DOI:10.19789/j.1004-9398.2019.03.011

青藏高原热融湖塘水文变化及其工程指示意义*

房建宏[1] 徐安花[1] 杨玉忠[2**] 张 泽[2]

(1. 青海省交通科学研究院,青海 西宁 810008;
2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要: 热融湖塘的发育和扩张显著地影响着青藏高原冻土区水文循环和工程稳定性. 本研究选择青藏高原北麓河盆地典型的热融湖塘,开展热融湖塘的同位素水文变化研究及工程指示性. 结果表明,永久性湖塘稳定同位素季节变化显著小于季节性湖塘; 年际差异结果显示,热融湖塘同位素水文过程受降水量和气温的协同影响,大的降水事件使得湖水同位素显著贫化,而较高的气温加剧了湖水同位素蒸发分馏效应,产生了重同位素的富集效应; 此外,夏季活动层和上限附近地下冰融化释放的水分成为湖塘水分的另一个重要的补给来源. 最后,研究结果也证实了热融湖塘的发育对青藏公路路基有较大的影响,建议在高原冻土区开展工程活动时要重点考虑热融湖塘对工程进展和后续工程稳定性的影响.

关键词: 青藏高原; 冻土; 热融湖塘; 同位素
中图分类号: P933

0 引 言

富冰多年冻土融化导致地表沉陷,地表水体不断聚集形成了热融洼地[1],热融洼地不断扩大进而与周边的小洼地相互连通最终形成了热融湖塘[2]. 湖水的潜热会进一步融化周边冻土和地下冰,导致湖塘的扩张和加深[3-4]. 热融湖塘的形成和发展是冻土区的独有地貌,与地下冰的分布息息相关[5].

近几十年,青藏高原变暖趋势显著[6-9],气候变暖和冻土退化导致活动层加深以及上限附近地下冰融化[7,10],冻土融化导致大量热融湖塘形成[11-12]. 青藏高原多年冻土约为 125×10^4 km^2,占高原总面积的67%[6,9]. 青藏高原湖泊(热融湖塘)广泛分布[8],其中在青藏工程走廊分布有超过2 163个热融湖塘[13]. 受工程活动和气候变暖的影响,青藏公路沿线热融湖塘数量增加[11]. 这些湖塘的存在和不断扩张必将对青藏高原水文循环[12,14]和青藏公路路基产生重大影响. 研究表明,距离青藏公路较近的热融湖塘和热融洼地较为发育,对路基稳定性构成一定的危害[15-17],建议在工程选线时应尽量绕避热融湖塘. 本文基于稳定同位素技术开展青藏高原两个典型热融湖塘同位素水文研究工作. 通过揭示热融湖塘同位素水文的变化特征,阐明热融湖塘的补给特征,最后探讨热融湖塘对青藏高原工程稳定性的影响. 以期能够为青藏高原水文过程研究和工程稳定性评价提供数据和参考.

1 研究区概况

北麓河盆地位于青藏高原腹地(图1),平均海拔高度4 600 m,属于青藏高原高寒地带. 根据北麓河气象站长期观测资料,北麓河多年平均气温 -3.58℃,极端高温23.2℃,极端低温 -37.7℃,冻结期为10月—次年4月. 北麓河盆地内富集高含冰量连续多年冻土. 年平均地温介于 -1.8 ~ -0.5°C之间,多年冻土厚度介于20 ~ 80 m之间,活动层厚度为1.6 ~ 3.4 m[18]. 盆地内热融湖塘广泛分布,30%的区域面积上分布有53%的湖面积,平均每公里分布有23个热融湖塘,且大部分湖塘发育在富冰和饱冰多年冻土区内[19]. 北麓河盆地内富冰和饱冰冻土的大量发育以及热融湖塘的密集分布显著地改变了区域水文过程和水循环. 在气候变暖的背景下,富冰和饱冰冻土不断退化,导致地下冰融化,

收稿日期: 2018-03-25
* 青海省交通科学研究院开放基金项目(2016-1-1)
** 通信作者: nwtiger145@163.com

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

加快了热融湖塘的扩张速度和新湖塘的形成,进一步加剧了冻土的退化,严重影响了青藏高原冻土水文过程和高原水资源的分配. 本论文选择北麓河两个不同水文状况的热融湖塘开展同位素水文研究(图 1),希望通过湖水同位素的变化对北麓河区域的水文循环特征有一定的把握. 湖 1 湖泊面积 1 950 m^2,属于永久性湖塘,无外来的直接径流补给,主要受到降水和冻土融水补给; 湖 2 水面面积为 400 m^2,属于季节性湖塘,暖季受到直接径流和降水补给,冬季干涸,水体更新速率很快.

2　研究方法

在北麓河冻土试验站附近选取了两个热融湖塘进行定点采样(图 1,表 1). 2011 年采样周期为 6—9 月,2012 年采样周期为 5—9 月. 2011—2012 年,共获得湖水样 57 个,所有样品直接装入 20 mL 玻璃瓶密封冷藏保存直至分析. 所有降水样品立即密封装入 20 mL 的棕色玻璃瓶内冷藏保存直至分析.

所有样品分析之前先进行过滤,完成过滤的样品在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室进行分析工作. 稳定同位素($\delta^{18}O$、δD)的测试工作采用 Picarro 液态水同位素分析仪(L1102-i,USA)完成,测定结果用 V-SMOW 和实验室标准进行校准,最后的结果以 V-SMOW 表示,$\delta^{18}O$ 和 δD 的测量精度分别为 0.07‰和 0.3‰. 过量氘(d-excess)采用 Dansgaard[10] 的方法计算获得: $d\text{-excess} = \delta D - 8 \times \delta^{18}O$.

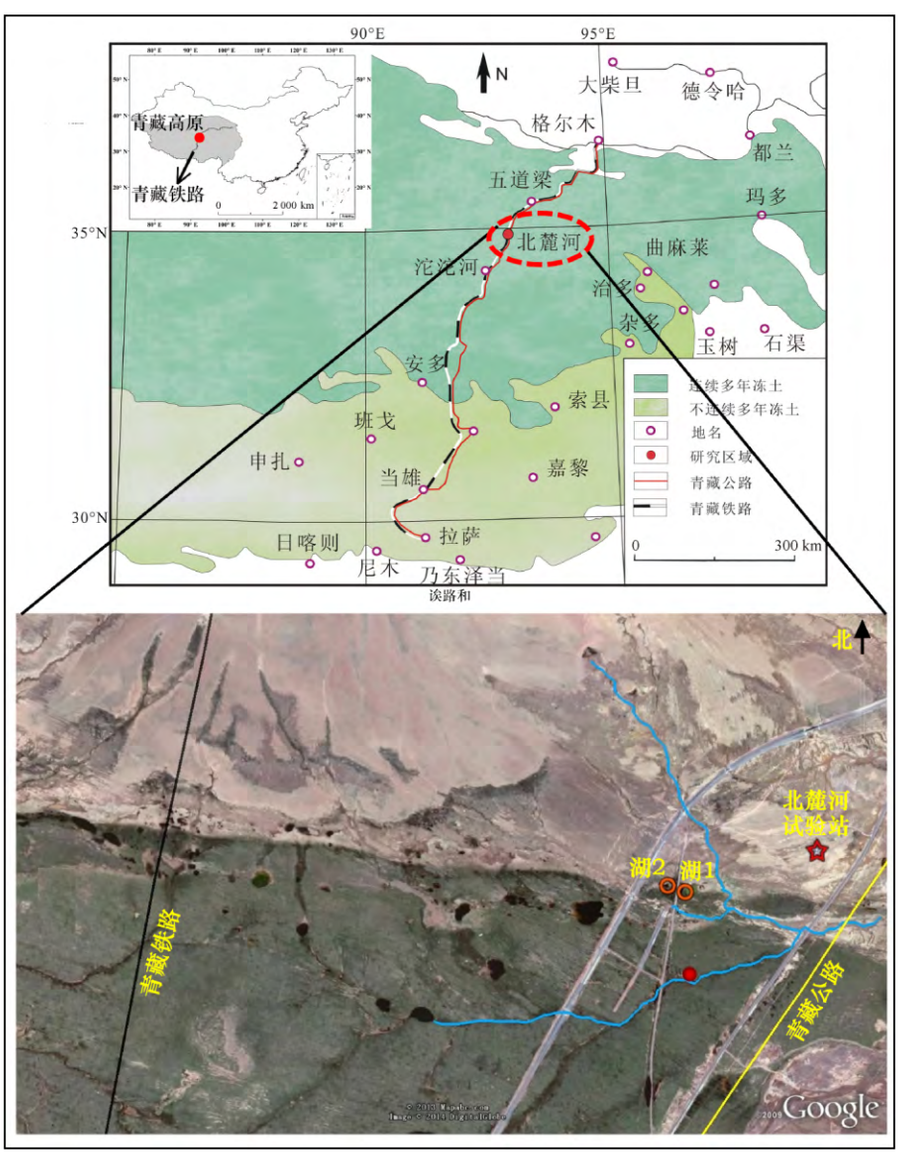


图 1　研究区位置及采样点分布

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 北麓河采样点具体位置

样品性质	采样地名称	经度	纬度	海拔/m
降水样	北麓河冻土试验站	92°56′06.57″	34°49′44.92″	4 642
湖水样	热融湖塘 1	92°55′41.40″	34°49′35.60″	4 636
湖水样	热融湖塘 2	92°55′37.80″	34°49′36.28″	4 636

3 结 果

3.1 湖水稳定同位素随时间的变化特征

图 2 给出了北麓河两个热融湖塘 2011 年和 2012 年湖水同位素随时间的变化趋势. 热融湖塘湖水的同位素值显著高于降水同位素($\delta^{18}O$均值为 -12.1‰; δD 均值为 -82.8‰).

分析发现,无论是 2011 年还是 2012 年,湖 1 和湖 2 表现出了不同的同位素变化特征. 和湖 1 相比,湖 2 同位素波动较大,而且 $\delta^{18}O$ 和 δD 都相对偏负,过量氘(d-excess)偏正(图 2). 这是由于湖 1 属于永久性湖泊,无外来地表水体的直接注入补给,湖水流动性比较弱,滞留时间长,导致其蒸发富集效应非常显著,因此湖 1 的 $\delta^{18}O$ 和 δD 表现出偏正的趋势,过量氘则显著偏负[21]. 另外湖 1 和湖 2 稳定同位素的差异与北麓河的气候环境有关. 北麓河海拔很高(约 4 700 m),属于干旱区,太阳辐射强,湖水二次蒸发作用比较强烈,逐年蒸发富集作用,导致湖水富集了较重的同位素. 而湖 2 属于季节性湖泊,更新速率快,受降水影响,同位素波动较大.

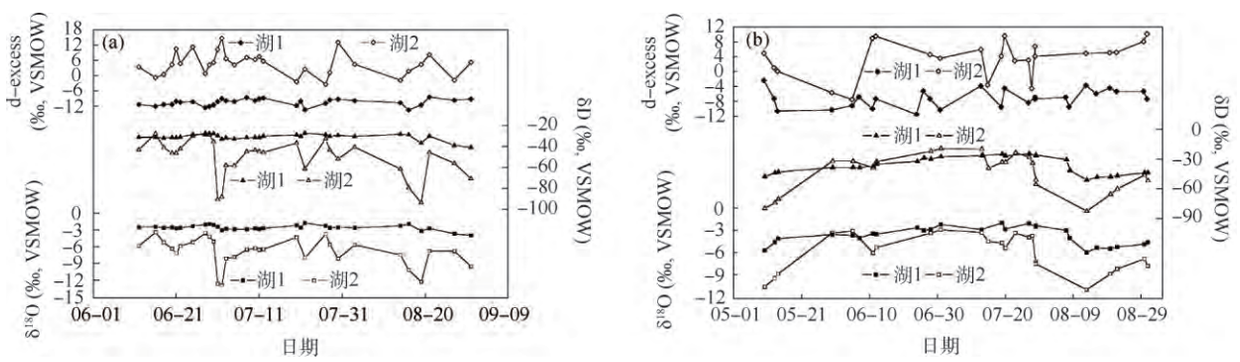


图 2 北麓河热融湖塘同位素 2011(a)和 2012(b)年随时间变化特征

3.2 热融湖塘稳定同位素水文的年际差异

对于同一个热融湖塘,由于气温、降水量和局地蒸发强度的差异,它们的稳定同位素变化存在年际差异. 图 3(a)给出了两年湖 1 的 $\delta^{18}O$ 随时间的变化特征对比. 图中清晰的展示了湖 1 两年同位素变化趋势的差异:6 月之前,2012 年湖水稳定同位素相对偏负(< -3‰);而从 6—8 月,2011 和 2012 年湖 1 的稳定的同位素均很偏正(在 -3‰ 左右),且变化趋势比较相似;而从 8—9 月,两年的变化趋势明显不同,2011 年相对偏正,2012 年则比较偏负. 这与两年的气温和降水量变化有关. 从图 5 可以清楚地看到,6 月 10 日到 7 月 31 日,两年的气温变化相差不大(气温平均值分别为 5.5℃和 5.9℃),因此在这个阶段两年的湖水同位素变化比较相似,稳定同位素的波动可能与局地水汽蒸发有关. 从 8—9 月,2011 年明显偏正,而 2012 年很偏负,这一方面与采样时间和样品数有关,从 8 月到 9 月两年总共采集了 12 个样品(每年 6 个),几乎是在降水事件后采集,两年湖 1 的低值都出现在降水量偏大的日期(2011-08-30 降水量为 30.3 mm,2012-08-12 降水量为 15.4 mm). 因此单次降水事件影响了湖水同位素的变化.

图 3(b)给出了湖 2 两年同位素的波动. 湖 2 的同位素在两年之内都表现出了较大的波动. 由于在 6 月之前,2011 年未采样,没有可比性. 从 6—8 月,2012 年湖 2 同位素浓度整体上高于 2011 年,而 8—9 月,则 2011 年高于 2012 年.

这是由于湖 2 属于季节性湖泊,湖水更新比较快,夏季受降水补给较多,在 6—8 月时间段内,北麓河 2012 年降水量明显少于 2011 年(图 4),而且日平均气温较 2011 年略微偏高,综合作用的结果使

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

得在这个时间段内,2012 年湖 2 同位素值高于 2011 年. 从 8—9 月,正好相反,2011 年湖水同位素值高于 2012 年(除了 8 月 19 日,由于降水量很大) ,这可能是因为 8—9 月份,北麓河 2011 年降水量低于 2012 年,局地蒸发强于 2012 年,由于湖水的蒸发富集作用,使得其同位素较 2012 年偏正.

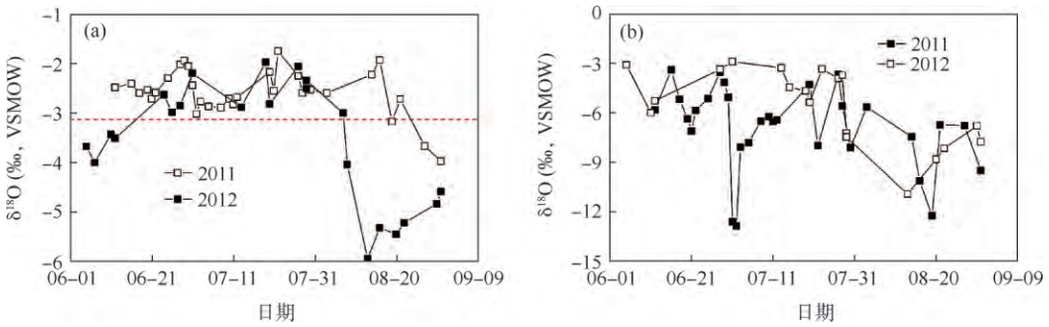


图 3　北麓河热融湖塘湖水 $\delta^{18}O$ 的年际变化

(a) 为湖 1; (b) 为湖 2

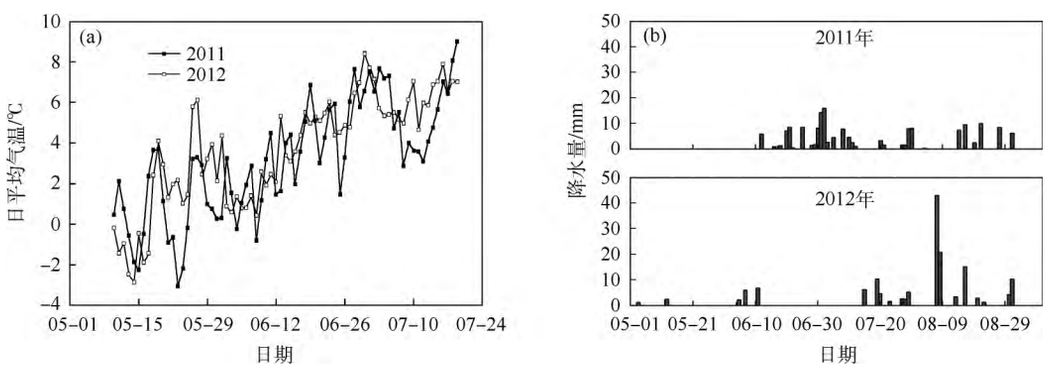


图 4　北麓河 2011 和 2012 年日平均气温(a) 和日降水量对比(b)

4　讨　论

4.1　热融湖塘补给来源分析

根据北麓河两个热融湖塘 2011 和 2012 年的同位素数据建立了两个湖塘湖水的 δD-$\delta^{18}O$ 线性关系图,通过该图可以具体的分析湖塘稳定同位素与降水之间的相互联系,从而推测补给来源(图 5) . 从图中可以看到,两个湖塘的同位素点都分布在北麓河降水线(LMWL) 的下方,而且几乎都大于夏季和冬季降水量加权平均值(图 5) (湖 2 个别点除外) . 两个湖塘蒸发线(LEL) 的斜率都小于降水线斜率,截距均为负值,这说明湖塘湖水经历了强烈的蒸发,轻同位素优先脱离水体,剩余水体中重同位素逐渐富集. 对比分析两个湖塘的蒸发线特征,我们发现湖 1 的同位素更偏正,蒸发线斜率和截距更小,这说明在同等气候条件下,湖 1 作为封闭湖塘,湖水同位素产生了逐年的蒸发富集效应,使得其富集更多的重同位素,而湖 2 由于属于季节性湖泊,冬季干涸,夏季受降水补给,使得其滞留时间短.

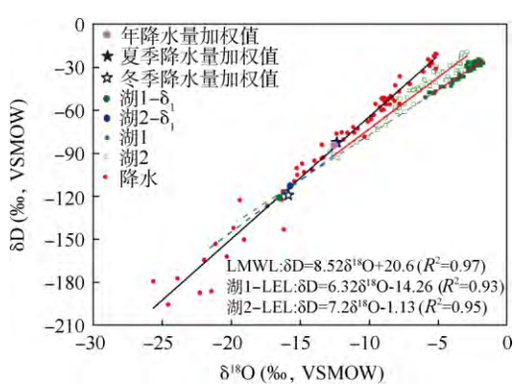


图 5　北麓河区域热融湖塘湖水 δD-$\delta^{18}O$ 关系图

研究发现,湖水蒸发线与降水线的交点(δ_I) 同位素值即为湖水的初始补给水体的年平均同位素值,而且湖水同位素值距 δ_I 越远,湖水蒸发越强[21-22]. 通过计算得出了湖 1 和湖 2 的 δ_I(图 6) . 从图中可以断定,湖 1 整体蒸发强度大于湖 2. 另外,从图中可以看出,两个湖塘 δ_I(湖 1: -15.9‰, -114.4‰; 湖 2: -16.7‰, -119.7‰) 与北麓河年降水量加权值(-12.6‰, -84.7‰) 和夏季降水

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

量加权值(2.5‰，-84.7‰)差异很显著，而与北麓河冬季降水的降水量加权平均值(-15.9‰，-119.5‰)比较接近，这与其他学者的研究成果比较接近[23]. 这也说明了热融湖塘湖水在未蒸发之前受到冬季降雪或者堆积降雪在春季的融水补给. 同时，由于热融湖塘周围均覆盖有冻土，冬季堆积的积雪在春季融化后，入渗进入活动层，夏季活动层融化释放的水分成为湖塘水分的另一个重要的补给来源，另外热融湖塘作为热的载体，在其周围和底部可能存在融区，使得湖水和融区周围的地下水产生了交换，这也可能是湖水的重要补给源.

4.2 高原热融湖塘发育对工程建筑稳定性的影响

热融湖塘是指由自然和人为因素引起活动层加深，造成地下冰或者冻土层融化、地表沉陷而形成的热融沉陷，最终扩张成为热融湖塘. 在气候转暖影响下，多年冻土退化、升温和融化，对热融湖塘的形成构成较大的影响. 由多年冻土融化产生的水分会在地势低洼处或原有的湖塘区域汇聚，加速湖塘的扩张，同时热融湖塘的发展又会引起冻土环境变化. 因此，研究热融湖塘对其周围多年冻土以及对青藏铁路路基稳定性的影响是必要的. 青藏公路和铁路沿线分布有大量的热融洼地和湖塘，随着气候变暖，冻土融化后导致洼地逐渐扩大，湖塘不断扩张，使得其侧向的热侵蚀范围也扩大，必将对公路和铁路路基产生影响.

研究发现: 热融湖塘影响周边冻土的空间分布，影响范围可至距湖边 50 m 处，在考虑未来气温升高 2.6℃ 情景下，热融湖塘对周围多年冻土的空间分布状态有显著影响. 热融湖塘对多年冻土上限的影响范围为自湖边至距湖边 50 m 处，热融湖塘影响多年冻土下限的范围为自湖边至距湖边 100 m 处[24]. 侧向的热传导会对路基底部的温度场产生影响，进而影响公路的稳定性.

本研究结果显示，热融湖塘同位素水文存在显著的季节和年际差异，这是由降水、气温以及冻土融化造成的. 由于含冰量、湖塘水文状况的差异，导致冻土融水对湖塘的补给量也不尽相同[12]，其形成与冻土的退化密切相关. 因此在气候变暖的背景下，热融湖塘作为热载体，通过垂向和侧向的热传导，将热流传入周边冻土内，从而导致活动层的加深和地下冰的融化，融化的冻土反过来会加剧热融过程、促进湖塘的形成. 冻土退化导致已有热融湖塘的扩张和新湖塘的形成必然会对周边路基和建筑物产生重要的影响.

5 结 论

基于青藏高原北麓河两个典型热融湖塘稳定同位素分析结果，得出以下结论:

(1) 北麓河热融湖塘呈现出不同的同位素变化特征，永久性湖塘稳定同位素显著偏正，季节性湖塘偏负，说明蒸发富集效应对湖塘同位素影响很大;

(2) 同一个湖塘同位素水文变化呈现出显著的年际差异，指示了降水量和气温对湖塘水文过程的影响;

(3) 两个湖塘初始补给水体稳定同位素(δ_I)与北麓河冬季降水的降水量加权平均值比较接近，说明了热融湖塘源水体为冬季降雪. 同时，积雪融水入渗进入活动层，夏季活动层融化释放的水分成为湖塘水分的另一个重要的补给来源;

(4) 从稳定同位素角度进一步证实了热融湖塘与冻土融化之间的相互联系、相互反馈及其对青藏公路路基稳定的影响. 随着气候变暖，冻土融化导致热融湖塘不断扩张，而湖塘的不断扩大进一步加剧了冻土的退化，从而对路基造成侧向和底部热侵蚀. 建议在高原冻土区开展工程活动时要重点考虑热融湖塘对工程进展和后续工程稳定性的影响.

参 考 文 献

[1] GROSSE G, JONES B, ARP C. Thermokarst lakes, drainage, and drained Basins [M] //Shroder J, GIARDINO R, HARBOR J. Treatise on Geomorphology. Glacial and Periglacial Geomorphology, San Diego: Academic Press, 2013, 8: 325 - 353.

[2] MACKAY J R. Lake stability in an ice-rich permafrost environment: examples from the western Arctic coast [C] // Aquatic ecosystems in semi-arid regions: implications for resource management. NHRI Symposium Series. 1992, 7.

[3] FEDOROV A N, GAVRILIEV P P, KONSTANTINOV P Y, et al. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia [J]. Ecohydrology, 2014, 7: 188 - 196.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[4] NARANCIC B, WOLFE B B, PIENITZ R, et al. Landscape-gradient assessment of thermokarst lake hydrology using water isotope tracers [J]. Journal of Hydrology, 2014, 545: 327 - 338.

[5] SMITH L C, SHENG Y, MACDONALD G M, et al. Disappearing arctic lakes [J]. Science, 2005, 308: 1429.

[6] LIU J, WANG S, YU S, et al. Climate warming and growth of high elevation inland lakes on the Tibetan Plateau [J]. Global Planetary Change, 2009, 67: 209 - 217.

[7] WU Q B, ZHANG T J. Recent permafrost warming on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113, D13108.

[8] GUO D L, WANG H J, LI D. A projection of permafrost degradation on the Tibetan Plateau during the 21st century [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2012, 117: D05106.

[9] XU X M, ZHANG Z Q, WU Q B. Simulation of permafrost changes on the Qinghai-Tibet Plateau, China, over the past three decades [J]. International Journal of Digital Earth, 2017, 10(5): 1 - 17.

[10] WU Q B, ZHANG T J. Changes in active layer thickness over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995 to 2007 [J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(5): D09107.

[11] NIU F J, LIN Z J, LIU H, et al. Characteristics of thermokarst lakes and their influence on permafrost in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geomorphology, 2011, 132: 222 - 233.

[12] YANG Y Z, WU Q B, YUN H B, et al. Evaluation of the hydrological contributions of permafrost to the thermokarst lakes on the Qinghai-Tibet Plateau using stable isotopes [J]. Global and Planetary Change, 2016, 140: 1 - 8.

[13] NIU F J, LUO J, LIN Z J, et al. Morphological characteristics of thermokarst lakes along the Qinghai-Tibet engineering corridor [J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2014, 46 (4): 963 - 974.

[14] PAN X, YU Q, YOU Y, et al. Contribution of supra-permafrost discharge to thermokarst lake water balances on the northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2017, 555: 621 - 630.

[15] 潘卫东,朱元林,吴亚平,等. 青藏高原多年冻土地区不良冻土现象对铁路建设的影响 [J]. 兰州大学学报(自然科学版),2002,38:127 - 131.

[16] 余绍水,潘卫东,史聪慧,等. 青藏铁路沿线主要次生不良冻土现象的调查和机理分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(6):1082 - 1085.

[17] 胡晓莹,盛煜,李静,等. 路基坡脚积水对多年冻土路基稳定性的影响研究进展 [J]. 冰川冻土,2014, 36(4): 876 - 885.

[18] WU Q B, HOU Y D, YUN H B, et al. Changes in active-layer thickness and near-surface permafrost between 2002 and 2012 in alpine ecosystems, Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China [J]. Global and Planetary Change, 2015, 124: 149 - 155.

[19] 牛富俊,董晟,林战举,等. 青藏公路沿线热喀斯特湖分布特征及其热效应研究 [J]. 地球科学进展,2013, 28(6):695 - 702.

[20] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus, 1964,16(4): 436 - 468.

[21] GIBSON J, EDWARDS T, BIRKS S, et al. Progress in isotope tracer hydrology in Canada [J]. Hydrological Processes, 2005, 19 (1): 303 - 327.

[22] GIBSON J, BIRKS S, EDWARDS T. Global prediction of δ_A and δ^2H-$\delta^{18}O$ evaporation slopes for lakes and soil water accounting for seasonality [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2008, 22 (2): 55 - 74.

[23] JONSSON C E, LENG M J, ROSQVIST G C, et al. Stable oxygen and hydrogen isotopes in sub-Arctic lake waters from northern Sweden [J]. Journal of Hydrology, 2009, 376(1 - 2):143 - 151.

[24] 崔巍. 热融湖塘对多年冻土的热影响研究 [D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2010.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Hydrological Changes of Thermokarst Lake on the Qinghai-Tibet Plateau and Implications for the Engineering Constructions

FANG Jianhong[1] XU Anhua[1] YANG Yuzhong[2] ZHANG Ze[2]

(1. Qinghai Research Institute of Transportation, Xining Qinghai 810001; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000)

Abstract: Development and expansion of thermokarst lakes significantly influence the hydrological cycles and engineering stabilities on the Qinghai-Tibet Plateau (QTP). Two typical thermokarst lakes in the Beiluhe Basin on QTP were selected to study the hydrological changes using stable isotopic method. The results indicate that both two lakes display distinct isotopic hydrological variations. The perennial lake (lake-1) shows minor temporal variations in stable isotopes than seasonal lake (lake-2). The interannual differences for two lakes suggested the influence of precipitation and air temperature on the stable isotopes. It was concluded that both two thermokarst lakes were hydrologically linked with permafrost thaw and ice melting. It was further verified that the development of thermokarst lake around the Qinghai-Tibet Highway was presenting (and will present) important control on the embankment. It was suggested that the impact of thermokarst lake on the progress and subsequent stability of construction should be primarily considered during the engineering activities in permafrost regions.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau; permafrost; thermokarst lake; stable isotopes

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net