

中央氣象局颱風路徑預報客觀指引優化之探討

李孟軒 林秉煜 許乃寧 賈愛玫 黃椿喜
中央氣象局氣象預報中心

摘要

目前國內外之颱風作業單位針對颱風路徑預報，多已由單一之決定性預報或簡單的多模式系集預報，逐漸進展為使用複雜的系集預報系統，並運用後處理整合出更佳預報指引。Dong and Zhang (2016)進一步提出OBEST (Observation-Based Ensemble Subsetting Technique)方法，透過颱風分析定位中心，針對最近期的系集成員之12小時預報誤差校驗，選取誤差較小的部分成員平均後產出新的路徑預報指引，結果顯示此方法所表現之路徑預報較一般系集平均為佳。本局於同年委託財團法人國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心(簡稱颱洪中心)進行研究，將OBEST法應用於西北太平洋颱風路徑預報技術開發，並於年底提供至本局作業系統使用。

統計2019年本局主觀與多個預報作業常用客觀指引之颱風路徑誤差校驗，前期(12、24小時預報)主觀預報與OBEST法表現良好；中期(48、72小時預報)貝氏模型平均法(Bayesian Model Averaging，以下簡稱BMA，許等，2019)與本局的WRFD、TWRP區域模式(解析度皆3公里)表現較突出；後期(96、120小時預報)仍以BMA表現較佳。

為了改進OBEST法後期的預報能力，本研究將探討三種因子之優化策略，分別為：(1)逐預報時(τ)測試；(2)初始時間測試；(3)觀測颱風強度測試。最後決定改進最顯著之策略，作為新版預報指引之參考。

關鍵字：颱風路徑預報 OBEST法 優化

一、前言

颱風路徑預報是全球各氣象作業單位頗具挑戰性的項目之一。回顧預報技術發展，從單一決定性預報、簡單多模式系集預報，演進至現今較複雜之系集預報系統，並運用統計等後處理方法整合出較佳預報指引，其主要目標為減少颱風預報路徑誤差。Dong and Zhang (2016)提出OBEST (Observation-Based Ensemble Subsetting Technique)方法，係以JMA對西北太平洋颱風定位中心為基礎，透過最近期系集成員之12小時預報誤差校驗，選出誤差最小之前M名成員平均後產出新的預報路徑。再利用2010-2011西北太平洋颱風個案，探討「排名後用以平均之成員數(M)」與「整體系集平均之預報誤差標準化之路徑誤差」之關係，ECMWF系集與ECMWF加上NCEP系集最佳排名成員數分別為M=20和M=28。另外，以2010-2011年後報與2012-2013年作業預報之颱風個案進行校驗，結果顯示OBEST路徑12至108小時預報普遍優於系集平均，其中2010-2011年12至36小時與2012-2013年12至24小時預報改進率具95%信心水準之統計顯著性。

本局於2016年委託颱洪中心將OBEST法應用於西北太平洋颱風路徑預報技術開發，以提供預報指引。本局參考颱洪中心的建議，並配合實際作業應用，

將EC系集12及18小時預報前20名成員平均產出之預報路徑，命名為ECES；EC與NCEP系集12及18小時預報前28名成員平均產出之預報路徑命名為ENES，並於年底正式上線作業系統供預報員使用。

二、颱風路徑誤差同步校驗

表1為校驗評比之各對象的說明，表2為2019年本局主觀預報與各常用客觀指引颱風路徑誤差同步校驗之結果。由於預報作業時間皆會延後於數值模式初始時間，例如OBEST法則需取得12小時後定位資料後方可運算，因此實際預報作業時，各預報指引的時間報別並不一致。為能有效評估預報成果，校驗各預報指引時應考量預報作業所能使用的各預報指引之預報時(TAU)進行同步校驗，以此方能反映各預報指引在作業時可用資料的表現。從表2可看到，各校驗對象在不同預報時段表現互有長處，例如主觀預報與ENES在12、24小時預報表現良好；BMA法於48小時之後的預報表現較突出，尤其120小時誤差接近300公里；本局WRFD與TWRP區域模式在24、48、72小

時預報表現較佳。其中在12、24、48、72小時預報，主觀誤差為56、82、140、210公里，ENES為58、83、140、210公里，可見ENES預報能力與主觀預報並駕齊驅；然而在96、120小時預報，主觀誤差為262、377公里，BMA法為249至280公里、296至323公里，ENES為288、420公里，顯示ENES表現明顯落後於主觀預報與BMA法。故本研究主要目的為優化ENES，以改進ENES後期預報能力。

校驗對象	說明	每日報數	水平解析度
CWB	本局主觀預報	*4或8	
ECES	OBEST-EC 系集	4	18km
ENES	OBEST-EC+NCEP 系集	4	---
BMAexp	#BMA 法應用	4	---
BMA_EC	#BMA 法應用	4	---
BMA_TEN	#BMA 法應用	4	---
EC_D	EC 決定性預報	2	9km
EC_M	EC 系集平均	2	18km
NC_D	NCEP 決定性預報	4	13km
NC_M	NCEP 系集平均	4	34km
WRF403slp	CWB 區域模式	4	3km
WRF415slp	CWB 區域模式	4	15km
TWRF203slp	CWB 區域模式	4	3km
TWRF215slp	CWB 區域模式	4	15km

表1. 颱風路徑誤差各校驗對象之簡介。*表示平時4報，警報期間8報。#BMA法主要產出各模式權重整合之最佳預報路徑。有關BMA法更詳盡介紹，請參閱許等(2019)：應用貝氏模型平均法於太平洋颱風路徑預報之探討。108年天氣分析與預報研討會。

	12h	24h	48h	72h	96h	120h
CWB	56	82	140	210	262	377
ECES	68	94	144	216	266	372
ENES	58	83	140	210	288	420
BMAexp	61	85	141	208	259	320
BMA_TEN	62	89	132	203	280	323
BMA_EC	72	97	141	203	249	296
EC_D	73	97	142	210	265	293
EC_M	80	107	154	213	289	372
NC_D	62	82	151	227	321	441
NC_M	59	86	155	234	359	564
WRF403slp	63	83	137	216	322	---
WRF415slp	67	88	146	207	317	---
TWRF203slp	60	79	141	213	323	---
TWRF215slp	61	84	139	204	313	---

表2. 2019年本局主觀預報與各常用客觀指引颱風路徑誤差同步校驗結果。上方第一列為各預報時；下方對應數據為路徑誤差，單位為公里。

三、 ENES優化策略與實驗設計

本研究主要探討ENES三種因子之優化策略，分別為：(一)逐預報時(TAU)測試；(二)初始時間測試：依照模式初始時間分為：00Z與12Z)與0618RUN(模式初始時間為06Z與18Z)；(三)觀測颱風強度測試：依照每6小時颱風定位分析之強度，分為強颱($\geq 33\text{m/s}$)與弱颱($< 33\text{m/s}$ ，含TD)。根據以上每種因子進行排列組合，利用2018至2019年資料設計出四種實驗，以下分別說明。

(一)實驗一：逐預報時(TAU)分析

本實驗步驟為：

- 18至240小時預報，每隔6小時某成員數與系集平均(72個成員)作路徑誤差標準化，該預報時出現路徑誤差最小之成員數，為最佳成員數，即圖1.三角形標記處與表3.之Mem.列數值。
- 利用機器學習之K-means分群法(K-means Clustering)，並衡量誤差平方和(sum of the squared errors, SSE, 公式(1)與圖2.a)與輪廓係數(Silhouette Coefficient, S, 公式(2)與圖2.b)決定最佳分群數(K值)。(1)式算法為計算每一個群中的每一個點p，到群中心的距離，其中有k個群； C_i 表示其中一個群； m_i 表示某群的中心點。圖2a可觀察到使SSE下降幅度由「快速轉為平緩」的點，稱為拐點(Inflexion point)，原則上挑選為K。(2)式中，a為凝聚度，是指與相同群內的其他點的平均距離；b為分離度，表示與不同群的其他點的平均距離；s是指以一個點作為計算的值，S則是將所有的點都計算s後再總和。S值越大，表示效果越好，適合作為K。例如本實驗綜合以上資訊，分為6群，即K=6，表3.不同顏色代表各分群。

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in C_i} |p - m_i|^2 \quad (1)$$

$$s = \frac{b-a}{\max(a,b)} \quad (2)$$

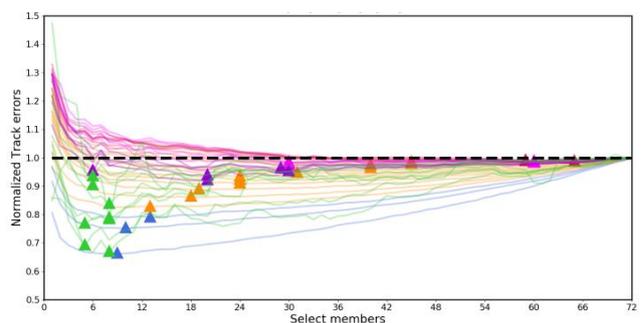


圖1. 2018至2019年西北太平洋颱風個案，ENES中所有系集成員計算其12小時路徑誤差與選取成員數的關係。橫軸為選取成員數，越往右越多，最多至72；縱軸為系集平均(72個成員)標準化之路徑誤差值；各曲線代表不同預報時間選取某成員數的路徑誤差並以全系即成員平均之路徑誤差標準化結果；三角形對

應之橫軸座標表示該預報時出現路徑誤差最小時選取的成員數，即最佳成員數；不同顏色代表各分群結果，可相互參考表3。

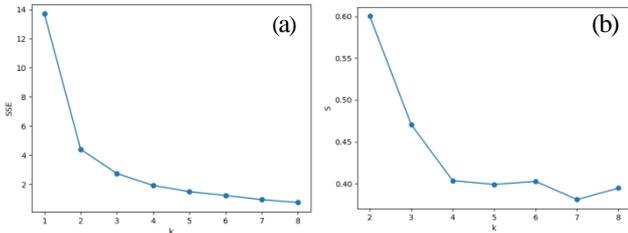


圖2.a各分群數(K值，橫軸，從左至右為1到8)與誤差平方和(sum of the squared errors, SSE, 縱軸)之關係；圖2.b各分群數(K值，橫軸，從左至右為2到8)與輪廓係數(Silhouette Coefficient, S, 縱軸)之關係。

Tau	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90
Mem	9	10	13	13	18	19	24	24	24	31	30	40	40
Sel	10			24									
Tau	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168
Mem	45	45	59	59	60	60	65	60	60	30	30	30	29
Sel	24		60						60				18
Tau	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	
Mem	20	20	30	6	6	6	8	8	5	5	8	8	
Sel	18			8									

表3.各預報時(TAU)對應之最佳成員數(Mem.列)與各分群之代表成員數(Sel.列)。

3.每一群裡，各預報時所包含之所有最佳成員數，由小至大排列，每一個最佳成員數得到各預報時標準化誤差之平均值，其中最小者，作為該群之代表成員數。以表4.為例，成員數9至13中，成員數10之標準化路徑誤差平均值最小(表4.黃底格)，成為代表成員數。各分群代表成員數決定後(表3之Sel.列數值)，即可建模出此版本的ENES，為ENES_exp1。

	成員數9	成員數10	成員數11	成員數12	成員數13
Tau18	0.660	0.663	0.665	0.671	0.673
Tau24	0.752	0.749	0.753	0.754	0.756
Tau30	0.792	0.789	0.791	0.794	0.788
平均	0.758	0.757	0.759	0.762	0.760

表4.表3藍色區間包含之各最佳成員數隨預報時之標準化路徑誤差，最下列為平均值，黃底為最小者，其對應之成員數為代表成員數。

4.校驗ENES_exp1與原版ENES之路徑絕對平均誤差(MAE)，檢驗重新建模後的預報改進情形。

(二)實驗二：初始時間分析

本實驗將資料分成0012RUN與0618RUN兩類，各類資料進行實驗一之步驟1到3，並依此分類建模後形

成ENES_exp2，與原版ENES比較路徑誤差。

(三)實驗三：觀測颱風強度分析

本實驗與實驗二相互獨立，將資料分成強颱風(≥33m/s)與弱颱風(<33m/s, 含TD)兩類，各類資料進行實驗一之步驟1到3，依此分類建模後形成ENES_exp3，與原版ENES比較路徑誤差。

(三)實驗四：初始時間與觀測颱風強度分析

本實驗結合實驗二與實驗三，將資料分成0012_強颱風、0012_弱颱風、0618_強颱風、0618_弱颱風共四類，各類資料進行實驗一之步驟1到3。依此分類建模後形成ENES_exp4，與原版ENES比較路徑誤差。

四、結果與討論

(一)實驗一：逐預報時(TAU)分析

由上一節表3.可看到，原則上代表成員數隨預報時增加而增加，第三、四群(紅色與粉紅色格)，代表成員數接近系集平均；而最後兩群(紫色與綠色格)因個案數較少，代表成員數下降。圖3.結果可看到18至72小時預報有1%到8%改進率，改進幅度約1公里到4公里；78至102小時預報因代表成員數接近原版設定(28個)，兩版本表現幾無差異；108至144小時預報也有1%到5%改進率，改進幅度可達6公里到10公里；總體而言預報後期改進幅度較大。

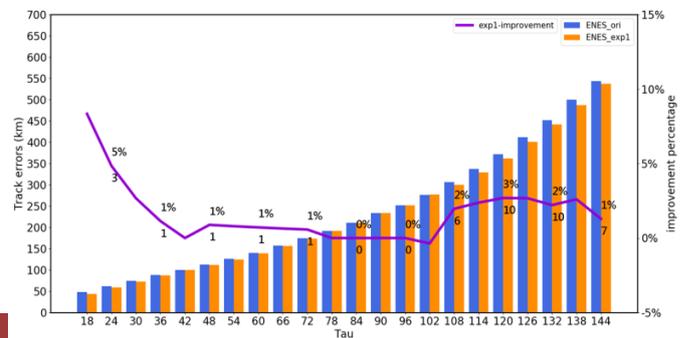


圖3.ENES與ENES_exp1之路徑預報較驗結果比較。橫軸為預報時；長條圖分別為ENES(藍色)與ENES_exp1(橘色)之路徑絕對平均誤差(MAE, 單位km, 左縱軸)；紫色線為ENES_exp1相對於ENES路徑誤差改進曲線，其上方數據為改進率(%，右縱軸)，下方數據為改進幅度(km)。

(二)實驗二：初始時間分析

表5.a與表5.b分別為0012RUN類與0618RUN類之分群結果，兩類資料皆分成6群(K=6)，其代表成員數分布特性與實驗一相似，唯各分群包含區間不盡相同。圖4.顯示，ENES_exp2路徑誤差改進情形與ENES_exp1類似，120至144小時預報改進幅度可達9至12公里，改進率約2%至3%。

Tau	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90
Mem	10	7	13	13	13	10	20	10	35	40	40	42	42
Sel	10						40				64		
Tau	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168
Mem	51	51	59	59	66	66	65	64	64	65	64	64	29
Sel	64										29		
Tau	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	
Mem	21	29	29	40	6	6	8	5	5	5	5	8	
Sel	29			6			8						

表5.a同表3，但為0012RUN類分布。

Tau	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90
Mem	7	10	10	19	19	24	25	26	26	31	30	30	30
Sel	19										30		
Tau	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168
Mem	34	60	32	60	60	60	60	30	35	28	39	28	
Sel	30		60						28				
Tau	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	
Mem	20	18	8	6	11	11	8	8	9	4	4	0	
Sel	28		8			8							

表5.b同表3，但為0618RUN類分布。

Tau	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90
Mem	5	10	11	8	13	14	15	26	30	39	38	33	33
Sel	11							37					
Tau	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168
Mem	37	37	32	37	37	32	35	35	31	32	30	30	18
Sel	37					32							6
Tau	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	
Mem	18	18	6	18	18	6	1	6	5	6	6	4	
Sel	6												

表6.a同表3，但為強颱風類分布。

Tau	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90
Mem	9	10	13	18	18	18	24	24	24	25	25	18	42
Sel	18												53
Tau	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168
Mem	58	61	61	66	66	66	71	71	71	71	60	60	61
Sel	53			66						71			66
Tau	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	
Mem	21	20	69	72	71	71	8	8	1	72	1	60	
Sel	66				72								

表6.b同表3，但為弱颱風類分布。

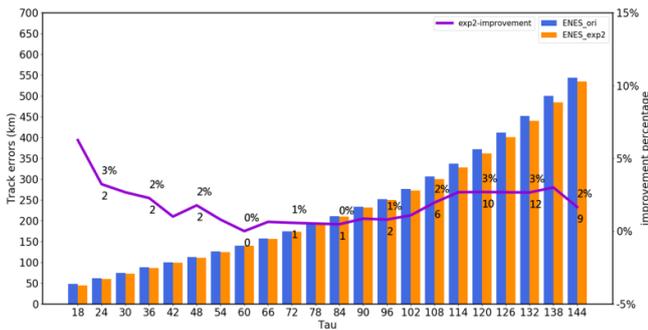


圖4.同圖3，但為ENES與ENES_exp2之路徑預報較驗結果比較。

(三)實驗三：觀測颱風強度分析

表6.a與表6.b分別為強颱風類與弱颱風類之分群結果，其中強颱風類分為4群，弱颱風類分為6群。與前兩種實驗較不同的是，強颱風組之代表成員數最多為37，可能主要因為，颱風強度到達33m/s以上多有眼的結構，各成員定位相近，因此只需挑選約排名前50%之成員平均即具代表性；而弱颱風組因各成員颱風結構掌握與定位差異較大，需要較多成員平均，使預報較穩定，因此最後兩群(紫色與綠色格)之代表成員數仍接近系集平均。圖5顯示，ENES_exp3在120至144小時預報改進幅度可達12至21公里，皆大於前兩種實驗。

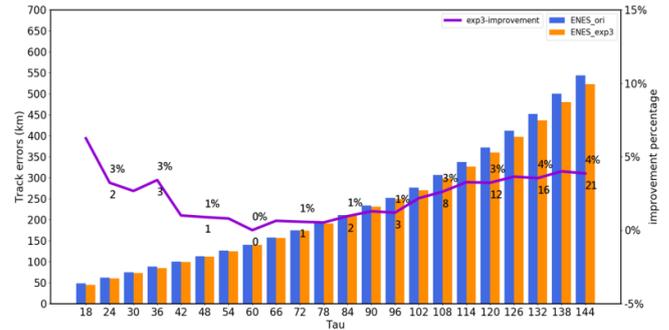


圖5.同圖3，但為ENES與ENES_exp3之路徑預報較驗結果比較。

(四)實驗四：初始時間與觀測颱風強度分析

表7.a、7.b、7.c、7.d分別為0012_強颱風類、0012_弱颱風類、0618_強颱風類、0618_弱颱風類之分群結果。其中0012_強颱風類與0618_強颱風類分群與代表成員數分布特性與實驗三強颱風類相似，兩類皆分為4群，代表成員數最大值分別為40與35；0012_弱颱風類與0618_弱颱風類分群與代表成員數分布特性也大致與實驗三弱颱風類相似，兩類皆分為6群，且在最後兩群代表成員數接近系集平均，除了0618_弱颱風類在第六群(綠色格)代表成員數為4。由此可知，觀測颱風強度因子主導各類資料分群特性。最後，圖6顯示，ENES_exp4在120至144小時預報改進幅度為12至20公里，與實驗三幾無差別。

Tau	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90
Mem	11	10	13	13	13	10	13	20	39	39	39	39	39
Sel	13								40				
Tau	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168
Mem	44	44	40	40	40	62	47	49	31	30	17	17	17
Sel	40								30				
Tau	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	
Mem	21	24	6	6	6	5	8	5	4	5	6	4	
Sel	30						5						

表7.a同表3，但為0012_強颱風類分布。

Tau	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90
Mem	10	7	13	10	8	10	20	10	19	24	18	18	53
Sel	10										18		58
Tau	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168
Mem	51	57	58	59	69	66	68	70	70	70	70	60	29
Sel	58								67				
Tau	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	
Mem	8	29	29	72	72	6	6	65	1	1	1	60	
Sel	67		65							60			

表7.b同表3，但為0012_弱颱風類分布。

Tau	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90
Mem	7	11	8	11	11	24	16	26	26	29	30	27	32
Sel	11										30		
Tau	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168
Mem	30	29	27	32	37	30	30	31	31	35	35	35	11
Sel	30								35				
Tau	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	
Mem	35	18	18	18	11	11	11	1	10	6	11	0	
Sel	35		11										

表7.c同表3，但為0618_強颱風類分布。

Tau	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	
Mem	7	10	18	19	18	18	25	31	31	31	33	30	40	
Sel	18										31			66
Tau	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168	
Mem	60	61	61	71	66	72	71	71	71	71	60	58	66	
Sel	66								71			65		
Tau	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240		
Mem	24	8	71	3	5	71	8	8	3	4	4	0		
Sel	65							4						

表7.d同表3，但為0618_弱颱風類分布。

圖6.同圖3，但為ENES與ENES_exp4之路徑預報較驗結果比較。

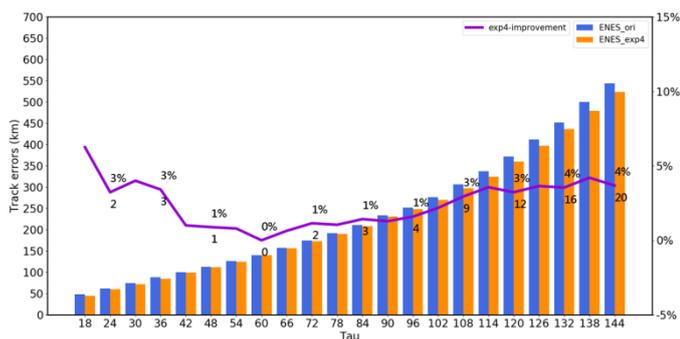
五、結論

總覽2019年本局主觀預報和常用客觀指引之颱風路徑誤差同步校驗，發現基於OBEST法產出之ENES只在前期預報表現較佳，故本研究討論ENES優化策略來試著改進後期的預報能力。

比較不同因子組合之ENES優化策略，結果顯示引入觀測颱風強度因子，將資料分為強颱風類($\geq 33\text{m/s}$)與弱颱風類($< 33\text{m/s}$, 含TD)較能凸顯不同群組資料的特性，依此分類建模較能改善後期預表現，改進幅度約10至20公里。另同時考慮建模效率，單純依觀測強度分類建模即可作為未來建立新版ENES或作業應用的參考策略。

六、參考文獻

1. 許乃寧、賈愛玫、林秉煜、陳昱璵、馮智勇, 2019 : “應用貝氏模型平均法於太平洋颱風路徑預報之探討”，109年天氣分析與預報研討會。
2. 陳昱璵、馮智勇、賈愛玫、許乃寧, 2018 : “應用貝氏模型平均法於2017年太平洋颱風路徑預報”，107年天氣分析與預報研討會。
3. Ansell, B. C., 2016: Improving High-Impact Forecasts through Sensitivity-Based Ensemble Subsets: Demonstration and Initial Tests. *Wea. Forecasting*, 31, 1019–1036.
4. Dong, L., and F. Zhang, 2016: OBEST: An observation-based ensemble subsetting technique for tropical cyclone track prediction. *Wea. Forecasting*, 31, 57–70.
5. Elsberry, R. L, J. R. Hughes, and M. A. Boothe, 2008: Weighted position and motion vector consensus of tropical cyclone track prediction in the western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 2478–2487.
6. Froude, L. S. R., L. Bengtsson, and K. I. Hodges, 2007: The Prediction of Extratropical Storm Tracks by the ECMWF and NCEP Ensemble Prediction Systems. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 2545–2567.
7. Prates F, 2012: Forecasting Tropical Cyclones in the Medium Range, ECMWF, 43pp.
8. S. Kim et al., "Deep-Hurricane-Tracker: Tracking and Forecasting Extreme Climate Events," 2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), Waikoloa Village, HI, USA, 2019, pp. 1761-1769.



A Discussion on Optimization of Objective Guidance for Typhoon Track Forecast by Central Weather Bureau

Meng-Hsuan Li, Ping-Yu Lin, Nai-Ning Hsu, Ai-Mei Chia and Treng-Shi Huang

Weather Forecast Center, Central Weather Bureau

Abstract

Dong and Zhang (2016) proposed the OBEST (Observation-Based Ensemble Subsetting Technique) method, which uses the latest typhoon best-track position to estimate the 12-hour forecast error of the most recent ensemble members, and select some members with smaller errors after averaging to produce a new forecast track. The results showed that the OBEST track performed better than the ensemble mean track. In the same year, Central Weather Bureau (CWB) commissioned Taiwan Typhoon and Flood Research Institute (TTFRI) to conduct research and apply the OBEST method to the development of typhoon track forecast techniques in the Northwest Pacific, and provided it to the operating system of CWB at the end of the year.

Examining the typhoon track error verification of the subjective and objective guidance commonly used by CWB forecasting operations in 2019, the early stage (12- and 24-hour forecast) subjective forecast and the OBEST method performed well. The middle stage (48- and 72-hour forecast) Bayesian model average method (Bayesian Model Averaging, hereinafter referred to as BMA) and CWB-WRFD, CWB-TWRF regional models (with a resolution of 3 km) performed more prominently. The later stage (96- and 120-hour forecast), BMA still performed better.

In order to improve the forecasting ability in the later period of the OBEST method, the study will focus on the optimization strategies of three factors, they are: (1) forecast hour (τ) test, (2) initial time test and (3) observed typhoon intensity test. The strategy being the best improvement is the reference for new guidance.

Keywords: typhoon track forecast, OBEST, Optimization