

國軍操課「新危險係數」設計與應用

The Application and Design of New Danger Coefficient for National Troops Activities

侯昭平 (Jou-Ping Hou)

國防大學理工學院環境資訊及工程學系上校助理教授

王泰鈞 (Tai-Jyun Wang)

陸軍第十軍團砲兵第五八指揮部
中尉氣象排長

楊士禾 (Shih-He Yang)

陸軍第八軍團砲兵第四三指揮部
中尉氣象排長

摘 要

現有國軍危險係數僅考慮氣溫和水氣對人體的熱平衡的影響，但實際上，日照和風速強弱同樣會使人員感到氣溫差異。當日照、水氣和風速均有利氣溫上升時，會使活動人員失去人體熱平衡，造成各類暑熱傷害，嚴重者可能失去生命。本研究運用自行開發之「黑球溫度計」及嶄新推演設計之「新體感溫度」、「新太陽體感溫度」和國軍操課「新危險係數」，期望真實呈現人體的溫度感受，保障人員安全。另透過產學合作，將本研究設計的理念和數據，提供中科院開發自動化的國軍操課「新危險係數」顯示平臺，透過自動化的感測元件，將環境大氣的改變，呈現國軍操課「新危險係數」，進而將國軍操課人員真實氣溫感受加以量化，提升操課效能，確保部隊操課安全。

關鍵詞：新體感溫度、新太陽體感溫度、新危險係數、暑熱傷害、黑球溫度計

Abstract

In terms of danger coefficient of the armed forces, currently only the impact of temperature and moisture are taken into consideration. In fact, solar radiation and wind velocity also make humans feel temperature differently. The felt temperature may rise due to the combination of solar radiation, moisture and wind velocity which could jeopardize the heat balance of human body, thus causes heat stroke. In serious cases, people can lose their lives. This research uses the black ball thermometer designed by the authors to derive new felt air temperature, new solar felt air temperature and new danger coefficient for the armed forces. We expect to get more realistic feels from people in order to protect soldiers who receive outdoor trainings. Besides, we cooperate with National Chung-Shan Institute of Science and Technology Center to develop a new environment display system based on our calculated results. The system can detect atmospheric changes and automatically display the new danger coefficient about

the military trainings. It is believed that our new design will show more realistic environment changes for people and protect our troops for outdoor trainings.

Keywords: new felt air temperature, new solar felt air temperature, new danger coefficient, heat stroke, black ball thermometer

壹、前言

自洪仲丘案肇生後，國人對於國軍訓練安全產生極大疑慮，特別是環境危險因素掌握不確實，導致操演人員可能產生中暑症狀，¹造成人員危安情形，引發外界關切；此亦顯示，操課當日「危險係數」雖為黃旗警戒狀態，仍肇生本案。顯見現有「危險係數」評估之大氣環境對人體的傷害等級，有修訂的必要。國軍現有「危險係數」計算方式為：「量測之氣溫＋相對溼度×0.1」（如表1），然後對應其係數，利用不同色旗，來表示環境對人體的影響，其對應內涵為：「危險指數40以上—「紅旗警戒」，操課須在樹蔭下、多休息、補充水分；35～40—「黃旗」，此時必須注意補充水分；35以下—「藍旗」，依規定正常操課，每50分鐘休息10

分鐘」，藉此評量操課環境安全，以及人員的飲水需求量。

事實上，人體熱平衡除氣溫和相對溼度會有明顯影響外，還可能因從事活動的不同、有無日曬、風速強弱產生極大的變化；因此，國軍部隊常有因操課無法適應，而產生各類程度不一的中暑症狀，部分案例甚至危及性命。若以現有「危險係數」進行評估，可能無法描述操練人員的真實感受，造成痼疾病發，送醫不治。洪案時，社會大眾著重譴責國軍不當管教，鮮少有人認真探討，如何計算熱平衡對人體的影響，進而防範悲劇的再度發生。

當人體內部熱能，流向身體皮膚時，人體會進行新陳代謝，使身體流汗，並取得一個最舒適的皮膚溫度。²在較低氣溫情形下，輻射和對流是除去人體熱量的有效方法。然而，一旦氣溫達到攝氏35度，人體通過輻射和對流散熱的機制減緩，由出汗造成的熱損失變成相當重要。但是出汗，本身無助於冷卻身體，除非汗水通過蒸發除去（汗變為水蒸汽），但汗水蒸發排熱時，會受制於相對濕度，因為高相對濕度會阻礙蒸發。這也是目前國軍危險係數必須納入相對濕度來計算的主要原因。

熱指數的計算，簡化了人體熱舒適的範

表1 現有國軍危險係數

中暑危險係數		
公式：危險係數=室外溫度(°C)+相對溼度×0.1		
係數	狀況	預防要點
<30	安全	正常作息
30～35	注意	水分補充
35～40	警戒	水分補充、避免激烈運動
>40	危險	適時調整操課服裝及場地

1 重症中暑症狀：熱中暑(Heat stroke)，伴隨頭痛、頭暈和疲倦，流汗少、皮膚發熱且乾燥。脈搏快，血壓可能增加或沒有變化，可能失去意識，數小時內致死。體溫可高達40℃～41℃，而連續高溫所造成的循環衰竭可致死或造成永久性腦傷害。

2 P. Fanger, *Thermal Comfort* (New York: McGraw-Hill, 1972).

圍，卻可呈現出人的熱感受，因此獲得歐美先進國家的重視。最基本的熱舒適指數，³由兩個或三個氣象的變量所結合。溫度和濕度都被認為是最重要的因素。熱指數定義為：

$$\begin{aligned} \text{Heat Index} = & -42.379 + 2.0491523T + 10.14333127R \\ & - 0.22475541TR - 6.8378 \times 10^{-3}T^2 \\ & - 5.481717 \times 10^{-2}R^2 + 1.2287 \times 10^{-3}T^2R \\ & + 8.5282 \times 10^{-4}TR^2 - 1.99 \times 10^{-6}T^2R^2 \end{aligned}$$

這種熱指數的使用限制是，溫度至少需要達到攝氏26.67度方能使用。因此，在某些不是那麼溫暖，但濕度較高的地方無法使用，使人暴露在中暑的危險之中。美國國家氣象局所使用的熱指數（如圖1），是重要的

人類熱舒適性指標，但僅考慮了溫度和濕度兩者。⁴

歐美先進國家對於環境大氣對人體的影響非常重視，但國外熱指數被指出需要改進的地方有二：（一）美國和加拿大沒有統一的單位標準，使得民眾常常混淆；（二）美國天氣預報辦公室(Weather Forecast Office(s), WFOs)認為現有的熱指數對於人體感受的代表性不足，因為他們發現風速會影響人體熱平衡，進而影響熱指數。

由於人類熱舒適本身是複雜的，在相同的氣象環境下每個人會有不同的感覺。⁵所以在開發新的熱指數時，必須考慮更為多元的

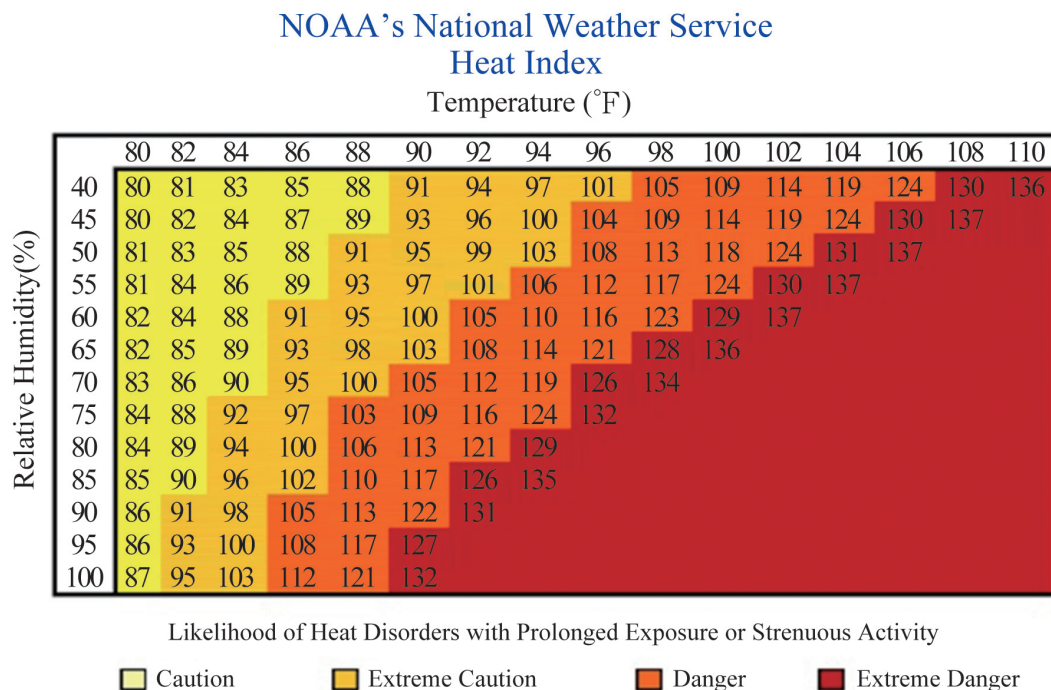


圖1 美國國家氣象服務廳運用氣溫和相對濕度換算出的暑熱指數

- 3 L. P. Rothfursz, The Heat Index "Equation" (or, More Than You Ever Wanted to Know About Heat Index). NWS Southern Region Headquarters Technical Attachment SR90-23, 1990.
- 4 R. G. Steadman, Assessment of Sultriness. 1. Temperature-humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science. *Journal of Applied Meteorology*, 18, 1979, pp. 861-873.
- 5 K. Blazejczyk, & B. Krawczyk, The Influence of Climatic Conditions on the Heat-balance of the Human Body. *International Journal of Biometeorology*, 35, 1991, pp. 103-106.

大氣參數。除了風、溫度和濕度，太陽輻射因為被多數人認為，會直接影響人體熱量感受，因而被指出應該加進熱指數，但太陽輻射會受到雲量、緯度和經度的影響，量測相對困難。

近年來，歐美各國已發現所用這些指標雖然存在不完整的缺陷，但是這些變量的組合，可以更表明熱壓力的程度。例如，我們知道大氣中風速和濕度可通過增加或抑制身體蒸發冷卻能力影響舒適度。當空氣中的水分含量降低，一個人出汗容易蒸發汗水，從而冷卻人的皮膚。⁶除了濕度，溫度也是熱傷害很大的原因。在某些特定的區域中，夜晚溫度上升的頻率，⁷會和都市熱島效應的關係具有高度的一致性。⁸

過去歐美研究人員一直努力改善熱指數在戶外使用時，不包括其它重要的因素（如風速，雲量），和太陽輻射在其熱指數計算中的缺點。因此，斯德曼(Steadman)開發出了體感溫度(Apparent Temperature, AT)，⁹一開始僅用於室內，但後來擴大為戶外使用。¹⁰所述AT雖使用乾球溫度(Dry Bulb Temperature)但考慮了溫度、濕度和風速，事

後證明，確實可以更為貼近人體的舒適感。

濕黑球溫度(Wet Bulb Globe Temperature, WBGT)使用環境溫度(Ta)（攝氏），濕球溫度(Tw)（攝氏），和黑球溫度(Tg)（攝氏），結合輻射和風速形成其讀數，來描述環境熱壓力。這個指數是最常用的，特別是在跑步研究和用於炎熱的天氣軍事訓練演習。¹¹但該指數沒有考慮到服裝，¹²且非氣象學家很難去測量黑球溫度，因此沒有被大量推廣。

美軍發現運用WBGT，可將軍事學員根據自己的身體健康水準，實施訓練區分；當WBGT值較高時，高健身水準學員可繼續訓練，但較低的健康水準的個體，應該立刻停止對他們的訓練。軍方還發現，WBGT成功使訓練單位，將受訓人員分類，並進行磨合，以適應環境氣候帶來的衝擊。

美國國家氣象局認為一個地區，公民適應夏季的逐漸炎熱的天氣或是寒冷冬季的來臨需要調適，因此負責在夏季報導熱指數，冬季報導風寒指數，計算出每個城市的每一天的熱指數值。在圖1中，熱指數圖表可呈現出環境大氣對人體的風險，如果他們長時間在戶外進行劇烈運動，更可運用為警示的指

6 J. M. Hanna, Climate, "Altitude, and Blood Pressure," *Human Biology*, 7, 1999, p. 553.

7 都市熱島效應：夜晚人造衛星以紅外線儀器觀測地球，發現都市比其周遭環境溫度來的高，以紅外線圖示之，如同城市是一座孤島。

8 R. C. Balling, & S. W. Brazel, "Diurnal-variations in Arizona Monsoon Precipitation Frequencies," *Monthly Weather Review*, 115, 1987, pp. 342-346.

9 R. G. Steadman, "A Universal Scale of Apparent Temperature," *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 1984, pp. 1674-1687.

10 Bureau of Meteorology, *About the WBGT and Apparent Temperature Indices*, 2008, Retrieved from <http://www.bom.gov.au/>. Accessed June 2010.

11 M. R. Ely, S. N. Cheuvront, W. O. Roberts, & S. J. Montain, "Impact of weather on marathon-running performance," *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39, 2007, pp. 487-493.

12 D. Minard, "Prevention of Heat Casualties in Marine Corps Recruits-Period of 1955-60, with Comparative Incidence Rates and Climatic Heat Stresses in Other Training Categories," *Military Medicine*, 126, 1961, pp. 261.

標。由於熱的風險值，在邏輯上有一定侷限性，且多數的熱指數計算相當複雜，沒有指數能夠普遍使用。

對於普通大眾所建立的熱指數必須是一個既容易判讀，又可以容易理解的結果。¹³ 未來才有推廣的可能。因此，本研究以國軍現有危險係數的分類範圍為基礎，運用自行研發之黑球溫度計和另行推導之計算方式，創建一個新的指標。不但易於判讀，亦使數據更貼近人體感受。

貳、文獻探討

1941年，保羅希波(Paul Siple)和查爾斯帕修(Charles Passel)在南極洲過冬時，第一次提出風寒溫度。他們把水放在室外，測量水溫度下降的速率，以此得出一種溫度指數。公布之後，人們開始有風速和低溫之間關係的概念。1973年，美國國家氣象局(National Weather Service, NWS)開始使用風寒指數(Wind Chill Temperature Index, WCTI)，描述人體的舒適程度。警告人們寒冷天氣的危險，這項風寒指數的預報，單位用華氏。不久後，加拿大氣象局(Meteorological Service of Canada, MSC)也開始使用這項指數，附加在他們的天氣預報中。

近年來，該指數已經受到越來越多的抨擊，因為這項指數的結果，和實際的溫度相差太大，每次預報出來的數值都太冷。在

20世紀，研究人員使用西波和帕修的實驗結果來對應人類的狀況，¹⁴ 不同於簡單的水容器中人類所產生的熱量代謝。因此多項結果顯示，這項指數非常需要大幅修正。2000年的春天，氣象學聯邦協調員辦公室(Office of the Federal Coordinator for Meteorological, OFCM)，希望NWS提供有關風寒和極熱計畫的相關資料。NWS指出從卡席勒(Kessler)、史奎爾(Schwerdt)、奎爾(Quayle)和斯德曼(Steadman)的實驗了解風寒指數不準確，希望OFCM能提供他們可以合作的機構。

當時，有人認為，媒體過度解讀風寒指數的內容，已經造成泛濫。其次，當時約4年研究認為最初設計的風寒指數，不能準確描繪的風寒效應帶給人類的影響。南極實驗的結果造成華氏10~15度的誤差。¹⁵ 另外，加拿大和美國使用相同的風寒指數，¹⁶ 但是使用的單位卻不一樣。因此成立溫度指數聯合行動小組(Joint Action Group for Temperature Indices, JAG/TI)。

該組成員，透過研討會、電子郵件彙整其它委員會的意見。2000年10月~2002年11月期間，有5次工作研討會和會議，第一次致力於WCTI的討論，第二次討論WCTI和熱指數之間的關係，第三次回顧之前的研究並彙整，第四次回顧前太陽輻射的計算以及延續熱指數的研究；第五次會議檢視WCIT和熱指數的發展與須改進的地方。在JAG/TI科學

13 M. A. McGeehin, & M. Mirabelli, "The Potential Impacts of Climate Variability and Change on Temperature-Related Morbidity and Mortality in the United States," *Environmental Health Perspectives*, 109, 2001, pp. 185-189.

14 E. Kessler, Wind chill errors. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74, 1993, pp. 1743-1744.

15 M. Bluestein, & J. Zecher, "A New Approach to an Accurate Wind Chill Factor," *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80, 1999, pp. 1893-1899.

16 P. A. Siple, & C. F. Passel, "Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures," *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89, 1945, pp. 177-199.

的審查和回顧中，把風寒指數以及熱指數帶向新的里程碑，美國和加拿大的業務方案進行了簡要總結，提出指導和建議。

一、奧茲菲斯基指數(Osczevski Index)

以研究面部為基礎，在加拿大國防研究部(Defence Research and Development Canada, DRDC)發展出奧茲菲斯基指數。這項指數包含溫度、風速、輻射、熱指數的理論、人類的舒適程度、凍傷的危險。該理論研究的結果，大部分感到冷的是在臉部的區域。用於評估這一理論的設備，是一個熱人體模型頭部，由電腦控制的，評估頭套的熱。使用這種裝置可以了解的熱度從4個不同的區域散失（臉、額頭、後腦勺、脖子）的數據。

二、希波與帕修指數(Siple and Passel Index)

1945年在南極洲所做的實驗，溫度範圍：攝氏-9度到-56度風速0m/s到12m/s他們把水放在室外，測量水溫度下降的速率，以此得出一種溫度指數來說明氣溫和風速的關係。

三、布魯斯坦與牙庫指數(Bluestein and Zecher Index)

在1999年發展出新的風寒指數，以希波與帕修指數為基礎。他們發現前一項指數沒有考慮容器的阻力，誇大風寒指數的效果。新的指數使用的數學方法進行人類頭部模型的實驗，溫度和風，視為環境因素，露出的面為熱損失的區域，沒有考慮太陽輻射。

四、感知溫度與生理等效溫度 Perceived Temperature(PT) and the Physiological Equivalent Temperature Indices (PET)

德國科學家開發另外兩種指數。這項指

數加進了人體舒適度以及平均人體溫度的模型。這兩種指數考慮到生理相關的方式和熱環境的所有變量。

五、斯德曼指數指數(Steadman's Climate Index)

這項指數包含了太陽輻射、溫度、風速、相對濕度和衣服的模型。國家氣象局NWS(National Weather Service)從中修改。據了解，新的算法允許更多大氣變量包括在其中。

六、綜合指數比較

前三項指數的算法是相似的，這3個指數得出來的結果比NWS高。奧茲菲斯基和布魯斯坦的指數之間差異在於身體暴露的量包含了太陽輻射。奧茲菲斯基的指數是一個完整的面部模型中，在風速靜止下，使用了人的步行速度，包括用於輻射的設定值，及計算出的結果。布魯斯坦指數是一個完整的頭部模型，在沒有太陽輻射下，風速1.8m/s下的計算值。布魯斯坦指數往往比奧茲菲斯基的指數略微更冷，這似乎是與考慮太陽輻射和風速所造成。奧茲菲斯基和其它指數最初設置風速1.8m/s，是大多數人往往在運動時的風速。斯德曼指數使用全身模型，增加更多的環境變量，納入服裝因素。（如圖2）

除了軍隊例行的演訓及出操以外，生活之中還有許多和熱傷害有關的活動，如大型馬拉松活動。這個活動近年在全世界開發國家中，參與人員與日俱增，在41年內，紐約市馬拉松參加者從僅僅170人增加到39,000人。¹⁷但活動因中暑造成的傷害，也快速增加，因此研究人員一直嘗試建立更好衡量人

17 紐約市馬拉松：每年在美國紐約市舉辦的馬拉松（42.195公里或26.219英里），會通過紐約市5個區，是世界上最大的馬拉松之一。

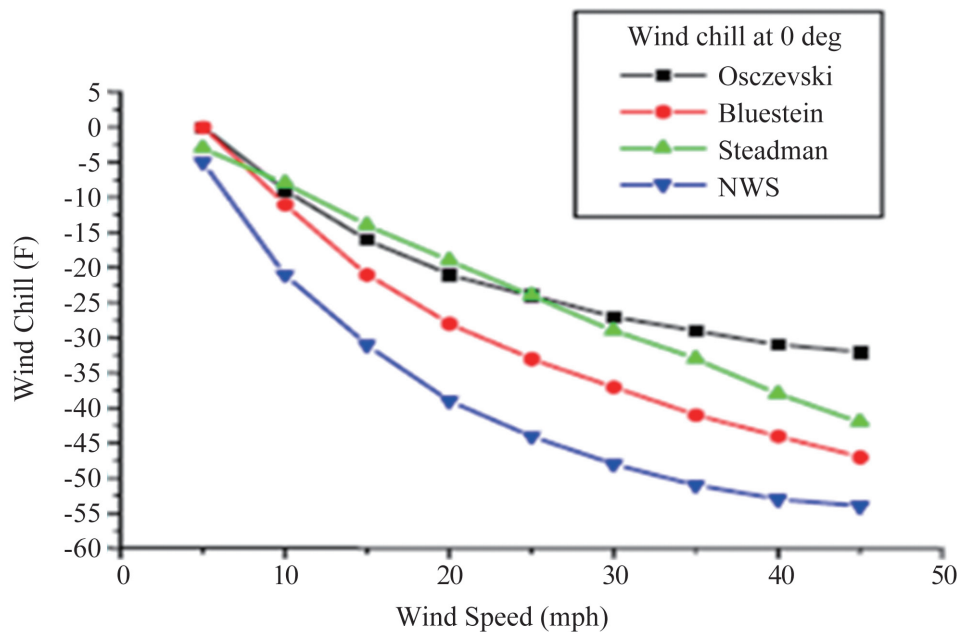


圖2 綜合指數比較

體對熱或冷的壓力的風險和脆弱性的方法，以提供活動參考運用。因為每年炎熱造成的意外死亡，甚至比洪水、颶風、龍捲風和雷擊的總和還要多。¹⁸

國外學者奇伯里(M.D. Kimberly)以所觀察數個馬拉松比賽為基礎，¹⁹ 研究天氣條件對於運動人員的影響，其使用的研究方法為：「分析比賽完成時間的快慢，在比賽當日 and 5 天前天氣條件的差異進行審查，再將參賽者區分本地跑者（居住於比賽舉辦地區）和外地跑者（非居住於比賽舉辦中心）」，希望透過研究得出的結果，提供未來跑者使用天氣資訊，規劃自己的跑步計畫，強度和配速等，還有更有效率的訓練。研究結果發現，當地跑者有最好的天氣適應性，非當地的跑者，若沒有進行一段時間的氣候調適，

不但成績較差，甚至容易發生嚴重的身體意外（如猝死或心臟疾病）。

他們的研究建議，未來路跑活動的舉辦單位，應該利用天氣資訊，規劃更完整的比賽，人力和物資更有效率的應用，依照危險程度，配置適當人員和醫療物品，亦可衡量參賽者感覺不適的風險或熱及冷的傷害，確保他們有足夠的供應，像水和冰，以應對可能出現的任何熱傷害。

參賽人員要適應天氣條件，結合了許多自然因素，如溫度、濕度、風速和社會因素。由於地理位置和氣象條件的差異，可能影響於單一個體，因此一個跑者要成功完成比賽並獲得良好的成績，有許多的限制因素：「如先前的訓練、天氣條件、本身能力和心理背景」；該研究發現，參賽者可能是

18 National Weather Service, *Heat: A Major Killer*. Retrieved from <http://www.nws.noaa.gov/os/heat/index.shtml#heatindex> Accessed June 2010.

19 M. D. Kimberly, *Acclimation's Influence on Physically-fit Individuals: Marathon Race Results as a Function of Meteorological Variables and Indices* (Arizona: Arizona State University, 2011)

因為尚未適應比賽地區的天氣條件，所以完成時間受到較大的影響，否則可以更快。例如，當地跑者可能會發現，當比賽當天條件從5天前的條件（基線）有所變化，完成時間會明顯受到影響，因為他們可能尚未適應比賽當天的條件。此外，如果比賽當日條件和前幾天相同，早已適應比賽當日的條件的選手，也就是本地跑者，會發現他們的完成時間，不受天氣顯著影響。

將運動員進行分類，可以發現影響每種類型跑者的特定因素。例如，較快的選手可能會受溫度的影響更深，而較慢的選手受濕度和氣象變量的組合影響較大，溫度和濕度對於適應天氣有很大的作用。因此該研究收集溫度和露點溫度，用於計算濕氣變量，包括蒸氣壓、飽和蒸氣壓以及相對濕度。風速是很重要的數據，風可以在身體上幫助蒸發冷卻，風速扮演影響完成時間的重要角色。若在一個強風的日子比賽，掌握或未能掌握風向和跑者方向，可能會幫助或阻礙正在移動方向的跑者。

另外，暑熱壓力指數(Heat Stress Index, HSI)為一種相對度量，是描述在一個特定的位置，評估目前天氣（使用斯德曼體感溫度）和氣候（由城市、雲量、氣溫）的極端高溫，來進行計算，指數範圍從1~10，其中10是最壞的情況，對於大眾最危險。

透過評估比賽當天對比引導到當天比賽前幾天的天氣，將能評估天氣條件的差異導致完成時間的差異。如果相對前些日子，在

比賽當天有天氣變化，當地跑者的完成時間可能會受到影響，無論是正面還是負面都取決於天氣的變化。分析前5天持續的氣象條件評估變化，研究推測如果比賽當天的條件和前5天（基線）相比顯著改變，當地跑者會看到他們完成時間受到影響。因為當地跑者應該早已適應了一組特定的條件，如果這些條件，在比賽當天有很大的程度上改變，運動員將感到不舒服。反之如果天氣條件持續類似於前5天，本地跑者應該有更好表現（更快的結束時間），因為跑者已適應比賽當天的條件，從而導致運行過程舒適，且受當天天氣影響較小。

此外運動員分別在溫暖乾燥和溫暖潮濕的環境下活動的許多研究認為，溫暖乾燥的條件比溫暖潮濕條件下更容易適應。²⁰ 濕度變量、露點溫度、蒸汽壓力和相對濕度反覆影響運動員的完成時間。外地選手到更潮濕和溫暖的地區時將受到影響，因為他們無法順利適應溫暖潮濕的環境。

風速方面，風寒指數和風寒等效溫度等顯示風影響運動員的完成時間。在許多情況下，如紐約市和辛辛那提飛豬馬拉松比賽的外地跑者顯示，²¹ 增長的風速或體感溫度似乎增加蒸發冷卻，使跑者感覺更舒適的效果。有些較極端天氣的比賽，如春分馬拉松（阿拉斯加州費爾班克斯）²²，服裝選擇會直接影響本地和外地跑者，如布料覆蓋會導致從身體的熱交換減少。氣壓方面似乎沒有太多關聯，影響更多的反而是心理因素。

20 L. E. Armstrong, R. W. Hubbard, J.P. DeLuca, & E. L. Christensen, "Heat acclimatization during summer running in the northeastern United States," *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 19, 1987, pp. 131-136.

21 辛辛那提飛豬馬拉松比賽：美國俄亥俄州辛辛那提市每年舉辦的非營利性全國性馬拉松。

22 春分馬拉松：阿拉斯加州費爾班克斯一年一度的馬拉松比賽，是世界上最困難的馬拉松課程之一，路程有3,285英尺（1,001公尺）的高低落差。

參加比賽時，尚未適應條件的運動員可能沒有意識到之前他們所適應的訓練和生活條件，將如何影響他們的表現。研究結果支持先前的研究，證明潮濕溫暖環境比溫暖乾燥條件更難以適應。²³ 跑者完成時間是由濕度變化因素，包括露點溫度、蒸汽壓力和相對濕度所影響。藉由增加或減少濕度值，當地和外地跑者都反映在表現。風的作用在運動適應研究或其他適應研究還沒有得到廣泛的探討。該研究發現，增加風速或包括風速變量之指數，如風寒溫度或風寒等效溫度，可以增加蒸發冷卻的有效性。這一發現表明，如果風存在可以增加空氣運動，則濕度增加可能對蒸發冷卻的效力減少，有不利影響。

移動空氣不僅可以增加蒸發冷卻的效果，在心理上，也讓人們感覺涼爽風的存在。²⁴ 儘管這項研究主要集中在馬拉松運動員，結果可應用於其他大型活動，如展覽、音樂會或節日。雖然這些活動都非高強度的運動。但從結論得知，大量的當地和外地人們，可能都會發現自己受氣象條件的影響，由於缺乏適應的那些條件，在熱脆弱性或壓力的風險較高。

參、新危險係數的推演與量測

本研究參考過去學者對於人體熱平衡的計算基礎，首先以斯德曼(Steadman)開發的體感溫度(Apparent Temperature, AT)來進行改良，由於該體感溫度(3.1)，曾進行大量

人體感受實驗，經評估可以運用體感溫度來說明中緯度地區大多數人體的感受。但其提出計算方式，係以水氣壓來量化環境場的水氣，具有量測和計算不易的缺點，需專業單位和儀器才能實施正確的估算，且其計算式中對於風速影響的評估係以中緯度環境場，在特定水氣下換算的結果，並不適用於臺灣地區，但其考慮的氣溫、風速和水氣，確實較能夠更為描述人體的感受。

$$AT = T_a + 0.33e - 0.7V_a - 4 \dots\dots\dots (3.1)$$

T_a 是溫度（攝氏溫度）， e 是蒸氣壓(hpa)，和 V_a 是風速(m/s)。

$$e = 0.611 \times 10^{\frac{7.5T_d}{2.87.7+T_d}} \dots\dots\dots (3.2)$$

T_d 是露點溫度（攝氏溫度）

為了簡化計算和量測，以適用於臺灣地區，我們對此體感溫度進行理論推演和公式改良，並得出新的體感溫度(New Felt Air Temperature, NFAT)(3.3)。在此式中，藉由我們本土大氣觀測的累積數據，對各參數進行計算與調整，大幅降低計算的難度，又能將水氣和風速的效應納入對氣溫的計算，而能呈現出臺灣環境大氣對人體的影響。

$$NFAT = T_a + 1.695RH - 2\sqrt{V_a} \dots\dots\dots (3.3)$$

T_a 是溫度（攝氏溫度）， RH 是相對濕度(%)， V_a 是風速(m/s)。其中 RH 的計算，運用了原公式中的蒸氣壓(e)，並另以飽和蒸氣壓(e_s)進行計算。

23 W. L. Kenney, D.W. DeGroot, & L.A. Holowatz, "Extremes of Human Heat Tolerance: Life at the Precipice of Thermoregulatory Failure," *Journal of Thermal Biology*, 29, 2004, pp. 479-485.

24 W. Yang, & G. Q. Zhang, "Air Movement Presences Observed Initially Ventilated Buildings in Humid Subtropical Climate Zones in China," *International Journal of Biometeorology*, 53, 2009, pp. 563-573.

$$e_s = 0.611 \times 10^{\frac{7.5T}{2.877.7+T}} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$RH = \frac{e}{e_s} \times 100\% \dots\dots\dots (3.5)$$

上述體感溫度計算方式，並不適用於日曬情形，但陽光對於位處東南亞的臺灣，確是一個必須納入考量的參數。由於提供一種太陽輻射校正的任務是很複雜的，需要考慮陽光的角度、一年天數、緯度、海拔、蒸汽壓力、空氣溫度和雲。雲層通過在輻射和雲的反射率的計算，減去一些太陽輻射的複雜的計算，取決於雲的類型、總天空覆蓋和雲厚度。另外，還要考慮地面的表面反照率；例如，雪具有取決於程度和範圍深度的高反照率。計算太陽輻射後，會大大影響指數。丹尼爾森(Danielsson)²⁵ 表示太陽輻射可能會

增加攝氏5度～10度的溫度。另外，風力增加使太陽輻射產生變動，因此，最好能實際測量太陽輻射，才能量化測量區域真正的日曬影響。但目前使用的大多數儀器並不包括這個功能。

本文參考國外天文臺的作法，研發簡易式的黑球溫度計，藉由半球型的黑體，代表人體受熱的極大值（黑體具有最大的輻射吸收值），將該自行製作的黑球溫度計，垂直置放於理工學院理學部頂樓，無任何遮蔽處所，且鉛直設置於全自動氣象儀器(Davis 6152)觀測系統旁（如圖3），藉由和標準氣象觀測儀器觀測的氣溫來進行比對，以量化太陽輻射造成的最大人體氣溫升值；在黑球溫度的設計上，我們將溫度感測元件和自動觀測儀器完成校驗後，置入內部空心的球型



圖3 Davis 6152全自動氣象觀測儀及自製黑球溫度計（置於紅色木桿前端，紅色箭頭處）整合影像

25 U. Danielsson, “Wind Chill and the Risk of Tissue Freezing,” *Journal of Applied Physiology*, 81, 1996, pp. 2666-2673.

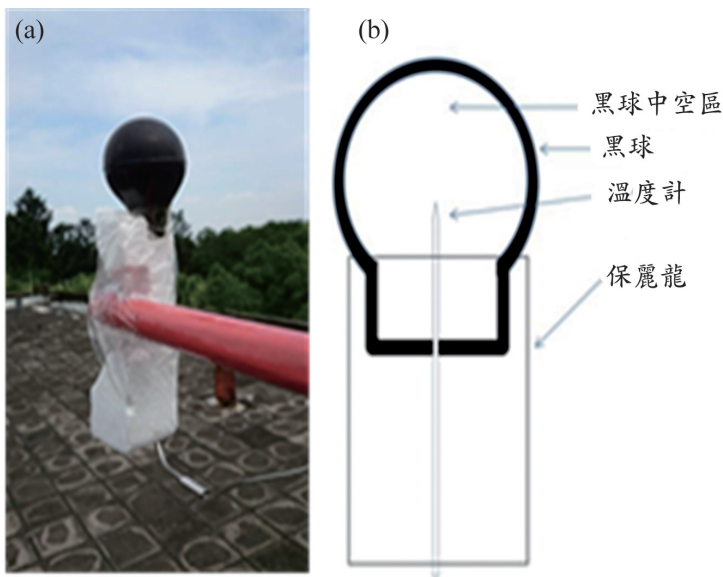


圖4 (a)自製黑球溫度計外觀影像及(b)內部構造圖

黑體中心位置（如圖4(a)(b)），將球型黑體密封，避免外界空氣和內部產生對流，影響觀測的結果。

過去許多學者研究和美軍訓練單位，在中緯度地區是使用濕黑球溫度(WBGT)(3.4)來量化跑步或劇烈活動等環境大氣對人體的感受。但其計算方式中，雖將代表太陽輻射的黑球溫度納入考量，僅另加考慮氣溫 and 濕度，未將風速對氣溫造成的影響納入，因此僅能在沒有風速的環境大氣中，有著較為理想的結果。有鑑於此，我們將WBGT的特性和NFAT進行推算和結合，推演出新太陽體感溫度(NEW Solar Felt Air Temperature, NSFAT)，並區分有日曬和無日曬兩種情形來進行觀測實驗，以推算國軍「新危險係數」(New Danger Coefficient, NDC)。

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_a \dots\dots\dots (3.6)$$

T_a 是乾球溫度（攝氏溫度）、 T_w 是濕球溫度（攝氏溫度）、 T_g 是黑球溫度（攝氏溫度）。

新太陽體感溫度(NSFAT)於戶外有日曬時，計算方式：（NFAT為新體感溫度， T_g 是黑球溫度）

$$\text{有日曬：NSFAT} = 0.65\text{NFAT} + 0.35T_g$$

新太陽體感溫度(NSFAT)於戶外無日曬，或在室內（無空調且通風）時，計算方式：

$$\text{無日曬：NSFAT} = 0.9\text{NFAT} + 0.1T_g$$

在考慮氣溫、濕度、風速和太陽輻射的新太陽體感溫度後，人員的感受溫度已可清楚的量化，為了對應現有的操課危險係數分級表，我們將NSFAT加上修正係數後即可得到國軍「新危險係數(NDC)」，其計算方式如下：

$$\text{有日曬：NDC} = \text{NSFAT} + 6$$

$$\text{無日曬：NDC} = \text{NSFAT} + 5$$

肆、資料分析

一、觀測與計算說明

將自製的黑球溫度計和氣象自動觀測系統結合體（如圖5），於104年9月16日～18日白天進行連續觀測，並於9月23日進行24小時的連續觀測，觀測期間均挑選屬弱綜觀之晴朗天氣；9月16日的太陽輻射曲線圖顯示，當日0900時～1300時期間，太陽輻射高於 $900\text{w}\cdot\text{m}^{-2}$ ，但因雲量頗多，在0700至1800時期間，太陽輻射變動量較大；當日氣溫隨日出後逐漸升高，1300時達到最高溫28.9度，此時自行設計之黑球溫度亦達最高溫37度，值得注意的是，氣溫遞增曲線僅有小幅度的變化，但黑球溫度則是和太陽輻射值具有近乎同相位的變化。此顯示，氣溫變動對於太陽輻射並不敏感，黑球溫度則是直接受到陽光的影響，而產生變化。此一特性非常有利

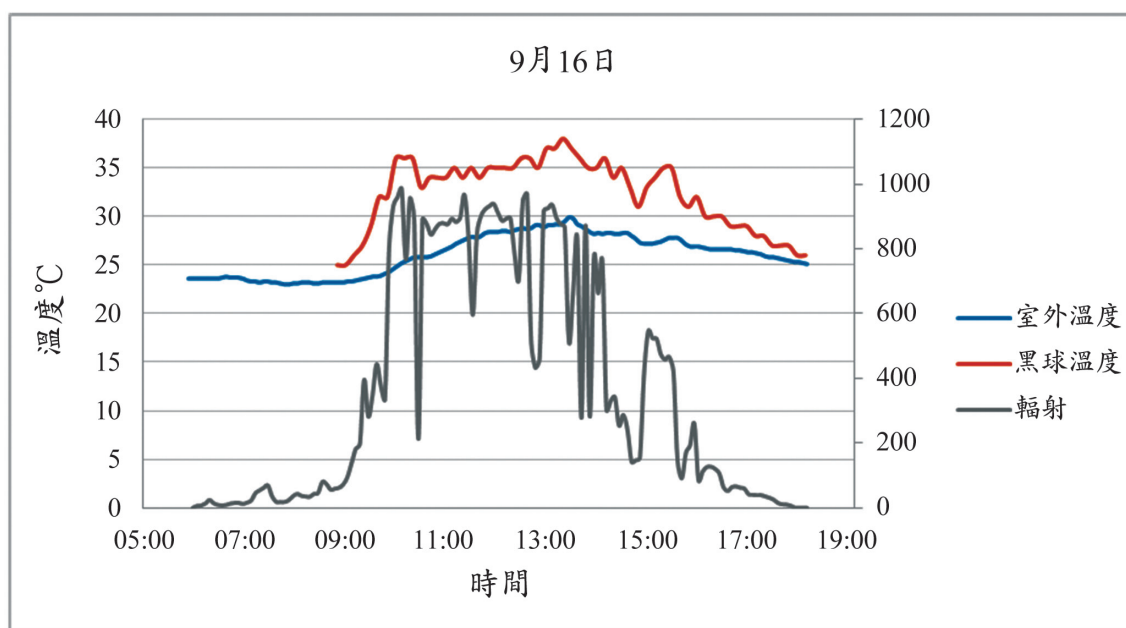


圖5 104年9月16日於國防大學理工學院理學部頂樓，使用整合式自動觀測儀器和自製黑球溫度計觀測結果。紅色實線為黑球溫度、藍色實線為室外氣溫、綠色實線為太陽輻射

於我們量化人員於陽光下活動的感受程度，代表我們自行設計的黑球溫度計相當成功。

當我們運用自製的黑球溫度和自動觀測儀器量測的結果，代入我們推導出的新太陽體感溫度(NSFAT)後，發現9月16日1300時最高溫雖僅攝氏28.9度，但考量風速、日照和水氣後，換算出室外NSFAT約為31.09，比當時的氣溫高出2.19。這顯示人員在戶外活動時，感受溫度會高於2度以上，換算為新國軍危險係數(NDC)後，等於37.09，已屬於黃旗警戒。同一時間室內NSFAT則顯示28.81(NDC=33.81)，略低於實際氣溫，這樣的計算結果，在我們實際訪談採樣本院學生感受後，獲得極為正面的肯定。另外，我們從當天的室內NSFAT計算數據顯示，室內的數值並非低於氣溫的量測結果，這顯示我們成功的將多樣影響人體感受的數據；顯示出來，在沒有日照的地方操課，仍然會因陽光透過地表反照的方式，將部分輻射能量傳遞

至無日照區域，造成人員感受溫度的上升。

在9月17日的觀測當中（如圖6），黑球溫度日出後即快速上升，0800時後，黑球溫度已超過35度，當時氣溫僅25.2度，換算出的室外NSFAT已達28.5（表略）(NDC=34.5)，這顯示戶外操課人員已明顯感受太陽的輻射熱，此時室內NSFAT約25.7(NDC=30.7)，僅略高於環境氣溫。這代表水氣、太陽輻射造成的反照加熱及環境風場，已讓人體的溫度感受略高於環境氣溫。在黑球溫度的變動上，當雲層變化使太陽輻射發生變動時，黑球溫度亦會產生明顯變動，當日最高氣溫出現在1300時為29.3度，此時黑球溫度為37度，室外NSFAT約30.9(NDC=36.9)，僅略高於環境溫度，這是因為當日水氣含量較低，且風速較強所造成的效應，和多數操課人員經驗上的感受一致；9月18日太陽輻射觀測顯示（如圖7），當日天氣晴朗，雲量亦不多，因此太陽輻射變動較小。有趣的是，當日黑

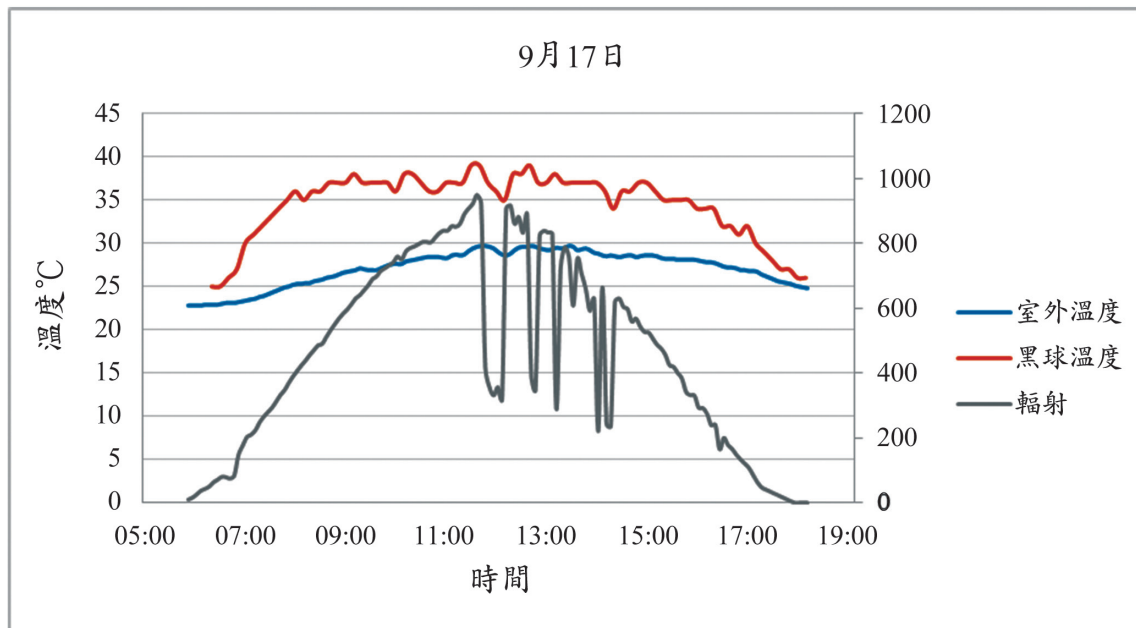


圖6 同圖5，但為104年9月17日

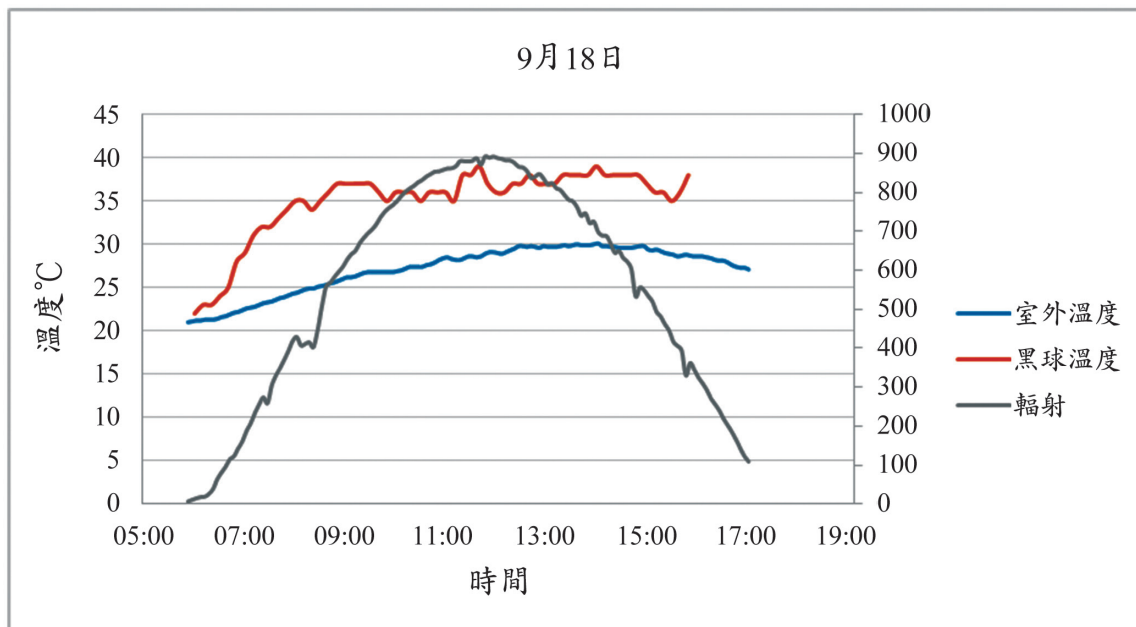


圖7 同圖5，但為104年9月18日

球溫度在0900時～1300時期間，卻有著較大的變動，探究其因，為在此時段風速增強(1.8m/s)所致，也就是風速能有效的降低黑球的表面溫度。當日最高氣溫30度出現在1400時，當時黑球溫度高達39度，換算當時的室

外NSFAT約32.47（表略）(NDC=38.47)、室內NSFAT約29.96(NDC=34.96)，均能符合設計呈現人體感受的目標。

9月23日我們進行24小時的連續觀測（如圖8），太陽輻射顯示，當日亦為晴朗的

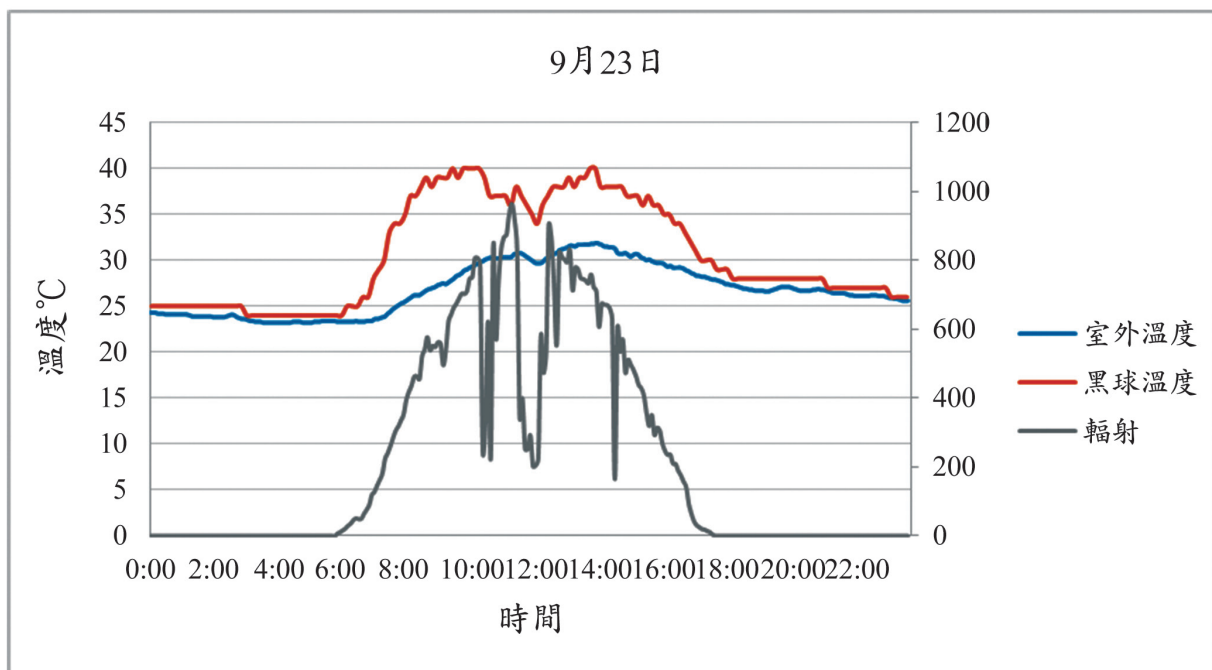


圖8 同圖5，但為104年9月23日

好天氣，但1000時～1500時期間，雲量偏多，造成太陽輻射值大幅變動，黑球溫度和太陽輻射增減趨勢和變動均相當的類似。有趣的是當日0700時～0800時，黑球溫度自28度快速上升至35度。此顯示，人員操課時，不可誤認晨間陽光偏弱，就失去暑熱的警覺；當日最高溫出現在1400時為31.8度，當時黑球溫度已達40度，在微風(1.3m/s)及部分水氣(RH=64%)的影響下，室外NSFAT約33.89（表略）(NDC=39.89)、室內NSFAT約31.54(NDC=36.54)，均已達到黃旗的警戒狀態。

二、新舊危險係數比較

現有國軍危險係數，在假設溫度固定33度、濕度70%時，便已達到代表危險的紅旗警戒；但這樣的天气環境，在臺灣夏天（特別是南部演訓和操練場地）卻常常出現；現有操課，為了國軍弟兄安全，在這樣的情形下，按規定不可以實施。但事實上，若訓練

區域有風，或陰天，可能連國軍弟兄本身都會覺得矯枉過正。因為在那樣的環境下，人體的感受上，應該可以正常操課的。為了說明，我們設計係數和現有危險係數的差異到底為何呢？是更為嚴苛或寬鬆，還是更為客觀？首先我們設定無風與微風做為比較的重點，來說明新舊係數的差異。由於天氣要素時時改變，必須在氣溫、濕度、風速和太陽輻射，採用特定值，來說明兩者計算後的差異。

為了凸顯風速的影響，挑選9月份密集觀測中，雲量較少的晴朗天氣，來實施對應計算。由於這樣晴朗的天氣，實際量測黑球溫度的值，均不超過40度。因此，我們以較高的熱輻射標準（選用太陽溫度40度），當作太陽輻射計算基準，然後在無風的情況下，相對溼度從70%增加至100%（每向上增加10%，計算一次現有危險係數和室外新危險係數NDC(out)及室內新危險係數NDC(in)

），來計算新舊係數有何不同？結果如表2，在表中可以發現，現有危險係數和室外新危險係數NDC(out)，在無風時，均超過40，代表無日照的室內新危險係數NDC(in)，則是在相對濕度超過90%後，危險係數超過40，在80%以下時則為黃旗警戒；很明顯的，使用較高太陽輻射的黑球溫度，使NDC(out)在相對濕度70%，就超過警戒值40。就是說，無風時，較嚴苛的理想型態中，室外新危險係數NDC(out)會比現有危險係數，對於環境的量化，更為嚴苛，NDC(out)則較為寬鬆。

接著，我們在微風下（4m/s，如表3）來和現有危險係數比較，結果發現，同樣溫度固定33度，黑球溫度40度，溼度每向上增加10%，現有國軍危險係數警戒結果相同，於濕度70%時便已達到代表危險的紅旗警戒。但此時，室外新危險係數NDC(out)，則落於黃旗警戒，室內危險係數，NDC(in)，也為黃旗警戒，但更接近藍旗的適合操課範圍。

圍。這樣結果說明，風速確實會影響危險係數的大小，而NDC(out)或NDC(in)數據的下降，確實較符合有風時，人體散熱較佳，適合操課活動的感受，這樣的設計，明顯較為客觀和合理。

伍、結 論

環境對於人員活動的影響非常直接，因此世界各先進國家無不設法運用各類大氣探測結果來量化人員的感受，以利進行各類活動的規劃。在中緯度國家除暑熱必須考慮外，甚至必須精確評估寒冷對人員的影響，以避免人員傷亡。國軍人員執行戰備、演訓和操課活動，均於變化多元的戶外實施，發展考慮氣溫、水氣、風速和太陽輻射等4項直接影響人員感受的評估方法，因而顯得迫切需要。現有國軍操課「危險係數」自頒訂後執行多年，不能考慮風速和太陽輻射的缺點已慢慢顯露。這使操課人員對於「危險係

表2 無風時，新舊危險係數比較

濕度%	現有危險係數	NDC(out)	NDC(in)
70	40	39.62	36.17
80	41	39.73	36.32
90	42	39.84	36.47
100	43	39.95	36.63

表3 微風(4 m/s)時，新舊危險係數比較

濕度%	現有危險係數	NDC(out)	NDC(in)
70	40	42.22	39.77
80	41	42.33	39.92
90	42	42.44	40.07
100	43	42.55	40.23

數」的信賴感下降，亦不利各類操課訓練的進行。

本次研究運用自行研發之黑球溫度計，成功將太陽輻射對於人員影響納入指標計算。由於人員的輻射吸收在學理上，不可能大於黑體，因此，這樣的設計，已能夠充分的反應操課人員承受的外部熱源；另外，改良國外的體感溫度，藉由簡化計算、係數的修正，創建出「新體感溫度」及「新太陽體感溫度」，成功的將氣溫、水氣、風速和太陽輻射納入探測和計算，並將此創新的指標，對應成為國軍「新危險係數」，未來規劃在進行大量人體感受實驗後，更可透過產學合作，將本研究的計算方式，植入和中科

院合作開發的「多元環境監測平臺」（如圖9）。藉由自動化的探測結果，忠實的將本研究對於環境場變化的評估即時的呈現，這樣的結果並非更為寬鬆，而是更為客觀。原危險係數判定紅旗危險的狀態，可能會因為環境風場的影響，使計算後的警戒狀態降為黃旗。反之，亦可能出現原危險係數判定黃旗的狀態，因太陽輻射、風速和水氣的影響，提升警戒為紅旗；未來將配合研究中的5日危險係數預報，使國軍部隊能據以完成各類戶外操課活動操課規劃，甚至推廣至民眾的馬拉松活動進行。

（收件：105年1月9日，接受：105年7月1日）



圖9 本院環資系大氣組與中科院合作開發之第一代「多元環境監測平臺」，可即時感測雨量、氣溫、濕度等大氣參數，並將大氣參數換算為「危險係數」，藉由紅、黃、藍等不同燈號，實施警示。（畫面中的數據僅為儀器測試數據，並非實際換算危險係數的結果）

參考文獻

外文部分

期刊論文

- AliToudert, F., Djenane M., Bensalem R., & Meyer H. (2005). "Outdoor Thermalcomfort in the Old Desert City of Beni-Isguen, Algeria," *Climate Res*, 28, pp. 243-256.
- Akyuz, A., Boyaci, S., & Cayli, A. (2010). "Determination of Critical Period for Dairy Cows Using Temperature Humidity Index," *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 9, 13, pp. 1824-1827.
- Armstrong, D. V. (1994). "Heat Stress Interaction with Shade and Cooling," *Journal of Dairy Science*, 77, pp. 2044-2050.
- Armstrong, L. E., Hubbard, R. W., DeLuca, J. P., & Christensen, E. L. (1987). "Heat Acclimatization During Summer Running in the Northeastern United States," *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 19, pp. 131-136.
- Balling, R. C., & Brazel, S. W. (1987). "Diurnal-variations in Arizona Monsoonprecipitation frequencies," *Monthly Weather Review*, 115, pp. 342-346.
- Basu, R., & Samet, J. M. (2002). "An Exposure Assessment Study of Ambient Heat Exposure in an Elderly Population in Baltimore, Maryland," *Environmental Health Perspectives*, 110, pp. 1219-1224.
- Berman, A. (2005). "Estimates of Heat Stress Relief Needs for Holstein Dairy Cows," *Journal of Animal Science*, 83, pp. 1377-1384.
- Blazejczyk, K., & Krawczyk, B. (1991). "The Influence of Climatic Conditions on the Heat-Balance of the Human Body," *International Journal of Biometeorology*, 35, pp. 103-106.
- Blazejczyk, K. (2001). "Assessment of Recreational Potential of Bioclimate Based on the Human Heat Balance," *The First International Workshop on Climate, Tourism and Recreation*, pp. 133-150.
- Bluestein, M. (1998). "An Evaluation of the Wind Chill Factor: Its Development and Applicability," *Journal of Biomechanical Engineering*, 120, pp. 255-258.
- Bluestein, M. & Zecher, J. (1999). "A New Approach to an Accurate Wind Chill Factor," *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80, pp. 1893-1899.
- Brouček, J., Novák, P., Vokřálov, J., Šoch, M., Kišac, P., & Uhrinčať, M. (2009). "Effect of High Temperature on Milk Production of Cows From Free-stall Housing with Natural Ventilation," *Slovak Journal of Animal Science*, 42, 4, pp. 167-173.
- Budd, G. M. (2008). "Wet-bulb Globe Temperature (WBGT)-its History and its Limitations," *Journal of Science and Medicine in Sport*, 11.
- Danielsson, U. (1996). "Windchill and the Risk of Tissue Freezing," *Journal of Applied Physiology*, 81, pp. 2666-2673.
- Ely, M. R., Cheuvront, S.N., Roberts, W.O., & Montain, S. J. (2007). "Impact of Weather

- on Marathon-Running Performance,” *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39, pp. 487-493.
- Fanger, P. (1972). *Thermal Comfort*. New York: McGraw-Hill.
- Hanna, J. M. (1999). “Climate, Altitude, and Blood Pressure,” *Human Biology*, 7.
- Herbut, Piotr, Angrecka Sabina (2012). “Forming of Temperature-Humidity Index (THI) and Milk Production of Cows in the Free-stall Barn During the Period of Summer Heat,” *Animal Science Papers and Reports*, 30, 4, pp. 363-372.
- Hue, O., Voltaire, B., Galy, O., Costes, O., Callis, A., Hertogh, C., & Blanc, S. (2004). “Effect of 8 Days of Acclimation on Biological and Performance Response in a Tropical Climate,” *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 44, pp. 30-37.
- Hue, O., Antoine-Jonville, S., & Sara, F. (2007). “The Effect of 8 Days of Training in Tropical Environment on Performance in Neutral Climate in Swimmers,” *International Journal of Sports Medicine*, 28, pp. 48-52.
- Kenney, W. L., DeGroot, D.W., & Holowatz, L. A. (2004), “Extremes of Human Heat Tolerance: Life at the Precipice of Thermoregulatory Failure,” *Journal of Thermal Biology*, 29, pp. 479-485.
- Kessler, E. (1993). “Wind Chill Errors,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74, pp. 1743-1744.
- Mader, T. L., Davis, M. S., & Brown-Brandl, T. (2006). “Environmental Factors Influencing Heat Stress in Feedlot Cattle,” *Journal of Dairy Science*, 84, pp. 712-719.
- McGeehin, M. A., & Mirabelli, M. (2001), “The Potential Impacts of Climate Variability and Change on Temperature-related Morbidity and Mortality in the United States,” *Environmental Health Perspectives*, 109, pp. 185-189.
- Minard, D. (1961). “Prevention of Heat Casualties in Marine Corps Recruits-Period (1955-60). Comparative Incidence Rates and Climatic Heat Stresses in Other Training Categories,” *Military Medicine*, 126.
- Morris, J.G., Nevill, M. E., Boobis, L.H., Macdonald, I.A., & Williams, C., (2005). “Muscle Metabolism, Temperature, and Function During Prolonged, Intermittent, High-intensity Running in Air Temperature of 33 Degrees and 17 Degrees C,” *International Journal of Sports Medicine*, 26, pp. 805-814.
- Moran, D. S. (2001). “Potential Applications of Heat and Cold Stress Indices to Sporting Events,” *Sports Medicine*, 31, pp. 909-917.
- Osczevski, R. J. (1995a). “Comments on ‘Wind Chill Errors’ ” : Part II. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75, pp. 1630-1631.
- Quayle, R. G., & Steadman, R. G. (1998). “The Steadman Wind Chill: An Improvement Over Present Scales,” *Weather and Forecasting*, 13, pp. 1187-1193.
- Radakovic, S. S., Donja, S., Maric, J., Subatovic, M., Radjen, S., Stefanova, E., Stankovic, N., & Filipovic, N. (2007). “Effects of

- Acclimation on Cognitive Performance Inoldiers During Exertional Heat Stress,” *Military Medicine*, 172, pp. 133-136.
 - Rothfursz, L. P. (1990). “The Heat Index “Equation” (or, More Than You Ever Wanted to Know About Heat Index),” NWS Southern Region Headquarters Technical Attachment SR90-23.
 - Schwerdt, R.W. (1995). “Comments on ‘Wind Chill Errors’ ”: Part III. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75, pp. 1631 -1637.
 - Segal, M., & Pielke, R. A. (1981), “Numerical-Model Simulation of Human Biometeorological Heat Load Conditions-Study for the Chesapeake Bay Area,” *Journal of Applied Meteorology*, 20, pp. 735-749.
 - Sheridan, S. C., Kalkstein, A. J., & Kalkstein, L.S.(2009). “Trends in Heat-related Mortalityin the United States, 1975-2004,” *Natural Hazards*, 50, pp. 145-160.
 - Siple, P.A., & Passel, C. F. (1945). “Measurements of Dry Atmospheric Cooling in Subfreezing Temperatures,” *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89, 1, pp. 177-199.
 - Spagnolo, J. C., & De, R. J. (2003). “A Human Thermal Climatology of Subtropical Sydney,” *International Journal of Climatology*, 23, pp. 1383-1395.
 - Steadman, R. G. (1979), “Assessment of Sultriness.1. Temperature-humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science,” *Journal of Applied Meteorology*, 18, pp. 861-873.
 - Steadman, R. G. (1984), “A Universal Scale of Apparent Temperature,” *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, pp. 1674-1687.
 - Voogt, J. A. (2002), “Urban Heat Island,” In I. Douglas (Ed.), *Causes and Consequences of Global Environmental Change*,” *Encyclopedia of Global Environmental Change*, 3, pp. 660-666.
 - Wallace, R. F., Kriebel, D., Punnett, L., Wegman, D. H., Wenger, C. B., Gardner, J. W., & Gonzales, R. R. (2005), “The Effects of Continuous Hot Weather Training on Risk of Exertional Heat Illness,” *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37, pp. 84-90.
 - Watts, J. D., & Kalkstein, L. S. (2002). “A New Relative Comfort Index for Warm Weather,” *Bull Am Meteorol*, 83, pp. 1572-1574.
 - Watts, J.D., & Kalkstein, L. S. (2004), “The Development of a Warm-Weather RelativeStress Index for Environmental Applications,” *Journal of Applied Meteorology*, 43, pp. 503-513.
 - Yang, W., Zhang, G. Q. (2009), “Air Movement Presences Observed Initially Ventilated Buildings in Humid Subtropical Climate Zones in China,” *International Journal of Biometeorology*, 53, pp. 563-573.
- 學位論文
- DeBiasse, & Kimberly, M. (2011). *Acclimation's Influence on Physically-fit Individuals:*

*Marathon Race Results as a Function of
Meteorological Variables and Indices.*
Arizona State University, Arizona, USA.

網際網路

Bureau of Meteorology. (2008). *About the
WBGT and Apparent Temperature Indices.*
Retrieved from <http://www.bom.gov.au/>.
Accessed June 2010.

National Weather Service. (2010). *Heat: A
Major Killer.* Retrieved from [http://
www.nws.noaa.gov/os/heat/index.shtml#
heatindex](http://www.nws.noaa.gov/os/heat/index.shtml#heatindex) Accessed June 2010.