

測風光達觀測與高解析邊界層風場模擬的比對

鄧詠霖¹ 張少凡¹ 廖宇慶¹ 林沛練¹
國立中央大學大氣科學系¹

摘要

配合政府的創新研發，強化風能有關的氣象分析與預報技術，以綠能產業應用需求為導向，拓展氣象在綠能開發的服務能力。本研究著重在氣象上與風能相關的邊界層風場觀測和模擬。觀測上，我們採用能在邊界層內觀測風場的測風光達(lidar)，其原理是利用發射雷射光來探測距離、風速或是空氣成分等。該光達可以於地表以上10至200m進行高時間解析度的風場觀測，以協助我們了解與分析邊界層內風場的特性。2017年9至11月期間，已針對兩台測風光達進行檢校與測試。其中一台擺置於中央大學測站，與鄰近32m氣象塔風力觀測比較；另一台則置於中央氣象局新屋氣象站，與測站風場資料比對，結果顯示，兩處的測風光達觀測與現地儀器量測的一致性高。模式的部分，為了解加入資料同化能力後對邊界層風場模擬的影響，選擇納進法(nudging)進行比較。高解析度模式(Weather Research and Forecasting, WRF)的參數設定，以nest down方式並使用 MYNN 邊界層參數化模擬邊界層風場，最細的解析度可達100m。在模擬與觀測的比較中，以個案2017年9月1日測風光達在中央大學測站觀測到的24hr風向風速為例，風向的模擬與觀測結果是吻合的；風速上在近地表的高度，模擬會比觀測較強，可能原因是模式對於摩擦的表現略差，但是隨高度愈高，模擬風速會與觀測愈來愈相似。此外，以本個案來說，加入納進法後與控制組(未加入納進法)之間差異並不明顯。最後，我們呈現模式邊界層高度隨時間的變化，大約中午至下午時間是事實上邊界層高度較高，同時也呈現位溫隨時間之變化，一般而言，位溫的垂直分布中，開始增加的高度可以用來判斷邊界層，比對後的結果與模式產出的邊界層高度有類似的變化。

關鍵字：測風光達、邊界層模擬

一、前言

近年來全球氣候異常，災害性極端天氣發生的頻率增加，其災害規模與型態均超出各國的歷史災害經驗，也為各國的政府與人民帶來巨大的損失。而聯合國政府氣候變遷小組(international Panel on Climate Change; IPCC)的報告指出，全球暖化極有可能加強極端氣候事件對社會經濟的衝擊。有鑑於此，政府於2011年大力發展及推廣潔淨替代能源來降低對石化能源的使用，包括推動「千架海陸風力機計畫」等計畫。一方面減少溫室氣體的排放，同時健全國家調適能力，降低社會脆弱度，厚植國內替代能源相關產業之國際競爭力，來促成我國以綠能產業為主的經濟發展。

本研究目標著重在氣象上與風能相關的邊界層風場觀測和模擬，特別是利用邊界層測風光達(Light Detection And Ranging, 以下簡稱Lidar)進行量測，數值模式以高解析度邊界層模擬技術進行大氣邊界層風場模擬和預報，最細水平網格間距將設定為數百公尺，蒐集現有的觀測資訊並提升模式預報邊界層風場的能力。

二、文獻回顧

過去這幾年，與風能方面相關的氣象研究在探討大氣邊界層流場的物理特性及風機與邊界層之間的效應，多著重於透過中尺度數值預報模式(WRF)進行模擬。由於風機尺度在WRF模式中屬於小尺度，根據國外Talbot et al. (2012)指出，WRF模式若要準確掌握並解析小尺度產生的渦流結構，須使用大渦流模擬(Large-Eddy Simulation, LES)。此外，Fitch et al. (2012)在大渦模擬的數值架構下，將風機參數化加入理想化模式中，模擬邊界層流場受風機影響將動能轉換成電能及亂流動能的效應，並探討風場與風機之間產生的交互作用，結果顯示風場會受風機阻礙產生風機下游的風速降低且亂流動能增加。在臺灣，風能方面相關研究多著重於透過大氣數值模式，模擬長期的風速與風場量測資料，例如：Lidar或風機觀測，作為探討大氣邊界層風場特性以及新的風機建設選址和發電效益評估。周等人(2015)利用WRF模擬風場與Lidar在近地表大氣的風場日夜變化進行驗證。研究顯示日間風速因地表加熱作用在垂直方向產生旺盛亂流動量，相較於夜間冷卻效應與地表摩

擦力，日間風速並無夜間風速垂直上有明顯分層。此外，王等人(2016)則以WRF模擬的最小水平網格間距為1公里以上邊界層風場與離岸風機觀測，透過風速頻率分布重建離岸區域風能潛勢的特徵。

三、Lidar觀測原理與校驗

Lidar是利用發射雷射光來探測距離，風速或空氣中成分等。空氣中的懸浮粒子隨風移動，當Lidar發射的雷射光被移動中的懸浮粒子散射，因為都卜勒效應，Lidar則會接收到與發射光不同頻率(徑向都卜勒頻移)散射光，此徑向都卜勒頻移代表著風在雷射光路徑方向分量(徑向風)的訊號。連續波Lidar發射雷射光時，會藉分光鏡把雷射光分一光束回到Lidar內，再與目標物散射回來的光束合併，以分析兩光束頻率差別，得到徑向風速。Lidar以雷射光在固定天頂角30度做角錐掃描，可每秒聚焦在每個指定高度層量測完50點資料，再依序移到另一層。可推導成式(1)， V_r 和 W 分別是真實風場的水平和垂直分量， β 是雷射光束方位角， β_0 是真實風場的風向， α 是固定天頂角=30度。藉由最小平方方法可擬合同一高度量測50點徑向風速，得到 A 、 B 和 β_0 。而 $V_r=A/\sin\alpha$ ， $W=B/\cos\alpha$ ，真實風向 $=\beta_0$ 或 $\beta_0\pm 180^\circ$ 。

$$V_r = |V_h \sin\alpha \cos(\beta - \beta_0) + W \cos\alpha|$$

$$= |A \cos(\beta - \beta_0) + B| \quad (1)$$

觀測上以2台Lidar進行觀測和收集資料，以了解這2台Lidar觀測資料的特性，進行檢校與測試。分別擺置於中央大學觀測坪與中央氣象局的新屋氣象站觀測，以了解觀測所在地附近風場特性。中央大學觀測坪Lidar可經由32m自動氣象塔(簡稱32米塔)進行資料比對。32米塔的位置距中央大學觀測坪Lidar約10m距離。而新屋氣象站目前僅地面測站進行該區域的風場量測，針對新屋氣象站房屋頂Lidar資料，只能以最低量測高度(離地12m)的風場觀測與地面測站進行比對。

圖1(a)至(c)為2017年9-11月比對中央大學觀測坪Lidar和32米塔在32m高量測的10分鐘平均水平風速。無論是哪個月，該層風速兩者儀器相關性高， R 可大於0.97。圖1(d)至(f)為比對新屋氣象站房屋頂Lidar在最低層(離地12公尺)和新屋測站量測的10分鐘平均水平風速，相關係數約0.9至0.94且RMSE小於 1.0 ms^{-1} ，Bias顯示Lidar風速值高估，這是由於Lidar風速位於16m高，整體上，Lidar風速在低層有合理的分布情形。

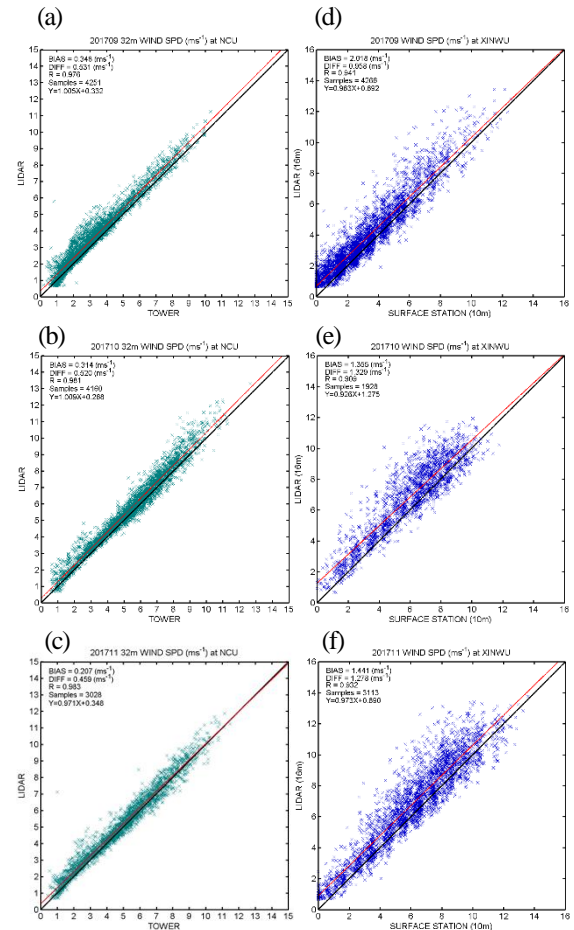


圖1：(a)至(c)為9至11月中央大學觀測坪Lidar和32米塔在32m高量測的10分鐘平均水平風速散布圖。(d)至(f)為9至11月新屋氣象站房屋頂Lidar在最低層(離地12m)和新屋測站量測的10分鐘平均水平風速散布圖。紅色線為資料迴歸線。

四、數值模擬設定

模式上使用美國國家大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research, 簡稱NCAR)所發展的天氣研究與預報模式系統(Weather Research and Forecasting, 簡稱WRF)之3.8.1版本來進行邊界層模擬。模式網格採6層巢狀網格(D01至D06)，最外層(D01)水平網格間距為24.3km，最內層(D06)則為100m，如圖2所示。提供給模式的再分析場資料來源為歐洲中期天氣預報中心(the European Centre for Medium-range Weather Forecasts, 簡稱ECMWF)。由於內層網格間距較細，因此D01至D04以Fully couple方式模擬，D05和D06分別經nest down(以下稱NDOWN)處理後做單一domain模擬，NDOWN處理過後的邊界條件會與上一層輸出檔的時間解析度有關，初始場則會配合邊界條件和原本上一層的初始場做整合，使模式在高解析度做數值積分時不易造成邊界附近的不連續性，特別是地形上的處理，如圖3。

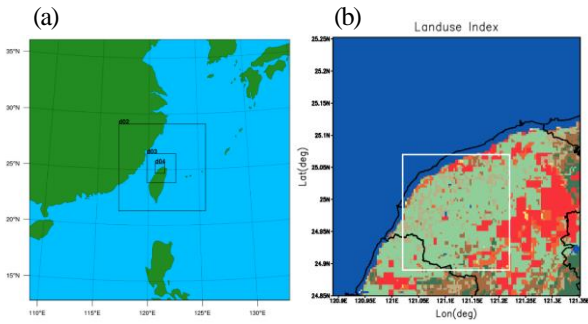


圖2：(a)模式D01至D04巢狀網格和(b)D05至D06網格範圍。(a)的分色，綠色代表陸地及藍色代表海洋。(b)的分色，ESA以USGS的24類土地利用型態。附錄為土地利用分色類別說明。

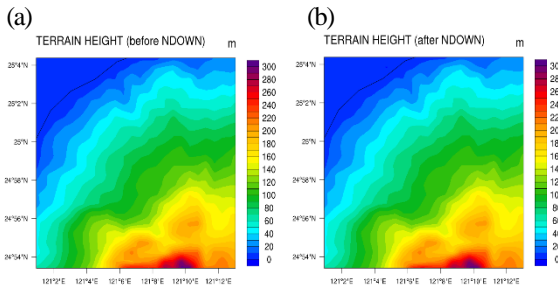


圖3：D06地形高度平面圖。(a)表示在WPS使用場資料庫處理好該網格解析度。(b)為經過NDOWN處理後的地形。單位：m。

D01至D04因網格間距大於500m則使用邊界層參數化，選用Yonsei University scheme(簡稱YSU scheme, Hong et al. 2006)。YSU scheme是目前較常使用的邊界層參數化方案之一。D05和D06的邊界層設定為Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino boundary layer(簡稱MYNN PBL, Nakanishi and Niino 2006)為近幾年發展快速的邊界層參數化方案，在WRF中選用MYNN PBL level 2.5，其閉合常數來自於LES database，可適用於小尺度。

此外，為了評估模式在資料同化能力下對模擬的影響，配合Lidar的風場觀測，我們認為使模式確保能夠先掌握大尺度的環境場是使風場更接近真實條件的重要因素之一，在此使用網格分析納進法(Grid Analysis Nudging)。供給的資料是網格化的分析場，針對模式變數中的水平風、溫度和水氣場皆可額外增加納進作用項放入積分過程，納進作用項的作用能夠讓上述變數場以三維空間點對點並經由時間內插的方式往再分析場靠近，如圖4所示，(a)為無加入納進法的控制組(CNTL)和(b)為僅在D01加入納進法(NUDG)的實驗組分別減去ECMWF的風場，可知加入納進作用後確實是與分析場差異最小。

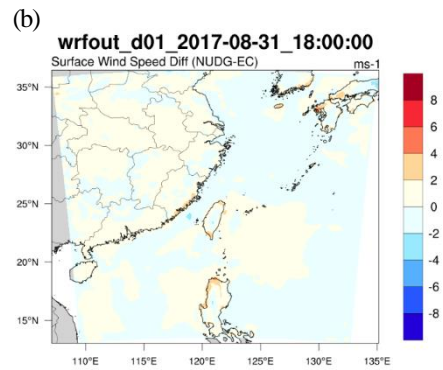
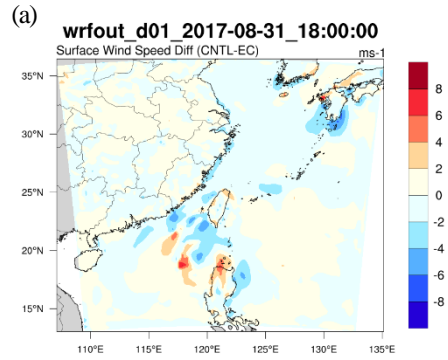


圖4：2017年8月31日18 UTC時D01模擬的10m水平風場與ECMWF再分析場的10公尺水平風場差異。(a)為CNTL減去ECMWF。(b)為NUDG減去ECMWF。單位：ms⁻¹。

五、模擬結果與觀測比對

選定2017年9月1日個案進行模擬與觀測的比對。模式自2017年8月31日12UTC開始，進行36hr模擬，取D06在9月1日00UTC至9月2日00UTC每10分鐘輸出邊界層的風場。觀測資料取中央大學Lidar離地表50和150m的高度觀測，由於中央大學海拔約130m，模式高度則是選擇內插到180和280m高度上的風場，且將離中央大學最近網格點周圍200m內的格點群取水平平均值。圖6中，紅色為Lidar觀測，藍色為無加入納進法的控制組(CNTL)，綠色為加入納進法(NUDG)的實驗組，可以發現到靠近地表的模式模擬風速比觀測高估，原因可以來自於觀測受到地表作用造成或是觀測受到附近植株或是建物所影響或是模式對地表摩擦的表現較偏離真實的情況。逐漸往高層比對，模式與觀測的風速與隨時間的變化較類似。大致上，CNTL和NUDG之間風速的差異並不大。

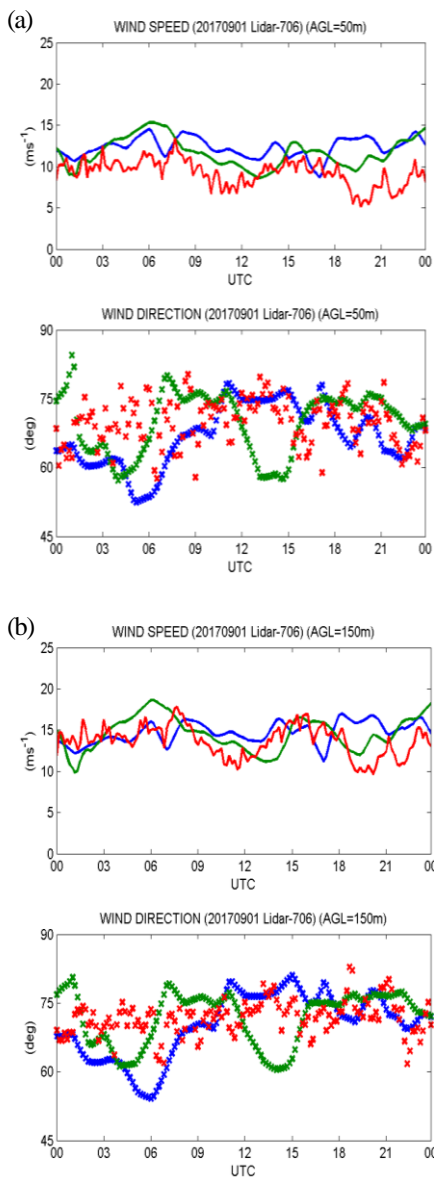


圖5：2017年9月1日時D06模擬的水平風場與中大Lidar觀測時序圖比較。(a)為距地表50m高的風速(上欄，縱軸單位： ms^{-1})以及風向(下欄，縱軸單位：度)。(b)同(a)，只是為距地表150m高的風速以及風向。圖中藍色、綠色、紅色分別代表CNTL、NUDG、Lidar觀測。橫軸為時間軸。

由於這兩個測試組CNTL和NUDG是採用MYNN level 2.5的邊界層參數化，可繪出模式的邊界層高度。圖6為離中央大學最近網格點周圍200m內的格點群取水平平均的邊界層高度值，藍色為CNTL，綠色為NUDG。兩個測試組在白天會上升，CNTL在05 UTC達到最高，但NUDG則是03 UTC達到高點後就低於CNTL，在晚上則大部分時間NUDG略高於CNTL，整體上，兩者在白天的高度皆比晚上的高度高。另一方面，我們將2km高度以下的水平平均位溫的垂直剖面繪出(圖7)，在白天因地表有受到加熱，位

溫在近地表有增高，比對兩個測試組別，NUDG的位溫似乎都低於CNTL，可能使得NUDG的邊界層高度較CNTL低之原因。

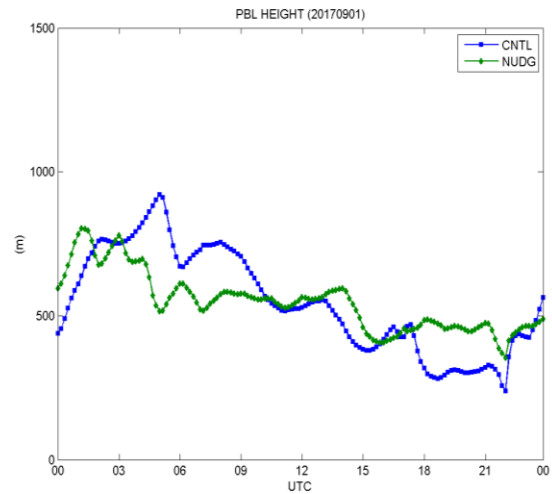


圖6：2017年9月1日D06模擬的邊界層高度隨時間的變化。單位：m。

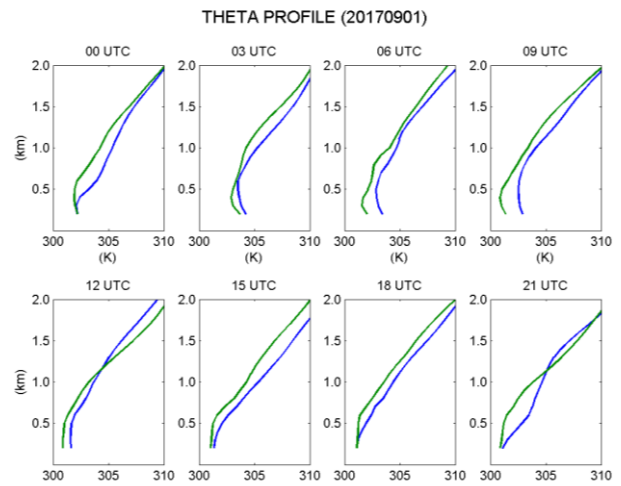


圖7：2017年9月1日的00 UTC至21 UTC每3小時的位溫垂直分布圖。單位：K。圖中藍色和綠色分別代表CNTL和NUDG。

六、結論

本研究中，利用測風光達儀器觀測可以得到邊界層內風場隨時間的變化，測風光達所量測的觀測數據，以水平風場而言，與鄰近儀器進行校驗，有吻合的結果。因此可以透過邊界層測風光達來了解模式模擬風場的表現。由於著重於邊界層內風場的模擬，在此提高了模式的水平解析度到100m，採用6層巢狀網格，NDOWN處理以及選定MYNN 2.5 Level的模式設定，針對2017年9月1日個案進行比對，模擬結果顯示，加入納進法的作用有無對於模式的風場差異小，由於這是單一個案，需要多做個案再去比較

其差異。而在靠近地表的模擬風速相對於觀測風速有正偏差，其原因可能是來自於模式對下邊界的摩擦作用掌握較偏離真實。但在相對高層的地方(仍在邊界層內)，模擬的風速與Lidar的觀測隨時間的變化較相似。另一方面，實驗結果顯示模擬的邊界層高度在日間有較夜間高的合理變化趨勢。





















七、參考文獻

- 吳炫慶, 2017: “利用WRF模式模擬及光達觀測進行風電場邊界層風場之模擬校驗研究”, 碩士論文
- 周庭光, 蔡原祥, 苗君易, 楊雅兆, 李中宏, 馮宗緯, 2015: “彰濱漢寶潮澗帶光達風場量測”, 2015臺灣風能學術研討會暨NEP-II離岸風力及海洋能源主軸中心成果發表會
- 曾仁佑, 陳景林, 劉遠芬, 蘇育辰, 陳盈臻, 吳炫慶, 2016: “台電現有風機運轉性能評估及改善對策”, 台電工程月刊, 第825期, 41~50頁
- 王尹懋, 戴志輝, 林博雄, 苗君易, 李中宏, 2016: “利用數值天氣模式重建風場資料庫”, 2016臺灣風能協會會員大會暨學術研討會
- Blahak, U., B. Goretzki, and J. Meis, 2010: “A simple parameterization of drag forces induced by large wind farms for numerical weather prediction models. Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition”, 2010, Warsaw, Poland, European Wind Energy Association, 186-189.
- Fitch, A. C., J. B. Olson, J. K. Lundquist, J. Dudhia, A. K. Gupta, J. Michalakes, and I. Barstad, 2012: “Local and Mesoscale Impacts of Wind Farms as Parameterized in a Mesoscale NWP Model.”, *Monthly Weather Review*, **140**, 3017-3038.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: “A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes.”, *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins, 2008: “Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models.”, *Journal of Geophysical Research*, 113.
- Kain, J. S., 2004: “The Kain-Fritsch convective parameterization: An update.”, *J. Appl. Meteor.*, **43**, 170-181.
- Nakanishi, M., and H. Niino, 2006: An improved Mellor-Yamada Level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Boundary-Layer Meteorology*, 119, 397-407.

- Pitter, M., C. Slinger and M. Harris, 2013: “Introduction to continuous-wave Doppler Lidar.”, Zephir Limited, UK.
- Smith, M., M. Harris, J. Medley and C. Slinger, 2014: “Necessity is the mother of invention: nacelle-mounted Lidar for measurement of turbine performance.” *Energy Procedia*, **53**, 13-22.
- Talbot, C., E. Bou-Zeid, and J. Smith, 2012: “Nested Mesoscale Large-Eddy Simulations with WRF: Performance in Real Test Cases.” *Journal of Hydrometeorology*, **13**, 1421-1441.
- Thompson, G., P. R. Field, R. M. Rasmussen, and W. D. Hall, 2008: “Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization.” *Monthly Weather Review*, **136**, 5095-5115.

八、附錄

USGS的24類土地利用型態分色類別表

Land Use Description	
	Urban and Built-up
	Dryland Cropland
	Irrigated Cropland
	Mixed Dr./lr. Cropland
	Cropland/Grassland
	Cropland/Woodland
	Grassland
	Shrubland
	Mixed Sh./Gr.
	Savanna
	De. Broadleaf
	De. Needleleaf
	Ev. Broadleaf
	Ev. Needleleaf
	Mixed Forest
	Water Bodies
	Herbaceous Wetland
	Wooden Wetland
	Barren Vegetated
	Herbaceous Tundra
	Wooded Tundra
	Mixed Tundra
	Bare Ground Tundra
	Snow or Ice