

# 积雪水热迁移机理与模型研究进展

王子龙,付 强,姜秋香,王湘浩

(东北农业大学水利与建筑学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘 要:**积雪是陆地水文循环以及大气过程的重要组成部分,它调节了陆地和大气之间的能量交换,对下垫面的能量收支平衡与水热迁移起重要作用。在介绍积雪特性参数确定方法及积雪水热运移规律的基础上,对国内外现有积雪模型进行了分类和总结,并指出未来在积雪特性参数化方案、数值模拟计算、尺度转换等方面还应进行更深入的研究。

**关键词:**积雪;水热迁移;积雪特性参数;积雪模型

中图分类号:P642.14

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)03-0006-05

积雪,亦称雪被或雪盖,是寒冷地区和寒冷季节的特征自然景观和天气现象,陆地表面积雪覆盖率可达46%,在冰冻圈中分布最为广泛。陆地雪盖以季节性积雪为主,积雪面积、深度及持续时间都有着明显的季节和年际变化。在季节性积雪区,一方面,积雪中水以冰晶形式存在,融化后形成地表径流或入渗改变了土壤水文过程;另一方面,积雪的高反照率和低热导率特性调节了陆气间能量交换,极大地影响了大气非绝热加热过程和下垫面土壤的能量平衡及温度变化<sup>[1]</sup>。因此,积雪是陆地水文循环及大气过程的重要组成部分。

积雪作为一种特殊的土壤上边界条件,其自身积累压密、内部质能变化、外部水热传导等是一个复杂的物理过程。近年来,将积雪内外主要物理过程概化为数学模型,联合气象、积雪特性、土壤水热数据对积雪水热迁移进行仿真模拟研究,已成为该领域的研究热点。本文对积雪内部水热运移机理和积雪模型研究进展进行梳理,指出存在的问题和难点,并对未来的研究方向进行展望。

## 1 积雪特性参数的研究

积雪特性参数(包括雪粒直径、雪面反照率、积雪有效热导率、积雪密度等)研究是探究积雪内部水热迁

移规律、建立积雪模型及开展数值模拟定量研究的基础。国内外对积雪的研究始于一个多世纪前对积雪特性参数的实验研究,并于20世纪后半叶进入快速发展期,这些成果为积雪内部复杂物理过程的研究奠定了坚实的理论基础。

### 1.1 雪粒直径

雪粒直径是积雪特性的重要参数。由于积雪压实及雪粒间聚集,自积雪表层到底层,雪粒直径呈增加趋势,同一时期的新雪粒径一般要小于陈雪粒径。由于积雪雪粒的形状不规则,直接测量雪粒直径的难度较大,通常把雪粒长轴直径作为雪粒直径。在50倍电子显微镜下观测,雪粒直径一般在数百至数千微米范围内变化,观测过程中积雪受外部环境作用易融化,给雪粒直径的测量带来很大困难。

雪粒直径对融雪水潜在的入渗速率<sup>[2-3]</sup>及太阳辐射传输的消光系数有直接影响,而消光系数又是求解雪面反照率的重要参数<sup>[4]</sup>(见公式1),因此,雪粒直径也是影响雪层辐射平衡的重要因素。

$$A_s = 1.0 - 0.206 C_e d_s \quad (1)$$

式中: $A_s$ 为雪面反照率; $C_e$ 为消光系数参数; $d_s$ 为雪粒直径。

### 1.2 雪面反照率

反照率是指地表在太阳辐射影响下反射辐射通量

收稿日期:2015-02-15

基金项目:国家自然科学基金(51579045,51279031);黑龙江省自然科学基金(D201403);黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2015006);东北农业大学“青年才俊”项目(14QC45)

作者简介:王子龙(1982-),男,山东胶州人,副教授,博士,主要从事寒区农业水土资源高效利用研究。E-mail: wzl1216@163.com

与入射辐射通量的比值,即各波长辐射反射率的积分。地球表面能获得多少太阳辐射能,在很大程度上依赖于地表反照率。不同下垫面具有不同的反照率特性<sup>[5]</sup>(见表1),而积雪的平均反照率是最高的。

表1 各种下垫面的平均反照率  
Table1 The average albedo of the various underlying surfaces

地面状况	水面	阔叶林	草地、沼泽	水稻田	灌木	田野	草原	沙漠	冰川、雪被
反照率/%	6~8	13~15	10~18	12~18	16~18	15~20	20~25	25~35	>50

雪面反照率的确定有直接法和间接法两类。直接法主要有两种方式<sup>[6]</sup>:一种是根据实测辐射数据进行计算,数据一般采用日反照率,即一日反射辐射累计值与一日总辐射累计值的比值<sup>[4,7]</sup>;一种是利用地物波谱仪直接测量。间接法主要由影响雪面反照率的因素(包括太阳高度角、雪龄、雪中杂质含量、雪粒直径、积雪厚度、积雪表面粗糙度、空中云量及积雪密度等<sup>[8]</sup>)反演,然而,实际工作中很难把上述因素全部加以考虑,一些学者利用常数化的方案<sup>[9]</sup>;一些学者采用经验的参数化方案,把雪粒直径、雪龄、空中云量及太阳高度角等因素<sup>[4,10]</sup>作为自变量进行回归分析求得。

1.3 积雪有效热导率

积雪有效热导率是雪被中能量传输的重要参数,在实际研究中不能通过直接测定而得到,需要通过相关分析及非线性回归方法进行拟合。研究表明:雪粒大小、形状、雪粒空间分布等积雪特性都对积雪有效热导率有重要影响。但积雪有效热导率的率定一般都是以积雪密度作为唯一参数进行经验拟合求得<sup>[4,9,11]</sup>。除积雪特性外,水蒸汽迁移、相变及温度梯度对一定密度的积雪有效热导率也有显著影响<sup>[12-13]</sup>。

1.4 积雪密度

积雪密度是反演雪粒直径、消光系数及积雪反照率的重要参数。新雪降落到地面后,随即开始压实过程。积雪压实的变化过程依次为:破坏变质作用(等温变质作用)、由于上覆雪自重导致的雪被压密(结构变质作用)及融雪水出流导致的雪层变薄、压密(融化变质作用)<sup>[1,14]</sup>。从微观上讲,积雪密度变化过程的实质是从比表面积很大的星形新雪变化成圆形、椭圆形或光滑不规则雪粒的过程。积雪密度的确定主要有两种方法:一种是利用雪特性分析仪在相应雪层直接观测;一种是根据积雪密度与雪粒直径<sup>[4]</sup>、近地面大气温度<sup>[15]</sup>、大气湿球温度<sup>[14]</sup>等因素的经验公式进行计算。

2 积雪水热迁移规律的研究

积雪内部的水主要以液态水的形式迁移,所以研

究积雪内液态水的迁移规律就显得尤为重要。Horton<sup>[16]</sup>在1915年对水在雪中的迁移速率进行了实验测定。一些学者对雪中液态水运移规律、冰层对水流动的影响以及雪中水压力等问题进行了探讨<sup>[17-19]</sup>。Morris和Godfrey<sup>[20]</sup>对液态水在积雪中的垂流进行了数学模拟。Akan<sup>[21]</sup>对饱和流动和非饱和流动两种情况下积雪内液态水的流动、热量传输和水气扩散规律进行了研究。Marsh等<sup>[22]</sup>和Blöschl等<sup>[23]</sup>系统地研究了雪层内部的非饱和透水过程。Sellers提出融雪活动层边界上水分迁移理论,考虑了融雪过程中积雪表面和渗透锋面不断移动的情况,并就相变水在雪层中的运移进行了研究<sup>[24-25]</sup>。

1934年Sverdrup<sup>[26]</sup>首次将现代能量迁移理论应用到雪层中,采用完整的能量平衡方程对湍流热在雪层和空气中的迁移进行了计算。20世纪40年代,美国陆军工程兵团和美国气象局开展了积雪水文学基本理论的研究,该研究首次提出利用积雪和环境之间的能量交换来计算融雪量的方法<sup>[27]</sup>。与此同时,前苏联科学家在积雪物理性质、积累和融化方面开展了大量的研究。Kuz'min<sup>[28]</sup>在积雪消融的研究成果中完整地论述了一个理论性和实际观点兼具的雪层能量交换过程。Sokratov<sup>[29]</sup>在实验室进行了不同温度梯度条件下雪中热、质运移实验,结果表明温度分布不是线性的,温度梯度在热流方向上迅速减小,说明热量迁移不能视为纯传导过程,水汽输送和相变对其影响显著。Fernández<sup>[30]</sup>以能量平衡理论建立了融雪模型,模型考虑了积雪表面和整个雪层的能量平衡,预测了积雪表层温度和冻结深度,准确模拟了季节性积雪的积累和融化过程。

3 积雪模型的研究

为了定量研究积雪下垫面土壤的水分和热量状况以及积雪对气候的响应情况,学者们建立了多种用途和形式的积雪水热耦合迁移模型。积雪水热耦合迁移的基本物理过程一般包括积雪-大气和积雪-土壤交

界面的能量交换、雪层内部的热量和水分迁移以及雪层内的质量守恒三大部分。目前积雪模型研究主要集中在两个方面,一方面应用到水文研究的流域水文模型,另一方面应用到气候变化研究的陆面过程模式。

### 3.1 基于水文学模式的融雪模型

基于水文学模式的融雪模型旨在估计径流的积雪水文学模式,该方面模型大部分只考虑了积雪消融过程,作为流域水文模型的一个子模式<sup>[31-32]</sup>,它们大都采用的是经验性方法。按照物理过程在模型中所占比重可将该方面模型细分为两类,即概念性模型和物理学模型。

概念性模型是基于积雪消融与其影响因子之间的数据关系建立回归模型<sup>[33-37]</sup>。度-日模型是该类模型的代表<sup>[34,38-39]</sup>,它以积雪消融与气温尤其是积雪表面的正积温之间的线性关系而建立的。由于建模简单、数据易获取且大多能满足所需精度,因此实际应用较为广泛。度-日模型的一般形式为:

$$M = C_m (T_{air} - T_{melt}) \quad (2)$$

式中: $M$ 为某段时间内积雪消融量(mm/d); $C_m$ 为雪的度-日因子(mm/°C·d); $T_{air}$ 为气温(°C); $T_{melt}$ 为融雪的临界温度(°C)。度-日因子 $C_m$ 随地形、下垫面性质以及积雪表面状况在时间和空间上发生着很大的变化,在度-日模型中融入其他相关环境气象因素,融雪径流模拟精度会大大提高。

物理学模型是根据能量平衡,以能量输入(包括辐射、地热、感热和潜热)驱动积雪消融过程,具有相对较强的物理过程。这类模型通常用来建立考虑融雪径流的流域分布式水文模型<sup>[40-43]</sup>。

### 3.2 基于陆面过程模式的物理学模型

在气候研究的陆面过程模式中,为了更真实地刻画积雪内部的质量、能量守恒以及积雪上边界大气的相互作用,一些基于物理过程的不同复杂程度的积雪模型发展起来,按其反映物理过程的复杂程度主要分为以下三类:

第一类是简单积雪模型<sup>[44-45]</sup>,它们用质量平衡方程来描述雪深,对积雪积累、升华和消融的参数化方案仅仅基于积雪表面温度和表面能量平衡,进而模拟积雪-土壤联合体的温度变化,大多数大气环流模式(GCM)中就采用了这类积雪模型<sup>[46-47]</sup>。

第二类是复杂精细模型,它们把积雪内部的质量及能量平衡以及积雪与其上边界大气的简单相互作用关系进行了考虑,进而详细地模拟包括积雪水循环和

积雪温度等物理现象<sup>[4,9,48]</sup>。Anderson和Jordan发展的积雪模型都对积雪内部水的三相变化作用、积雪内部液态水的运动、积雪内外能量守恒规律、积雪变质作用及雪粒的颗粒直径变化等物理过程作了十分精细的描述。

第三类是中等复杂模型,它们用简单的参数化方案描述了雪盖内部复杂的、重要的物理过程<sup>[49-50]</sup>。Loth和Graf发展的积雪模型是一个用于气候研究的一维模型,它提供了一种基于质量及能量守恒概念的包含较为详细的水的三相变化简便有效地处理液态水迁移的方案,这对于处理积雪融水的产出、入渗和径流有重要作用,而且它还把积雪分层减少到至多3层,减少了GCM过程长期数值积分中积雪子模式的计算量。

Boone和Etchevers<sup>[51]</sup>对三类模型作了比较研究,结果表明:分层和不分层模型差别很大,分层模型明显优于不分层模型。另外,这三类模型在短时间尺度上积雪基本特征的模拟存在差异,造成雪水当量模拟结果差异的主要原因是一些物理参数化方案不同,如模型中不同的表面能量湍流交换方案、积雪表面反照率方案等。最后指出第三类模型相比另外两类而言较能满足气候模型中对雪模型简单、省时且能反映真实情况的要求。

我国在基于陆面过程模式的积雪模型研究中,孙菽芬<sup>[13]</sup>、金继明<sup>[52]</sup>、李倩<sup>[53]</sup>等发展了一个复杂的三层雪模型,详细考虑了积雪内部压实、融化及相变物理过程;戴永久<sup>[54]</sup>等根据多孔介质理论,由土壤、积雪和植被的水分和热量守恒控制方程发展了陆面过程模式IAP94;夏坤<sup>[55]</sup>利用BATS-SAST模式调整了地表积雪覆盖率的计算方案,使模拟结果能够合理描述积雪内部物理变化、植被对积雪的影响;陈海山等<sup>[56]</sup>详细考虑了地气系统中的积雪、土壤水热传输、植被及湍流边界层中的各种物理过程,发展了既能够反映积雪变化、干旱/半干旱区地气交换过程,同时又能够描述不同陆面状况地气交换过程的陆面模式。

## 4 结语

由于积雪内部物理过程的复杂性,在研究中仍面临许多挑战:如雪粒直径、积雪反照率、积雪的有效热导率及液态水的有效扩散率等雪层内部水热控制参数的直接测定或间接率定;积雪模型的分层方案与数值计算方法;由尺度和下垫面条件引起的积雪模型精度和适应性问题等。因此,开展适合不同研究区域、尺度



及目的的积雪特性参数化方案、数值模拟计算、尺度转换等方面的研究是未来研究的重点。

参考文献:

- [1] 孙淑芬. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型[M]. 北京: 气象出版社, 2005. (SUN Shufen. Physical and Biochemical Mechanism and Parametric Model of Land Surface Process[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005. (in Chinese))
- [2] Colbeck S C. The physical aspects of water flow through snow[J]. *Advances in Hydrosience*, 1978, 11: 165–206.
- [3] Shimizu H. Air Permeability of Deposited Snow [D]. Sapporo: The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 1970.
- [4] Anderson E A. A point energy and mass balance model of a snow cover [R]. Maryland: Office of Hydrology–National Weather Service, 1976.
- [5] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003. (SHENG Peixuan, MAO Jietai, LI Jianguo, et al. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003. (in Chinese))
- [6] 郭忠明, 王宁练, 蒋熹, 等. 冰雪反照率测量和反演及其应用研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(4): 739–746. (GUO Zhongming, WANG Ninglian, JIANG Xi, et al. Research progress on snow and ice albedo measurement, retrieval and application[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(4): 739–746. (in Chinese))
- [7] 蒋熹. 冰雪反照率研究进展[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 728–738. (JIANG Xi. Progress in the research of snow and ice albedo[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 728–738. (in Chinese))
- [8] Şensoy A, Şorman A A, Tekeli A E, et al. Point-scale energy and mass balance snowpack simulations in the upper Karasu basin, Turkey[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(4): 899–922.
- [9] Jordan R. A one-dimensional temperature model for a snow cover: technical documentation for SNITHERM.89[R]. Hanover: US. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, 1991.
- [10] Bohren C F, Barkstrom B R. Theory of the optical properties of snow[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(30): 4527–4535.
- [11] Mellor M. Properties of snow [R]. Hanover: U.S. Army Materiel Command Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1964.
- [12] Yen Y. The rate of temperature propagation in moist porous mediums with particular reference to snow[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, 72(4): 1283–1288.
- [13] SUN S, JIN J, XUE Y. A simple snow-atmosphere-soil transfer model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D16): 19587–19597.
- [14] LaChapelle E R. Properties of Snow [D]. Seattle: University of Washington, 1969.
- [15] Niwa K, Moritani A. Model of snowmelt runoff for prediction of dam inflow[R]. Tokyo: Institute of Construction Ministry, 1990: 121–129.
- [16] Horton R E. The melting of snow [J]. *Monthly Weather Review*, 1915, 43(12): 599–605.
- [17] Colbeck S C. A theory of water percolation in snow[J]. *Journal of Glaciology*, 1972, 63(11): 369–385.
- [18] Lingam E J. Phase equilibria of veins in polycrystalline ice[J]. *Canada Journal Earth Sciences*, 1974, 11(9): 1280–1287.
- [19] Wankiewicz A. Water pressure in ripe snowpacks [J]. *Water Resources Research*, 1978, 14(4): 593–600.
- [20] Morris E M, Godfrey J. The European hydrological system snow routine[A]. Modeling of Snow Cover Runoff[C]. Hanover: U.S. Army Cold Regions Research & Engineering Laboratory, 1979: 269–278.
- [21] Akan A O. Modelling enrichment of soluble pollutants in snow covers[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1974, 73(1): 225–234.
- [22] Marsh P, Wood M K. Meltwater movement in natural heterogeneous snow covers[J]. *Water Resources Research*, 1985, 21(11): 1710–1716.
- [23] Blöschl G, Kirnbauer R. Point snowmelt models with different degrees of complexity internal processes [J]. *Journal of Hydrology*, 1991, 129(1): 127–147.
- [24] Sellers S. Water transport in phase-changing snowpacks [A]. IUTAM Symposium on Theoretical and Numerical Methods in Continuum Mechanics of Porous Materials[C]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 3–12.
- [25] Sellers S. Theory of water transport in melting snow with a moving surface[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2000, 31(1): 47–57.
- [26] Sverdrup H U. The eddy conductivity of the air over a smooth snow field[J]. *Geofysiske publikasjoner*, 1936, 11(7): 5–69.
- [27] U.S. Army Corps of Engineers. Snow Hydrology: Summary Report of the Snow Investigations [M]. Portland: North Pacific Division, Corps of Engineers, U.S. Army, 1956.
- [28] Kuz'min P P. Melting of Snow Cover = Protsess Tayaniya Shezhnogo Pokrova [M]. Translated by Vilim E. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, 1972.
- [29] Sokratov S A, Maeno A. Heat and mass transport in snow under a temperature gradient[A]. Snow Engineering: Recent Advances[C]. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1997: 49–54.
- [30] Fernández A. An energy balance model of seasonal snow evolution[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, 23(5–6): 661–666.
- [31] Morris E M. Modelling Snowmelt-induced Processes[C]. Wallingford: IAHS Press, 1986.
- [32] Anderson M G, Sambles K M. Modeling seasonally freezing ground conditions [R]. London: European Research Office, U.S. Corps of Engineers, 1989.
- [33] 卿文武, 陈仁升, 刘时银, 等. 两类度日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. (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. (in Chinese))
- [34] 蓝永超. 灰色系统理论的关联分析在融雪径流预报中的应用探讨[J]. 冰川冻土, 1993,15(3):481–486. (LAN Yongchao. Investigation on application of grey cognate analysis for snowmelt runoff forecast[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993,15(3):481–486. (in Chinese))
- [35] 柯丹,汪玲玲,牛生杰,等. 基于常规气象资料融雪模式的建立及应用[J]. 大气科学学报, 2010,33(5):555–560. (KE Dan, WANG Lingling, NIU Shengjie, et al. A snowmelt model based on routine meteorological data [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2010,33(5):555–560. (in Chinese))
- [36] 陈晓飞,田静,刘小洲,等. 研究冻融侵蚀的融雪/积雪水量模型[J]. 水土保持科技情报, 2003,(6):13–16.(CHEN Xiaofei, TIAN Jing, LIU Xiaozhou, et al. Research on freeze–thaw erosion snowmelt/snow water model[J]. Scientific and Technology Information of Soil and Water Conservation, 2003,(6):13–16. (in Chinese))
- [37] 周石砾,中尾正义,桥本重将,等. 水在雪中下渗的数学模拟[J]. 水利学报, 2001,(1):6–10. (ZHOU Shiqiao, SHASHIMOTO, MNakawo, et al. Mathematical modeling of water percolation in snow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001,(1):6–10. (in Chinese))
- [38] 王建, 马明国, Federicis P. 基于遥感与地理信息系统的 SRM 融雪径流模型在 Alps 山区流域的应用[J]. 冰川冻土, 2001,23(4):436–441. (WANG Jian, MA Mingguo, P Federicis. Simulating snowmelt runoff in mountainous watershed of Italy using GIS and remote sensing data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001,23(4):436–441. (in Chinese))
- [39] 马虹,程国栋. SRM 融雪径流模型在西天山巩乃斯河流域的应用实验[J]. 科学通报,2003,48(19):2088–2093.(MA Hong, CHENG Guodong. Application of experimental SRM snowmelt runoff model in the western Tianshan Gongnaisi River basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2003,48(19):2088–2093. (in Chinese))
- [40] 高洁. 高山积雪的时空分布特征及融雪模型研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.(GAO Jie. Spatiotemporal Distribution of Snow and Snowmelt Modeling in Alpine Regions[D]. China: Tsinghua University, 2011. (in Chinese))
- [41] 房世峰. 基于“3S”技术的分布式融雪径流模型的设计和应用[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2007.(FANG Shifeng. The Design and Application of Distributed Snowmelt Runoff Model Based on the “3S”Technology[D]. Urumchi:Xinjiang University,2007.(in Chinese))
- [42] 魏召才. 融雪过程模拟及积雪特性分析研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010. (WEI Zhaocai. The Study Snow Melt Processes Simulation and Snow Characteristics Analysis [D]. Urumchi: Xinjiang University, 2010. (in Chinese))
- [43] 贺青山. 融雪过程模拟及冻土水热效应分析研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012. (HE Qingshan. The Study on Snow Melt Processes Simulation and Frozen Effects Analysis [D]. Urumchi: Xinjiang University, 2012. (in Chinese))
- [44] Pitman A J, Yang ZL, Cogley J G, et al. Description of bare essentials of surface transfer for the bureau of meteorology research centre AGCM [R]. Melbourne: BMRC Research Report, 1992.
- [45] Douville H, Royer J F, Mahfouf J F. A new snow parameterization for the Météo–France climate model[J]. Climate Dynamics, 1995,12(1):21–35.
- [46] Verseghy D L. Class—a Canadian land surface scheme for GCMS. I. soil model [J]. International Journal of Climatology, 1991,11(2):111–133.
- [47] Slater A G, Pitman A J, Desborough C E. Simulation of freeze–thaw cycles in a general circulation models land surface scheme [J]. Journal of Geophysi
- [48] Brum E, Martin E, Simon V, et al. An energy and mass balance model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting[J]. Journal of Glacial, 1989,(35):333–348.
- [49] Loth B, Graf H, Oberhuber J M. Snow cover model for global climate simulations[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres, 1993,98(D6):10451–10464.
- [50] Lynch–Stieglitz M. The development and validation of a simple snow model for the GISS GCM[J]. Journal of Climate, 1994,7(12):1842–1855.
- [51] Boone A, Etchevers P. An intercomparison of three snow schemes of varying complexity coupled to the same land surface model: local–scale evaluation at an alpine site[J]. Journal of Hydrometeorology, 2001,2(4):374–394.
- [52] 金继明. 一个用于 GCM 的简单雪盖–大气–土壤传输模式 (SAST)[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1999. (JIN Jiming. A Simple Snow–Atmosphere–Soil Transfer Mode for GCM (SAST)[D]. Beijing: Research Institute of Atmospheric Physics China, 1999. (in Chinese))
- [53] 李倩. 陆面过程模型中统一土壤–雪盖水热传输耦合模型的研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2008. (LI Qian. Research on Unified Soil and Snow Water and Heat Transfer Coupling Model of Land Surface Process Model[D]. China: Research Institute of Atmospheric Physics China, 2008.(in Chinese))
- [54] 戴永久. 陆面过程模式及其与 GCM 耦合模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1995.(DAI Yongjiu. A Land–Surface Physical Processes Model for GCMs[D]. Beijing: Research Institute of Atmospheric Physics China, 1995. (in Chinese))
- [55] 夏坤. BATS–SAST 模式对森林和草地两种下垫面积雪过程的数值模拟 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2008. (XIA Kun. The Simulation of Snow Processes on Forest and Grass Sites by BAST–SAST Model [D]. China: China Academy of Meteorological Sciences, 2008. (in Chinese))
- [56] 陈海山,孙照渤. 陆面模式 CLSM 的设计及性能检验 I. 模式设计[J]. 大气科学, 2004,28(6):801–819. (CHEN Haishan, SUN Zhaobo. Design of a comprehensive land surface model and its validation part I. model description [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004,28(6):801–819. (in Chinese))

- [J]. Yellow River, 2014,36(2):58-61. (in Chinese))
- [7] 徐珊,夏丽华,陈智斌,等. 基于生态足迹法的广东省水资源可持续利用分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013,11(5):11-15,98. (XU Shan, XIA Linhua, CHEN Zhibin, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources in Guangdong province based on ecological footprint theory [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013,11(5):11-15,98. (in Chinese))
- [8] 常龙芳. 云南省水资源生态足迹与生态承载力动态分析[J]. 云南地理环境研究, 2012,24(5):106-110. (CHANG Longfang. Dynamic analysis of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Yunnan province [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2012,24(5):106-110. (in Chinese))
- [9] 戴昌军,管光明,梁忠民,等. 基于水资源足迹的武汉市水资源可持续利用研究[J]. 人民长江, 2011,42(9):8-11. (DAI Changjun, GUAN Guangming, LIANG Zhongmin, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources in Wuhan city based on water resources footprint [J]. Yangtze River, 2011,42(9):8-11. (in Chinese))
- [10] 丁华,邱卫国. 基于生态足迹的上海市水资源生态承载力评价[J]. 人民长江, 2013,44(15):19-21. (DING Hua, QIU Weiguo. Assessment on ecological carrying capacity of water resources in Shanghai city based on ecological footprint model [J]. Yangtze River, 2013,44(15):19-21. (in Chinese))
- [11] 罗娜. 辽宁省水资源生态足迹动态变化与时间序列预测分析研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2012. (LUO Na. Dynamic Analysis and Time Series Prediction of Water Resources Ecological Footprint of Liaoning Province[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2012. (in Chinese))
- [12] 陈成中,林振山,贾敦新. 基于生态足迹指数的全球生态可持续性时空分析[J]. 地理与地理信息科学, 2007,23(6):68-72. (CHEN Chengzhong, LIN Zhenshan, JIA Dunxin. Spatiotemporal analysis on sustainable ecosystem in world based on ecological footprint index [J]. Geography and Geo-Information Science, 2007,23(6):68-72. (in Chinese))

## Assessing Utilization of Water Resources in Hunhe River Catchment Based on Ecological Footprint

WANG Xiuying, LIU Heping

(Hydrology Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)

**Abstract:** The water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in the Hunhe River catchment from 2005 to 2013 were calculated according to the water resources ecological footprint model, and the utilization of water resources in the catchment was assessed based on the calculated index. The results are as follows: from 2005 to 2013, the water resources ecological footprint in the Hunhe River catchment show a non-significant downward trend, while the water resources ecological carrying capacity fluctuated and was significantly related to precipitation in the catchment. There was ecological deficit of water resources in all the years from 2005 to 2013 but 2010, when there was a surplus. The water resources ecological footprint index was below the range of the sustainability, but the water resources ecological footprint per  $10^4$  Yuan GDP continued to decrease. Over all, the water resources utilization in the catchment was unsustainability, but the utilization efficiency improved obviously and it was developing towards sustainability since 2010.

**Key words:** water resources ecological footprint; water resources ecological carrying capacity; Hunhe River; water resources utilization

(上接第 10 页)

## Advances in Water and Heat Transfer Mechanism and Snow Model

WANG Zilong, FU Qiang, JIANG Qiuxiang, WANG Xianghao

(College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Snow is a key component of terrestrial hydrological cycle and atmospheric process, which regulates the energy exchange between land and atmosphere and plays an important role in energy balance and water and heat transfer of land surface. This paper introduced the measurements of snow characteristic parameters and water and heat transfer mechanism of snow, classified and summarized the existing snow models, and pointed that the suggested potentials in future studies will focus on parameterization scheme of snow characteristic parameters, numerical simulation and scale transformation.

**Key words:** snow; water and heat transfer; snow characteristic parameter; snow model