

Reprint 821

氣溫與熱力指數在酷熱天氣警告業務運作上的應用比較

梁延剛、陳玉卿 & 林鄭泗蓮

第二十三屆粵港澳氣象科技研討會

澳門，2009 年 2 月 18-20 日

氣溫與熱力指數在酷熱天氣警告業務運作上的應用比較

梁延剛 陳玉卿 林鄺泗蓮
香港天文台

摘要

世界各地的氣象機構因應本地的天氣情況，利用不同的熱力指數來制定發出酷熱天氣警告的準則。在香港，天文台利用最高氣溫及淨有效溫度(NET)作為參考指標。

奧運馬術比賽在香港舉行期間，天文台成功應用一項熱力指數 - 濕球黑球溫度(WBGT)來監測馬匹所承受的暑熱壓力。為應付這次馬術比賽，天文台設立了專門量度和監測 WBGT 的儀器和預報工具，效果良好。

WBGT 除可應用於馬匹外，亦可應用於人類。本文利用過去因天氣炎熱而引致的中暑、送院求助數據從人體反應和業務運作的層面探討氣溫、NET 及 WBGT 在酷熱天氣警告業務的應用。

1. 引言

人類是溫血動物，對氣溫的轉變會作出生理的反應以保持體溫在 37°C 左右。冬天的嚴寒及盛夏的酷熱能為人類帶來不適，尤以生理調節能力較差的幼兒、長者或長期病患者為嚴重，增加中暑及誘發心、肺、呼吸道等有關疾病的機會(WHO/WMO/UNEP, 2003)。

除了氣溫外，其他氣象條件例如濕度、風速及太陽輻射等都會影響人體對熱力的感覺。舉例來說，在炎熱的天氣下，高濕度會減少人體因透過汗水蒸發而流失的熱量，低風速亦會減少人體熱量的流失，增加不適程度。基於以上原因，結合上述氣象條件的熱力指數應運而生。世界各地的氣象機構因應本地的天氣情況，利用不同的熱力指數來制定發出酷熱天氣警告的準則。世界氣象組織計劃在 2009 年發出指引，就指數的國際通用細則提出建議。

在香港，天文台從 2007 年開始正式利用最高氣溫及一種稱為淨有效溫度(Net effective Temperature, 簡稱 NET)的熱力指數(Li and Chan, 2000; Leung *et al.*, 2008)作為參考指標。

奧運馬術比賽在香港舉行期間，天文台成功應用一種熱力指數 - 濕球黑球溫度(Wet Bulb Globe Temperature, 簡稱 WBGT)來監測馬匹所承受的暑熱壓力。為應付這次馬術比賽，天文台設立了專門量度和監測 WBGT 的儀器和預報工具，效果良好。WBGT 除可應用於馬匹外，亦可應用於人類(Bureau of Meteorology, 2009)。本文從人體反應和業務運作的層面探討氣溫、NET 及 WBGT 在酷熱天氣警告業務的應用。

2. 數據與方法

本文所用的 NET 是以天文台總部錄得的氣溫、相對濕度及風速計算出來，公式如下 (Hentschel, 1986)：

$$NET = 37 - \frac{37 - T}{0.68 - 0.0014 RH + 1/(1.76 + 1.4v^{0.75})} - 0.29T(1 - 0.01RH)$$

其中 T 為氣溫、RH 為相對濕度、v 為風速。

自 2007 年，天文台在京士柏設立了量度和監測 WBGT 的儀器。儀器測量乾球溫度、自然濕球溫度 (naturally wet-bulb temperature) 和黑球溫度 (globe temperature)，綜合這 3 個參數可計算出相應的 WBGT，

計算公式如下 (ISO, 1989; Juang and Lin, 2007) :

$$WBGT = 0.7 T_{nwb} + 0.2 T_g + 0.1 T_a$$

當中 :

T_{nwb} 為自然濕球溫度 - 未被遮蔽而外包濕紗布的濕度計, 所得之溫度代表溫度、濕度、風速等之綜合效應;

T_g 為黑球溫度 - 中空黑色不反光金屬球, 中央插入溫度計, 所得之溫度代表輻射熱之效應;

T_a 則為乾球溫度 - 乾球溫度計不直接曝露在陽光下, 所測量的氣溫代表純空氣溫度之效應。

本文利用了 2007-2008 年 5-9 月天文台總部錄得的日最高氣溫、日最高 NET 及京士柏的日最高 WBGT 以作比較。天文台總部及京士柏皆位於市區中心。

香港長者安居服務協會為長者提供「一線通」平安鐘服務。長者在有需要求救時, 可按動平安鐘。若情況嚴重, 長者會獲安排送院求診。本文利用這些每日送院求診數字, 與上述的氣溫、NET 及 WBGT 分別進行迴歸分析, 並以雙尾 t-測試檢驗相關係數的統計顯著水平 (Draper and Smith, 1981)。

此外, 本文亦透過報章報導的中暑個案, 分析當最高氣溫、NET 或 WBGT 到達某界值時, 出現中暑的概率。文中提及的成功率 (Probability of Detection, 簡稱 POD), 虛報率 (False Alarm Ratio, 簡稱 FAR) 及臨界成功指數 (Critical Success Index, 簡稱 CSI) 的計算方法見附件, 詳情可參考 WMO (2009)。

3. 結果與討論

3.1. 人體反應

理論上, 由於 WBGT 結合了較多能影響熱力感覺的氣象參數 (氣溫、濕度、風速及太陽輻射), 所以比 NET (氣溫、濕度及風速) 或氣溫更能反映人類對熱力的反應。

圖 1 顯示日最高氣溫、最高 NET 及最高 WBGT 的統計量, 氣溫與 WBGT 的分佈相若, NET 的數值較低。氣溫與 WBGT 的平均值都為 30.6, 高於 NET 的 26.9。離散度方面, 氣溫、NET 及 WBGT 的幅度相近, 約為 13 至

14；三者的標準差 (standard deviation) 亦很接近，約為 2 至 3。NET 的上四分位與下四分位的距離較短，中間的 50% 數據較為集中。

圖 2 顯示最高氣溫與平均送院求診數字的關係。因為有設置平安鐘的人數隨時間而變化，所以先將送院數字常規化為每 5 萬人中需送院的數字。從圖 2 可以看到氣溫在 28 度以下時平均送院數字與氣溫沒有明顯關係；氣溫在 28 度或以上時，數字則呈上升趨勢。NET、WBGT 跟平均送院數字也有類似的情況，即在某界值或以上時，送院數字上升 (圖 3)。送院數字分別與氣溫、NET 及 WBGT 的相關係數都頗高，在統計學上達 5% 顯著水平，顯示送院數字與這三個參數均有很密切的關係。送院數字與氣溫 ($r = 0.93$) 及 WBGT ($r = 0.87$) 的相關較 NET ($r = 0.76$) 為高。

至於中暑個案方面，最高氣溫、NET 及 WBGT 也能反映氣溫越高，中暑機會越大的情況 (圖 4)。Li (2008) 利用 2007 年 5-8 月的數據比較了 NET 及 WBGT 在預報是否出現中暑個案的表現。以 $WBGT \geq 33.0$ 作預測，POD (70%) 與 CSI (36%) 分別高於 $NET \geq 29.0$ 的 POD (39%) 與 CSI (28%)；但 FAR (57%) 則高於 $NET \geq 29.0$ 的 FAR (50%)。本文利用 2007-2008 年 5-9 月的數據得出的結果相若，即 WBGT 的 POD 較 NET 為佳，但 FAR 則稍遜 (表 1b 及 1c)。比較表 1a 及 1b，可見最高氣溫在預報是否出現中暑個案的表現較 NET 差。

3.2 . 業務運作

天文台現時利用最高氣溫及 NET 作為參考指標來發出酷熱天氣警告。預報員預測最高氣溫的準確率很高。圖 5 顯示 NET 很受風速的影響，程度可高於氣溫。風速稍為有些微改變，NET 的上落很大，運作效果有時不太理想。

WBGT 方面，一些氣象機構例如澳洲氣象局應用它來監察暑熱壓力 (Bureau of Meteorology, 2009)。他們利用以下公式來作估算：

$$WBGT = 0.567T + 0.393e + 3.94$$

其中 T 為氣溫，e 為水氣壓力 (與濕度有關)。

本文利用多元迴歸法，建立了以下公式

$$WBGT = -12.065 + 1.193T + 0.0688 RH$$

來估算每小時的 WBGT (圖 6)。計算得出的 WBGT 與實際錄得的 WBGT 相關係數高達 0.92，在統計學上達 5% 顯著水平，均方根誤差 (root mean square error) 只得 1.0。在奧運馬術期間，預報員也應用了類似的公式在沙田及雙魚河為馬術賽事作出預報，效果良好。

3.3 . 酷熱天氣警告

綜合以上討論，以 WBGT 作為酷熱天氣警告的參考指標，較 NET 穩定。氣溫是一般市民最為熟悉的指標，但在某些情形下，WBGT 比氣溫更能反映市民受熱的情況。例如 2007 年 7 月 16 日有中暑個案出現及有多達 91 人 (每 5 萬人) 送院，這數字是送院數字中由高至低的第七位。當天的最高 WBGT 達 33.6，但最高氣溫只得 32.8。因此，可考慮同時以氣溫及 WBGT 作為指標。表 1d 及 1e 是其中兩種結合氣溫及 WBGT 的指標來預測中暑的列聯表 (contingency table)，從中暑數據上看，較單以氣溫或 WBGT (表 1a、1c) 更貼近市民對酷熱天氣的反應。

4. 結論

本文從科學和預報技巧的層面討論了氣溫、NET 及 WBGT 在酷熱天氣警告業務的應用。

氣溫、NET 及 WBGT 均與送院數字及中暑的出現有密切關係。氣溫及 WBGT 跟送院人數的相關較 NET 為高。另外，以 WBGT 來預測中暑的出現，成功率較 NET 高，但虛報率也較 NET 高。在業務運作方面，NET 很受風速影響，上落的幅度很大。WBGT 則相對較穩定。

綜合以上的比較，以 WBGT 作為酷熱天氣警告的參考指標，較 NET 穩定。氣溫是一般市民最為熟悉的指標，但 WBGT 在某些情況可互補氣溫的不足。因此，可考慮結合氣溫及 WBGT 作為酷熱天氣警告的指標。

參考文獻

- Bureau of Meteorology, Australia, 2009: *About the WBGT and Apparent Temperature Indices*. Available online: http://www.bom.gov.au/info/thermal_stress/
- Draper, N and H. Smith, 1981: *Applied Regression Analysis*, 2nd Edition, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Hentschel G., 1986: A human biometeorology classification of climate for large and local scales. In *Proceedings WHO/HMO/UNEP Symposium on Climate and Human Health*, Vol. I, WCPA – No. 1. WMO: Leningrad.
- ISO, 1989: ISO 7243. *Hot environments – Estimation of the heat stress on working man based in the WBGT-index (wet bulb globe temperature)*. Geneva, Switzerland, International Organisation for Standards.
- Juang, Y.J. and Y.C. Lin, 2007: The Effect of Thermal Factors on the Measurement of Wet Bulb Globe Temperature. *Journal of Occupational Safety and Health* 15:191-203.
- Leung, Y.K., K.M. Yip and K.H. Yeung, 2008: Relationship between thermal index and mortality in Hong Kong. *Meteorological Applications* 15:399-409.
- Li, K.W., 2008: Notes of the results of the study on the impact of high Wet Bulb Globe temperature (WBGT) and Air temperature in Hot Weather Condition. *HKO internal document*.
- Li, P.W. and S.T. Chan, 2000: Application of a weather stress index for alerting the public to stressful weather in Hong Kong. *Meteorological Applications* 7:369-375.
- WHO/WMO/UNEP, 2003: *Climate Change and Human Health – Risks and Responses* (edited by McMichael, A.J., D.H. Campbell-Lendrum, C.F. Corvalan, K.L. Ebi, A.K. Githeko, J.D. Scheraga and A. Woodward). World Meteorological Organization, Geneva.
- WMO, 2009: *Forecast Verification – Issues, Methods and FAQ*. 4th International Verification Methods Workshop. WWRP/WGNE Joint Working Group on Verification. Available online: http://www.bom.gov.au/bmrc/wefor/staff/eee/verif/verif_web_page.html

表 1. 香港天文台的最高氣溫、NET 及 WBGT 與中暑報告的列聯表
(2007-2008 年，5-9 月的數據)

(a) 最高氣溫 ≥ 33.5

預測指標	中暑報告		總數
	有	無	
是	10	11	21
否	38	241	279
總數	48	252	300

POD: 21%
FAR: 52%
CSI: 17%

(b) NET ≥ 29.0

預測指標	中暑報告		總數
	有	無	
是	16	18	34
否	32	234	266
總數	48	252	300

POD: 33%
FAR: 53%
CSI: 24%

(c) WBGT ≥ 33.0

預測指標	中暑報告		總數
	有	無	
是	18	30	48
否	30	222	252
總數	48	252	300

POD: 38%
FAR: 63%
CSI: 23%

(d) 最高氣溫 ≥ 33.5 或 WBGT ≥ 33.0

預測指標	中暑報告		總數
	有	無	
是	23	34	57
否	25	218	243
總數	48	252	300

POD: 48%
FAR: 60%
CSI: 28%

(e) 最高氣溫介乎 32.5 至 33.4 及 WBGT ≥ 33.0 ，或 最高氣溫 ≥ 33.5

預測指標	中暑報告		總數
	有	無	
是	18	21	39
否	30	231	261
總數	48	252	300

POD: 38%
FAR: 54%
CSI: 26%

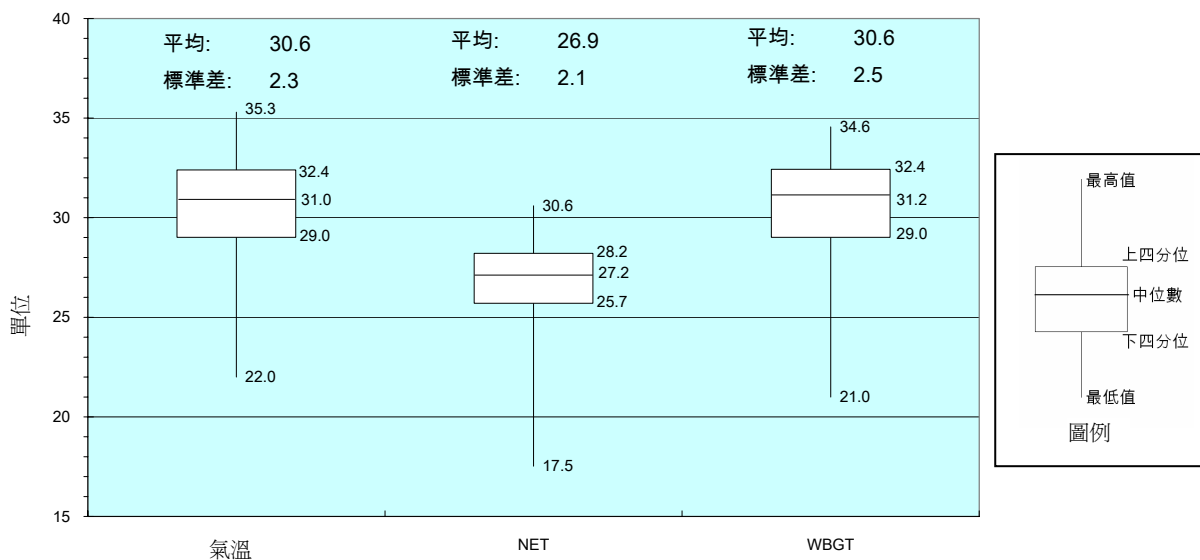


圖 1. 日最高氣溫、NET 及 WBGT 的統計盒型圖 (Box and Whisker Plot) (2007-2008 年，5-9 月的數據)

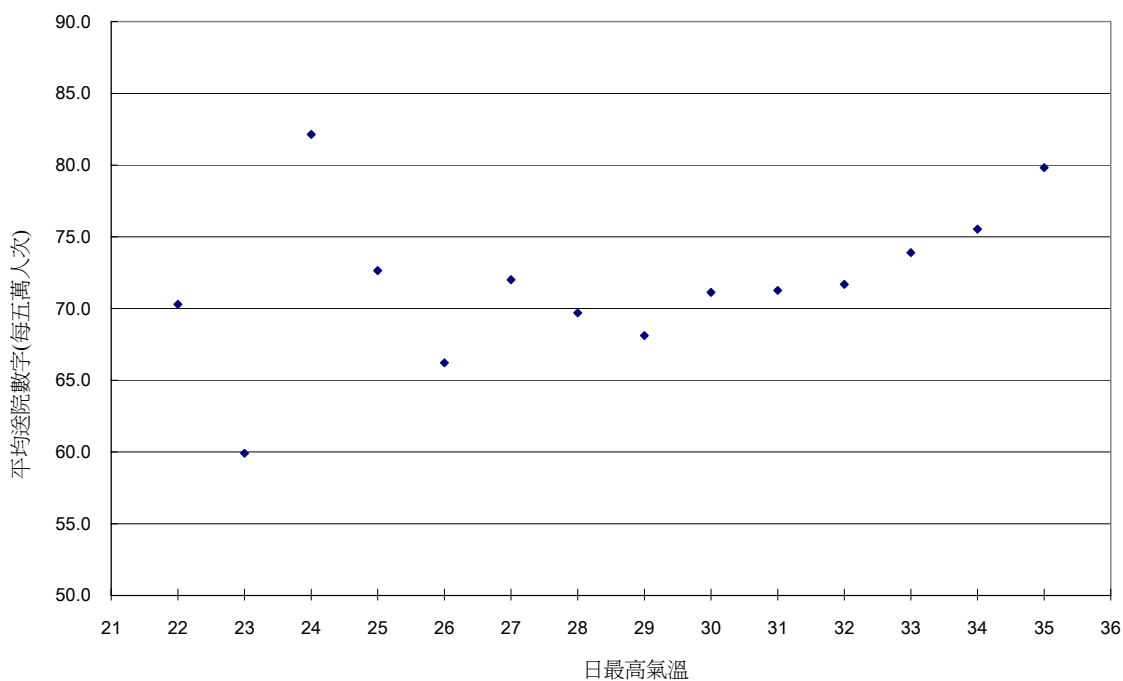


圖 2. 送院數字與日最高氣溫的散點圖 (Scatter Diagram) (2007-2008 年，5-9 月的數據)

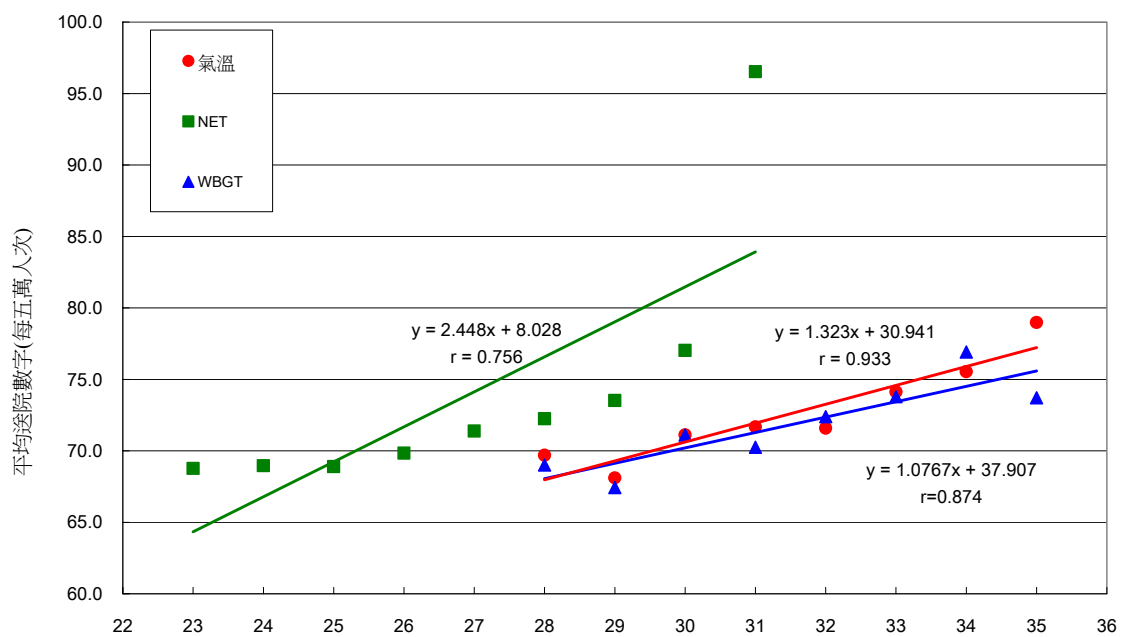


圖 3. 送院數字與日最高氣溫、NET 及 WBGT 的上升趨勢圖，相關係數分別為 0.93、0.76 及 0.87 (2007-2008 年，5-9 月的數據)

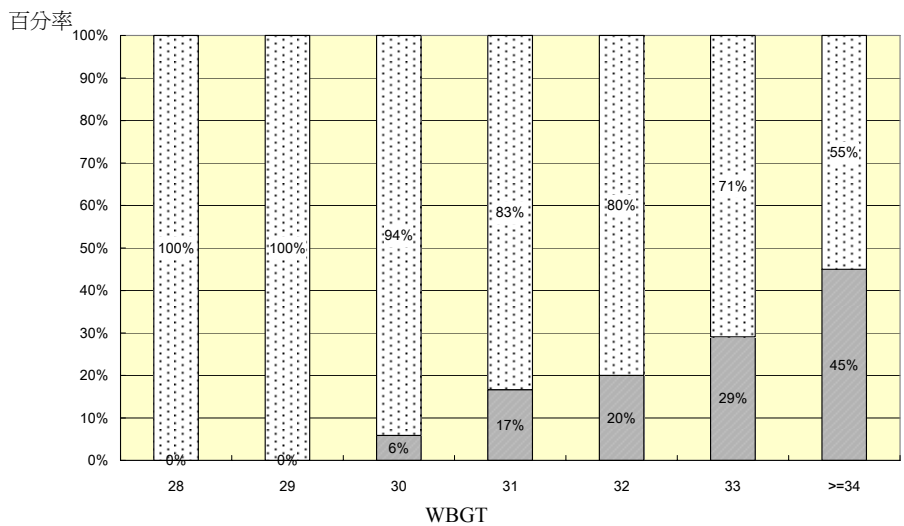
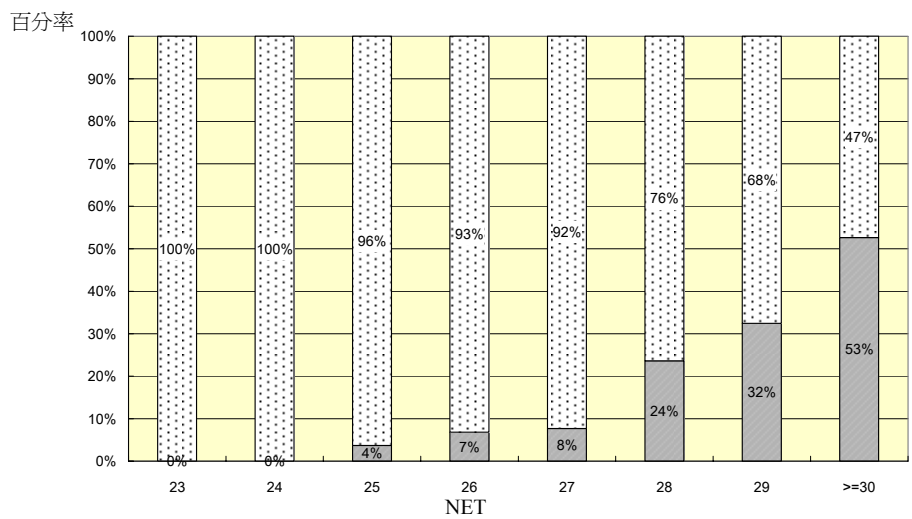
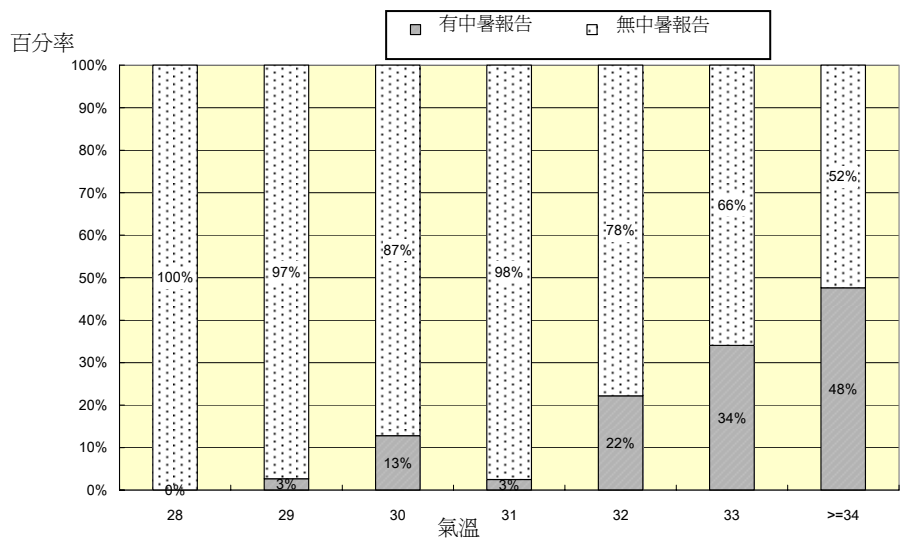


圖 4. 在不同溫度、NET 及 WBGT 下，有中暑報告的百分率。圖中的溫度、NET 及 WBGT 以四捨五入計算，即 31 代表數值介乎 30.5 至 31.4 之間（2007-2008 年，5-9 月的數據）

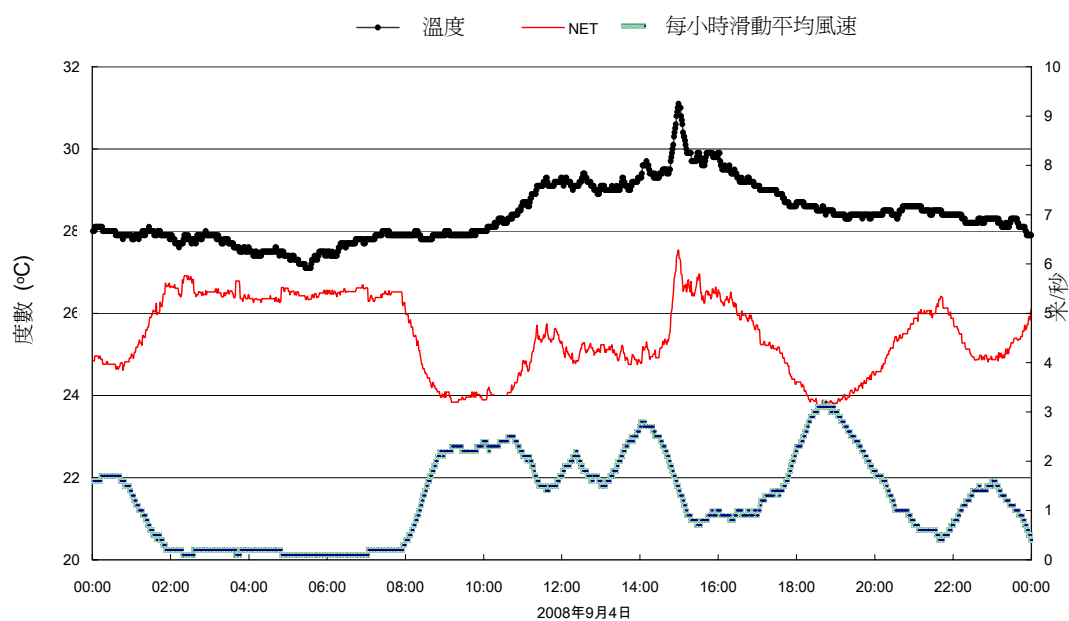


圖 5. 2008 年 9 月 4 日的溫度、NET 及風速時間序列

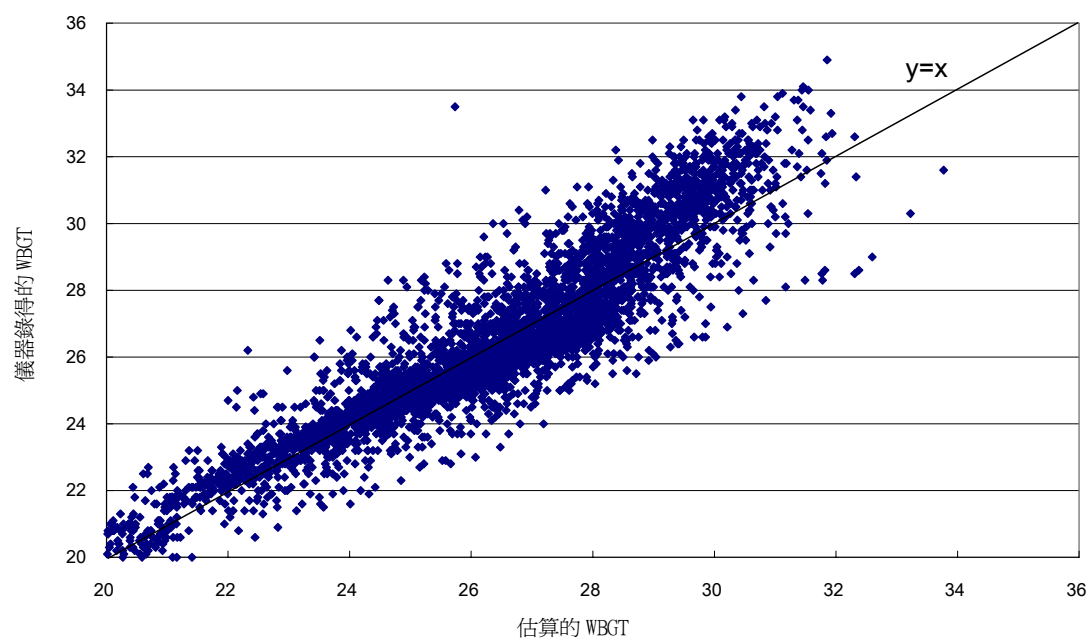


圖 6. 京士柏儀器錄得的 WBGT 與估算的 WBGT 的比較 (2007-2008 年，5-9 月的數據)

附件

列聯表 (Contingency Table)

預測	觀測		總數
	是	否	
是	a	b	a+b
否	c	d	c+d
總數	a+c	b+d	a+b+c+d=n

(a) 成功率 (Probability of detection, POD)

$$\text{POD} = \frac{a}{a+c}$$

- POD 數值介乎 0-1 之間，數值愈大愈接近正確預報。
- 表示在觀測事件中，正確預報的百分比。

(b) 虛報率 (False Alarm Ratio, FAR)

$$\text{FAR} = \frac{b}{a+b}$$

- FAR 數值介乎 0-1 之間，數值愈小愈接近正確預報。
- 表示在預測事件中，虛報的百分比。

(c) 臨界成功指數 (Critical Success Index, CSI)

$$\text{CSI} = \frac{a}{a+b+c}$$

- CSI 數值介乎 0-1 之間，數值愈大愈接近正確預報。
- 表示在事件中(觀測和/或預測)，正確預報的百分比。