

应用辐射平衡原理计算夏季水泥路面温度*

刘熙明¹⁾²⁾ 喻迎春²⁾ 雷桂莲²⁾ 刘志萍²⁾

¹⁾(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室(LAPC),北京 100029)

²⁾(江西省气象科技服务中心,南昌 330046)

摘 要

应用能量守恒方法,考虑太阳短波辐射、大气和地面的长波辐射(辐射)、潜热、感热传输等能量之间的平衡,并考虑水汽、气溶胶、浮尘以及云等对太阳短波辐射的吸收和散射,建立了一种较实用的路面温度预报模型。应用南昌市自动气象观测站2002年7月26日至8月24日共30d逐时的各气象要素资料进行模拟分析,并与该时段内所测到的水泥路面温度进行对比,发现:当夏季日照时间超过5h时,水泥路面最高温度预报最大误差 $< 4^{\circ}\text{C}$,多日误差绝对值平均为 2.13°C ,该模型具有较好的实际应用价值;但当雨日或无日照时,结果较差。

关键词: 辐射通量 能量平衡 夏季 水泥路面温度

引 言

路面温度预报主要是预测夏冬两季路面温度。由于夏季路面温度较高时,加上汽车轮胎与高温路面之间的摩擦,容易造成爆胎,酿成事故;而冬季路面温度太低时,易造成路面结冰,使汽车刹车失阻,造成事故。

路面温度的预报在欧美及日本等国发展得比较成熟,英国气象局的应用气象学家们从20世纪60年代起,就开始了路面温度预报的研究,到90年代,已经有比较成熟的路面温度数值预报模式。他们应用先进的自动监测系统获得实时的路面要素资料和气象要素资料,从而对未来的路面温度进行预报服务^[1]。1992~1993年,德国开始将路面状况及路面温度预报列为德国公路天气信息系统(SWIS)的一部分,并且沿高速公路安装了公路天气监测系统,为路面温度预报提供了资料来源^[2]。他们大都以太阳辐射能量守恒原理为基础,应用数值天气预报为气象要素场的来源。Sha^[1]等利用沿公路的自动监测站资料,建立了冬季路面结冰自动预报模式。Jacobs和Raatz^[2]应用能量守恒方法,分别对不同条件下的路面温度进行了预报计算,得到其平均误差一般为 $1\sim 2\text{K}$ 。由于欧美国家地理纬度较高,冬季路面结冰现象比较普遍,为了清除路面冰,政府以往每年需要投入数千万元的资金和大量的人力,采取的主要措施就是向地面撒盐^[1~2]。现在,政府只需根据气象部门的预报结果,就可以决定何时、何地需要撒多少盐,从而节省了大量的资金。美国

* 国家自然科学基金 40233030 和中国气象局 1999 年“江西省公路交通专业气象服务技术研究”课题资助。

2003-06-06 收到,2004-03-10 收到再改稿。

加州大学的覃志豪等^[3-4]分别应用 NOAA AVHRR 热通道数据和陆地卫星 TM6 数据等资料演算地表温度,效果较好。但所得到的地表温度均为土壤地表的温度。目前我国对路面温度预报研究较少,且大多是应用经验统计、对比等方法来获得路面温度,其实际应用效果较差,误差较大。

路面温度的高低由地面净热辐射通量决定,而地面的净热辐射通量是太阳和地球辐射通量之和^[5]。若不考虑车辆对路面温度的摩擦影响,应用能量守恒方法,即考虑太阳短波辐射、大气和地面的长波辐射(辐散)以及潜热、感热传输等能量之间的平衡,就可以建立路面温度预报方法。

1 路面温度的计算

路面能量平衡方程为:

$$G(t) = (1 - \alpha_s) S \downarrow + L \downarrow - L \uparrow - H - V \quad (1)$$

其中 $G(t)$ 为 t 时刻路面导热通量, $S \downarrow$ 为太阳短波辐射(当太阳高度角 $\leq 0^\circ$ 时,取 $S \downarrow = 0$), α_s 为路面反照率,这里取常数 0.31, $(L \downarrow - L \uparrow)$ 为净长波辐射, H 、 V 分别为感热、潜热输送。

1.1 太阳短波辐射 $S \downarrow$ 的计算

到达地面的太阳短波辐射主要是受当地纬度、太阳赤纬、太阳高度角、地面反射率、大气中的气溶胶粒子浓度、空气污染程度、以及云量、云状、水汽等因子的影响。Shao^[1]给出:

$$S \downarrow = f S_0 t_R t_g t_w t_p t_c (\sin \beta \sin \delta + \cos \beta \cos \delta \cos \omega) \quad (2)$$

其中, S_0 为太阳常数($1353 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), f 为与日地距离有关的因子, β 为地理纬度, δ 为太阳赤纬, ω 为时角。 t_R 、 t_g 分别为 Rayleigh 散射和恒量气体的吸收系数, t_w 、 t_p 、 t_c 分别为水汽吸收、气溶胶及浮尘的吸收和散射、云的吸收和散射系数。

$$f = 1 + 0.034 \cos[2\pi(N - 1)/365] \quad (3)$$

一般情况下,取 $f \approx 1.0$ 。

$$\omega = (2\pi/24) \cdot (t - 12) \quad (4)$$

其中 t 为平均太阳时(顺时针为正,逆时针为负)。

$$t_R t_g = 1.012 - 0.084 [m(949 p^{-5} + 0.051)]^{1/2} \quad (5)$$

其中 p 为气压, m 为光学质量。

$$m = 35 [1.224 (\sin \beta \sin \delta + \cos \beta \cos \delta \cos \omega)^2 + 1]^{1/2} \quad (6)$$

$$t_w = 1 - 0.077 (wm)^{0.3} \quad (7)$$

其中: $w = \exp[1.3709 - 1 \ln(e + 1) + 0.07074 T_d]$, e 为与纬度有关的常数(1.11 ~ 3.37), T_d 为露点温度。

$$t_p = x^m \quad (8)$$

其中 x 为常数(值为 0.95)。

$$t_c = 1 - C_l(1 - c_l) + [1 - C_m(1 - c_m)] + [1 - C_h(1 - c_h)] \quad (9)$$

其中, C_l 、 C_m 、 C_h 分别为低、中、高云云量, c_l 、 c_m 、 c_h 分别为低、中、高云透射率。由于在实际观测当中,中云量一般没有记录,而且在每天的地面天气图中只有高云和低云资料。因此,在这里,仅考虑高云和低云的影响,取 $C_m = 0$, C_h 、 C_l 分别为 0~1 之间的值(由预报得到),由方程(9)中可以看到,由于取 $C_m = 0$,对 c_m 可以不考虑它的取值大小,而高云和低云的透射率分别通过与实测资料进行比较、调试,得到 $c_h = 0.65$, $c_l = 0.2$ 。

1.2 长波辐射($L\downarrow - L\uparrow$)的计算

根据 Stefan Boltzmann 定律,大气长波辐射 $L\downarrow$ 为^[2,6]:

$$L\downarrow = \sigma(T + 273)^4 \cdot \varepsilon_{a,0} \quad (10)$$

其中: σ 为 Stefan Boltzmann 常数(值为 $5.6697 \times 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$), T 为气温($^{\circ}\text{C}$); $\varepsilon_{a,0}$ 为天空显性辐散系数,其表达式为:

$$\varepsilon_{a,0} = b + 5.95 \cdot 10^{-5} \cdot e \cdot \exp(1500/T) \quad (11)$$

e 为水汽压; b 为与能见度有关的常数,其取值标准为:

- (1) 能见度好时, $b = 0.69 - 0.01 d_d$;
- (2) 能见度一般时, $b = 0.73 - 0.01 d_d$;
- (3) 能见度差时, $b = 0.77 - 0.01 d_d$ 。

$d_d = a \sin(\cos \theta_{z,t-2h}) \times (1 - C_{eff}) \times \left| 1 - \frac{f_f}{20} \right| / 50$, 其中 $\theta_{z,t-2h}$ 为天顶角(2 h 以后), f_f 为风速, C_{eff} 为太阳直接辐射因子,

$$C_{eff} = C_l + (1 - C_l) \times 0.95 \times C_m + (1 - C_l) \times (1 - 0.95 \times C_m) \times C_h \times 0.5 \quad (12)$$

由 Stefan Boltzmann 定律,同样可以得到地面长波辐射 $L\uparrow$:

$$L\uparrow = \sigma(T_s + 273)^4 \cdot \varepsilon_{s,0} \quad (13)$$

其中, T_s 为路面温度($^{\circ}\text{C}$), $\varepsilon_{s,0}$ 为路面放射率,Shao^[1]等指出:沥青路面时, $\varepsilon_{s,0} = 0.956$;水泥混凝土路面时, $\varepsilon_{s,0} = 0.966$ 。

1.3 感热、潜热的计算

$$H = C_p \rho C_H V (T - T_s) \quad (14)$$

$$V = L \rho C_E V (q - q_s) \quad (15)$$

其中, ρ 为近地面空气密度(值为 $1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), V 为风速, T 为气温, q 为空气湿度, T_s 、 q_s 分别为路面温度和路面湿度, L 为凝结潜热(值为 $2.5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_H 、 C_E 分别为感热、水汽输送系数(分别为 1.81×10^{-3} 、 0.15×10^{-3}), C_p 为常压下的空气比热(值为 $1.00 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

由公式(1)~(15)可以求得 t 时刻路面导热通量 $G(t)$ 。假设路面为均匀分布的均质体,根据热力学方程, t 时刻单位质量的路面温度 $T_s(t)$ 与 $G(t)$ 之间的关系为:

$$\frac{\partial T_s(t)}{\partial t} = \frac{1}{C_{pd}} \frac{\partial G(t)}{\partial t} \quad (16)$$

其中 C_{pd} 为公路的比热,由公路材质决定(水泥路面的比热为 $1.17 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)。因此,只要知道预报点路面温度的初始场资料,就可以对上式进行时间差分,求得 t 时刻的路面温度。

2 夏季水泥路面温度计算实例

在江西,夏季高温是导致公路运输过程中交通事故的主要原因之一。据统计,江西夏季日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 日数历年平均为 7~43 d。由于高温所导致的公路交通事故常有发生,鉴于此,我们仅就夏季高温天气时的水泥路面温度预报进行了试验。试验过程中,我们应用江西省气象局设在南昌市的自动气象观测站的逐时气象要素观测资料和水泥路面温度观测资料,对 2002 年 7 月 26 日至 8 月 24 日 30 d 的水泥路面温度进行逐日 24 h 的计算和对比。

在水泥路面温度预报计算过程中,取计算时间步长为 1 h,即:应用 1 h 一次的气象要素实况观测资料作为水泥路面温度预报计算过程中的气象要素场资料,而以预报计算起报时的水泥路面温度实况值作为计算未来 24 h 水泥路面温度的初始值(在本试验中,以每天午夜 00:00(北京时,下同)作为预报起报时间),计算出下 1 个时次的水泥路面温度预报值,该时次的预报值又是计算下 1 个时次水泥路面温度的初始值。这样,每天共得到 23 个时次的水泥路面温度预报值。为了进行有效对比,我们分别计算了不同日照情况下的结果。图 1 为 2002 年 8 月 10 日(日照时数 0 h,有降水) 8 月 12 日(日照时数 6.7 h,无降水)和 8 月 23 日(日照时数 11.6 h,无降水)的计算结果和实况对比。

从图 1 可以看出,计算所得到的水泥路面温度的日最大值一般出现在 12:00~13:00,而实况一般出现在 13:00~14:00,并且计算结果的偏差与天空状况关系非常密切。图 1 a 中夏季雨天或无日照时,计算结果白天明显偏高(偏高 10°C 以上)。我们认为,路面下方的结构特征以及感热的垂直传输过程在本文中处理过于简单,并且,阴雨天时散射辐射也没有进行特别考虑。图 1 b 和图 1 c 分别为日照时间 ≥ 5 h 的情况,可以看到计算所得到的水泥路面温度与实况比较相似,但时间上略有错开:在 01:00~12:00,预报值较实况值有所偏高;在 13:00~23:00,预报值较实况值有所偏低。

为了进一步分析预报结果,我们对 2002 年 7 月 26 日至 8 月 24 日逐日水泥路面最高温度预报值、实况值以及它们之间进行了比较(表 1)。从表 1 中可以看到:当日照时间 ≥ 5 h,预报值与实况值之间的最大误差绝对值 $< 4^\circ\text{C}$,并且多日误差绝对值平均为 2.13°C ,

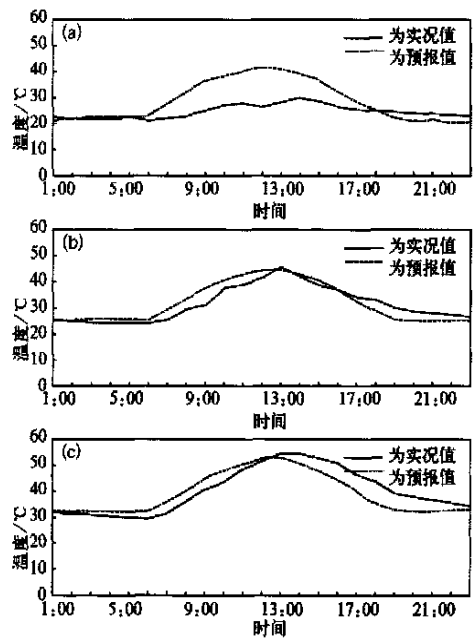


图 1 水泥路面温度预报值与实况值比较
(a) 2002 年 8 月 10 日(有降水), (b) 2002 年 8 月 12 日(无降水,日照时数 6.7 h), (c) 2002 年 8 月 23 日(无降水,日照时数 11.6 h)

表 1 2002 年 7 月 26 日~8 月 24 日逐日水泥路面最高温度预报值、实况值以及误差分析

日期	实况值(°C)	预报值(°C)	误差(°C)	日照(h)	日期	实况值(°C)	预报值(°C)	误差(°C)	日照(h)
7月26日	42.5	44.8	2.3	5.0	8月10日	29.7	41.11	11.41	0
7月27日	41.6	44.15	2.55	5.5	8月11日	42.7	44.94	2.24	8
7月28日	46.8	47.15	0.35	8.9	8月12日	45.8	45.1	-0.7	6.7
7月29日	50.3	47.5	-2.8	8.6	8月13日	45.5	46.5	1	8.2
7月30日	52.7	48.77	-3.93	9	8月14日	42	46.76	4.76	1.7
7月31日	52.9	50.07	-2.83	10.4	8月15日	35.7	47.9	12.2	2.7
8月1日	53	50.17	-2.83	11.2	8月16日	30.8	45.65	14.85	0.6
8月2日	53.3	49.71	-3.59	11.9	8月17日	29.1	42.51	13.41	0
8月3日	54	51.13	-2.87	11.6	8月18日	36.6	42.57	5.97	1
8月4日	55.8	52.82	-2.98	12	8月19日	36.9	45.31	8.41	1.1
8月5日	51.2	50.96	-0.24	9.8	8月20日	51.9	48.87	-3.03	10.8
8月6日	36.2	58.76	22.56	0.3	8月21日	53	51.16	-1.84	10
8月7日	27.7	45.65	17.95	0	8月22日	53.9	53.11	-0.79	11.1
8月8日	29.7	45.37	16.67	0	8月23日	55	53.19	-2.81	11.6
8月9日	25.5	42.65	17.15	0	8月24日	54.7	52.86	-1.84	11.2

小于气象部门有关气温预报的误差规定(2.5 °C);而当日照时间 < 5 h 时,则预报值与实况值之间的误差较大。另外还可以看到:当日照时间为 5 ~ 8 h 时,预报值一般较实况值偏高;而日照时间超过 8 h 时,则预报值一般较实况值偏低。

图 2 为不考虑日照时间 < 5 h 的情况下路面最高温度的预报值与实况值的比较。由图 2 可以看到:路面最高温度的预报值与实况值非常吻合,当实况值上升或下降时,预报值也随着上升或下降。

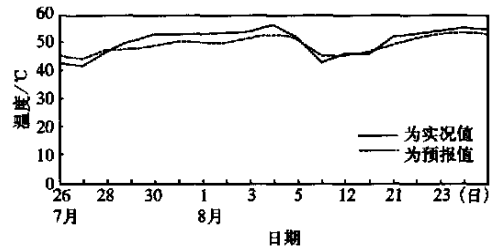


图 2 2002 年 7 月 26 日至 8 月 24 日日日照 ≥ 5 h 的日最高水泥路面温度实况值与预报值的比较

3 结 语

(1) 应用能量守恒方法,考虑太阳短波辐射、大气和地面的长波辐射(辐散)以及潜热、感热传输等能量之间的平衡,可以建立路面温度预报模型;

(2) 当日照时间 ≥ 5 h 时,应用能量守恒方法对夏季路面温度,尤其是路面最高温度进行预报具有一定的可应用性。

(3) 当为雨日或无日照时,模型结果的偏差比较大。这主要是因为路面下方的结构特征以及感热的垂直传输过程在本文中处理过于简单,并且,阴雨天时散射辐射也没有进行特别考虑。

(4) 由于在目前的日常气象观测中,一般缺少中云的观测资料,因此,本文在试验过程中均将中云的作用忽略。如果应用数值预报输出产品时,应该考虑高、中、低云的综合

作用,这样,更符合实际。

上述只是设定在理想条件下路面温度计算方法,在实际过程中,还应该考虑诸多因素,如:路面的地理信息情况、路面环境的植被情况、车体通过摩擦与路面之间的热交换情况、路体内部热传输的非均匀性,等等。因此,应用式(16)计算得出的路面温度与实况值存在一定的偏差应该也是比较合理的。在实际应用过程中,应该进行有关的订正。

参考文献

- 1 Shao J, Lister P J. An automated nowcasting model of road surface temperature and state for winter road maintenance. *J Appl Meteor*, 1996, **35**(8): 1352 ~ 1361.
- 2 Jacobs W, Raatz W E. Forecasting road surface temperatures for different site characteristics. *Meteorol Appl*, 1996, **3**(3): 243 ~ 256.
- 3 覃志豪, Zhang Ming-hua, Arnon Karnieli. 用 NOAA-AVHRR 热通道数据演算地表温度的劈窗算法. 国土资源遥感, 2001, (2): 33 ~ 42.
- 4 覃志豪, Zhang Ming-hua, Arnon Karnieli, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法. 地理学报, 2001, **56**(4): 456 ~ 466.
- 5 吴国雄, 刘辉. 气候物理学. 北京: 气象出版社, 1995. 72 ~ 103.
- 6 王名才. 大气科学常用公式. 北京: 气象出版社, 1994. 145.

USING RADIANT BALANCE THEORY TO CALCULATE CONCRETE ROAD SURFACE TEMPERATURE IN SUMMER

Liu Xi ming¹⁾²⁾, Yu Yingchun²⁾, Lei Guilian²⁾, Liu Zhiping²⁾

¹⁾ (LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy Science, Beijing 100029)

²⁾ (Service Center of Meteorological Science and Technology of Jiangxi Province, Nanchang, 330046)

Abstract

By using energy balance method and considering the balance among solar short-wave radiation, atmospheric and ground long wave radiations, latent heat fluxes and sensible heat fluxes, an operational forecasting model for concrete road surface temperature is established, the parameterizations of absorption and scattering of vapor, aerosol and cloud are also adopted in this model. The daily observation data of Nanchang City (from July 26, 2002 to August 24, 2002) have been used in the validation of the model, results show that when sunshine-hour per day in summer is less than 5 h, the biggest error of forecasting for the highest road surface temperature is less than 4 °C, and the mean absolute value of the errors in validation period is less than 2.13 °C, which proves that the model is practically useful. But in rainy or non-sunshine days, the model doesn't work well.

Key words: Radiant flux Energy balance Summer Concrete road surface temperature