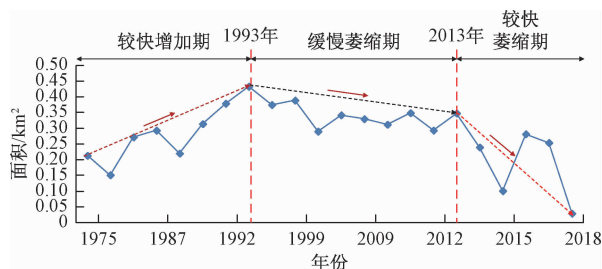


图3 月亮湖湖面面积1975—2018年变化曲线

Fig. 3 Variation curve of the water area of Moon Lake from 1975 to 2018

2.2 湖区周边植被及水位补给特征

月亮湖区周边植被主要为樟子松和落叶松人工林,湖东部和南部的落叶松栽种距今约60 a。湖西部和北部的落叶松树龄主要为 $41 \sim 50 \text{ a}$ 和 $11 \sim 20 \text{ a}$ (图4)。

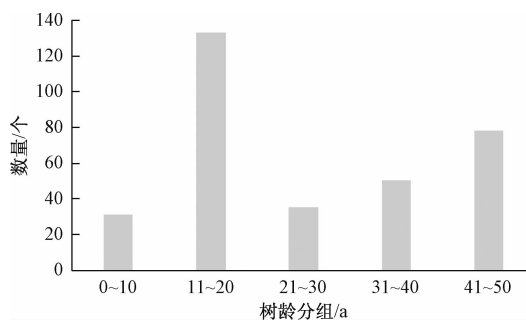


图4 月亮湖西部和北部主要乔木年龄分组

Fig. 4 Age groups of major forest in the west and north of Moon Lake

月亮湖旅游区于2004年开始运行,多年6—10月份每天游客量平均约7500人。湖周边有2口取水井供旅游开发和生活用水使用,湖东侧水井(图5中2#水井)已近干涸,湖西侧的水井(图5中1#水井)地下水位也呈波动式下降态;湖区周边原设有跑马场,常有牲畜前来饮水。近年来,由于自然气候变化和旅游开

发、道路修筑、森林种植等因素,月亮湖的水面面积和深度均呈下降趋势,水面萎缩明显,由原来的湖变成了现在的水坑,已达历史极低水位,且湖中水草茂盛,水体呈富营养化。

2019 年对月亮湖及周边的地下水位进行了调查,发现湖面水位标高为 1 687.5 m,湖西侧的 1#水井地下水位标高为 1 682.71 m,湖西南约 2 000 m 处的泉眼标高为 1 597.41 m,湖东侧 2#水井地下水位标高为 1 672.73 m,地下水位等值线及地下水流向如图 5 所示,月亮湖区水文地质条件见图 6。因此可以推测,月

亮湖水相对较高,可能会向周边的水井补给地下水。在月亮湖向如意河补给通道上钻孔揭示的地下水位显示,月亮湖的水位与钻孔揭示的水位水力梯度接近 1%,仍有可能向下游补给,实际上遥感影像显示如意河上游仍然是湿地,可能与月亮湖的补给有一定联系。根据 2016—2019 年月亮湖西侧游乐场 1#水井水位的监测数据可知,该井水位动态变化较大(图 7),初步推测可能是人为开采影响所致。湖区东侧游乐场水井的地下水位埋深监测数据显示该井的地下水位呈现总体下降趋势(图 7)。

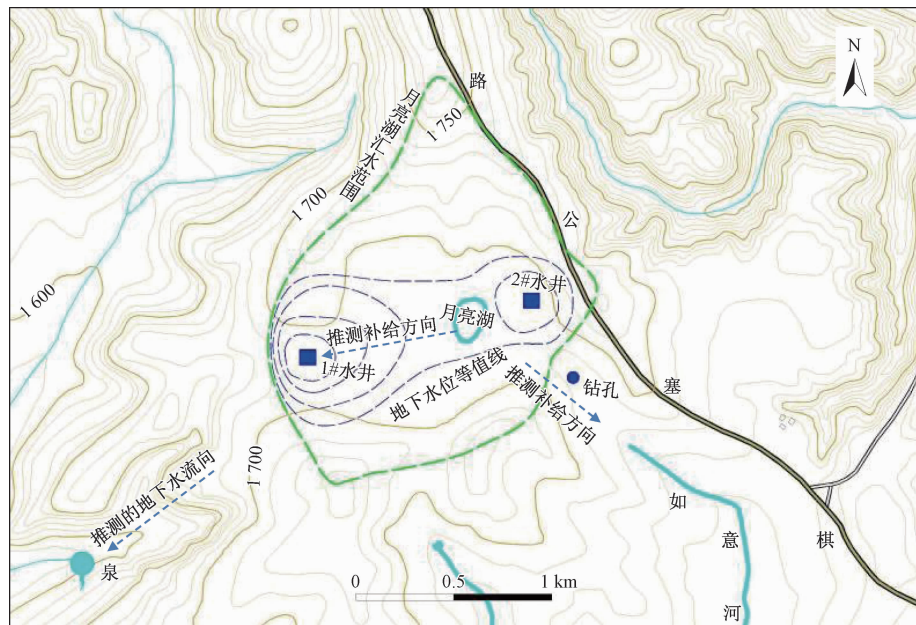


图 5 月亮湖周边地下水位等值线及地下水流向图

Fig.5 Contour map of groundwater level and their flow directions around Moon Lake

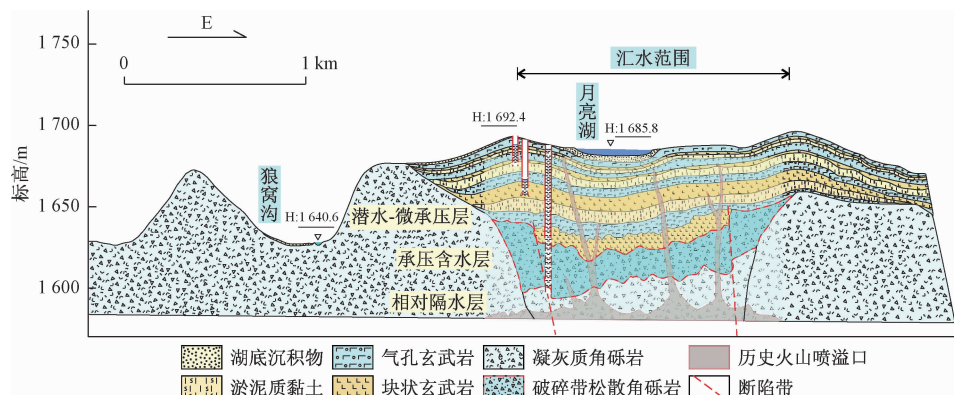


图 6 月亮湖区水文地质剖面图

Fig.6 Hydrogeological section of Moon Lake area

3 月亮湖周边人工林

建国初期,为了阻挡频袭北京的沙尘暴,防止呈扇

形围聚在北京北面的巴丹吉林、腾格里、乌兰布和、浑善达克等沙地南侵,1962 年国家选择在坝上地区的塞罕坝组建大型机械化林场,在玄武岩风化壳区、第四系

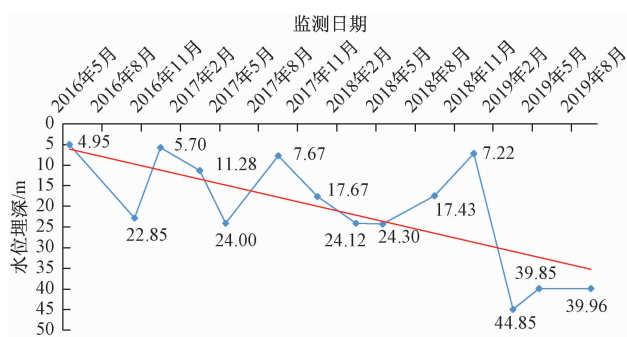


图7 月亮湖东侧游乐场水井(1#)地下水位埋深动态曲线

Fig.7 Dynamic curve of groundwater levels at the 1 # well on the east side of Moon Lake

风成黄土区和河流冲洪积地带植树造林。截至2016年,在坝上高原植树造林约 9.8×10^4 ha,其中1962—1978年为快速植树造林阶段,1979—2003年为较缓慢增加阶段,之后植树造林增加面积更为缓慢(图8)。建成了红松洼、塞罕坝、木兰围场、御道口等国家级和省级自然保护区,打造出了世界上面积最大的人工森林,生态环境明显好转。月亮湖就位于塞罕坝机械林场的人工林区,月亮湖区周边均为1962年以来不同年份种植的人工林。

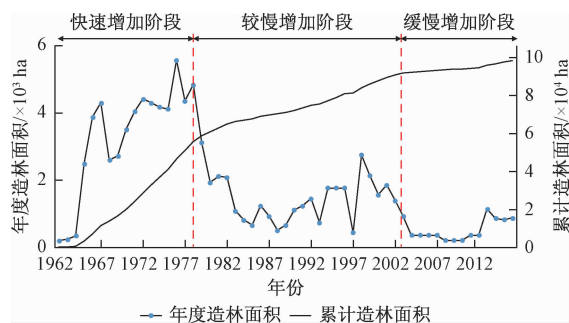


图8 塞罕坝地区1962—2016年人工植树造林面积统计

Fig.8 Statistical curves of artificial afforestation area in Saihanba area from 1962 to 2016

4 月亮湖面积萎缩原因

4.1 湖面面积与区域温度和降水关系

距离月亮湖12 km外的塞罕坝气象站完整记录了1975年以来的逐月温度和降水数据,可以为分析月亮湖的湖面面积变化及成因提供依据。从该气象站记录的降水量数据可以看出,1975年以来的降水总体呈增加趋势,1975—2018年年降水量增加了约50 mm,其中1975—1993年为缓慢增加期、1993—2003年为缓慢下降期、2003年以来为基本稳定期(图9a)。1975—2018年坝上高原塞罕坝地区年均气温升高约

0.8℃,各个季节升温差异较大,其中春季上升约0.5℃,夏季上升约0.7℃,秋季上升约0.5℃,冬季上升约0.4℃(图9b)。

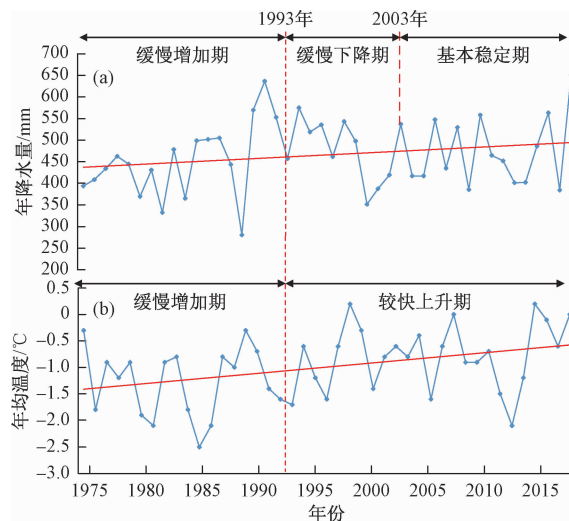


图9 塞罕坝地区1975—2018年年降水量(a)和年均温(b)变化曲线

Fig.9 Variation curves of annual precipitation (a) and average annual temperature (b) from 1975 to 2018 in Saihanba area

通过与月亮湖最近的塞罕坝地区的气象数据进行对比,显示1975年以来该地区的降水量总体上呈增加趋势,说明汇入月亮湖中的大气降水是增加的。其中1993年以前湖面面积增大与降水量增加基本同步,1993—2003年间二者也有相似波动趋势,2003年之后二者之间没有必然联系。该地区温度也呈增加的态势,由于温度升高会导致蒸发量增强,温度升高导致的蒸发加强可能对气候干旱化的影响更加明显^[19],因此2003年之后湖泊面积萎缩可能与自然因素中的温度升高导致蒸发量增大有一定关系。综合比较湖泊面积多项式拟合曲线和蒸发量拟合曲线可见,月亮湖湖面面积大小变化与蒸发量关系更密切(图10)。

4.2 湖面面积与植树造林关系

月亮湖周边的植被类型主要为1962年以来陆续种植的人工林,其次为天然草地和湿地。该地区1975—2016年,人工林种植面积增加了 5.7×10^4 ha,分析认为该地区降水量的增加可能与不断增加的人工森林有着正相关关系(图11),但随着造林面积的增加,月亮湖水域的面积呈减小趋势(图8),但二者是否有直接相关性还需要进一步深入研究。另外一种推测可能是温度升高后更有利于森林生长,随着森林面积扩大和树龄增加,虽然降水量增加了,但森林增加了水

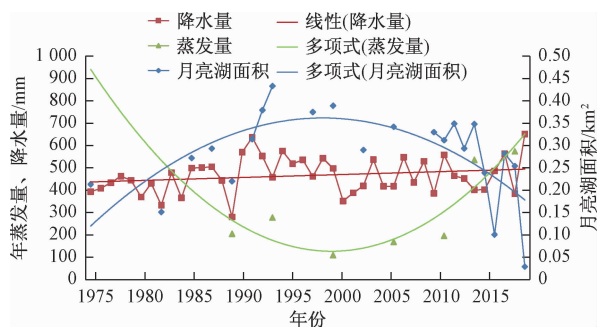


图 10 塞罕坝地区 1975—2018 年湖面面积、降水量和蒸发量变化特征

Fig. 10 Variation characteristics of lake size, precipitation and evaporation in Saihanba area from 1975 to 2018

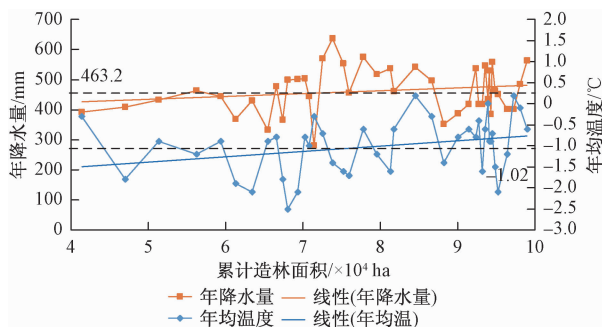


图 11 塞罕坝地区累计造林面积与年降水量和温度变化关系
Fig. 11 Relationship between cumulative afforestation areas and annual precipitation and temperature in Saihanba area

源涵养能力,抑制了降水后的地表径流量,同时通过叶面蒸腾作用将水分散发到空气中^[20-21],因此会造成月亮湖汇水范围内入湖的水量相应减少。

4.3 旅游开发对湖泊的影响

2013 年 7 月 30 日影像显示水域面积为 $3.4 \times 10^5 \text{ m}^2$, 2018 年 6 月 29 日影像显示水域面积为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^2$, 从 2013—2018 年的 5 年间,月亮湖水面面积缩小趋势明显(图 12)。月亮湖面积减少的原因除了蒸发等自然因素外,可能与人类活动密切相关。人类活动对该湖泊的影响主要表现在:(1)湖区周边围湖造房、游乐场和马场等旅游项目较多,硬化的水泥路面阻断了湖泊周边的地表天然径流补给通道,隔断了两侧地表水力联系,人为缩小并限定了湖区补水范围,这种影响在干旱半干旱区尤其明显。(2)湖区东北侧(2#, 见图 5)和西侧(1#)的 2 口水井抽取地下水,2009—2018 年间,湖区东北侧水井每年 7—10 月份抽取地下水约 200 m^3 ,湖区西侧水井每年 7—10 月份抽取地下水约 162 m^3 ,抽取的地下水主要用于旅游经营者和游客使用。(3)据不完全统计,月亮湖区 6—10 月份每

天平均用水人数为 50 人,每天按照 50 L 定额估算,每年(6 月 1 日—10 月 10 日共 132 d)用水 330 m^3 ;马匹 200 头,按照每天每头 10 L 定额估算,每年用水量 264 m^3 ,人蓄饮水量每年约为 594 m^3 ,2 口水井抽取的地下水每年合计 362 m^3 ,缺口 232 m^3 应该主要由月亮湖提供。因此,每年月亮湖除了需要补给地下水外,还需要提供约 232 m^3 的水为旅游服务。



图 12 2013 年和 2018 年月亮湖水域面积对比
(底图为 Google earth 影像)

Fig. 12 Comparison images of the water area of Moon Lake in 2013 and 2018 (base map from Google Earth)

5 坝上高原湖泊萎缩应对建议

月亮湖水面萎缩有自然和人为双重因素,但笔者认为更重要的是人为因素造成了月亮湖快速萎缩。主要表现在:(1)近年来的旅游开发,抽取地下水和牲畜大量饮用湖区地表水对该湖泊影响较大,造成湖区周边地下水位下降、泉水干涸,这是人类活动直接作用的结果;(2)湖区周边山坡的原始植被为草地,现绝大部分已改为人工林,由于人工林的蒸散量要普遍高于当地草地等自然植被的蒸散量(鲁晨曦等,2017)^[10],叶面蒸腾作用加强;(3)湖区的游乐场等地原为如意河上游的湿地和草地,现已退化为沙地,沙质裸露,水源涵养能力下降。

综合分析认为:地下水开采和旅游开发(牲畜)用水增多是湖泊萎缩的主要原因,这在坝上高原具有典型性和普遍性,也是全球气候变化与人类旅游活动的综合体现。因此,建议坝上地区发展生态节水旅游,实

施湖区及周边地区地下水禁限采,强化水源涵养保护,以更好地发挥坝上高原是京津冀重要的水源涵养区和生态环境支撑区的功能。

6 结论

通过对坝上高原生态环境资料的分析整理,尤其是对高原东部的月亮湖进行的深入调查研究,分析了自然因素和人类活动双重作用对该地区湖泊的影响,基本查清了湖面萎缩的主要原因,取得的主要结论:

(1)月亮湖水面面积自1975年以来,呈现先增加后减小趋势,其中1975—1993年为湖面较快增长期,1993—2013年为缓慢萎缩期,之后为较快萎缩期。

(2)年际尺度上月亮湖区降水量和蒸发量都呈增加趋势,但因温度升高和大规模植树造林后植被类型改变引起叶面蒸腾作用加强可能是湖泊萎缩的重要原因。

(3)人类活动对湖泊面积的影响作用也不容忽视,如月亮湖区周边人工林面积增加和周边道路硬化、地下水开采和牲畜饮水增多等。建议坝上地区发展生态节水旅游,实施湖区及周边地区地下水禁限采,强化水源涵养区建设。

参考文献 (References):

- [1] 孙建中, 杨明华, 盛学斌, 等. 河北坝上地区脆弱生态环境特征[J]. 中国沙漠, 1994, 14(4): 37 - 45. [SUN J Z, YANG M H, SHENG X B, et al. Fragile eco-environment characteristic in Bashang region, Hebei province [J]. Journal of Desert Research, 1994, 14(4): 37 - 45. (in Chinese)]
- [2] 刘艳东, 钱金平. 承德市生态功能区划研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011. [LIU Y D, QIAN J P. Study on ecological function division of Chengde city [M]. Beijing: China Environment Science Press, 2011. (in Chinese)]
- [3] 中共中央, 国务院. 京津冀协同发展规划纲要[EB]. 2015. [CPC Central Committee, State Council. Outline of Beijing-Tianjin-Hebei Coordinated Development Plan[EB]. 2015. (in Chinese)]
- [4] 邓辉. 从自然景观到文化景观——燕山以北农牧交错地带人地关系演变的历史地理学透视[M]. 北京: 商务印书馆, 2005: 291 - 306. [DENG H. From natural landscape to cultural landscape—a historical-geographical perspective of human-land relationship evolution in the interlaced zone of agriculture and animal, north of Yanshan [M].

Beijing: Business Press, 2005: 291 - 306. (in Chinese)]

- [5] 刘永慧, 田治, 刘敖然, 等. 河北围场御道口地区中全新世以来古植被与古气候演变[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 69 - 72. [LIU Y H, TIAN Y, LIU A R, et al. Variation of paleovegetation and paleoclimate since the Mid-Holocene in the Yudaokou area of Weichang County, Hebei Province [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 69 - 72. (in Chinese)]
- [6] 武爱彬, 赵艳霞. 坝上高原生态用地时空格局演变与生态系统服务价值分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 283 - 291. [WU A B, ZHAO Y X. Analysis of ecological land pattern evolution and ecosystem service value in Bashang plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 283 - 291. (in Chinese)]
- [7] 袁金国, 王卫, 龙丽民. 河北坝上生态脆弱区的土地退化及生态重建[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 139 - 143. [YUAN J G, WANG W, LONG L M. Land degradation and ecological reconstruction of eco-fragile region in Bashang of Hebei Province [J]. Journal of Arid land Resources and Environment, 2006, 20(2): 139 - 143. (in Chinese)]
- [8] 许丁雪, 吴芳, 何立环, 等. 土地利用变化对生态系统服务的影响研究——以张家口-承德地区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7493 - 7501. [XU D X, WU F, HE L H, et al. Impact of land use change on ecosystem services a case study of the Zhangjiakou-Chengde area [J]. Acta ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7493 - 7501. (in Chinese)]
- [9] ZHAI Q M, GUO Z Y, LI Y L, et al. Annually laminated lake sediments and environmental changes in Bashang Plateau, North China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 241(1): 95 - 102.
- [10] 鲁晨曦, 曹世雄, 石小亮. 我国北方干旱半干旱地区人工造林对地下水位变化影响的模拟研究[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 715 - 725. [LU C X, CAO S X, SHI X L. Stimulation on the impact of afforestation on the groundwater table in arid and semi-arid areas in northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 715 - 725. (in Chinese)]
- [11] HUANG T M, PANG Z H, YANG S, et al. Impact of

- afforestation on atmospheric recharge to groundwater in a semiarid area[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125 (9). DOI: 11. 1029/2019jd032185.
- [12] 高素改. 河北坝上高原湖淖时空演化规律及其驱动力分析[D]. 石家庄:河北师范大学, 2019. [GAO S G. An analysis of temporal and spatial evolution laws and driving forces of lakes on Bashang Plateau in Hebei Province[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2019. (in Chinese)]
- [13] GE J, GUO W D, PITMAN A J, et al. The nonradiative effect dominates local surface temperature change caused by afforestation in China[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(14):4445–4471.
- [14] Earth Symmetry Scenes Committee. Earth System Scan Overview: A Program for Global change [M]. Washington D C: National Aeronautics and Space Administration, 1986: 1–48.
- [15] 杨艳昭, 封志明, 闫慧敏, 等. 自然资源资产负债表编制的“承德模式”[J]. *资源科学*, 2017, 39(9):1646–1657. [YANG Y Z, FENG Z M, YAN H M, et al. The pattern of compilation of the natural resources balance sheet for Chengde City [J]. *Resources Science*, 2017, 39(9):1646–1657. (in Chinese)]
- [16] 殷志强, 卫晓锋, 刘文波, 等. 承德市生态文明示范区综合地质调查实施方案(2019—2025)[R]. 北京:中国地质环境监测院, 2020:1–49. [YIN Z Q, WEI X F, LIU W B, et al. Implementation plan of comprehensive geological survey in ecological civilization demonstration zone of Chengde City[R]. Beijing: China Institute of Geo-Environment Monitoring, 2020:1–49. (in Chinese)]
- [17] 姜加明, 吴敬禄, 沈吉. 安固里淖沉积物记录的气候环境变迁[J]. *地理科学*, 2004, 24(3):346–351. [JIANG J M, WU J L, SHEN J. Lake sediment records of climatic and environmental change in Angulinao Lake [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(3):346–351. (in Chinese)]
- [18] 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 湖泊沉积物粒度多组分特征及其成因机制研究[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(2):345–353. [YIN Z Q, QIN X G, WU J S, et al. Multimodal grain size distribution characteristics and formation mechanism of lake sediments[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(2):345–353. (in Chinese)]
- [19] 朱江玲, 刘鸿雁, 王红亚. 河北坝上地区湖泊沉积物记录的中全新世干旱气候[J]. *地理科学*, 2007, 27(3):380–384. [ZHU J L, LIU H Y, WANG H Y. Mid Holocene dry climate recorded by lacustrine sediments in Bashang region of Hebei Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(3):380–384. (in Chinese)]
- [20] 席丹, 王文科, 赵明, 等. 玛纳斯河流域山前平原区蒸散发时空异质性分析[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(2):25–34. [XI D, WANG W K, ZHAO M, et al. Analyses of the spatio-temporal heterogeneity of evapotranspiration in the piedmont of the Manas River Basin [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2):25–34. (in Chinese)]
- [21] 曹乐, 聂振龙, 刘敏, 等. 民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(3):25–33. [CAO L, NIE Z L, LIU M, et al. Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin oasis in the Shiyang River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3):25–33. (in Chinese)]