任国玉，陈峪，邹旭恺，等. 2010. 综合极端气候指数的定义和趋势分析 [J]. 气候与环境研究，15 (4)：354－364. Ren Guoyu，Chen Yu，Zou Xukai，et al. 2010. Definition and trend analysis of an integrated extreme climatic index [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese)，15 (4)：354－364.

综合极端气候指数的定义和趋势分析

任国玉[1] 陈峪[1] 邹旭恺[1] 周雅清[1,2]
王小玲[1] 江滢[1] 任福民[1] 张强[1]

1 中国气象局气候研究开放实验室，国家气候中心，北京 100081
2 山西省晋中市气象局，晋中 030600

摘 要 综合极端气候指数对于极端气候变化监测、整体认识区域极端气候变化趋势及其原因和影响，具有实际意义。根据中国常年极端气候特点和不同种类极端气候事件的经济社会影响，选取全国平均高温日数、低温日数、强降水日数、沙尘天气日数、大风日数、干旱面积百分率和登陆热带气旋频数等 7 种极端气候指标，定义两个综合极端气候指数，分别为 7 种极端气候指标简单（等值权重）合成的综合指数 I 和加权（差异权重）合成的综合指数 II。综合指数 II 主要依据各种极端气候事件引发的灾害严重程度及其社会影响大小，分别确定其对应指标的相对重要性和权重系数。分析结果表明：1956～2008 年，综合指数 I 序列表现出明显的下降趋势，说明中国地区常见的极端气候事件总体有不断减少、减弱的趋势；同期综合指数 II 序列没有表现出明显的升降趋势变化，说明对中国地区具有重大经济和社会影响的极端气候事件频率总体上没有发生明显变化。就各个单项极端气候指数变化来看，全国平均年高温日数、强降水日数和干旱面积百分率呈上升趋势，但除高温日数外，其他指数趋势变化均不显著；全国平均年低温日数、沙尘天气日数和大风日数呈下降趋势，且趋势性均很显著；登陆中国大陆的热带气旋频数有所减少，但趋势不很明显。因此，在全球气候显著变暖的半个多世纪内，中国地区多数常见的极端气候事件发生频率，或者显著减少，或者变化不明显；而对全国经济和社会具有重大影响的主要极端气候事件，其频率总体上未见明显趋势变化。

关键词 极端气候事件 综合指数 气象灾害 观测 气候变化 中国

文章编号 1006-9585 (2010) 04-0354-11 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

Definition and Trend Analysis of an Integrated Extreme Climatic Index

REN Guoyu[1], CHEN Yu[1], ZOU Xukai[1], ZHOU Yaqing[1,2], WANG Xiaoling[1],
JIANG Ying[1], REN Fumin[1], and ZHANG Qiang[1]

1 *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing* 100081

2 *Jinzhong Meteorological Bureau, Jinzhong* 030600

Abstract Integrated Extreme Climatic Index (IECI) is defined and used to analyze the overall change trend of the frequency and intensity of major extreme climatic events over mainland China. The index is composed of seven single extreme climatic indices, i. e. the country-average frequencies of high temperature days, low temperature days, in-

收稿日期 2010-01-21 收到，2010-03-17 收到修定稿
资助项目 国家“十一五”科技支撑项目课题 2007BAC29B02 和 2007BAC03A01、水利部行业专项 200801001
作者简介 任国玉，男，1958 年出生，博士，研究员，从事气候变化和古气候研究。E-mail：guoyoo@cma. gov. cn

tensive precipitation days, dust storm days, strong wind days, percentage of drought areas, and number of landfalling tropical cyclones. Varied weights are assigned to the single extreme climatic indices based on the average economic losses and social impacts induced by the extreme weather and climatic events during recent five years. The largest weight, for example, is given to the frequency of intensive precipitation events because of the huge economic and life losses caused by the heavy rainfall and floods in eastern China. It is followed by the percentage of drought areas and number of landfalling tropical cyclones. The IECI-I and IECI-II are then the equally and unequally weighted sums of the standardized individual extreme climatic indices. Analysis applying the IECI-I and IECI-II to the past 53 years (1956－2008) shows that IECI-I undergoes significant downward trend, while IECI-II witnesses no significant linear trend. Relatively large interannual and interdecadal variation is found for both IECI-I and IECI-II, with frequent low values and a marked decreasing trend occurring from the late 1950s to the early 1980s for IECI-II, indicating a relatively low frequency of major meteorological disasters in early years of the period analyzed, for example, and an obvious upward trend since the mid-1980s, indicating an increase in frequency of major meteorological disasters in the country. In view of the individual extreme climatic indices, rising trends are found for frequencies of high temperature, intensive precipitation, and percentage of drought areas, but the trend is insignificant for intensive precipitation frequency, and it is not very significant for percentage of drought areas. Significant downward trends are found for frequencies of low temperature, dust storms and strong wind. Number of landfalling tropical cyclones is experiencing an insignificant downward change. It is evident from the analysis of the IECI change that the frequency and intensity of the climate extremes, which have the most severe impact on economy and society of the country as a whole, have not shown any significant upward trend in the time period when both global and the country-averaged surface air temperature witness a significant increasing trend.

Key words extreme climatic events, Integrated Extreme Climatic Index, meteorological disasters, observations, climate change, mainland China

1 引言

伴随着全球气候变暖，极端气候事件发生的频率或强度可能增加或减少，与其相关的气象灾害可能加重或减轻。因此，研究过去半个世纪左右全球和区域观测到的极端气候变化趋势，并预估未来可能变化趋势，对于科学评价气候变化的直接影响，有效应对特别是适应区域气候变化，具有关键作用。

现有的研究对于各种极端气候事件频率和强度变化规律和未来可能趋势给予充分关注。例如研究发现，近几十年来北半球中高纬度陆地地区极端强降水事件频率和强度增加了（Alexander et al.，2006；IPCC，2007），多数陆地区域与最低气温相关的异常冷夜频数明显减少，异常暖夜频数则显著增多（Easterling et al.，2000；Frich et al.，2002；IPCC，2007；丁一汇和任国玉，2008；Choi et al.，2009），全球陆地的副热带地区干旱现象变得更强、更持续（Dai et al.，2004），北大西洋地区的强热带气旋活动增加（IPCC，2007）。有研究者认为，极端天气和气候事件频率增加可能是造成气象灾害经济损失上升的主要原因（Anemüller et al.，2006），而另有研究指出，灾害经济损失增加不一定是极端天气气候事件频率上升引起的（Kunkel et al.，1999）。多数研究认为，与气温相关的异常冷（暖）夜（日）频率变化可能是由于人类排放温室气体造成的，北半球中高纬度陆地地区极端强降水事件频率增加可能也是对全球气候变暖的响应（IPCC，2007；Zhang et al.，2007）。

绝大多数研究主要关注某一种或一类极端气候事件，而对于一个地区多种或多类极端气候事件的综合研究还较欠缺。在气候变化的检测和影响研究中，以及在应对气候变化的政府和公民行动中，经常需要了解一个地区或国家多种极端气候事件发生频率和强度的总体变化情况，以便认识区域气候对于人为外强迫的可能响应信号，以及多种极端气候事件频率和强度变化的综合影响。例如，政府部门和公众需要了解，在过去半个世纪左右全球气候明显变暖的背景下，中国地区能够引起严重经济损失和人员死亡的各种极端气候

事件从总体上看究竟是增多（强）了，还是减少（弱）了？这个问题可以通过构造和分析不同的极端气候指数变化情况来回答，但这些指数种类繁杂，不同指数的变化趋势差异明显，难给人以概要和整体的印象。因此，如何在纷繁的极端气候指数中选择具有明确气候和社会经济指示意义的指标，构造一个区域极端气候综合指数，并对过去和未来的变化趋势进行分析，是一个颇值得研究的问题。

Karl et al.（1996）最早针对美国本土地区定义了一个气候极端指数（CEI），综合考虑极端气温和降水等指标，并对该指数的时间变化进行了分析；Hansen et al.（1998）建议一个气候变化指数，其中考虑了具有实际应用价值的指标，如加热度日（heating degree day）、强降水事件频率等；Baettig et al. （2007）也提出一个气候变化指数，考虑了诸如最热年份数、最干和最湿年份数、异常暖的夏季和冬季年份等。后两个指数不完全针对极端气候，还包含了对平均气候的描述，采用的指标也不完整，对气温偏低的极端事件普遍给予忽略，参考和应用价值有限。

美国的CEI指数是由月平均最高气温、月平均最低气温、极端1日降水量、降水日数和无雨日数、以及Palmer指数（PDSI）等5个单项指标组成，在年和季节平均基础上计算分析（Karl et al.，1996）。除极端干旱和潮湿以及极端1日降水量用固定的绝对阈值外，其他各指标的极端事件被定义为显著高（低）于多年平均值（在第90或10个百分位值以外）的发生频率。然后分别计算美国本土地区5个单项指标极端事件所出现的区域面积（经纬度网格点）百分比例，再对其进行算术平均，即得到CEI指数。每一单项指标（如月平均最高气温）又分异常偏高和异常偏低两种情形（指数），最后的单项指标百分比是两种指数极端事件所出现区域面积百分比之和。分析美国本土CEI指数的时间变化趋势，发现在1910～1994年期间线性趋势不明显，但年代尺度波动较大，20世纪70年代中期以后的上升趋势也颇引人注意。

Gleason et al.（2008）对CEI指数做了修正，增加了早期的资料点，并把指数序列更新到2006年。最主要的修正是把PDSI指数的极端干旱和极端潮湿阈值（±3）改为百分位值（最高和最低10%），极端1日降水量阈值也由固定的2英寸（或50.8 mm）修正为百分位值（最高的10%）。更新的美国本土CEI指数序列表明，1994年以后上升十分明显，整个1910～2006年期间也具有较明显的上升趋势，说明美国本土地区极端气候事件总体上呈现增多、增强趋势。

世界各地区、国家具有不同的气候条件，其极端气候事件的种类和影响也各不相同。尽管中国和美国在气候条件上具有很多相似性，但中国频繁发生的洪涝、台风和沙尘暴等气象灾害在美国并不是影响最严重的。CEI指数的构建思路有参考价值，但其选用指标仅具有地区性意义。此外，CEI指数本身也存在其他不足。例如，由于仅计算各种指标极端事件所出现的区域面积百分比，热带飓风和龙卷风这类局地或区域性事件就无法在综合指数中描述；CEI指数对于5种指标的极端事件影响给予相同权重，实际上不同极端事件对于一个地区和国家的经济和社会影响十分悬殊，例如美国冬季最低气温的暖异常远没有冷异常造成的能源、交通和通讯损失多，与最高气温相关的极端事件可能也无法与干旱造成的影响相提并论。因此，CEI指数仍存在一定缺陷，同时也不能直接应用到包括中国在内的其他国家和地区。

本文根据中国实际气候特点和不同种类极端气候事件的经济社会影响程度，探索制定适合中国地区具体情况的综合极端气候指数，并应用综合极端气候指数统计分析过去半个多世纪极端气候条件的综合演化趋势。

2 综合极端气候指数定义、资料与计算方法

2.1 定义

对极端气候事件的关注度，同一个国家内不同人群和不同地区也有明显差异。中国北方内陆地区的人们，一般不受台风影响，但他们非常关注干旱、沙尘暴和大风等极端事件；南方的人们更关注台风、强降水和洪涝、高温热浪等极端事件。从全国来看，农民十分关注干旱和洪涝灾害，城镇居民多关注高温和低温、沙尘暴和强风等极

端气候事件，政府部门更关注那些可能引起当地重大经济损失和人员伤亡的极端事件。对于气候变化研究者来说，由于气温对于气候变化信号检测的特殊重要性，一般更关注与气温相关的极端气候事件变化。因此，如何选取各个地区和各界共同关注的极端气候事件，是首先需要考虑的。

这里主要根据各种类极端气候事件的经济和社会影响程度，选取 7 种区域或全国平均极端气候指标，分别是平均高温日数（Htd）、平均低温日数（Ltd）、平均强降水日数（Ipd）、干旱面积百分率（Dap）、登陆热带气旋（台风）频数（Tcf）、平均沙尘天气日数（Dsd）、平均大风日数（Swd）。没有包括指示极端气候事件强度的指标，对于干旱面积百分率以外的指标没有选取干旱影响范围（面积）指标，是因为极端气候事件区域平均的频数与强度、面积之间存在极好的相关性，作为反映频数的全国和区域平均极端气候事件日数，可以很好地代表相应的强度和范围指标。例如，一个区域平均强降水日数与达到强降水阈值以上的降水量（或降水强度）和台站（网格）数量之间具有十分显著的正相关关系，可以仅用前者表征极端强降水的时间变化。

所选取的 7 种极端气候事件均为中国大陆地区常见的、能够引起比较严重气象灾害的现象，其中高温可以导致热浪，造成供水供电短缺，引起中暑甚至死亡；低温可以引起霜冻、冰冻和冷害，给农业生产和交通运输、通讯等造成严重损失，增加电力负荷；强降水事件是引发洪涝灾害的祸首，造成巨大经济损失和人员伤亡；干旱主要对农业和水资源供应造成不利影响；热带气旋（台风）带来的暴雨和强风会产生严重洪涝和风灾；沙尘天气除对农业生产造成危害之外，也会对生态、环境和人体健康造成不利影响；沙尘暴和热带气旋以外的大风事件也可以产生局地性重大破坏。此外，中国地区的极端天气气候事件还包括局地强对流现象，如雷暴、龙卷风、冰雹等，但这些局地强对流现象的观测记录尚不完善，影响具有局地性和瞬时性，同时其部分影响也已隐含在强降水、大风和热带气旋等指标中，在综合极端气候指数里不再独立统计。北方暴雪引发的灾害比较重要，但目前研究不多，而且由于和低温、强降水等事件有密切联系，部分影响隐含在后者之中，也不单独作为一个指标参与综合极端气候指数计算。

实际上，上述 7 种极端天气气候事件造成的气象灾害严重程度还有较大差异，不能同等对待。不论在历史上，还是在现代，洪涝灾害都是引起中国直接经济损失和死亡人数最多的气象灾种。过去半个世纪内，洪涝灾害致使中国农业年均受灾面积达 8.67×10^6 km^2，直接经济损失占自然灾害总损失的 1/3 以上，平均每 3 年就发生 1 次死亡人数超过 1000 人的大灾（高文学，1997）。因此，在综合极端气候指数中，可考虑对强降水事件指标赋予最高的权重。干旱是中国仅次于洪涝灾害影响的气象灾种。受干旱影响，全国每年平均有 2.00×10^7 km^{2}土地受灾，粮食减产量占所有自然灾害造成的减产量 50％以上。严重的干旱造成城市供水紧张和乡村饮用水困难，引发土地荒漠化和森林火灾，产生沙尘暴，给经济和社会造成重大破坏。热带气旋引起的暴雨、风暴潮和强风等灾害对沿海地区形成巨大危害，尽管死亡人数持续减少，但直接经济损失却不断攀升，近几年损失尤其偏重，日益受到各界关注（中国气象局，2007）。极端低温事件引发的各种气象灾害也比较严重，其中包括东部春、秋和冬季的寒潮、东北夏季的低温冷害、南方的“倒春寒”和冰冻灾害等，给国民经济造成重大损失。此外，中国的极端高温、沙尘暴和大风等事件及其伴随的气象灾害也越来越引起重视，但其造成的直接经济损失和死亡人数相对较少，可以赋予较低的权重。

表 1 列出了 2004～2008 年共 5 年全国每年平均的主要极端气候事件及其相应气象灾害的直接经济损失和死亡人数。资料来源于国家民政部公布的自然灾害损失年鉴。低温灾害直接经济损失包括低温、冷冻和雪灾影响，高温、沙尘天气和强风等灾害直接经济损失没有统计资料，干旱、高温、沙尘暴和强风等灾害直接引起的死亡人数也没有统计资料。不论从直接经济损失还是从灾害造成的死亡人数看，平均每年洪涝灾害破坏都是最大的，其次是台风或热带气旋、干旱、低温冷冻（雪灾）。应该指出的是，干旱造成的经济损失主要是根据农业粮食减产折算的，没有包括干旱对城乡水资源供应、能源供应和森林火灾等影响所造成的破坏，因此这里给出的经济损

表 1 中国主要极端气候类型、指标及其影响程度
Table 1 Major extreme climate events and the losses in China

气候类型	指标	经济损失/10^4 元	死亡人数	社会关注度	年权重系数
高温	平均高温日数 Htd	～	～	很高	0.07
低温	平均低温日数 Ltd	423.9	61	高	0.08
洪涝	平均强降水日数 Ipd	650.3	966	高	0.30
干旱	干旱面积百分率 Dap	472.3	～	低	0.25
台风	登陆热带气旋频数 Tcf	490.7	487	中	0.20
沙尘暴	平均沙尘天气日数 Dsd	～	～	低	0.05
强风	平均大风日数 Swd	～	～	中	0.05

注：～ 表示目前统计数据不可获得。

失数字明显偏低，实际的影响当大于台风或热带气旋。

对于各种极端气候事件及其衍生灾害的社会影响，可用社会关注度来大致衡量。利用 Baidu 搜索引擎搜索迄今针对各种极端气候事件的报道条目数，可以大致了解国内媒体和公众对其关注程度。考虑对于每一种极端气候事件各种可能的命名方案，采用具有最多报道条目数量的结果，进行分类。比如，"强降水"可以搜索出 1×10^6 条，而"暴雨"可以搜索出 32×10^6 条，则采用"暴雨"的搜索结果。规定 50×10^6 条以上为社会关注度"很高"、25×10^6～50×10^6 条为"高"、10×10^6～25×10^6 条为"中"、1×10^6～10×10^6 条为"低"、1×10^6 条以下为"很低"，则 7 种极端气候事件的社会关注度列于表 1 中。其中，高温事件的社会关注度最高，低温和强降水（暴雨）较高，热带气旋（台风）和大风中等，干旱和沙尘天气（沙尘暴）相对较低。

值得说明的是，社会对极端气候事件的关注度与其实际引起的灾害损失和死亡人数常常无关。例如，干旱在我国引起的经济损失非常大，与强降水造成的洪涝灾害不相上下，但其社会关注度远无高温事件强烈；同样，不论从经济损失还是人员伤亡看，与低温相关的极端气候事件都比与高温相关的极端气候事件严重，但高温事件比低温事件更加引人瞩目，社会关注度更高。造成这种现象的原因还需要进一步研究，但可能主要与气候变化问题的政治化倾向有关。

综合考虑各种气象灾害的影响程度，但主要考虑灾害直接经济损失大小，以及灾害造成的死亡人数多少，确定各种极端气候指标的相对重要性。对社会影响或社会关注度也给予一定考虑，但不作为主要因子。据此，对每一种极端气候指标赋予相应权重系数（表 1），其中强降水日数权重系数最高，为 0.30；干旱面积百分率次之，为 0.25；登陆热带气旋数为 0.20；低温日数为 0.08；高温日数为 0.07；沙尘天气日数和大风日数，其所蕴涵的气象灾害损失或影响程度相对较轻，其间差异也不明显，赋予同一权重 0.05。上述权重赋值还考虑了部分单项极端气候指标中，如大风日数与登陆台风数、沙尘暴以及登陆台风数与强降水量之间存在的联系，避免造成过度强调的倾向。大风日数赋予权重比较低，沙尘暴频率的权重也不高，就是在一定程度上考虑到这个问题。登陆台风数与强降水日数的权重系数均较高，但考虑到他们的实际影响程度，这里给出的权重系数应该也是适当的。

对于同气温、降水相关的单项极端气候指标，采用日观测资料和百分位数作为阈值的方法（表 2）。其中，高温日数是日最高气温大于 1971～2000 年 30 年日最高气温第 90 个百分位值的天数，主要反映日间高温事件频次；低温日数是日最低气温小于 1971～2000 年 30 年日最低气温第 10 个百分位值的天数，主要反映夜间低温事件频次；强降水日数是日降水量大于 1971～2000 年 30 年日降水量第 95 百分位值的天数，反映相对强降水事件的频次。大风日数是指一日之内任何时间出现瞬时（3 s）平均风速大于 17 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$（相当于风力 8 级）的天数，反映较强瞬时风速事件的频次。

表2 综合极端气候指数（IECI）各分量指标的定义
Table 2 Definition of individual extreme climate indices of Integrated Extreme Climate Index (IECI)

序号	缩写	名称	定义	单位
1	Htd	高温日数	日最高气温＞第90百分位值的日数	d
2	Ltd	低温日数	日最低气温＜第10百分位值的日数	d
3	Ipd	强降水日数	日降水量＞第95百分位值的总降水日数	d
4	Dap	干旱面积百分率	发生气象干旱的区域面积与有效观测区域面积的百分比值	(%)
5	Tcf	登陆台风频数	统计时段内登陆我国沿海的台风数量	个
6	Dsd	沙尘天气日数	统计时段内有观测记录网格点平均的沙尘天气日数	d
7	Swd	大风日数	瞬时平均风速＞17 $m \cdot s^{-1}$的日数	d

干旱面积百分率是全国发生气象干旱的区域面积与有效观测区域面积的百分比值。气象干旱采用《气象干旱等级》国家标准（张强等，2006）中推荐使用的综合气象干旱指数（CI）。CI指数是综合考虑Thornthwaite方法计算的可能蒸散量和近30天与近90天降水量标准化指数合成的，已经用于中国实时气象干旱监测业务。当CI≤－0.6时即认为出现气象干旱（邹旭恺等，2010）。在单项指标中只有气象干旱采用了面积百分率，因为先前发表的文献重点分析了气象干旱面积百分率变化。但如果采用全国平均气象干旱持续日数指标，其结果应该是相似的。

登陆热带气旋频数是指登陆中国大陆东南沿海的热带气旋（台风）数量，主要发生在夏秋季节，冬季月份没有登陆台风。沙尘天气日数是指全国有观测记录网格点平均的沙尘天气现象发生日数。沙尘天气现象包括扬沙、浮尘和沙尘暴，大部分地区主要发生在春季，夏、秋季节少见。

2.2 资料和计算方法

综合极端气候指数（Integrated Extreme Climate Index，IECI）根据以上7个单项极端气候指标合成：

$$\mathrm{IECI}=\sum_{i=1}^{7}\delta_i E_i, \qquad (1)$$

其中，δ为权重系数，E是各单项极端气候指标的标准化值。

分别计算合成两个综合极端气候指数，即由7种极端气候指标简单（等值权重）合成的综合极端气候指数（综合指数I或IECI-I）和差异权重加权合成的综合极端气候指数（综合指数II或IECI-II）。在综合指数II的情况下，分别确定其对应指标的相对重要性和权重系数（表1）：

$$\mathrm{IECI\text{-}II}=0.07\mathrm{Htd}+0.08\mathrm{Ltd}+0.3\mathrm{Ipd}+0.25\mathrm{Dap}+0.2\mathrm{Tcf}+0.05\mathrm{Dsd}+0.05\mathrm{Swd}. \qquad (2)$$

采用1956～2008年国家基准气候站和基本气象站（最多740个站）观测资料。所有气象资料均来自中国气象局国家气象信息中心。气温资料是日最高（低）气温记录，经过质量控制，但未做均一化订正和城市化影响偏差订正（周雅清和任国玉，2010）；日降水资料经过质量控制，但没有对迁站、更换仪器等引起的非均一性误差以及风速和蒸发等引起的“低截获”偏差进行订正；综合气象干旱指数计算使用了全国606个日降水量和平均气温资料（邹旭恺等，2010）；单站日平均风速资料做过质量控制，也对1970年前后由于更换仪器造成的非均一性进行了整体订正，但对2000年以后自动站观测与人工值守观测之间的不连续性没有订正（Jiang et al.，2010）。迁站和观测仪器设备更换等对登陆热带气旋、沙尘天气日数等记录影响较小。

统计可以在月、季节和年基础上进行。对于以百分位数作为阈值的极端气候指标，首先计算获得单个站点的单项指标逐年时间序列，然后按2×2或2.5×2.5的网格计算网格点逐年平均时间序列，再根据网格面积加权获得全国逐年平均时间序列；全国干旱面积百分率按照邹旭恺等（2010）提供方法计算；全国区域平均沙尘天气日数时间序列参照张莉和任国玉（2003）所用方法计算。对全国平均时间序列进行标准化处理（距平/均方差），获得各个单项极端气候指数的标准化序列。然后按等值权重系数计算综合指数I，按

差异权重系数计算综合指数II。本文只给出全国年平均综合极端气候指数序列。区域和季节平均的综合极端气候指数序列可在上述方法基础上经修正获得。

IECI值界于－1.0～1.0之间，某一年数值越大，表示所分析区域或全国该年份有重要影响的极端气候事件总体偏多偏强；反之亦然。综合指数不是各个单项指数的平均，而是逐年对各单项指数标准化值求和的结果。当所有单项极端气候指数都增大（减小）时，综合指数将快速升高(降低)；但当有的单项指数增加，有的减小时，综合指数趋势变化将相对不明显。干旱面积百分率和强降水日数以及高温日数和低温日数之间，存在一定反位相联系，即干旱面积百分率（高温日数）增加（减少），则强降水日数（低温日数）可能减少（增加），二者在一定程度上有相互抵消的作用，减弱了其对综合指数值的贡献。但从影响上考虑也还算合理，因为在极端干旱年份干旱造成的损失异常高，而极端强降水造成的损失就可能非常低，当年极端旱涝灾害引起的经济损失仍然接近"正常"。

由于造成严重灾害的极端气候事件多发生在夏半年，IECI值在夏半年比冬半年要大。从年IECI值来看，各个地区之间具有明显差异；同一季节不同地区或同一地区不同季节的IECI值也存在差异。以下仅对全国年平均单项极端气候指数和IECI-I、SECI-II指数时间序列进行分析，重点探讨1956～2008年期间的趋势变化特点。

3 综合极端气候指数趋势变化

3.1 单项极端气候指数

图1给出1956～2008年标准化的各单项极端气候指数变化曲线。可以看出，高温日数、强降水日数、干旱面积这三项极端气候指数呈上升趋势，高温日数的增加趋势通过了0.05的显著性检验，其他指数增加趋势没有通过显著性检验，表明暖热事件、强降水事件以及干旱事件在这个时期都有所增加，但只有高温事件频率的增加是显著的；低温日数、沙尘天气日数和大风日数三项极端气候指数呈下降趋势，并且都通过0.05的显著性检验，表明寒（凉）冷事件以及与风速有关的极端气候事件频率均经历了显著的减少。台风登陆频数表现出轻微下降，但趋势不显著。

各单项极端气候指数的变化特征与以往关于中国地区各个单项极端气候事件频率和强度变化的研究结论（例如：翟盘茂等，1999；龚道溢和韩晖，2004；王绍武等，2005；钱维宏等，2007；丁一汇和任国玉，2008）是一致的。高温日数和低温日数与其他研究中用的暖昼日数和冷夜日数标准相似，已有研究一般表明全国平均来看分别具有较明显的上升和非常显著的下降趋势，不一致主要和所选取的分析时间段有关（Yan et al.，2002；Zhai and Pan，2003；钱维宏等，2007；丁一汇和任国玉，2008；周雅清和任国玉，2010）。全国平均强降水日数没有明显上升与早先研究结论大体一致（Zhai et al.，2005；钱维宏等，2007；丁一汇和任国玉，2008）。更新到2008年的全国气象干旱面积百分率有较明显增加趋势，刚好通过0.05的显著性水平检验（邹旭恺等，2010）。登陆热带气旋频数、全国平均沙尘天气频率和全国平均大风日数变化与其他研究也基本一致（周自江等和章国材，2003；张莉和任国玉，2003；李英等，2004；范一大等，2005；王秀萍和张永宁，2006；Jiang et al.，2010）。因此，用以指示中国地区主要极端气候事件变化的各个单项指数序列具有良好的代表性。

3.2 综合极端气候指数

按前文给出的方法，得到等值权重和差异权重加权合成的综合指数I和II。图2给出1956～2008年全国IECI-I序列曲线。IECI-I序列有一定年际波动，整个研究时段总体呈显著的下降趋势。20世纪50年代末至80年代初，IECI-I在多数年份为正值，但呈现出明显的下降趋势，说明这个时期影响我国的重大极端气候事件总体偏多、偏强，但有不断减少、减弱的趋势；80年代中期以后，IECI-I在多数年份呈现为负值，同时下降趋势有所缓和，特别是90年代中以来，升降趋势不再明显。IECI-I最高值出现在1966年，第二最高年为1958年，以后依次为1956年和1971年；最低值出现在1995年，次低年为1997年，以后依次为2000年和1985年。

IECI-I整个时期趋势变化明显，主要是因为各个单项极端气候指数虽然具有不同方向的变化

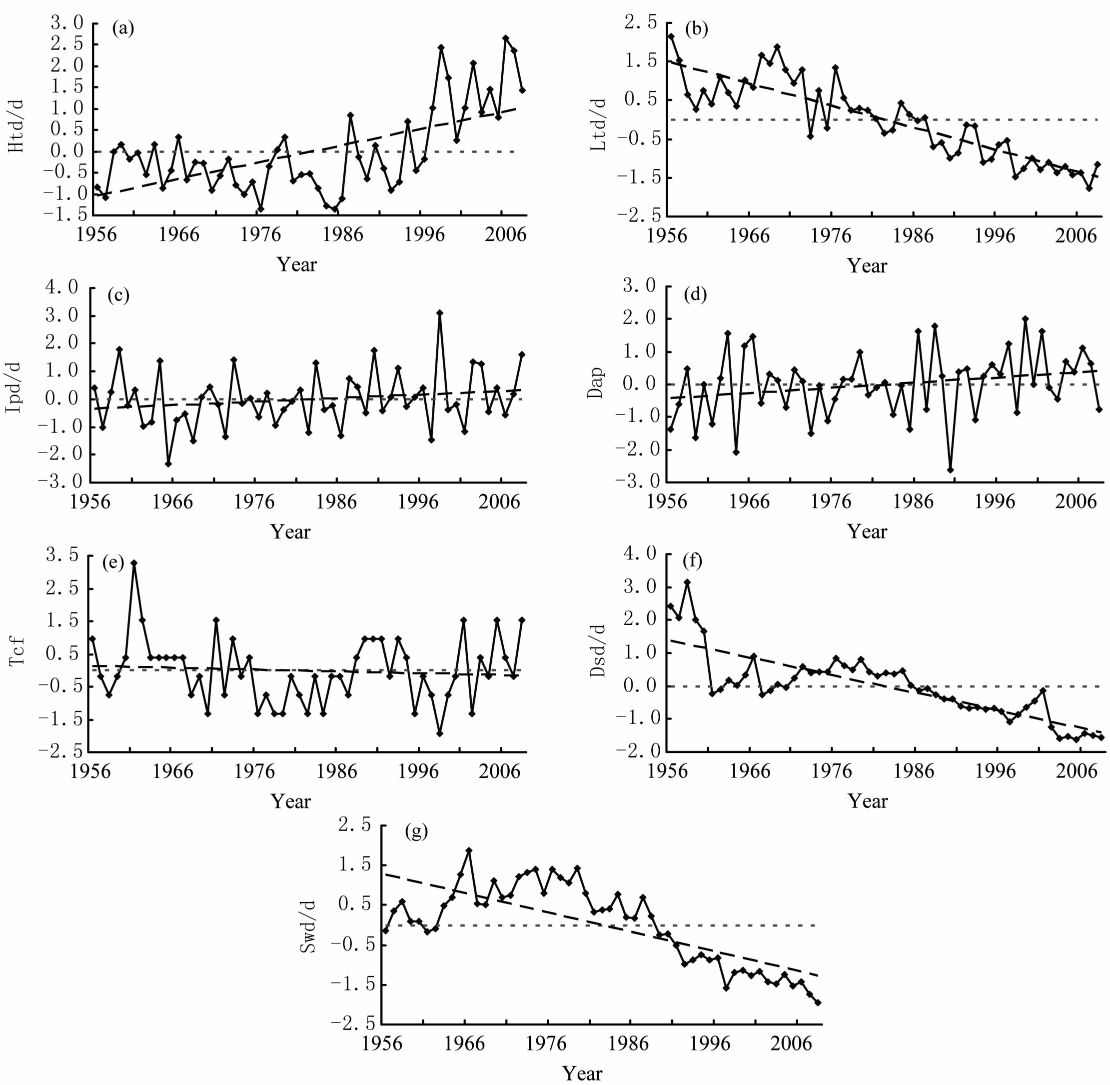

图 1　1956～2008 年各单项极端气候指数标准化值变化曲线（水平短虚线为 0 值线，长虚线为趋势线）：（a）高温日数（Htd）；（b）低温日数（Ltd）；（c）强降水日数（Ipd）；（d）干旱面积百分率（Dap）；（e）登陆热带气旋数（Tcf）；（f）沙尘天气日数（Dsd）；（g）大风日数（Swd）

Fig. 1　Changes in country-averaged individual extreme climate indices during 1956－2008 (long dashed lines indicate linear trends): (a) High temperature days (Htd); (b) low temperature days (Ltd); (c) intensive precipitation days (Ipd); (d) drought area percentage (Dap); (e) landing tropical cyclone frequency (Tcf); (f) dust storm days (Dsd); (g) strong wind days (Swd)

趋势，但高温日数、强降水日数、干旱面积百分率等指数的上升趋势多不明显，而低温日数、沙尘天气日数和大风日数等指数的下降趋势一般较显著，登陆台风频数也轻微减小，导致综合指数 I 整体呈明显下降趋势。1966 年 IECI-I 最高，主要是因为大风日数最多，沙尘天气日数和干旱面积百分率也较高；1995 年除干旱面积百分率略高外，其他单项极端气候指数都很低，应当算风调雨顺的一年。

图 3 给出 1956～2008 年全国 IECI-II 序列曲线。IECI-II 序列年际波动和年代际波动特征与 IECI-I 序列相近，但整个研究时段看不出有明显的升降趋势变化。从 20 世纪 50 年代末至 80 年代初，IECI-II 序列表现出较明显下降，多数年份为负值，特别是 70 年代中后期和 80 年代初，数值很低。这说明，20 世纪 80 年代初以前对中国具有重大影响的极端气候事件总体偏少偏弱，且有不断下降的趋势。权重系数较高的强降水日数、干

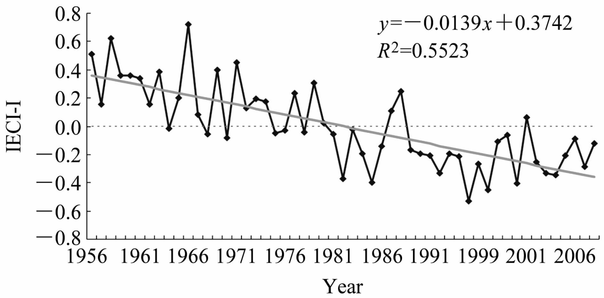

图2　1956～2008年全国综合极端气候指数I序列变化。灰色实线为线性趋势线

Fig. 2　Change in country-averaged Integrated Extreme Climate Index (IECI-I) during 1956～2008. Grey lines indicate linear trends

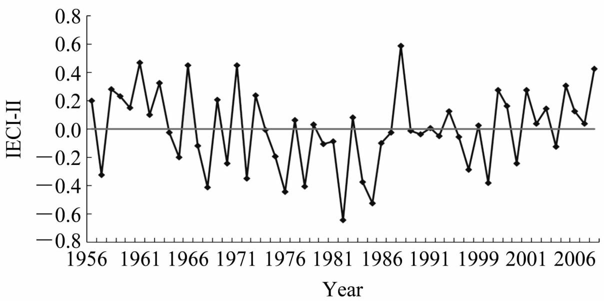

图3　同图2，但为全国综合极端气候指数II的时间序列

Fig. 3　Same as Fig. 2, but for Integrated Extreme Climate Index (IECI-II)

旱面积百分率和登陆台风频率处于平均值附近或偏低，是造成上述变化的主要原因。但是，从20世纪80年代中期开始，IECI-II却表现出一定上升趋势，90年代中期以后上升趋势尤为明显，表明该时段对我国具有重大影响的极端气候事件总体偏多偏强，这主要是因为权重系数较高的强降水日数、干旱面积百分率和登陆热带气旋频率增多，同时高温日数也大幅增加。虽然低温日数、大风日数和沙尘天气日数明显减少，但他们或者权重系数低，或者虽有较高权重系数，但其减少幅度较小，因此对综合指数的贡献不大，整个时期特别是最后20多年IECI-II呈现为弱的上升趋势。

1956～2008年全国IECI-II最低的5年分别是1982、1985、1976、1968和1978年，最高的5年是1988、1961、1966、1971和2008年。IECI-II最低的5年中，1968、1982、1978年的强降水日数分别位列整个时期倒数第2、6和10位，这些年份也是全国大范围少雨的年份；1976、1978、1982年登陆台风频率分列倒数第3、4和6位。而IECI-II最高的5年，1961、2008、1971年登陆台风频率分列第1、2和5位，2008年强降水日数位列分析时期第4位，1988、1966年干旱面积百分率列第2和第6位。

由于对极端强降水事件频率和干旱面积百分率、登陆热带气旋频率等赋予了最高权重，IECI-II受这3个单项极端气候指数的影响也比较大。全国范围极端强降水事件频率和干旱面积百分率呈现明显的负相关关系，二者具有此消彼长的现象，因此IECI-II在一些大旱或大水年并不一定明显偏高。一个例子是1998年，我国南方发生重大洪涝，全国平均的极端强降水指数是整个时期最高的，但由于干旱面积不大，加上登陆的热带气旋极少，当年的IECI-II并不很高。

4　结论和讨论

选取对中国大陆地区经济、社会影响较高的7种极端气候指标，分别是全国平均高温日数、低温日数、强降水日数、沙尘天气日数、大风日数、干旱面积百分率和登陆热带气旋频数，计算合成了两个综合极端气候指数，即由各单项指标简单（等值权重）合成的综合指数I和加权（差异权重）合成的综合指数II。综合指数II主要依据各种极端气候事件引发的灾害严重（损失）程度及其社会影响大小，分别确定其对应指标的相对重要性和权重系数。应用两个综合极端气候指数，分析了1956～2008年中国大陆地区极端气候总体演变趋势。

1956～2008年期间，综合指数I呈现明显下降趋势。20世纪50年代末至80年代初，综合指数I具有较明显的下降趋势，说明这个时期影响中国的重大极端气候事件总体上不断减少、减弱；80年代中期以后，IECI-I的下降趋势有所减缓，特别是90年代中以来，升降趋势不再明显。IECI-I最高值出现在1966年，最低值出现在1995年。

IECI-II序列年际波动和年代际波动特征与IECI-I序列相近，但整个研究时段没有表现出明显的升降趋势变化。从20世纪50年代末至80年代初，IECI-II序列表现出较明显下降趋势，说明

对中国具有重大经济社会影响的极端气候事件总体上不断减少；20 世纪 80 年代中期开始，IECI-II 表现出一定回升，90 年代中期以后上升趋势明显，表明该时段对中国地区具有重大经济社会影响的极端气候事件频率总体上呈现升高趋势。IECI-II 极端值均出现在 20 世纪 80 年代，最高值发生于 1988 年，最低值出现在 1982 年。

就构成综合极端气候指数的各个单项指数来看，1956～2008 年期间全国平均高温日数、强降水日数、干旱面积百分率等单项极端气候指数呈上升趋势，但趋势多不显著，仅高温日数的增加通过了 0.05 显著性水平检验；全国平均低温日数、沙尘天气日数和大风日数等单项极端气候指数呈下降趋势，且下降趋势均通过了 0.05 显著性水平检验；登陆我国的热带气旋频数仅有轻微减少，趋势变化不明显。

因此，仅从各单项极端气候指数变化看，自 20 世纪 50 年代中期以来，多数表现为明显下降趋势，呈上升趋势的单项极端气候指数一般未通过显著性检验，表明中国地区多数常见的极端气候事件发生频率显著减少了；如果考察等值权重合成的综合指数 I 时间变化，全国平均的主要极端气候事件频率总体上也呈明显减少趋势；而如果考虑每种极端气候事件造成的经济和社会影响差异，分析差异权重合成的综合指数 II 时间变化，则可发现中国地区每年具有重大经济社会影响的极端气候事件频率总体上没有明显升降趋势。

过去的半个多世纪是全球和中国地面气候显著变暖时期。多数研究认为，这个时期的气候变暖主要是由大气中温室气体浓度升高引起的（IPCC，2007）。本文分析表明，在全球气候显著变暖的背景下，中国地区多数常见的单项极端气候事件频率或者明显减小，或者趋势性不显著；对全国经济社会具有重大影响的主要极端气候事件频率总体上未见明显趋势性变化。

本文研究的不确定性主要来自资料。各单项极端气候指数分析结果在一定程度上受到地面气象观测资料偏差的影响；在计算加权合成的综合极端气候指数时，各单项极端气候指数的权重系数确定还受到相关气象灾害损失数据缺失等因素困扰。因此，本文定义的综合极端气候指数仍有改进的余地。

参考文献（References）

Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. J. Geophys. Res., 111, D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.

Anemüller S, Monreal S, Bals C. 2006. Global Climate Risk Index 2006: Weather-Related Loss Events and Their Impacts on Countries in 2004 and in a Long-Term Comparison [M]. Bonn: Germanwatch, 40pp.

Baettig M B, Wild M, Imboden D M. 2007. A climate change index: Where climate change may be most prominent in the 21st century [J]. Geophys. Res. Lett., 34, L01705, doi: 10.1029/2006GL028159.

Choi G, Collins D, Ren G, et al. 2009. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asian-Pacific Network region, 1955－2007 [J]. Int. J. Climatol., 29: 1906－1925.

Dai A, Trenberth K E, Qian T. 2004. A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870－2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming [J]. J. Hydrometeorol., 5: 1117－1130.

丁一汇，任国玉. 2008. 中国气候变化科学概论 [M]. 北京：气象出版社，281pp. Ding Yihui, Ren Guoyu. 2008. Introduction to Climate Change Science of China [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 281pp.

Easterlling D R, Evens J L, Groisman P Y, et al. 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 81 (3): 417－425.

范一大，史培军，周俊华，等. 2005. 近 50 年来中国沙尘暴变化趋势分析 [J]. 自然灾害学报，14 (3): 22－28. Fan Yida, Shi Peijun, Zhou Junhua, et al. 2005. Research on change of dust storm in China in recent 50 years [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 14 (3): 22－28.

Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century [J]. Clim. Res., 19: 193－212.

高文学. 1997. 中国自然灾害史（总论）[M]. 北京：地震出版社，525pp. Gao Wenxue. 1997. History of China Nnatural Disasters [M] (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 525pp.

Gleason K L, Lawrimore J H, Levinson D H, et al. 2008. A revised U. S. climate extremes index [J]. J. Climate, 21 (10): 2124－2137.

龚道溢，韩晖. 2004. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析 [J]. 地理学报，59 (2): 230－238. Gong, Daoyi, Han Hui. 2004. Extreme climate events in northern China over the last 50 years [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 59 (2): 230－238.

Hansen J, Sato M, Glascoe J, et al. 1998. A common-sense climate index: Is climate changing noticeably? [J]. Proc. Natl. Acad. Sci., 95: 4113－4120.

IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds., Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 996pp.

Jiang Y, Luo Y, Zhao Z, et al. 2010. Changes in wind speed over China during 1956－2004 [J]. Theor. Appl. Climatol., 99 (3): 421－430.

Karl T R, Knight R W, Easterling D R, et al. 1996. Indices of climate change for the United States [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 279－292.

Kunkel K E, Pielke R A Jr, Changnon S A. 1999. Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: A review [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80 (6): 1077－1098.

李英，陈联寿，张胜军. 2004. 登陆我国热带气旋的统计特征 [J]. 热带气象学报，20 (1): 14－23. Li Ying, Chen Lianshou, Zhang Shengjun. 2004. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20 (1): 14－23.

钱维宏，符娇兰，张玮玮，等. 2007. 近40年中国平均气候与极值气候变化的概述 [J]. 地球科学进展，22 (7): 673－684. Qian Weihong, Fu Jiaolan, Zhang Weiwei, et al. 2007. Changes in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (7): 673－684.

王绍武，伍荣生，杨修群，等. 2005. 中国的气候变化 [M] //秦大河，丁一汇，苏纪兰. 中国气候与环境演变（上卷）. 北京：科学出版社，63－103. Wang Shaowu, Wu Rongsheng, Yang Xiuqun, et al. 2005. Climate Change in China [M] (in Chinese) // Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan. Change in Climate and Environment of China (I). Beijing: Science Press, 63－103.

王秀萍，张永宁. 2006. 登陆中国热带气旋路径的年代际变化 [J]. 大连海事大学学报，32 (3): 41－45. Wang Xiuping, Zhang Yongning. 2006. Interdecadal change of the landing tropical cyclone tracks over China [J]. Journal of Dalian Maritime University (in Chinese), 32 (3): 41－45.

Yan Z, Jones P D, Davies T D, et al. 2002. Trends of extreme temperatures in Europe and China based on daily observations [J]. Climatic Change, 53 (1－3): 355－392.

翟盘茂，任福民，张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. 气象学报，57 (2): 208－216. Zhai Panmao, Ren Fumin, Zhang Qiang. 1999. Detection of changing trend of extreme precipitation in China [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 57 (2): 208－216.

Zhai P, Pan X. 2003. Trends in temperature extremes during 1951－1999 in China [J]. Geophys Res. Lett., 30, doi: 10.1029/2003Gl018004.

Zhai P, Zhang X, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J. Climate, 18: 1096－1108.

张莉，任国玉. 2003. 中国北方沙尘暴频数演化及其气候成因分析 [J]. 气象学报，61 (6): 744－750. Zhang Li, Ren Guoyu. 2003. Change in dust storm frequency and the climatic controls in northern China [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese). 61 (6): 744－750.

张强，邹旭恺，肖风劲，等. 2006. 气象干旱等级 GB/T20481－2006 [S]. 北京：中国标准出版社. 17pp. Zhang Qiang, Zou Xukai, Xiao Fengjin, et al. 2006. Grades of Meteorological Drought GB/T20481－2006 [S] (in Chinese). Beijing: China Standardization Press, 17pp.

Zhang X, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends [J]. Nature, 448 (26): 461－466.

中国气象局. 2007. 中国气象灾害年鉴（2007）[M]. 北京：气象出版社，260pp. China Meteorological Administration. 2007. Yearbook of China meteorological disasters (2007)[M](in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 260pp.

周雅清，任国玉. 2010. 中国大陆1956～2008年极端气温事件变化特征分析 [J]. 气候与环境研究，15 (4): 405－417. Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2010. Variety characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956－2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 405－417.

周自江，章国材. 2003. 中国北方的典型强沙尘暴事件（1954～2002年）[J]. 科学通报，48: 1224－1228. Zhou Zijiang, Zhang Guocai. 2003. Strong dust storm evens of northern China (1954－2002) [J]. Bulletin of Chinese Sciences (in Chinese), 48: 1224－1228.

邹旭恺，张强，任国玉. 2010. 基于综合气象干旱指数与干旱变化趋势研究 [J]. 气候与环境研究，15 (4): 371－378. Zou Xukai, Zhang Qiang, Ren Guoyu. 2010. Droughts variations in China based on a compound index of meteorological drought [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 371－378.