

文章编号:1004-4574(2012)04-0145-07

江苏省风电场的气象灾害风险评估

郑有飞^{1,2}, 林子涵², 吴荣军^{1,2}, 许遐祯³, 尹继福⁴

(1. 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044; 3. 江苏省气候中心, 江苏 南京 210008; 4. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044)

摘要:在分析江苏省风电场气象灾害特征的基础上,建立了以江苏省为例的风电场气象灾害风险性评价模型,确定台风密度、龙卷风密度、雷暴密度、风机密度、单机发电功率、人均GDP这6个因子作为评估指标。结合GIS技术和层次分析法对江苏省长江以北各縣市风电产气象灾害风险度进行了区划。结果表明,江苏省长江以北的沿海城市:南通和盐城区域为风电场气象灾害的极高风险区和高风险区,而同样为沿海城市的连云港与苏中地区的泰州市、扬州市和苏北地区的淮安为风电场气象灾害的中风险区,宿迁和徐州均为风电场气象灾害的低风险区。

关键词:风电场气象灾害;层次分析法;风险度

中图分类号:P429

文献标志码:A

Risk assessment of wind-powered meteorological disasters in Jiangsu Province

ZHENG Youfei^{1,2}, LIN Zihan², WU Rongjun^{1,2}, XU Xiazhen³, YIN Jifu⁴

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

3. Climate Center of Jiangsu Province, Nanjing 210008, China; 4. School of Atmospheric Physics and Environment college, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the analysis of the characteristics of wind-powered meteorological disasters in Jiangsu Province, this paper established the wind-powered farm meteorological disaster risk assessment model of Jiangsu Province, and took seven factors, including the density of the typhoon, tornado density, thunderstorm density, per capita GDP and population density, etc., as assessment indices. Combined with GIS technology and AHP, the wind-powered meteorological disaster risk degree was zoned for cities and counties on the north of Yangtze River in Jiangsu Province. Results show that coastal cities on the north of the Yangtze River, Nantong and Yancheng, are extreme high and high risk areas of wind-powered meteorological disaster, respectively, while coastal city Lianyungang, mid-Jiangsu city Taizhou and north-Jiangsu city Huaian, are moderate risk areas, and cities of Suqian and Xuzhou are low risk areas of the disaster.

Key words: wind powered; meteorological disaster; analytic hierarchy process (AHP); degree of risk

能源危机迫在眉睫,开发可再生的绿色能源是社会可持续发展的必由之路。风能是清洁的可再生能源,取之不尽,用之不竭。在所有新能源、可再生能源利用技术中,风力发电是技术最成熟、最具规模开发和商业

收稿日期:2011-10-29; 修回日期:2011-12-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41075114); 国家科技支撑计划项目(2007BAC29B05)

作者简介:郑有飞(1959-),男,教授,博士,主要从事环境气象及农业气象研究。E-mail:zhengyf@nuist.edu.cn

发展前景的方式^[1-2]。在此背景下,近年,我国用于风电场建设的投资显著增加,2011 年的累计风电装机容量即达 52 800 MW。然而在之前的风电场设计中,对极端天气气候的影响讨论较少,特别对沿海地区的台风、龙卷风和雷暴等极端灾害天气对风电场影响的研究鲜见报道,这些已成为目前风能资源开发利用亟待解决的关键性问题。实际上,极端灾害性天气能够较大程度的破坏风电机组,是影响风电场运行安全的主要因素,也是风电场设计必须考虑的因素^[3-4]。

风险评估又称安全或危险评价^[5],是指利用系统工程方法对将来或现有系统因受外动力作用和影响下可能存在的危险及后果进行综合评估和预测,目的是通过科学、系统的安全评价估算,为评估系统的总体安全性及制定有效的预防和防御措施提供科学依据,消除或控制系统中的危害因素,最大限度降低系统中存在的致灾风险。综合国内外文献,数学方法应用及风险量化表达已成趋势,国内外风险评估主要数学方法有:概率统计^[6-7]、模糊数学^[8]、基于信息扩展理论^[9-10]、层次分析法^[11]、灰色系统^[12]、人工神经网络^[13]、加权综合评价^[14]。层次分析法是对一些较为复杂、较为模糊的问题作出决策的简易方法,它特别适用于那些难于完全定量分析的问题,思路清晰且系统性强,所需定量数据较少,对问题本质分析得较透彻,颇具实用性。在缺少风电场受灾案例情况下本论文选取层次分析法作为风险评估方法。

江苏省位于我国大陆东部沿海中心,其沿海年均风速在 6 m/s 以上,且较稳定,完全符合风力发电机的风速要求,属于风资源较丰富区^[15]。同时,江苏省处于北亚热带和暖温带的过渡区,台风、洪涝、雷电和强对流等灾害性天气种类多,频率高,来势猛,强度大。江苏省的风能丰富区主要位于长江以北的沿海地区,这些地区也是风电开发的重点区域,近年,江苏省的风电开发实现了突破性进展,已建、规划的风电场近 30 个,其中已建风电场主要集中在启东沿海至大丰港之间的沿海地区,而规划中的风电场主要分布在东台、大丰的沿海滩涂、海上辐射沙洲以及浅海地区^[16]。苏南地区由于城市和人口密集,较大程度的限制了风能资源的开发利用。江苏风力发电正处于起步阶段,缺少风险评估分析案例,无法得到受灾因子数据,因此,本文选择江苏省长江以北地区(不含南京的六合、江浦)作为研究区域,拟在各县市建设 100 台型号为 GE1.5 MW 的风机,结合各个县市的风能状况、社会经济指标,以此作为评估分析的基础,以各县市为风电场的气象灾害风险评估单元,评估江苏省各县市建风电场所要承受的气象灾害的风险。并结合其结果,提出了风电场应对主要极端气象灾害的措施,以期有关部门制定相关防控对策提供理论依据,并为未来的风电场建设及维护提供技术支撑。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文采用的 1950 至 2009 年的逐年台风、龙卷和雷击频数数据及年平均风速等风能数据由江苏省气候中心提供;而期间的人均 GDP 来自江苏省 2009 年统计年鉴。

1.2 研究方法

(1) 层次分析法

层次分析法是美国运筹学家 Saaty 教授于 20 世纪 70 年代初期提出的一种简便、灵活而又实用的多准则决策方法。运用层次分析法建模,大体上可按下面 4 个步骤进行^[17]。

1) 建立递阶层次结构模型

按照评价指标体系的基本关系构建递阶层,指标体系的每层中各元素支配下一层中的相应元素,形成一个递阶层次,同一层中各元素相互独立,从而形成了由一个总目标层和若干个子准则层组成的递进的“金字塔”型层结构。

2) 构造出各层次中的所有判断矩阵

在确定的递阶层次结构中,每一个元素和该元素支配的下一层元素构成一子区域,对于子区域内的各元素采用专家咨询法来构建若干个判断矩阵。设 A 元素 A_k 与下层元素 B_1, B_2, \dots, B_n 有联系,则判断矩阵如表 1 所示。其中 b_{ij} 表示对于 A_k 而言,其下一层任意元素 B_i 对 B_j 相对重要性的数值表现。 b_{ij} 的取值由 Saaty 的 1 ~ 9 值法(表 2) 决定。显然,判断矩阵都有如下性质: $b_{ii} = 1, b_{ji} = 1/b_{ij}$ 。判断矩阵的值根据客观数据、专家意见和分析者的认识综合给出。

表 1 判断矩阵

Table 1		Judgement matrix			
A_k	B_1	B_2	...	B_n	
B_1	b_{11}	b_{12}	...	b_{1n}	
B_2	b_{21}	b_{22}	...	b_{2n}	
...	
B_n	b_{n1}	b_{n2}	...	b_{nn}	

表2 判断矩阵的标度及含义
Table 2 Scale and meaning of judgement matrix

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有相同重要性
3	表示两个因素相比,前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比,前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 的重要性之比为 b_{ij} ,那么因素 <i>j</i> 与因素 <i>i</i> 重要性之比为 $b_{ji} = 1/b_{ij}$ 。

3) 层次单排序及一致性检验

计算判断矩阵的最大特征根和特征向量,应用和积法计算,其步骤为:

步骤1:将判断矩阵*B*每一列归一化

$$a_{i,j} = b_{ij} / \left[\sum_{k=1}^n b_{ik} \right], \quad i, j = 1, \dots, n. \tag{1}$$

步骤2:将 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 按行加总。

步骤3:将*b*中所得的行和向量归一化,得排序权重向量

$$W_i = W_i / \left[\sum_{j=1}^n W_j \right], \quad i, j = 1, \dots, n. \tag{2}$$

按下式计算判断矩阵*B*对应的最大特征值

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \left[(AW)_i / nW_i \right], \tag{3}$$

其中 $(AW)_i$ 表示*AW*的第*i*个分量。

步骤4:一致性检验

$$C_l = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1). \tag{4}$$

根据判断矩阵的阶数*n*,查找相应的一致性指标 R_l 。对于 $n = 1, \dots, 9$, Saaty 给出了 R_l 的值,如表 6-3 所示:

表3 一致性指标 R_l
Table 3 Consistency index R_l

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_l	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

计算一致性比率:

$$CR = C_l / R_l. \tag{5}$$

当 $CR < 0.1$ 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵作适当修正。

(2) 为了将指标值统一量纲,需要对指标进行归一化处理(标准化无量纲处理),将值统一转化到 $[0, 1]$ 范围。具体可采用以下归一化函数进行无量纲化。比例型指标:

$$r_i = \begin{cases} 1 & X_i \geq X_{i_{\max}}; \\ \frac{X_i}{X_{i_{\max}}} & X_{i_{\min}} \leq X_i \leq X_{i_{\max}}; \\ 0 & X_i \leq X_{i_{\min}}. \end{cases} \tag{6}$$

(3) 通过层次分析法,计算出各指标的权重矩阵(*R*),结合风险评价指标 C_0 构建风险性评价的数学模型为:

$$V = \sum_{j=1}^m R(j) \cdot X(i, j). \tag{7}$$

式中: V 为风险性指数; m 为风险性评价指标总数; $R(j)$ 为各评价指标的权重值; $X(i, j)$ 为指标的归一化指数值。

2 江苏省风电场气象灾害特征分析

影响江苏省风电场的主要气象灾害有台风、龙卷风和雷暴。图 1 给出了 1950 - 2009 年 60(a) 江苏省长江以北地区热带气旋、龙卷风、雷暴影响的频次分布。从图 1(a) 中可以看出, 台风频次分布沿海多, 内陆少, 自沿海至内陆呈减少趋势; 1950 - 2009 年江苏省共发生台风 187 次, 其中沿海活动类 44 次, 登陆消失类 41 次, 登陆北上类东 31 次, 登陆北上类中 29 次, 南海穿出类 20 次, 登陆北上类西 17 次, 登陆江苏类 5 次, 南通受台风影响次数最多高达 106 次。从图 1(b) 中可以看出, 龙卷在江苏地区水平分布不均, 东南沿海最多, 达 40 次以上; 西部的洪泽湖地区较少, 不足 10 次。图 1(c) 中雷暴频次分布也存在差异, 中部的里下河地区和洪泽湖地区雷暴较多, 均达 1 500 次以上。

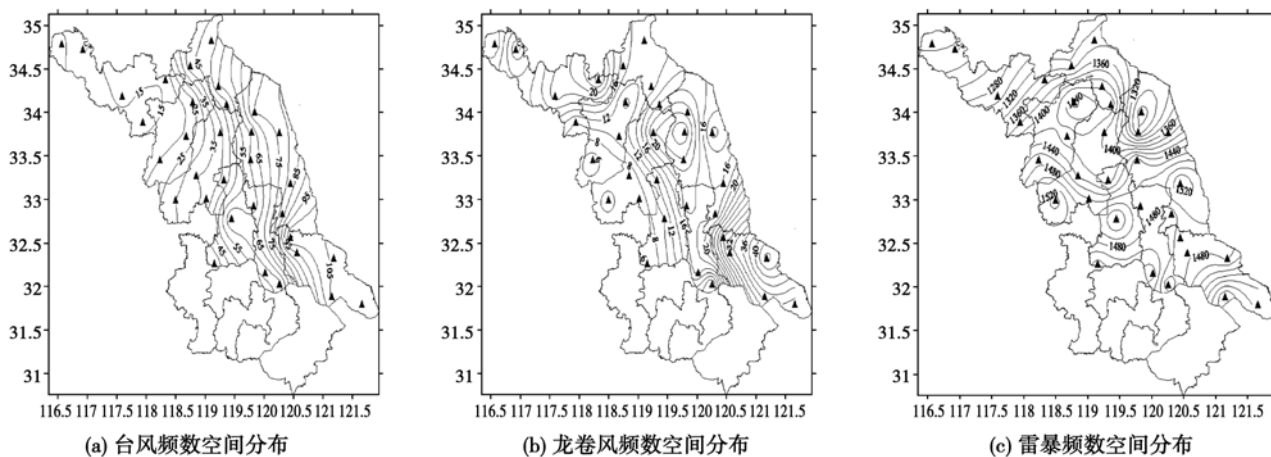


图 1 1950 - 2009 年主要气象灾害频次分布

Fig. 1 Frequency distribution of major meteorological disasters during 1950 - 2009

3 江苏省风电场气象灾害风险评估

3.1 评估指标体系的构建

风险评估指标可以用以下若干方法来确定^[18-20]: 1) 通过灾害个例的分析采用信息量法来确定评价指标; 2) 从不同社会状况出发来理解易损性并确定指标; 3) 根据灾情来反推确定评价指标等。基于上述方法及避免人为性和任意性, 本文确定了以下 6 个评价指标:

(1) 台风密度(C_1): 区域单位面积上研究期限内发生台风的次数, 单位为次 / km^3 , 可根据区域台风统计资料确定。

(2) 龙卷风密度(C_2): 区域单位面积上研究期限内发生龙卷风的次数, 单位为次 / km^3 , 可根据区域龙卷风统计资料确定。

(3) 雷暴密度(C_3): 区域单位面积上研究期限内发生雷暴的次数, 单位为次 / km^3 , 可根据区域雷暴统计资料确定。

(4) 风机密度(C_4): 风机密度是指以各县市为单位的区域面积内风机的规模, 以台 / km^3 为表征单位, 风机密度表征着承灾体易损性目标。

表 4 风电场气象灾害风险评估指标

Table 4 Risk assessment indices of wind-powered meteorological disasters

影响层	指标层	影响方向
危险性	台风密度 / (次 · km^{-3})	+
	龙卷密度 / (次 · km^{-3})	+
	雷暴密度 / (次 · km^{-3})	+
易损性	风机密度 / (台 · km^{-3})	+
	单机发电功率 / MW	+
防灾减灾能力	人均 GDP / (万元 / 人)	-

(5) 单机发电功率(C_5):单机发电功率即单台风机的发电输出效率,算法是: $P = \frac{1}{8}\pi\rho D^2 v^3 C_p y_t y_g$,单位为 kg/m^3 , D 是风力发电其中 ρ 是空气密度,机风轮直径,单位是 m , v 是风速,单位 m/s , C_p 是风轮的功率参数, y_t 风力发电机传动装置的机械效率, y_g 是发电机的机械效率。

(6) 人均GDP(C_6):人均GDP直接反映了区域的社会经济发展水平。人均GDP越高,区域社会现代化程度越高,气象灾害对于风电场可能造成的损失就越小。具体数据取自江苏省统计年鉴。

表格4中对各风险评估指标对风电场影响方向作了一个汇总:

3.2 判断矩阵、层次单排序及一致性检验

(1) 相对目标层,气象状况要比风电场的状况稍重要,而龙卷风状况比社会经济明显重要,假设不同县市,同样的状况的风电场遭受同样的气象灾害,社会经济好的县市要比社会经济落后的县市抗灾能力强,但由于风机遭龙卷风袭击造成的是毁灭性的破坏,社会经济的好差对目标层的影响不大。同样也可以认为风电场状况较社会经济稍重要与相同重要之间,基于此,建立对比矩阵如表5:对比矩阵计算结果是:最大特征为3.00338,C.I. = 0.00169,C.R. = 0.00325 < 0.1说明对比矩阵一致性检验合格。

表5 气象灾害对风电场的影响(A)——风险因素(B)对比矩阵
Table 5 Contrast matrix between influence (A) of meteorological disasters on wind-powered field and risk factors (B)

A	B_1	B_2	B_3	W	排序
B_1	1	3	5	0.64837	1
B_2	1/3	1	2	0.22595	2
B_3	1/5	1/2	1	0.12203	3

(2) 台风密度和龙卷风密度相当于雷暴密度 C_3 强烈重要。经列向量归一化,求和再归一化得到:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1 \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} 0.455 & 0.455 & 0.455 \\ 0.455 & 0.455 & 0.455 \\ 0.091 & 0.091 & 0.091 \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} 1.365 \\ 1.365 \\ 0.273 \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} 0.455 \\ 0.455 \\ 0.091 \end{bmatrix}$$

(3) 风机密度相对于单机发电量稍显重要。所以构建如下的矩阵:

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}, W_2 = [0.75]$$

计算得 $\lambda_{\max} = n = 2$,则 C.I. = 0,C.R. = C.I. /R.I. = 0,通过一致性检验。

(4) 对于社会经济而言,人均国民生产总值比人口密度略微重要,构造以下的矩阵:

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}, W_2 = [0.66]$$

计算得 $\lambda_{\max} = n = 2$,则 C.I. = 0,C.R. = C.I. /R.I. = 0,通过一致性检验。

由上述得出的各层影响因子的权重,可得出各因子的总权重,如表格6所示:

3.3 风电场的综合气象灾害风险度及其区划

根据以上评估指标的权重值及各指标对风险度影响方向,风险性评价的数学模型公式(7)可表示为:

$$V = 0.3X_1 + 0.3X_2 + 0.05X_3 + 0.17X_4 + 0.06X_5 + 0.12X_6 \quad (8)$$

结合指标数据可以得到江苏省各县市建风电场的综合气象灾害风险值,风险值结果显示,江苏省长江以北各县市风险值呈梯度分布。南通各县市风险值均高于其他县市,其中如东县最高,风险值高达0.82;其次是盐城各县市,如大丰风险值为0.57;宿迁徐州各县市风险值较低,其中徐州沛县最低,风险值为0.21。结合风险值生成风险值空间分布图(如图2)。

根据上述求得的风险度结果,按0.75 - 1,0.5 - 0.75,0.25 - 0.5,0 - 0.25将其划分

表6 C层各因子——风电场的龙卷风影响(A)的总权重
Table 6 C level of each factor—the total weight of the tornado wind effects (A)

	$B_1(0.65)$	$B_2(0.23)$	$B_3(0.12)$	总权重(R)
C_1	0.455			0.3
C_2	0.455			0.3
C_3	0.091			0.05
C_4		0.75		0.17
C_5		0.25		0.06
C_6			1	0.12

为极高风险、高风险、中风险和低风险。可以得到南通和盐城区域为风电场气象灾害的极高风险区和高风险区,而同样为沿海城市的连云港与苏中地区的泰州市、扬州市和苏北区的淮安市为风电场气象灾害的中风险区,宿迁和徐州均为风电场气象灾害的低风险区。就沿海岸的风能资源开发重点地区而言,气象灾害风险自南向北逐渐降低,这与气象灾害的空间分布特征和强度是一致的。由此可见,利用层次分析法得到的气象灾害风险分布与气象灾害观测事实相符。



图 2 江苏长江以北各县市风电场的气象灾害风险

Fig. 2 Wind-powered meteorological disaster risk of cities and counties on the north of Yangtze River in Jingsu Province

4 结论与讨论

(1) 在建立了以江苏省长江以北县市为例的风电场气象灾害风险性评价模型基础上,确定台风密度、龙卷风密度、雷暴密度、风机密度、单机发电功率、人均 GDP 这 6 个因子作为评估指标。各指标之间都有很好的独立性,均能够从相应角度反映风电场的气象灾害风险指数。

(2) 该研究采用层次分析法进行了风险评价,评价结果表明,江苏省长江以北的沿海城市:南通和盐城区域为风电场气象灾害的极高风险区和高风险区,而同样为沿海城市的连云港与苏中地区的泰州市、扬州市和苏北地区的淮安为风电场气象灾害的中风险区,宿迁和徐州均为风电场气象灾害的低风险区。这与气象灾害的水平强度和分布具有很好的一致性,能很好地反映江苏省气象灾害风险特征。

(3) 针对风电场气象灾害的风险评估结果,沿海城市既是江苏省重点发展风电行业区域又是风险气象灾害风险度较高的城市,所以在风电机组的设计、制造和安装过程中,更加重视采取防台风、防雷击措施,使气象灾害造成的损失减到最小。为减少台风对风电机组尤其是对叶片造成的损伤,可以针对主梁与翼壳之间粘结强度不够问题,采取对叶片后翼连接加设铆固装置等,对叶片局部构造改进。日本设计出智能偏航控制装置,以降低强风所增加的机组载荷,该装置的应用可使强风来临时叶片和塔架负载分别降低 25% 和 30%,从而提高风力机的可靠性。目前国内已有一项相关专利——一种能抗台风的风力发电机。另外应加强风电机组的防雷设计,根据不同的雷击损坏机理,对叶片、机舱、轴承等机械部件以及信号、控制线路等采取不同的防雷措施。防雷保护的主要思路是将雷电流安全地从雷击点传导到接地轮毂,从而避免叶片内部雷电电弧的形成。目前的风电机组的防雷击措施主要有:利用新材料防雷电、利用避雷网防雷电、利用避雷器防雷电、利用新技术监测雷电。

(4) 本文结合各个县市的主要气象灾害、风能状况、社会经济指标,以各县市为风电场的气象灾害风险评估单元,构建风电场气象灾害风险评估模型,对江苏省长江以北各县市建风电场的气象灾害进行风险评估与区划。研究中还存在一些问题,如江苏风力发电正处于起步阶段,缺少风险评估分析案例,无法得到受灾因子数据,另外开展风电场气象灾害风险评估研究是首次尝试和探索,其技术方法还有待于在以后的研究中不断的改进和完善,评估模型、指标权重的确定等方面有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 王锬. 浅析福建省风力发电产业发展的金融支持[J]. 能源与环境, 2011, 3(31): 31-34.
WANG Kun. Analysis of wind power generation in Fujian Province industrial development financial support [J]. Energy and Environment, 2011, 3(31): 31-34. (in Chinese)
- [2] 贺德馨. 中国风能发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(6): 95-100.
HE Dexin. China wind power development strategy research [J]. China Engineering Science, 2011, 13(6): 95-100. (in Chinese)
- [3] 陈严, 张锦源, 叶枝全. 风力机在恶劣环境下的可靠性研究方法[J]. 风力发电, 2005(3): 20-24.
CHEN Yan, ZANG Jinyuan, YE Zhiquan. Wind turbine in the harsh environment of reliability research methods [J]. Wind Power, 2005(3): 20-24. (in Chinese)
- [4] 张礼达, 张彦南. 气象灾害对风电场的影响分析[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(11): 28-30.
ZHANG Lida, ZHANG Yannan. The meteorological disaster on wind power field effect analysis [J]. Electric Power Science and Engineering, 2009, 25(11): 28-30. (in Chinese)
- [5] 汪元辉. 安全系统工程[D]. 天津: 天津大学, 1999.
WANG Yuanhui. Safety System Engineering [D]. Tianjin: Tianjin University, 1999. (in Chinese)
- [6] Korkmaz K A. Earthquake disaster risk assessment and evaluation for Turkey[J]. Environmental Geology, 2009, 57(2): 307-320.
- [7] 杨慧娟, 李宁, 雷颀. 我国沿海地区近54 a台风灾害风险特征分析[J]. 气象科学, 2007, 27(4): 413-418.
YANG Huijuan, LI Ning, LAI Yang. Our country coastal area of nearly 54 a typhoon disaster risk analysis [J]. Meteorological Science, 2007, 27(4): 413-418. (in Chinese)
- [8] Karimi I, Hüllermeier E. Risk assessment system of natural hazards: a new approach based on fuzzy probability[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2007, 158(9): 987-999.
- [9] Liu X, Zhang J, Cai W, et al. Information diffusion - based spatio - temporal risk analysis of grassland fire disaster in northern China[J]. Knowledge - Based Systems, 2010, 23(1): 53-60.
- [10] 峰本, 彭俊龙, 黄滢. 基于信息扩散理论的热带气旋灾害风险评估[J]. 气象研究与应用, 2009, 30(1): 23-26.
LU Feng, PENG Junlong, HIANG Ying. Based on theory of information diffusion on tropical cyclone disaster risk assessment [J]. Meteorological Research and Application, 2009, 30(1): 23-26. (in Chinese)
- [11] Astellanos Abella E A, Van Westen C J. Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi - criteria evaluation[J]. Landslides, 2007, 4(4): 311-325.
- [12] 毛新虎, 刘占魁, 李秀青. 灰色聚类法在矿山地质灾害危险性分区评价中的应用[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2008, 34(3): 545-551.
MAO Xihu, LIU Zhankui, LI Xiuqing. The grey clustering method in the mine geology disaster risk zoning evaluation [J]. Journal of Southwest University for Nationalities : Natural Science Edition, 2008, 34(3): 545-551. (in Chinese)
- [13] Wu J D, Li N, Yang H J. Risk evaluation of heavy snow disasters using BP artificial neural network: the case of Xilingol in Inner Mongolia[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2008, 22(6): 719-725.
- [14] Meyer V, Haase D, Scheuer S. A multicriteria flood risk assessment and mapping approach[J]. Flood Risk Management: Research and Practice, 2009: 1687-1693.
- [15] 金春鹏, 刘勇, 周莉雅. 江苏沿海风能开发与大规模非并网风电产业基地建设研究[J]. 能源研究与利用, 2010, 2(8): 8-12.
JIN Chunpeng, LIU Yong, ZHOU Liya. Jiangsu coastal wind power development and large - scale non - grid - connected wind power industry base construction study [J]. Energy Research and Utilization, 2010, 2(8): 8-12. (in Chinese)
- [16] 白雪. 基于MM5模式的江苏省风能资源评估及环境效益评价[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
BAI Xue. The MM5 Model Based on Evaluation of Wind Energy Resources in Jiangsu Province and Environmental Benefit Evaluation [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [17] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法[M]. 北京: 中国物价出版社, 2001.
SU Weihua. Multiple Index Comprehensive Evaluation Theory and Method [M]. Beijing: China Price Press, 2001. (in Chinese)
- [18] Cardona O D, Hurtado J E, Chardon A C, et al. Indicators of Disaster Risk and Risk Management Summary Report for WCDR[R]. Program for Latin America and the Caribbean IADB UNC/IDEA, 2005: 1-47.
- [19] Pelling M, Maskrey A, Ruiz P, et al. United Nations Development Programme. A Global Report Reducing Disaster Risk: A challenge for Development [R]. New York: UNDP, 2004: 1-146.
- [20] Dille M, Chen R S, Deichmann U, et al. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis[R]. Washington DC: Hazard Management Unit, World Bank, 2005: 1-132.