

## 青藏工程走廊热融湖塘水理化特性分析

林战举<sup>1</sup>, 牛富俊<sup>1</sup>, 罗京<sup>1</sup>, 尹国安<sup>1</sup>, 刘明浩<sup>1</sup>, CHRIS Burn<sup>2</sup>

(1. 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;

2. Carleton University, Ottawa K1S 5B6, Canada)

**摘要:** 为查明青藏工程走廊热融湖塘水理化特性及其理化特性与湖塘分布之间的关系, 选取青藏工程走廊楚玛尔河至风火山段为研究区域, 沿青藏公路从北向南依次选取 19 个热融湖塘进行水深、面积等几何特征调研并取水样, 进行阴阳离子等理化参数测定。分析了热融湖塘水的理化特性, 并结合调研资料探讨了热融湖塘理化特性与区域环境及湖塘分布之间的相关性。结果表明在 3 个研究亚区湖的水理化特性有较大差别, 楚玛尔河高平原从北向南湖水矿化度逐渐升高, 水质由淡水向咸水再到强咸水过渡, 主要与该区域“碟”状湖的分布特征和寒旱多风及蒸发量大有关; 可可西里山区和北麓河盆地的湖水矿化度较低, 水质以弱咸水或淡水为主。这两个亚区湖较深, 地形以丘陵盆地为主, 降低了湖面的蒸发量。

**关键词:** 青藏工程走廊; 多年冻土; 热融湖塘; 理化特性

**中图分类号:** P332.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2014)02-0217-08

热融湖塘是指由自然或人为因素引起季节融化深度加深, 导致地下冰或高含冰量多年冻土局部融化, 地表随之热融沉陷、积水后形成的湖塘<sup>[1]</sup>, 又称热喀斯特湖塘。热融湖塘的出现被认为是多年冻土变暖的指示器。在全球气候变暖和高原人类活动的双重影响下, 近几年青藏工程走廊热融湖塘发育很快, 大量分布在平原、盆地等冰缘地区<sup>[2-5]</sup>。2007 年开展了一次沿青藏公路的热融湖塘调查, 调查结果表明大约有 69 个热融湖塘和 234 个积水坑分布在可可西里山区至西大滩盆地之间的青藏公路两侧, 总面积约为 2.5 万 m<sup>2</sup>; 2009 年 9 月对相同的区域开展了第 2 次调查, 结果表明水体的面积已增加到 35 万 m<sup>2</sup>, 主要与 2008 年开工的青藏公路改建工程有很大关系<sup>[6-7]</sup>。此外, 对北麓河盆地的一个热融湖塘近 7 年的监测表明, 该热融湖塘湖岸每年以 0.8 m 的速度后退, 面积增加率为 40~70 m<sup>2</sup>/a<sup>[3,5]</sup>。

热融湖塘的形成一方面对寒区环境产生较大影响, 造成多年冻土的局部融化甚至融穿; 同时, 热融湖塘的侧向热侵蚀也会导致周围多年冻土融化深度加深, 地温升高。另一方面热融湖塘的发育也对寒区工程产生较大影响, 尤其是侧向的热侵蚀可能会造成附近的路基产生不均匀沉陷, 造成路基坡脚滑塌<sup>[8-13]</sup>。然而, 不同组分和理化特性的热融湖塘对周围冻土环境及冻土工程的影响差异较大。一般而言, 高矿化度湖的湖底温度较低。2011 年 1 月在对青藏工程走廊沿线部分热融湖塘湖底温度监测时发现, 在一些咸水湖, 即便是水深达到 2 m 左右, 常年保持液态水, 但在冬季湖底的温度也达到 -1~-2℃<sup>[5]</sup>, 这类湖产生的水热过程也与淡水湖有较大差异。而且热融过程也能够快速且范围较大地影响周围土体及地表径流的化学特性, 当高矿化度的湖水在侧向地表径流或渗流进入路基下部后, 除了常规土体的冻胀外, 还可能产生盐胀, 从而对路基产生更加严重的破坏。

本文以青藏工程走廊楚玛尔河至风火山段为研究区域, 从北向南依次选取 19 个热融湖塘并取水样, 分析了研究区热融湖塘的水化学成分及其水体类型, 对研究区进行了不同水体划分。同时, 分析热融湖塘理化

**收稿日期:** 2013-05-15; **网络出版时间:** 2013-11-30

**网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20131130.1543.011.html>

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB026101); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所人才基金资助项目(Y251941001)

**作者简介:** 林战举(1975—), 男, 甘肃临洮人, 助理研究员, 博士, 主要从事寒区岩土工程与地质灾害及环境研究。

E-mail: zhanjulin@lzb.ac.cn

特性与区域气象、湖塘几何分布等关系,对于研究热融湖塘发育过程和预防热融湖塘所带来的工程病害和冻融灾害有重要意义,也对今后高原冻土区土壤及生态环境演化研究具有一定的指导意义。

## 1 研究区及研究方法

研究选取青藏工程走廊楚玛尔河至风火山段(图1),该区为工程走廊内热融湖塘主要发育区,区内海拔4 400~5 100 m,分布连续多年冻土。年平均气温低于 $-4^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温达 $-35\sim-45^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温达 $20^{\circ}\text{C}$ 以上,年降雨量为300~400 mm,年蒸发量为1 400~1 800 mm。大部分地区植被稀少,呈高山冻土荒漠景观,植被一般呈丘状、斑状、片状,稀疏状分布,覆盖小于50%,在部分相对平缓向阳地段植被盖度相对较高,可达70%~80%,以低矮针状、蒿草类植物为主。地表侵蚀强烈,土壤流失严重,土地沙化和荒漠化现象在多年冻土地区不断扩展和蔓延。

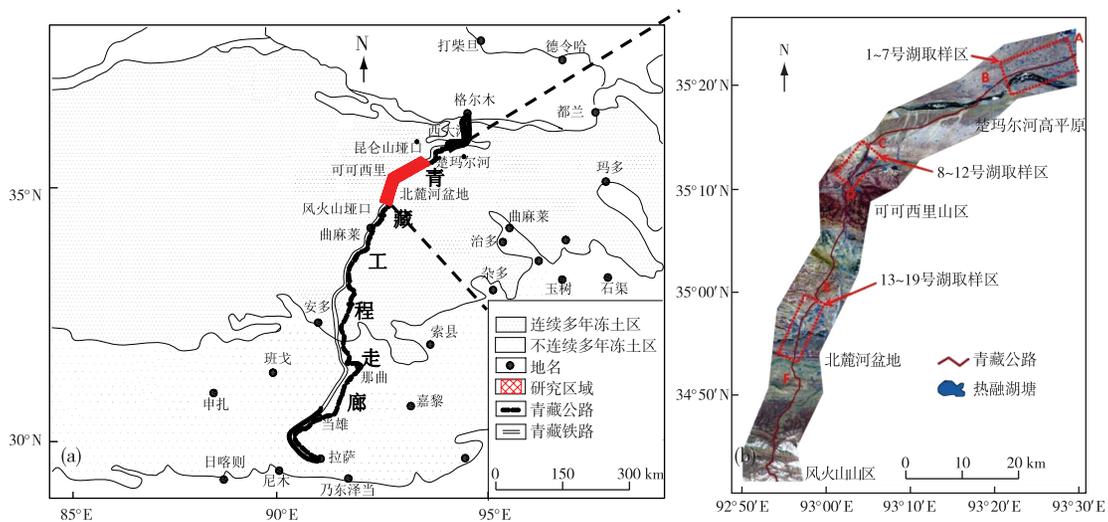


图1 研究区位置及热融湖塘分布

Fig. 1 Location of study and thermokarst lakes distribution

基于2010年8月的SPOT-5影像,在ArcGIS平台上对热融湖塘解译的结果表明,该区域以青藏公路为轴线,向两侧各拓展约5 km,热融湖塘的数量为2 610个,最大湖的面积约 $2.5\text{ km}^2$ ,最小湖的面积约 $100\text{ m}^2$ ,总集水面积约为 $15.4\text{ km}^2$ 。其中楚玛尔河高平原湖的数量为1 226个,湖面面积 $5.1\text{ km}^2$ ;可可西里湖的数量为574个,湖面面积 $1.8\text{ km}^2$ ;北麓河盆地湖的数量为783个,湖面面积 $8.2\text{ km}^2$ ;风火山山区湖的数量为27个,湖面面积为 $0.4\text{ km}^2$ <sup>[14]</sup>。

为了取样方便,取样热融湖塘主要选择靠近青藏公路两侧各1 km范围内,取样热融湖塘数量19个,其中楚玛尔河高平原7个,可可西里山区5个,北麓河盆地7个,从北向南依次编号为1~19,每个取样湖相距不超过1 km。水样用500 mL的聚乙烯塑料瓶盛装,取样前用硝酸溶液浸泡并用待装水样冲洗。取样时让水样缓缓流入采样容器,并立即盖好瓶塞,放入低温箱保存。取样完成后送冻土工程国家重点实验室理化分析室进行水体主要化学成分测定。取样热融湖塘除了可可西里一个湖(表1中编号9湖)颜色为浅褐色外,其余均为清澈透亮,呈淡绿色。取样完成后对湖塘深度、面积、形状等几何参数进行了调研。

研究区水系随季节不同有较大变化,甚至有些浅湖在枯水期或枯水年干涸。因此,水化学组分及水质受补给水量的影响,水化学类型发生季节变化。湖泊水化学类型的波动变化需要长期的观测和取样分析。本研究仅以本次取样化验数据进行分析讨论。

## 2 结果与讨论

### 2.1 主要结果

(1) 热融湖塘水化学成分分析 表 1 列出了 19 个取样热融湖塘的主要水化学成分, 从表 1 可以看出, 研究区热融湖塘水体主要阴离子为  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ ( $\text{HCO}_3^{2-}$ )、 $\text{SO}_4^{2-}$ , 其中楚玛尔河高平原和北麓河盆地的部分湖水含有  $\text{NO}_3^-$ ( $\text{NO}_2^-$ ) 离子, 且楚玛尔河高平原有 4 个湖  $\text{NO}_3^-$ ( $\text{NO}_2^-$ ) 离子的含量都非常高, 最高达到 10 188 mg/L; 阳离子主要为  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 。可见, 整个研究区热融湖塘水体的主要化学成分类型基本相同, 但是含量有较大差异。

表 1 研究区从北向南热融湖塘水化学成分测定结果

Table 1 Chemical composition of water body in thermokarst lakes from north to south in study regions

位置	湖塘编号	主要化学组分/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )							
		$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$ ( $\text{NO}_2^-$ )	$\text{CO}_3^{2-}$ ( $\text{HCO}_3^{2-}$ )	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$
楚玛尔河高平原	1	26.3	0	0(36.3)	13.8	11.0	0	3.5	19.4
	2	3.7	0(2 677.9)	33.6(207.9)	1 472.8	319.5	17.6	221.4	74.2
	3	2 895.8	0	68.1(179.3)	662.5	1 862.4	66.8	387.6	216.5
	4	29.5	18.5 (5 304.5)	93.2(135.1)	641.8	707.5	21.8	104.7	51.3
	5	4.0	0(4 302.3)	39.3(276.4)	2 206.4	476.7	31.7	297.6	111.5
	6	5.1	1.8 (10 188.0)	86.1(206.4)	1 278.3	1 245.9	117.3	144.9	66.0
	7	15 757.0	0	172.3(416.7)	4 130.5	7 092.6	189.3	2 940.6	57.0
可可西里山区	8	72.8	0	0(74.2)	4.8	40.5	4.9	19.8	18.7
	9	149.3	0	0(36.8)	22.2	112.1	4.3	56.1	13.8
	10	527.1	0	0(113.9)	112.4	330.0	7.5	67.5	44.4
	11	793.0	0	0(277.1)	265.0	481.6	8.7	79.3	61.7
	12	1 130.8	0	0(263.0)	168.6	564.3	15.3	125.9	75.2
	13	832.9	10.8	0(183.6)	73.0	133.3	4.6	39.1	21.7
北麓河盆地	14	558.7	0	0(166.9)	268.0	305.8	5.7	113.5	33.6
	15	874.7	0	0(233.6)	295.8	405.9	26.5	205.4	35.7
	16	325.2	0	0(89.4)	23.3	323.5	14.4	351.9	269.3
	17	546.6	7.1	0(201.7)	15.6	452.9	19.2	305.3	244.3
	18	295.0	0	0(161.0)	60.3	233.8	19.4	165.5	566.2
	19	1.6	59.2	0(18.3)	19.9	17.4	1.9	5.5	23.1

(2) 热融湖塘水矿化度分析 虽然水体中主要成分基本相同, 但含量不同却导致不同的矿化度。表 2 列出了 19 个取样热融湖塘的矿化度, 从表 2 可以看出, 楚玛尔河高平原的湖塘矿化度最高, 除了最北的第 1 个湖矿化度为 0.11 外, 其余 6 个湖矿化度为 5~31。说明该区域从北向南湖水矿化度逐渐升高, 湖水水质由淡水向咸水再到强咸水过渡; 可可西里山区湖塘矿化度最低, 为 0.2~2.3, 该区域大部分湖为淡水或弱咸水湖; 北麓河盆地除了最南的第 19 个湖矿化度为 0.15 外, 其余矿化度为 1~2, 水体为弱咸性或淡水, 从北向南湖水矿化度逐渐降低。

(3) 热融湖塘水相对密度分析 不同化学组分、不同矿化度导致不同水的相对密度, 表 2 列出了 19 个湖塘测定的相对密度。楚玛尔河高平原区湖的相对密度为 1.000~1.016; 可可西里湖的相对密度为 1.000~1.002; 北麓河盆地湖的相对密度为 1.000~1.002。把矿化度与相对密度之间的关系反映在图 2 中, 它们之间符合线性关系, 斜率为 0.005, 拟合  $R^2$  为 0.986 1, 矿化度与相对密度之间有很好的相关关系, 矿化度越高, 相对密度越大。

表 2 研究区从北向南热融湖塘水质测定结果

Table 2 Water quality in thermokarst lakes from north to south in study regions

位置	湖编号	矿化度/(g·L <sup>-1</sup> )	相对密度	水质类型	总硬度	水质状况	水源补给情况
楚玛尔河高平原	1	0.11	1.000	淡水	63	极软水	有
	2	5.03	1.003	咸水	1 093	极硬水	无
	3	6.35	1.003	咸水	2 130	极硬水	无
	4	7.12	1.004	咸水	557	极硬水	无
	5	7.76	1.005	咸水	1 498	极硬水	无
	6	13.35	1.007	强咸水	759	极硬水	无
	7	30.79	1.016	强咸水	12 194	极硬水	无
可可西里山区	8	0.23	1.000	淡水	128	软水	无
	9	0.40	1.000	淡水	264	中硬水	无
	10	1.20	1.001	弱咸水	388	硬水	无
	11	1.97	1.002	弱咸水	479	极硬水	无
	12	2.34	1.001	弱咸水	704	极硬水	有
	13	1.30	1.002	弱咸水	214	中硬水	有
北麓河盆地	14	1.46	1.001	弱咸水	549	极硬水	有
	15	2.07	1.001	弱咸水	931	极硬水	有
	16	1.40	1.001	弱咸水	2 115	极硬水	无
	17	1.79	1.001	弱咸水	1 862	极硬水	无
	18	1.50	1.001	弱咸水	2 094	极硬水	无
	19	0.15	1.000	淡水	80	软水	无

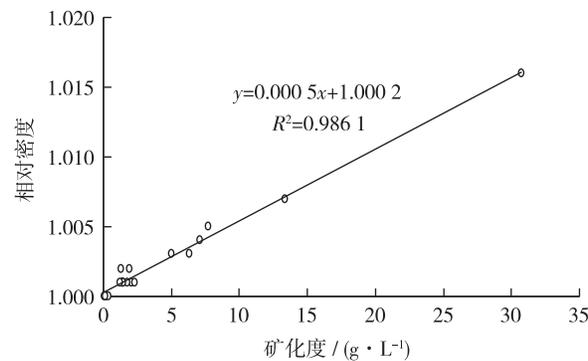


图 2 水体矿化度与相对密度之间的关系

Fig. 2 Relationship between the mineralization and relative density

(4) 热融湖塘水硬度分析 根据阿列金天然水分类<sup>[15]</sup>, 进行水质总硬度(以 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等离子为主)的计算(表 2)。研究区大部分热融湖塘水质硬度较高, 楚玛尔河高平原湖除了最北侧的第 1 个湖水为极软水外, 其余均为极硬水, 硬度均高于 500, 最高达到 12 194; 可可西里山区湖水硬度在 3 个区域最低, 中硬度以下的有 2 个湖, 最大硬度为 704; 北麓河盆地湖除了最南侧的第 19 个湖水为软水外, 其余均为中硬水或极硬水, 硬度最高达到 2 115。总体来说, 研究区域热融湖塘水以极硬水为主。

(5) 热融湖塘水化学类型分析 对水体化学类型的分类方案较多, 但采用离子当量的比值来进行分类的方法采用较多。下面采用简便的计算法——难溶盐法<sup>[16]</sup>, 对研究区热融湖塘水体化学类型进行分类。难溶盐法的计算公式如下:

$$K_a = \frac{N(\text{Ca}^{2+}) - [N(\text{CO}_3^{2-}) + N(\text{HCO}_3^-)]}{N(\text{SO}_4^{2-})}$$

$$K_b = \frac{[N(\text{Ca}^{2+}) + N(\text{Mg}^{2+})] - [N(\text{CO}_3^{2-}) + N(\text{HCO}_3^-)]}{N(\text{SO}_4^{2-})}$$

式中 当  $K_a \leq 0$  且  $K_b \leq 0$  时, 水体为碳酸盐型; 当  $K_a \leq 1$  且  $0 < K_b \leq 1$  时, 水体为硫酸钠亚型; 当  $K_a \leq 1$  且  $K_b > 1$  时, 水体为硫酸镁亚型;  $K_a > 1$  且  $K_b > 1$  时, 水体为氯化物型。经过计算, 研究区水体水化学类型见表 3。

根据表 3 的计算结果可以看出, 研究区热融湖塘水以碳酸盐型为主, 占 47%, 其次是硫酸钠亚型, 占 32%, 氯化物类占 16%。楚玛尔河高平原区湖以碳酸盐类和硫酸钠亚类型为主; 可可西里山区湖以碳酸盐类型为主, 只有 1 个湖为硫酸镁亚类; 北麓河盆地湖以氯化物类为主, 碳酸盐类和硫酸钠亚类型占 30% 左右。以上的分析表明研究区湖水的来源主要为冰雪融水和高含冰量多年冻土融水为主。

表 3 研究区水体水化学类型  
Table 3 Chemical type of water body in study regions

位置	湖塘编号	难溶盐系		水化学类型
		$K_a$	$K_b$	
楚玛尔河高平原	1	-1.226	-0.972	碳酸盐类
	2	-0.114	0.037	硫酸钠亚类
	3	-0.047	0.538	硫酸钠亚类
	4	-0.276	-0.113	碳酸盐类
	5	-0.093	0.042	硫酸钠亚类
	6	-0.177	-0.064	碳酸盐类
	7	-0.129	0.583	硫酸钠亚类
	8	-11.563	-7.438	碳酸盐类
可可西里山区	9	-1.036	1.491	硫酸镁亚类
	10	-0.618	-0.018	碳酸盐类
	11	-0.813	-0.514	碳酸盐类
	12	-1.114	-0.367	碳酸盐类
	13	-2.218	-1.682	碳酸盐类
	14	-0.497	-0.074	碳酸盐类
北麓河盆地	15	-0.669	0.025	硫酸钠亚类
	16	7.721	22.824	氯化物类
	17	2.731	22.301	氯化物类
	18	6.720	9.464	氯化物类
	19	0.241	0.518	硫酸钠亚类

(6) 热融湖塘水主要化学成分组成 根据表 1 中 19 个热融湖塘水主要组分含量, 其中淡水湖 4 个, 弱咸水湖 9 个, 咸水湖 4 个, 强咸水湖 2 个的主要组分含量取平均值见表 4。

表 4 不同水质主要化学组分含量及比值  
Table 4 Contents and ratio of main chemical constituent in the water with different quality in study regions

湖泊类型	阳离子								阴离子							
	$Na^+$		$K^+$		$Mg^{2+}$		$Ca^{2+}$		$Cl^-$		$NO_3^-(NO_2^-)$		$CO_3^{2-}(HCO_3^-)$		$SO_4^{2-}$	
	含量	比值	含量	比值	含量	比值	含量	比值	含量	比值	含量	比值	含量	比值	含量	比值
淡水湖	45.3	1.0	2.8	1.0	21.2	1.0	18.8	1.0	62.5	1.0	14.8	1.0	41.4	1.0	15.2	1.0
弱咸水湖	359.0	7.9	13.5	4.8	161.5	7.6	150.2	8.0	653.8	10.5	2.0	0.1	187.8	4.5	142.4	9.4
咸水湖	841.5	18.6	34.5	12.3	252.8	11.9	113.4	6.0	733.3	11.7	3075.8	207.8	258.2	6.2	1245.9	82.0
强咸水湖	4169.3	92.0	153.3	54.8	1542.8	72.8	61.5	3.3	7881.1	126.1	5094.9	344.3	440.8	10.6	2704.4	177.9

注: 离子含量的单位为 mg/L; 比值是各种离子在淡水湖、弱咸水湖、咸水湖、强咸水湖中含量的归一化表达。

研究区热融湖塘阳离子以  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  为主, 阴离子以  $Cl^-$ 、 $NO_3^-$  或  $NO_2^-$ 、 $CO_3^{2-}$  或  $HCO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  为主。从表 4 可以看出, 湖水中阳离子相对稳定, 而阴离子含量相差较大, 从而说明阳离子含量对水体的水化学性质影响不大, 起决定作用因素是水体中的阴离子含量。同一离子在淡水湖—弱咸水湖—咸水湖—强咸

水湖中的含量比例逐渐增大。这种变化表明湖水在由淡水经弱咸水、咸水向强咸水变化过程中, 主要组分的含量是累积增长的, 仅有  $\text{Ca}^{2+}$  离子含量略有下降态势。

## 2.2 讨论

### 2.2.1 热融湖塘水理化特性与区域环境

研究区为可可西里自然保护区的一个狭窄带状区域, 占青藏工程走廊长度仅约为 140 km, 区内分布高温高含冰量多年冻土。根据北麓河冻土研究基地 2003—2006 年的气象资料, 该区域年降水量为 368 mm, 蒸发量为 1 538 mm, 属蒸发大于补给的水量收支负平衡区。可见研究区热融湖塘水源补给并不是以大气降水为主要来源。

3 个研究亚区中楚玛尔河高平原境内有楚玛尔河流经, 可可西里山区湖泊主要集中在五道梁盆地, 亚区内没有河流流经, 北麓河盆地区内有北麓河、秀水河等河流。但本次研究取样尽可能避开有河流补给来源的湖, 表 2 中“水源补给情况”列中“有”只是指有小溪或冲沟水源补给。因此, 各热融湖塘水体相对独立。

研究区气候寒冷, 每年 7~9 月为暖季, 其余时间为冷季。冷季地表及活动层有不同程度的冻结, 地下径流相对较少。研究区大部分地区, 尤其是楚玛尔河高平原区, 地表植被较差, 地表沙化及侵蚀严重, 土壤蓄水能力较差, 地表径流也相对较少<sup>[17]</sup>。由此可见, 研究区热融湖塘水源补给以冻土或地下冰融化水为主。

从 2.1 节分析结果可以看出, 研究区虽然面积不大, 但不同亚区热融湖塘水化学类型及组分却有较大差别。湖泊的水化学组分具有区域性特点, 自然环境和区域土壤、岩石类型在很大程度上决定湖水的化学组分。例如楚玛尔河南侧, 湖塘水体矿化度剧增, 湖塘边缘和干涸小湖表层为盐土, 白色盐结皮连片。主要是该区域寒旱多风、蒸发量大, 在低洼的融化沉陷区, 高矿化度湖水在强烈的蒸发下, 为失水聚盐所形成。

### 2.2.2 热融湖塘水理化特性与湖分布特征关系

该研究区是青藏工程走廊主要的热融湖塘分布区, 热融湖塘分布的区域性特点非常明显。如图 1 所示, 热融湖塘并不是均匀的分布在 140 km 的带状区域, 而是片状集中分布。从青藏公路里程 K2950(图中 A 点)开始, 向南延伸至楚玛尔河大桥 K2990(图中 B 点), 全长约 40 km, 水以咸水到强咸水为主, 水质类型为极硬水。从湖的分布特点来看, 该区域湖的长轴方向基本为 NE 方向, 平均面积为 7 550 m<sup>2</sup>, 湖的外轮廓线是不规则的, 平均水深 70 cm, 有 2/3 的湖冬季冻结到湖底, 体现了数量多、面积大而浅的特点。结合到水化学类型, 由于该区域地势平坦, 湖较浅, 类似“碟状”的湖塘蒸发量大而导致矿化度增加<sup>[4,5]</sup>。

从青藏公路里程 K3000(图中 C 点)开始, 向南延伸至五道梁盆地南侧 K3010(图中 D 点), 全长约 10 km, 水以淡水到弱咸水为主, 水质类型为中硬水。从湖的分布特点来看, 该区域湖的长轴方向基本为 NE 或 NW 方向, 平均面积为 4 940 m<sup>2</sup>, 平均水深 180 cm, 有 13% 的湖冬季冻结到湖底, 体现了数量少、面积小而深的特点。结合到水化学类型, 由于该区域地形为丘陵盆地, 湖较深, 类似“桶状”的湖蒸发量小而导致矿化度降低<sup>[4,5]</sup>。

从青藏公路里程 K3030(图中 E 点)开始, 向南延伸至风火山脚下 K3060(图中 F 点), 全长约 30 km, 水以弱咸水到淡水为主, 水质类型为中硬水。从湖的分布特点来看, 该区域湖的长轴方向基本为 NEN 方向, 平均面积为 13 600 m<sup>2</sup>, 湖塘外轮廓分布较规则, 平均水深 138 cm, 有 10%~15% 的湖冬季冻结到湖底, 体现了数量多、面积大而较深的特点。结合到水化学类型, 该区域地形为丘陵盆地, 湖较深, 类似“碗状”的湖蒸发量介于其他 2 个亚区<sup>[4,5]</sup>。

## 3 结 论

以青藏工程走廊楚玛尔河至风火山段为研究区域, 分楚玛尔河高平原、可可西里山区和北麓河盆地 3 个研究亚区, 开展热融湖塘水理化特性分析。主要结论如下:

(1) 3 个研究亚区热融湖塘水理化特性差异较大, 最北端的楚玛尔河高平原地区湖塘矿化度较高, 水质

以咸水和强咸水为主,水的硬度较大,这与该区域湖塘"大而浅"的空间分布特征以及高蒸发量的气候特征有关。

(2) 处于中部和南部的可可西里山区和北麓河地区湖水矿化度相对较低,湖水以淡水或弱咸水为主,这与湖塘面积小而深的空间分布特征有关。

(3) 考虑热融湖塘与寒区环境及寒区工程的关系,要特别关注强咸水湖塘及所在的区域,开展这些湖塘对寒区环境的盐渍化危害以及对寒区工程的盐胀和冻胀破坏研究,具有重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] 邱国庆,刘经仁,刘洪绪,等.冻土学词典[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1994.(QIU Guoqing, LIU Jingren, LIU Hongxu, et al. Geocryological glossary [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1994. (in Chinese))
- [2] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000.(ZHOU Youwu, GUO Dongxin, QIU Guoqing, et al. Geocryology in China [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))
- [3] LIN Z J, NIU F J, XU Z Y, et al. Thermal regime of a thermokarst lake and its influence on permafrost, Beiluhe basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2010, 21: 315-324.
- [4] 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(3/4): 222-233.
- [5] 林战举.多年冻土区热喀斯特湖特征及其对冻土环境与工程的影响研究[D].北京:中国科学院研究生院,2011.(LIN Zhanju. The research of thermokarst lake characteristics and its influence on the permafrost environmental and engineering in permafrost regions [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese))
- [6] NIU F J, XU J, LIN Z J, et al. Engineering activity induced environmental hazards in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau [C]//DOUGLAS L K, KENNETH M H. Proceedings of Ninth International Conference on Permafrost. Fairbanks: University of Alaska Fairbanks, 2008: 1287-1292.
- [7] LIN Z J, NIU F J, LUO J, et al. Changes in permafrost environments caused by the Qinghai-Tibet Highway construction and maintenance [J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18: 1454-1464.
- [8] LING F, ZHANG T J. Numerical simulation of permafrost thermal regime and talik development under shallow thaw lakes on the Alaskan Arctic Coastal Plain [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(16): 26-36.
- [9] 林战举,牛富俊,葛建军,等.青藏铁路北麓河地区典型热喀斯特湖变化特征及其对冻土热状况的影响[J].冰川冻土, 2010, 32(2): 341-349. (LIN Zhanju, NIU Fujun, GE Jianjun, et al. Variation characteristics of thaw lakes in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau and its influence on the thermal state of permafrost [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 341-349. (in Chinese))
- [10] LIN Z J, NIU F J, LIU H, et al. Hydrothermal processes of alpine tundra lakes, Beiluhe basin, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65: 446-455.
- [11] WHITE D, HINZMA L, ALESSA L, et al. The arctic freshwater system: Changes and impacts [J]. Journal of Geophysical Research, 112 (G04s54). [doi: 10.1029/2006 JG000353]
- [12] HINZMAN L D, BETTEZ N D, BOLTON W R, et al. Evidence and implications of recent climate change in Northern Alaska and other Arctic Regions [J]. Climatic Change, 2005, 72: 251-298.
- [13] LUNARDINI V J. Climatic warming and the degradation of warm permafrost [J]. Permafrost Periglacial Processes, 1996, 7: 311-320.
- [14] 鲁嘉濠.青藏铁路沿线区域热喀斯特湖易发程度评价研究[D].北京:中国科学院研究生院,2012.(LU Jiahao. Evaluation research of prone degree of the thermokarst lake along Qinghai-Tibet Railway [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese))
- [15] 阿列金 O A. 水化学[M].北京:水利电力出版社,1958.(ARLIEKIN O A, Water chemistry [M]. Beijing: Water Power Press, 1958. (in Chinese))
- [16] 姚宁钢.卤水类型判别的简便方法:难溶盐法[J].湖泊科学,1990(2): 71-73.(YAO Ninggang. The simple method for differentiating brine type: Undissolved salt law [J]. Journal of Lake Sciences, 1990 (2): 71-73. (in Chinese))

- [17] 李炳元, 顾国安, 李树德. 可可西里综合科学考察系列丛书: 青海可可西里地区自然环境[M]. 北京: 科学出版社, 1996. (LI Bingyuan, GU Guo'an, LI Shude. The series of the comprehensive scientific expedition to the Hoh Xil region-physical environment of Hoh Xil region, Qinghai [M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese))

## Analysis on physical and chemical properties of water in thermokarst lakes along Qinghai-Tibet engineering corridor\*

LIN Zhanju<sup>1</sup>, NIU Fujun<sup>1</sup>, LUO Jing<sup>1</sup>, YIN Guo'an<sup>1</sup>, LIU Minghao<sup>1</sup>, CHRIS Burn<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Carleton University, Ottawa, K1S 5B6, Canada)

**Abstract:** Formation and development of thermokarst lakes have great influence on the cold region environment, and its lateral heat erosion can cause the embankment instability in permafrost regions. However, lake water with different physical and chemical composition has obviously different impact on cold region environment and permafrost engineering. In order to understand the chemical properties of thermokarst lakes and find out the relationship between chemical properties and their distribution along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor, a corridor from Chumaerhe high plateau to Fenghuoshan mountain passing along the Qinghai-Tibet Highway was selected. Our study area included three sub-regions, the Chumaerhe high plateau, Hoh Xil hill region, and Beilu River basin. Nineteen thermokarst lakes along the north-south direction were observed separately for its depth, area, and shape and lake water was sampled and major cations and anions were analyzed at the State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Chinese Academy of Sciences. The relationship between the physical and chemical properties of the 19 thermokarst lakes and the regional environment and thermokarst lakes distribution were studied. The results showed an obvious difference in chemical properties of the thermokarst lakes at these three sub-regions. For example, salinity of the thermokarst lakes in Chumaerhe high plateau gradually increases from north to south and the lake water belongs to saline or hypersaline water. This may be due to the lakes' spatial configuration with the big area and shallow depth, the cold and windy weather, and the high evaporation. In contrast, the salinity of lakes in Hoh Xil hill region and Beilu River basin is lower than those in Chumaerhe high plateau, and the lake water is fresh or slightly saline. The lakes at these two sub-regions are deep and the terrain is hills or basin, which reduces their evaporation. The study provided guidance for the disease control of permafrost embankment and the future engineering planning and design along this corridor.

**Key words:** Qinghai-Tibet engineering corridor; permafrost; thermokarst lake; chemical characteristics

---

\* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2012CB026101).