

基于 WRF 模式的短期风速预报研究

徐永清¹, 刘春生¹, 张弛², 王庆祥¹ (1. 黑龙江省气候中心, 黑龙江哈尔滨 150030; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要 使用 WRF 模式对黑龙江省东部地区 2009 年 7 月~2010 年 6 月期间的风速进行预报研究, 并与测风塔 70 m 实测风速比较, 分析模式的预报性能和误差大小。结果表明, 测风塔实测年平均风速 5.0 m/s, 预报年平均风速为 6.1 m/s, 相关系数高达 0.71, WRF 模式能够很好地预报出风速的变化趋势; WRF 模式准确地反映出实际风速的月变化趋势, 除 1 月外, 各月预报值均大于实测值, 5 和 9 月误差较大; 预报风速与实测风速在各时刻相关性非常高, 相关系数均在 0.60 以上, 相对误差与均方根误差均是夜间大、白天小; WRF 模式预报的主导风向与实测一致, 但数值略小, 对年风向频率具有较好的预报效果。

关键词 WRF 模式; 风速; 短期预报; 误差

中图分类号 S161.7 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)08-03539-03

Study of Short-term Wind Speed Forecast Based on WRF

XU Yong-qing et al (Heilongjiang Climate Center, Haerbin, Heilongjiang 150030)

Abstract WRF was used to study on wind speed forecasting in Eastern Heilongjiang Province during July 2009 to June 2010. Results were compared to the observation values at height of 70 meters by anemometer tower to analyze the forecasting ability and errors, showing that, the average annual observation value of anemometer tower is 5.0 m/s, while forecasting value is 6.1 m/s, sharing the correlation coefficient as 0.71, indicating the good performance of WRF. Except for January, forecasting values of each month by WRF is bigger than observation values, though the monthly variation trend is well simulated. Correlativity of hourly forecasting and observation values is always bigger than 0.6, while relative error and root mean square showed a bigger-in-day and smaller-at-night trend. Main wind direction forecasted by WRF is accord with the observation values with a slight decrease, while the annual wind direction frequency forecasting is satisfying on some extend.

Key words WRF; Wind velocity; Short-term forecasting; Error

风能作为一类可再生、永不枯竭和无污染的能量资源, 具有很高的经济和社会效益。近年来, 我国风电发展迅速, 据中国风能协会统计, 至 2011 年底我国累计装机容量已达 62 364.2 MW, 位居世界第 1 位。但由于风力发电具有随风速、风向变化而频繁变化, 且运行极不稳定的特点, 对电网的安全运营危害极大。风电功率预报对风能的合理调配利用、电网稳定、商业运营、决策服务等方面有非常重要的作用。

20 世纪 90 年代初期, 欧洲一些国家就已经开始对风速、风能预报进行系统的研究^[1-4]。目前, 已有十多种成熟的模型用于各国的短期风能预报业务。我国风能预报工作开展较晚, 但近年来, 大量专家学者对风速、风能预报做了许多研究工作^[5-8]。包括中国气象局、中国电科院、清华大学、华北电力大学及众多企业陆续开发出风电功率预报系统, 预报技术也由简单的统计方法发展到物理与统计相结合的方法, 即采用中期天气预报模式嵌套高分辨率有限区域模式和发电量统计模型对风电场发电量进行预报。其中, 中尺度数值模型对风速预报的准确性直接决定了风电功率的预报精度。笔者利用 WRF 模式对黑龙江省东部地区风速、风向进行预报研究, 并与测风塔实测风速、风向比较, 检验中尺度数值模式 WRF 在黑龙江东部地区风的预报能力, 探索 WRF 模式在该地区风电功率预报的可行性。

1 资料与方法

1.1 模式介绍 WRF (Weather Research Forecasting) 是由美国多个研究部门及大学共同参与开发研究的新一代中尺度预报模式。该模式中包括了辐射过程、边界层参数化过程、

对流参数化过程、次网格湍流扩散过程以及微物理过程等物理过程, 是一个完全可压的非静力模式, 控制方程组均写为通量形式。网格采用有利于在高分辨率模拟中提高准确性的 Arakawa c 格点。WRF 采用地形追随混合 σ 垂直坐标, 动能、熵、动量守恒, 为 2 阶有限差分格式。质量坐标框架 (ARW, EM) 采用地形追随非静力气压垂直坐标。网格采用 Arakawa C—grid。差分方案为 3 阶 Runge—Kutta 显式时间分离差分方案, 5 阶或 6 阶平流差分方案, 质量、动量、干熵及其标量守恒, 应用通量形式的诊断方程。WRF 模式系统具有可移植、易维护、可扩充、高效率、方便等诸多特性, 是目前最为先进的中尺度数值天气模式, 目前已经在世界大多数国家的天气预报业务和相关的业务部门及科研单位广泛应用。

1.2 资料选取 边界资料取自 NCEP 的预报产品 GFS 资料, 每 3 h 一次、分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。模式进行 4 重嵌套, 相应的水平网格距分别为 27、9、3、1 km, 4 重网格垂直方向均分为不等距 28 层, 其分辨率在大气低层较高并随高度逐渐降低, 其中近一半分布在 2 km 以下, 最外层积分步长为 120 s, 每 15 min 输出一次模拟结果, 积分时长为 48 h。

同时, 采用黑龙江省风能资源专业观测网中依兰测风塔 70 m 的 2009 年 7 月~2010 年 6 月的逐时风速、风向资料。依兰测风塔位于依兰县气象站院内, 塔高 70 m, 共有 10、30、50、70 m 4 层测风数据, 在此仅对 70 m 风速进行预报对比研究。测风塔位于黑龙江省风能资源最丰富的地区——松花江谷地地区。测风塔的观测环境和测风仪器、方法符合风能资源测量方法 (GB/T18709-2002) 规定, 按风电场风能资源评估方法 (GB/T18710-2002) 对测风数据进行了完整性、合理性检验, 测风塔的有效数据完整率在 98% 以上。

1.3 方法简述 为检验 WRF 模式的预报效果, 计算了预报风速与观测风速序列之间的相关系数、平均相对误差、均方

作者简介 徐永清 (1975-), 男, 满族, 黑龙江哈尔滨人, 工程师, 硕士, 从事气候资源开发利用及气候可行性论证工作, E-mail: xtong05@163.com。

收稿日期 2013-03-22

根误差。相关系数可以确定风速的预报与观测序列之间的关系,反应风速预报的趋势效果。平均相对误差与均方根误差可以衡量预报与观测值之间的偏离程度。

2 结果与分析

2.1 年平均预报效果分析 去除测风塔和 NCEP 预报缺失数据,共得到逐时预报与实测风速 8 198 对。实测年平均风速为 5.0 m/s,预报风速为 6.1 m/s,二者逐时风相关系数为 0.71,实测最大风速为 18.7 m/s,预报最大风速为 17.7 m/s。其中,3~25 m/s 风速区间共 5 178 h,该区间内实测风速为 6.9 m/s,预报风速为 7.3 m/s,相关系数为 0.67。

2.2 月预报效果分析 由图 1 可见,观测风速 1 月份平均风速最大,达 7.6 m/s,其次为 12 月的 6.4 m/s,其他月份均在 6.0 m/s 以下,7、8、9 月平均风速最低,7 月最低,仅为 3.5 m/s;预报月平均风速与实测风速的变化趋势高度一致,仅在 1 月预报平均风速略小于实测值,其他月份均高于实测值。

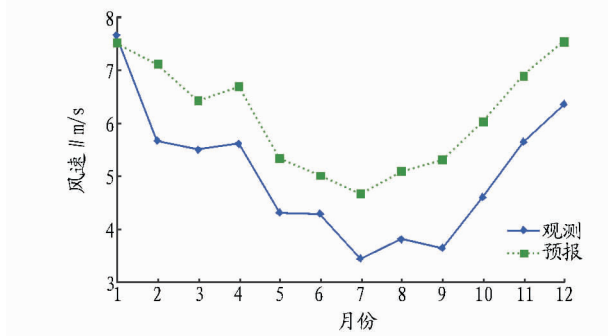


图1 实测与预报月平均风速比较

图2显示,相对误差月际变化较大,在风速较小的9月最大,达21.4%,而在实测风速最大的1月,相对误差较小,仅为13.6%,相对误差在4月最小,为12.6%;均方根误差在5月最大,远大于其他月份,达2.2 m/s,7月最小,仅为1.2 m/s,之后均方根误差缓慢上升,在2月达次高值1.7 m/s,4月则为次低值1.3 m/s。整体上处于春夏之交的5月和夏秋之交的9月误差较大,9月相对误差最大,但因平均风速较小,均方根误差并不是很大,而在5月均方根误差达最大,但平均风速较6~10月大,相对误差反而较这些月份小。各月逐时风速的相关系数5月最低,为0.36,其他各月相关系数均在0.57以上,12月的相关系数最高,达0.81。

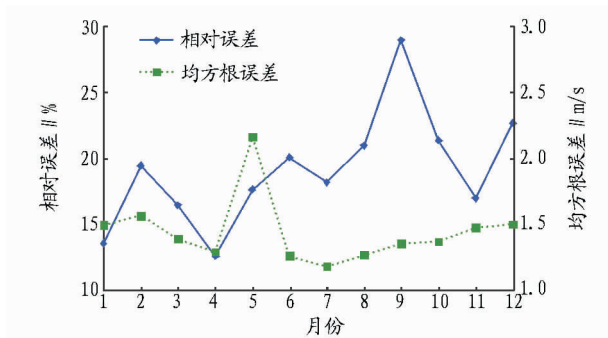


图2 均方根误差与相对误差月变化

2.3 日预报效果分析 观测风速呈现午后大、早晨小的

单峰型特征,这与许多研究的结果相符^[9]。这主要是因为近地层大气中风速日变化主要决定于湍流交换的日变化。日出以后,地面逐渐受热,近地面空气开始升温,逐渐形成不稳定大气层结,上下层空气的湍流交换开始加强,上层空气的动量下传使得近地层空气获得动量,风速逐渐增大,风速在12:00达最大;15:00后,地面温度逐渐下降,湍流交换逐渐减弱,风速也不断减小;夜间,由于地面辐射冷却作用,近地面空气降温,易形成稳定大气层结,该层结不利于空气动量下传,而地面摩擦作用使得近地面风速减小,这样一直持续到夜间,至早晨风速较小。因为测风塔位于城市近郊,湍流交换强烈,在午前风速上升较快,午后下降迅速。模式因为分辨率、下垫面数据不能完全反应城市实际情况、预报高度较低具有高空风速特征等因素,预报风速日变化不能完全反应实际的变化情况,预报风速虽也是日出后风速开始增大,但幅度较小,一致持续到19:00才开始下降,01:00风速又上升,到05:00形成一个峰值,呈双峰型特征(图3)。

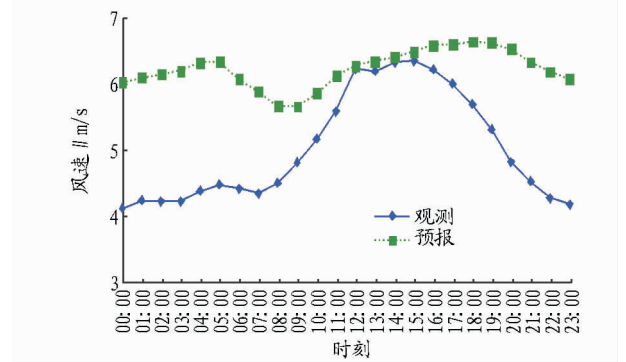


图3 实测与预报日平均风速比较

由图4可见,平均相对误差与均方根误差的日变化趋势较一致,均是白天小、夜间大。夜间风速较小,相对误差均在20%以上,均方根误差在1.2 m/s以上;白天风速较大,相对误差在15%以下,均方根误差在1.0 m/s以下。各时刻预报与实测风速的相关系数均很高,均在0.60以上,且与实测风速呈明显的反位相变化(图5),08:00~19:00相关系数均在0.70以上,12:00最高,为0.87,夜间相关系数相对较小,22:00最小,为0.63。

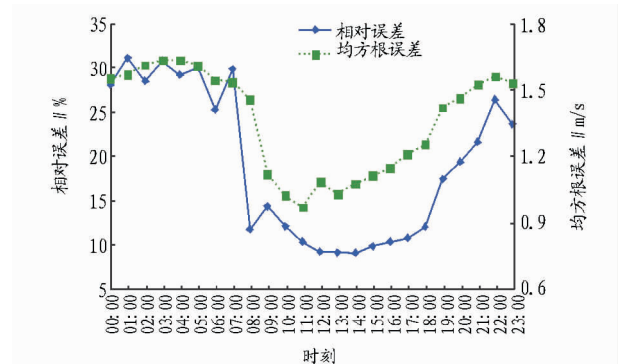


图4 均方根误差与相对误差日变化

2.4 各风速区间预报效果分析 由图6可见,风速越大相对误差越小,在<1.0 m/s区间,相对误差高达81.7%,而在

风速 $>4.0\text{ m/s}$ 区间,相对误差均在 15% 以下;均方根误差呈明显的 U 字形,风速较小和较大区间均方根误差较大,在 $4\sim 11\text{ m/s}$ 均方根误差较小。

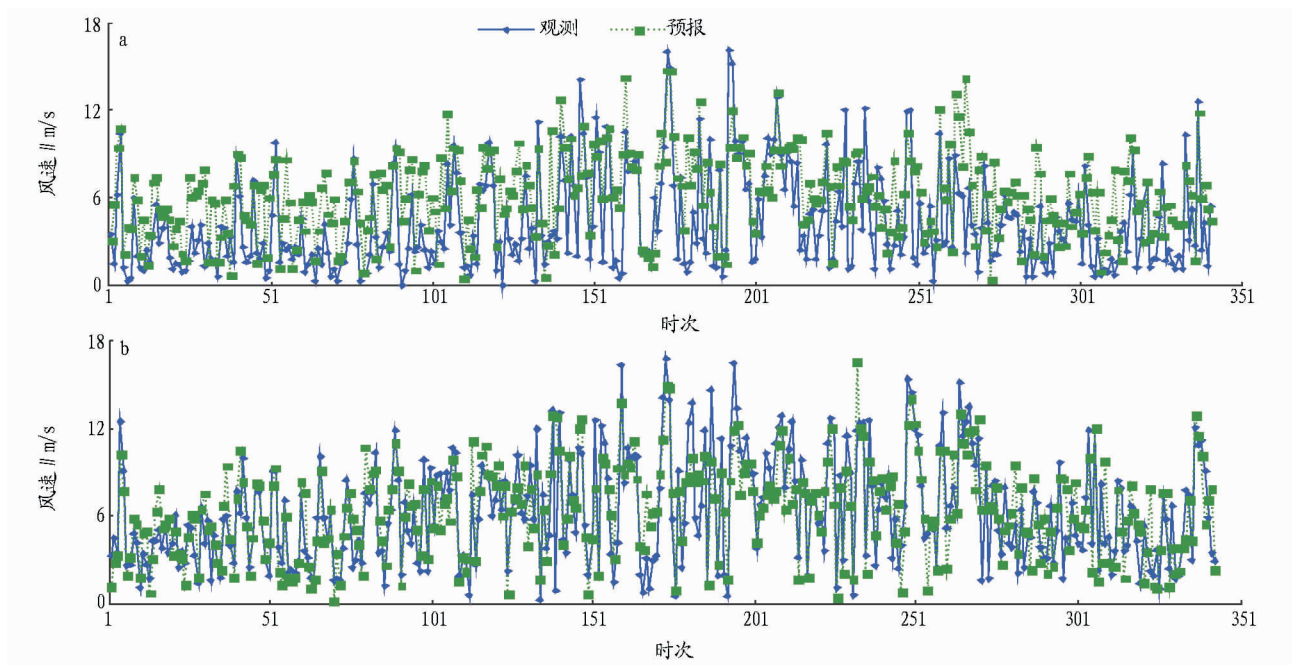


图 5 02:00 (a) 和 14:00 (b) 预报与实测风速比较

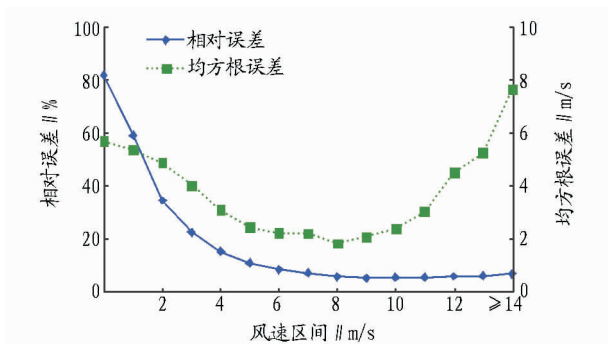


图 6 各风速区间均方根误差与相对误差比较

2.5 风向预报效果分析 由图 7 可见,实测主导风向非常明显,WSW 风向占 33.0%,其次为 W、SW,分别占 8.9% 和 7.6%,其他风向所占比例较小;预报风向的主导风向与实测一致,但频率略小,占 27.2%,次主导风向预报频率大于实测,其他风向相差不大,整体上对风向的预报效果较好。

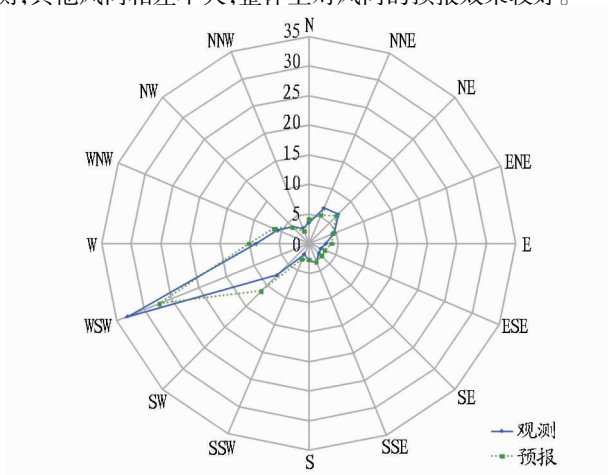


图 7 预报与实测风向玫瑰图

3 结论

(1) WRF 模式可以很好地预报出黑龙江东部地区的风速变化趋势,年逐时风速相关系数高达 0.72,预报风速值明显高于实测值。预报月平均风速的变化趋势,除 1 月外其他月份均是预报风速大于实测风速;5 和 9 月误差较大,其他月份误差较小;5 月相关系数最小,为 0.36,其他月份相关系数较高。

(2) 虽然预报风速不能完全反映实测风速的日变化趋势,但各时刻风速的相关系数均很高,均在 0.60 以上,相对误差和均方根误差变化趋势一致,均是白天小、夜间高。相对误差随风速最大逐渐降低,而均方根误差呈 U 字型曲线。

(3) WRF 模式可以准确地预报出主导风向,对风向具有较强的预报能力。

(4) 准确的风速预报是高精度风功率预报的前提。但风既受高空大气运动的支配,又受地形地貌和下垫面的影响,对风的预报带来了难度。预报结果中,同时刻的预报与实测风速序列相关性较高,在风电功率预报中,可以尝试分时刻建立统计预报模型,进行风功率预报工作。

参考文献

- [1] LARS L. Shoat-term prediction of the power production from wind farms [J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 1999, 90: 207–220.
- [2] PINARD J P, BENOIT R, YU W A. West wind climate simulation of the mountainous Yukon [J]. Atmosphere-Ocean, 2005, 43 (3): 259–282.
- [3] YU W, BENOIT R, GIRARD C, et al. Wind Energy Simulation Toolkit (WEST): a wind mapping system for use by the wind-energy industry [J]. Wind Engineering, 2006, 30 (1): 15–33.
- [4] KALNAY E, JORD S J, MCPHERSON R D. Maturity of operational numerical weather prediction: medium range [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79: 2753–2769.
- [5] 孙川永, 陶树旺, 罗勇, 等. 高分辨率中尺度数值模式在风电场风速预报中的应用 [J]. 太阳能学报, 2009, 30 (8): 1097–1099.

确定规划近期和远期的人口平均自然增长率为 4.2‰和 4.0‰。根据以上分析,预测近期(2015 年)全镇人口规模为 5.57 万人,远期(2020 年)人口规模 5.68 万人。

表 1 焦庙镇人口规模预测结果

规划年	城镇人口	农村人口	镇域人口	城镇化水平//%
2008 年	11 600	42 500	54 100	21.4
2015 年	22 500	33 200	55 700	40.4
2020 年	30 000	26 800	56 800	52.8

2.1.2 用水量预测。规划人均综合生活用水量标准按 150 L/(人·d)(包括共建用水量)计,工业用水量标准按单位工业用地用水量标准 0.5 万 m³/(km²·d)计,其他用水量(包括浇洒道路、绿地、市政用水及管网漏损量)按总用水量的 10% 计。工业用地面积 2008 年为 0.31 km²,2015 年为 0.56 km²,2020 年为 0.72 km²,规划需水量预测结果见表 2。

表 2 焦庙镇需水量预测结果 万 m³/d

规划年	生活用水量	工业用水量	其他用水量	总用水量
2008 年	0.17	0.16	0.04	0.37
2015 年	0.34	0.28	0.07	0.69
2020 年	0.45	0.36	0.08	0.89

2.1.3 排水量预测。生活污水量(含公建污水量)按其生活给水量的 85% 计,工业污水量按其工业给水量的 75% 计,城区污水排放量预测结果见表 3。

表 3 焦庙镇排污量预测结果 万 m³/d

规划年	生活污水排放量	工业废水排放量	总污水排放量
2008 年	0.14	0.12	0.26
2015 年	0.29	0.21	0.50
2020 年	0.38	0.27	0.65

2.2 水环境容量和水环境承载力 焦庙镇紧靠黄河,黄河自东南穿过,新赵牛河位于镇域西侧,全镇地下水丰富,为宜井区,人均水资源占有量为 430 m³。齐河县自来水公司新水源就地位于该镇北展区的芦庄,水源丰富。结合焦庙镇镇区现状给水水源地,规划确定在现状水源的基础上扩大供水规模。该水源地位于镇区东南,近期供水规模为 0.5 万 m³/d,远期供水规模为 1 万 m³/d。根据水体允许纳污量计算公式,污染物降解系数取 0.15(1/d)。水体允许纳污量对混合带允许范围的约束条件是:混合带长度不允许超过 1 500 m,宽度不能超过河宽的 1/3,即边界条件: $y_{\max} \leq B/3$; $x_{\max} \leq 1\,500$ 。计算所得焦庙镇水环境容量为 0.73 万 m³/d。根据排污量数据和水环境容量数据,利用环境承载率评价法,计算水环境承载力指数。当 0≤环境承载力指数≤1 时,区域开发强度

没有超过环境承载力,而且环境承载力指数越小,区域越有开发潜力;当环境承载力指数>1 时,区域开发强度超过了环境承载力。由表 4 可知,2008、2015、2020 年焦庙镇水环境承载力指数均小于 1,说明焦庙镇近远期水环境规划承载力都有一定富余。但值得注意的是,远期规划(2020 年)水环境承载力指数高达 0.902 8,污水排放量接近水环境容量值,有超载的危险,说明焦庙镇水环境并不乐观,富载不多,应在更长远的规划中予以重视和保护。

表 4 焦庙镇水环境容量和水环境承载力计算结果 万 m³/d

规划年	污水排放量	水环境容量	水环境承载力指数
2008 年	0.26	0.72	0.361 1
2015 年	0.50	0.72	0.694 4
2020 年	0.65	0.72	0.902 8

3 结论与对策

焦庙镇水环境有一定污染,水环境承载力指数 2008 年为 0.361 1,近期规划(2015 年)值为 0.694 4,远期规划(2020 年)达到 0.902 8,均有一定富余,但富载不多,远期有超载的危险。远期规划应以水环境质量和维护水生态平衡为目标,以容量总量为基础,结合流域经济社会发展水平,合理编制流域水污染防治规划,落实城镇水污染防治对策及流域防治措施,不断消减污染物排放量,启动饮用水源地重点保护工程,确保全镇所有水环境达到功能区水质要求,推进节水型社会的建设。

参考文献

[1] 唐剑武,叶文虎.环境承载力的本质及其定量化初步研究[J].中国环境科学,1998,18(3):227-230.
[2] ODUM E P. Fundamentals of ecology[M]. Saunders: Philadelphia, PA, 1971.
[3] BARRETT J. Component ecological footprint: Developing sustainable scenarios[J]. Impact Assess Project Appraisal,2001,19:107-118.
[4] 崔凤军.城市水环境承载力的实例研究[J].山东矿业学院学报,1995,14(2):140-144.
[5] 高彦春,刘昌明.区域水资源开发利用的阈值分析[J].水利学报,1997(8):73-79.
[6] 曾维华,王华东,薛纪渝,等.人口、资源与环境协调发展关键问题之一环境承载力研究[J].中国人口·资源与环境,1991,1(2):33-37.
[7] 彭再德,杨凯,王云.区域环境承载力研究方法初探[J].中国环境科学,1996,16(1):6-9.
[8] 洪阳,叶文虎.可持续环境承载力的度量及其应用[J].中国人口·资源与环境,1998,8(3):54-58.
[9] 陈传美,郑垂勇,马彩霞.郑州市土地承载力系统动力学研究[J].河海大学学报,1999,27(1):53-56.
[10] 蒋晓辉,黄强,惠洪河,等.陕西关中地区水环境承载力研究[J].环境科学学报,2001,21(3):312-317.
[11] 曾维华,杨月梅,陈荣昌,等.环境承载力理论在区域规划环境影响评价中的应用[J].中国人口·资源与环境,2007,17(6):21-37.
[12] 许颖,杨光明,郝晓丽,等.县城环境承载力综合评价研究[J].安徽农业科学,2012,40(25):12581-12583.

(上接第 3541 页)

[6] 陈豫英,刘还珠,陈楠,等.基于聚类天气分型的 KNN 方法在风速预报中的应用[J].应用气象学报,2008,19(5):564-572.
[7] 王永,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):155-160.

[8] 陈录元,尚可政,周海,等.环渤海地区 4~10 天风速预报中相似预报法的应用[J].气象科技,2012,40(2):219-225.
[9] 杨晓玲,丁文魁,袁金梅,等.河西走廊东部大风气候特征及预报[J].大气科学学报,2012,35(1):121-127.