

文章编号: 1000-0240(2009)02-0350-07

气候变暖背景下青藏高原多年冻土层中地下冰 作为水“源”的可能性探讨

吴吉春, 盛煜, 吴青柏, 李静, 张秀敏

(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, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 多年冻土中含有大量地下冰, 全球气候变暖势必导致多年冻土退化, 地下冰融化, 部分水分被释放并参与到区域水循环之中, 改变了区域水文状况. 冻土退化-释水的过程在监测上面临较大困难, 无法提供直接证据, 但其长期累计的效果在宏观水文过程中表现显著. 为此, 利用近年来青藏高原部分湖泊水位变化监测以及地区水文情势变化研究成果, 探讨了在气候变暖背景下, 多年冻土层中的地下冰作为一种潜在水“源”的可能性. 结果表明: 多年冻土退化较强烈地区, 补给源头在多年冻土区的封闭湖泊水位上涨、地下水位上升, 排除其它补给量增加的可能性后, 多年冻土地下冰很可能是补给水量增加的原因之一.

关键词: 气候变暖; 多年冻土退化; 地下冰融化; 潜在水源

中图分类号: P642.14 **文献标识码:** A

0 引言

全球多年冻土冻土分布约占全球陆地总面积的1/4, 在全球气候变暖的背景下, 冻土变化必将深刻影响冻土区水文过程^[1]. 国外寒区水文研究中, 就长期的水文监测数据开展了河流径流变化的对比研究^[2-3]; 利用遥感资料或地面调查讨论冻土区湖泊(热融湖塘)变化^[4-5]; 更多的研究是把多年冻土作为隔水层, 而考虑活动层在冻融过程中的水文效应^[6-7]. 在我国, 杨针娘等^[8-9]最早在20世纪80年代初到90年代初在青藏高原北缘的祁连山地区开展冻土水文观测研究, 进行了常规的地面水文、气象要素以及冻土活动层的水热状况的观测, 对冻土冻融过程进行了较为详尽的研究, 并计算了实验流域的水量平衡. 近年来, 高原寒区水文变化的研究逐步将多年冻土层作为一个主要的水文因子考虑. 张森琦等^[10]讨论了黄河源区水文变化, 认为冻土消失或活动层加厚, 冻结层上潜水位下降, 含水可容空间增加, 使得地表水与地下水的补排关系发

生倒置, 区域地表、地下水动、静储量减少, 最终导致了冬季源区黄河的频繁断流; 王根绪等^[11]对比江河源区不同时期遥感资料发现地表水体面积萎缩, 归因于多年冻土退化. 总之, 目前有关冻土水文的研究, 均以活动层为研究对象, 仅考虑了冻融循环过程中地表水与冻结层上水之间的互补关系, 以及水热传输机制, 还没有研究将多年冻土直接作为一种水源, 在水量平衡方程中以参量形式体现出来.

青藏高原号称“中华水塔”, 是我国几条著名河流的发源地. 一直以来, 人们仅把冰川作为天然的“固体水库”. 实际上, 在青藏高原多年冻土分布远比冰川广泛得多, 而多年冻土层中往往含有大量地下冰, 其含水量可超过岩土层自身的饱和含水量, 尤其是细粒沉积物堆积较厚的冻土区. 粗略估计, 整个高原多年冻土层中总水量是冰川的2~3倍^[12].

冰川作为一种水源, 在监测上是“显性”的, 各种研究手段可以直接实施在冰川本体上. 在气候响

收稿日期: 2008-08-16; 修订日期: 2008-10-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2007CB411506); 国家杰出青年科学基金项目(40625004); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-10)资助

作者简介: 吴吉春(1973—), 男, 甘肃永登人, 1996年毕业于兰州大学地质系, 现为博士研究生, 主要从事普通冻土的研究.

E-mail: wujichun@lzb.ac.cn

应过程中,冰川形态改变明显、遗留形迹清晰、时滞性弱,可以在较短时间内完成冰川变化的监测及研究。然而多年冻土埋藏在地面以下一定深度内,无法直接探察,是“隐性”的,对其中的状态及变化的探查相对比较困难。加之我国冻土界与水文界各自的研究领域造成的学科隔阂,基本数据的共享性差,使得多年冻土在高原水文过程中的作用一直没有引起足够的重视,导致目前人们对多年冻土层的水文地质意义认识还仅仅停留在“冷生隔水层”的概念上,由此派生出“冻结层上(下,中)水”的概念性认识,而没有揭示其内在联系。与冰川不同,多年冻土中的地下冰赋存在岩土介质中,单位体积内其水量与冰川无可比拟。由于岩土本身具有一定的持水性,各项均质性变化较大,地下冰融化以后能释放的水量(过剩冰)数据获得困难较大,这也是水文学研究中不得不忽略多年冻土在气候变暖背景下作为一种潜在水源的原因。

多年冻土变化监测多侧重于温度、厚度和分布面积的变化,由于对地下冰的长期、连续性非破损监测十分困难。目前对多年冻土上限附近地下冰消融过程及富裕水的运移几乎无法监测,很难获得多年冻土在高原水循环中具有水源作用的直接、可靠和量化的证据。本文拟从一些冻土现象以及封闭湖泊水量平衡关系理论分析入手,利用近年来湖泊水位变化监测和地区性水文情势变化的研究成果,来定性讨论多年冻土在气候变暖背景下作为一种潜在水“源”的可能性。

1 多年冻土对水分的存储

在多年冻土勘察中,常常发现有些多年冻结层中含有大量地下冰,尤其是土质颗粒比较细或含细颗粒土较多的地层中,含冰量远远超过其饱和含水量,称为高含冰量多年冻土,其岩芯取出融化后,呈流态,大量出水。这类冻土在工程上具有很大的危险性,因为其一旦消融,将失去大部分承载力,从而受到广泛重视。高含冰量多年冻土在水平方向分布区域广泛,青藏公路资料表明,560 km 的多年冻土路段中高含冰路段约占 188 km^[13];青康公路多年冻土路段总长约 157 km,其中高含冰路段达 100 km^[14];新藏公路 140 km 的多年冻土路段中有 80 km 为饱冰等高含冰量冻土^[15];祁连山区多条公路跨越多年冻土区,经过的河谷、盆地、山前冲洪积扇、分水岭缓坡等部位均分布有高含冰底层,况且公路选线已经避开了那些特别不利地段。沿深

度方向上,高含冰量多年冻土普遍分布在表层 20 m 深度以内,多年冻土上限附近一般是地下冰富集部位^[16-17]。

针对多年冻土上限附近存在的高含冰(甚至纯冰)层,程国栋^[18]提出“重复分凝”机制,合理地解释了其形成机理,得到国内外广泛认同。“重复”包括两重含义,其一是在一年内,由各种不同作用造成的分凝成冰多次重复;其二是指这些作用年复一年的重复。由于重复分凝过程,在年内可以有效地将活动层内的水分固定在多年冻土上限附近,年复一年随着地表的加积,或者气候变冷,多年冻土上限抬升,在新的上限附近继续了这一过程。总之,由于重复分凝机制,使得参与区域水循环的部分地下水最终被固定在多年冻土层中。

在局部地层中还发现,一定厚度的纯冰层存在于某一深度,但在多年冻土上限附近居多。这些纯冰层的形成除了重复分凝机制外,还有一部分属于埋藏冰和侵入冰。石冰川、冰川末端表碛下的冰川冰停止活动以后,在寒冷气候条件下得以保存,以及湖冰埋藏、冰川退缩后遗留的死冰埋藏,形成多年冻土层中的埋藏冰;侵入地层中的地下水在多年冻土发展期间可以形成地下冰脉、冰床,地表水在地表冻裂处侵入地层中形成冰楔和复合楔体,也可形成厚层地下纯冰层^[19]。

另外,多年冻土层作为冷生隔水层,将地下水分为 3 部分:冻结层上水、层下水和层间水。随着多年冻土层的加厚,冻结层下水具有一定的承压性质,而寒冷气候往往导致地下水排泄区封冻,在排泄区往往形成一系列冻胀丘,并不能使地下水顺畅的排泄,从而使地下水储存。

2 高原多年冻土分布及近期变化

多年冻土的存在是陆面热量收支过程中支出大于收入长期积累的结果,在表现上是一种温度现象。青藏公路沿线是青藏高原多年冻土条件勘察最为密集的地带,由此大致确定了高原多年冻土分布的控制指标:多年冻土北下界在昆仑山北麓的西大滩地区,年平均气温 $-2.0\sim-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,对应高程下限为海拔 4 150~4 200 m;南界对应年平均气温 $-2.0\sim-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,分布在念青唐古拉山以北海拔 4 600 m 以上的广大地区内;连续多年冻土北下界年平均气温 $-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,对应高程下限为海拔 4 350~4 650 m;连续多年冻土南下界在安多以北,年平均气温 $-3.5\sim-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,对应高程海拔 4 780

m^[20].

气候变暖,促使多年冻土退化.自20世纪70年代以来的多年冻土监测资料显示^[16, 21-22],青藏高原很多地方都出现了退化趋势,具体表现为多年冻土地温升高,厚度减小,甚至冻结层消失.青藏公路沿线1995—2000年的地温连续监测表明^[23],天然状态下多年冻土活动层以 $1.5 \sim 5.5 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度在增厚.这意味着多年冻土的上限在加深,多年冻土上限附近部分地下冰的融化.在多年冻土区的边缘地区,如南、北下界附近和冻土岛边缘等区域,由于冻土厚度薄,地温高,退化最为显著,表现为多年冻土层减薄或完全融化^[21, 24].

3 多年冻土南下界附近封闭湖泊水位变化

在青藏高原冰川融化补给河湖是有目共睹的,其对湖水量和水位变化的贡献是明显的,也比较容易观测到.但是,多年冻土消融所导致的水量径排条件变化却很难直接监测.在气温升高的背景下,一个年内,多年冻土上限年下降值以厘米计,单位面积内释放的水量较小,但是就整个流域来说,却可能引起流域水量平衡的变化,尤其在长期的连续升温背景下.近年来,借助遥感和连续监测资料研究了高原一些地区的水文情势变化,分析这些变化,可为多年冻土融水在流域水循环中所起的作用提供一些间接的证据.

3.1 内陆封闭湖泊的水量平衡关系

对于内陆封闭湖泊来说,其水量收入包括湖面降水,地表径流和地下径流汇入;水量支出如果忽略地下渗漏,则主要为水面蒸发.建立湖泊水量平衡关系:

$$E = P + R \quad (1)$$

式中: E 为湖面蒸发量; P 为湖面降水量; R 为入湖径流量.把降水和蒸发量以深度计,并假设湖泊积水面积(流域)内降水量与湖面一段时期内平均降水量相等,那么湖泊水量平衡关系可改写为^[25]:

$$PA_{\text{湖}} + kPA_{\text{集}} = EA_{\text{湖}}$$

或:

$$\frac{A_{\text{集}}}{A_{\text{湖}}} = \frac{E - P}{kP} = \frac{E/P - 1}{k} \quad (2)$$

式中: $A_{\text{集}}$ 为湖泊流域面积; $A_{\text{湖}}$ 为湖泊水面面积; k 为流域径流系数; 其它各项与式(1)相同.

从式(2)可以看出,对于封闭内陆湖泊来说,其流域面积固定,水量平衡关系体现在湖水面积和

水位的变化上.流域径流系数由地面状况和地形坡度、下伏地层岩性等因素决定,在一定时期内(一年以上)平均状态,可认为是恒定的.因此,水量平衡决定于湖面蒸发量和流域平均降水量的比值 E/P .

3.2 高原内陆湖泊水量变化分析

班戈错($31^{\circ}40' \sim 31^{\circ}50' \text{ N}$, $89^{\circ}24' \sim 89^{\circ}37' \text{ E}$, 湖面海拔4522 m)位于西藏那曲地区班戈县城西北75 km处,是西藏第二大湖——色林错的“分蘖湖”.湖泊流域面积约1950 km²,由源于其南部的朗钦山(海拔5506 m,无稳定积雪)的卡挖藏布补给,该地区处于高原大片连续多年冻土的南界附近,多年冻土下界海拔在4600 m左右^[20].赵元艺等^[26]通过地形图、遥感资料、水位观测、水深测量等数据,研究了1959—2003年近50 a来班戈错湖面变化.结果表明^[26]: 1959—1973年湖面下降了0.25 m, 1973—2003年期间湖面总体上升了1.75 m,后期略有降低.20世纪70年代初期湖面面积最小时仅有3.5 km², 2001年最大达166.2 km²,增大了约47倍.班戈错附近班戈县气象站多面资料表明,多年平均蒸发量为2012 mm(20 cm蒸发皿),多年平均降水量为310 mm,蒸发量是降水量的6.5倍.按内流湖水量平衡关系分析,湖面增大47倍,在径流系数假设不变的情况下需要蒸发量和降水量比值达到1.1才可以满足.事实上,该地区多年以来干湿格局并没有发生明显改观.从20世纪60年代到90年代末的40 a中,本区气候变化的总体趋势是:蒸发量略有减小,降水量略有增加,年平均气温明显升高.湖面的升降与该地区气温的升降一致.

对于封闭湖泊水位变化来说,流域内降水量是最主要的控制因素.但是在干旱地区,由某年降水异常导致的湖泊水位变化,理论上来说应该在降水恢复正常以后很快被补偿,除非这种异常持续.地处干旱区的班戈错湖泊水位持续上涨,湖面扩大,而水面蒸发总量与湖泊面积呈正比.在湖泊水量平衡关系中,湖泊总水量增加,支出量同时大幅增加,说明出现了强大的新补给水源.赵元艺等^[26]否定了冰川融水补给(流域内没有永久性冰川)和大气降水增加所致的原因,指出与邻近的色林错有水力联系是其水位上升的主要原因.1972年、1992年和1999年3个年份的遥感图像解译和实地调查表明,色林错自70年代以来水域面积也处于持续扩大过程中,湖岸大片淹没,第一阶湖堤部分被淹^[27].而

色林错主要由源于唐古拉山冰川的扎加藏布补给, 唐古拉山的冰川融化是其可能原因; 另外, 色林错众多入湖径流源于周围没有冰川但确定有多年冻土存在的高山, 多年冻土融水增加也是可能原因之一。色林错与班戈错湖面高程之间约有 14 m 的水位差, 如果两湖之间真有水力联系, 则水位应基本持平, 或者说在色林错稳定的水力联系下, 其水位变化不会出现从接近干涸到迅猛上涨如此大的波动。实际上, 班戈错流域上游约在海拔 4 800 m 部位存在一片面积较大的冻土湿地, 边缘有热融湖塘发育, 说明多年冻土开始在该地区退化, 其补给水量来自这一高含冰冻土区可能性较大。

另外, 这一地区的其它湖泊如巴木错、蓬错、东错、乃日平错自 20 世纪 70 年代以来, 水位均有不同程度的上升, 湖面扩大, 淹没周边牧场、居民用地^[28]。而这些湖泊均由源于附近海拔在 5 400 m 以下高山的河流补给, 与班戈错情形类似, 而附近却无其它地表水体。同时, 位于同一地区的纳木错 ($30^{\circ}30' \sim 30^{\circ}55' \text{ N}$, $90^{\circ}16' \sim 91^{\circ}03' \text{ E}$, 湖面海拔 4 718 m) 水位却没有明显变化^[27], 原因是那木错流域面积小(为色林错的 1/4), 湖水面积大(西藏最大湖泊, 1 920 km²), 位置偏南, 冰川、多年冻土范围较小, 消融补给量小, 和湖面蒸发维持平衡。

与那曲地区湖泊水位变化对应, 羊卓雍错、沉错、扎布耶盐湖位置更偏南, 多年冻土下界、冰川末端海拔更高, 相对分布范围更小。长期水位监测、遥感资料分析表明^[29-30], 自 20 世纪代以来, 这些湖泊水位总体处于降低趋势, 湖水盐度增大, 虽然在个别年份异常升高, 但其后总是持续降低。青海湖自 20 世纪 60 年代以来也在不断萎缩。李世杰等^[31]在对高原湖泊重复考察的基础上, 指出青藏高原湖泊表现出明显的退缩是一种普遍现象。在这种背景下, 集中在那曲地区的几个主要湖泊却出现水位升高趋势, 水位变化与气温升高基本同步。在很多湖泊流域内并无冰川存在的情况下, 多年冻土融水作为一种可能补给因素, 需要给予考虑和足够重视。

4 多年冻土北下界附近水文形势变化

柴达木盆地西南边缘是昆仑山东段山区地表和地下径流的排泄区, 格尔木市就坐落在源于昆仑山区的格尔木河冲洪积扇前缘东翼。20 世纪 80 年代, 该地区地下水位快速上升, 造成当地生产、生活严重受损^[32]。达布逊湖位于柴达木盆地察尔汗盐滩南

缘, 为格尔木河等河流的地表径流和地下径流的排泄区, 在极端干旱的气候条件下, 已经处于盐湖发展的最后阶段——卤水型盐湖, 其西部盐滩地自 1976 年以后受补给水量加大, 出现了一个常年性的新生湖, 称为西达布逊湖^[33]。柴达木盆地气候变化研究表明^[34], 该地区气温明显升高, 降水量略有增加, 但出现在 20 世纪 80 年代中期以后蒸发量也同步增加。这些现象说明, 该地区原有的水量平衡格局被打破, 出现了潜在的新补给源。格尔木河流域所处的昆仑山东段, 现代冰川很少, 海拔 3 900 ~ 4 200 m 以上发育多年冻土。自 1975 年以来的近 30 a, 格尔木河源区西大滩谷地多年冻土已经发生了显著的退化^[12], 下界上升约 25 m, 多年冻土面积约减少 12%。多年冻土消融释放的水分很有可能参与到格尔木河水循环之中了。

5 讨论

关于多年冻土中储存的水量至今仍然限于初步的推测性估算, 目前还没有研究就这一问题做出令人满意的解答, 多年冻土钻探中含水量的测定只能提供一种直观的认识。在高纬地区, 如加拿大北部和西伯利亚地区, 某些多年冻土退化造成地面融沉, 幅度可达数米到十几米^[35-36]。这种融沉的空间无疑是地下冰融化后提供的, 足可见多年冻土中所储的水分是十分可观的。但是在天然状态下多年冻土退化速度还是很缓慢的, 一般的监测时间尺度内, 无法准确给出其消融量, 限制了这一领域研究的深入开展。前人的研究中, 提及多年冻土对封闭湖泊水量增加的贡献, 也仅仅限于推测式的论述, 一笔带过。

在寒区讨论地表水文状况的变化, 降水量的变化是首先要讨论的, 其次冰川因为监测上的便利, 为大多数研究者所重视^[26-28]。但是因为有关观测以来气温变化的渐进性, 冰川消融量理论上不会出现突变, 而且随着冰川范围的缩小, 相同的升温幅度下, 其融水量会逐渐减小。对于多年冻土来说, 气温变暖虽然导致普遍退化, 但其主体部分主要表现为升温特征^[21, 24]。对于多年冻土边缘地区来说, 地温升至相变温度后, 一旦多年冻土开始融化将十分迅速, 可在年代际时间尺度内完全消融^[21]。这一过程具有某些突变性质(相对于其存在的时间尺度而言), 如果排除降水增加的原因以后, 可能更有利于解释区域性的水量增加。

多年冻土退化, 在水文上的表现可能有几种形

式: 1) 在平原区, 首先是活动层加厚, 冻土上限开始融化, 在重力和土层压力作用下, 地下冰融化导致部分过饱和水被排出, 地面发生融沉, 有时可在沉陷凹地汇集成湖. 由于地表水的热侵蚀作用, 地下冰的融化持续, 造成热融湖塘的扩大, 致使地面蒸发增加, 从而增加了空气湿度, 最终导致区域降水量的增加. 如果融蚀贯穿多年冻土层厚度或者侧向上沟通其它融区, 则可能发生湖水的排泄, 通过地表或地下径流参与到水循环, 补给河流或内陆湖泊; 2) 在山区, 冻土上限附近过剩地下冰的融化, 直接以潜水形式向低处渗流, 进入非冻土区, 参与到水循环; 3) 在适当地区, 多年冻土作为隔水顶板, 封闭着一定量的承压水. 当冻土层变薄, 甚至某些部位出现贯穿融区, 则形成新生上升泉, 补给地表. 这种现象出现在西大滩东段(小南川口以东)沿东西向新断裂带附近, 呈线状分布着一系列塌陷的古冻胀丘洼地, 最大直径 200 m 以上, 呈马蹄形, 每个洼地都有一个出口^[37]. 可见冻土退化时, 冻胀丘塌陷, 地下冰融化流出补给地表径流, 地表形态的证据是比较可靠的. 这些变化决不是一时之功, 也非显而易见, 而是一个“潜移默化”的过程.

西伯利亚环北极地区, 相隔 25 a 的卫星照片显示, 除连续冻土区内热融湖塘面积和数量有所增加外, 其它冻土地区明显减小(少). 这一现象说明: 冻土变暖, 致使热融湖塘出现并扩展(目前的连续冻土区内); 随着冻土持续退化, 不连续冻土地区贯通性加强, 导致湖水排泄增加或疏干^[5]. 与之相对应, 该地区主要河流的入海(北冰洋)径流量自 20 世纪 30 年代以来增大了 7%(约 128 km³), 平均每年增加水量约 (2.0±0.7) km³^[3], 似乎揭示了冻土退化在地区水源补给方面提供了一个“源”. 同样, 我国北方地区最大的湖泊——呼伦湖(116°58′~117°47′ E, 48°30′~49°20′ N), 地处目前东北多年冻土区南界附近, 自 20 个世纪初期以来, 其水位一直处于波动升高过程中; 期间在 1920—1930 年代和 1960—1970 年代出现下降^[38], 和全球气温变化一致^[39].

对于区域水循环来说, 大气降水是最主要、最直接的补给水源. 在全球变暖背景下, 正如冰川一样, 在高原地区, 如果多年冻土融水参与到水循环从而促进了某些水文特征的变化是实事, 那么, 必将对高原气候环境和生态等诸方面的研究产生深远的影响. 这是一个值得继续深入研究且具有重要理论意义和实际价值的新课题, 需要建立原位监测,

以获得可信的数据支持, 同时, 加强机理研究, 通过模拟手段, 得到可靠的结论.

致谢: 金会军研究员对论文提出中肯建议与意见, 陈仁升研究员提供了部分数据, 在此一并表示衷心感谢.

参考文献(References):

- [1] Woo M K. Permafrost hydrology in North America [J]. Atmosphere-Ocean, 1986, 24(3): 201—234.
- [2] Onuchin X, Balzter H, Borisova H, *et al.* Climatic and geographic patterns of river runoff formation in Northern Eurasia [J]. Advance in Water Resource, 2006, 29: 1314—1327.
- [3] Peterson B J, Holmas R M, McClelland J W, *et al.* Increasing river discharge to the Arctic Ocean [J]. Science, 2002, 298: 2171—2173.
- [4] Yoshikawa K, Hinzman L D. Shrinking thermokarst ponds and groundwater dynamics in discontinuous permafrost near Council, Alaska [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2003, 14: 151—160.
- [5] Smith L C, Sheng Y, Macdonald G M, *et al.* Disappearing Arctic lakes [J]. Science, 2005, 308: 1429.
- [6] Quinton W L, Marsh P. The influence of mineral earth hummock on subsurface drainage in the continuous permafrost zone [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1998, 9: 213—228.
- [7] Sugimoto A, Naito D, *et al.* Characteristics of soil moisture in permafrost observed in East Siberian taiga with stable isotopes of water [J]. Hydrological Processes, 2003, 17: 1073—1092.
- [8] Yang Zhenjiang. Streamflow characteristics and water balance in alpine permafrost regions [J]. Science in China (Series D), 1996, 26(6): 567—571. [杨针娘. 高山冻土区水量平衡及地表径流特征[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(6): 567—573.]
- [9] Yang Zhenjiang, Yang Zhihui, Liang Fengxian, *et al.* Permafrost hydrological processes in Binggou Basin of Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, 15(2): 235—241. [杨针娘, 杨志怀, 梁凤仙, 等. 祁连山冰沟流域冻土水文过程[J]. 冰川冻土, 1993, 15(2): 235—241.]
- [10] Zhang Senqi, Wang Yonggui, Zhao Yongzhen, *et al.* Permafrost degradation and its environmental sequent in the source regions of the Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(1): 1—6. [张森琦, 王永贵, 赵永真, 等. 黄河源区多年冻土退化及其环境反映[J]. 冰川冻土, 2004, 26(1): 1—6.]
- [11] Wang Genxu, Ding Yongjian, Wang Jian, *et al.* Land ecological changes and evolutionary patterns in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 15 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(2): 163—173. [王根绪, 丁永建, 王建, 等. 近 15 年来长江黄河源区的土地覆被变化[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 163—173.]
- [12] Nan Zhuotong. Study on characteristics of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau and construction of digital roadbed of the Qinghai-Tibet Railway [D]. Lanzhou: CA-REERI, CAS, 2003: 1—121. [南卓铜. 青藏高原冻土分布

- 研究及青藏铁路数字路基建设[D]. 兰州: 中国科学院博士论文, 2003: 1-121.]
- [13] Wu Qingbai, Liu Yongzhi, Shi Bin, *et al.* Advance research on frozen engineering permafrost region along Qinghai-Xizang Plateau Highway [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, **10**(1): 55-61. [吴青柏, 刘永智, 施斌, 等. 青藏公路多年冻土区冻土工程研究新进展[J]. *工程地质学报*, 2002, **10**(1): 55-61.]
- [14] Zhu Linnan, Wu Ziwang, Liu Yongzhi, *et al.* Impacts of permafrost degradation on embankment stability of No. G214 Highway [J]. *Highway*, 1995 (4): 4-6. [朱林楠, 吴紫旺, 刘永智, 等. 多年冻土退化对 214 国道路基稳定性的影响[J], *公路*, 1995 (4): 4-6.]
- [15] Yu Qihao, Kurt Roth, Jin Huijun, *et al.* Progress of the Sino German joint researches on the degradation of permafrost on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(6): 844-849. [俞祁浩, Kurt Roth, 金会军, 等. 中德合作三江源区和甜水海地区多年冻土退化过程科学考察和研究进展[J]. *冰川冻土*, 2006, **28**(6): 844-849.]
- [16] Jin Huijun, Yu Qihao, Wang Shaoling, *et al.* Changes in permafrost environments along the Qinghai-Tibet engineering corridor induced by anthropogenic activities and climate warming [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, **53**: 317-333.
- [17] Jin Huijun, Wei Zhi, Wang Shaoling, *et al.* Assessment of frozen ground conditions for engineering geology along the Qinghai-Tibet Railway and Highway [J]. *Engineering Geology*, 2008, **101**: 96-109.
- [18] Cheng Guodong. The forming process of thick layered ground ice [J]. *Science in China (Series B)*, 1982 (3): 281-288. [程国栋. 厚层地下冰的形成过程[J]. *中国科学(B 辑)*, 1982 (3): 281-288.]
- [19] Murton J B. Ground-ice stratigraphy and formation at North Head, Tuktoyaktuk Coastlands, Western Arctic Canada: a product of glacier-permafrost interactions [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2005, **16**: 31-50.
- [20] Wang Jiacheng, Wang Shaoling, Qiu Guoqing. Permafrost along the Qinghai-Xizang Highway [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1979, **34**(1): 281-288. [王家澄, 王绍令, 邱国庆. 青藏公路沿线的多年冻土[J]. *地理学报*, 1979, **34**(1): 18-32.]
- [21] Jin Huijun, Zhao Lin, Wang Shaoling, *et al.* Thermal regimes and degradation modes of permafrost along the Qinghai-Tibet Highway [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, **49**(11): 1170-1183.
- [22] Wu Qingbai, Dong Xianfu, Liu Yongzhi, *et al.* Responses of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau, China, to climate change and engineering construction [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2007, **39**(4): 682-687.
- [23] Wu Qingbai, Shi Bin, Liu Yongzhi. Interaction study of permafrost and highway along Qinghai-Xizang Highway [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, **46**(2): 97-105.
- [24] Nan Zhuotong, Li Shuxun, Cheng Guodong. Predict of permafrost change in 50 and 100a on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, **34**(6): 528-534. [南卓铜, 李述训, 程国栋. 未来 50 与 100a 青藏高原多年冻土变化情景预测[J]. *中国科学(D 辑)*, 2004, **34**(6): 528-534.]
- [25] Fan Yunqi. The supply coefficient of interior lakes in Xizang [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1983, **14**(2): 117-127. [范云崎. 西藏内陆湖泊补给系数的初步探讨[J]. *海洋与湖沼*, 1983, **14**(2): 117-127.]
- [26] Zhao Yuanyi, Zhao Xitao, Zheng Mianping, *et al.* The denivellation of Bankog Co in the past 50 years, Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, **80**(6): 876-884. [赵元艺, 赵希涛, 郑绵平, 等. 西藏班戈错近 50 年来的湖面变化[J]. *地质学报*, 2006, **80**(6): 876-884.]
- [27] Yang Rihong, Yu Xuezheng, Li Yulong. The dynamic analysis of remote sensing information for monitoring the expansion of the Selincuo Lake in Tibet [J]. *Remote Sensing for Land & Resource*, 2003, **56**: 64-67. [杨日红, 于学政, 李玉龙. 西藏色林错湖面增长遥感信息动态分析[J]. *国土资源遥感*, 2003, **56**: 64-67.]
- [28] Bian Duo, Yang Zhiqiang, Li Lin, *et al.* The Response of lake area change to climate variations in North Tibet Plateau during last 30 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, **65**(5): 510-518. [边多, 杨志刚, 李林, 等. 近 30 年来西藏那曲地区湖泊变化对气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2006, **65**(5): 510-518.]
- [29] Lu Anxin, Wang Lihong, Yao Tandong. The study of Yamzho Lake and Chencuo Lake variation using remote sensing in Tibet Plateau from 1970 to 2000 [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2006, **21**(3): 173-177. [鲁安新, 王丽红, 姚檀栋. 青藏高原湖泊现代变化遥感方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2006, **21**(3): 173-177.]
- [30] Qi Wen, Zheng Mianping. Time serial analyses of water level fluctuation of Zabuye Salt Lake, Tibet [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, **26**(6): 693-700. [齐文, 郑绵平. 扎布耶盐湖水位波动规律初探[J]. *地理科学*, 2006, **26**(6): 693-700.]
- [31] Li Shijie, Li Wanchun, Xia Weilan, *et al.* The Scientific expedition on the modern lake evolution in the Qinghai-Tibet Plateau: a preliminary report [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998, **10**(4): 95-96. [李世杰, 李万春, 夏威岚, 等. 青藏高原现代湖泊变化与考察初步报告[J]. *湖泊科学*, 1998, **10**(4): 95-96.]
- [32] Jiang Zhong. Preliminary research on the reason of ground water table rising in Germu regions [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1987 (3): 54-55. [姜忠. 格尔木地区地下水位上升致灾原因初探[J]. *水文地质工程地质*, 1987 (3): 54-55.]
- [33] Chen Kezao, Bowler J M. Preliminary study on sedimentary characteristics and evolution of palaeoclimate of Qarhan Salt Lake in Qaidam Basin [J]. *Science in China (Series B)*, 1985 (5): 463-472. [陈克造, Bowler J M. 柴达木盆地察尔汗盐湖沉积特征及其古气候演化的初步研究[J]. *中国科学(B 辑)*, 1985 (5): 463-472.]
- [34] Shi Xinghe, Zhao Yanning, Dai Sheng, *et al.* Research on climatic change of Qaidam Basin since 1961 [J]. *Journal of Desert Research*, 2005, **25**(1): 123-128. [时兴合, 赵燕宁, 戴升, 等. 柴达木盆地 40 多年来的气候变化研究[J]. *中国沙漠*, 2005, **25**(1): 123-128.]
- [35] Nelson F E, Anisimov O A. Permafrost zonation in Russia under anthropogenic climatic change [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1993, **4**(2): 137-148.
- [36] Jorgenson M T, Racine C H, Walters J C, *et al.* Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming

- climate in central Alaska [J]. *Climate Change*, 2001, **48**: 551—579.
- [37] Wang Shaoling. The pingos along the Qinghai-Xizang Highway [C]//Professional Papers on Permafrost Studies of Qinghai-Xizang Plateau. Beijing: Science Press, 1983: 23—29. [王绍令. 青藏公路沿线的冻胀丘[C] //青藏冻土研究论文集. 北京: 科学出版社, 1983: 23—29.]
- [38] Qin Boqiang, Wang Sumin. The resent expansion of Hulun Lake and its relation to warming global climate [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1994, **25**(3): 280—287. [秦伯强, 王苏民. 呼伦湖的近期扩张及其与全球气候变化的关系[J]. 海洋与湖沼, 1994, **25**(3): 280—287.]
- [39] Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*[M]. Cambridge, U K and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.

Discussion on the Possibility of Taking Ground Ice in Permafrost Regions as Water Sources under Climate Warming

WU Ji-chun, SHENG Yu, WU Qing-bai, LI Jing, ZHANG Xiu-min

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Large amount of ground ice are borne in permafrost regions on the Tibetan Plateau. Inevitably, the degradation of permafrost due to climate warming have led, is leading and will lead to the thawing of permafrost and melting of ground ice, releasing part of soil moisture. This part of soil moisture from melting ground ice enters the hydrological cycle at various spatio-temporal scales, changing regional hydrological regimes to various degrees. Although the cumulative effects of this

released soil moisture could be reasonably significant in hydrological processes at the macro — scales, the direct and reliable monitoring evidence is difficult to submit. On the basis of the monitoring of changes of water levels in some of the lakes on the Tibetan Plateau and of the hydrological change trends at the regional scale, in this paper, the possibility of taking the degrading permafrost on the Tibetan Plateau as water sources under climate warming is discussed preliminarily.

Key words: climate warming; permafrost degradation; ground ice melting; potential water sources