

陈荣,程正泉,黄健聪. 广州地区湿球黑球温度指数预报研究[J]. 气象,2012,38(5):623-628.

广州地区湿球黑球温度指数预报研究^{* 1}

陈 荣¹ 程正泉² 黄健聪¹

1 广州市番禺区气象局,广州 511400

2 广州中心气象台,广州 510080

提 要: 利用广州地区 2009 年 10 月至 2010 年 3 月的湿球温度、干球温度、黑球温度,以及附近自动气象站相同时刻的温度、风速、湿度资料进行统计分析,在对广州地区湿球黑球温度(Wet Bulb Globe Temperature, WBGT)统计、特征分析的基础上,分别采用昼夜两段模式和分时模式构建出 WBGT 预报方程。利用 WBGT 的实测资料,对上述两种预报方程和直接引用的香港天文台 WBGT 预报方程一同分析预报误差,对比发现:直接引用的香港天文台的预报方程预报效果最差,分时段 WBGT 预报模式总体偏差最小;三种预报方法在夜间比白天预报偏差小,昼夜预报法和分时预报法预报偏差不超过 1℃,两者对夜间的 WBGT 预报能力相当,但在白天时段分时预报法明显比昼夜预报法的预报偏差小。据此,文章选取预报效果最好的分时模式建立预报方程,文中最后针对预报方程中温度、相对湿度因子由于预报误差而导致的 WBGT 预报误差进行了讨论。基于此研究成果,气象部门为第 16 届亚洲运动会的马术比赛提供了准确、周到的气象服务,为马术比赛的赛事安排及比赛的成功举办提供了重要的决策依据。

关键词: 湿球黑球温度指数,预报,马术比赛,气象服务

Study on Forecast of WBGT Index of Guangzhou

CHEN Rong¹ CHENG Zhengquan² HUANG Jiancong¹

1 Panyu District Office of Meteorology, Guangzhou 511400

2 Guangzhou Central Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

Abstract: Based on the observation of web-bulb, dry-bulb, black-globe temperatures, and the simultaneous air temperature, wind speed and relative humidity records of the adjacent AWS of Guangzhou in September 2009 to March 2010, study is carried out of the features of Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) index of Guangzhou and two kinds of forecasting equations—a daytime and nighttime forecasting method and an hourly forecasting method. Then the forecasting errors of the two kinds of methods together with the initial equation imported from Hongkong Observatory are analyzed, and results show that, the initial Hongkong equation has the biggest error, and the hourly forecasting method constructed based on the hourly fitting has the least error; The three methods all have less errors in nighttime than in daytime, and errors of both daytime and nighttime forecasting method and hourly forecasting method are less than 1℃. Compared with the daytime and nighttime forecasting method, the hourly forecasting method has the similar errors in nighttime and much less errors in daytime. Therefore, based on these, the hourly forecasting method is applied in the meteorological service of the equestrianism of Guangzhou 2010 Asian Games. In the end, the forecasting error of WBGT equation is discussed based on the forecast error of temperature and relative humidity.

Key words: WBGT index, forecast, equestrian competition, meteorological service

* 广东省科技计划项目(00697331120128016)资助

2011 年 6 月 15 日收稿; 2011 年 9 月 25 日收修定稿

第一作者: 陈荣,主要从事灾害性天气预报技术研究. Email: pycr@sina.com

引言

在马术比赛中,马匹的表现是影响比赛结果很关键的因素。马匹往往会因为炎热和潮湿的天气而影响到比赛的成绩,国际马术联合会 1995 年引入了湿球黑球温度指数(Wet Bulb Globe Temperature, WBGT),用于监测和预报马匹实际感受的暑热压力。第 16 届亚洲运动会于 2010 年 11 月在广州举办,马术比赛是本次亚运会的重要比赛项目,广州亚组委需要气象部门提供 WBGT 指数预报和服务。

为了衡量不同天气条件下人体舒适状况,多年来国内外学者对舒适度指数进行了研究,这些指数在人体热舒适、生物气候条件评价、气象与健康以及城市规划等方面得到了广泛应用^[1-17]。WBGT 指数最早于 1957 年由 Yaglou 等^[18]提出。WBGT 指数是表示人体接触生产环境热强度的一个经验指数,它采用了自然湿球温度、黑球温度和干球温度 3 种参数,3 种要素占不同的权重,并通过公式计算而获得^[19]。在国际上,WBGT 指数已被 ISO 7243 标准体系认证^[20];WBGT 被美国职业安全与健康研究所选作评估炎热环境安全性的指标^[21]。1982 年,国际标准化组织(ISO)在 ISO 7243 标准中,采用了 WBGT 指数来评价高温作业环境的热强度。芬兰、瑞典、罗马尼亚、俄罗斯、比利时、澳大利亚和日本等许多国家都采用了 WBGT 指数作为评价高温作业环境热强度的指数。英国、法国和德国等国还进行了 WBGT 指数的现场和实验室评价研究。我国绿色奥运建筑研究课题组采用 WBGT 作为评估奥运园区夏季室外热环境的安全性指标^[22]。吴结晶等^[23]统计分析青岛市区夏季(6—9 月)与体感温度关系密切的最高气温、相对湿度和风速的气候概况,根据体感温度的计算形式和有关气象要素的分布特征,得出其经验计算公式。吴兑等^[24]对环境气象学进行了深入的研究,提出人体的舒适感与气温、湿度、风速综合作用有关的生物气温指标,并按研究的不同角度进行了分类,其中一类是根据生理反应综合气象因素制定的指标,如湿黑球温度。2008 年北京奥运会期间,在香港奥运分赛场马术比赛期间,香港天文台专门为马术比赛预报 WBGT 指数。

由于 WBGT 指数的特征、预报方程式会因为地区的差异而有所不同,因此很有必要开展广州地区 WBGT 指数的气候特征研究和预报方程式的建立。

本文在对广州地区 WBGT 数据统计、分析的基础上,依据广州地区 WBGT 的特点,分别采用昼夜

两段模式和分 24 个时次模式建立 WBGT 预报方程,通过对这两种预报方程以及直接引用香港天文台 WBGT 预报方程进行预报误差分析,选取预报效果最好的分时预报模式,建立预报方程,并对方程中温度、相对湿度因子由于预报误差而导致的 WBGT 预报误差大小进行分析。基于此研究成果,气象部门为第 16 届亚运会的马术比赛提供了准确、周到的气象服务,为马术比赛的赛事安排以及比赛的成功举办提供了重要的决策依据。

1 WBGT 的监测与特征

1.1 WBGT 指数的监测

为了收集广州地区的 WBGT 监测资料,广州市气象局于 2009 年 10 月在广州建立了 WBGT 自动监测站,WBGT 自动监测站主要由湿球温度、干球温度、黑球温度 3 个感应器组成,温度感应器的测量范围介于 $-40\sim 50^{\circ}\text{C}$,分辨率为 0.1°C ,误差范围为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。监测站通过 GPRS 技术自动将数据传输至广东省气象局信息中心,与区域自动气象站的传输时间一样,每 6 min 有一次数据传送,数据文件采用 XML 类型存放,通过上述方式能实时探测到安装地点的自然湿球温度、干球温度和黑球温度。

按照国际上 WBGT 指数既定的计算公式,利用自然湿球温度、干球温度、黑球温度计算得到对应时间的 WBGT 值,即: $WBGT = 0.7T_{nw} + 0.2T_g + 0.1T_a$,其中, T_{nw} (Natural Wet Bulb Temperature)是自然湿球温度, T_g (Globe Temperature)是黑球温度, T_a (Dry Bulb Temperature)是干球温度。

在 2008 年奥运会期间,国际马术联合会按暑热对马匹的影响程度,对 WBGT 指数大小进行了分级(见表 1)并提出应对措施。

表 1 WBGT 指数高低对马匹影响表

Table 1 Category of WBGT index and its strategies

WBGT/ $^{\circ}\text{C}$	应对措施
<28	赛事不受影响
28~30	需要马匹采取适当避暑措施
30~32	加强避暑措施,避免马匹过热
32~33	天气不利马匹进行比赛,赛程应作适当调整
>33	天气不适宜比赛,应征询兽医意见

1.2 资料介绍

本文基于 2009 年 10 月中旬到 2010 年 3 月的采集所得到的资料进行数据分析和特征研究,资料

中包括每 6 min 一次的温度、湿度、风、雨量资料,同时也保存同一时刻的黑球温度、湿球温度、WBGT 指数资料。

1.2.1 月变化特征

从 2009 年 10 月到 2010 年 3 月的月平均统计资料看,黑球温度、湿球温度、干球温度在几个月里的变化趋势体现出相同的季节变化特征,因为 WBGT 指数是由黑球温度、湿球温度和干球温度按权重求和所得,因此也表现出随温度升降而升降的季节变化特点,从秋季的 10 月至冬季的 1 月 WBGT 指数跟随黑球温度、湿球温度、干球温度一起逐月下降,然后由冬季的 1 月至春季 3 月 WBGT 指数又随着 3 种温度逐月上升(如图 1)。

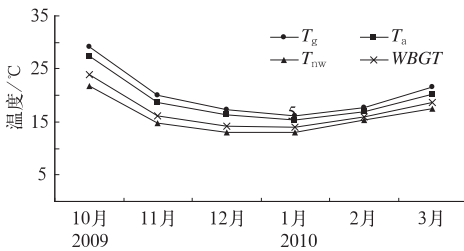


图 1 WBGT 月平均值变化图

Fig. 1 Monthly averaged WBGT index (unit: °C)

1.2.2 WBGT 指数的日变化

WBGT 指数的变化受气温、相对湿度、风和太阳辐射等多种因子影响,不同天气下其变化也非常复杂。基于每天 00:00—23:00 每 6 min 一次的 WBGT 指数和相对湿度资料,按小时分别对 WBGT 指数、干球温度、湿球温度和黑球温度求平均,统计发现,它们的变化特点类似,有明显的日变化现象, WBGT 指数在早晨出现最低值,日出以后随着气温的上升逐渐增大,午后(14:00)随着气温达到最高值而达到最大,日落后随气温的下降而逐渐减小(如图 2)。

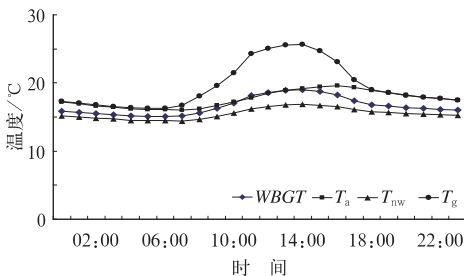


图 2 WBGT 日变化特征图

Fig. 2 Diurnal variations of WBGT index (unit: °C)

1.2.3 WBGT 指数与湿度的变化关系

基于每天 00:00—23:00 每 6 min 一次的 WB-

GT 指数和相对湿度资料,按小时分别对它们进行求平均,得到 00:00—23:00 每小时的 WBGT 平均值、相对湿度平均值,对比分析发现, WBGT 指数与相对湿度曲线有较好的对应,大致上呈反位相的关系(如图 3)。

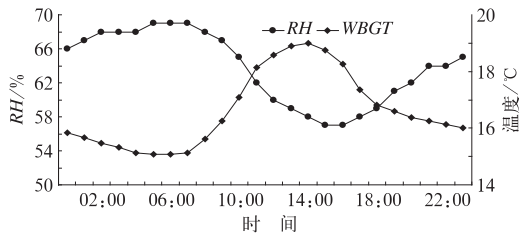


图 3 WBGT 指数与相对湿度变化趋势图

Fig. 3 Diurnal variations of WBGT index (unit: °C) and relative humidity (unit: %)

2 WBGT 指数预报方法

香港天文台利用气温和相对湿度预报 WBGT 指数,为 2008 年奥运会马术比赛提供了优质的气象服务。广州地区 WBGT 的统计特点研究表明,同一时刻的气温、相对湿度与 WBGT 关系非常密切,基于 WBGT 资料统计特点和借鉴香港天文台的 WBGT 预报方法,本文利用 WBGT 值与同一时间的温度、相对湿度因子进行回归分析,建立二元线性回归方程式。

为了建立广州地区的 WBGT 预报方程式,本文利用 2009 年 10 月至 2010 年 3 月资料,用两种方法去研究 WBGT 预报方法:第一种方法是按照昼夜两段模式,建立本地白天、夜间两段的 WBGT 预报方程;第二种方法是为了避免日变化带来的影响,分 24 个时次建立 WBGT 预报方程。

为了进一步了解上述两种预报方法的预报效果,本文将它们连同香港天文台的 WBGT 预报方法进行误差对比分析,从而确定最优的预报模式,提高预报准确率。

2.1 昼夜 WBGT 预报方法

利用 2009 年 10 月至 2010 年 1 月中旬的 WBGT、温度和相对湿度资料,借鉴香港天文台的预报方法,将预报时间分为白天(07:01—19:00)和夜间(19:01—07:00)两段,通过对 WBGT 与温度(TEMP)、湿度(RH)关系的统计分析,得到回归系数,组建预报方程,最后得到方程

$$\text{白天}(07:01-19:00): \text{WBGT} = -3.361 + 0.947\text{TEMP} + 5.769\text{RH} \quad (1)$$

$$\text{夜间}(19:01-07:00): \text{WBGT} = -6.329 + 0.943\text{TEMP} + 8.990\text{RH} \quad (2)$$

经过分析,方程的相关系数均超过了 0.98,说明拟合效果理想。

2.2 分时 WBGT 预报方法

昼夜预报方法建立的方程拟合效果不错,也简单考虑了白天和夜间 WBGT 的变化规律,但仍不能满足预报的需求,特别是白天,WBGT 的日变化幅度在早晚和中午时段有很大差别。为此,考虑到 WBGT 指数明显的日变化的特征,为了避免日变化的影响,将预报时段划分为 24 个(每天 00:00—01:00, 01:00—02:00, ..., 23:00—00:00),利用 2009 年 10 月至 2010 年 1 月中旬的 WBGT、温度和相对湿度资料,建立 WBGT 分时段预报方程式,如 00:00—01:00,将 2009 年 10 月至 2010 年 1 月每日 0 时 00 分、06 分、12 分、18 分、24 分、30 分、36 分、42 分、48 分和 54 分的 WBGT 值、气温、相对湿度进行回归分析,建立 00:00—01:00 时段的预报方程[见式(3)],依此方法可得到其他 23 个时段(01:00—02:00, ..., 23:00—00:00)的预报方程,方程的形式如式(4)

$$\text{WBGT} = 0.943\text{TEMP} + 9.03\text{RH} - 6.311 \quad (3)$$

$$y = ax_1 + bx_2 + c \quad (4)$$

式中, y 代表 WBGT, x_1 代表温度, x_2 代表相对湿度, c 为常数。

通过回归分析,得到各时段方程系数 a 、 b 和 c (见图 4),系数 a 在 0.923~0.965 之间,系数 b 在 2.521~9.648 之间,系数 c 在 -6.606~-0.35 之

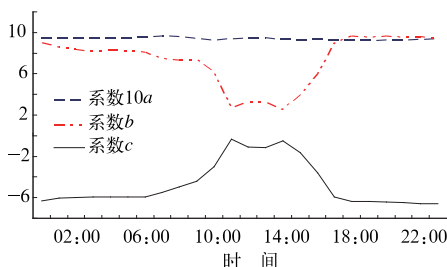


图 4 24 个时段的 WBGT 预报方程系数变化图

Fig. 4 Hourly coefficients of WBGT forecasting equations

(Coefficient a magnified by 10 is drawn with long dashed line, b with dot-dashed line, and c with solid line)

间。从图 4 可以看出,系数 a 的全天变动相对于 b 和 c 幅度小,系数 b 和 c 在傍晚 19 时至早晨 06 时这段时间变化不明显,而在早晨 07 时至傍晚 18 时变化明显; a 、 b 和 c 系数相对于自身而言,在中午前后的变幅最大,由此可见 WBGT 预报系数具有一定的日变化特点,说明分时研究建立 WBGT 预报方程是非常必要的。

通过查 F 分布表($\alpha = 0.05$),得到自由度(2,900)时, $F_{\alpha} = 3.01$,因为各时次的 F 值均远大于 3.01,所以可以认为所求算出来的 24 个预报方程式的回归效果是显著的。

2.3 香港天文台预报方法

在 2008 年香港奥运分赛场马术比赛期间,香港天文台研究了一套 WBGT 指数预报方法,为奥运马术比赛提供了优质的服务。香港天文台的预报方程利用温度和湿度作为 WBGT 方程因子,方程大致分为白天和夜间两段,其中白天的时间段是 07:01—19:00,夜间时间段是 19:01—07:00。以下是沙田赛马场(地理位置最靠近广州,位于香港北部)的预报方程式:

$$\text{白天}(07:01-19:00): \text{WBGT} = -13.35 + 1.24\text{TEMP} + 7.3\text{RH}$$

$$\text{夜间}(19:01-07:00): \text{WBGT} = -8.41 + 0.98\text{TEMP} + 9\text{RH}$$

由于此方程式应用于离广州最近的沙田赛马场,作为预报方法的一种,本文尝试直接引用此方程式来对广州地区 WBGT 进行预报,与上文介绍的两种拟合方法进行对比,了解其在广州地区的预报准确程度。

2.4 预报方法的误差对比分析

利用 2010 年 1 月下旬至 3 月的 WBGT 的实测资料(共 492 个样本),对 WBGT 预报方程进行检验,比较三种预报方法的预报效果。利用本地昼夜两段预报方程、分 24 时段的预报方程和香港天文台预报方程对 2011 年 1—3 月的 00—23 时每 6 min 计算一次 WBGT 预报值,然后计算其与实测值之间的误差[见(5)式],结果见图 5。对比发现,分 24 个时段的 WBGT 预报方法总体偏差最小,效果最好,未经处理直接引用香港天文台预报方程效果最差;三种预报方法夜间比白天预报偏差小,香港天文台的预报方程夜间段预报偏差在 2~2.5℃,而白天的预报偏差平均在 2.5℃ 以上,最大偏差达到 4℃;昼夜预报方法和分时预报方法偏差不超过 1℃,两者

对夜间段的 WBGT 预报误差相当,但在白天的 07—20 时,分时预报方法预报偏差明显比昼夜预报方法小,特别是 11—15 时气温相对较高时段,分时预报方法的预报偏差最小,此外,昼夜预报方法在傍晚前后拟合误差也明显较分时预报方法要大。因而,分时预报方法明显比其他两种预报法拟合效果好,适宜用于建模。

$$X = \frac{1}{n} \sum abs(WBGT_{实际} - WBGT_{预报}) \quad (5)$$

n 为各时次的记录数。

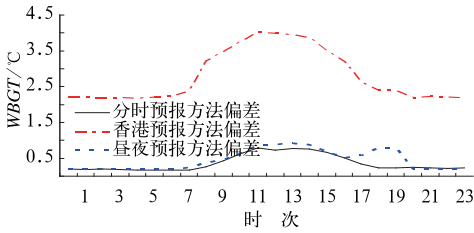


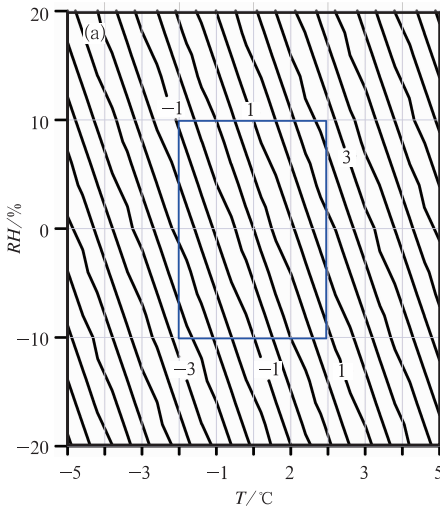
图 5 WBGT 预报方法偏差对比

Fig. 5 Forecasting errors for different forecasting equations

(Solid line is hourly equation, long dashed line is equation imported from HKO, and dot-dashed line is updated equation with new local coefficients in the same way as HKO)

3 误差理论分析

由 WBGT 的预报方程[式(4)]可知 a, b 和 c 是常数。在业务应用中,若要对 WBGT 进行预报,则 $WBGT(y)$ 的预报误差是主要由温度(x_1)和相对湿度(x_2)的预报误差所引起,可表示为



$$\Delta y = a\Delta x_1 + b\Delta x_2$$

假设温度预报误差在 $\pm 5^\circ\text{C}$,相对湿度预报误差在 $\pm 20\%$,可分析 WBGT 的误差变化范围。由于系数 a 变化范围在 0.923~0.965 之间,而 b 的变化范围从 14:00—15:00 时段的 2.521 到 18:00—19:00 时段的 9.648,由此可见系数 a 变化不大,而系数 b 变化大,故选取 18:00—19:00 和 14:00—15:00 时段为代表来分析误差的变化情况。

选取 18:00—19:00 时段的预报方程,代入 a 和 b 得到

$$\Delta y = 0.923\Delta x_1 + 9.648\Delta x_2$$

Δx_1 取值 $-5\sim 5^\circ\text{C}$, Δx_2 取值 $-20\%\sim 20\%$,计算得到 Δy 变化值在 $-9\sim 9^\circ\text{C}$ 间。在相对湿度误差为 0 的条件下, 1°C 的温度预报偏差导致的 WBGT 偏差约为 1°C ,这与温度预报偏差为 0 时,由相对湿度预报偏差 10% 所导致的 WBGT 偏差相当。

选取 14:00—15:00 时段的预报方程,代入 a 和 b 得到

$$\Delta y = 0.931\Delta x_1 + 2.521\Delta x_2$$

Δx_1 取值 $-5\sim 5^\circ\text{C}$, Δx_2 取值 $-20\%\sim 20\%$,计算得到 Δy 变化值在 $-6\sim 6^\circ\text{C}$ 间。温度预报偏差 1°C 可导致约 1°C 左右的 WBGT 偏差,而 40% 的相对湿度预报偏差才导致 1°C 左右的 WBGT 偏差。由此可见, WBGT 的预报误差主要由温度预报误差造成。由图 5 可知,中午前后是一天中系数 b 最小的时段,因此该时段的 WBGT 预报误差主要由温度预报误差产生。

从图 6 可以看出导致 WBGT 预报误差的原因,相对湿度的预报误差比温度预报误差影响小,相对

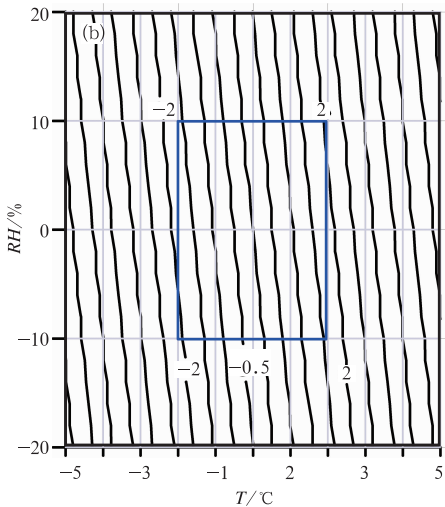


图 6 18:00—19:00(a)和 14:00—15:00(b)时段 WBGT 误差分析

Fig. 6 Forecasting errors of WBGT equation for (a) 18:00—19:00 BT and (b) 14:00—15:00 BT based on the forecasting errors of temperature and relative humidity

湿度预报误差对 WBGT 的影响夜间大于白天。日常预报中,通常温度预报偏差通常在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内、相对湿度偏差约为 $\pm 10\%$ 以内,这种情况下,WBGT 日常预报误差可以控制在 $\pm 2.8^{\circ}\text{C}$ 以内;若气温预报偏差控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内、相对湿度预报偏差在 $\pm 10\%$ 以内,则 WBGT 预报误差在 $\pm 1.9^{\circ}\text{C}$ 以内。

4 结论与讨论

(1) 统计发现,广州地区的 WBGT 与干球温度、湿球温度和黑球温度变化特点相似,具有明显的季节和日变化特征。一天里,WBGT 指数在早晨出现最低值,日出以后随着气温的上升逐渐增大,午后达到最大,日落以后随着气温的下降逐渐减小。

(2) 根据 WBGT 以及气温、湿度等历史资料及其统计特征,可以采用昼夜预报方法、分时预报方法来拟合出 WBGT 指数的预报方程,通过对上述两种预报方法和香港天文台 WBGT 预报方程的误差对比,分析发现采用分时预报方法拟合出来的 WBGT 预报方程的预报效果最好,适宜用分时预报方法建模,拟合预报方程进行 WBGT 指数预报。

(3) WBGT 分时预报方法的误差主要由温度、湿度预报误差引起,而中午前后 WBGT 的预报误差主要由温度预报误差造成,相对湿度预报误差对 WBGT 预报误差的影响夜间大于白天。在温度预报偏差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度偏差 $\pm 10\%$ 的情况下,WBGT 预报误差可以控制在 $\pm 2.8^{\circ}\text{C}$ 以内,该条件可满足业务需求。

亚运会期间,WBGT 分时预报方程投入业务运行,预报准确率高。基于此研究成果,气象部门为亚运会的马术比赛提供了准确、周到的气象服务,为马术比赛赛事安排及比赛的成功举办提供了重要的决策依据。

将来,在现有 WBGT 预报成果的基础上,可以通过优化 WBGT 预报方程、调整 WBGT 阈值、重新划分防御等级等方式,为公众提供更有效的高温中暑预报预警服务。

参考文献

- [1] Thom E C. The discomfort index[J]. *Weatherwise*, 1959, 12(1): 57-60.
- [2] Steadman R G. A universal scale of apparent temperature[J]. *J Climate Appl Meteor*, 1984, 23(12): 1674-1687.
- [3] Brauner N, Shacham M. Meaningful wind chill indicators derived from heat transfer principles[J]. *Int J Biometeor*, 1995, 39(1): 46-52.
- [4] Höpfer P. The physiological equivalent temperature—A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment[J]. *Int J Biometeor*, 1999, 43(2): 71-75.
- [5] Hevener O F. All about humitures[J]. *Weatherwise*, 1959, 12(56): 83-85.
- [6] Matzarakis A, Mayer H, Iziomon M G. Applications of a universal thermal index: Physiological equivalent temperature [J]. *Int J Biometeor*, 1999, 43(2): 76-84.
- [7] Kalkstein L S, Valimont K M. An evaluation of summerdiscomfort in the United States using a relative climatological index[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1986, 67(7): 842-848.
- [8] Kalkstein L S, Davis R E. Weatherand humanmortality: An evaluation of demographic and interregional responses in the United States[J]. *Ann Assoc Amer Geographers*, 1989, 79(1): 44-64.
- [9] Kilbourne E M. Heatwaves and hotenvironments[C]. *The Public Health Consequences of Disasters*. NewYork:Oxford University Press, 1997: 245-269.
- [10] 谈建国,邵德民,马雷鸣,等. 人体热量平衡模型及其在人体舒适度预报中的应用[J]. *南京气象学院学报*, 2001, 24(3): 384-390.
- [11] 谈建国. 衡量上海夏季暑热程度的相对舒适度指数研究[J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28(2): 213-218.
- [12] 徐大海,朱蓉. 人对温度、湿度、风速的感觉与着衣指数的分析研究[J]. *应用气象学报*, 2000, 11(4): 430-439.
- [13] 蔡子颖,韩素芹,张长春,等. 室外热环境指标的简化计算和应用研究[J]. *气象*, 2011, 37(6): 701-706.
- [14] 黄卓,陈辉,田华. 高温热浪指标研究[J]. *气象*, 2011, 37(3): 345-351.
- [15] 周月华,郭广芬. 基于多指标综合指数的灾害性天气过程预评估方案[J]. *气象*, 2010, 36(9): 87-93.
- [16] 李兴荣,张小丽,隋高林,等. 深圳夏季典型晴天不同小气候区温湿及舒适度特征[J]. *气象*, 2010, 36(10): 62-66.
- [17] 彭洁,宗志平,黄小玉,等. 湖南猛洞河漂流气候舒适度评价及预报方程的建立[J]. *气象*, 2011, 37(6): 771-776.
- [18] Yaglou C P, Minard D. Controt of heat casualties at military training centers[J]. *Archives of Industrial Health*, 16: 302-305.
- [19] 甘永祥,戴自祝,张庆,等. 湿球黑球温度指数测试和贯彻《高温作业分级标准》中的几个问题探讨[J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2005, 23(6): 484-485.
- [20] ISO. International Standard 7243, hot environments—Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature)[S]. 1989.
- [21] 董靓. 街谷夏季热环境研究[D]. 重庆:重庆建筑大学,1991.
- [22] 绿色奥运建筑研究课题组. 绿色奥运建筑评估体系[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [23] 吴结晶,李瑞光,穆美舒,等. 青岛市区夏季暑热指数初探[J]. *气象*, 2000, 26(4): 33-36.
- [24] 吴兑,邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报[M]. 北京:气象出版社,2001:163.