

成驰,陈正洪,刘建宇,等.南方冰雪灾害期间地面水热通量推算及应用试验[J].暴雨灾害,2011,30(3):266-271

## 南方冰雪灾害期间地面水热通量推算及应用试验

成 驰<sup>1</sup>,陈正洪<sup>1</sup>,刘建宇<sup>2</sup>,徐祥德<sup>3</sup>

(1.湖北省气象服务中心,武汉 430074;2.云南省气象科学研究所,昆明 650034;3.中国气象科学研究院,北京 100081)

**摘要:**使用2008年1—2月武汉、南昌、长沙、永州四站逐日气象资料,采用一个水热通量参数计算模型反演我国南方2008年初冰雪灾害发生前后四个代表站地面水热通量变化特征,并尝试利用反演的地面潜热通量值进行地面积雪、融雪预报试验。结果表明:冰雪灾害发生后,地面水热通量参数值发生明显变化,其中向上感热通量明显下降,潜热通量明显上升,净辐射值较低,部分站点为负值;土壤热流量变化较灾害前变化平稳,随灾情发展,深层土壤热量开始逐渐向表层传输;水热通量参数值对分析灾害发生发展期间的能量传输变化特征具有较好的参考价值;利用水热通量模型,结合降雪预报可拟合融雪量和积雪深度,积雪深度拟合绝对误差在5 mm以下。

**关键词:**冰雪灾害;水热通量;地表能量平衡

中图分类号:P468 文献标识码:A 文章编号:1004-9045(2011)03-0266-06

## Calculation and Application Test of Ground Water and Heat Flux During Ice Disaster Over South China

CHENG Chi<sup>1</sup>, CHEN Zhenghong<sup>1</sup>, LIU Jianyu<sup>2</sup>, XU Xiangde<sup>3</sup>

(1.Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430074; 2.Meteorological Institute of Yunnan Province, Kunming 650034; 3.Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** By using daily meteorological data from 4 stations (Wuhan, Nanchang, Changsha and Yongzhou) from January to February of 2008 and a water and heat flux calculation model, changing features of ground water and heat fluxes at 4 stations before and after ice and snow disaster of early 2008 in South China was inversed, and forecast tests on ground snow and snowmelt were tried with the inversed ground latent heat flux. The results show that the ground water and heat flux evolve significantly with the sensible heat flux decreased and the latent heat flux increased, and the net radiation is in low values and is negative in some sites during the ice disaster. The soil heat flux changes smoothly during the ice disaster than that before the ice disaster, meanwhile heat in the deep soil began to be transferred to the surface with development of the disaster. The water and heat flux is useful to analyze evolving feature of the energy transfer during the ice disaster. Combined with snow forecast the water and heat flux model can be used to fit the amount of snowmelt and snow depth, and the absolute fitting error of snow depth is less than 5 mm.

**Key words:** ice disaster; water and heat flux; energy equilibrium in ground surface

### 0 引言

2008年1月10日至2月初,我国南方大部分地区发生有气象记录以来罕见低温雨雪冰冻灾害。对这次冰雪过程,陶诗言等<sup>[1]</sup>和李崇银等<sup>[2]</sup>从大气环流异常角度分析了持续性冻雨产生的原因;董海萍等<sup>[3]</sup>利用中尺度模式对冰灾过程进行了模拟,认为低层低温、逆温层的存在及充足水汽是冰冻形成的主要原因。有研究表明<sup>[4]</sup>,近地层形成冰冻灾害,除与冬季大气环流

异常导致持续性雨雪天气等条件有关之外,还与地表热量和辐射平衡条件有关。目前,由于地面水热通量观测资料匮乏,对冰雪灾害天气过程多采用常规气象资料进行分析研究。因此,本文尝试采用一个能够应用常规气象站资料的水热平衡参数计算模型,计算分析2008年我国南方冰雪灾害期间部分站点地面水热通量特征,具体分析冰灾发生前、发展过程中、结束后的地面感热、潜热通量变化以及净辐射、土壤热流量等参数变化,试图揭示其原因。考虑到地面积雪、融雪

收稿日期:2011-02-12;修订稿日期:2011-05-26

资助项目:国家科技支撑计划课题(2008BAC48B02)

第一作者:成驰,男,1981年生,工程师,主要从事气候应用研究与开发。E-mail: chc8108@126.com

过程很大程度上取决于水热通量参数的变化,本文以武汉站为代表,尝试利用水热通量参数进行地面积雪、融雪预报试验,以便为将来冰雪灾害期间地面积雪预警预报提供参考依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 模型简介

应用常规气象资料计算水热通量模型来自最初由 Kondo 等提出的多层土壤模式<sup>[5]</sup>。该模式最初用于估算干燥和半干燥地区蒸发量、土壤含水量、裸土表面温度等,但经在日本筑波和鸟取等地实验,证明也适用于湿润地区<sup>[6]</sup>。徐健青等<sup>[7,8]</sup>将此模型改进后用于青藏高原和东亚地区水热平衡研究,经与青藏高原和东亚地区 32 个站点观测验证,认为该模型可用于东亚地区存在地表植被和雪盖情况下的实际地面水热平衡参数计算。

通过该模型,可利用全年逐日平均气温、最高气温、最低气温、平均水气压、平均风速、降水、日照时数等常规要素以及给定不同土壤质地的热惯量等参数,计算感热通量、潜热通量、土壤热通量、向下短波辐射、向下长波辐射、净辐射、蒸发量、各层土壤含水量等水热平衡参数。该模型建立的基础是地表能量平衡方程:

$$R_n - G = H + \epsilon E \quad (1)$$

式(1)中, $\epsilon$ 为汽化潜热, $E$ 为蒸发量, $R_n$ 为净辐射, $G$ 为土壤热通量, $H$ 为感热通量。能量平衡方程中的前三项可分别表示为:

$$R_n = (1 - \text{ref})S \downarrow - \epsilon(\sigma T_s^4 - L \downarrow) \quad (2)$$

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T_A) \quad (3)$$

$$G = -(\lambda_g \frac{\partial T_s}{\partial z})_{z=0} \quad (4)$$

式(2)—(4)中, $S \downarrow$ 为向下短波辐射,在模型中通过日照时数反演得到; $L \downarrow$ 为向下长波辐射,取决于短波辐射和水汽压,其具体经验公式见文献<sup>[5]</sup>; $\text{ref}$ 为土壤反照率,随季节和表层土壤含水率而变化; $\sigma$ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, $T_A$ 为气温, $T_s$ 为地温。

该模型中,将水在土壤中的传输划分为水相和气相,水和热的传输方程可分别表示为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial z} (Q_{liq} + Q_{vap}) \quad (5)$$

$$C_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = -\frac{\partial Q_h}{\partial z} - \epsilon E_{soil} \quad (6)$$

$$Q_h = -\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (7)$$

$$C_H U = \max[a + b \times 0.7U, c \times (T_s - T_A)^{1/3}] \quad (8)$$

式(5)—(8)中, $\theta$ 为土壤体积含水率; $t$ 代表时间; $Q_h$ 为热通量; $E_{soil}$ 为土壤中蒸发率;在 0.02 m 以下土层

中与 $\partial Q_h / \partial z$ 相比, $\epsilon E_{soil}$ 非常小,在实际计算中可忽略; $Q_{liq}$ 和 $Q_{vap}$ 分别是水相和气相的水通量,在垂直方向上,向上为正; $T_g$ 为在深度为 $z$ 处的地温; $c_g$ 、 $\rho_g$ 、 $\lambda_g$ 分别代表比热、密度和给定土壤的导热系数,其中土壤导热系数在模型中取决于土壤种类、含水量和雪盖等因数。式(8)为交换速度 $C_H U$ 的参数化方案,其中 $C_H$ 为拖曳系数, $U$ 为风速,系数 $a=0.0027$ , $b=0.0031$ , $c=0.0036$ 。通过土壤水分传输的计算,将提高地表能量平衡计算的精确度。

模式中将全国土壤质地分为粘土(Clay)、砂土(Sand)及壤土(Loam)三种类型(图 1);采用格点形式将全国共分为 420 行、531 列,栅格大小为 10 km×10 km。

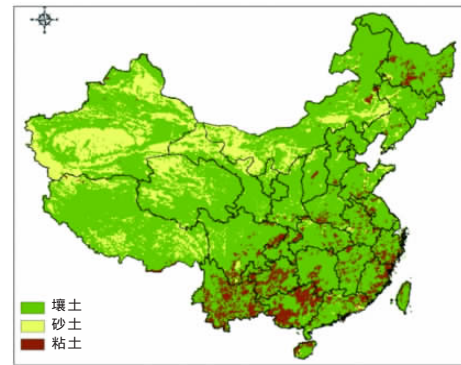


图 1 中国土壤质地分布图

在该模型实际积分计算中,根据不同土壤类型,模式中考虑地表热平衡影响土壤深度为 0.5~1.0 m。模式土壤分成 10 层,土壤表层临界情况可以式(9)、(10)表示,即土-气界面水相水通量( $Q_{liq}$ )为 0,气相水通量( $Q_{vap}$ )等于蒸发率( $E$ )。

$$Q_{liq(z=0)} = 0 \quad (9)$$

$$Q_{vap(z=0)} = E \quad (10)$$

模式迭代运行时间步长为 20 s,根据以上平衡方程迭代计算即可得到水热平衡各通量参数值。

### 1.2 资料与计算方案

考虑到 2008 年 1 月至 2 月初冰雪灾害造成较大损失的省份主要是湖南、贵州、湖北、江西,因此本文分析中选取湖北武汉、江西南昌、湖南长沙和其南部的永州作为灾害发生区域代表站点。本文应用模型计算所使用的资料包括各代表站 2008 年 1—2 月逐日平均气温、最高气温、最低气温、平均水气压、平均风速、降水、日照时数和各站年平均气压。其中武汉、南昌、长沙在模式中的土壤类型为壤土,永州为粘土。

## 2 结果与分析

### 2.1 计算结果检验

除去风速和拖曳系数等的影响,地面感热通量应与 $T_s$ 、 $T_A$ 梯度即地-气温差呈正相关<sup>[9]</sup>。因此,可利用

地-气温差值来检验感热通量( $H$ )的计算准确性。图 2 给出 2008 年 1 月 1 日至 2 月 10 日武汉、长沙、南昌、永州 4 个代表站地-气温差值( $T_s-T_A$ )与感热通量( $H$ )

的散点图。从中可见,各站地-气温差值与感热通量均呈较好的相关性。这说明模型对冰雪灾害期间水热通量的计算结果较准确,具有良好的可用性。

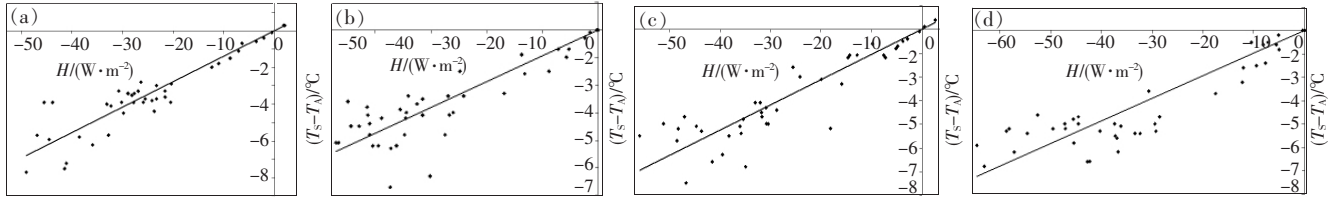


图 2 2008 年 1 月 1 日至 2 月 10 日武汉(a)、长沙(b)、南昌(c)、永州(d)站地-气温差值( $T_s-T_A$ )与感热通量( $H$ )散点图

2.2 结果分析

2008 年 1 月我国南方持续冰雪天气由 4 次过程组成,分别为 1 月 10—14 日冷锋降水过程、1 月 18—23 日降水过程、1 月 25—29 日降水过程、1 月 20 日至 2 月 2 日降水过程。此后,阻塞形势消失,冰雪天气持续 20 余天后结束。图 3 给出武汉、长沙、南昌、永州 4 站 2008 年 1 月 1 日至 2 月 10 日气温和降水变化。从中可见,随着 1 月上旬末强冷空气南侵,各站日平均

气温均从 1 月上旬正常偏高急剧下降,由于 1 月中下旬四次降水过程相继发生且间歇较短,各站整个中下旬气温均稳定在 0℃左右;2 月初以后,降水过程逐渐停止,各站气温开始缓慢回升;偏北的武汉站降水主要发生在前两次雨雪过程,长沙和南昌的降水主要发生在第二到第四次雨雪过程中,永州站降水主要发生在后两次雨雪过程中,四次雨雪天气过程呈逐渐南移特征。

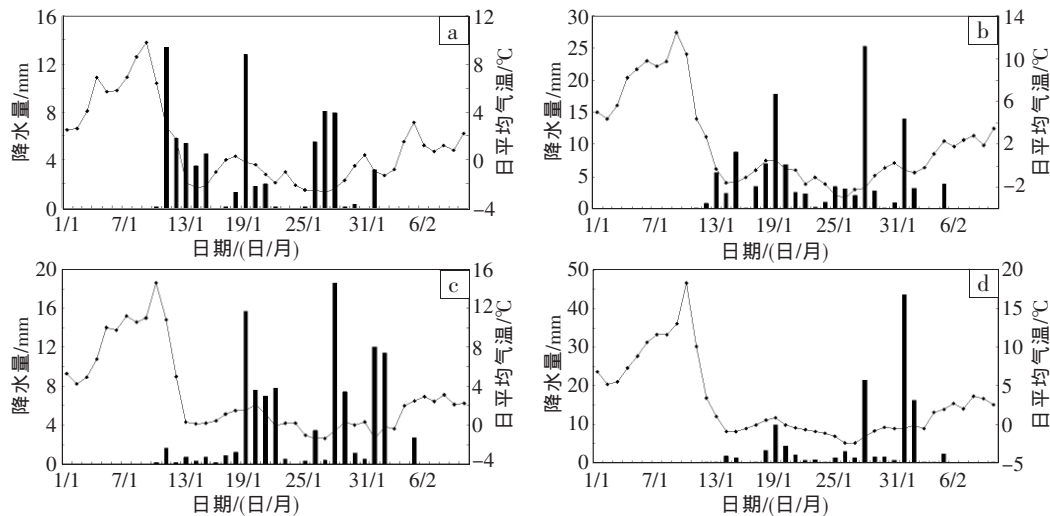


图 3 2008 年 1 月 1 日至 2 月 10 日武汉(a)、长沙(b)、南昌(c)、永州(d)站气温(实线)和降水量(方柱)变化图

图 4 给出 2008 年初各代表站计算得到的日平均感热通量变化。从中可看出,各代表站均随着低温雨雪天气到来,地温显著降低,地-气温差明显加大,大气给地表加热,向上的感热通量明显降低。

为对比分析 2008 年初冰雪灾害发生前后感热通量变化,取各站 1 月上旬无降水日、1—2 月发生持续性降水日的平均感热通量分别代表冰雪灾害发生前和发生期的,两者对比结果见表 1。从中可见,各站冰雪灾害发生前或期间感热通量均为负值,其绝对值代表大气向地面输送热量的大小,冰雪灾害期间各站日平均感热通量绝对值均在  $30.00 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  以上,永州站绝对值最大,达  $41.05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;对比冰雪灾害发生前后感热通量差值可知,各站相差不大,冰灾期间感热通量绝对值均较灾害前增加,增加值为  $25\sim 30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

表 1 2008 年初冰雪灾害发生前后各代表站感热通量对比表

| 站名 | $H_1/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ | $H_2/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ | $\Delta H/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ |
|----|------------------------------------|------------------------------------|---|
| 武汉 | -4.65                              | -30.53                             | 25.88                                   |
| 长沙 | -7.37                              | -36.89                             | 29.52                                   |
| 南昌 | -3.21                              | -31.27                             | 28.06                                   |
| 永州 | -12.62                             | -41.05                             | 28.43                                   |

注:  $H_1$ 、 $H_2$  分别表示冰雪灾害发生前和期间的平均感热通量;  $\Delta H=H_1-H_2$

图 5 给出 2008 年初各代表站日平均潜热通量变化。从中可见,1 月上旬,随气温上升,土壤含水量下降,导致各站潜热通量均有所降低;随冰雪灾害期间大量降水,土壤含水量增加,蒸发随之加大,使各站向上潜热通量明显增加。

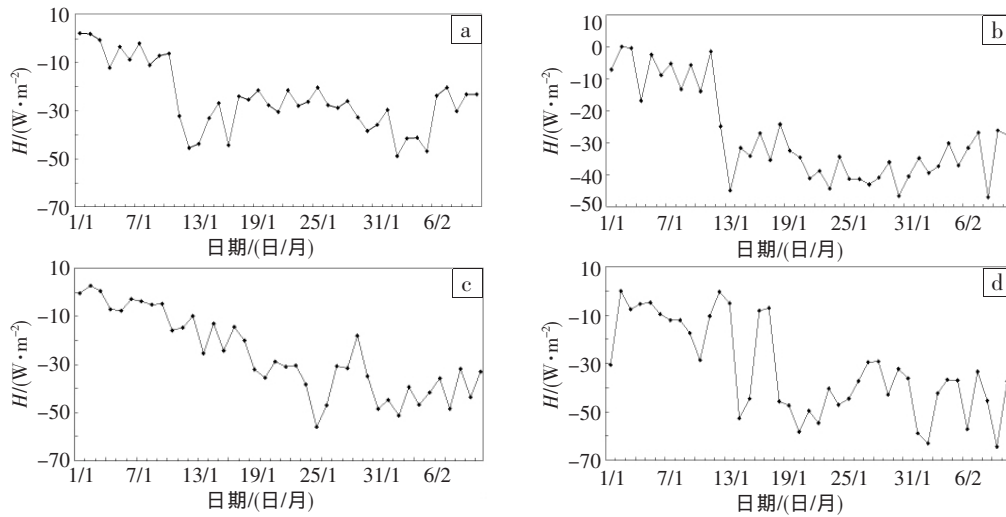


图 4 2008 年 1 月 1 日至 2 月 10 日武汉(a)、长沙(b)、南昌(c)、永州(d)站地面感热通量(H)变化图

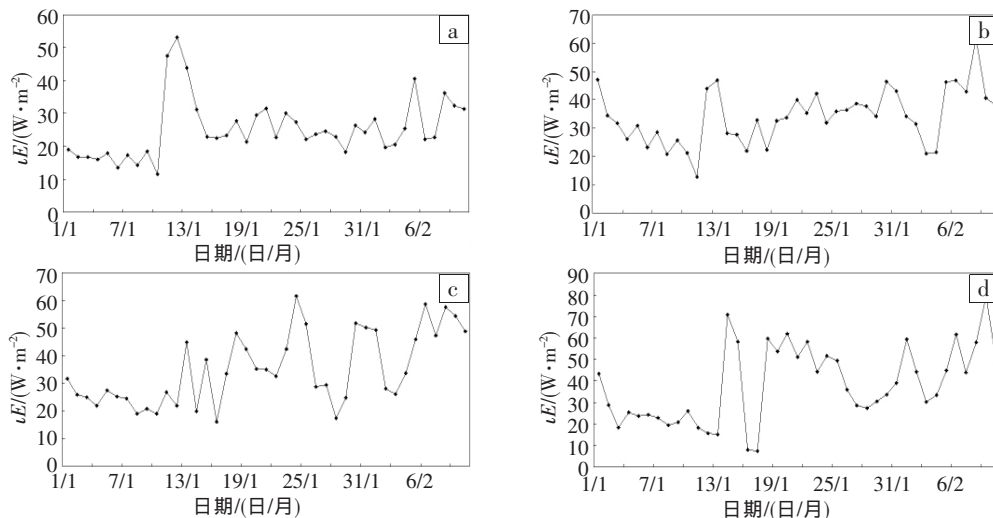


图 5 2008 年 1 月 1 日至 2 月 10 日武汉(a)、长沙(b)、南昌(c)、永州(d)站地面潜热通量(ΔE)变化图

同样,取各站 1 月上旬无降水日的平均潜热通量代表冰雪灾害发生前的、1—2 月发生持续性降水的日均值代表冰雪灾害发生期的,两者对比结果见表 2。从中可见,2008 年初灾害期间潜热通量永州站最大,其灾害前后差值绝对值也最大,达  $18.08 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;长沙站灾害前后潜热通量差值绝对值最小,为  $6.39 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;武汉站灾害期间平均潜热通量最小,为  $28.39 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,该站潜热通量最大值出现在 1 月 10—14 日的降水过程中,因此次过程武汉气温较高( $>0 \text{ }^\circ\text{C}$ )造成蒸发较大

表 3 2008 年初冰雪灾害发生前后各代表站潜热通量对比表

| 站名 | $\iota E_1/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ | $\iota E_2/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ | $\Delta\iota E/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ |
|----|--|--|--|
| 武汉 | 16.63                                    | 28.39                                    | -11.76                                       |
| 长沙 | 28.99                                    | 35.38                                    | -6.39  |
| 南昌 | 23.98                                    | 36.07                                    | -12.09                                       |
| 永州 | 24.66                                    | 42.74                                    | -18.08                                       |

注:  $\iota E_1, \iota E_2$  分别表示冰雪灾害发生前和期间的平均潜热通量;  
 $\Delta\iota E = \iota E_1 - \iota E_2$

所致。

图 6 给出 2008 年初各代表站地面净辐射的时间变化。从中可见,自 1 月初至 1 月中旬,各站净辐射值波动较大且缓慢降低,低温阴雨天气开始后,净辐射值开始迅速下降,长沙和武汉站 1 月中下旬大部分时段降至负值,南昌和永州站下旬部分时段也降至负值;至 2 月上旬,随雨雪天气结束,各站净辐射开始较快上升,恢复到雨雪前水平。

同样,对比结果表明,1 月冰雪灾害前,各站净辐射平均值在  $10\sim 20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  之间,冰雪灾害期间平均净辐射各站在  $-4.0\sim 0.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (表略)。

图 7 给出 2008 年初各代表站土壤热流量( $R_n$ )变化。从中可见,从 1 月初至 1 月中旬,各站  $R_n$  大部分时间均为负值并波动幅度较大,至冷锋南侵前温度最高日前后,向下传输的  $R_n$  达到最大;低温阴雨天气开始后, $R_n$  变化趋于平稳,并缓慢上升,说明热量开始逐渐由深层向表层传输;2 月上旬,随雨雪天气结束,冰雪消

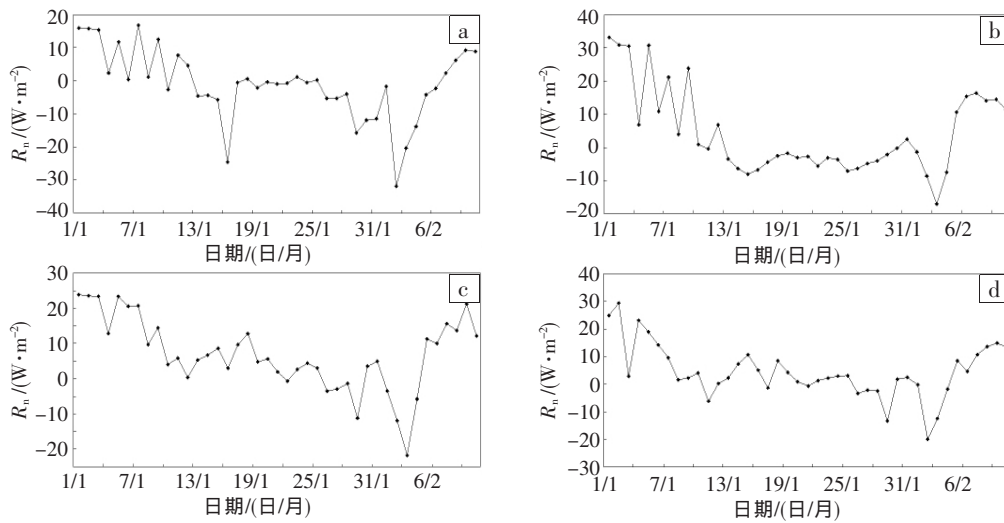


图 6 2008 年 1 月 1 日至 2 月 10 日武汉(a)、长沙(b)、南昌(c)、永州(d)站地面净辐射( $R_n$ )变化图

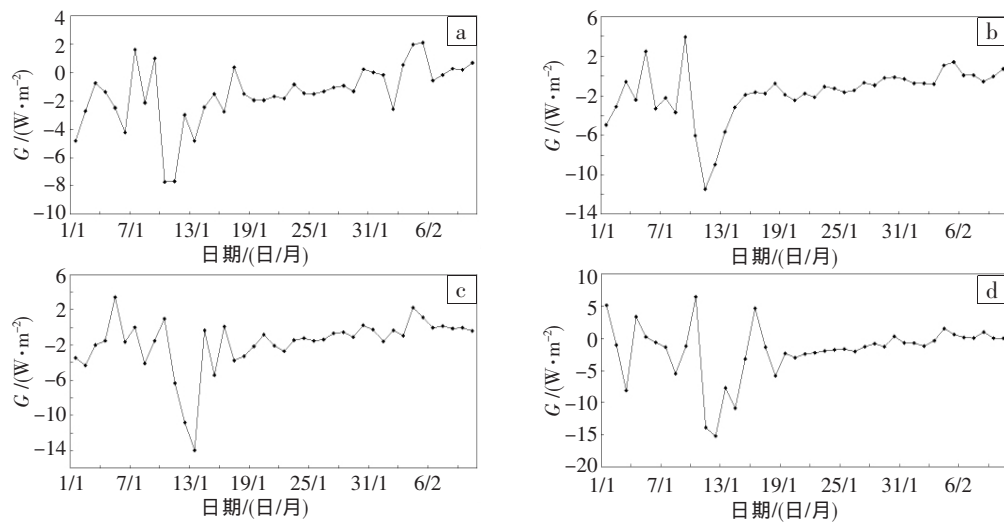


图 7 2008 年 1 月 1 日至 2 月 10 日武汉(a)、长沙(b)、南昌(c)、永州(d)站土壤热流量( $G$ )变化图

融,各站  $R_n$  大部分时间达到正值,即深层土壤热量给地表加温。

同样,对比结果表明,各代表站冰雪灾害前后土壤热流量平均值无明显区别,这可能由土壤热流量相对稳定和变化滞后所致(表略)。

### 3 地面积雪、融雪预报试验

#### 3.1 积雪深度与融雪量推算

南方冬季积雪增大取决于降雪、融雪两个过程,当融雪速度小于降雪速度时,积雪深度增加。因此,要拟合出积雪深度,除获得降雪预报量外,还应对融雪过程作出准确估计。积雪深度的计算思路为,当日积雪深度等于上一日积雪深度加上当日降雪深度减去当日融雪量。由此建立积雪深度计算式如下:

$$A_n = A_{n-1} + S_n - M_n \quad (11)$$

其中,  $A_n$  为当日积雪深度,  $A_{n-1}$  为上一日积雪深度,  $S_n$  为当日降雪深度,  $M_n$  为当日融雪量。上一日积雪

深度可通过测量气象观测场内未融化的积雪得到,表示从积雪面到地面的垂直深度(以 cm 为单位),该值随积雪量增大而不断累积变化。

由于积雪密度、含水量等各种因素影响,降雪量不能直接换算降雪深度  $S_n$ ,但降雪量和降雪深度存在一定的对应关系。当降雪落地无融化时,一般 1 mm 降雪量在北方地区可形成的积雪深度为 0.8~1.0 cm,在南方地区的积雪深度为 0.6~0.8 cm<sup>[10]</sup>。由于 2008 年初冰冻雨雪灾害主要发生在南方,本文取 1 mm 降水量对应 8 mm 降雪深度。因此,在式(11)中,就仅有日融雪量是未知的。

#### 3.2 拟合试验

由地面水热通量平衡方程可知,冰雪灾害期间净辐射( $R_n$ )和土壤热流量( $G$ )的绝对量值均较小,感热通量和潜热通量相平衡,即地面感热通量获得的热量用于融化积雪,并转化为汽化潜热。图 8 给出 2008 年 1 月 1 日至 2 月 10 日武汉站日平均融雪量和潜热通量

变化曲线。

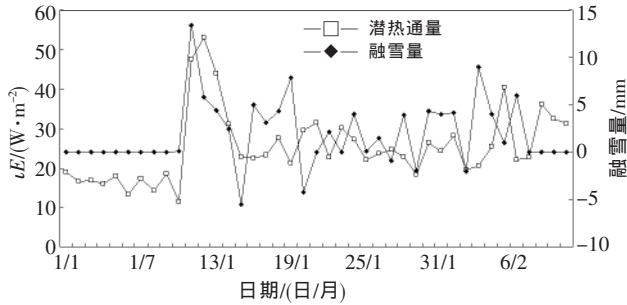


图 8 2008 年 1 月 1 日至 2 月 10 日武汉站潜热通量( $\tau E$ )与融雪量( $M_n$ )变化图

从图 8 中可见,潜热通量与日融雪量的对应关系较好,2008 年初第一次冰雪过程(1 月 10-15 日)出现较大融雪量对应较大潜热通量;第四次过程(1 月 30 日-2 月 2 日)融雪量与潜热通量变化大且对应较好;第一、第四两次过程之间,变化平缓的融雪量对应数值较小的潜热通量。

由上可知,不同地面水热通量条件会导致不同融雪强度,进而影响积雪深度的变化。因此,本文尝试采用 2008 年 1 月 10-25 日逐日潜热通量( $\tau E$ )和融雪量( $M_n$ )建立日融雪量拟合方程:

$$M_n = 0.1987\tau E - 3.1296 \quad (12)$$

其中, $\tau E$  为反演得到的潜热通量。根据式(11)、(12),利用 1 月 26 日至 2 月 10 日逐日数据进行日积雪深度拟合独立样本检验,对拟合效果的检验结果见图 9。

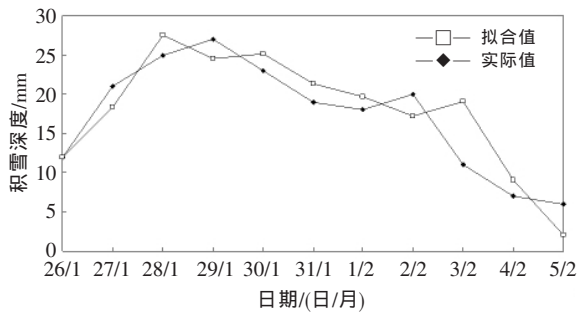


图 9 2008 年 1 月 26 日至 2 月 10 日武汉站积雪深度拟合值与实际值对比图

从图 9 中的对比结果可见,预报的积雪深度基本上与实际积雪深度一致,其相关系数达 0.90,除个别日期外,预报积雪深度的绝对误差低于 5 mm。这表明该预报思路是可行的。

### 4 结论与讨论

1) 本文利用水热平衡参数模型反演计算了冰雪灾害期间地面感热通量、潜热通量、净辐射和土壤热流量等参数,从地气系统能量交换的角度分析了这些

参数的变化特征及其可能的原因,结果对分析地面能量传输的变化与冰雪灾害发生发展的可能相互作用具有较好的参考价值。

2) 冰雪灾害发生期间,地温降至气温以下,大气给地表加热,使向上感热通量明显下降。降水增加导致蒸发增加,使潜热通量明显上升。低温雨雪天气开始后,受寡照影响,净辐射值迅速降至较低值,部分站点降至负值。冰雪灾害期间土壤热流量变化较灾害前平稳,随冰雪灾害灾情发展,热量开始逐渐由深层向表层传输,由深层土壤给地表加温。

3) 不同地面水热通量条件会导致不同融雪强度,进而影响积雪深度的变化。利用潜热通量与地面日融雪量的相关性建立融雪量拟合方程,结合降雪量预报来拟合积雪深度是可行的,在积累一定量的观测和试验数据后可尝试应用于实际预报中。

本文只分析了部分代表站点反演计算结果,其结果是否适合我国南方广大区域,文中没有涉及。因此,在以后的研究中,将继续增加计算反演的站点,对更大范围内的水热通量参数进行探讨。同时,在积雪深度拟合实验中,降雪深度受天气、季节要素影响很大,并非 1 mm 降水量与 8 mm 降雪深度的简单转换,还因观测和实验数据样本有限,积雪和融雪量计算不够精确,这也在一定程度上影响了研究的深入。

### 参考文献:

- [1] 陶诗言,卫捷.2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析[J].气候与环境研究,2008,13(4):337-350.
- [2] 李崇银,杨辉,顾薇.中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析[J].气候与环境研究,2008,13(2):113-122.
- [3] 董海萍,倪娜,洪凯,等.MM5 模式对 2008 年 1 月 25-30 日我国南方强冰雪过程的数值模拟[J].暴雨灾害,2009,28(1):29-35.
- [4] 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.
- [5] Kondo J, Saigusa N. Modeling the evaporation with a formula for vaporization in the soil pores [J]. J Meteor Soc Japan, 1994, 72: 413-421.
- [6] Kondo J, Jianqing Xu. Seasonal Variation in the Heat and Water Balance for Nonvegetated Surface [J]. J Appl Meteor, 1997, 36: 1676-1695.
- [7] Xu J Q, Shigenori HAGINOYA. Heat and Water Balance Estimates over the Tibetan Plateau in 1997-1998 [J]. J Meteor Soc Japan, 2005, 83(4): 577-593.
- [8] Xu T Q, Shigenori HAGINOYA. Surface heat and pan evaporation trend in Eastern Asia in the period 1971-2000 [J]. Hydrol Process, 2005, 19: 2161-2186.
- [9] 柏晶瑜,徐祥德,周玉淑,等.春季青藏高原感热异常对长江中下游夏季降水影响的初步研究[J].应用气象学报,2003,14(3):363-368.
- [10] 周后福,刘英,翟青,等.2008 年安徽雪深全国之最多的成因探讨[J].安徽农业科学,2008,36(18):7874-7877.