

非常规气象要素在紫外线预报中的应用

谢静芳¹ 应爽² 刘海峰² 陈雷¹

(1 吉林省气象服务中心,长春 130062; 2 长春市气象台,长春 130051)

摘要 利用吉林省业务运行的 WRF 模式,计算了与紫外线指数相关的气温、湿度、云量、风速等常规气象要素和地表向下的短波辐射通量、地面热通量、反照率等非常规气象要素,利用长春市紫外线观测资料,分析了紫外线辐射与常规和非常规气象要素的相关性。基于长春市紫外线观测实况,以常规气象要素、非常规气象要素、混合气象要素为因子,利用相同的统计建模方法,分别建立紫外线预报模型。结果表明:大气短波辐射等非常规气象要素与紫外线指数的相关性,明显高于气温、云量、比湿、风速等常规气象要素;应用非常规气象要素和混合气象要素的紫外线预报方程,显著优于常规气象要素;基于混合气象要素的紫外线预报方程,与基于非常规气象要素的预报方程比较,预报性能差异不大。此外,应用常规气象要素建立的分季节紫外线预报方程,其预报效果明显优于全年预报方程。应用非常规气象要素建立的分季节紫外线预报方程,与全年预报方程相比,预报效果差异不大。

关键词 模式预报产品;非常规气象要素;紫外线预报

中图分类号: P49 DOI: 10.19517/j.1671-6345.20190138 文献标识码: A

引言

在数值预报模式日常业务运行中输出和应用的物理量有气温、气压、比湿、风速、云量、降水量等,以下称为常规气象要素。在日常预报业务运行中计算,但未输出和应用的物理量,如大气短波辐射、地表反照率、地表热通量等,以下称为非常规气象要素。

在专业气象服务指标、产品和技术标准等研究中,应用数值模式常规气象要素预报产品,建立预报指标和模型的方法极为普遍。由于缺少非常规气象要素观测和模式预报产品输出,相关研究工作和业务应用非常有限。

紫外线辐射指数和强度预报是面向公众的主要专业气象服务产品之一。国内紫外线预报方法研究和预报业务中,除沈元芳等应用 GRAPES 模式中的 Goddard 短波辐射方案,创建了紫外线数值预报系统以外^[1],各地主要是利用数值预报产品中与云、温、湿、风等相关的常规气象要素作为预报因子,建立紫外线指数或辐射强度等级预报模型或预报方

程^[2-5]。尽管部分研究基于辐射传输方程、热量平衡方程或热量传输方程,建立了紫外线预报模型,但模型中的非常规气象因子,仍然是由常规气象因子计算或参数化得出^[6-8],而极少应用数值模式的非常规气象要素预报产品。

这种情况,在其它专业气象服务领域也普遍存在。比如地表温度、道路结冰等交通气象因子,与地面短波辐射、地表热通量、反照率等非常规气象要素具有更直接的关联关系,但建立预报模型时,通常还是将气温等常规气象要素作为预报因子^[9-12]。

本研究应用 WRF 模式(Weather Research and Forecasting Model),计算和输出常规与非常规气象要素,并对紫外线预报的应用效果进行对比分析,研究探讨非常规气象要素对提高紫外线预报质量的作用。

1 资料及处理方法

1.1 紫外线观测资料及处理

紫外线观测资料来自长春市 2012—2014 年带通式波段辐射计,将带通 280~400 nm 的 1 h 累计

作者简介:谢静芳,女,1962,学士,正研级高工,主要从事应用气象研究工作,Email:1911967959@qq.com

收稿日期:2019年3月28日;定稿日期:2019年11月20日

辐射量作为紫外线观测的小时值。

在紫外线预报服务应用中,有紫外线指数和辐射强度等级两种预报产品,故根据紫外线指数和紫外线辐射强度等级与紫外线辐射量的对应关系^[13],计算出2012—2014年长春市逐小时紫外线辐射指数和强度等级。

1.2 WRF模式物理量输出及处理

本研究中,应用目前吉林省预报业务运行的WRF3.3.1模式,重新计算并输出2012—2014年逐日、逐小时预报产品。该模式选用Lin微物理、KF

积云参数化、RRTM长波辐射、Duhdia短波辐射、YSU边界层方案,应用NCEP逐日FNL $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 空间分辨率分析场为WRF模式初始场,重新计算并输出2012—2014年逐日、逐小时模式预报产品。

本文中,常规气象要素是指WRF模式业务运行中计算并输出的物理量,非常规气象要素是指本研究增加输出的物理量。在模式重新运行计算时,选取输出的物理量包括与地面大气辐射相关的22个常规气象要素(表略)和18个非常规气象要素(表1)。

表1 WRF模式输出的非常规气象要素

要素名称	中文含义	要素名称	中文含义
SWNORM	正常的地表短波辐射	SWDOWN	地表向下的短波辐射通量
ACSWUPT	顶层向上短波辐射累积	GLW	地表向下的长波辐射通量
ACSWUPTC	顶层向上晴空短波辐射累积	ALBEDO	反照率
ACSWDNT	顶层向下短波辐射累积	ALBBCK	背景反照率
ACSWDNTC	顶层向下晴空短波辐射累积	EMISS	地面辐射系数
ACSWUPB	底层向上短波辐射累积	SR	固体降水比例(冻结降水)
ACSWUPBC	底层向上晴空短波辐射累积	SNOPCX	雪态改变时的热通量
ACSWDNB	底层向下短波辐射累积	GRDFLX	地面热通量
ACSWDNBC	底层向下晴空短波辐射累积	ACGRDFLX	累积地面热通量

2 相关分析

利用计算输出的2012—2014年逐小时40个常规和非常规气象要素,与对应时刻的紫外线观测实况进行相关分析,相关系数在0.2以上且信度通过 $\alpha=0.01$ 检验的要素共15个。其中,常规气象要素10个,非常规气象要素5个(表2)。

表2中,相关系数超过0.3的常规气象要素有8个,按照相关系数的大小依次为:T2(2 m气温)、TC925(925 hPa气温)、TC850(850 hPa气温)、TC700(700 hPa气温)、TD925(925 hPa露点温度)、RH2(2 m相对湿度)、TD850(850 hPa露点温度)和Q925(925 hPa水汽混合比),其中2 m气温和相对湿度的相关系数分别达到0.436和0.432,相关性最好。而风速和低云量的相关系数都低于0.2。表2中,相关系数超过0.3的非常规气象要素有5个,按照相关系数的大小依次为:SWDOWN、GRDFLX、GLW、ALBEDO和SR,其中相关性最好的是SWDOWN,相关系数达到0.575。由此可见,非常规气象要素与紫外线辐射具有显著的相关性,

并且其相关系数明显高于气温、露点温度、低云量等常规气象要素。

表2 相关系数0.2以上且通过 $\alpha=0.01$ 检验的常规和非常规气象要素

常规气象要素	相关系数	非常规气象要素	相关系数
T2	0.436	SWDOWN	0.575
TC925	0.402	GRDFLX	-0.555
TC850	0.385	GLW	0.346
TC700	0.352	ALBEDO	-0.346
TD925	0.344	SR	-0.344
TD850	0.308		
TD700	0.282		
RH2	-0.324		
Q925	0.302		
Q700	0.239		

进一步分析表明:不同季节逐小时常规和非常规气象要素与紫外线的相关性特征与全年有所不同。总的来看,温度因子、湿度因子、10 m风速(WS10)和地表向下的短波辐射通量等相关性较

好。从季节特征来看,春夏季节相关系数普遍低于秋冬季节。从要素特征来看,各季节非常规气象要素的相关系数都大于常规气象要素。其中,常规气象要素春、秋季节温度相关性最好,其次是湿度;夏季温度相关性最好;冬季风速相关性最好,其次是温度。非常规气象要素冬季相关性最好,其次为秋季,春夏季节相关性较差。表 3 给出了各季节信度通过 $\alpha=0.01$ 检验的、具有代表性的部分常规和非常规气象要素与紫外线的相关系数计算结果,及与全年相关系数的比较。

表 3 各季节气象要素与紫外线的相关系数

气象要素	春季	夏季	秋季	冬季	全年
SWDOWN	0.373	0.358	0.595	0.780	0.575
T2	0.235	0.295	0.526	0.269	0.436
TC925	0.221	0.228	0.486	0.074	0.402
Q925	0.175	-0.009	0.408	0.064	0.302
WS10	0.165	0.019	0.052	0.367	0.192

紫外线是大气短波辐射的一部分,因此地表向下的短波辐射通量 SWDOWN,与紫外线具有显著的、直接的关联关系,但相关系数全年仅为 0.575,冬季最高为 0.780,夏季仅为 0.358,冬夏相差一倍多。分析其原因主要有两个方面:

(1) 紫外线实况与 SWDOWN 有差异。紫外线

只是短波辐射 SWDOWN 的一部分,紫外线观测设备接收到的紫外线辐射,不仅包括到达地面的向下的紫外线,还包括紫外线反射和散射。

(2) 模式预报有偏差。WRF 模式的短波辐射预报存在一定偏差,同时其偏差还与季节和天气特征有关。秋冬季节天气多晴好,短时间变化小,WRF 逐小时预报准确率较高,相关系数也较大。春夏季节多大风和云雨天气,天气复杂多变,WRF 模式逐小时预报能力显著下降,受其影响,相关系数也显著减小。

3 建立预报模型

利用长春市 2012—2013 年逐小时紫外线观测资料和 WRF 数值预报资料,采用相同的建模方法和 3 种不同的因子选择方法,建立全年和各季节紫外线预报方程。3 种选择因子方法是:

方法 1: 常规气象要素

方法 2: 非常规气象要素

方法 3: 混合(常规+非常规)气象要素

3.1 全年预报模型

选取与紫外线指数相关系数值较大的因子,采用逐步回归方法,建立逐小时紫外线指数预报方程。采用 F 概率检验,分别设置进入值和剔除值,最终得到 3 个紫外线指数预报方程(表 4)。

表 4 三种因子建立的紫外线指数预报方程

方程类型	方程和因子	复相关系数
常规气象要素因子预报方程 (常规方程)	$Y = -34.978 + 0.444X_1 - 0.292X_2 + 0.285X_3 - 0.12X_4$ $X_1: T2, X_2: TC925, X_3: WS10, X_4: Q925$	0.485
非常规气象要素因子预报方程 (非常规方程)	$Y = 1.872 + 0.005X$ $X: SWDOWN$	0.575
混合气象要素因子预报方程 (混合方程)	$Y = -0.298 + 0.003X_1 + 0.008X_2 - 0.007X_3 + 0.052X_4$ $X_1: SWDOWN, X_2: T2, X_3: GRDFLX, X_4: Q925$	0.627

3.2 季节预报模型

季节预报模型试验研究方案设计如下:

季节划分方法有两种,一是采用我国通用四季划分方法,将 3—5 月、6—8 月、9—11 月、12 月至次年 2 月,分别定为春、夏、秋、冬四季。二是在通用四季划分方法基础上,根据长春市春、秋季节时间短、冬季时间漫长的特点,将春秋两季各减少一个月,冬

季增加两个月,夏季时间不变。

建立预报方程的方法为两种,一是采用逐步回归方法,建立预报方程。二是参考年预报模型的气象要素因子,选取相关系数较高的因子,建立多元回归预报方程。表 5~8 给出了采用通用季节划分和多元回归方法,建立的各季节紫外线预报方程。

表5 春季紫外线指数预报方程

方程类型	方程和因子	复相关系数
常规方程	$Y = -5.625 - 0.036X_1 - 0.016X_2 + 0.053X_3 + 0.074X_4$ $X_1: Q925, X_2: TC925, X_3: T2, X_4: WS10$	0.237
非常规方程	$Y = 2.996 + 0.004X$ $X: SWDOWN$	0.402
混合方程	$Y = 1.944 + 0.004X_1 + 0.19X_2 + 0.103X_3 - 0.101X_4 + 0.054X_5$ $X_1: SWDOWN, X_2: Q925T2, X_3: TC925, X_4: T2, X_5: WS10$	0.449

表6 夏季紫外线指数预报方程

方程类型	方程和因子	复相关系数
常规方程	$Y = -15.393 - 0.034X_1 - 0.302X_2 + 0.367X_3 - 0.026X_4$ $X_1: Q925, X_2: TC925, X_3: T2, X_4: WS10$	0.282
非常规方程	$Y = 3.805 + 0.002X$ $X: SWDOWN$	0.295
混合方程	$Y = -3.07 + 0.002X_1 + 0.005X_2 - 0.163X_3 + 0.185X_4 - 0.041X_5$ $X_1: SWDOWN, X_2: Q925T2, X_3: TC925, X_4: T2, X_5: WS10$	0.449

表7 秋季紫外线指数预报方程

方程类型	方程和因子	复相关系数
常规方程	$Y = -19.85 + 0.04X_1 - 0.058X_2 + 0.14X_3 + 0.047X_4$ $X_1: Q925, X_2: TC925, X_3: T2, X_4: WS10$	0.469
非常规方程	$Y = 1.612 + 0.006X$ $X: SWDOWN$	0.568
混合方程	$Y = 1.56 + 0.006X_1 + 0.233X_2 + 0.067X_3 - 0.069X_4 + 0.014X_5$ $X_1: SWDOWN, X_2: Q925T2, X_3: TC925, X_4: T2, X_5: WS10$	0.645

表8 冬季紫外线指数预报方程

方程类型	方程和因子	复相关系数
常规方程	$Y = -9.939 - 0.578X_1 - 0.054X_2 + 0.102X_3 + 0.185X_4$ $X_1: Q925, X_2: TC925, X_3: T2, X_4: WS10$	0.358
非常规方程	$Y = 0.48 + 0.007X$ $X: SWDOWN$	0.733
混合方程	$Y = 1.593 + 0.007X_1 + 0.229X_2 - 0.038X_3 + 0.033X_4 + 0.001X_5$ $X_1: SWDOWN, X_2: Q925T2, X_3: TC925, X_4: T2, X_5: WS10$	0.741

4 预报结果检验

利用2014年资料和建立的全年或各季节的常规、非常规、混合3种预报方程,分别计算紫外线逐小时预报,并对预报效果进行检验。

本研究中紫外线预报检验方法有两种,一是根据中国气象局规定的紫外线预报质量考核评分办法,将紫外线辐射指数换算为辐射强度等级,根据预报与实况强度等级偏差计算质量评分。其中:误差0级为100分,误差1级为50分,误差2级及以上为0分。二是根据紫外线强度预报与实况的等级偏差0~4级,计算不同等级差值所占的百分率。

4.1 全年预报模型检验

对3种全年预报方程进行预报检验,其结果,非常规方程和混合方程的预报质量评分,比常规方程分别提高14.6和14.4分,误差0级百分率分别提高19.4和18.1,误差≤1级的百分率分别提高9.9和10.8。非常规方程和混合方程的预报质量评分和误差0级百分率,均比常规方程显著提高(图1),但非常规方程与混合方程预报质量评分和误差0级百分率的差异并不显著。

4.2 季节预报模型检验

对不同方法建立的每个季节的3种方程,逐一进行预报检验,其中最优的是通用季节划分和多元回归方法建立的3种方程。将其预报检验结果与全年方程的预报检验结果进行比较(表9),主要有以下特征:

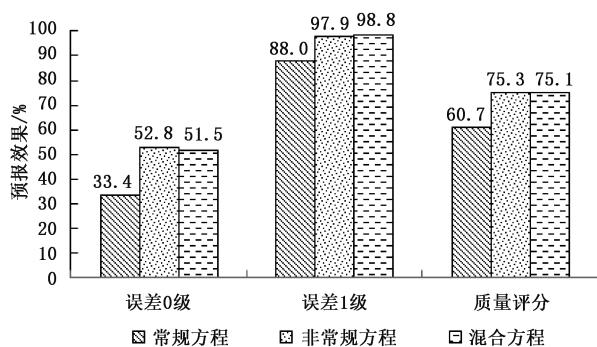


图 1 3 种紫外线预报方程预报效果检验

(1) 3 种方程预报效果的比较。春、秋、冬 3 个季节的 3 种紫外线预报方程, 都是非常规方程和混合方程的预报效果显著优于常规方程。夏季非常规

方程预报效果略低于常规方程, 但混合方程仍优于常规方程。

(2) 各季节预报效果的比较。对常规、非常规和混合 3 种方程进行比较, 预报效果都是冬季最好, 夏季最差。其中非常规方程和混合方程预报效果的季节差异, 显著大于常规方程。

(3) 各季节与全年预报效果的比较。尽管紫外线辐射强度以及常规和非常规气象要素都具有显著的季节变化特征, 紫外线辐射与常规和非常规气象要素的相关性也具有显著的季节差异。但分季节建立的 3 种紫外线预报方程, 与全年方程相比, 仅常规方程误差 0 级百分率提高 6.4 个百分点, 预报质量评分提高 5.3 分, 非常规和混合方程, 预报效果都略有下降。

表 9 分季节建立的紫外线预报方程预报效果统计

%

	误差 0 级百分率			质量评分		
	常规方程	非常规方程	混合方程	常规方程	非常规方程	混合方程
春季	32.7	44.3	42.0	59.6	65.0	64.7
夏季	38.8	38.3	41.1	64.7	64.1	65.3
秋季	37.3	54.5	50.0	66.0	73.8	71.6
冬季	50.8	71.3	71.5	73.9	85.6	85.7
平均质量	39.8	52.0	51.2	66.0	72.1	71.8
比全年方程质量	+6.4	-0.8	-0.3	+5.3	-3.2	-3.3

5 结论和讨论

(1) 利用 WRF 模式, 计算和输出了与紫外线辐射相关的气温、比湿、风速、云量等常规和地表向下的短波辐射通量、地面热通量、反射率等非常规气象要素。分析表明: 非常规气象要素与紫外线辐射强度具有显著的相关性, 且其相关系数明显高于常规气象要素。

(2) 非常规气象要素对于改进紫外线预报效果具有重要作用。应用 WRF 模式非常规气象要素预报产品, 比应用常规气象要素预报产品, 紫外线预报 0 级误差百分率和预报质量评分都有显著提高。

(3) 采用混合气象要素为因子的预报方程, 与采用非常规气象要素的预报方程相比, 其预报效果没有显著差异。分析其原因, 是 WRF 模式计算非常规气象要素(SWDOWN)时, 已经考虑了常规气象要素的影响, 再次将常规气象要素作为预报订正因

子, 对于改进预报效果作用不显著。

(4) 分季节建立紫外线预报方程, 与全年预报方程相比, 常规方程的预报效果有显著改进, 但非常规和混合方程的预报效果改进不明显。分析其原因, 是常规气象要素的季节性变化特征与紫外线季节性变化有关, 建立分季节预报方程, 可以改进预报效果。而非常规气象要素(SWDOWN)与紫外线相关性的季节差异, 可能主要与不同季节 WRF 模式预报能力的差异有关, 分季节建立预报方程, 并不能改进 WRF 产品在紫外线预报中的应用效果。

(5) 本研究虽然仅针对与紫外线辐射相关的非常规气象要素, 但对其他非常规气象要素应用也具有参考价值。更广泛和深入地开展非常规气象要素在专业气象服务预报中的应用研究, 并根据研究和服务需求, 将非常规气象要素纳入数值模式预报业务输出产品清单, 对提高专业气象预报服务能力具有重要意义。

参考文献

- [1] 沈元芳, 刘洪利, 刘煜, 等. GRAPES 紫外线(UV)数值预报[J]. 气象科技, 2009, 37(6): 697-704.
- [2] 曲晓黎, 张彦恒, 赵娜, 等. 石家庄市紫外线监测分析及预报方法[J]. 气象科技, 2011, 39(6): 731-735.
- [3] 杨雪艳, 王宁, 王宝书, 等. 长春市紫外线指数预报服务方法研究[J]. 吉林气象, 2007(3): 34-36.
- [4] 李青春, 陆晨. 北京地区紫外线观测与预报系统[J]. 气象科技, 2001, 29(4): 47-50.
- [5] 张东风, 危万虎, 白素莲, 等. 紫外线实时监测及专业预报系统[J]. 湖北气象, 2000(3): 14-16.
- [6] GB/T36744—2018. 紫外线指数预报方法[S].
- [7] 董美莹, 沈翊, 张力. 浙江省紫外线指数预报系统[J]. 科技通报, 2007, 23(6): 785-789.
- [8] 曾艳, 吴幼乔. 紫外线辐射强度预报模型研究[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(5): 685-692.
- [9] 冯蕾, 王晓峰, 何晓凤, 等. 基于 INCA 和 METRo 的江苏省路面高温精细化预报[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 109-118.
- [10] 白永清, 陈城, 何明琼. 利用 Logistic 回归方法的高速桥(路)面结冰风险等级预警模型[J]. 气象科技, 2016, 44(2): 336-340.
- [11] 冯涛, 李迅, 丁德平. 高速公路道面温度预报[J]. 公路交通科技, 2012, 29(5): 19-29.
- [12] 王明华, 陆忠艳, 才奎志, 等. 东北高速公路行车安全气象条件预报业务系统[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(4): 53-56.
- [13] 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.

Application of Unconventional Meteorological Elements in Ultraviolet Index Prediction

XIE Jingfang¹ YING Shuang² LIU Haifeng² CHEN Lei¹

(1 Jilin Meteorological Service Center, Changchun 130062; 2 Changchun Meteorological Observatory, Changchun 130051)

Abstract: Based on the WRF model of Jilin Province, the conventional meteorological elements such as temperature, humidity, cloud cover, and wind speed and the unconventional meteorological elements such as downward surface shortwave radiation flux, surface heat flux and albedo are calculated. The correlation between ultraviolet radiation (UV) with conventional and unconventional meteorological factors is analyzed by using the ultraviolet observation data in Changchun. Based on the observation of UV in Changchun, the UV index prediction models are established by using the same statistical modeling method, taking the conventional and unconventional meteorological elements and mixed meteorological elements as factors. The results show that the correlation between atmospheric short wave radiation and UV index is significantly higher than those of conventional meteorological factors such as temperature, cloud cover, specific humidity and wind speed. The UV index prediction equations of unconventional meteorological elements and mixed meteorological elements are superior to that of conventional meteorological elements. The UV index prediction equation based on mixed meteorological elements has little difference from that based on unconventional meteorological elements. In addition, the application of conventional meteorological elements to the establishment of seasonal UV index prediction equations, compared with the annual ultraviolet prediction equations, significantly improved the prediction effect. The application of unconventional meteorological elements to the establishment of seasonal UV index prediction equations, compared with the annual ultraviolet prediction equations, significantly improved the prediction effect.

Keywords: numerical weather forecasting product; unconventional meteorological element; UV prediction