



论文

登陆中国大陆台风影响力研究

张庆红^{①*}, 韦青^②, 陈联寿^③

① 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871;

② 中国气象局国家气象中心, 北京 100081;

③ 中国气象局气象科学研究院, 北京 100081

* E-mail: qzhang@pku.edu.cn

收稿日期: 2009-11-16; 接受日期: 2010-04-07

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2009CB421500)和国家自然科学基金项目(批准号: 40975059, 40921160380)资助

摘要 台风是影响中国的重要高影响天气系统之一, 综合考虑登陆中国大陆台风的大风灾害和强降水灾害, 探讨台风的影响力指数的建立方法, 为台风灾害预警的标准化提供理论依据. 利用登陆中国大陆台风造成的直接经济损失表征台风的影响能力, 定义了考虑台风尺度的总破坏力指数(TDI)和水汽总量指数(TVI), 统计分析了 2001~2007 年 30 个登陆台风的经济损失与其影响陆地前 TDI 和 TVI 的关系, 发现台风影响力同其影响陆地前 TVI 呈显著正相关, 两者的相关系数达到了 0.751, 而与影响陆地前 TDI 的相关为 0.59, 与台风的强度(中心附近最大风速)的相关系数只有 0.345. 进一步研究发现较高 TVI 的台风在登陆后引发了较强的降水, 从而导致了较大的直接经济损失. 结合卫星遥感的水汽和海洋表面风速, 定义了台风影响力指数, 其与经济损失的相关系数达到 0.769. 30 个登陆大陆台风中影响力指数最高的是 0606 号碧利斯(Bilis), 其次是 0509 号麦莎(Matsa). 使用系统聚类法将台风的影响力分成 5 级. 在 30 个台风中, 影响力等级最高的 5 级台风有 1 个, 占 3%; 影响力等级为 4 级的有 3 个, 占 10%; 影响力等级为 3 级和 2 级的各有 7 个, 各占 23%; 影响力等级为 1 级的有 12 个, 占 40%.

关键词台风
影响力指数
水汽
经济损失

热带气旋(TC)是一种高影响天气, 在西北太平洋被称为台风, 在东北太平洋和大西洋被称为飓风. 热带气旋的灾害由暴雨、大风和风暴潮三部分组成^[1]. 传统上用中心地面最低气压和中心附近最大风速这两个参数来表征热带气旋的强度, 由于实际业务当中, 这两个量是线性相关的, 现行热带气旋强度的级别都是根据其中心附近最大风速来划分. 我国 2006 年出台的台风强度标准按中心附近最大风速划分为 6 类: 热带低压(10.8~17.1 m/s), 热带风暴(17.2~24.4 m/s), 强热带风暴(24.5~32.6 m/s), 台风(32.7~41.4

m/s), 强台风(41.5~51.0 m/s)和超强台风(>51.0 m/s). 美国对飓风强度划分为 Saffir-Simpson 标准, 把飓风按照其中心附近最大风速分成 5 级, 一级飓风为 33.1~42.5 m/s, 二级飓风为 42.6~49.2 m/s, 三级飓风为 49.3~58.1 m/s, 四级飓风为 58.2~69.2 m/s, 五级飓风为大于 69.3 m/s^[2]. 这些对于台风的分级都是只考虑了风灾和一定程度上的风暴潮灾害, 没有考虑暴雨引发的洪水, 泥石流等灾害^[2], 而暴雨灾害往往是热带气旋主要的灾害^[1]. 例如, 2006 年的热带风暴碧利斯(Bilis)登陆我国后在陆地上维持了 5 天, 造成了

特大暴雨, 引发洪水及山体滑坡等灾害, 所造成的直接经济损失为 459.1 亿元, 是建国以来经济损失最大的一个台风. 同年登陆的台风桑美(Saomei)是建国以来强度最强的登陆台风, 其登陆时的中心最大风速达到 64 m/s, 但是其登陆后迅速消失, 造成的经济损失只有碧利斯的 1/2 左右, 为 258.7 亿元. 因此台风中心的最大风速不能够完全表征其对社会经济的影响力. 可见传统参数存在缺陷, 本文引入台风尺度和总水汽量概念, 构造一个台风影响力指数, 从而弥补传统方法的缺陷.

在国外, Emanuel^[3]曾经对热带气旋的破坏能力做过定义, 台风瞬时耗散动能(P)可以用以下公式表示:

$$P = 2\pi \int_0^{r_0} \rho C_D V^3 r dr, \quad (1)$$

其中 r 是台风半径, r_0 是台风外围边界半径, ρ 是空气密度, C_D 是表面拖曳系数, V 是风速; 如果考虑不同的热带气旋, 不同半径内 ρC_D 为常数, 而对于 P 的主要贡献来自台风最大风速圈, 热带气旋潜在破坏能力可以用简单的能量耗散指数 PDI(Power Dissipation Index)表示:

$$PDI = \int_0^{\tau} V_{\max}^3 dt, \quad (2)$$

其中 $V_{\max}$ 为中心附近最大风速, τ 为热带气旋的维持时间^[4], 这些关于热带气旋潜在破坏能力的量仅考虑了风的破坏力, 并没有考虑暴雨引发的灾害.

在我国台风灾害研究方面, Zhang 等^[5]等分析了 1983~2006 年影响中国的台风造成的灾害损失, 发现过去 24 年台风导致的直接经济损失有明显的上升趋势, 但通过每年总 GDP(Gross Domestic Product)的标准化处理发现这个上升趋势首要是由中国经济发展造成的, 台风本身引发的灾害损失并没有明显的趋势. 对台风灾害的评价和预评估的研究都是采用统计方法, 建立登陆台风的风力与人员伤亡和经济损失的关系^[6,7], 没有考虑暴雨灾害往往比大风灾害更为严重. 本文将利用登陆台风的经济损失, 台风登陆前海洋表面风速及其所携带水汽探讨台风影响力的定义和分级方法.

1 资料和方法

本研究所用资料: 1) 2001~2007 年台风造成的直

接经济损失, 资料来源为民政部; 标准化处理台风直接经济损失所用的 2001~2007 年通货膨胀率及 GDP 增长率来源于 <http://www.econstats.com>; 2) 台风所携带水汽资料来源于 SSM/I 2001~2007 年逐日卫星资料, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (http://www.ssmi.com/ssmi/ssmi_description.html); 3) 台风风场资料源于 QuickScat 卫星遥感, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (http://www.ssmi.com/qscat/qscat_browse.html); 4) CMORPH(Climat prediction center MORPHing method) 逐 3 h 卫星反演降水资料, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 资料来源 http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/janowiak/cmorph_description.html; 5) 台风的路径和外围闭合等压线半径资料来源于 JTWC (Joint Typhoon Warning Center).

JTWC 的台风外围半径定义为海平面气压最外围闭合等压线半径, 因 2004 年 JTWC 半径资料缺乏, 所以只考虑了 2001~2003 和 2005~2007 年的登陆中国大陆的台风个例, 其中 0601 号珍珠、0603 号杰拉华、0707 号帕布和 0716 号罗莎是擦过大陆, 造成的经济损失不足以表现其影响能力, 没有被统计. 将剩余的 30 个登陆台风作为本文的研究对象, 表 1 列出了所选 30 个台风的编号及所造成的标准化经济损失. 台风降水的分离采用了任福民等^[8]提出的台风降水的客观识别方法, 并根据格点降水资料的网格分布特点对原方法中邻站距离(200 km)这一参数进行调试, 经过试验将邻站定义的距离(d)修正为: 北纬 20° 以北 $d=110$ km, 北纬 20° 以南 $d=120$ km^[9].

在数学统计中用了聚类统计方法^[10]和统计多元回归方法^[10], 鉴于 Emanuel^[3]定义的 PDI 指数没有考虑台风的尺度和非对称结构, 我们定义台风总破坏力为卫星遥感观测的洋面风速的三次方在台风外围半径内的面积积分, 实际上因为本文所用卫星资料观测的分辨率相同, 我们简单地把台风外围半径内所有观测点的风速的三次方累加起来以表征台风的总破坏能力指数(TDI). 台风的影响半径内的总水汽量 TVI (Total column water Vapor Index)也采用同样的简化方法, 即将台风半径内卫星遥感所有观测点的整层水汽量相加:

$$TDI = \sum_{i=1}^n V_i^3, \quad (3)$$

$$TVI = \sum_{i=1}^n CWV_i, \quad (4)$$

表 1 2001~2007 年 30 个登陆台风综合信息

TC 序号	TC 编号	名字	标准化直接经济损失(亿元)	强度等级	强度 (m/s)	强度 排名	台风中心位置	外围半径 (km)	TVI ($\times 10^4$ mm)	影响力 指数 I	高影响指 数排名	影响力 等级
1	200107	玉兔 Yutu	19.59	台风	41.2	11	21.2°N, 112.4°E	250.02	1.89	34.77	22	1
2	200108	桃芝 Toraji	76.92	台风	38.6	12	23.2°N, 122.0°E	407.44	4.99	146.85	9	3
3	200118	百合 Nari	1.33	热带低压	15.4	28	22.7°N, 117.7°E	203.72	1.24	0.02	30	1
4	200215	北冕 Kammuri	116.15	热带风暴	23.1	22	21.5°N, 115.3°E	259.28	2.10	48.56	20	1
5	200217	黄蜂 Vongfong	59.25	热带风暴	18	25	17.3°N, 111.9°E	222.24	1.59	18.05	26	1
6	200219	森拉克 Sinlaku	165.5	强台风	46.3	9	26.5°N, 125.8°E	259.28	2.07	75.33	16	2
7	200221	黑格比 Hagupit	7.07	热带风暴	18	25	20.3°N, 116.8°E	222.24	1.47	10.90	29	1
8	200308	天鹅 Goni	3.63	强热带风暴	33.4	16	17.6°N, 113.6°E	222.24	1.54	15.83	27	1
9	200309	伊布都 Imbudo	62.04	强台风	46.3	9	19.4°N, 114.2°E	277.80	2.42	74.53	17	2
10	200310	莫拉克 Morakot	45.19	强热带风暴	33.4	16	22.4°N, 121.1°E	250.00	1.94	27.00	25	1
11	200312	科罗旺 Krovanh	59.95	台风	36	14	17.9°N, 116.8°E	250.02	1.90	42.21	21	1
12	200315	杜鹃 Dujuan	46.88	强台风	64.3	3	21.2°N, 121.8°E	287.06	2.42	67.76	18	2
13	200323	尼伯特 Nepartak	30.71	强热带风暴	33.4	16	13.9°N, 115.9°E	259.28	2.00	30.03	24	1
14	200505	海棠 Haitang	159.36	超强台风	59.2	4	23.0°N, 124.0°E	370.00	4.26	207.01	4	4
15	200508	天鹰 Washi	0.59	热带风暴	18	25	18.4°N, 111.5°E	351.88	3.90	107.91	12	2
16	200509	麦莎 Matsa	266.68	台风	38.6	12	21.8°N, 125.7°E	463.00	6.67	241.85	2	4
17	200510	珊瑚 Sanvu	44.5	强热带风暴	30.9	19	20.5°N, 119.2°E	370.00	4.29	152.62	8	3
18	200513	泰利 Talim	227.07	强台风	56.6	7	23.8°N, 122.9°E	444.00	5.73	229.96	3	4
19	200515	卡努 Khanun	209.03	强台风	56.6	7	25.2°N, 124.4°E	379.25	4.19	138.36	11	3
20	200518	达维 Damrey	180.5	台风	30.9	19	19.3°N, 113.9°E	407.00	4.73	167.52	6	3
21	200519	龙王 Longwang	115.45	超强台风	61.7	3	23.1°N, 123.8°E	370.40	3.67	105.20	13	2
22	200606	碧利斯 Bilis	459.11	强热带风暴	23.1	22	24.8°N, 122.4°E	509.30	8.35	319.40	1	5
23	200607	格美 kaemi	75.71	台风	30.8	19	22.4°N, 122.1°E	287.06	2.58	79.39	15	2
24	200608	派比安 Prapiroon	103.52	热带风暴	23.1	22	17.7°N, 116.5°E	277.80	2.37	56.24	19	1
25	200610	桑美 Saomei	258.73	超强台风	72	1	25.3°N, 125.3°E	333.36	3.47	94.67	14	2
26	200703	桃芝 Toraji	1.02	热带低压	7.7	30	17.3°N, 111.5°E	222.24	1.53	11.28	28	1
27	200709	圣帕 Sepat	100.95	超强台风	59.1	4	21.9°N, 122.8°E	388.92	4.63	170.95	5	3
28	200713	韦帕 Wipha	97.36	强台风	59.1	4	23.3°N, 125.7°E	388.92	4.74	156.02	7	3
29	200714	范斯高 Francisco	2.44	热带低压	10.3	29	20.4°N, 116.9°E	259.28	2.10	32.14	23	1
30	200715	利奇马 Lekima	6.04	台风	36	14	17.6°N, 109.9°E	379.66	4.45	143.76	10	3

V 为卫星遥感的海洋表面风速, CWV 为卫星遥感的整层水汽, n 为台风外围半径内观测的格点数. 如果因为地形或极轨卫星观测范围不全等原因造成的个别格点缺测, 其 CWV 或 V 由外围半径内其他所有观测点的平均值替代. 台风外围云带第一次抵达海岸的时间定义为影响开始时间, 影响开始时间台风的中心位置和外围半径见表 1. 由于极轨卫星观测时间有限, 水汽和风速的统计时间取距离影响开始时间最近的一次观测.

2 台风TVI和TDI与经济损失的相关

首先图 1 给出了台风影响陆地开始时间中心最

低气压、中心附近最大风速和标准化直接经济损失的序列与相关. 从统计结果可以看到, 台风引起的标准化直接经济损失与其影响陆地前最低气压的相关性较差, 相关系数仅为-0.341; 与最大风速的相关性也较差, 仅为 0.345, PDI 与经济损失的相关为 0.327(图略). 因此, 台风开始影响陆地时间的中心最大风速和中心最低气压都不足以全面衡量台风登陆后的影响力, 其对经济损失预估能力较弱, 因此 2006 年的碧利斯和桑美的强度和所造成经济损失更无相关性.

造成台风经济损失的原因除了大风以外, 还有持续暴雨所带来的洪涝灾害, 因此下面我们从水汽角度分析. 以 2006 年碧利斯和桑美为例(图 2),

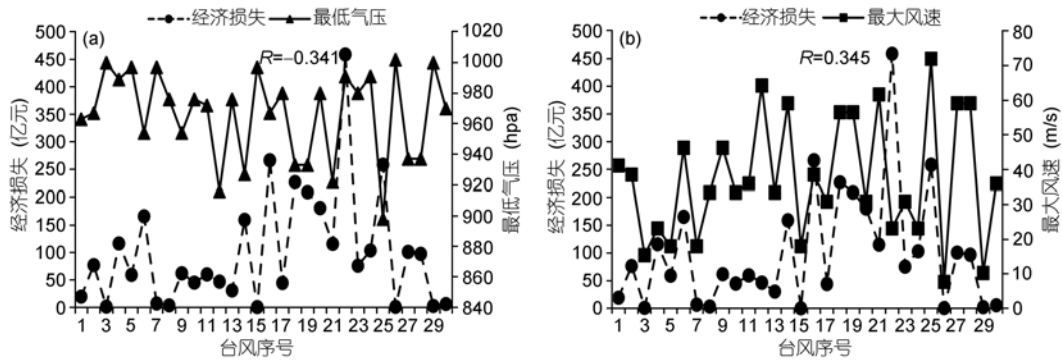


图1 台风影响陆地开始时间中心最低气压(a)、最大风速(b)与标准化直接经济损失的相关性

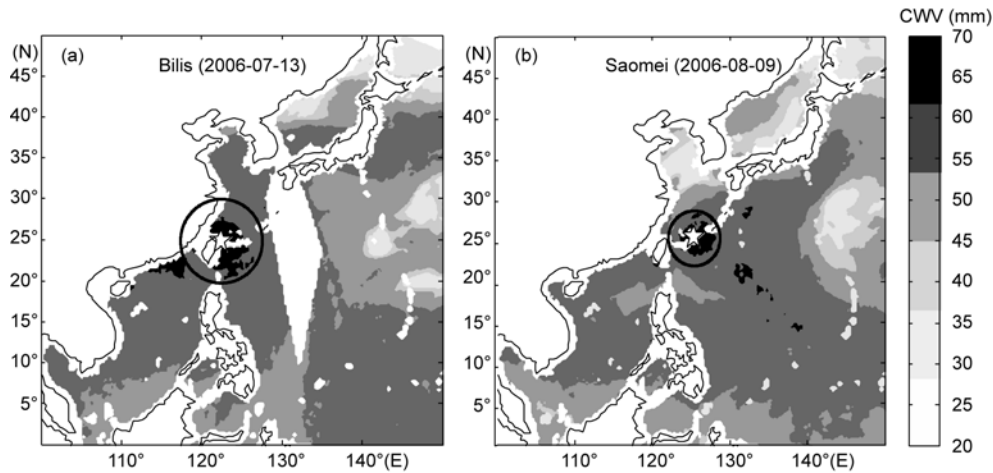


图2 台风碧利斯(a)和桑美(b)影响陆地开始时间 SSM/I 卫星遥感 CWV 分布

五角星表示台风中心位置, 黑色圆圈表示台风外围半径

选取其影响陆地开始时间的7月13日和8月9日, 分别给出了台风开始影响时间的整层水汽分布. 可以发现碧利斯的整层水汽含量超过 62 mm 的面积远远超出了桑美. 进一步计算最外围半径内的台风 TVI 来表征台风的潜在的总潜热势能. 两个台风所含 TVI 分别为 69013 和 28303 mm, 强度弱的碧利斯是一个相对“湿”的台风, 而强度强的桑美则是一个相对“干”的台风. 进一步统计了 2001~2003 及 2005~2007 年间的 30 个台风在影响陆地开始时间的台风 TVI 并列入表 1. 可以看到, 所含水汽最多的是 0606 号碧利斯, 其次是 0509 号麦莎, 这两个台风在陆地上引起较强的降雨并维持了较长时间, 从而造成较大损失.

图3给出的是台风影响陆地开始时间 TVI 和 TDI 指数与标准化直接经济损失的序列与相关. 台风 TVI

与标准化的经济损失的相关系数在 99%置信水平上达到了 0.751, TDI 指数与标准化直接经济损失的相关系数在 99%置信水平上也达到 0.59, 可见预估台风灾害用台风外围半径内的总水汽量比用 PDI 更为可靠, 而考虑台风尺度的 TDI 也比单单考虑中心最大风速的 PDI 更能客观地表征台风造成的经济损失. 这就解释了超强台风桑美影响力反而不如热带风暴碧利斯: 一方面碧利斯的尺度是桑美的 3 倍, 另一方面碧利斯所携带水汽量是桑美的 2 倍.

下面我们尝试从物理机制角度解释热带气旋所携带水汽与直接经济损失的较高相关性. 考虑到真正造成洪涝灾害的是降雨强度, 我们定义了一个雨强参数 L :

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n l_{i,t}, \tag{5}$$

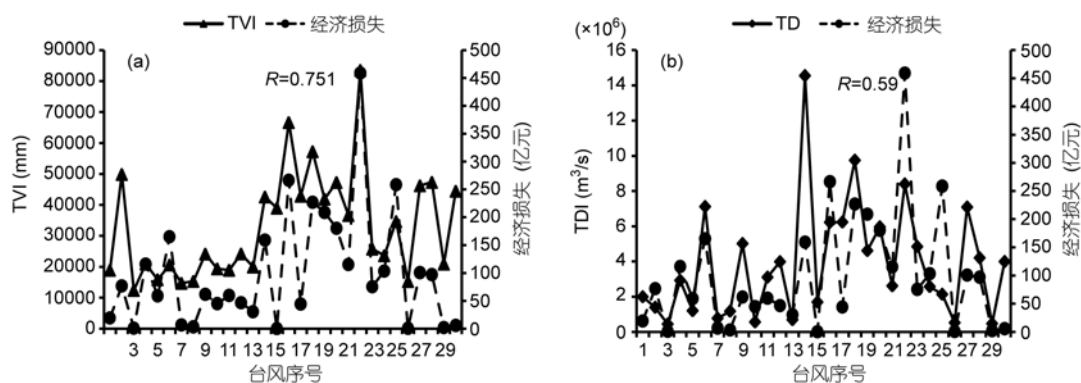


图 3 台风影响陆地开始时间 TVI(a)和 TDI(b)与标准化直接经济损失的序列相关性

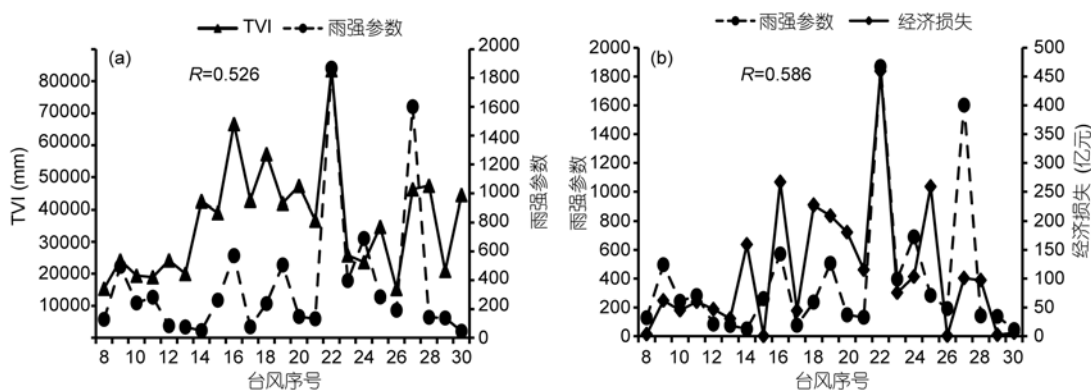


图 4 台风影响陆地开始时间台风 TVI 与雨强参数(a)和雨强参数与经济损失(b)的相关序列

其中

$$l_{i,t} = \begin{cases} 1, & 10 \text{ mm} > x_{i,t} \geq 5 \text{ mm}, \\ 2, & 20 \text{ mm} > x_{i,t} \geq 10 \text{ mm}, \\ 3, & x_{i,t} \geq 20 \text{ mm}, \end{cases} \quad (6)$$

x 为一个陆地上格点单位时间热带气旋降水量; n 为台风降水资料总时次(每天 8 次); m 为单位时间陆上台风降水格点数。

用台风降水客观分离法分离 CMORPH 卫星降水资料得到每 3 h 的台风陆地降水计算雨强参数, 与其登陆前台风 TVI 作相关, 发现相关系数 $R=0.526$, 超过了 99% 的置信水平, 而雨强参数同标准化直接经济损失的相关则达到 $R=0.586$, 置信水平为 99%(图 4). 即登陆前有较高水汽总量的台风在陆地上引发了较强的降水, 从而导致了较大的直接经济损失。

3 台风影响力指数

根据前面的分析发现, 台风所携带水汽与直接经

济损失相关程度最高, 这里综合考虑台风 TDI 和 TVI, 采用多元回归方法, 定义了表征台风影响力的指数 I :

$$I = 1.499 \times 10^{-6} \text{TVI} \times L + 6.657 \times 10^{-6} \text{TDI} - 49.732, \quad (6)$$

其中 $L=2501.6 \text{ J/g}$ 为 0°C 时水的汽化潜热, 该指数与标准化的经济损失的相关系数 $R=0.769$, 超过了 99% 的置信水平, 比单纯考虑水汽的相关性有所增加. 表 1 所示为我们得到的台风影响力指数序列, 其中影响力指数最高的是 0606 号碧利斯, 其次是 0509 号麦莎. 在 30 个台风当中, 如果按照台风登陆前的强度排名, 2006 年的桑美排名第一, 影响力指数却处于第 14 位; 而 0606 号碧利斯按照台风的强度在 30 个台风中排名 22 位, 而影响力指数却跃为第一位. 根据 30 个台风的影响力指数序列, 采用了系统聚类分析方法, 将其分成 5 个等级(表 2). 在 30 个台风中, 影响力等级为 5 级的有 1 个, 占 4%; 4 级的有 3 个, 占 10%; 3 级的有 7 个, 占 23%; 2 级的有 7 个, 占 23%; 1 级的有 12 个, 占 40%.

表2 2001~2007年30个登陆中国大陆热带气旋影响力分级

级别	影响因子区间	热带气旋个数(百分比)
5	$I>300$	1(4%)
4	$200<I\leq 300$	3(10%)
3	$120<I\leq 200$	7(23%)
2	$60<I\leq 120$	7(23%)
1	$I\leq 60$	12(40%)

4 结论

台风是影响我国的高影响天气,而其影响力从来没有被定义和定量描述过. 本文用登陆中国大陆的台风所造成的经济损失代表台风的影响力,选取了2001~2007年的30个登陆台风,研究了台风的最低气压、最大风速和所携带水汽(TVI),以及总破坏能力(TDI)与其影响力的关系. 统计发现:

(1) 台风引起的标准化直接经济损失与其影响陆地前的最大风速的相关系数为0.327,从动力学角度不足以全面衡量台风的影响力.

(2) 考虑了台风尺度以后的TDI指数与标准化

经济损失的相关系数达到0.59.

(3) 台风造成的标准化直接经济损失同台风影响陆地前所携带水汽呈显著正相关,两者的相关系数在99%置信水平上达到了0.751. 从热力角度考虑的水汽特征明显比传统意义上的强度更能表征台风的影响力.

(4) 在99%置信水平上,台风所携带水汽与雨强参数的相关系数 $R=0.526$,而雨强参数同标准化直接经济损失的相关则达到 $R=0.586$,即有较高水汽含量的台风在陆地上引发了较强的降水,从而导致了较大的直接经济损失. 此模型能从物理机制上较好解释水汽同直接经济损失之间的关系.

(5) 定义了台风影响力指数,其能客观地反映台风的影响能力,此指数在台风登陆前对台风在陆地引发的灾害具有预测能力.

经济损失也受人为因素影响,不能够严谨地代表台风的影响力. 此模型从宏观上定义了台风影响力指数,所选的台风个例仅有30个,还需要有更多的资料进行验证.

致谢 感谢评审人提出的建设性意见.

参考文献

1 陈联寿,丁一汇. 西北太平洋台风概论. 北京: 科学出版社,1979

2 National Hurricane Center. The Saffir-Simpson Hurricane wind scale (experimental). <http://www.nhc.noaa.gov/aboutsshs.html>, 2009

3 Emanuel K A. The power of a hurricane: An example of reckless driving on the information superhighway. Weather, 1998, 54: 107—108

4 Emanuel K A. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Nature, 2005, 436: 686—689

5 Zhang Q, Wu L, Liu Q. Tropical cyclone damages in China: 1983—2006. Bull Am Meteorol Soc, 2009, 90: 489—495

6 钱燕珍,何彩芬,杨元琴,等. 台风灾害指数的估算与应用方法. 气象, 2001, 27: 14—24

7 樊琦,梁必骐. 台风灾害经济损失的模糊数学评测. 气象科学, 2000, 20: 360—366

8 任福民, Gleason B, Easterling D. 一种识别台风降水的数值方法. 热带气象学报, 2001, 17: 308—313

9 韦青. 西北太平洋台风降水特征及影响力研究. 硕士学位论文. 北京: 北京大学物理学院, 2009

10 马开玉,丁裕国,屠其璞,等. 气候统计原理与方法. 北京: 气象出版社,1993. 139—180