

文章编号: 1008-2786-(2017)3-266-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000221

怒江流域中上游地表冻融特征及时空分布

罗 贤 季 璇 李运刚 黄江成

(云南大学 亚洲国际河流中心/云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室,云南 昆明 650091)

摘 要: 冻土水文过程的复杂性使其分析及模拟较为困难,在研究青藏高原冻土退化水文效应的过程中,需要明确流域内土壤冻结和融化状态的时空变化特征。利用被动微波遥感数据反演获得的地表冻融状态,系统地辨识怒江流域中上游地表冻融状态时空变异特征。结果表明:1. 怒江流域贡山水文站以上年平均地表冻结天数 > 270 d 的区域占研究区总面积的 32.0%,而 180~270 d 的则约占 62.3%,海拔高度每升高 1 000 m,年地表冻结天数平均增长约 62 d;2. 研究区不同年份持续冻结的开始和结束时间差异较大,融化-冻结阶段的 9—10 月平均气温与阶段末 10 月地表冻结面积的相关系数为 -0.80,而冻结-融化阶段的 4—6 月平均气温与阶段末 6 月地表冻结面积的相关系数则为 -0.87,均在 0.01 水平上显著负相关,研究区气温的年际波动导致地表冻结面积、冻结日期、融化日期及冻结持续时间等的年际变化;3. 被动微波遥感反演获得的高时间分辨率冻融状态数据,可为气候变化背景下,缺资料高原山地流域大范围地表冻融状态变化分析、流域尺度水文过程模拟等提供良好的数据支撑。

关键词: 地表冻融状态;被动微波遥感;气候变化;怒江流域

中图分类号: P933

文献标志码: A

由于特殊的地理环境,青藏高原上广泛发育着多年冻土和季节冻土^[1]。在全球变暖背景下,青藏高原冻土发生了较大的变化,部分多年冻土转变为季节冻土,季节冻土则呈现冻结日期推迟、融化日期提前,冻结持续时间缩短、最大冻结深度变浅等趋势^[2-4]。近 40 年来,青藏高原的多年冻土面积已由 $1.50 \times 10^6 \text{ km}^2$ 缩减为 $1.26 \times 10^6 \text{ km}^2$,据推测,在未来几十年,青藏高原冻土退化仍会保持甚至加速^[5]。

冻土层的存在改变了土壤水分运动规律及土壤含水量,冻土的不透水性、蓄水调节作用及抑制蒸发作用,使冻结期流域的水文过程较无冻期或无冻地区有很大的差异^[6-9]。冻土水文过程的复杂性给流域水文模拟带来了较大困难,在研究冻土退化水文效应的过程中,需要明确流域内土壤冻结和融化状

态的时空变化特征,使其分析及模拟结果更加科学和准确^[10-11]。

当前,针对青藏高原土壤表面冻融过程的研究主要在一些局部地区开展,如青藏铁路和公路沿线^[12]。传统冻土观测主要依靠钻孔及定位观测站进行,由于观测点分布稀疏,很难满足水文过程研究对于冻融状态数据的需求;另一方面,在融冻及封冻开始阶段,地表冻融状态变化频繁,需要高时间分辨率数据进行分析 and 计算。冻土分布变化资料的缺乏,使冻土退化的水文效应研究受到了制约^[13]。微波遥感为解决上述问题提供了新的工具,冻/融土壤间显著的介电特性差异,使微波对于地表冻融状态十分敏感。被动微波由于具有高时间分辨率,可用于大范围地表逐日冻融状态的长期监测^[14-15]。

近 40 年来,怒江流域西藏段具有明显的增暖趋

收稿日期(Received date): 2016-02-01; 修回日期(Accepted date): 2016-06-29。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41601026); 喜马拉雅地区气候变化适应性研究项目(挪威外交部和瑞典国际发展署) [National Natural Science Foundation of China (41601026); the Himalayan Climate Change Adaptation Program (the Ministry of Foreign Affairs, Norway and Swedish International Development Agency)]

作者简介(Biography): 罗贤(1985-),男,云南玉溪人,博士,助理研究员,主要从事水文水资源研究。[Luo Xian, male, born in 1985, Yuxi of Yunnan province, Ph. D., research associate, mainly engaged in hydrology and water resources.] E-mail: luoxian@ynu.edu.cn

势,年平均气温的增长速率为 $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其中怒江上游的增温趋势明显高于全国其他区域^[16-17],河源区那曲站冬季平均气温增幅达到了 $0.81^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[18]。受此影响,近50年来,怒江中上游最大冻土深度有显著变浅的趋势,其中上游那曲站的减幅为 $-21.3\text{ cm}/10\text{ a}$,高于西藏其他观测站点^[19]。为此,本文拟利用被动微波遥感数据反演获得地表冻融状态,借助于地形、气温数据,系统地辨识怒江流域中上游地表冻融状态时空分布及变化特征,并就海拔高度、气温对冻融状态的影响进行探讨,从而为冻土退化水文效应研究提供参考依据。

1 研究区概况

怒江发源于西藏唐古拉山南麓,出境后称萨尔温江,在缅甸境内汇入印度洋,干流长 $3\,673\text{ km}$,流域面积 32.5 万 km^2 。在我国境内,怒江干流长 $2\,013\text{ km}$,流域面积 13.6 万 km^2 ^[20]。流域位于 $91^{\circ}13'\sim 100^{\circ}15'\text{E}$, $23^{\circ}5'\sim 32^{\circ}48'\text{N}$,地势总体呈西北高、东南低。嘉玉桥以上为怒江流域上游,处于青藏高原东南部;中游从嘉玉桥至云南泸水,处于青藏高原向云贵高原过渡的横断山脉区^[21-22]。怒江在西藏的河长为 $1\,393\text{ km}$,占其在我国境内全长的69%;流域面积为 10.3 万 km^2 ,占其在我国境内流域面积的75%^[23-24]。

由于怒江流域贡山水文站以下大部分地区海拔低、气温高,因此本研究主要分析贡山站以上流域地表冻融状态时空分布特性。研究区流域面积约 10.7 万 km^2 ,其中大部分位于西藏自治区。

2 数据

2.1 地表冻融分类数据

研究采用的地表冻结和融化分类数据来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc. westgis. ac. cn)的中国长序列地表冻融数据集。该数据集采用SSM/I(1987—2009年)逐日亮温数据,由双指标冻融判别算法进行分类,将中国大陆地区主体部分划分为冻结地表、融化地表、沙漠和水体等4种类型,空间分辨率为 25.07 km 。

SSM/I传感器为条带扫描,因此源数据中分类结果为条带方式,未实现空间连续覆盖。本研究将

源数据进行合成处理,对于缺数据的栅格单元,采用时间上最近的分类数据作为其值,以获得空间连续的地表冻融分类结果。

利用贡山水文站以上怒江流域边界,提取研究区逐日地表冻融状态数据,获得怒江流域中上游贡山站以上逐日地表冻融状态。由于源数据中1987年及2009年数据并不完整,研究仅探讨1988—2008年地表冻融状态的变化。

2.2 气象数据

根据研究区范围,采用怒江流域中上游及周边的17个气象站的气温数据,其中那曲、索县、比如、丁青、洛隆、八宿、左贡及贡山站位于怒江流域内,安多、当雄、嘉黎、类乌齐、昌都、波密、芒康、察隅及德钦站则地处流域周边地区(气温数据来源于中国气象科学数据共享服务网,http://cdc. cma. gov. cn/home. do),各站位置如图1所示。上述17个气象站的高程介于 $1\,583\sim 4\,800\text{ m}$,其中的12个站气温数据覆盖整个研究时段,4个站始于1991年,1个站开始自1992年。由于研究区地形复杂,借助于地形数据,采用协同克里格方法进行插值,获得1988—2008年研究区各月平均气温。

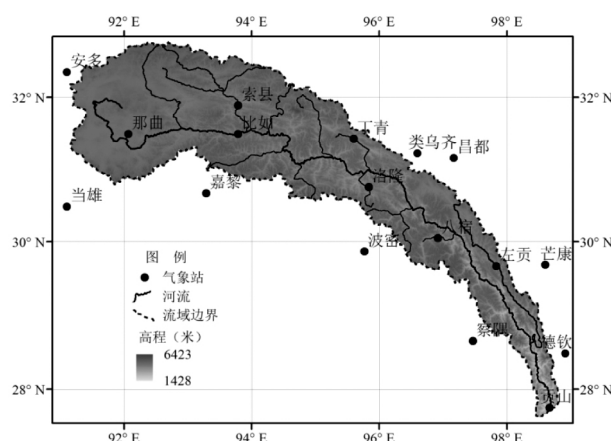


图1 研究区地形及气象站分布图

Fig. 1 Terrain and the distribution of meteorological stations in the study area

3 地表冻融状态空间分布及变化特征分析

3.1 地表冻融状态的空间分布特征

3.1.1 地表冻结天数

利用研究区地表冻融分类数据,统计各区域每年地表处于冻结状态的平均天数,并据此将研究区

划分为4种类型:0~90 d(约少于3个月);90~180 d(约在3至6个月);180~270 d(约在6至9个月);270~366 d(约超过9个月),其结果如图2所示。从整体上看,怒江流域贡山水文站以上大部分地区年平均地表冻结天数超过180 d。其中,年平均地表冻结天数介于180~270 d的地区为6.7万 km^2 ,占研究区总面积的62.3%;冻结天数>270 d的地区为3.4万 km^2 ,所占比例为32.0%。从冻结天数的空间分布来看,地表冻结天数超过270 d的地区大部分位于怒江流域上游,分布于卡曲、索曲、热玛曲、姐曲及嘎曲等发源自唐古拉山及念青唐古拉山的支流流域。

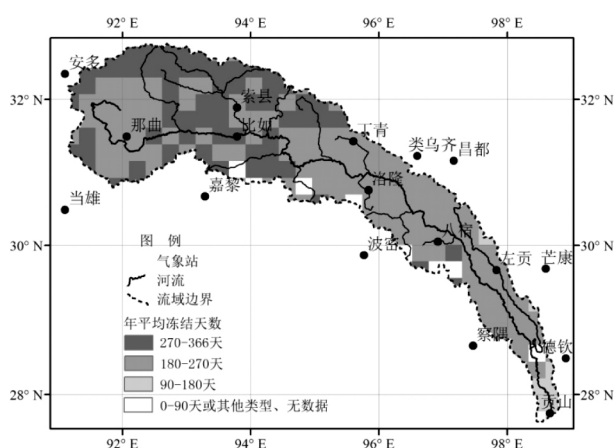


图2 研究区年平均地表冻结天数分布图

Fig. 2 Distribution of mean annual surface freezing days in the study area

3.1.2 地表持续冻结状态开始和结束时间

将每年各个栅格由融化状态转变为冻结状态,且其冻结状态持续到次年的日期,定义为持续冻结状态的开始时间;将每年各个栅格首次由冻结状态转变为融化状态的日期,定义为持续冻结状态的结束时间。利用被动微波遥感反演得到的逐日地表冻融状态,分别分析研究区持续冻结的开始及结束时间,其结果如图3所示。研究区地表持续冻结的开始时间主要集中于9月和10月,其中39.5%的地区地表持续冻结开始于9月,集中于流域上游高海拔地区,而始于10月的地区面积所占比例为51.3%,主要分布于流域上游那曲县周边地区及流域中游;另一方面,研究区地表持续冻结结束时间主要在4月之后,其中结束于6月及之后的地区占总面积的25.5%。

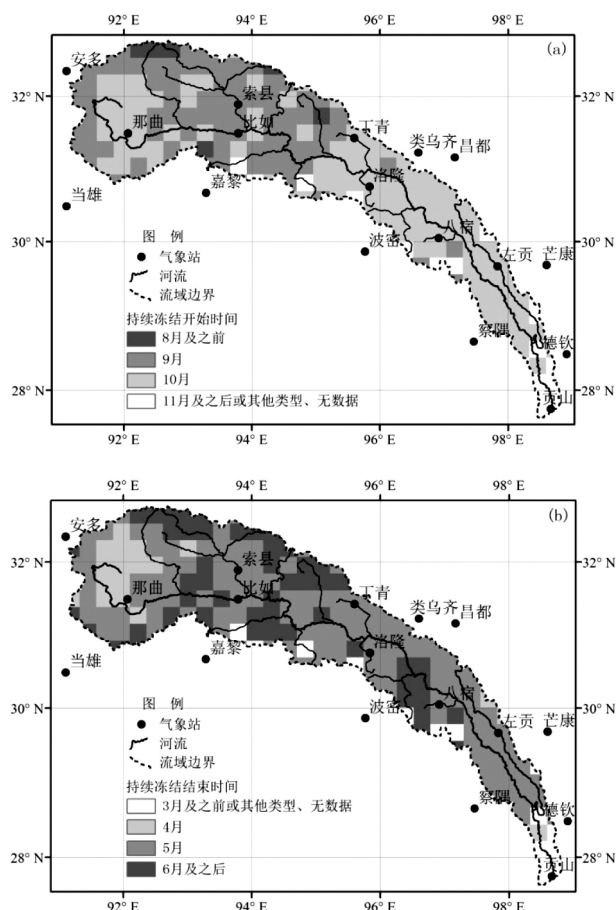


图3 研究区地表持续冻结开始(a)及结束(b)时间

Fig. 3 The start (a) and end (b) time of continuous freezing status in the study area

3.2 地表冻融状态空间变化特征

研究区年平均地表冻结天数与海拔高度的关系如图4所示,二者的相关系数为0.60,在0.01水平上显著相关。从整体上看,研究区海拔高度每升高1000 m,年地表冻结天数平均增长约62 d。

图5为研究区地表持续冻结开始及结束时间与海拔高度的关系。研究区地表持续冻结开始的年积日与海拔高度的相关系数为-0.61,在0.01水平上显著负相关;持续冻结结束的年积日与海拔高度的相关系数则为0.40,在0.01水平上显著相关。从整体上看,海拔高度越高,地表持续冻结的开始时间越早,而结束时间则越晚。例如,海拔高度在4000~4500 m的地区,地表持续冻结开始时间主要集中于9月下旬至10月,而海拔高度>5000 m的地区,地表持续冻结则多开始于8月下旬至10月上旬;对于地表持续冻结结束时间,海拔高度介于4500~5000 m的地区,地表持续冻结大部分于4月下旬至6月中旬结束,而海拔高度>5000 m的地

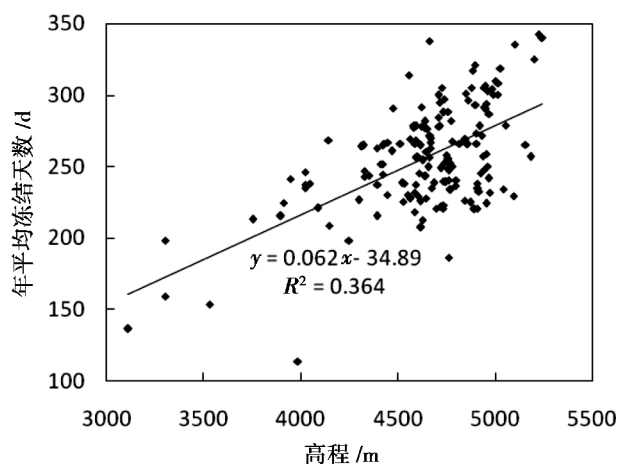


图4 研究区年平均地表冻结天数与海拔高度的关系

Fig. 4 The relationship between mean annual surface freezing days and elevation in the study area

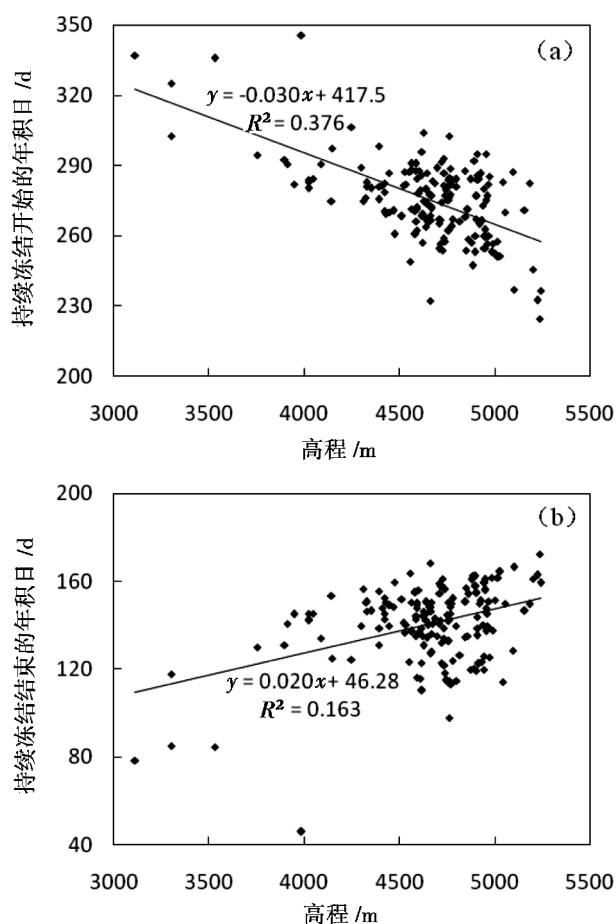


图5 研究区地表持续冻结开始(a)及结束(b)时间与海拔高度的关系

Fig. 5 The relationship between start (a) and end (b) time of continuous freezing status and elevation in the study area

区 则主要集中于5月下旬至6月。

除海拔高度外,对研究区年平均地表冻结天数

与年平均气温的关系进行分析,如图6所示。研究区年平均地表冻结天数与年平均气温的相关系数为-0.61,在0.01水平上显著负相关,冻结天数随年平均气温的增高而减少。

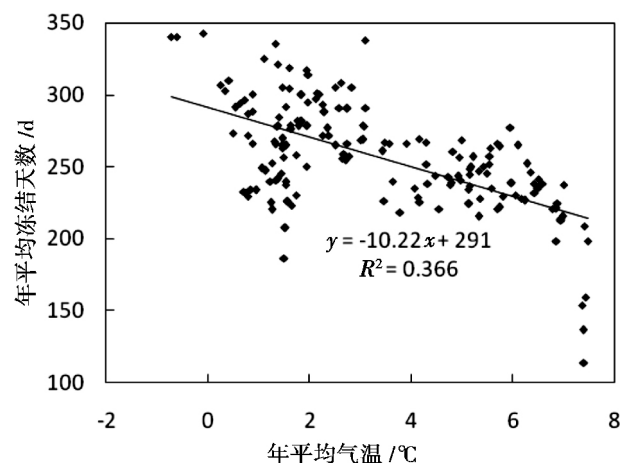


图6 研究区年平均地表冻结天数与年平均气温的关系

Fig. 6 The relationship between mean annual surface freezing days and air temperature in the study area

综合研究区海拔高度及气温对地表冻结天数的影响来看,海拔高度为4 000~4 500 m的区域,年平均气温多介于3.0~7.0℃,年平均地表冻结天数大部分在210~270 d;而海拔高度4 500~5 000 m的区域,年平均气温为0.0~7.0℃,年平均地表冻结天数大部分在210~320 d;另一方面,研究区年平均气温低于0.0℃的区域共有3个,年平均气温分别为-0.7、-0.6及-0.1℃,对应的平均海拔高度依次为5 241 m、5 237 m及5 225 m,为研究区海拔最高的3个区域,其年平均地表冻结天数分别为340.3 d、340.0 d及342.8 d,高于其余区域。海拔高度是青藏高原气温最显著的影响因素^[25],研究区温度随海拔变化使地表冻结天数分布具有明显的垂直分带性。

根据已有研究,怒江流域上游北边的唐古拉山南坡多年冻土下界高度大约在4 600~4 700 m,南边的念青唐古拉山则大约位于4 800~5 000 m。怒江中游所处的横断山区,多年冻土主要分布于高海拔山地上,呈岛状分布,其下界在4 600~4 900 m,由北往南逐渐升高^[25]。研究区年平均地表冻结天数超过300 d的区域,其平均海拔高度多在4 800 m以上,与已有成果中该区多年冻土分布区的下界高度较为接近。另一方面,在我国西部高山、高原地区,多年冻土带下界大致与年平均气温-3~-2℃

线相当^[25],研究区几个温度最低的区域年平均气温略高于此温度,其地表冻结状态接近于全年冻结。

4 地表冻融状态时间分布及变化特征

4.1 地表冻融状态的时间分布特征

研究区各月地表冻结面积的变化如图7所示。从冻融状态变化过程来看,11月至次年3月,研究区大部分区域地表处于冻结状态;4月,逐步进入融化阶段,至7月冻结面积最小,7月多年平均地表冻结面积为1.1万km²;9月开始,逐渐进入冻结状态,至11月,大部分区域地表基本冻结。

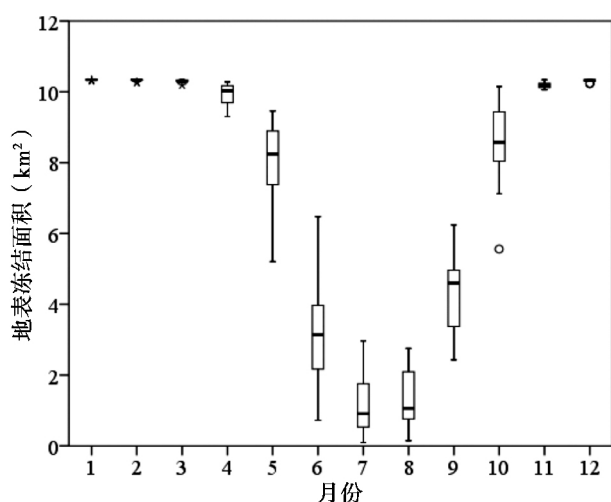


图7 研究区各月地表冻结面积盒须图(1988—2008年)

Fig. 7 Box-plot of monthly surface freezing area in the study area (1988—2008)

从地表冻结面积的年际变化来看,11月至次年3月,即封冻阶段,研究区大部分地区地表均为冻结状态,冻结面积年际变化不大;而融化—冻结阶段的9—10月,以及冻结—融化阶段的4—6月,冻结面积的年际差异较大,例如,在1988—2008年的21年中,研究区6月的平均地表冻结面积为3.1万km²,6月平均地表冻结面积高于4.0万km²的有4年,同时低于2.0万km²的则有5年。

4.2 气温对地表冻融状态变化的影响

4.2.1 气温年内变化特征

研究区1988~2008年各月平均气温如图8所示。对于大部分年份,研究区11月至次年3月平均气温在0.0℃以下,其中1月气温最低,多年平均气温约为-6.7℃;7月和8月气温最高,分别达到12.1℃及11.5℃。

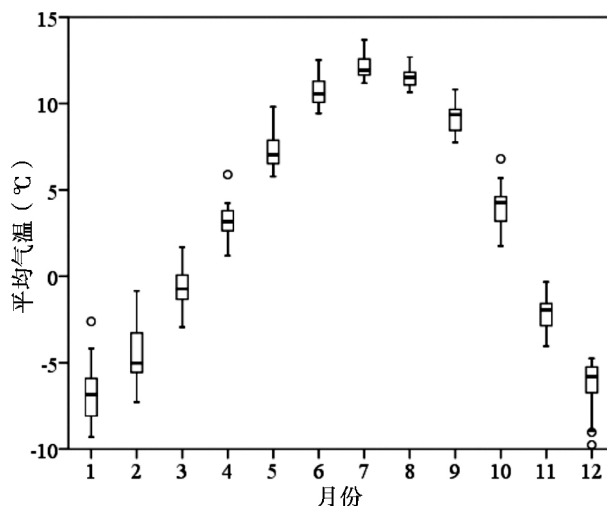


图8 研究区各月平均气温盒须图(1988—2008年)

Fig. 8 Box-plot of monthly air temperature in the study area (1988—2008)

4.2.2 气温年际变化对冻融循环的影响

根据前面的分析,研究区融化—冻结阶段的9—10月,以及冻结—融化阶段的4—6月,冻结面积的年际变化较为明显。为了探讨上述两个阶段地表冻结面积与气温年际变化的关系,分别分析融化—冻结阶段9—10月平均气温与阶段末10月地表冻结面积的关系,以及冻结—融化阶段4—6月平均气温与阶段末6月地表冻结面积的关系,见图9及图10。怒江流域中上游9—10月平均气温与10月地表冻结面积的相关系数为-0.80,而4—6月平均气温与6月地表冻结面积的相关系数则为-0.87,均在0.01水平上显著负相关。融化—冻结

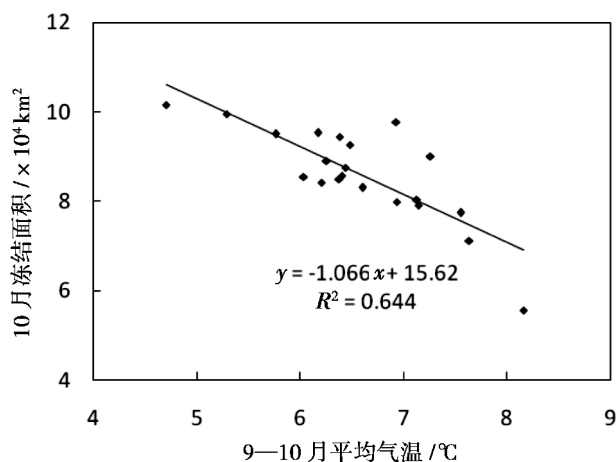


图9 研究区9—10月平均气温与10月地表冻结面积的关系

Fig. 9 The relationship between average air temperature (September and October) and surface freezing area (October) in the study area

阶段以及冻结—融化阶段的气温年际波动,导致了地表冻结面积、冻结日期、融化日期及冻结持续时间的年际变化。

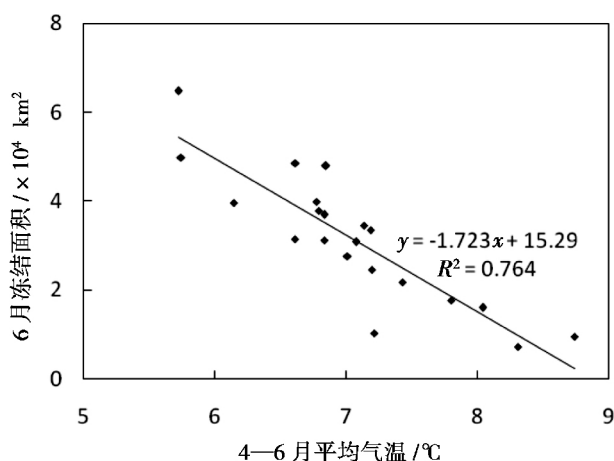


图10 研究区4—6月平均气温与6月地表冻结面积的关系

Fig. 10 The relationship between average air temperature (April to June) and surface freezing area (June) in the study area

气候变暖对青藏高原地表土壤的冻融循环造成影响^[4]。怒江中上游近年来增温明显^[16],各年持续冻结开始及结束时间、平均冻结天数也有较大差异。例如,1990—1999年,研究区年平均气温为3.0℃,持续冻结开始及结束的平均年积日分别为270.6及143.1日,地表冻结天数为262.7d;而在2000—2008年,研究区年平均气温为3.5℃,较之前的10年高0.5℃,而持续冻结开始及结束的平均年积日依次为280.7d及136.5d,地表冻结天数为246.7d,较1990s持续冻结偏晚,解冻偏早,冻结天数则较此前短16.0d。

5 结论

1. 通过分析被动微波遥感数据反演得到的地表冻融状态,怒江流域贡山水文站以上大部分地区年平均地表冻结天数超过180d,其中>270d的区域占研究区总面积的32.0%,而在180~270d的则约占62.3%。

2. 怒江流域贡山水文站以上地区年平均地表冻结天数与海拔高度呈显著相关关系,海拔高度每升高1000m,年地表冻结天数平均增长约62d,年平均地表冻结天数超过300d的区域,海拔高度>4800m;另一方面,研究区年平均地表冻结天数与年平均气温呈显著负相关关系,年平均地表冻结天

数>270d的区域,年平均气温基本都<3.1℃。

3. 研究区不同年份持续冻结的开始和结束时间差异较大。融化—冻结阶段9—10月的平均气温与阶段末10月地表冻结面积的相关系数为-0.80,而冻结—融化阶段4—6月的平均气温与阶段末6月地表冻结面积的相关系数则为-0.87,均在0.01水平上显著负相关。研究区气温的年际波动导致了冻结面积、冻结日期、融化日期及冻结持续时间等的年际变化。

4. SSM/I逐日亮温数据反演获得的地表冻融状况数据空间分辨率较粗,仅能反映约625km²范围内的总体信息。研究区部分区域尤其是怒江中游高山峡谷地区地形起伏较大,地表冻融状态精度可能会受到一些影响。但总的来说,高时间分辨率的被动微波遥感数据,可为缺资料高原山地流域大范围地表冻融状态变化分析、流域尺度水文过程模拟等提供良好的数据支撑。

参考文献(References)

- [1] 杨梅学,姚檀栋, Nozomu H, 等. 青藏高原表层土壤的日冻融循环[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1974-1976 [YANG Meixue, YAO Tandong, GOU Xiaohua, et al. Diurnal freeze/thaw cycles of the ground surface on the Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(1): 136-139]
- [2] WU Qinghai, ZHANG Tingjun. Recent permafrost warming on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: D13108
- [3] KANG Shichang, XU Yanwei, YOU Qinglong, et al. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau [J]. Environmental Research Letters, 2010, 5(1): 015101
- [4] LI Xin, JIN Rui, PAN Xiaoduo, et al. Changes in the near-surface soil freeze-thaw cycle on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 17: 33-42
- [5] 程国栋, 金会军. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 1-11 [CHENG Guodong, JIN Huijun. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau and it changes [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 1-11]
- [6] 陈仁升, 康尔泗, 吉喜斌, 等. 黑河源区高山草甸的冻土及水文过程初步研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 387-396 [CHEN Rensheng, KANG Ersi, JI Xibin, et al. Preliminary study of the hydrological processes in the alpine meadow and permafrost regions at the headwaters of Heihe River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 387-396]
- [7] 孙颖娜, 付强, 姜宁, 等. 寒区冻土水文模拟模型研究若干进展[J]. 水文, 2008, 28(4): 1-4 [SUN Yingna, FU Qiang, JIANG Ning, et al. Research on hydrological frozen soil simulation

- model for cold area [J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(4): 1–4]
- [8] WANG Genxu, HU Hongchang, LI Taibin. The influence of freeze-thaw cycles of active soil layer on surface runoff in a permafrost watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 375: 438–449
- [9] 阳勇, 陈仁升. 冻土水文研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 711–723 [YANG Yong, CHEN Rensheng. Research review on hydrology in the permafrost and seasonal frozen regions [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(7): 711–723]
- [10] CHRISTOPHER Spence, AMANDA Burke. Estimates of Canadian Arctic Archipelago runoff from observed hydrometric data [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 362: 247–259
- [11] 王晓巍, 付强, 丁辉, 等. 季节性冻土区水文特性及模型研究进展 [J]. *冰川冻土*, 2009, 31(5): 953–959 [WANG Xiaowei, FU Qiang, DING Hui, et al. Advances in researches on hydrologic features and their modeling in seasonal frozen soil regions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 953–959]
- [12] 王康, 张廷军. 中国 1956—2006 年地表土壤冻结天数时空分布及其变化特征 [J]. *地球科学进展*, 2013, 28(11): 1269–1275 [WANG Kang, ZHANG Tingjun. Spatial and temporal distribution and variations in the near-surface soil freezing days across China, 1956–2006 [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(11): 1269–1275]
- [13] 叶柏生, 丁永建, 焦克勤, 等. 我国寒区径流对气候变暖的响应 [J]. *第四纪研究*, 2012, 32(1): 103–110 [YE Baisheng, DING Yongjian, JIAO Keqin, et al. The response of river discharge to climate warming in cold region over China [J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(1): 103–110]
- [14] 晋锐, 李新, 车涛. SSM/I 监测地表冻融状态的决策树算法 [J]. *遥感学报*, 2009, 13(1): 152–161 [JIN Rui, LI Xin, CHE Tao. A decision tree algorithm for surface freeze/thaw classification using SSM/I [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(1): 152–161]
- [15] 张廷军, 晋锐, 高峰. 冻土遥感研究进展: 被动微波遥感 [J]. *地球科学进展*, 2009, 24(10): 1073–1083 [ZHANG Tingjun, JIN Rui, GAO Feng. Overview of the satellite remote sensing of frozen ground: passive microwave sensors [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(10): 1073–1083]
- [16] 杜军, 翁海卿, 袁雷, 等. 近 40 年西藏怒江河谷盆地的气候特征及变化趋势 [J]. *地理学报*, 2009, 64(5): 581–591 [DU Jun, WENG Haiqing, YUAN Lei, et al. The climate characteristics and changing trends over the Nujiang River Basin in Tibet from 1971 to 2008 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 581–591]
- [17] 樊辉, 何大明. 怒江流域气候特征及其变化趋势 [J]. *地理学报*, 2012, 67(5): 621–630 [FAN Hui, HE Daming. Regional climate and its change in the Nujiang River Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 621–630]
- [18] 罗贤, 何大明, 季璇, 等. 近 50 年怒江流域中上游枯季径流变化及其对气候变化的响应 [J]. *地理科学*, 2016, 36(1): 107–113 [LUO Xian, HE Daming, JI Xuan, et al. Low flow variations in the middle and upper Nujiang River Basin and possible responds to climate change in recent 50 years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(1): 107–113]
- [19] 杜军, 建军, 洪健昌, 等. 1961–2010 年西藏季节性冻土对气候变化的响应 [J]. *冰川冻土*, 2012, 34(3): 512–521 [DU Jun, JIAN Jun, HONG Jianchang, et al. Response of seasonal frozen soil to climate change on Tibet Region from 1961 to 2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(3): 512–521]
- [20] 刘昌明, 周成虎, 于静洁, 等. 中国水文地理 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 828–829 [LIU Changming, ZHOU Chenghu, YU Jingjie, et al. *China Hydro-geography* [M]. Beijing: Science Press, 2014: 828–829]
- [21] 陆孝平, 富曾慈. 中国主要江河水系要览 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 128–131 [LU Xiaoping, FU Zengci. *China's major river systems* [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010: 128–131]
- [22] 刘冬英, 沈燕舟, 王政祥. 怒江流域水资源特性分析 [J]. *人民长江*, 2008, 39(17): 64–66 [LIU Dongying, SHEN Yanzhou, WANG Zhengxiang. Analysis of water resource characteristics in Nujiang River Basin [J]. *Yangtze River*, 2008, 39(17): 64–66]
- [23] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏河流与湖泊 [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 24–26 [Comprehensive Scientific Expedition of Chinese Academy of Sciences to the Qinghai–Tibetan Plateau. *Rivers and Lakes in Tibet* [M]. Beijing: Science Press, 1984: 24–26]
- [24] 何大明, 冯彦, 胡金明, 等. 中国西南国际河流水资源利用与生态保护 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 43–45 [HE Daming, FENG Yan, HU Jinming, et al. *Utilization of water resources and environmental conservation in the international rivers, Southwest China* [M]. Beijing: Science Press, 2007: 43–45]
- [25] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 19–21, 42–45 [ZHOU Youwu, GUO Dongxin, QIU Guoqing, et al. *Geocryology in China* [M]. Beijing: Science Press, 2000: 19–21, 42–45]

Spatial and Temporal Distribution and Variation Characteristics of Surface Freeze/Thaw Status in the Upper and Middle Nujiang River Basin

LUO Xian ,JI Xuan ,LI Yungang ,HUANG Jiangcheng

(Asian International Rivers Center of Yunnan University ,Yunnan Key Laboratory of International Rivers
and Transboundary Eco-security ,Yunnan Kunming 650091 ,China)

Abstract: The complexity of hydrological process in frozen regions makes its analysis and simulation difficult. When researching on hydrological impacts of frozen soil degeneration in Tibetan Plateau ,it is needed to know spatial and temporal distribution characteristics of soil freezing and thawing status. Making use of surface soil freeze/thaw status derived from passive microwave remote sensing data ,spatial and temporal distribution and variation characteristics of surface soil freezing and thawing status in the Upper and Middle Nujiang River Basin was identified. The results showed that: (1) In much of Nujiang River Basin above Gongshan station ,the area with more than 270 surface freezing days covered 32.0% of total area ,and the area with surface freezing days between 180 and 270 days accounted for 62.3% . On average ,annual surface freezing days were increased by about 62 days with every 1000 m elevation. (2) The start and end time of continuous freezing status in the study area varied in different years. The correlation coefficient between average temperature in thaw-freeze stage (September to October) and freezing area in October was -0.80 ,while the correlation coefficient between average temperature in freeze-thaw stage (April to June) and freezing area in June was -0.87 . Both reach 0.01 significant level. Inter-annual fluctuation of air temperature resulted in the variations of surface soil freezing area and duration ,and the start date of freezing and thawing status. (3) Surface soil freeze/thaw status derived from passive microwave remote sensing data ,with high time resolution ,could be applied in large-scale freeze/thaw variations analysis and hydrological simulation under climate change ,especially in ungauged plateau and mountain watersheds.

Key words: surface freeze/thaw status; passive microwave remote sensing; climate change; Nujiang River Basin

封面照片: 四川省雪隆囊地区溃坝沉积物 扫描电镜下石英颗粒外形

溃坝沉积物石英砂特征主要呈不规则颗粒,表现为次圆状(见图 a、c)和次棱角状(见图 b),其边缘主要为棱脊磨损(图 b)和次棱脊(见图 c)。颗粒表面显示中起伏(见图 b、d)和/或低起伏。

(刘超 中国地质大学(北京) 2015 年 12 月)