

# 风电场风速和风电功率预报准确率评判方法

江滢<sup>1,2</sup>, 李忠<sup>3</sup>, 侯佑华<sup>4</sup>, 赵东<sup>1,2</sup>

1. 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081
2. 中国气象局风能太阳能中心, 北京 100081
3. 内蒙古气象局, 呼和浩特 010051
4. 内蒙古电力(集团)有限责任公司, 呼和浩特 010000

**摘要** 对风电场风速和风电功率预报进行客观准确的评判,可以有效促进风电场风速和风电功率预报水平的提升,为减缓风电并网对电网的影响服务。本文在对风电场风速和风电功率预报准确率评判方法进行全面回顾的基础上,分析了常用数学预报准确率评判法、相对于风电场额定值的预报准确率评判法、等级预报准确率评判法和与风力发电特征紧密结合的风电场风速预报准确率评判法。同时还分析了这4类风电场风速和风电功率预报准确率评判方法的特质,及其与风力发电特征的结合程度和适用范围。

**关键词** 风电场; 风速; 风电功率; 预报; 准确率; 误差

**中图分类号** P49,TK89

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.36.011

## Evaluation Methods for Forecast Accuracy of Wind Speed and Wind Power of a Wind Farm

JIANG Ying<sup>1,2</sup>, LI Zhong<sup>3</sup>, HOU Youhua<sup>4</sup>, ZHAO Dong<sup>1,2</sup>

1. *Public Meteorological Service Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*
2. *Wind and Solar Energy Resources Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*
3. *Inner Mongolia Weather Bureau, Hohhot 010051, China*
4. *Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010000, China*

**Abstract** The accurate evaluation of the wind speed and wind power forecast for a wind farm can effectively promote the forecasting accurate levels and reduce the adverse effects of the wind power on the power network. This paper makes a comprehensive review of forecast accuracy evaluation methods of the wind speed and the wind power for wind farms, and it is shown that the forecast accuracy evaluation methods fall into four categories, the common mathematical prediction accuracy evaluation method, the forecast error percentage method relative to the wind farm rating, the grade forecast accuracy evaluation method and the method closely integrated with the wind power generation characteristics. These accuracy evaluation methods are analyzed with respect to the characteristics, the extent and the scope, related with the wind power generation characteristics.

**Keywords** wind farms; wind speed; wind power; forecasting; accuracy; error

### 0 引言

对风电场风速和风电功率进行相对客观、准确的预报,

可以有效减缓风电并网对电网的影响,提高风能资源的利用率。许多单位、部门或个人研发了各自的风电功率预报系统,

收稿日期: 2012-08-13; 修回日期: 2012-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41205114); 公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY201006035, GYHY201106018); 中国气象局成都高原气象研究所高原气象开放基金课题项目(LPM2012005)

作者简介: 江滢, 高级工程师, 研究方向为风能资源变化、风能资源评估和气候变化监测等, 电子信箱: Jianguy@cma.gov.cn

同时对风电场风速和风电功率预报误差或准确率进行分析。根据预报误差或侧重点不同,准确率评判方法可分为常用数学预报准确率评判法、相对于风电场额定值的预报准确率评判法、等级预报准确率评判法和与风力发电特征紧密结合的风电场风速预报准确率评判方法4类。在风电场风速或风电功率预报早期,为了评判风电场风速或风电功率预报系统的预报准确性,将工程测量或气象预报的准确率评判方法直接引入,即常用数学预报准确率评判方法。该评判方法是风电场风速预报研究早期的一种相当普遍的方法<sup>[1-8]</sup>。随着风电开发的快速发展,常用数学预报准确率评判方法在预报误差相同情况下,不能区分风电场容量大小对风电并网造成的不同影响的问题日益显现。为了解决这一问题,许多学者采用预报误差相对于风电场额定值的比率作为预报准确率的评判指标<sup>[9-16]</sup>,即相对于额定值的预报准确率评判方法。该方法可以在一定程度上解决预报误差相同情况下风电场容量大小对风电并网影响不同的问题。但是,该方法的预报误差或准确率与常用数学预报准确率评判方法的误差是简单的倍数关系,由于风机存在不同风速下发电特性不同的特性,因此常用数学预报准确率评判方法和相对于额定值的预报准确率评判方法都不能充分建立预报误差或准确率大小与风机发电功率实际值与预估值之间的简单对应关系。为了反映不同风速段或不同风电功率段的预报效果,部分学者将风速或风电功率分为若干个等级,预报未来时刻风速或风电功率所在等级或范围<sup>[3-4, 17-22]</sup>,也就是等级预报准确率评判方法,用该方法评判风电场风速或风电功率预报的准确性较为客观、准确,但是评判指标繁多,不易于推广。近几年,为了更精细化评估风电场风速或风电功率预报效果,同时充分考虑风机发电功率与风速变化的关系,一些学者<sup>[12]</sup>采用分段法或变换法进行风速预报准确率评判,即与风力发电特征紧密结合的风电场风速预报准确率评判方法。

由于缺少相关的标准或规范对风电场风速或风电功率预报准确率评判方法进行规范,这些风电场风速和风电功率预报误差和准确率评判方法之间缺少一致性。反映预报与实测之间相同性能的预报误差或准确率(如离散程度)定义方法不同,统计结果也存在明显差异,不方便比较。还有部分预报误差或预报准确率评判指标未能充分考虑风力发电的特点。本文在充分调研现有的风电功率预报准确率评判方法的基础上,详细分析讨论了各类风电场风速和风电功率预报准确率评判方法的特质,及其与风力发电特征的结合程度和适用范围等。

## 1 预报准确率评判方法回顾

### 1.1 常用数学预报准确率评判方法

常用数学预报准确率评判方法,早期主要用于工程测量、气象预报的准确率评判中,也是最早用于风电场风速预报准确率评判的方法。该方法的主要评判指标如下。

(1) 反映预报值与实测值之间离散程度的误差评判指标——均方根误差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (1)$$

(2) 反映预报误差平均状况的指标——平均绝对误差和平均相对误差:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i| \quad (2)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|F_i - O_i|}{O_i} \times 100\% \quad (3)$$

(3) 反映预报值与实测值相关关系指标——相关系数:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(F_i - \bar{F}) \cdot (O_i - \bar{O})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (4)$$

其中, $O_i$ 为*i*时刻实测值, $F_i$ 为*i*时刻预测值, $\bar{O}$ 为实测值平均值, $\bar{F}$ 为预测值平均值, $N$ 为样本总数。

### 1.2 相对于风电场额定值的预报准确率评判方法

相对于风电场额定值的预报准确率评判方法主要考虑在预报误差相同情况下,风电场容量对风电并网造成的不同影响,许多学者采用预报误差相对于风电场额定值的比率作为预报准确率的评判指标,其主要评判指标如下。

(1) 预报值与实测值离散程度相对于额定值的比率:

$$RMSE_{cap} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}{C} \quad (5)$$

还有一种变形——风电功率预报准确率:

$$r_1 = \left( 1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{F_i - O_i}{C} \right)^2} \right) \times 100\% \quad (6)$$

(2) 预报平均绝对误差相对于额定值的比率:

$$MAE_{cap} = \frac{\sum_{i=1}^N |F_i - O_i|}{C \cdot N} \quad (7)$$

(3) 反映预报准确率达到一定水平的频次——合格率:

$$r_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_i \times 100\% \quad (8)$$

其中, $\left( 1 - \frac{|F_i - O_i|}{C} \right) \times 100\% \geq 75\%$ ,  $B_i = 1$ ;  $\left( 1 - \frac{|F_i - O_i|}{C} \right) \times 100\% < 75\%$ ,  $B_i = 0$ ;  $O_i$ 为*i*时刻实测值, $F_i$ 为*i*时刻预测值, $C$ 为额定值(以平均开机容量为主,还有风电场容量、额定功率或额定风速等), $N$ 为样本总数。

### 1.3 等级预报准确率评判方法

许多预报不是预报要素(如风速)的具体数值,而是将要素分为若干个等级,预报未来时刻该要素所在等级或范围。评判方法主要有以下4种。

(1) 预报成功率法<sup>[23-24]</sup>:

$$f = \frac{m}{n} \quad (9)$$

其中,  $f$  为预报成功率,  $m$  为预报成功次数,  $n$  为预报总次数。该预报准确率的评判方法虽然简单, 但不能区别盲目预报或连续性预报的优劣。例如, 中国北方春季日平均风速  $>3\text{m/s}$  的预报, 如果做连续性预报, 成功率可能达 90% 以上, 该评判方法不能反映出预报水平。

(2) Hedike 评判方法<sup>[25-28]</sup>:

$$S = \frac{m-E}{n-E} \quad (10)$$

其中,  $S$  为 Hedike 评分, 变化范围  $[0, 1]$ ;  $m$  为预报成功次数;  $n$  为预报总次数。当预报与气候预报比较时,  $E = \sum_{i=1}^k n_i p_i$  ( $k$  为预报量分级数,  $n_i$  为第  $i$  级出现的总次数,  $p_i$  为第  $i$  级出现的气候概率); 当预报与盲目预报 (预报与实测无关) 比较时,  $E = \sum_{i=1}^k \frac{n_i n_{i'}}{n}$  ( $n_i$  和  $n_{i'}$  分别为实测和预报第  $i$  级的次数)。由于第  $i$  级时间出现频率为  $n_i/n$ , 那么预报总次数  $n_i$  相乘反映盲目预报发生的次数。

(3)  $\chi^2$  评判方法<sup>[29-31]</sup>: 对预报要素分  $k$  级情况, 实测为第  $i$  级而预报为第  $j$  级事件的发生次数为  $n_{ij}$ , 实测第  $i$  级及预报第  $j$  级出现的总次数分别记为  $n_i$  和  $n_j$ , 而全部试验总次数为  $n$  时, 统计量 (在假设预报与实测两件事为独立条件下) 为

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{\left( \frac{n_{ij} - \frac{n_i n_j}{n}}{\frac{n_i n_j}{n}} \right)^2}{\frac{n_i n_j}{n}} \quad (11)$$

查  $\chi^2$  分布表可知  $\chi_a^2$ 。当  $\chi^2 > \chi_a^2$  时, 实测值与预报值有关, 预报的效果较好。

(4) 两类事件列联表的评判方法<sup>[32-33]</sup>: 要素仅分为发生和不发生两级。如果要素预报和实测是同一等级, 则为预报正确 (正确预报次数为  $n_{11}$ ); 如果预报等级小于实测等级, 则为漏报 (漏报次数为  $n_{12}$ ); 如果预报等级大于实测等级, 则为空报 (空报次数为  $n_{21}$ ), 于是有

$$\text{正确预报率} \quad T_s = \frac{n_{11}}{n_{11} + n_{12} + n_{21}} \times 100\% \quad (12)$$

$$\text{漏报率} \quad PO = \frac{n_{12}}{n_{11} + n_{12}} \times 100\% \quad (13)$$

$$\text{空报率} \quad FAR = \frac{n_{21}}{n_{11} + n_{21}} \times 100\% \quad (14)$$

此类对于漏报和空报还可用预报总次数与观测总次数之比的偏度率表示, 即

$$B = \frac{n_{11} + n_{21}}{n_{11} + n_{12}} \times 100\% \quad (15)$$

其中,  $B > 1$  为空报,  $B < 1$  时为漏报。

与前两类预报准确率评判方法相比, 此类预报准确率评判方法更能客观、准确地评判预报值与实测值之间的差异和关联情况, 但缺点是, 此类方法评判指标繁多, 除非统计专业

技术人员, 其他人员较难采用。故此类预报准确率评判方法多用于风速预报或风电功率预报的研究单位, 重点分析不同风速段或不同风电功率段的预报效果, 用来改进风速或风电功率预报方法。当然, 也有部分学者将两类事件列联表的评判方法用于风电场大于切出风速的预报准确率评判中。

#### 1.4 与风力发电特征紧密结合的风速预报准确率评判方法

一般来说, 风机在风速较小时 (小于切入风速) 是无功输出的 (称为小风速段); 之后, 功率随风速的增加而快速增加 (称为变化风速段); 达到额定风速后, 始终保持额定功率状态, 即风机输出功率与风速增加无关 (称为额定风速段); 直到风速达到切出风速后, 风速过大给风机运转带来一定风险而采取停机保护措施 (称为大风风速段) (图 1)。如果预报风速和实测风速都在额定风速段, 风速预报误差对风能的产出无影响; 如果预报风速和实测风速都在小风速段, 存在类似特点。为了充分考虑风机发电功率与风速的这种变化关系, 一些学者<sup>[12]</sup>采用分段法和变换法两种方法进行风速预报准确率评判。

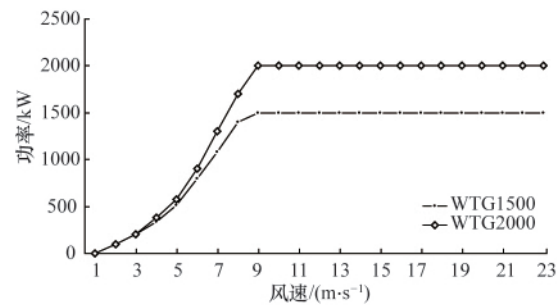


图 1 风机功率与风速变化关系

Fig. 1 Relation between wind turbine power generation and wind speed

(1) 分段法。根据不同风速段风机输出功率不同的特征, 将实测风速分为小风速段、变化风速段、额定风速段和大风风速段 4 个风速段。利用常用数学预报准确率评判方法分别对各风速段风速预报准确率进行评判 (如均方根误差、相对误差等)。因为会出现预报风速和实测风速不在同一个风速段的情况, 为了保证预报准确率评判的客观性, 还应分别评判每个风速段预报风速的空报 (预报风速在该风速段, 而实测风速不在该风速段) 和漏报 (实测在该风速段, 而预报风速不在该风速段) 情况。

(2) 变换法。根据不同风速段风机输出功率的不同特征, 首先将小风速段的预报和实测风速分别进行等于切入风速处理; 将额定风速段的预报和实测风速分别进行等于额定风速处理。再利用数学预报准确率评判方法进行评判。

## 2 讨论与结论

风电功率是表征风电场发电效率的物理量, 风电功率与

风速的立方成正比。因此,风电功率与风速都是风电场发电量预报的关键要素。风速是可直接测量的量。能代表风电场整体风况位置的测风塔的风速,可视为该风电场自然风况;通过数值模拟或其他方法得到的风电场预报风况也应反映该风电场自然风况。风电功率是风电场发电效率的直接反应,一个风电场自然风况大小是造成风电功率大小的最主要因素。同时,风电功率还受到风机性能、风机排布、风电场设计等因素的影响,甚至还受到风电并网限电影响。风电功率不仅应考虑自然风功率,还应综合考虑风机性能、排布方式、尾流影响及风电并网的限电等影响。鉴于风速预报是风电场真实风况的预报,它包含了风电无效风速(小于切入风速)、发电风速(启动风速至切出风速)和对风电场造成停机风险的大风速(大于等于切出风速)的预报;而风电功率预报则是风电场未来电功率输出结果的预报,风电场风速预报的准确率评判和风电功率预报的准确率评判同等重要,两者之间既有一定联系,又不能相互代替。

常用数学预报准确率评判方法(也称预报误差统计法)出现最早,长期用于各种预报或测量等方面的误差分析。常用数学预报准确率评判方法也常用于风电场风速预报和风电功率预报准确率的评判。此类预报准确率评判方法的特点是能较为客观且系统地反映风电场预报风速与实测风速之间的离散程度(均方根误差)、相关关系(相关系数)及预报误差的整体情况(平均绝对误差和平均相对误差)等;但此类预报准确率评判方法缺乏对风力发电特征的考虑,没有考虑不同风速段风力产能不同的特点,也不能反映相同常用数学预报准确率情况下不同容量风电场带给电网的冲击程度。

相对于风电场额定值的预报准确率评判方法多用于风电场风电功率预报准确率的评判。该方法考虑了不同容量的风电场风电功率预报误差对风电并网的不同影响,能较客观地评判风电功率预报误差相对于风电场容量的比率,更符合风电并网对风电场风电功率预报准确率的需求。相比较而言,风电场平均开机容量比风电场总容量更能反映风电场风电产出量的情况。国家能源局《关于印发风电场功率预测预报管理暂行办法》中提到的风电场预报系统预报准确率评判指标就属于此类(式(6))。部分学者将风速预报误差相对于风机额定风速的比率作为评判风电场风速预报准确率的指标。风电场风速预报是对风电场区域自然风况的预报,风机额定风速的预报准确率评判方法是对自然风况预报水平的反映,与常用数学预报准确率评判方法的反映能力相同,仅为一个常数比的差异,缺乏实际应用意义。风速是影响风机产能的重要因素但不是唯一因素,风电场限电等情况对评判结果影响很大。因此,相对风机额定风速的风电场风速预报准确率评判方法缺少实际应用意义。

与风力发电特征紧密结合的风速预报准确率评判方法既能反映风速预报与实测风速之间的关系,也充分考虑了不同风速段风速预报误差对风电产出率的不同影响。该类风电

场风速准确率评判方法中,分段法的优点是能较细致地反映不同风速段预报风速与实测风速之间的差异及正确预报率、漏报率和空报率等;缺点是评判指标过多,各指标之间有关联也有差异,错综复杂,作为标准的指标时,会增加应用推广的难度。变换法既能较大程度地减少评判指标个数,又能反映风电场风速预报水平,还能与风能利用的风速特征紧密结合。具体理由如下:

(1) 变换法既能较客观反映预报风速与实测风速之间的均方根误差、绝对误差和相关关系等,又具有风力发电特性。变换法与常用数学预报准确率评判方法的主要不同之处在于增加了对小风速段和额定风速段风速的处理。以额定风速段为例,只要预报风速和实测风速都在该风速段内,风机以额定功率发电,预报风速与实测风速之间的差异与风机发电效率无关。变换法对于该风速段风速进行等于额定风速处理,即预报风速等于实测风速等于额定风速,则风速预报误差为零。所以在此种情况下,误差的数值能反映预报风速和实测风速的相互关系,且具有风力发电的电风速特质。如果预报风速超出该风速段范围且实测风速在该风速段范围,进行等于额定风速处理后,误差统计的量是预报风速值与额定风速值之间的差异,反映的是预报风速与实际具有风力产生的风速之间的差异,具有风能利用特质。变换法对于小风速段具有类似的结论。图2是某风电场常用数学预报均方根误差和变换法风速预报均方根误差对比图。从图2可知,在小风速段和额定风速段,变换法均方根误差明显比常用数学预报均方根误差小,主要差异是预报风速和实测风速均在同一风速段时,变换法均方根误差为零;而对于常用数学预报准确率评判,尽管预报风速和实测风速都在额定风速段,只要预报风速和实测风速存在差异,统计的均方根误差大于零,使得评判时段内常用数学平均均方根误差大于变换法平均均方根误差。相比较而言,变换法风电场风速预报准确率评

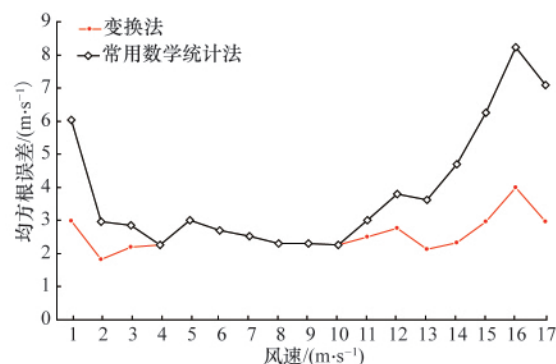


图2 某风电场常用数学统计法和变换法风速预报均方根误差对比(2012-03-07)

Fig. 2 Mean square errors of wind speed forecasts by the common mathematical method and the transformation method (March-July, 2012)

判方法比常用数学风电场风速预报准确率评判方法更具有风力发电的特征。

(2) 变换法风电场风速预报准确率评判方法基本能反映不同风速段的漏报、空报情况。为了减少评判指标个数,变换法对于不同风速段的漏报和空报情况,没有给出专门的指标,而是经过变换隐含在变换后的均方根误差、绝对误差、相关系数等里面。以小风速段的均方根误差为例,预报准确时(实测风速和预报风速均在小风速段),变换法均方根误差为零;漏报时(实测风速在小风速段而预报风速不在小风速段),变换法均方根误差大于零;空报时(实测风速不在小风速段而预报风速在小风速段),变换法均方根误差大于零。如果空报和漏报情况较多,评判时段内平均均方根误差值相对较大;反之,如果某风速内空报和漏报情况较少,评判时段内平均均方根误差值相对较小。由此可见,变换法在一定程度上能反映不同风速段预报风速的空报和漏报情况,但较难反映空报和漏报的具体频次。对于风能利用来说,除了大于等于切出风速的大风的空报、漏报对风力发电影响较大外,其他风速段风速预报的空报和漏报的具体频次对风能利用影

响相对较小,可见变换法能满足风能利用对不同风速段(非大于等于切出风速的大风速段)风速预报准确率的评判需求。此外,变换法评判指标个数少,资料处理和统计过程简单,易于推广应用。

用变换法评判风电场风速预报结果比常用数学统计法更具有风电发电特质。图3(a)是利用常用数学统计法得到的某风电场不同风速段预报误差,可以看出,1—16m/s风速段,预报方法1的预报误差小于预报方法2的预报误差,预报方法1预报效果好于预报方法2;对于变换法(图3(b)),1—10m/s风速段,常用数学统计法评判预报方法1和预报方法2预报效果基本一致,预报方法1的预报效果优于预报方法2;但对于额定风速段(11—16m/s),预报方法2的预报误差小于预报方法1。也就是说,在额定风速段,预报方法2预报值与实测值在额定风速段的一致率均比预报方法1高。从风能利用的角度来说,预报方法2略好于预报方法1。故变换法评判预报风速更具有风电发电特质,更能客观反映影响风力发电风速的预报准确率情况。

大于等于风机切出风速的风会给风机承载带来一定风

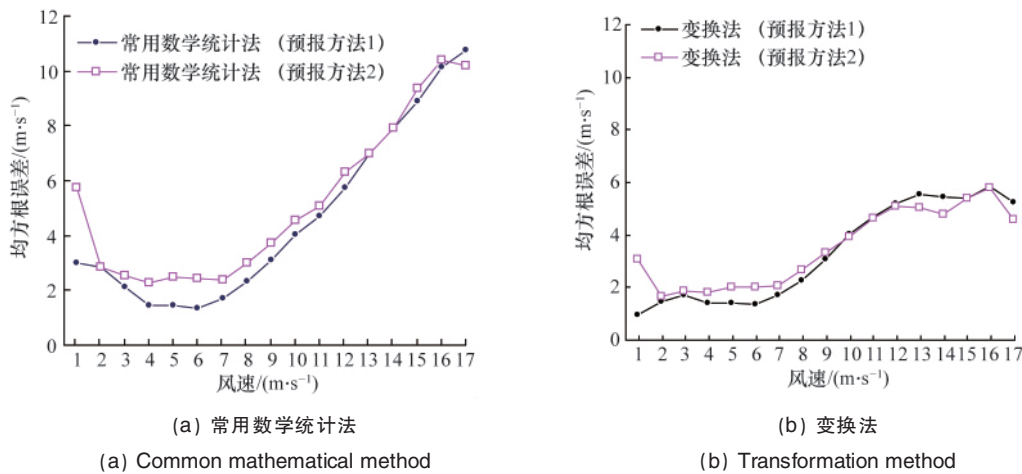


图3 某风电场预报方法1和预报方法2风速预报误差对比(2012-03-07)

Fig. 3 Mean square errors of wind speed forecasts by forecast method 1 and forecast method 2 (2012-03-07)

险,该风速段预报的准确率是保证风电场正常运行、规避风险的关键。此类风速预报的准确率评判,主要是考虑能否预报出大于等于切出风速,即发生大风风速或不发生大风风速两类事件。两类事件列联表的评判方法非常适合,且评判指标统计方法相对其他等级预报准确率评判方法简单。

参考文献 (References)

[1] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.  
Wei Fengying. The technologies of statistics diagnosis and forecast in modern climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999.  
[2] 王梓坤. 概率论基础及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1976.  
Wang Zikun. Probability theory and its application[M]. Beijing: Science

Press, 1976.  
[3] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2010.  
Huang Jiayou. The meteorological statistical analysis and forecasting methods[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010.  
[4] 孔玉寿, 章东华. 现代天气预报技术[M]. 北京: 气象出版社, 2000.  
Kong Yushou, Zhang Donghua. Modern weather forecast technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2000.  
[5] 劳·C·R. 线性统计推断及其应用[M]. 张燮, 译. 北京: 科学出版社, 1987.  
Rao C R. Linear statistical inference and its applications[M]. Zhang Xie, trans. Beijing: Science Press, 1987.  
[7] 曹鸿兴, 江野. 二氧化碳浓度增加与温度变化的关联分析[M]// 竺生. 气候学研究—气候与中国气候问题. 北京: 气象出版社, 1993: 148-

154.  
Cao Hongxing, Jiang Ye. Increased carbon dioxide concentration and temperature changes associated analysis [M]//Yao Zhensheng. Climate studies—Climate and climate issues. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 148–154.
- [8] 邓雪姣, 胡胜, 闫敬华. 主客观天气预报质量对比分析[J]. 应用气象学报, 2003, 14(6): 729–738.  
Deng Xuejiao, Hu Sheng, Yan Jinghua. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2003, 14(6): 729–738.
- [9] 国家能源局. 风电场功率预测预报管理暂行办法[S]. 北京: 国家能源局, 2011.  
National Energy Board. Interim measures for the wind farm power forecasting management[S]. Beijing: National Energy Administration, 2011.
- [10] 国家电网公司调度通信中心. 风电功率预测系统功能规范(试行)[S]. 北京: 国家电网公司, 2011.  
State Grid Corporation Dispatching and Communication Center. The functional specification of wind power prediction system (Trial) [S]. Beijing: State Grid Corporation, 2011.
- [11] 王勇, 李照荣, 李晓霞, 等. 风电功率预报方法研究进展[J]. 干旱气象, 2011, 29(2): 156–160.  
Wang Yong, Li Zhaorong, Li Xiaoxia, et al. *Journal of Arid Meteorology*, 2011, 29(2): 156–160.
- [12] Yuri Makarov, David Hawkins, Eric Leuze, et al. California ISO wind generation forecasting service design and experience[EB/OL]. [2012–08–13]. <http://www.repartners.org/pdf/CAISOWdForecastModel.pdf>, 2010.
- [13] 张铁军, 朱蓉, 李照荣, 等. 利用中尺度模式与诊断风场模型进行风电功率预报[J]. 干旱气象, 2011, 29(4): 500–503.  
Zhang Tiejun, Zhu Rong, Li Zhaorong, et al. *Journal of Arid Meteorology*, 2011, 29(4): 500–503.
- [14] Porter K, Rogers J. Central wind power forecasting programs in North America by regional transmission organizations and electric utilities[R]. Subcontract Report NREL/SR–550–46763, Washington DC: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [15] Makridakis S, Wheelwright S C, Handyman R J. Forecasting methods and applications[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [16] Patel M R. Wind and solar power systems[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999.
- [17] Wilks D S. Statistical methods in the atmospheric science[M]. Waltham, MA: Academic Press, 2006: 627.
- [18] 盛春岩, 肖明静, 周雪松, 等. 风预报检验办法 (QX/T–2012–07)(气象行业标准)[S]. 北京: 中国气象局, 2012.  
Sheng Chunyan, Xiao Mingjing, Zhou Xuesong, et al. Wind forecast verification methods (QX/T–2012–07)(Meteorological Standardization of China)[S]. Beijing: China Meteorological Administration, 2012.
- [19] 朱龙彪, 陈有利, 乐益龙, 等. 临近天气预报检验(气象行业标准)[S]. 北京: 中国气象局, 2008.  
Zhu Longbiao, Chen Youli, Le Yilong, et al. Nowcasting verification (Meteorological Standardization of China)[S]. Beijing: China Meteorological Administration, 2008.
- [20] 辛吉武, 许向春, 叶晓东, 等. GB/T 21984—2008 短期天气预报[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会, 2008.  
Xin Jiwu, Xu Xiangchun, Ye Xiaodong, et al. GB/T 21984–2008 Short-range weather forecast [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2008.
- [21] 林明智, 毕宝贵, 乔林. 中央气象台短期降雨预报水平初步分析[J]. 应用气象学报, 1995, 6(4): 392–399.  
Lin Mingzhi, Bi Baogui, Qiao Lin. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1995, 6(4): 392–399.
- [22] 吴璐, 翟盘茂. 两套卫星降水资料对青藏高原及其以东地区暖季日降水事件的检测能力评估[J]. 气象学报, 2012, 待发表.  
Wu Lu, Zhai Panmao. *Acta Meteorologica Sinica*, in press, 2012.
- [23] 铃木荣一. 气象统计学[M]. 北京: 地人书馆, 1968.  
Ling Murongyi. *Meteorological statistics* [M]. Beijing: Diren Libraries, 1968.
- [24] 王宗皓, 李麦村. 天气预报中的概率统计学方法[M]. 北京: 科学出版社, 1974.  
Wang Zonghao, Li Maicun. The probability of statistical methods in the weather forecast[M]. Beijing: Science Press, 1974.
- [25] 罗阳, 赵伟, 翟景秋. 两类天气预报评分问题研究及一种新评分方法[J]. 应用气象学报, 2009, 20(2): 129–136.  
Luo Yang, Zhao Wei, Zhai Jingqiu. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(2): 129–136.
- [26] Heidke P. Calculation of the success and goodness of strong wind forecasts in the storm warning service[J]. *Geogr Ann Stockholm*, 1926 (8): 301–349.
- [27] 丁金才. 天气预报评分方法评述[J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(1): 143–150.  
Ding Jincai. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1995, 18(1): 143–150.
- [28] 新田尚, 立平良三, 市桥英辅. 最新天气预报技术[M]. 宁松, 译. 北京: 气象出版社, 1997: 145–146.  
Xin Tianshang, Li Pingliangsan, Shi Qiaoyingfu. Latest weather forecast technology [M]. Ning Song, trans. Beijing: China Meteorological Press, 1997: 145–146.
- [29] 张军, 葛军, 田俊杰, 等. 概率天气预报及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 1998: 127–137.  
Zhang Jun, Ge Jun, Tian Junjie, et al. Probability of weather forecast and its application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1998: 127–137.
- [30] 李麦村, 王绍武. 近年来我国长期预报的发展[C]//长期天气预报文集. 北京: 气象出版社, 1981.  
Li Maicun, Wang Shaowu. Development of the long-range forecast in China during recent years [C]//The Corpus of Long-term Weather Forecast. Beijing: China Meteorological Press, 1981.
- [31] 吴高任, 林庆禄, 王迎春. 北京地区区域性暴雨专家系统[C]//北方暴雨预报专家系统文集. 北京: 气象出版社, 1986.  
Wu Gaoren, Lin Qinglu, Wang Yingchun. The rainstorm experts system in Beijing[C]//Northern Rainstorm Forecasting Expert System Anthology. Beijing: China Meteorological Press, 1986.
- [32] Bermowitz R T, Zumdorfer E A. Automated guidance for predicting quantitative precipitation[J]. *Monthly Weather Review*, 1979, 107(2): 122–128.
- [33] Hughes L A. Precipitation probability forecast—problems seen via a comprehensive verification[J]. *Monthly Weather Review*, 1979, 107(2): 129–139.

(责任编辑 马宇红, 朱宇)