

DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0090

LIU Jie, ZHANG Wei, XIA Jun, et al. Study of degree-day model from 2000 to 2016: the main progress and key issues [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 801–810. [刘洁, 张伟, 夏军, 等. 2000–2016 年度日模型的主要研究进展及关键问题 [J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 801–810.]

2000–2016 年度日模型的主要研究进展及关键问题

刘 洁¹, 张 伟², 夏 军¹, 沈永平², 康世昌²

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院
冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 积雪是冰冻圈重要的组成部分, 基于积雪消融量与气温之间显著的正线性关系假定建立的度日模型是模拟积雪消融量的有效工具。从经典度日模型、度日模型的改进(例如辐射数据的引入)、分布式度日模型以及遥感数据在度日模型中的应用等方面总结了 2000–2016 年度日模型的主要研究进展。同时, 考虑到影响度日模型的关键参数和变量, 系统总结了降水状态判断的温度阈值、度日因子、辐射系数的最新研究进展及其在度日模型中的使用。在变化环境下开展度日模型与遥感、GIS 技术相结合的协同研究, 是目前度日模型研究的主要方向。

关键词: 度日因子; 积雪; 积雪消融; 融雪量

中图分类号: F299.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2017)04-0801-10

0 引言

北半球积雪面积最大可到 0.46 亿 km², 占陆地面积的 46%^[1], 积雪是冰冻圈重要的组成部分。水文学、地理学等学科重视对积雪的研究, 2000 年成立的气候与冰冻圈计划(CliC)也把积雪作为核心研究对象之一^[2]。积雪与气候的关系密切, 一方面, 积雪对气候变化的响应极为敏感^[3]; 另一方面, 积雪作为一种特殊的下垫面, 具有高反照率、低热导率和大消融潜热等特殊的物理性质, 是影响近地层能量平衡的重要因子, 积雪的变化在一定程度上影响着全球气候系统^[4]。同时, 积雪融水是重要的淡水资源, 我国年均最大积雪水资源量约为 102.79 km³^[5]。在我国西北干旱区, 水资源匮乏, 积雪融水是春季地表水资源的主要来源^[5], 为包括长江、黄河、塔里木河等在内的我国主要河流提供补给; 积雪融水也为众多山前绿洲的发育和维系提供了水资源保障。

目前, 积雪水文过程的研究方法主要包括地面

观测、遥感监测与模型模拟等三种方法。地面观测为积雪水文过程的研究提供了珍贵的数据, 但点尺度上的观测往往不能反映研究区域的空间异质性, 且需要耗费巨大的人力与财力; 遥感监测有监测范围广、监测时间长的特点, 但无法提供积雪水文研究中的所有参数, 且遥感产品在尺度上往往不能满足模型的需要, 还需将遥感产品进行降尺度处理^[6]; 基于经验和物理机制构建的积雪水文模型则加深了对积雪水文物理过程的理解^[7], 是预报融雪径流、评估气候变化对寒区水资源影响的重要工具。

模型作为研究积雪水文过程的重要手段, 主要经历了由基于度日因子的概念模型到基于能量平衡的物理模型的过渡。度日模型以融雪量与气温存在显著的正线性关系假定为基础, 其主要目的在于计算融雪量^[8]。物理模型以能量与水量的平衡关系为基础: 考虑雪盖储热变化量、净辐射通量、感热通量、潜热通量、来自土壤的热通量和降雨所传送的热量等要素的能量平衡关系; 也考虑“降雨/积雪

收稿日期: 2016-12-15; 修订日期: 2017-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571028); 冰冻圈科学国家重点实验室开放基金(SKLCS-OP-2017-10); 冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFS201412)资助

作者简介: 刘洁(1993–), 女, 山西太原人, 2016 年在兰州大学获学士学位, 现为武汉大学在读硕士研究生, 从事水文水资源研究。

E-mail: liujie16@whu.edu.cn

通信作者: 夏军, E-mail: xiaj@igsrr.ac.cn

融水→径流”过程中的水量平衡关系^[9]。物理模型的区域不确定性比较小,兼顾了更多的能量项,并包括一些细致的雪层内部能量变化过程,但需要大量的分辨率数据对模型进行驱动和验证。而度日模型所需的气温数据容易获取、插值和预报,且该模型计算简单,在流域尺度上通常可以获得与物理模型相近的输出结果^[7],因此度日模型成为在山区流域模拟和预报融雪径流最重要的水文模型。度日模型自提出以来不断发展,在全球变化与对模拟结果的时空精度要求不断高的背景下,仍需进一步完善。为此,本文总结了2000–2016年度日模型的主要进展及关键问题,展望了度日模型的未来发展。

1 物理基础

度日模型的基本假设是融雪量与气温存在显著的正线性关系,度日模型一般形式为

$$M = \begin{cases} DDF \cdot (T - T_T) & T > T_T \\ 0 & T \leq T_T \end{cases} \quad (1)$$

式中: M 为融雪量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); DDF 为度日因子($\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为气温($^\circ\text{C}$); T_T 为融雪临界温度($^\circ\text{C}$)。

Ohmura^[10]指出,包括长波辐射与短波辐射在内的净辐射与感热通量是积雪消融的主要能量来源,长波辐射与感热通量为冰雪消融提供了约75%的能量,短波辐射为冰雪消融提供了约25%的能量。其中地表接收的大气长波辐射主要来源于近地表层,在近地表层气温是长波辐射的主要影响因素;同时,气温与短波辐射、感热通量也有较好的相关关系。因此,气温是一个比较理想的衡量冰雪表面综合能量状况的指标。研究者在世界各地对冰雪融水的研究也验证了这一基本假设的合理性。

2 度日模型的应用进展

2.1 引入能量项的改进度日模型

随着度日模型的发展,研究者开始在模型中引入太阳辐射因子,以提高模拟精度。

Hock^[11]首先在研究中引入太阳辐射因子,其改进后的模型为

$$M = \begin{cases} (MF + RF \cdot I) \cdot (T - T_T) & T > T_T \\ 0 & T \leq T_T \end{cases} \quad (2)$$

式中: MF 为消融因子($\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); RF 为辐射消融因子($\text{m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); I 为辐射项($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。

随后,Pellicciotti等^[12]在Hock的基础上,为分离温度、能量各自对融雪的贡献,将度日模型改进为加法形式,并在瑞士的冰川流域进行模拟,结果表明,在小时尺度上,改进的度日模型较传统度日模型模拟效果有显著提高。其改进后的模型为

$$M = \begin{cases} TF \cdot T + SRF(1 - \alpha) \cdot I & T > T_T \\ 0 & T \leq T_T \end{cases} \quad (3)$$

式中: TF 为温度因子($\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); SRF 为短波辐射消融因子($\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$); α 为积雪反照率; I 为入射短波辐射($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。

随后的研究中,引入辐射因子的改进度日模型的形式与式(3)基本一致。学者在世界各地的研究表明,引入辐射因子的改进度日模型往往可以提高模拟精度。Hock^[11]引入晴天直接辐射之后发现,在小时尺度上改进度日指数模型较传统度日模型有显著提高,模拟结果接近于能量平衡模拟结果。Kustas等^[13]研究表明,引入辐射因子后,SRM模型的评价系数比传统方法的评价系数提高近40%。卿文武等^[14]在天山科其喀尔巴西冰川消融估算的研究中对比了经典度日模型与改进的度日模型,结果表明,在200 m和100 m的海拔梯度下,改进的度日模型模拟结果优于传统的度日模型。Wheler等^[15]在加拿大圣伊莱亚斯山脉的两个冰川小流域应用了经典的度日模型与Hock^[11]提出的引入了净辐射的改进度日模型,研究结果表明:即使在无法精确输入气温的情况下,改进的度日模型也能很好地模拟日尺度与季节尺度的融雪过程,且改进的度日模型参数具有较好的空间可移植性,为无资料地区的融雪研究提供了新的思路。Fuchs等^[16]在热带Zongo冰川评估了融雪模块分别为经典度日模型、改进的度日模型的融雪-径流-物质平衡模型,结果表明,改进的度日模型可以很好地模拟径流与物质平衡,且改进的度日模型在热带地区具有适用性,不需要根据季节调整参数。Hulth等^[17]基于冰川上的逐时自动气象站观测数据与太阳辐射数据,开发了一种改进的分布式度日模型,并使用无线电探空资料计算气温直减率、辐射投射率指数,结果表明,气温与辐射对冰雪消融的影响较大,因此温度反演精度与太阳辐射数据精度的提高可以显著提高模型的模拟精度。Irvine-Fynn等^[18]在高纬北极地区,基于高时空分辨率的数据集,使用一种新的引入辐射的度日模型模拟径流,结果表明,改进的度日模型与能量平衡模型模拟精度相当。Li等^[19]在模拟塔里木流域的融雪径流时,使用基于度日因

子、辐射系数、产流系数的复合参数,取得了较好的模拟结果。这些研究结果均表明了辐射因子在融雪模拟中的重要性,在度日模型中引入辐射因子可以提高模型的模拟精度。

2.2 分布式度日模型

由于坡度、坡向、遮蔽等地形条件的影响,冰雪消融速率在空间上存在较大差异。为充分表达冰雪消融的空间差异,一些学者开展了对分布式度日模型的研究(表 1),Hock^[11]引入分布式度日模型,在 30 m × 30 m 的格网尺度进行研究,提高了模型模拟的结果;SRM 模型按 500 m 划分不同的高程带进行融雪模拟,成为模拟融雪最有效的经典模型^[20];Hulth 等^[17]开发了一个基于网格尺度的由逐时气温数据与直接太阳辐射驱动的改进温度指数模型,结果表明,在空间上对气温直减率与太阳辐射更好的估计可以提高模型的模拟精度;Pellicciotti 等^[21]提出了一个改进的温度指数模型,并讨论了该模型在分布式尺度的应用,同时比较了该模型在

点尺度、分布式尺度应用时的模拟效果差异;Jost 等^[22]在森林流域对比了基于温度指数的融雪模型、经典的度日模型、分布式水文模型,研究结果表明,对积雪分布信息的监测可以为改进温度指数模型的参数率定提供帮助;房世峰等^[23]基于遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术,设计和构建了一个融雪及产汇流过程全部基于栅格尺度的分布式融雪径流模型,并在新疆军塘湖流域对 2006 年春季典型融雪期内的洪水过程进行了模拟,得到了较高精度的模拟结果。

很多学者将改进的度日模型与空间分布式水文模型耦合,在栅格单元尺度或水文响应单元尺度模拟冰雪消融状况。Koboltschnig 等^[24]利用冰川融水模块为改进度日模型的空间分布式概念性水文模型(PREVAH),对阿尔卑斯山的冰川小流域进行冰雪融水模拟,并使用多源数据进行验证,研究结果表明在全流域尺度与海拔带尺度上都有较好的模拟结果;夏军等^[25]将度日模型与基于栅格的分布式水

表 1 主要分布式度日模型比较
Table 1 Comparison and summary of the main distributed degree-day models

模型名称	模型分类	消融算法	时空分辨率	使用的遥感数据	代表应用地区	代表应用者及参考文献
SWAT	半分布式物理模型	度日因子法	逐日/逐月 划分 HRU	/	黑河上游、乌鲁木齐河流域、黄河源区、开都河流域	王中根等 ^[41] 、赵杰等 ^[42] 、郝振纯等 ^[43] 、白淑英等 ^[44]
HBV	半分布式概念模型	度日因子法	逐日 划分高程带	/	冬克拉玛底河流域	Gao 等 ^[45]
SRM	半分布式概念模型	度日因子法	逐日 500 m 高程带	MODIS/Envisat ASAR/ NOAA/Landsat/AWiFS/ SMMR/GLDAS/FY-2D	祁连山黑河流域、阿尔卑斯流域、幼发拉底河和底格里斯河流域	Kustas 等 ^[13] 、Wang 等 ^[20] 、Jain 等 ^[33] 、Tekeli ^[35]
SNOWMOD	半分布式概念模型	度日因子法	逐日 600 m 高程带	NOAA-AVHRR/ Terra/Aqua-MODIS	喜马拉雅山区	Jain 等 ^[33]
PREVAH	分布式概念模型	改进的度日因子法	逐日/逐时 500 m × 500 m	/	阿尔卑斯山区	Koboltschnig 等 ^[24]
DTVGM	分布式概念模型	度日因子法	逐日 500 m × 500 m	TRMM/Modis-LST	黑河上游 拉萨河流域	夏军等 ^[25] Ye 等 ^[39]
WaSiM-ETH	分布式物理模型	改进的度日因子法	逐时 100 m × 100 m	/	瑞士中部罗纳盆地	Klok 等 ^[27]
TOPKAPI	分布式物理模型	改进的度日因子法	逐时 100 m 高程带	MOD10A1.5	阿尔卑斯山区	Finger 等 ^[28]
J2000	分布式物理模型	改进的度日因子法	逐日 划分 HRU	/	喜马拉雅山区	Nepal 等 ^[29]
GBHM	分布式物理模型	度日因子法	逐时 150 m × 150 m	MODIS	八宝河流域	闫玉娜等 ^[36]

文模型 DTVGM 进行耦合,并在黑河干流获得了较好的径流模拟结果;Verbunt 等^[26]将改进的度日模型与基于栅格的分布式水文模型 WaSiM 进行耦合,并在瑞士高寒山区流域模拟了冰川融水对径流的贡献;Klok 等^[27]将包含太阳辐射的分布式温度指数模型与 WaSiM-ETH 进行耦合,研究结果表明,该模型可以很好地模拟罗纳盆地(瑞士中部)的高山亚盆地逐日、逐年的径流;Finger 等^[28]将改进的度日模型与基于物理过程的分布式水文模型 TOPKAPI 耦合,用以模拟阿尔卑斯山区未来气候变化情景下水资源的变化和不确定性以及对水利发电的影响;Nepal 等^[29]基于改进的度日模型开发了分布式物理水文模型 J2000,并应用于喜马拉雅山区中尺度流域冰川融水径流的模拟,同时评估了气候变化背景下下游水资源的可用性。

2.3 基于遥感数据的度日模型

高寒山区受到观测条件的限制,水文模型输入数据存在较大的不确定性,降低了模拟与预测融雪径流的精度。遥感作为可用于大尺度监测地球表面的新手段,克服了传统积雪参数点测量的不足,把传统的“点”测量方法获取的有限代表性的信息扩展为“面”信息,这使真正地在地表参数进行定量分析成为可能。尤其对于积雪参数,其高时间和空间动态性使得只有通过遥感手段才能获得精确的空间连续、时间连续的大范围动态地表参数,并为全球或区域尺度气候模式与水循环提供有效、定量的积雪参数。NOAA/AVHRR 传感器可提供每天的积雪分布数据,但其空间分辨率很低(1 km 左右)^[30]。随着更多可见光近红外传感器卫星(如 MODIS, Landsat 等)的发射,基于卫星的积雪遥感监测能力得到了发展,遥感在融雪模型中的应用日益广泛。主要表现在 RS 在积雪监测中的应用(雪盖、雪深等)、RS 反演模型中的参数(雪面反照率、雪面温度、土壤湿度、地表粗糙度等)等两方面^[31]。在度日积雪水文模型的研究中,研究者通常从遥感数据提取的积雪信息主要是积雪覆盖面积与雪水当量。

采用遥感数据对积雪面积进行监测,可以避免在进行融雪量估算时对无雪区的错误估算。Nagler 等^[32]在使用 SRM 模拟阿尔卑斯流域的融雪径流时,开发了基于遥感积雪覆盖产品与气象数据的通用数据同化方案,并对气象数据进行了降尺度处理,以匹配 MODIS 与 Envisat ASAR 的积雪产品,结果表明,其数据同化方案是有效的,融雪径流模拟具有较高的精度;Jain 等^[33]在使用 SNOWMOD

研究喜马拉雅流域融雪径流时,使用了 NOAA-AVHRR 与 Terra/Aqua-MODIS 遥感数据估算积雪覆盖面积,结果表明,在气候变暖的背景下,总径流量无显著变化,但融雪径流发生的时间提前了,季风季的融雪径流量下降了;Aggarwal 等^[34]在使用 SRM 模拟巴吉拉蒂河流域模拟融雪径流时,在不同的研究时间分别使用了 MODIS、Landsat 和 AWiFS 遥感数据提取积雪覆盖面积,得到了较好的模拟结果;Tekeli^[35]在研究幼发拉底河和底格里斯河流域的融雪径流时,使用了 NOAA 和 MODIS 卫星图像提取 SRM 所需的积雪面积信息,也获得了有效的模拟结果。

也有研究者基于遥感数据提取了雪水当量信息。闫玉娜等^[36]在使用 GBHM 对八宝江流域的流域水文过程模拟中,使用经过去云处理的 MODIS 积雪面积比例产品,经过积雪衰减曲线转化为雪水当量,用来更新模型中的状态变量,显著提高了春季融雪径流的模拟精度;Tiwari 等^[37]使用了 SMMR 数据估算雪水当量与积雪覆盖面积,分析了喜马拉雅流域融雪的时空特征,并尝试改进融雪径流模型。

还有一些研究者从遥感数据中提取了其他信息,用以进行度日模型的模拟。Wu 等^[38]在研究阿尔泰山流域的融雪时,通过时间分辨率为 8 d、空间分辨率为 1 km 的 MODIS 数据提取积雪反照率,并使用 MOD10A1 每日积雪产品验证模型结果。Ye 等^[39]使用多源遥感数据,驱动耦合了融雪模块的 DTVGM 模拟融雪径流,刘晓林等^[40]使用多源遥感数据驱动 SRM 模拟融雪径流,为高寒无资料地区的水文研究提供了新思路。

3 度日模型中的关键参数与问题

3.1 降水状态判断的温度阈值

高寒山区地形复杂,降水类型多变。在垂直方向上,由于气温的海拔效应,高海拔区的固态降水比例远高于低海拔区;同时海拔又是影响降水状态温度阈值的关键要素,温度阈值存在随海拔增加而增大的变化趋势。海拔梯度对降水状态同时存在正负反馈,致使海拔对降水状态的影响更加复杂。降雨与降雪的径流过程明显不同,但靠常规气象观测难以描述不同地点/区块的降水类型。在大多数水文模型中,固液态降水分离的气温阈值是研究者自定的,这就要求研究者根据野外经验,或者有限的观测数据,甚至是通过模型调试来给定气温阈值,

由此导致降水输入与模型输出的不确定性。因此, 需要对度日模型中降水状态的温度阈值进行定量研究。

基于临界气温/露点温度的参数化方法被广泛应用^[46], 当前大多数水文模型采用临界气温法来分离降雨和降雪: 著名的分布式水文模型采用双临界气温指数法进行固液态降水分离: 即当气温高于上临界气温值时为降雨, 低于下临界气温时为降雪, 气温介于两临界气温之间则按线性插值计算^[47], 这种方法也见于修正 HBV 模型^[48] 和 DWHC 模型^[46] 等中。在其它常用的水文模型中, 往往采用单临界气温指数法, 即固液态降水分离仅采用一个临界气温值^[49–52]。中国高寒区缺乏系统的临界温度的观测和统计结果, 研究者往往根据局地情况调整温度阈值。此外, 也有研究者利用月降水比率分离法作为分离固液态降水的补充方法^[53]。有学者对临界气温的参数化方案进行了研究, 2010 年韩春坛等^[53] 根据中国气象局基本/基准气象站资料, 基于散点图人工判读, 获取了中国陆地范围内固液态降水分离的单临界日平均气温, 并对单临界气温法和双临界气温法的适用性进行了研究, 结果表明, 单临界气温法在中国适用效果较好, 而双临界气温法只适用于干旱地区; 随后, Chen 等^[54] 利用概率统计对其进行了校准, 并补充了中国固液态降水分离的临界日平均露点温度; 2014 年, Ding 等^[55] 基于湿球温度、相对风速、地表高程等提出了判别降水类型的参数化方案; Liu 等^[56] 根据葫芦沟流域的实测资料, 研究发现, 在日尺度上降雨、降雪的临界温度是 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 发生雨加雪的气温范围为 $0\sim 7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$; 在半小时尺度上, 降雨时气温高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 降雪时气温低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 发生雨夹雪时气温在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近波动; 2017 年, 张雪婷等^[57] 运用概率保证法计算了天山地区固液态降水分离的阈值温度为 $1.36\sim 5.48\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.2 度日因子

一些研究者认为, 度日因子的年际变化和空间变化不明显, 度日模型在区域内其他冰川应用时可不再重新率定参数^[58–62]。而另一些研究者认为, 度日因子会随着地形、环境等条件的变化而改变, 尤其是在山区, 坡度、坡向、山体遮挡等地形因素对冰川消融的影响很明显, 导致度日因子也随之不断变化, 统一参数条件下各类消融模型(含能量平衡模型)在区域内很难保证预测结果的精度^[63]。学者们基于实测资料, 研究了各地的度日因子, 为

度日模型中度日因子的确定提供了参考(表 2)。

张勇等^[64] 根据科其卡尔巴契冰川 2003 年的观测资料, 分析了该冰川度日因子的空间变化规律及其影响因素, 结果表明, 各海拔高度上的度日因子, 介于 $2.0\sim 9.7\text{ mm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间变化, 平均值为 $5.7\text{ mm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 与青藏高原各冰川及其它地区冰川相比较小; 度日因子随着海拔的增高而递增, 随平均气温的升高而递减; 由于冰面状况复杂, 度日因子变化幅度较大, 裸冰区的度日因子明显大于表碛覆盖区; 此外人为测量误差、反照率、地形等对度日因子的影响也不容忽视。张勇等^[63] 还根据中国西部不同地区数十条冰川的短期考察和观测资料, 分析了西部冰川度日因子的空间变化特征, 结果表明: 由于青藏高原及其周围地区独特的气候和热量条件, 西部冰川度日因子具有明显的区域特征, 西部冰川的度日因子由西北向东南逐渐增大, 这与中国西部冰川的气候环境变化趋势是一致的, 即在干冷的气候条件下度日因子较小, 而在暖湿的气候条件下度日因子较大; 在同一冰川上, 度日因子的空间变化较为明显; 从冰川类型来看, 相较极大陆型及亚大陆型冰川, 海洋型冰川的度日因子较大。谯程骏等^[65] 基于实测资料, 计算并分析了唐古拉山冬克拉玛底冰川的冰度日因子与冰雪消融度日因子, 结果表明, 度日因子随着海拔的增加而递增。吴倩如等^[66] 基于消融期的物质平衡和气象观测资料, 计算了青藏高原念青唐古拉峰北坡纳木错流域扎当冰川 2007 和 2008 年冰川冰和雪的度日因子值, 并分析了冰川度日因子的时空变化及影响因素, 结果表明: 扎当冰川雪的度日因子值为 $5.3\text{ mm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 不同海拔冰的度日因子在 $4.0\sim 14.0\text{ mm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间, 平均为 $9.2\text{ mm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$; 冰的度日因子值随着海拔的升高有所下降, 但季节变化规律不明显。刘伟刚等^[67] 根据喜马拉雅山珠穆朗玛峰绒布冰川消融资料和同期气温数据, 分析了该冰川度日因子时空变化, 研究结果显示绒布冰川度日因子随海拔升高而增加。崔玉环等^[68] 基于乌鲁木齐河源 1 号冰川 22 年的物质平衡花杆观测资料和大西沟气象站气象资料, 分析了该冰川度日因子的时空变化规律及其影响因素。结果表明: 时间尺度上, 融雪度日因子年际变化不大, 融冰度日因子随年际变化有增加趋势, 且这种增加趋势在冰川中下部要比冰川上部明显; 空间尺度上, 随海拔升高, 度日因子具有明显的下降趋势。

表 2 中国西部不同冰川度日因子

Table 2 A summary of the glaciers in western China, on which degree-day factors (DDF) had been observed $\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

山区	冰川	DDF _{ice}	DDF _{snow}	海拔/m	时段	文献来源
天山	乌鲁木齐河源 1 号冰川西支	8.5		3 831 ~ 3 945	1986/1993	[69]
	乌鲁木齐河源 1 号冰川东支	7.3		3 754 ~ 3 898	1986/1988	[69]
			3.1	4 048	1986/1993	[69]
	科其卡尔巴契冰川	4.5		3 347	2003-06-28/09-12	[63]
		7.0		4 216	2003-07-11/09-13	[63]
	琼台兰冰川	4.5		3 675	1978-06-17/07-31	[63]
		7.3		4 100	1978-06-25/08-14	[63]
		8.6		4 200	1978-06-21/07-31	[63]
			3.4	4 400	1978-06-21/08-11	[63]
横断山	海螺沟冰川	5.0		3 301	1982-08-24/1983-08	[63]
	白水河 1 号冰川	13.3		4 600	1982-06-23/08-30	[63]
			5.9	4 800	1982-06-26/07-11	[63]
	大贡巴冰川	13.2		4 540	1982-09-20/1983-09-22	[63]
	小贡巴冰川	12.0		4 550	1982-07-15/1983-07-15	[63]
喀喇昆仑山	巴托拉冰川	3.4		2 780	1975-06/08	[63]
	特拉木坎力冰川	5.9		4 630	1987-06-25/09-07	[63]
		6.4		4 650	1987-06-24/09-07	[63]
	切尔干布拉克冰川	2.6		4 750	1960-06-06/07-30	[63]
	洋布拉克冰川	4.3		4 800	1987-07-01/07-05	[63]
昆仑山	煤矿冰川	3.0		4 840	1989-05-07/09-07	[63]
	哈龙冰川	4.7		4 616	1981-06-15/06-28	[63]
		3.6		4 900	1981-06-14/06-27	[63]
唐古拉山	小冬克玛底冰川	13.8		5 425 ~ 5 475	1993-07/08	[70]
	小冬克玛底冰川	9.9 ~ 16.1		5 460 ~ 5 710	2008	[65]
	大冬克玛底冰川	8.7 ~ 11.6		5 330 ~ 5 520	2008	[65]
	小冬克玛底冰川		8.5	5 650 ~ 5 710	2008	[65]
	扎当冰川	9.2		5 580 ~ 5 660	2007-06/09; 2008-07/09	[66]
			5.3	5 580 ~ 5 660	2007-09/10; 2008-06/07	[66]
祁连山	七一冰川	7.2		4 305 ~ 4 619	2002-07/08	[70]
喜马拉雅山	抗物热冰川	9.0		5 700 ~ 6 000	1993-07-20/08-25	[63]
	中绒布冰川	3.3		5 260	2009-05-15/06/14	[67]
					2009-08-23/10-17	
	东绒布冰川	8.2		5 350	1959-07-08/07-20	[67]
		23.2		5 450	1959-03-25/06-19	[67]
		46.4		5 550	1959-05-15/06-09	[67]
		42.1		5 750	2009-06-10/06-14	[67]

3.3 辐射系数

在改进的度日模型中,辐射系数作为一个经验参数,其选择直接影响了融雪径流模拟的结果。

Heynen 等^[71]分析了改进度日模型冰川、碎屑覆盖的冰川在白天、夜间、晴天、阴天四种情况下参数的敏感性,结果表明,辐射因子是改进度日模型中

最敏感的参数。在多数研究中,研究者往往基于一个站点的气象观测数据与能量平衡模型的模拟结果,使用优化算法率定辐射系数,然后再运用于其他气象观测站点,以得到较好的模拟效果。Arce^[72]在研究热带安第斯山脉流域的融雪径流时,使用优化算法,将辐射因子率定为 $0.022 \text{ cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。Pellicciotti 等^[12]在研究瑞士 Haut 流域的冰川径流时,将辐射因子率定为 $0.0094 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。Carenzo 等^[59]研究了以下四种情况下辐射系数的可移植性:(1) 同时间段内同一冰川的不同位置;(2) 同一年中不同研究时段内同一冰川的同一位置,其中不同时段划分依据为不同的表面特性(雪、冰)和不同的天气类型(晴天、多云);(3) 不同年份同一冰川的同一位置;(4) 不同年份的其他冰川。结果表明,辐射系数在不同冰川间的变化较小,而辐射系数在同一冰川、不同的气象条件下有一定的变化,例如晴天的辐射系数比阴天的辐射系数大。

4 总结与展望

度日模型是在无资料地区或缺资料地区模拟融雪的有效工具。2000–2016 年,研究者通过在度日模型中引入辐射因子,开展分布式度日模型研究,在度日模型中使用遥感数据等方式进一步提高了度日模型的模拟精度。同时,研究者在度日因子的参数化方案研究上也做了许多有益的工作。在全球变化与对模拟结果的时空精度要求不断提高的背景下,度日模型可从以下方面继续完善。

加强对遥感技术与水文模型的集成和从遥感数据中提取水文数据方法的研究。在高寒无资料地区或缺资料地区通常很难根据实测资料建立起融雪-降雨-径流关系,从遥感及地理信息中获取的具有物理意义的参数就成了径流模拟和预报的有效手段之一。通过水文-遥感耦合模型的研究,充分利用遥感提供的 DEM、土地覆被、雪盖等空间信息,以提高缺资料地区水文模拟的精度,是未来度日模型发展的重要方向。

开展变化环境下流域水循环过程、区域水资源形成与演变规律的研究。如何在变化环境下对融雪进行准确地模拟和预测是一个研究热点,将大气环流模型(GCM)与度日模型进行耦合是解决这一问题的有效途径,但目前陆气耦合还面临尺度问题,网格分布非均匀性等关键问题等,这要求研究者进行多学科联合研究,以分布式度日模型为基础,结

合大气和陆面过程深入开展大气模式与水文模型的耦合,研究大气植被土壤水文系统的交互影响,并借助遥感技术、GIS 和四维数据同化方法,发展新一代的大气-陆面-水文过程耦合模型,以在全球变化背景下,提高径流模拟和预报的精度。

参考文献(References):

- [1] Li Jing. Response of snow cover to climate change in Tarim River Basin and simulation of snowmelt runoff in mountainous watershed[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011. [李晶. 塔里木河流域积雪对气候变化的响应及其山区流域融雪径流模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.]
- [2] Qin Dahe, Xiao Cunde, Ding Yongjian, et al. Progress on cryospheric studies by international and Chinese communities and perspectives[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6): 649–656. [秦大河, 效存德, 丁永建, 等. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 649–656.]
- [3] Li Xiangying, Ding Yongjian, Ye Baisheng, et al. Changes in physical features of Glacier No. 1 of the Tianshan Mountains in response to climate change[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(26): 2820–2827. [李向应, 丁永建, 叶柏生, 等. 天山 1 号冰川成冰带和积雪特征对气候变化的响应[J]. 科学通报, 2011, 56(19): 1583.]
- [4] Wang Zilong, Fu Qiang, Jiang Qiuxiang, et al. Advances in water and heat transfer mechanism and snow model[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(3): 6–10. [王子龙, 付强, 姜秋香, 等. 积雪水热迁移机理与模型研究进展[J]. 水文, 2016, 36(3): 6–10.]
- [5] Che Tao, Li Xin. Spatial distribution and temporal variation of snow water resources in China during 1993–2002[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(1): 64–67. [车涛, 李新. 1993–2002 年中国积雪水资源时空分布与变化特征[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 64–67.]
- [6] Sturm M. White water: fifty years of snow research in WRR and the outlook for the future[J]. Water Resources Research, 2015, 51(7): 4948–4965.
- [7] Hock R. Temperature index melt modelling in mountain areas[J]. Journal of Hydrology, 2003, 282(1/2/3/4): 104–115.
- [8] Yong, Liu Shiyin. Progress of the application of degree-day model to study glaciers and snow cover[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(1): 101–107. [张勇, 刘时银. 度日因子模型在冰川与积雪研究中的应用进展[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 101–107.]
- [9] Zilaibu Abulaiti, Abudu Shalamu, Saydi Muattar, et al. A review on the application of snowmelt runoff model[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2012, 29(2): 235–239. [孜来布·阿不来提, 阿不都·沙拉木, 穆艾塔尔·赛地, 等. 融雪径流模型应用研究综述[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2012, 29(2): 235–239.]
- [10] Ohmura A. Physical basis for the temperature-based melt-index method[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 40(4): 753–761.
- [11] Hock R. A distributed temperature-index ice-and snowmelt model including potential direct solar radiation[J]. Journal of Glaciology, 1999, 45(149): 101–111.
- [12] Pellicciotti F, Brock B, Strasser U, et al. An enhanced tempera-

- ture-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Switzerland[J]. *Journal of Glaciology*, 2005, 51(175): 573 – 587.
- [13] Kustas W P, Rango A, Uijlenhoet R. A simple energy budget algorithm for the snowmelt runoff model[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(5): 1515 – 1527.
- [14] Qing Wenwu, Chen Rensheng, Liu Shiyin, et al. Research and application of two kinds of temperature-index model on the Koxkar Glacier[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(4): 409 – 416. [卿文武, 陈仁升, 刘时银, 等. 两类度日因子模型在天山科其喀尔巴西冰川消融估算中的应用[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(4): 409 – 416.]
- [15] Wheler B A, Flowers G E. Spatially distributed temperature-index melt modelling of glaciers in the Donjek Range, St. Elias Mountains, Yukon Territory [C]// AGU Fall Meeting Abstracts, 2008, 244(6): 709 – 716.
- [16] Fuchs P, Asaoka Y, Kazama S. Estimation of glacier melt in the tropical Zongo with an enhanced temperature-index model[J]. *Journal of Japan Society of Civil Engineers: Series B1*, 2013, 69(1/2): 310 – 313.
- [17] Hulth J, Hock R M, Røstad C. An enhanced distributed temperature-index melt model including radiosonde data and solar radiation[C]// AGU Fall Meeting, San Francisco, December 14 – 18, 2009.
- [18] Irvine-Fynn T D L, Hanna E, Barr N E, et al. Examination of a physically based high-resolution distributed Arctic temperature-index melt model, on Midre Lovénbreen, Svalbard[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 28(1): 134 – 149.
- [19] Li Xingong, Williams M W. Snowmelt runoff modelling in an arid mountain watershed, Tarim Basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(19): 3931 – 3940.
- [20] Wang Jian, Li Shuo. Effect of climatic change on snowmelt runoffs in mountainous regions of inland rivers in Northwestern China[J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2006, 49(8): 881 – 888.
- [21] Pellicciotti F, Brock B, Strasser U, et al. The distributed application of an enhanced temperature-index melt model including albedo and global radiation[C]// AGU Fall Meeting, San Francisco, December 8 – 12, 2003.
- [22] Jost G, Moore R D, Smith R, et al. Distributed temperature-index snowmelt modelling for forested catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420(7): 87 – 101.
- [23] Fang Shifeng, Pei Huan, Liu Zhihui, et al. Study on the distributed snowmelt runoff process based on RS and GIS[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(4): 655 – 662. [房世峰, 裴欢, 刘志辉, 等. 遥感和 GIS 支持下的分布式融雪径流过程模拟研究[J]. *遥感学报*, 2008, 12(4): 655 – 662.]
- [24] Koboltschnig G, Holzmann H, Schner W, et al. Potential of a water balance model with high temporal resolution for the distributed modelling of ice-and snowmelt processes at high elevated sites[C]// Proceedings of the 63rd Eastern Snow Conference, Delaware USA, 2006: 19 – 63.
- [25] Xia Jun, Wang Gangsheng, Lü Aifeng, et al. A research on distributed time variant gain modeling[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 789 – 796. [夏军, 王纲胜, 吕爱锋, 等. 分布式时变增益流域水循环模拟[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 789 – 796.]
- [26] Verbunt M, Gurtz J, Jasper K, et al. The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 282(1/2/3/4): 36 – 55.
- [27] Klok E J, Jasper K, Roelofsma K P, et al. Distributed hydrological modelling of a heavily glaciated Alpine river basin[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2001, 46(4): 553 – 570.
- [28] Finger D, Pellicciotti F, Konz M, et al. The value of glacier mass balance, satellite snow cover images, and hourly discharge for improving the performance of a physically based distributed hydrological model[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(7): 2379 – 2392.
- [29] Nepal S, Krause P, Fligel W A, et al. Understanding the hydrological system dynamics of a glaciated alpine catchment in the Himalayan region using the J2000 hydrological model[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(3): 1329 – 1344.
- [30] Shi Jiancheng, Xiong Chuan, Jiang Lingmei. Review of snow water equivalent microwave remote sensing[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2016, 59(4): 731 – 745. [施建成, 熊川, 蒋玲梅. 雪水当量主被动微波遥感研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(4): 529 – 543.]
- [31] Zhao Qiudong, Liu Zhihui, Qin Rongmao, et al. Research advance of snowmelt model[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2007, 44(6): 734 – 739. [赵求东, 刘志辉, 秦荣茂, 等. 融雪模型研究进展[J]. *新疆农业科学*, 2007, 44(6): 734 – 739.]
- [32] Nagler T, Rott H, Malcher P, et al. Assimilation of meteorological and remote sensing data for snowmelt runoff forecasting[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1408 – 1420.
- [33] Jain S K, Goswami A, Saraf A K. Assessment of snowmelt runoff using remote sensing and effect of climate change on runoff[J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(9): 1763 – 1777.
- [34] Aggarwal S P, Thakur P K, Nikam B R, et al. Integrated approach for snowmelt run-off estimation using temperature index model, remote sensing and GIS[J]. *Current Science*, 2014, 106(3): 397 – 407.
- [35] Tekeli A E. Operational hydrological forecasting of snowmelt runoff by remote sensing and geographic information systems integration[D]. Ankara, Turkey: Middle East Technical University, 2005.
- [36] Yan Yuna, Che Tao, Li Hongyi, et al. Using snow remote sensing data to improve the simulation accuracy of spring snowmelt runoff: take Babao River basin as an example[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 211 – 221. [闫玉娜, 车涛, 李弘毅, 等. 使用积雪遥感面积数据改善山区春季融雪径流模拟精度[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 211 – 221.]
- [37] Tiwari S, Kar S C, Bhatla R. Examination of snowmelt over Western Himalayas using remote sensing data[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 125(1): 227 – 239.
- [38] Wu Xuejiao, Shen Yongping, Wang Ninglian, et al. Coupling the WRF model with a temperature index model based on remote sensing for snowmelt simulations in a river basin in the Altay Mountains, north-west China[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(21): 3967 – 3977.
- [39] Ye Aizhong, Duan Qingyun, Zeng Hongjuan, et al. A distributed time-variant gain hydrological model based on remote sensing[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(3): 222 – 230.
- [40] Liu Xiaolin, Yang Shengtian, Zhao Changsen, et al. The snowmelt runoff model based on multi-source remote sensing studied and applied in ungauged basins[J]. *Remote Sensing*

- Technology and Application, 2015, 30(4): 645–652. [刘晓林, 杨胜天, 赵长森, 等. 多源遥感驱动的 SRM 模型在缺水地区的研究及应用[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 645–652.]
- [41] Wang Zhonggen, Liu Changming, Huang Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe basin[J]. Progress in Geography, 2003, 22(1): 79–86. [王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79–86.]
- [42] Zhao Jie, Xu Changchun, Gao Shentong, et al. Hydrological modeling in the Ürtmqi River basin based on SWAT[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 666–674. [赵杰, 徐长春, 高沈瞳, 等. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河流域径流模拟[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 666–674.]
- [43] Hao Zhenchun, Zhang Yueguan, Yang Chuanguo, et al. Effects of topography and snowmelt on hydrologic simulation in the Yellow River's source region[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 311–318. [郝振纯, 张越关, 杨传国, 等. 黄河源区水文模拟中地形和融雪影响[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 311–318.]
- [44] Bai Shuying, Wang Li, Shi Jianqiao, et al. Runoff simulation for Kaidu River basin based on SWAT model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(9): 79–84. [白淑英, 王莉, 史建桥, 等. 基于 SWAT 模型的开都河流域径流模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 79–84.]
- [45] Gao Hongkai, He Xiaobo, Ye Baisheng, et al. Modeling the runoff and glacier mass balance in a small watershed on the Central Tibetan Plateau, China, from 1955 to 2008[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(11): 1593–1603.
- [46] Chen Rensheng, Lü Shihua, Kang Ersi, et al. A distributed water-heat coupled model for mountainous watershed of an inland river basin of Northwest China(I): model structure and equations[J]. Environmental Geology, 2008, 53(6): 1299–1309.
- [47] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain[J]. Water Resources Research, 1994, 30(6): 1665–1679.
- [48] Kang Ersi, Cheng Guodong, Lan Yongchao, et al. A model for simulating the response of runoff from the mountainous watersheds of inland river basins in the arid area of northwest China to climatic changes[J]. Scientia in China: Series D, 1999, 42(Suppl 1): 52–63. [康尔泗, 程国栋, 蓝永超, 金会军. 西北干旱区内陆河流域山径流变化趋势对气候变化响应模型[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 1999, (增刊 1): 47–54.]
- [49] Xu Liang, Wood E F, Lettenmaier D P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modification[J]. Global & Planetary Change, 1996, 13(1): 195–206.
- [50] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73–89.
- [51] Refsgaard J C, Seth S M, Bathurst J C, et al. Application of the SHE to catchments in India Part I: general results[J]. Journal of Hydrology, 1992, 140(1/2/3/4): 1–23.
- [52] Singh V P. Computer models of watershed hydrology[M]. Highlands Ranch, Colorado, USA: Water Resources Publications, 1995: 443–476.
- [53] Han Chuntan, Chen Rensheng, Liu Junfeng, et al. A discuss of the separating solid and liquid precipitations[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 249–256. [韩春坛, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 固液态降水分离方法探讨[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 249–256.]
- [54] Chen Rensheng, Liu Junfeng, Song Yaoyuan. Precipitation type estimation and validation in China[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(4): 917–925.
- [55] Ding Baohong, Yang Kun, Qin Jun, et al. The dependence of precipitation types on surface elevation and meteorological conditions and its parameterization[J]. Journal of Hydrology, 2014, 513(11): 154–163.
- [56] Liu Junfeng, Chen Rensheng. Discriminating types of precipitation in Qilian Mountains, Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2016, 5: 20–32.
- [57] Zhang Xueting, Li Xuemei, Gao Pei, et al. Separation of precipitation forms based on different methods in Tianshan mountainous area, Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(2): 235–244. [张雪婷, 李雪梅, 高培, 等. 基于不同方法的中国天山山区降水形态分离研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(2): 235–244.]
- [58] Shea J M, Moore R D, Stahl K. Derivation of melt factors from glacier mass-balance records in western Canada[J]. Journal of Glaciology, 2009, 55(189): 123–130.
- [59] Carenzo M, Pellicciotti F, Rimkus S, et al. Assessing the transferability and robustness of an enhanced temperature-index glacier-melt model[J]. Journal of Glaciology, 2009, 55(190): 258–274.
- [60] Pellicciotti F, Buergi C, Immerzeel W W, et al. Challenges and uncertainties in hydrological modeling of remote Hindu Kush-Karakoram-Himalayan(HKH) basins: suggestions for calibration strategies[J]. Mountain Research and Development, 2012, 32(1): 39–50.
- [61] Pellicciotti F, Helbing J, Rivera A, et al. A study of the energy balance and melt regime on Juncal Norte Glacier, semi-arid Andes of central Chile, using melt models of different complexity[J]. Hydrological Processes, 2008, 22(19): 3980–3997.
- [62] Ragetti S, Pellicciotti F. Calibration of a physically-based, fully distributed hydrological model in a glacierized basin: on the use of knowledge from glacio-meteorological processes to constrain model parameters[J/OL]. Water Resources Research, 2012, 48(3) [2016-01-23]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011WR010559/epdf>.
- [63] Zhang Yong, Liu Shiyin, Ding Yongjian. Spatial variation of degree-day factors on the observed glaciers in western China[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(1): 89–98. [张勇, 刘时银, 丁永建. 中国西部冰川度日因子的空间变化特征[J]. 地理学报, 2006, 61(1): 89–98.]
- [64] Zhang Yong, Liu Shiyin, Shangguan Donghui, et al. Study of the positive degree-day factors on the Koxkar Baqi Glacier on the south slope of Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 337–343. [张勇, 刘时银, 上官冬辉, 等. 天山南坡科其卡尔巴契冰川度日因子变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 337–343.]
- [65] Qiao Chengjun, He Xiaobo, Ye Baisheng. Study of the degree-day factors for snow and ice on the Dongkemadi Glacier, Tanggula Range[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 257–264. [谯程骏, 何晓波, 叶柏生. 唐古拉山冬克玛底冰川雪冰度日因子研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 257–264.]
- [66] Wu Qianru, Kang Shichang, Gao Tanguang, et al. The characteristics of the positive degree-day factors of the Zhadang Glacier on the Nyainq ntanglha Range of Tibetan Plateau, and its application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32

- (5): 891–897. [吴倩如, 康世昌, 高坛光, 等. 青藏高原纳木错流域扎当冰川度日因子特征及其应用[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 891–897.]
- [67] Liu Weigang, Xiao Cunde, Liu Jingshi, et al. Study of the degree-day factors on the Rongbuk Glacier in the Mt. Qomolangma, Central Himalayas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1101–1110. [刘伟刚, 效存德, 刘景时, 等. 喜马拉雅山珠穆朗玛峰北坡绒布冰川度日因子研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1101–1110.]
- [68] Cui Yuhuan, Ye Baisheng, Wang Jie, et al. Analysis of the spatial-temporal variations of the positive degree-day factors on the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 265–274. [崔玉环, 叶柏生, 王杰, 等. 乌鲁木齐河源1号冰川度日因子时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 265–274.]
- [69] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Ye Baisheng, et al. Study on the mass balance of the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River using degree-day method[C]// Proceedings of the Fifth Chinese Conference on Glaciology and Geocryology: vol 1. Lanzhou: Gansu Culture Press. 1996: 197–204. [刘时银, 丁永建, 叶佰生, 等. 度日因子用于乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡计算的研究[C]// 第五届全国冰川冻土学大会论文集: 上册. 兰州: 甘肃文化出版社 1996: 197–204.]
- [70] Bhakta K R, Ageta Y, Nakawo M, et al. Positive degree-day factors for ice ablation on four glaciers in the Nepalese Himalayas and Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Bulletin of Glaciological Research, 2003, 20: 7–14.
- [71] Heynen M, Pellicciotti F, Carenzo M. Parameter sensitivity of a distributed enhanced temperature-index melt model[J]. Annals of Glaciology, 2013, 54(63): 311–321.
- [72] Arce J P F. Melt, runoff and surface mass balance modelling in the tropical Andes using an enhanced temperature-index approach[D]. Sendai, Japan: Tohoku University, 2013.

Study of degree-day model from 2000 to 2016: the main progress and key issues

LIU Jie¹, ZHANG Wei², XIA Jun¹, SHEN Yongping², KANG Shichang²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Snow cover is an important component of the cryosphere. The degree-day model based on the assumption of positive linear relationship between snow ablation and temperature is an effective tool to simulate the snow ablation. This paper summarizes the main research progress of degree-day model in following aspects: the classical degree-day model, the improvement of degree-day model, the distributed degree-day model and the application of remote sensing data in degree-day model from 2000 to 2016. Meanwhile, given the key parameters and variables, the applications and new progresses of temperature threshold of precipitation type, the degree-day factor and the radiation coefficient are summarized systematically. Collaborative research, combining with remote sensing, GIS and degree-day model, is the primary research orientation of degree-day model.

Key words: degree-day factor; snow cover; snow ablation; snowmelt amount

(本文编辑: 庞瑜)