

郭淑海,陈仁升,韩春坛,等. 冰雪升华测算结果及影响因素研究进展[J]. 地球科学进展,2017,32(11):1 204-1 217,doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.11.1204. [Guo Shuhai, Chen Rensheng, Han Chuntan, et al. Advances in the measurement and calculation results and influencing factors of the sublimation of ice and snow[J]. Advances in Earth Science,2017,32(11):1 204-1 217,doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.11.1204.]

冰雪升华测算结果及影响因素研究进展*

郭淑海^{1,2},陈仁升^{1*},韩春坛¹,刘国华¹,宋耀选¹,
阳 勇¹,刘章文¹,刘俊峰¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院(筹),甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:冰雪升华是冰冻圈—大气圈水分和热量交换、冰冻圈水分损耗的主要途径之一,也是寒区水文过程中的重要组成部分和研究难点。冰雪升华过程及其影响因素观测与模拟研究在南北极、北美和北欧等地开展较早,并取得了卓有成效的研究结果。在分析不同地区、不同气候条件下的冰雪升华量、升华潜热对水量和能量平衡影响的基础上,论述了冰雪升华的影响因素。研究结果认为冰雪升华虽然是区域水文过程和能量收支平衡的重要组成部分,但在湿润气候条件下,冰雪升华作用受到抑制,此外,冰雪升华受局地地形(海拔、坡度、坡向)、植被、气象要素的影响明显,导致冰雪升华各地报道差异较大。冰雪升华时空差异明显,涉及的影响因素众多,相关工作较为零散,缺乏长期、系统观测与研究,导致对冰雪升华的水热过程及其影响认识不清,冰雪升华研究尚存在许多不确定性,仍面临许多难点需克服。

关 键 词:冰雪升华;地形;林冠截雪;风吹雪

中图分类号:P426.63

文献标志码:A

文章编号:1001-8166(2017)11-1204-14

1 引 言

冰雪是冰冻圈的重要组成部分,对气候变化极为敏感,被认为是气候变化的指示器^[1,2]。冰雪具有独特的热力学和水文学特性,其升华过程是区域乃至全球水量平衡、能量平衡^[3]及大气环流的重要影响因素,对生态、水文、地貌及气候具有重要影响。在全球气候变暖背景下,全球冬季降雪量普遍减少^[4],冰雪融雪期提前、延长,冰雪升华过程加剧,势必引起区域和流域尺度能量和水量平衡的变化,进而影响区域水资源、生态甚至大气环流的变化^[5]。冰主要包括冰川、海冰、湖冰和河冰等,但其

升华研究主要以分布范围相对固定的南北极冰盖和部分山地冰川/盖为主。与冰川/盖相比,积雪的分布范围更广,其升华研究更为普遍,在北美、南北极和北欧等地研究历史较长。积雪时空分布及升华过程受下垫面条件和气候的影响更加明显,太阳辐射、降水、气温、风场、地形和植被等均是升华过程的重要影响因素^[6]。与冰面升华不同,积雪升华按升华速率由高到低,通常可分为风吹雪升华、林冠截雪升华和地表积雪升华^[7],相反的凝结过程则主要发生在夜间或高湿条件下^[5]。鉴于当前冰雪升华研究的地域广泛性、零散性、有限性以及冰雪分布高度的时空异质性,冰雪升华过程及其对区域水量和能量

* 收稿日期:2017-06-07;修回日期:2017-09-20.

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目“高寒山区冰雪升华/蒸发观测实验研究”(编号:41671029);国家自然科学基金重大项目“冰冻圈水资源服务功能研究”(编号:41690141)资助。

作者简介:郭淑海(1986-),男,山东沂水人,博士研究生,主要从事冰雪水文研究. E-mail: guoshuhai@lzb.ac.cn

* 通信作者:陈仁升(1974-),男,山东沂水人,研究员,主要从事寒区水文观测与模拟研究. E-mail: crs2008@lzb.ac.cn

平衡的影响尚缺乏全面的认识。本文首先概述了全球各地不同气候条件下的冰雪升华量、升华潜热及其在水量平衡和能量平衡中的作用,进而阐述了地形(海拔、坡度和坡向)、森林和风吹雪对冰雪升华的影响,最后提出了未来需要重点关注和研究的方向。

2 冰雪升华量

冰雪升华量是冰冻圈水量平衡的重要支量,但区域地形、植被以及气象要素差异导致当前冰雪升华各地报道差异明显,冰雪升华对不同地区、不同时段内水量平衡的影响不尽相同。本节主要介绍全球不同地区、不同气候条件下的冰雪升华量及其在水量平衡中的比例关系。

冰主要包括冰川、海冰、湖冰和河冰等,其升华过程的研究主要以冰川/盖为主,并主要集中在南极、北极等地,在其他地区也有零散的研究,而湖冰、河冰等升华过程的研究极为少见。冰表面升华观测很早就南极洲海岸展开^[8,9],Fuji^[10]在南极洲观测站(海拔 2 230 m),利用直径 9 cm、深 1.5 cm 的玻璃圆盘观测裸冰表面升华量,其结果与物质平衡总量控制法较为一致。鉴于冰川/盖升华量大规模、长期直接观测较为困难,近年来各种模型估算方法得以发展。Van Den Broeke^[11]利用 ECHAM-3 模型对南极洲冰盖升华的时空变化研究表明,观测期年升华量占年降水量的 10% ~ 15%,升华对南极洲蓝冰区的形成有重要影响。Box 等^[12]分别将 2 种空气动力学法得到的格陵兰岛冰盖表面升华量与涡动相关法、蒸发器法获得的结果进行比较,探讨通过这 2 种方法计算冰盖升华的差异性。Gusain 等^[13]通过空气动力学法计算的南极洲观测站点升华量约占整个夏季净消融量的 16.5%。中国是山地冰川最多的国家,冰川升华观测较早,但在 1990—2010 年基本间断,近年来又逐步开展。早期的工作主要在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川开展。谢维荣等^[14]、张寅生等^[15]以及 Hiroyuki 等^[16]分别采用蒸发器直接测量、热量平衡和梯度观测方法,研究了乌鲁木齐河源 1 号冰川冰雪表面升华量,为该区夏季水量平衡分析和冰雪水资源计算提供了重要参数。近年来,蒋熹等^[17]对能量平衡法与蒸渗仪法得到的七一冰川表面升华量进行比较,结果发现夜间计算值与测量值相差较小,而白天结果相差较大。孙维君等^[18]通过能量平衡方程计算得到的祁连山老虎沟 12 号冰川积累区冰川表面日均升华量为 0.8 mm。而同

样采用能量平衡法,方潇雨等^[19]计算的十一冰川日均升华量仅为 0.1 mm。Yang 等^[20]发现藏东南帕隆 94 号冰川(海洋型冰川)2005—2010 年平均升华损失仅为 -0.07 m/a,完全可忽略不计。不同地区、海拔、冰川类型以及观测时段(时长)、连续性、观测项目及精度、估算方法等的差异,导致了不同的结果。总体看,中国山地冰川升华过程研究还较为零散,其规律获取还需要大量、长期的基础观测资料和研究支持,在高寒山区,河冰面积远大于冰川面积,结冰期 5 ~ 6 个月,其升华观测与研究尚未见诸报道。

相对于冰,雪升华观测与研究较多,主要包括地表积雪、冠层积雪和风吹雪升华。与冰面升华观测类似,其观测方法主要有蒸发器或蒸渗仪法、空气动力学法和涡动相关法等^[12,21,22]。Rolf^[23]较早地在瑞典拉普兰采用锌制蒸发器研究雪面升华,Baker^[24]于 1915—1916 年在美国犹他州利用浅绿色玻璃蒸发器测量雪面升华,分析升华量与饱和差及气温之间的关系,得出冬季雪面升华量约占降雪量的 14%。杨大庆等^[25]发现乌鲁木齐河源高山区冬季积雪升华主要取决于热量条件,积雪月升华量可占月降水量的 55% ~ 100%。对蒙古国欧亚冰冻圈边缘的薄雪覆盖区进行研究,Zhang 等^[26]通过空气动力学法计算得到 3 个站点的积雪升华数据,发现影响积雪升华的主要气象要素依次为风速、气温和水汽压差,平原区和山区站点年升华量分别占年降雪量的 20.3% 和 21.6%。李弘毅等^[27]采用梯度法计算黑河上游祁连山冰沟流域的雪升华量,发现整个积雪期雪升华量达到降水量的 68.8%。在其他类似的半干旱山区,积雪升华量同样在同期降雪中占有相当大的比重,例如,美国白山(50% ~ 80%^[28])、加利福尼亚州内华达山(20%^[29],36%^[30])、科罗拉多州落基山(15%^[31])、亚利桑那州北部的旧金山峰(17% ~ 43%^[32])、南美安第斯山(30% ~ 90%^[33])、摩洛哥阿特拉斯山(44%^[34],7% ~ 20%^[35])、以色列赫尔蒙山(46% ~ 82%^[36])、西班牙内华达山(21% ~ 42%^[37])。在积雪覆盖的针叶林地区,林冠截留积雪升华也是区域水量平衡的重要组成部分^[38,39],涡动相关法则是直接观测冠层积雪升华最有效的方法^[40]。冠层积雪截留量可达年降雪量的 60%^[41],升华损失可达 30% 以上^[42],Pomeroy 等^[43]指出植被会降低地表积雪升华速率。

然而,在湿润气候条件下,积雪升华通常只在短期内起重要作用^[44]。Storck 等^[45]认为,与更干的气候区相比,海洋性气候区降雪更加频繁,综合情况更

不利于积雪升华的进行,积雪升华并不是海洋性气候区林冠积雪最主要的损失形式。在湿润气候条件下的阿尔卑斯山区,升华对积雪水文过程的影响要小很多^[46~48]。消融期冰雪面水汽压可以看作是饱和水汽压,多数情况下高于近地面大气水汽压,因而有利于升华的进行,凝结作用则会受到抑制,但消融期气温较高,降水较多,湿度较大,冰雪主要以融化为主,升华导致的冰川物质亏损相对较小,可以不予考虑^[18,19,49],这与气候寒冷干燥时期的大陆型冰川是有区别的,此时冰川的消融主要以升华为^[50,51]。

总体看,受气候、积雪期、积雪基本物理性质、地形等因素的影响,雪升华量各地报道结果差异较大。南极雪升华量约占降雪量的 12.5%^[52],北极为 19.5%^[53]和 50%^[54],阿拉斯加北向山坡观测结果为 32%^[55]。加拿大普列利草原 1995 年结果为 15%~40%,加拿大极地西部占 28%^[56];Pomeroy 等^[57]报道普列利草原为 29%,极地冻原为 22%。美国犹他州占 14%^[24]、科罗拉多州亚高山森林区最大升华率约为 20%^[38],Troendle 等^[42]则报道升华损失可达 30% 以上。Aizen 等^[58]报道中亚天山地区升华率为 30%,杨大庆等^[25]发现积雪月升华量可占月降水量的 55%~100%;李弘毅等^[27]报道月雪升华量达到降雪量的 68.8%。在蒙古平原区和山区站点年升华量分别占年降雪量的 20.3%和 21.6%^[26]。DeWalle 等^[59]总结指出温暖多风地点,升华量约占降雪量的 40%,而在寒冷和无风地点则占 10%~15%。Liston 等^[54]认为,导致上述差异的原因在于地区下垫面不同的湿润状况。大量研究表明,冰雪升华是区域水量平衡的重要组成部分,但在全球气候变暖背景下,全球冬季降雪量普遍减少,升华对区域水量平衡的影响将受到限制^[60]。

3 冰雪升华潜热

净辐射往往是冰雪表面能量最主要的贡献者,也是冰雪消融最重要的控制因素,但在一些特殊地区,例如,钦诺克风或焚风盛行区,感热对积雪消融的贡献更大,在高湿气候条件下(如新西兰和阿尔卑斯山区),凝结潜热同样可以成为积雪消融的重要影响因素之一^[5,61]。冰雪表面潜热通量可直接反映其升华率及升华量,总体来看,冰雪升华潜热相对较小^[7,18]。

杨兴国等^[3]分析了不同地区冰川/积雪面的能量平衡特征,发现升华潜热对能量平衡的影响存在

比较明显的区域差异,这种差异的产生应该与海陆影响程度和不同地区的季节差异有关。张寅生等^[62]从 1992 年 5 月至 1993 年 4 月对唐古拉山冬克玛底冰川平衡线处(海拔 5 600 m)能量平衡的观测研究表明,4~10 月冰川表面通过大致相等的净辐射和感热过程获得能量,即使在最暖月(8 月),其月平均气温仅略高于 0℃,冰面融化微弱,升华在冰面消融过程中占绝对优势,升华潜热占能量支出项的 81%。与冬克玛底冰川相比,蒋熹等^[17]、康尔泗等^[63,64]和 Ohata 等^[65]认为,在海拔相对较低的祁连山七一冰川、天山乌鲁木齐河源 1 号冰川消融期,降水相对偏多,气候更加暖湿,在能量支出部分,升华潜热占比均低于 8%,而方潇雨等^[19]、陈记祖等^[66]和李晶等^[67]在祁连山十一冰川、老虎沟 12 号冰川及天山南坡科其喀尔巴西冰川消融期也发现了 15%~40% 的潜热支出占比。在气候更加寒冷干燥的南极大陆,夏季较高的气温能有效促进冰面水分向大气扩散,升华潜热往往是冰面能量最主要的消耗项^[51],而气候相对更加温暖、潮湿的南极洲外围地区,凝结作用加强,升华潜热对能量平衡的影响减弱^[68,69]。Wagnon 等^[70]研究海拔 5 150 m 的南美洲热带 Zongo 冰川消融区和积累区 1996—1997 年的冰面能量平衡获得的冰面升华量虽然低于同期总消融量的 17%,但升华潜热占能量支出项的比例却超过 63%,冰面升华现象在旱季最明显,并认为热带冰川升华对气候变化极为敏感。而 Sicart 等^[71]之后对 Zongo 冰川的研究同样认为旱季升华潜热对冰面能量平衡的影响更明显,但发现净长波辐射是最主要的能量消耗项。在南美洲热带地区的 Illimani 冰川(海拔 6 340 m),Wagnon 等^[72]发现升华潜热是冬季冰面能量平衡的主要耗热项,并得出热带高海拔冰川升华作用比南极强的结论。在非洲乞力马扎罗山的相关研究也证明了升华潜热对冰面能量平衡的重要影响^[73]。中国藏东南帕隆 4 号冰川同样位于低纬度地区,而 Yang 等^[74]研究发现其消融区夏季的冰面升华主要在相对干冷、多风条件下产生,受南亚季风影响强烈的时期,潜热以凝结作用为主,升华潜热对冰面能量平衡的影响微弱。研究表明,与海洋型冰川(暖冰川)相比,大陆型冰川(冷冰川)具有相对更高的潜热耗热比,更低的冰雪融化耗热比,且随着消融期的结束和冷季的到来,大陆型冰川潜热耗热的比重开始增加^[17,62]。

一般冰雪融化是冰川消融期最主要的耗热项,但在气候相对干冷的非消融期,升华对冰川物质能

量损耗的影响尤为重要,但过度寒冷的天气条件同样不利于升华耗热。例如,海拔 5 600 m 的冬克玛底冰川平衡线处,11 月至次年 3 月,感热和凝结潜热为冰面贡献了绝大部分能量,冰面升华受到强烈抑制,净辐射成为主要的能量支出项,其中有 4 个月占能量支出的 100%^[62]。南极冬季太阳辐射缺失,地表能量收入以大气持续向冰面输送的感热为主,冰雪升华非常微弱,升华潜热在能量平衡支出项中占比很小,冰面同样倾向于出现净凝结现象^[75,76]。

此外,冰与雪作为 2 种截然不同的固体水存在形式,两者的物理性质及其与周围环境的交互作用不同,升华潜热对冰、雪面能量平衡的影响也存在明显差异,即使在临近区域,冰与雪的升华潜热也明显不同。南极洲冰雪升华主要在南半球的夏季产生,其蓝冰区比积雪区具有相对更低的反照率和更高的表面温度,因而具有相对更高的升华速率^[11,77,78]。受冰面与雪面反照率差异影响,Fujii 等^[79]在日本瑞穗站附近的冰面计算的潜热通量为 -21 W/m^2 ,而 Ohata 等^[75]几乎在同样地点的雪面仅获得了 -7 W/m^2 的潜热通量。Bintanja 等^[51]在瑞典斯维站计算的蓝冰区(反照率为 0.56)潜热通量为 -29 W/m^2 ,临近积雪区(反照率为 0.81)为 $-15 \sim -22 \text{ W/m}^2$ 。相邻区域,冰面潜热通常要高于雪面,但升华潜热仍是雪面能量平衡较重要的组成部分,例如,在科罗拉多州弗兰特山积雪覆盖区,Cline^[80]发现融雪期升华潜热占能量总支出的 21% (1994 年)和 15% (1995 年)。在北美内华达山脉,Marks 等^[29]对融雪期雪面能量平衡的研究发现,辐射、感热和潜热均是雪面能量平衡的重要组成部分,同期感热和潜热量相当,但两者方向相反,可相互抵消。但 Nakai 等^[81]获得的白天积雪覆盖的日本札幌冷杉林冠层升华耗热量相当于 80% 的净辐射,而无积雪覆盖的冠层则以向上的感热通量为主,这种差异的产生与积雪覆盖的冠层具有相对更高的温度和更多可利用的水分有关。而在日本十胜地区,春季积雪表面能量收入项的 80% 以融化的形式消耗,升华消耗了剩余 20% 的能量^[82]。

但在湿润气候条件下,升华潜热对雪面能量平衡的影响同样会受到抑制。在以色列赫尔蒙山,Sade 等^[36]对斑状积雪表面能量平衡的研究发现,12 月至次年 2 月,气温较低,积雪融化微弱,升华是最主要的能量消耗项,3~5 月,随着气温的回升,积雪融化量和融化耗热不断增加,升华量和升华潜热则不断受到抑制,5 月为净凝结。与半干旱山区相比,

在气候较湿润的新西兰南岛山区,Moore 等^[61]发现积雪消融期凝结作用强烈,升华微弱,升华潜热可忽略不计。在法国的阿尔卑斯山,7 月观测期潜热通量为 -4.8 W/m^2 ^[46],瑞士阿尔卑斯山区 5 月积雪潜热通量仅有 -4 W/m^2 ,相当于 3.7 mm 的净升华量^[83],在挪威,Harding^[84]5 月观测到的垂直水汽通量为净凝结。Suzuki 等^[85]发现升华潜热对日本岩手山南麓开阔裸地和落叶松林地融雪期能量平衡的影响微弱。

4 冰雪升华的影响要素

4.1 地形对冰雪升华的影响

地形通过直接或间接的方式影响冰雪—大气间复杂的水热交互过程,海拔、坡度及坡向影响陆面冰雪空间分布及之后的冰雪消融过程,进而对区域水量和能量平衡产生重要影响^[86]。地形因素在冰雪升华中扮演了重要角色,但目前相关研究主要以雪为研究对象,冰的相关研究严重不足。风速、太阳辐射随坡向、坡度和海拔高度而变化,导致高海拔地区或坡度较大的南坡的积雪升华相对更高^[87,88]。

4.1.1 海拔高度对冰雪升华的影响

在山区,海拔是积雪量和雪水文过程的重要影响因素,在一定范围内,高海拔地区倾向于拥有更强的太阳辐射和风速,更低的气温和水汽压,更多的降雪量和更长的积雪期,这为冰雪升华创造了有利的条件^[89,90]。通常,积雪升华对高海拔积雪区水量平衡的影响更加明显,在半干旱的摩洛哥阿特拉斯山南坡,Schulz 等^[34]研究认为,受更长时间的零下低温、更大风速和更强太阳辐射作用,积雪升华倾向于在 3 000 m 以上地区产生更大影响。对南美安第斯高原积雪期水量平衡的研究也发现积雪升华对水量平衡的影响随海拔高度的增加呈增加趋势^[33]。

然而,受不同地区、不同海拔高度下的复杂地形和气象条件影响,海拔高度对积雪升华的影响也比较复杂^[32]。在加拿大西部的奥提根流域的相关研究报道,空地和林下积雪升华率均随海拔高度的增加呈增加趋势,消融期总升华则先减少后增加,最高海拔研究点的地表升华损失量最大^[5]。西伯利亚勒拿河流域范围内的积雪升华(不包括风吹雪升华)与海拔高度的相关系数为 0.35,其在降雪量中的占比与海拔高度的相关系数却仅为 0.25,高海拔地区降雪量偏多,升华损失影响反而较小^[91],该结果的产生与其未考虑风吹雪升华有一定的关系。当综合考虑地表积雪、林冠截雪和风吹雪,在阿尔卑斯

山流域内发现积雪升华量与海拔高度总体呈增加趋势,风速较高的山脊具有最大升华量,升华对降雪损耗的影响在山脊处也最明显^[92]。但高海拔地区更多的积雪升华量并非完全由更高的升华速率导致,也可能是由更多的降雪量造成,Montesi 等^[93]在不同海拔(3 230 和 2 920 m)的亚高山林区发现,与高海拔地区相比,低海拔地区气温更高,相对湿度更低,但由于低海拔地区未受地形遮蔽影响,其风速反而更大,林冠截雪升华速率更高,但高海拔地区降雪量更多,更高的林冠截雪率产生了更多的积雪升华量。

4.1.2 坡向与坡度对冰雪升华的影响

斜坡冰雪物理特性、水文过程与坡向密切相关。与北坡(北半球)相比,南坡可接受更多太阳辐射,导致其积雪融化与升华速率较北坡高^[94],此外,南坡植被密度与叶面积普遍较小,林冠截雪率低,地表积雪面积占比反而较高,积雪融化对消融的贡献更大,因而,流域内相同海拔高度,一般北坡雪水当量最大,南坡最少^[38],南半球则正好相反。West^[95]在内华达山利用雪面蒸发器获得的 4 种不同坡向及山脊处的积雪升华差异明显,山脊处积雪升华最大,北坡积雪升华比南坡少 21%。在天山积雪雪崩站,王积强等^[96]利用雪面蒸发器测得的阴坡积雪夜间凝结量大于白天升华量,整个冬季阴坡的凝结时间比升华时间多,量也大,阳坡的雪面升华强度可能比阴坡大。而陆恒等^[97]在天山积雪雪崩站的研究发现,由于植被影响,阴坡雪岭云杉林冠下积雪表面净短波辐射和显热明显小于阳坡开阔地。不同坡向盛行风的差异也是影响积雪升华的重要因素。落基山东坡向下的钦诺克风(干暖风)可在 1 h 内使冬季气温达到甚至超过 20 ℃,导致积雪在较短时间内大量消融^[98]。Golding^[99]计算得出加拿大落基山东坡钦诺克风盛行期(1~3 月)林线以上研究点积雪升华高达 88 mm,林线以下为 53 mm。而在气候类似的科罗拉多州落基山,Troendle 等^[100]获得的南坡积雪期林冠和地表积雪升华为 58 mm,北坡仅为 33 mm。

坡度的较小变化也可导致斜坡积雪分布、太阳辐射和风的较大改变,进而对冰雪升华产生重要影响。然而,目前涉及坡度影响因素的相关研究较少,单独分析坡度影响因素的研究更为稀少。南极大陆作为大陆冰川最主要的分布区,其坡度的较小变动会对区域风速和风向产生重要影响^[101],由南极高原沿下坡向快速吹向沿海地区的下降风极大增强了冰雪升华^[11]。坡度越大,斜坡积雪越容易受重力和

风的影响而产生雪崩和风吹雪现象,积雪倾向于在海拔较低,地势较缓的山谷或平地处积累,山谷与斜坡水热差异明显,积雪升华也存在明显不同^[88,92]。坡度大、海拔高的迎风坡与山脊处通常具有更加明显的风吹雪升华现象^[7]。

4.2 森林对积雪升华的影响

与降雨不同,林冠对降雪的再分配和雪水文过程的影响更加明显。林冠截雪过程相当复杂,影响因素除降雪和风场特征等气象要素外,还受树种组成、林分密度等林分特征的影响,林区气象要素与林分特征不同,对雪的截留、融化和升华影响差异明显。森林类型、林木密度等直接影响截留降雪量、林内积雪分布以及林内能量平衡过程,从而影响积雪的升华过程及升华量。鉴于冰川上无森林,本节仅讨论森林对积雪升华的影响。

4.2.1 林冠截留对积雪升华的影响

林冠层对降雪的截留和林冠截雪升华强烈制约地表积雪积累量,是中高纬和高海拔林区雪水文过程的重要影响因素。林区降雪中的一部分被冠层截留,剩余部分穿透到林冠下层或林内空地,因而,积雪升华在森林冠层和林下地表均可同时发生。林冠截雪升华主要取决于冠层截雪率、积雪暴露时间及大气状况^[102]。林冠层的截雪能力有限,高频且雪量较小的降雪事件通常有助于提高林冠截雪率和升华量^[92],除了提高截雪率,冠层积雪暴露时间的延长、气温的升高、湿度的降低、风速的增强及更多净辐射的输入也有助于促进冠层表面水分进入大气^[45],但暴露时间的延长、气温的升高以及风速的增强对林冠截雪的维持可能产生副作用,降低进入大气的截雪升华量。稳定积雪期,气温较低,风速较小时,穿透到林下的林冠截雪量较少,升华是林冠截雪减少的主要形式,当融雪期气温回升,而降雪量减少,大量林冠截雪通过滑落或融水滴落的形式穿透到林下,导致林冠层升华作用减弱^[103,104]。

林冠截雪升华速率通常高于林下地表积雪升华。林冠的存在导致林区短波辐射向下输入减少,林内风速降低,林下积雪—大气间潜热交换减弱,此外,与地表积雪相比,林冠截雪具有更大的比表面积,与周围风和水汽等气象要素的接触更加充分,导致林冠截雪比林下积雪或林间开阔地积雪具有更大的升华速率^[7,42],且随着植被覆盖的提高,林冠层截雪率增加,林下积雪减少,植被覆盖产生的遮蔽与阴影效应进一步削弱了林下积雪消融。因而,在林区雪水文过程中,与林下积雪升华相比,林冠截雪升华

通常具有更重要的地位,针叶林区约 60% 的年降雪被林冠截留^[45,105],通过皆伐的方式可增加 30% ~ 45% 的地表积雪积累量^[56,88],林冠截雪升华占年降雪量的 20% ~ 30%^[93],高达 50%^[42]。尽管多数情况下林冠层的存在抑制了林下积雪升华,但当林冠层温度较高,较强向下长波辐射的存在,可促进林下积雪升华^[106],林冠层相对较大的感热通量导致冠层与林下积雪间产生较大的温度差,造成林下积雪—大气间较大的比湿梯度,也可提高林下积雪的升华速率,林下积雪升华损失强烈依赖于林冠感热和潜热的分配^[81]。

受林冠层的影响,通常林下积雪升华速率也较开阔地低。这种差异的产生与林间空地或开阔地较低的水汽含量和相对较高的风速有关,且积雪升华随林间空地或有效风区长度的增大而增强。近地面边界层风速的增大或粗糙度的增加,导致湍流涡旋尺寸增大,也有助于提高积雪升华速率^[5]。Zhang 等^[88]对东西伯利亚落叶松林下与空地积雪升华进行对比研究,发现森林覆盖对积雪升华的影响与大气稳定度密切相关,随着大气稳定度的减小,林区与空地间的积雪升华差异越明显。但林下积雪夜间可接受更多冠层下行长波辐射,其受地表长波辐射降温的影响相对较弱,因而,又表现出夜间林下积雪升华比空地大的特点。West^[95]利用雪面蒸发器观测林下地表和林中空地积雪升华,发现观测期林中空地积雪升华积累量虽然大于林下,且较大的空地具有更多积累量,日间林下积雪升华仅约为空地的一半,但夜间空地辐射降温失去更多热量,导致其夜间积雪升华较林下积雪弱。受夜间冠层下行长波辐射的影响,Froyland^[32]发现冬季林下积雪日升华显著多于空地。

4.2.2 森林类型对积雪升华的影响

林区积雪升华过程包括林下地表积雪升华和林冠截雪升华 2 个子过程,但受不同森林类型自身特性的较大差异影响,对不同森林类型,研究者对林下和林冠 2 个子过程的关注度有所差别。当前的森林积雪升华研究主要关注针叶林,尤其是常绿针叶林,对其它森林类型报道较少,且主要集中在高纬和高海拔地区,这与全球范围内的高纬和高海拔林区主要由北方针叶林和亚高山森林构成,且可更有效截留降雪有关^[107,108],林冠截雪研究也主要集中在北美、北欧与日本 3 个地区^[109]。针叶林,尤其是北方寒带针叶林树种比较单一,林冠截雪率比其他森林类型高,其积雪升华主要关注林冠截雪,对林下或林

间空地的研究相对较少。针叶林独特的林冠特性有利于截雪升华的进行,Lundberg 等^[110]发现林冠截雪升华云杉林>松树林>阔叶林>针阔混交林。Nakai 等^[81,111]获得的云杉和冷杉混交林与单一冷杉林林冠截雪升华分别为 0.6 和 0.7 ~ 2.3 mm/d,并认为除了观测误差与气象差异,不同森林类型截雪升华差异的产生可能与冷杉林冠具有更高的截雪率有关。Suzuki 等^[109]对落叶松和针叶林林冠截雪对水热平衡的影响进行研究,结果显示针叶林相对更高的截雪率使其具有更大的潜热通量,空气动力学阻力和冠层阻力强烈影响针叶林林冠截雪升华,而落叶松林则主要受冠层阻力的影响。

与针叶林相比,对阔叶林和针阔混交林积雪升华研究严重滞后,现有研究对两者的积雪升华过程的关注点也有所不同。高纬和高海拔阔叶林冬季普遍落叶,郁闭度大幅度降低,林冠截雪积累量较少,持续时间较短,虽然有学者关注树干截雪升华,但相关研究还是以地表积雪为主,通常将地表积雪升华看作整个林区下垫面的积雪升华,很少关注林冠截雪升华过程^[112]。针阔混交林的森林组成和结构更为复杂,影响其积雪升华的因素更多,对针阔混交林积雪升华的研究更少,且当前的研究一般既不考虑森林组成和结构的影响,也不对林冠层和林下进行区别分析,而将针阔混交林下垫面看作一个整体进行研究^[113]。

4.2.3 森林密度对积雪升华的影响

森林密度的差异也是影响林区积雪升华的重要因素。森林密度的改变不仅会引起林冠层结构的变化,影响冠层净辐射、截留降雪量及其升华过程,也会影响林下地表的雪水文过程^[83],进而导致林区水量与能量平衡的变化^[106]。一般林冠截雪升华随森林密度的增大而增加,而林下积雪升华与森林密度的关系却呈相反趋势。Bernier^[114]发现加拿大冬季不同密度黑松林地表积雪升华差异明显,林木株数为 2 500 株/hm² 时,林下积雪升华为开阔地的 1/3,林木株数减小到 1 650 株/hm² 时,林下积雪升华与空地相近,风速较小是限制林内地表积雪升华的主要因素。Doty 等^[115]在美国犹他州采用称重法对比分析林中空地积雪升华,在无暴风雪期间,发现空地积雪平均升华为 0.30 mm/d,林中为 0.21 mm/d,而浓密的混合针叶林中积雪升华仅为 0.14 mm/d,结果表明林内地表积雪升华随林冠密度的增大而减小。在芬兰东部和北部的相关研究发现,林冠截雪升华量与降雪量的比值与森林密度呈正比,林冠截

雪升华可以看作是森林密度和森林类型的函数^[110]。Strasser 等^[92]和 Suzuki 等^[91]对流域范围的升华研究发现,在森林覆盖区,随着森林密度的提高,林冠截雪升华作用显著增强。而在日本岩手山地区,受暖湿气候条件影响,稀疏落叶松林(411 株/hm²)和高密度落叶松林(1 433 株/hm²)融雪期的地表积雪升华却不明显^[83]。

4.3 风吹雪对冰雪升华的影响

风吹雪(又称吹雪或风雪流)是风挟带雪粒在空中运动的一种非典型气—固两相流^[116]。风吹雪的产生主要由雪面物理特性和局地边界层气象条件决定,其升华速率取决于雪粒比表面积、蒸气压梯度以及雪粒表面空气流动^[88],因而,风吹雪升华是多因素综合影响的复杂物理过程,是雪粒与风、湿、温综合作用的结果。风吹雪及其升华过程作为一种特殊的水热运输方式,其在时间上具有明显的间歇性,在空间上具有高度的差异性,风吹雪一方面会直接引起地表积雪的重新分布,导致冰雪升华空间差异增大,另一方面,风雪流中的雪粒比地表积雪和林冠截雪具有更大的比表面积和更高的升华速率,能有效提高区域冰雪升华量。在高纬和高海拔冰川/盖、积雪分布区,例如南极和格陵兰沿海的下降风区,北冰洋冰雪覆盖区及其他冰雪覆盖的山区和平原区,积雪期普遍存在的风吹雪现象可通过对雪粒的迁移及其迁移过程中产生的升华作用强烈影响地表积雪的重新分布及冰雪覆盖区的水量平衡^[117~119]。

在加拿大大草原,风吹雪升华量占年降雪量比例为 15%~41%^[56]。加拿大北极苔原带及阿拉斯加北极区其比例分别为 28%^[88]和 18%~25%^[120]。Berg^[121]认为科罗拉多州 Niwot Ridge 的风吹雪升华占降水量的 30%~51%。南极下降风区的阿德莱德地区该比值为 10%~20%^[122]。但风吹雪升华的持续进行也可能产生较明显的负反馈效应^[7]。

4.3.1 风吹雪升华对冰雪升华的促进作用

风吹雪中雪粒较高的升华速率能有效促进区域冰雪升华总量。相比间歇性发生的风吹雪升华,即使风速并不超过风吹雪发生的平均临界风速,地表冰雪升华通常可持续进行,因而,其在时空上具有更大的连贯性和均匀性,积累量也往往更大。然而,从地表吹起的雪粒具有更大的比表面积,与周围温度、湿度和风的相互作用更加充分,能有效促进雪粒升华的进行,提高冰雪升华总量^[43,122],在湍流大气层中的升华速率可比静止空气下的大 15%~40%,因而,风吹雪升华被认为是最有效的雪升华方式^[123],

尤其是在新雪覆盖且大风条件下^[92]。风吹雪升华可在冰雪总升华中占有相当大的比重,该比值在祁连山冰沟流域垭口站为 41.5%^[124],冰沟流域高山区为 50.7%^[125],加拿大落基山为 53%~95%^[7]。利用南极瑞典斯维站附近的气象和风吹雪数据,Bintanja^[126]发现 3 号点风吹雪发生时间只占总观测期的 21%,但风吹雪升华却与地表升华具有一致的重要性,在其他 3 个研究点,风吹雪升华占总升华量的 2/3,研究结果强调了风吹雪升华的有效性及其在总升华量中的重要性。对全球尺度的地表冰雪和风吹雪升华研究发现,地表冰雪升华贡献了全球 70% 的升华量,剩余 30% 由风吹雪升华造成^[127]。地表冰雪和风吹雪升华均与近地表大气的水汽含量存在强烈的交互作用,在大风条件下,风吹雪升华是地表—大气总水汽通量的主要贡献者,当近地面水汽饱和时,地表升华完全可忽略不计^[126]。

4.3.2 风吹雪升华对冰雪升华的负反馈效应

持续进行的风吹雪升华产生的负反馈效应也比较明显,对风吹雪升华和地表冰雪升华可能产生较强的抑制作用。在南极冰盖下降风区,风速越大、气温越高、相对湿度越小,越有利于风吹雪升华的进行^[126]。但风吹雪升华也具有自身的限制性,持续进行的风吹雪升华可增加周围空气的湿度,降低空气温度和饱和水汽压,因此产生的负反馈效应不仅能抑制风吹雪升华的持续进行,同样可能导致近地面水汽趋于饱和,抑制冰雪表面水分向大气扩散,当风速较强时,这种抑制效果更加明显^[128,129]。风吹雪运动主要以跃移为主,大部分吹雪颗粒位于跃移层,但受风吹雪升华负反馈效应的影响,通常认为跃移层水汽基本趋于饱和,该层风吹雪升华可忽略不计,当前的风吹雪升华研究主要关注悬移层雪粒升华^[123,126,130],但跃移层也可能存在比悬移层更强的风吹雪升华现象^[131,132]。大气湿度的增加严重制约冰雪升华的进行^[52,127],然而,大量研究表明,若风速能有效移除雪粒或升华水汽,风吹雪升华的负反馈效应减弱,风吹雪升华及冰雪表面升华可持续进行^[126,133],干空气的水平流动或对雪粒的垂直携带作用对风吹雪升华速率的增幅可达 80%^[134],因而,有必要根据具体情况综合考虑跃移层及悬移层的雪粒升华,而此类相关研究较为缺乏。

5 结论与展望

冰雪升华量及其参数化估算方法是冰冻圈与全球变化、寒区水文等领域的重要研究内容和难题之

一。大量研究表明,冰雪升华既是区域水文过程和水量收支平衡的重要组成部分,也是冰雪面能量支出的重要影响因素之一,对“延缓”区域气温升高和冰冻圈萎缩具有一定的作用。冰雪升华与海陆分布、海陆位置、大气环流以及局地地形(海拔、坡度、坡向)、植被、气象要素的季节变化密切相关,这些因素的综合作用导致冰雪升华各地报道差异较大,其对区域水热平衡的影响也存在明显的不同,给冰雪升华观测和模拟也带来了不小的难度。但随着科学技术的不断进步,当前的冰雪升华研究已经取得了显著进展,一系列较新的测算方法不断涌现,同位素技术和微波遥感等新技术不断被应用于冰雪升华观测研究中,拓宽了冰雪升华观测的时空尺度,提高了其观测精度;大范围地表冰雪、林冠截雪和风吹雪升华的综合估算模型相继出现,并被嵌入到综合水文模型进行模拟,进一步提高了对区域冰雪水文过程的认识。

虽然当前的冰雪升华研究在不同地区针对地表冰雪、林冠截雪和风吹雪升华在研究方法、升华量和影响因素等方面均取得了很大进展,但由于冰雪所处地域以及不同升华类型及其影响因素的特殊性和复杂性,冰雪升华研究仍有较多难点亟待解决:①冰雪升华研究主要以积雪、冰川/盖为研究对象,对海冰、湖冰和河冰的升华研究较少;②地表冰雪、林冠截雪和风吹雪升华各自的测算方法较多,但很少有学者对不同测算方法的适用性进行评价,这给具体研究中选取最优测算方法带来了不少困惑,此外,同一区域内不同升华类型的大尺度综合研究也存在明显不足;③如何根据地形因素(海拔、坡度和坡向)改进冰雪升华测算方法,提高对大范围复杂地形的冰雪升华认识是还需解决的重要问题之一;④林区积雪升华主要关注寒带针叶林,对阔叶林和针阔混交林的关注较少;⑤风吹雪升华目前尚不能直接测量,可通过观测数据或数值模型计算得到,但风吹雪升华的时空数值模拟存在较大的难度。

根据目前冰雪升华的研究现状,未来的冰雪升华研究应重点关注以下几个方面:

(1) 加强对海冰、湖冰和河冰的升华研究。冰主要包括冰川、海冰、湖冰和河冰等,其升华过程研究主要以冰川/盖为主,未来应强化对海冰、河冰和湖冰的升华观测,其升华规律的获取还需要大量、长期的基础观测资料和研究支持。

(2) 加强实际观测提高估算模型的准确性和普适性。基于实际观测发展可以推广的雪升华量间接

估算方法是必然趋势,而冰雪升华时空差异性又比较明显,现有数据和结果尚不能形成可广泛应用的参数化估算方法,观测困难、数据稀少是主要的限制性因素,在不同地区开展长期、系统的观测与研究,积少成多,是解决该问题的有效途径之一。

(3) 完善不同测算方法的适用性评价和尺度转换问题。尺度转换是许多领域所面临的难题,冰雪升华涉及的环境因素众多,不同的测算方法不断出现,长时间、大尺度、多类型的升华研究迫切需要解决不同时空尺度下测算结果的尺度扩展问题。

(4) 加强不同林分特征的林冠积雪、林下积雪以及林中空地积雪升华的综合研究。由于针叶林具有独特的优势,导致林区积雪升华主要关注寒带针叶林,且主要以林冠积雪升华为主,未来应综合考虑不同森林类型、林木密度等林分特征下的林冠积雪、林下积雪升华,提高对林区积雪升华认识的整体性和准确性。

(5) 结合地形因素,加强对区域地表冰雪、林冠截雪和风吹雪升华的大尺度综合研究。受冰雪特性、复杂下垫面条件(地形和植被)、气象要素以及积雪不同升华类型(地表冰雪、林冠截雪和风吹雪升华)的影响,冰雪升华的观测和模拟依然存在较大的难度,尤其应加强大范围、复杂下垫面条件下的地表冰雪、林冠截雪和风吹雪升华的综合观测和模拟研究。

参考文献 (References):

- [1] Lemke P, Ren J, Alley R B, *et al.* Observations: Changes in snow, ice and frozen ground [M] // IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2007: 337-383.
- [2] Wu Shanshan, Yao Zhijun, Jiang Liguang, *et al.* Method review of modern glacier volume change [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(2): 237-246. [吴珊珊, 姚治君, 姜丽光, 等. 现代冰川体积变化研究方法综述 [J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 237-246.]
- [3] Yang Xingguo, Qin Dahe, Qin Xiang. Progress in the study of interaction between ice/snow and atmosphere [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 392-402. [杨兴国, 秦大河, 秦翔. 冰川/积雪—大气相互作用研究进展 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 392-402.]
- [4] Xie Yongkun, Liu Yuzhi, Huang Jianping, *et al.* Impact of the ice-albedo feedback on meridional temperature gradient of northern hemisphere [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(11): 1 276-1 282. [谢永坤, 刘玉芝, 黄建平, 等. 雪冰反馈对北半球经向温度梯度的影响 [J]. 地球科学进展, 2013, 28

- (11): 1 276-1 282.]
- [5] Jackson S I, Prowse T D. Spatial variation of snowmelt and sublimation in a high-elevation semi-desert basin of western Canada [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(18): 2 611-2 627.
 - [6] Yu Zhengxiang. Characteristics of Snowpack in Major Forest Types and Remote Sensing Estimation of Northern Daxing, Anling Mountains [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016. [俞正祥. 大兴安岭北部主要森林类型积雪特征及遥感估测 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.]
 - [7] MacDonald M K, Pomeroy J W, Pietroniro A. On the importance of sublimation to an alpine snow mass balance in the Canadian Rocky Mountains [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(7): 1 401-1 415.
 - [8] Loewe F. Notes on firn temperatures and ablation in MacRobertson Land, Antarctica [J]. *Journal of Glaciology*, 1956, 2(20): 725-726.
 - [9] Weller G. The heat budget and heat transfer processes in Antarctic plateau ice and sea ice [J]. *Biodrugs; Clinical Immunotherapeutics Biopharmaceuticals and Gene Therapy*, 1999, 12(2): 136-138.
 - [10] Fujii Y. Sublimation and condensation at the ice sheet surface of Mizuho Station, Antarctica [J]. *National Institute of Polar Research*, 1979, 67(67): 51-63.
 - [11] Van Den Broeke M R. Spatial and temporal variation of sublimation on Antarctica: Results of a high-resolution general circulation model [J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 1997, 102(D25): 29 765-29 777.
 - [12] Box J E, Steffen K. Sublimation on the Greenland ice sheet from automated weather station observations [J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 2001, 106(D24): 33 965-33 981.
 - [13] Gusain H S, Singh K K, Mishra V D, *et al.* Study of surface energy and mass balance at the edge of the Antarctic ice sheet during summer in Dronning Maud Land, East Antarctica [J]. *Antarctic Science*, 2009, 21(4): 401-409.
 - [14] Xie Weirong, Cao Meisheng. The preliminary results of snow evaporation on Glacier No. 1 at the Headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains [M] // *Glaciers and Permafrost Section of the Geography Institute, CAS, eds. Studies of Glaciology and Hydrology in the Urumqi River, Tianshan Mountains*. Beijing: Science Press, 1965: 70-73. [谢维荣, 曹梅盛. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪面蒸发测量的初步结果 [M] // 中国科学院地理研究所冰川冻土研究室. 天山乌鲁木齐河冰川与水文研究. 北京: 科学出版社, 1965: 70-73.]
 - [15] Zhang Yinsheng, Kang Ersi, Yang Daqing. The study of evaporation at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains [C] // *Proceedings of the 4th National Conference of Glaciology and Geocryology (Glaciology)*. Beijing: Science Press, 1990: 87-94. [张寅生, 康尔泗, 杨大庆. 天山乌鲁木齐河源区蒸发研究 [C] // 第四届全国冰川冻土学术会议论文集 (冰川学). 北京: 科学出版社, 1990: 87-94.]
 - [16] Hiroyuki O, Ohata T, Higuchi K. The influence of humidity on the ablation of continental-type glaciers [J]. *Annals of Glaciology*, 1992, 16(1): 107-114.
 - [17] Jiang Xi, Wang Ninglian, Yang Shengpeng, *et al.* The surface energy balance on the Qiyi Glacier in Qilian Mountains during the ablation period [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(4): 686-695. [蒋熹, 王宁练, 杨胜朋, 等. 祁连山七一冰川暖季能量平衡及小气候特征分析 [J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 686-695.]
 - [18] Sun Weijun, Qin Xiang, Ren Jiawen, *et al.* Surface energy balance in the accumulation zone of the Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountains during ablation period [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 38-46. [孙维君, 秦翔, 任贾文, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川积累区消融期能量平衡特征 [J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 38-46.]
 - [19] Fang Xiaoyu, Li Zhongqin, Bernd Wuennemann, *et al.* Physical energy balance and statistical glacier melting models comparison and testing for Shiyi Glacier, Heihe River Basin, Qilian Mountains, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(2): 336-350. [方潇雨, 李忠勤, Bernd Wuennemann, 等. 冰川物质平衡模式及其对比研究——以祁连山黑河流域十一冰川研究为例 [J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 336-350.]
 - [20] Yang W, Yao T, Guo X, *et al.* Mass balance of a maritime glacier on the southeast Tibetan Plateau and its climatic sensitivity [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(17): 9 579-9 594.
 - [21] Meiman J R, Grant L O. Snow-air Interactions and Management of Mountain Watershed Snowpack [R]. Fort Collins: Environmental Resources Center, Colorado State University, 1974: 1-39.
 - [22] Moore R D. On the use of bulk aerodynamic formulae over melting snow [J]. *Hydrology Research*, 1983, 14(4): 193-206.
 - [23] Rolf B. Condensation upon and evaporation from a snow surface [J]. *Monthly Weather Review*, 1915, 43(9): 466-466.
 - [24] Baker F S. Snow field experiment on evaporation from snow surfaces [J]. *Monthly Weather Review*, 1917, 45(7): 363-366.
 - [25] Yang Daqing, Zhang Yinsheng. Results of snow surface sublimation measurements in the mountain area of Urumqi River Basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, 14(2): 122-128. [杨大庆, 张寅生. 乌鲁木齐河流域山区冬季积雪蒸发观测的主要结果 [J]. 冰川冻土, 1992, 14(2): 122-128.]
 - [26] Zhang Y, Ishikawa M, Ohata T, *et al.* Sublimation from thin snow cover at the edge of the Eurasian cryosphere in Mongolia [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(18): 3 564-3 575.
 - [27] Li Hongyi, Wang Jian, Bai Yunjie, *et al.* The snow hydrological processes during a representative snow cover period in Binggou Watershed in the upper reaches of Heihe River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2): 293-300. [李弘毅, 王建, 白云洁, 等. 黑河上游冰沟流域典型积雪期水文情势 [J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 293-300.]
 - [28] Beaty C B. Sublimation or melting: Observations from the White Mountains, California and Nevada, USA [J]. *Journal of Glaciology*, 1975, 14(71): 275-286.
 - [29] Marks D, Dozier J. Climate and energy exchange at the snow sur-

- face in the alpine region of the Sierra Nevada; 2. Snow cover energy balance [J]. *Water Resources Research*, 1992, 28 (11): 3 043-3 054.
- [30] Leydecker A, Melack J M. Estimating evaporation in seasonally snow-covered catchments in the Sierra Nevada, California [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 236(1/2): 121-138.
- [31] Hood E, Williams M, Cline D. Sublimation from a seasonal snowpack at a continental, mid-latitude alpine site [J]. *Hydrological Processes*, 1999, 13(12/13): 1 781-1 797.
- [32] Froyland H K. Snow Loss on the San Francisco Peaks: Effects of an Elevation Gradient on Evapo-sublimation [D]. Flagstaff: Northern Arizona University, 2012.
- [33] Vuille M. Zur Raumzeitlichen Dynamik von Schneefall und Ausaperung im Bereich des Südlichen Altiplano, Südamerika [M]. Bern: Geographica Bernensia, 1996.
- [34] Schulz O, De J C. Snowmelt and sublimation: Field experiments and modelling in the High Atlas Mountains of Morocco [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2004, 8(6): 1 076-1 089.
- [35] Boudhar A, Boulet G, Hanich L, *et al.* Energy fluxes and melt rate of a seasonal snow cover in the Moroccan High Atlas [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2016, 61(5): 931-943.
- [36] Sade R, Rimmer A, Litaor M I, *et al.* Snow surface energy and mass balance in a warm temperate climate mountain [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 848-862.
- [37] Herrero J, Polo M J, Moñino A, *et al.* An energy balance snowmelt model in a Mediterranean site [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 371(1): 98-107.
- [38] Schmidt R A, Troendle C A, Meiman J R. Sublimation of snowpacks in subalpine conifer forests [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, 28(4): 501-513.
- [39] Lundberg A, Halldin S. Evaporation of intercepted snow: Analysis of governing factors [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30 (9): 2 587-2 598.
- [40] Molotch N P, Blanken P D, Williams M W, *et al.* Estimating sublimation of intercepted and sub-canopy snow using eddy covariance systems [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21 (12): 1 567-1 575.
- [41] Hedstrom N R, Pomeroy J W. Measurements and modelling of snow interception in the boreal forest [J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12(10): 1 611-1 625.
- [42] Troendle C A, Meiman J R. The effect of patch clearcutting on the water balance of a subalpine forest slope [C] // Proceedings of the 54th Western Snow Conference, 1986: 93-100.
- [43] Pomeroy J W, Gray D M. Sensitivity of snow relocation and sublimation to climate and surface vegetation [C] // Jones H G, *et al.*, eds. *Snow Cover and Its Interactions with Climate and Ecosystems*. Wallingford UK: IAHS Press, 1994: 213-226.
- [44] Braun L N, Lang H. Simulation of snowmelt runoff in lowland and lower Alpine regions of Switzerland [M] // Zürcher Geographische schriften 21. Zürich: Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 1985.
- [45] Storck P, Lettenmaier D P, Bolton S M. Measurement of snow interception and canopy effects on snow accumulation and melt in a mountainous maritime climate, Oregon, United States [J]. *Water Resources Research*, 2002, 38 (11), doi: 10. 1029/2002WR001281.
- [46] De la Casiniere A C. Heat exchange over a melting snow surface [J]. *Journal of Glaciology*, 1974, 13(67): 55-72.
- [47] Lang H. Is evaporation an important component in high alpine hydrology? [J]. *Hydrology Research*, 1981, 12 (4/5): 217-224.
- [48] Tarboton D, Bloschl G, Cooley K, *et al.* Spatial snow cover Processes at Kiihtai and Reynolds Creek [M] // Grayson R, *et al.*, eds. *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling*. New York: Cambridge University Press, 2001: 158-186.
- [49] Ma Hong, Liu Yifeng, Hu Ruji. Simulate of energy balance and rate of snow-melting in Tianshan [J]. *Geographical Research*, 1993, 12(1): 87-92. [马虹, 刘一峰, 胡汝骥. 天山季节性积雪的能量平衡研究和融雪速率模拟 [J]. 地理研究, 1993, 12(1): 87-92.]
- [50] Chen Liang, Duan Keqin, Wang Ninglian, *et al.* Characteristics of the surface energy balance of the Qiyi Glacier in Qilian Mountains in melting seasons [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6): 882-888. [陈亮, 段克勤, 王宁练, 等. 祁连山七一冰川消融期间的能量平衡特征 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 882-888.]
- [51] Bintanja R, Van Den Broeke M R. The surface energy balance of Antarctic snow and blue ice [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 34(4): 902-926.
- [52] King J C, Anderson P S, Mann G W. The seasonal cycle of sublimation at Halley, Antarctica [J]. *Journal of Glaciology*, 2001, 47(156): 1-8.
- [53] Pomeroy J W, Parviainen J, Hedstrom N, *et al.* Coupled modeling of forest snow interception and sublimation [J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12(15): 2 317-2 337.
- [54] Liston G E, Sturm M. The role of winter sublimation in the Arctic moisture budget [J]. *Hydrology Research*, 2004, 35 (4/5): 325-334.
- [55] Benson C S. Reassessment of Winter Precipitation on Alaska's Arctic Slope and Measurements on the Flux of Wind Blown Snow [M]. Alaska: Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks, 1982.
- [56] Pomeroy J W, Gray D M. Snowcover accumulation, relocation and management [J]. *Arctic and Alpine Research*, 1998, 30 (3): 314.
- [57] Pomeroy J W, Li L. Prairie and Arctic Areal snow cover mass balance using a blowing snow model [J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 2000, 105 (D21): 26 619-26 634.
- [58] Aizen V B, Aizen E M, Melack J M. Climate, snow cover, glaciers, and runoff in the Tien Shan, Central Asia [J]. *Water Resources Bulletin*, 1995, 31(6): 1 113-1 129.
- [59] DeWalle D R, Rango A. Principles of Snow Hydrology [M]. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2008.

- [60] Knowles J F, Blanken P D, Williams M W, *et al.* Energy and surface moisture seasonally limit evaporation and sublimation from snow-free alpine tundra[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 157(3): 106-115.
- [61] Moore R D, Owens I F. Controls on Advective Snowmelt in a Maritime Alpine Basin [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1984, 23(1): 135-142.
- [62] Zhang Yinsheng, Yao Tandong, Pu Jianchen, *et al.* Energy budget at ELA on Dongkemadi Glacier in the Tonggula Mts. Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(1): 10-19. [张寅生, 姚檀栋, 蒲健辰, 等. 唐古拉山冬克玛底冰川平衡线高度附近的能量平衡[J]. 冰川冻土, 1996, 18(1): 10-19.]
- [63] Kang Ersi, Ohmura A. A parameterized energy balance model of glacier melting on the Tian Mountain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1994, (5): 467-476. [康尔泗, Ohmura A. 天山冰川消融参数化能量平衡模型[J]. 地理学报, 1994, (5): 467-476.]
- [64] Kang Ersi, Ohmura A. Energy, water and mass balance and runoff models in Tianshan glacier-affected area[J]. *Science in China (Series B)*, 1994, 24(9): 983-991. [康尔泗, Ohmura A. 天山冰川作用流域能量、水量和物质平衡及径流模型[J]. 中国科学:B辑, 1994, 24(9): 983-991.]
- [65] Ohata T, Zhongyuan B, Lingfu D. Heat balance study on Glacier No. 1 at head of Urumqi River, Tianshan Mountains, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1989, 11(4): 298-310.
- [66] Chen Jizu, Qin Xiang, Wu Jinkui, *et al.* Simulating the energy and mass balances on the Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 38-47. [陈记祖, 秦翔, 吴锦奎, 等. 祁连山老虎沟12号冰川表面能量和物质平衡模拟[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 38-47.]
- [67] Li Jing, Liu Shiyin, Zhang Yong. Snow surface energy balance over the Ablation period on the Keqicar Baxi Glacier in the Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 366-373. [李晶, 刘时银, 张勇. 天山南坡科契卡尔巴西冰川消融期雪面能量平衡研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 366-373.]
- [68] Bintanja R. The local surface energy balance of the Ecology Glacier, King George Island, Antarctica: Measurements and modelling[J]. *Antarctic Science*, 1995, 7(3): 315-325.
- [69] Hogg I G G, Paren J G, Timmis R J. Summer heat and ice balances on Hodges Glacier, South Georgia, Falkland Islands Dependencies[J]. *Journal of Glaciology*, 1982, 28(99): 221-238.
- [70] Wagnon P, Ribstein P, Francou B, *et al.* Annual cycle of energy balance of Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia[J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 1999, 104(D4): 3 907-3 923.
- [71] Sicart J E, Wagnon P, Ribstein P. Atmospheric controls of the heat balance of Zongo Glacier (16°S, Bolivia) [J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 2005, 110(D12): 81-97.
- [72] Wagnon P, Sicart J E, Berthier E, *et al.* Wintertime high-altitude surface energy balance of a Bolivian Glacier, Illimani, 6340 m above sea level[J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 2003, 108(D6): 315-323.
- [73] Mölg T, Hardy D R. Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on Kilimanjaro[J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 2004, 109(D16): 1 399-1 405.
- [74] Yang W, Guo X, Yao T, *et al.* Summertime surface energy budget and ablation modeling in the ablation zone of a maritime Tibetan glacier[J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 2011, 116(D14), doi: 10.1029/2010JD015183.
- [75] Ohata T, Ishikawa N, Kobayashi S, *et al.* Heat balance at the snow surface in a katabatic wind zone, East Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 1985, 6(1): 174-177.
- [76] King J C, Anderson P S. Heat and water vapour fluxes and scalar roughness lengths over an Antarctic ice shelf[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 69(1): 101-121.
- [77] Orheim O, Lucchitta B K. Numerical analysis of Landsat thematic mapper images of Antarctica: Surface temperatures and physical properties[J]. *Annals of Glaciology*, 1988, 11: 109-120.
- [78] Winther J G, Elvehøy H, Bøggild C E, *et al.* Melting, runoff and the formation of frozen lakes in a mixed snow and blue-ice field in Dronning Maud Land, Antarctica [J]. *Journal of Glaciology*, 1996, 42(141): 271-278.
- [79] Fujii Y, Kusunoki K. The role of sublimation and condensation in the formation of ice sheet surface at Mizuho Station, Antarctica [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87(C6): 4 293-4 300.
- [80] Cline D W. Effect of seasonality of snow accumulation and melt on snow surface energy exchanges at a continental alpine site[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, 36(1): 32-51.
- [81] Nakai Y, Sakamoto T, Terajima T, *et al.* Energy balance above a boreal coniferous forest: A difference in turbulent fluxes between snow-covered and snow-free canopies [J]. *Hydrological Processes*, 1999, 13(4): 515-529.
- [82] Hayashi M, Hirota T, Iwata Y, *et al.* Snowmelt energy balance and its relation to Foehn Events in Tokachi, Japan[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2005, 83(5): 783-798.
- [83] Plüss C, Mazzoni R. The role of turbulent heat fluxes in the energy balance of high alpine snow cover[J]. *Hydrology Research*, 1994, 25(1/2): 25-38.
- [84] Harding R J. Exchanges of energy and mass associated with a melting snowpack[M]//Morris E M, eds. *Modelling Snowmelt-Induced Processes*. Wallingford UK: IAHS Press, 1986: 3-15.
- [85] Suzuki K, Ohta T, Kojima A, *et al.* Variations in snowmelt energy and energy balance characteristics with larch forest density on Mt Iwate, Japan: Observations and energy balance analyses[J]. *Hydrological Processes*, 1999, 13(17): 2 675-2 688.
- [86] Goodwin I D. Snow accumulation and surface topography in the katabatic zone of Eastern Wilkes Land, Antarctica[J]. *Antarctic Science*, 1990, 2(3): 235-242.
- [87] Pomeroy J W, Toth B, Granger R J, *et al.* Variation in surface energetics during snowmelt in a subarctic mountain catchment

- [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4(4): 702-719.
- [88] Zhang Y, Suzuki K, Kadota T, *et al.* Sublimation from snow surface in southern mountain Taiga of eastern Siberia[J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 2004, 109(D21): 2 161-2 170.
- [89] Kirchner P B. Snow Distribution over an Elevation Gradient and Forest Snow Hydrology of the Southern Sierra Nevada, California [D]. Merced: University of California, 2013.
- [90] Gray D M, Prowse T D. Snow and floating ice[M]//Maidment D R, eds. *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1993.
- [91] Suzuki K, Liston G E, Matsuo K. Estimation of continental-basin-scale sublimation in the Lena River Basin, Siberia[J]. *Advances in Meteorology*, 2015, (22): 1-14.
- [92] Strasser U, Bernhardt M, Weber M, *et al.* Is snow sublimation important in the alpine water balance? [J]. *The Cryosphere Discussions*, 2007, 1(2): 303-350.
- [93] Montesi J, Elder K, Schmidt R A, *et al.* Sublimation of intercepted snow within a subalpine forest canopy at two elevations[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(5): 763-773.
- [94] Golding D L, Swanson R H. Snow distribution patterns in clearings and adjacent forest[J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(13): 1 931-1 940.
- [95] West A J. Snow evaporation and condensation[C]//Proceedings of the 27th Western Snow Conference, 1960: 66-74.
- [96] Wang Jiqiang, Wei Wenshou. Snow evaporation (condensation) observation experiment[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 1994, 17(3): 38-41. [王积强, 魏文寿. 雪面蒸发(凝结)的观测实验[J]. *沙漠与绿洲气象*, 1994, 17(3): 38-41.]
- [97] Lu Heng, Wei Wenshou, Liu Mingzhe, *et al.* The characteristic of energy budget on snow surface beneath Picea Schrenkianaforest in the west Tianshan Mountains of China during snowmelt period [J]. *Mountain Research*, 2015, 33(2): 173-182. [陆恒, 魏文寿, 刘明哲, 等. 融雪期天山西部森林积雪表面能量平衡特征[J]. *山地学报*, 2015, 33(2): 173-182.]
- [98] Nkemdirim L C. An empirical relationship between temperature, vapour pressure deficit and wind speed and evaporation during a winter chinook[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1991, 43(3): 123-128.
- [99] Golding D L. Calculated snowpack evaporation during Chinooks along the eastern slopes of the Rocky Mountains in Alberta[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, 17(11): 1 647-1 651.
- [100] Troendle C A, Leaf C F. Water Resources Evaluation Non-point Sources in Silviculture[M]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 1980: 173-173.
- [101] Frezzotti M, Gandolfi S, Urbini S. Snow megadunes in Antarctica: sedimentary structure and genesis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107 (D18), doi: 10. 1029/2001JD 000673.
- [102] Svoma B M. Canopy effects on snow sublimation from a Central Arizona Basin[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(1): 20-46.
- [103] Storck P, Kern T, Bolton S. Measurement of differences in snow accumulation, melt, and micrometeorology due to forest harvesting[J]. *Northwest Science*, 1999, 73(12): 87-101.
- [104] Gelfan A N, Pomeroy J W, Kuchment L S. Modeling forest cover influences on snow accumulation, sublimation, and melt[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(5): 785-803.
- [105] Pomeroy J W, Schmidt R A. The use of fractal geometry in modeling intercepted snow accumulation and sublimation[C]//Proceedings of the 50th Eastern Snow Conference, 1993: 1-10.
- [106] Li Huidong, Guan Dexin, Jin Changjie, *et al.* Measurement and estimation methods and research progress of snow evaporation in forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(12): 3 603-3 609. [李辉东, 关德新, 金昌杰, 等. 森林积雪蒸发测算方法及研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(12): 3 603-3 609.]
- [107] Pomeroy J W, Gray D M, Shook K R, *et al.* An evaluation of snow accumulation and ablation processes for land surface modelling [J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12(15): 2 339-2 367.
- [108] Pomeroy J W, Dion K. Winter radiation extinction and reflection in a boreal pine canopy: Measurements and modelling[J]. *Hydrological Processes*, 1996, 10(12): 1 591-1 608.
- [109] Suzuki K, Nakai Y, Ohta T, *et al.* Effect of snow interception on the energy balance above deciduous and coniferous forests during a snowy winter[M]//Water Resources Systems-water Availability and Global Change. Wallingford: IAHS Press, 2003: 309-317.
- [110] Lundberg A, Koivusalo H. Estimating winter evaporation in boreal forests with operational snow course data[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(8): 1 479-1 493.
- [111] Nakai Y, Sakamoto T, Terajima T, *et al.* Evaporation of snow intercepted by a todo-fir forest (I): Water balance measurements [J]. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 1995, 77(6): 581-588.
- [112] Varhola A, Coops N C, Bater C W, *et al.* The influence of ground-and lidar-derived forest structure metrics on snow accumulation and ablation in disturbed forests[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2010, 40(4): 812-821.
- [113] Li Huidong, Guan Dexin, Wang Anzhi, *et al.* Characteristics of evaporation over broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountains, Northeast China during snow cover period in winter [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4): 1 039-1 046. [李辉东, 关德新, 王安志, 等. 长白山阔叶红松林冬季雪面蒸发特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1 039-1 046.]
- [114] Bernier P Y. Wind speed and snow evaporation in a stand of juvenile lodgepole pine in Alberta[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20(3): 309-314.
- [115] Doty R D, Johnston R S. Comparison of gravimetric measurements and mass transfer computations of snow evaporation beneath selected vegetation canopies[C]//Proceedings of the 37th Western Snow Conference, 1969: 57-62.

- [116] Lü Xiaohui. Some Investigations into Wind Snow Two Phase Flow in Wind Tunnel [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. [吕晓辉. 风雪两相流的风洞实验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.]
- [117] Sugiura K, Ohata T. Large-scale characteristics of the distribution of blowing-snow sublimation [J]. *Annals of Glaciology*, 2008, 49(1): 11-16.
- [118] Kane D L, Hinzman L D, Benson C S, *et al.* Snow hydrology of a headwater Arctic Basin: 1. Physical measurements and process studies [J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(6): 1 099-1 109.
- [119] Tang Xueyuan, Sun Bo, Li Yuansheng, *et al.* Some recent progress of Antarctic ice sheet research [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(11): 1 210-1 218. [唐学远, 孙波, 李院生, 等. 南极冰盖研究最新进展 [J]. 地球科学进展, 2009, 24(11): 1 210-1 218.]
- [120] Liston G E, Sturm M. Winter precipitation patterns in arctic Alaska determined from a blowing-snow model and snow-depth observations [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2002, 3(6): 646-659.
- [121] Berg N H. Blowing snow at a Colorado alpine site: Measurements and implications [J]. *Arctic and Alpine Research*, 1986, 18(2): 147-161.
- [122] Bintanja R. The contribution of snowdrift sublimation to the surface mass balance of Antarctica [J]. *Annals of Glaciology*, 1998, 27(1): 251-259.
- [123] Dai Xiaqing. Numerical Simulation of Drifting Snow Sublimation in the Saltation Layer [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015. [代晓晴. 跃移层风吹雪升华的数值模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.]
- [124] Li Hongyi, Wang Jian, Hao Xiaohua. Influence of blowing snow on snow mass and energy exchanges in the Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1 084-1 090. [李弘毅, 王建, 郝晓华. 祁连山区风吹雪对积雪质能过程的影响 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1 084-1 090.]
- [125] Zhou J, Pomeroy J W, Zhang W, *et al.* Simulating cold regions hydrological processes using a modular model in the west of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 509(4): 13-24.
- [126] Bintanja R. Snowdrift sublimation in a katabatic wind region of the Antarctic ice sheet [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(11): 1 952-1 966.
- [127] Déry S J, Yau M K. Large-scale mass balance effects of blowing snow and surface sublimation [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002, 107 (D23), doi: 10. 1029/2001JD001251.
- [128] Mann G W. Surface Heat and Water Vapor Budgets over Antarctica [D]. UK: University of Leeds, 1998.
- [129] Xiao J, Bintanja R, Déry S J, *et al.* An intercomparison among four models of blowing snow [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 97(1): 109-135.
- [130] Mann G W, Anderson P S, Mobbs S D. Profile measurements of blowing snow at Halley, Antarctica [J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 2000, 105(D19): 24 491-24 508.
- [131] Huang N, Dai X, Zhang J. The impacts of moisture transport on drifting snow sublimation in the saltation layer [J]. *Atmospheric Chemistry-Physics*, 2016, 16(12): 7 523-7 529.
- [132] Dai X, Huang N. Numerical simulation of drifting snow sublimation in the saltation layer [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(6 611), doi: 10.1038/srep06611.
- [133] Zwaafink C D G, Löwe H, Mott R, *et al.* Drifting snow sublimation: A high-resolution 3-D model with temperature and moisture feedbacks [J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 2011, 116(D16): 971-978.
- [134] Déry S J, Yau M K. Simulation of blowing snow in the Canadian Arctic using a double-moment model [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(2): 297-316.

Advances in the Measurement and Calculation Results and Influencing Factors of the Sublimation of Ice and Snow^{*}

Guo Shuhai^{1,2}, Chen Rensheng^{1*}, Han Chuntan¹, Liu Guohua¹,
Song Yaoxuan¹, Yang Yong¹, Liu Zhangwen¹, Liu Junfeng¹

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As an important exchange process of water and heat between the cryosphere and the atmosphere, snow and glacier sublimation is a principal pathway of moisture content loss of cryosphere. The observations and simulations of snow and glacier sublimation for the process and influencing factors were conducted earlier in the Antarctic and the Arctic Pole, North America and northern Europe, and had made great progress. Based on the analysis of the sublimation of ice and snow and the latent heat of sublimation in different regions and climatic conditions, the influencing factors to sublimation of ice and snow were analyzed. Although sublimation of ice and snow is an important part of regional hydrological process and energy budget balance, under humid climate conditions, sublimation of ice and snow is inhibited. It is greatly affected by local topography (elevation, slope and aspect), vegetation and meteorological elements, resulting in large differences in reported sublimation of ice and snow. However, there are many factors that affect the sublimation, resulting in the obvious spatial and temporal differences of research results. The researches lack of long-term, systematic observation and research, and which has contributed to the lack of understanding in the water-heat process of snow and glacier. There are still great uncertainties and difficulties in this study that need to be overcome.

Key words: Sublimation of snow and glacier; Topography; Intercepted snow; Snowdrift.

* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China "Field observation on snow and glacier sublimation/evaporation in the cold alpine regions" (No. 41671029) and "Research on the water resource services of the cryosphere" (No. 41690141).

First author: Guo Shuhai (1986-), male, Yishui County, Shandong Province, Ph. D student. Research areas include snow and ice hydrology.

E-mail: guoshuhai@lzb.ac.cn

* **Corresponding author:** Chen Rensheng (1974-), male, Yishui County, Shandong Province, Professor. Research areas include hydrological observations and simulations in cold regions. **E-mail:** crs2008@lzb.ac.cn