
与应用技术
水保监测

基于评估模型的陕西省水资源气候影响分析

程肖侠¹, 孙 娴¹, 方建刚¹, 毛明策¹, 梁奇琛²

(1. 陕西省气候中心, 陕西 西安 710015; 2. 武功县气象局, 陕西 武功 712200)

摘 要: 利用陕西省 1961—2009 年 96 个观测站的年降水、气温资料以及 1997—2006 年水利部公布的水资源资料, 基于线性拟合、水资源丰枯评价指标、变差系数及产水模数等方法和指标, 对陕西省近 50 a 来的水资源状况进行了气候影响分析。结果表明, 基于降水、气温的水资源评估模型能够对陕西省水资源状况进行评估, 且评估效果好于只考虑降水的评估模型。近 50 a 来陕西省气候趋于暖干, 年平均气温自 20 世纪 90 年代升高, 1996 年前后发生突变; 年降水自 20 世纪 80 年代中后期减少, 1988 年前后发生突变。受气温升高、降水减少影响, 近 50 a 来陕西省水资源量呈减少趋势, 1991 年前后发生突变, 水资源量显著减少。20 世纪 90 年代之前, 陕西省水资源量正常偏多, 之后水资源正常偏枯, 且年际变化显著, 年水资源量不稳定。陕西省属于旱年缺水类型, 天然供水量的减少增加了水资源利用率, 水资源供需压力增大。

关键词: 水资源; 评估模型; 气候变化; 影响分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)02-0114-04

中图分类号: P343.1

Impacts of Climate Change on Water Resources in Shaanxi Province During Past Fifty Years Based on Regression Models

CHENG Xiao-xia¹, SUN Xian¹, FANG Jian-gang¹, MAO Ming-ce¹, LIANG Qi-chen²

(1. Shaanxi Climate Center, Xi'an, Shaanxi 710015, China;

2. Meteorological Bureau of Wugong, Wugong, Shaanxi 712200, China)

Abstract: Employing the annual mean precipitation and temperature data from 96 meteorological stations in Shaanxi Province during the period from 1961 to 2009, and the water resource data published by Chinese Ministry of Water Resources from 1997 to 2006, the impacts of climate change on water resources of Shaanxi Province were analyzed by linear regression, water resource evaluation index, variation coefficient, and water mode. The results show that, the water resource assessment model based on both precipitation and temperature data was more reasonable in evaluation than the one merely based on precipitation data. The climate had become warmer and drier in the past fifty years, the annual mean temperature increases substantially around 1996 and the annual precipitation decreases sharply around 1988. With the declining precipitation and increasing temperature, the water resources had gradually reduced in the past 50 years, and worsened around 1991. The water resources were more than enough before 1990. Since then, the water resources were less than enough with more significant interannual variations. The water resources are limited in drier years. The reduction in natural water supply enhanced the water use efficiency in the living, industrial and agricultural activities and increased the pressure from water supply and demand.

Keywords: water resource; evaluation model; climate change; impact analysis

陕西省属大陆季风性气候, 南北所跨纬度多, 境内气候差异明显, 受气候差异影响, 陕西省水资源量分布南多北少, 该省人均年水资源量 1 280 m³, 为全国平均水平的 55%^[1], 水资源匮乏。近年来气候变化显著影响了水资源量的年际、年内分布特征、空间分布特征等等, 加剧了供需矛盾, 水资源短缺已成为

制约陕西省经济社会发展的严重问题^[1]。

目前, 气候变化对水资源影响的研究主要围绕区域降水、蒸发等气象要素对河川径流、水量的影响^[2-7], 或者对于气象学者来说, 由于水文资料缺乏, 主要基于统计分析、气候模式与水文模型嵌套, 遵从“未来气候情景设计—水文模拟—影响研究”的模

收稿日期: 2011-05-31

修回日期: 2011-08-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“青藏高原生长对亚洲内陆干旱化及大气粉尘循环影响的模拟研究”(41105060); 国家科技部公益性行业(气象)科研专项“气象灾害对重大工程影响评估的关键技术研究”(GYHY200806012)

作者简介: 程肖侠(1980—), 女(汉族), 陕西省韩城市人, 工程师, 主要从事气候变化研究与服务工作。E-mail: shuishixiaoyue@hotmail.com。

式, 研究气候变化对流域径流平均变化的影响^[8], 以及探讨未来气候情景下水文要素的变化情况和趋势^[9]。针对陕西省水资源的研究成果还相对较少, 主要有水资源普查和统计分析^[10-11], 以及基于水文模型^[12-13]和经验公式^[14]研究区域气候变化对水资源的影响。这些研究对认识区域水资源状况奠定了科学基础, 但在研究方法及研究对象等方面存在一定局限性, 实际决策中往往需要对某一行政区域而非某一流域的水资源量进行评价。在当前我国正处于由传统水利向现代可持续发展水利转变的关键阶段, 尤其是在经济社会高速发展, 水资源供需矛盾日益严峻的背景下, 科学研究必将为水文水资源可持续开发利用提供科学决策依据。因此, 本研究试图运用现有水文和气候资料, 对陕西省水资源气候变化特征进行更全面、更深入的分析。

1 资料方法

(1) 采用 1961—2009 年陕西省 96 站降水、气温资料及中国水利部公布的 1997—2006 年《中国水资源公报》中陕西省水资源资料, 建立水资源总量与降水、气温的线性评估模式, 解决年水资源总量的估算问题, 评估模式为:

$$W = a + b_1P + b_2T$$

式中: W ——水资源总量 (10^8 m^3); P ——陕西全省区域平均年降水量 (mm); T ——年平均气温 ($^{\circ}\text{C}$); a b_1 b_2 ——线性系数。

(2) 采用水资源总量评估指标 (表 1)^[15], 定量评估年水资源量的丰枯等级, 对陕西省水资源量进行年景评估。

表 1 年水资源分级标准^[15]

年型	判别式
异常丰水年	$R_s > R_{ave} + 1.5s$
丰水年	$R_{ave} + 1.5s \geq R_s \geq R_{ave} + 0.7s$
正常年	$R_{ave} + 0.7s > R_s > R_{ave} - 0.7s$
枯水年	$R_{ave} - 0.7s \geq R_s \geq R_{ave} - 1.5s$
异常枯水年	$R_{ave} - 1.5s > R_s$

注: R_s R_{ave} s 分别代表水资源总量的当年值、多年平均值和均方差。

(3) 变差系数反映水资源总体系的离散程度, 变差系数越大, 水资源年际变化剧烈, 对水资源利用不利, 易发生洪涝灾害, 反之年际变化小, 有利于水资源利用。

(4) 采用水资源总量产水模数^[15]及 1999—2004 年陕西省用水量资料, 对陕西省水资源供需进行评

价。产水模数是评估某地天然可供水状况的指标。

(5) 利用 Mann—Kendall 方法分析气温、降水及水资源的变化趋势及突变特性。

(6) 利用复相关系数 R 对回归方程的拟合效果进行检验。

2 评估模型建立

大量研究表明^[6-7, 15], 水资源量与降水关系十分密切, 用降水量和水资源量的线性关系进行水资源评估, 是目前较常用的方法。考虑降水与水资源的线性关系建立的回归方程为:

$$W_p = -236.3 + 0.9515P \quad (R = 0.9100)$$

众所周知, 气温也是影响水资源量的一个重要气候因子, 所以进一步考虑了气温的影响, 同时考虑降水 (P) 和气温 (T) 对水资源量 (P_{PT}) 的影响建立的水资源评估模型为:

$$P_{PT} = 1309.884 + 0.82P - 116.714T \quad (R = 0.9500)$$

表明水资源量与降水和气温同时建立的线性回归方程拟合效果好于只考虑降水影响的拟合方程。所以, 本研究以水资源量为因变量, 降水和气温为自变量建立回归方程, 作为水资源评估模型, 利用该模型反演水资源量历史序列, 分析水资源量的气候变化特征。

由图 1 可以看出, 模拟水资源量与实测水资源量非常接近, 基于水资源评估模型的水资源量与实测水资源量年代际特征一致, 1997—2006 年平均相对误差为 7.6%。从各个年份看, 除 2005 年模拟值与实测值偏差较大外 (相对误差为 17%), 其它年份均比较接近, 模型能够较准确反映水资源总量的整体变化趋势和年代际特征, 可以对陕西省水资源量进行评估。但线性回归模型的计算精度受建模资料序列长度和值域的影响较大, 所以完善水资源资料长度是有待进一步解决的问题。

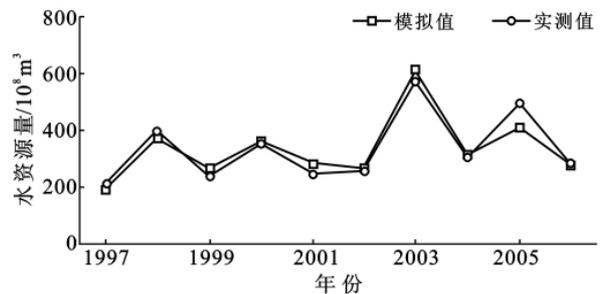


图 1 陕西省 1997—2006 年水资源量模拟值与实测值

3 气温、降水变化分析

由图 2 可以看出,近 50 a 来,陕西省年平均气温呈上升趋势,20 世纪 90 年代以前气温基本为负距平,90 年代以后气温明显升高,尤其是 90 年代中期开始增暖显著。20 世纪 90 年代陕西省年平均气温为 12.1 °C,较常年值偏高 0.3 °C,2001—2009 年年平均气温 12.4 °C,较常年值高出 0.7 °C。Mann—Kendall 检验表明,陕西省年平均气温在 1996 年前后发生突变,显著增温。年降水量减少,年代际波动明显,20 世纪 60 年代和 80 年代降水偏多,70 年代略偏少,90 年代至今降水偏少明显,较多年平均值偏少 3%~11%。降水主要从 20 世纪 80 年代末 90 年代初开始减少, Mann—Kendall 检验表明,降水量变化在 1988 年前后发生突变,降水显著减少。

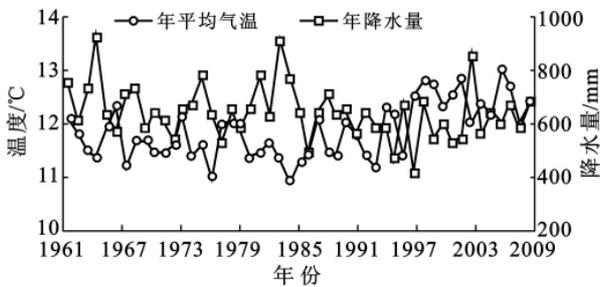


图 2 1961—2009 年陕西省年平均气温、年降水量

4 水资源气候影响分析

4.1 水资源总量年代际特征

分析基于水资源评估模型反演的 1961—2009 年水资源量序列(图 3)发现,受降水减少,气温升高的影响,近 50 a 陕西省年水资源量呈减少趋势。20 世纪 60 年代和 80 年代水资源偏多,70 年代偏少,90 年代至今水资源量明显偏少, Mann—Kendall 检验表明年水资源量变化在 1991 年前后发生突变,自 1991 年前后开始,水资源量显著减少。3 个异常丰水年分别出现在 1964, 1983 和 1984 年; 8 个丰水年除 2003 年外,其余均出现在 1990 年之前,其中 1960s 出现 3 a,

1970s 出现 2 a, 1980s 出现 2 a。由表 2 可见, 1990 年之前的 30 a 中,有 3 个异常丰水年、7 个丰水年, 18 个正常年,其余仅有 2 年水资源较少,属于枯水年, 1990 年之前,陕西省水资源量正常偏多,基本满足陕西省水资源需求。1990 年之后的 19 a 中,仅 1 a 是丰水年,其余 18 a 中有 10 个正常年,且接近偏枯临界线, 4 个枯水年, 4 个异常枯水年,近十几年来,水资源量偏少,仅 90 年代后期(1995—2000 年)就出现 3 个异常偏枯年,水资源短缺问题日益突出。

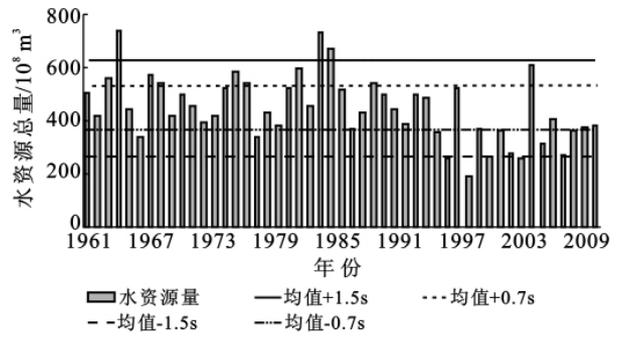


图 3 1961—2009 年陕西省水资源量

表 2 不同时段各丰枯等级的年数 a

时段	异常丰水年	丰水年	正常年	枯水年	异常枯水年
1961—2009 年	3	8	27	6	4
1961—1990 年	3	7	18	2	0
1991—2009 年	0	1	10	4	4

水资源量年际变化稳定性也是影响水资源预测、管理和可持续发展的重要因素。由表 3 看出,与 20 世纪 80 年代及其之前相比,90 年代至今水资源变差系数明显变大,1961—1990 年变差系数为 20.1%, 1991—2009 年为 28%,变差系数明显增大。分析发现,1991 年至今水资源量偏少,水资源变差系数却明显大于 1991 年之前的变差系数值,表明 20 世纪 90 年代之后水资源量减少的同时,其年际变化越来越显著,年水资源量越来越不稳定。这种变化趋势使得水资源调控和管理面临更大的困难,无疑对水资源预测、水资源管理和科学利用提出更大挑战。

表 3 陕西省水资源变差系数分年代变化

项目	1960s	1970s	1980s	1990s	2001—2009 年	1961—1990 年	1991—2009 年
变差系数 C_v /%	20.6	16.2	20.4	28.3	27.8	20.1	28.0

4.2 水资源供需变化的气候特征

水资源总量的年代际特征能够反映某个地区总的水资源状况,是水资源评价的一个方面,但水资源

的科学评价往往受到人口、经济发展、自然地理位置、气候条件等诸多因素的影响,如对于两个人口密度、经济发展水平及自然地理条件不同的地区来说,同样

多的水资源总量所发挥的效力是不同的, 所以从水资源的供应和需求两方面进行综合分析, 才能进一步科学认识某地水资源的变化特征, 完善特定地区水资源状况的评价。

反映某一特定地区水资源情况的指标有很多, 如: 人均水资源量、径流深、产水系数等, 本研究选取产水模数(单位面积水资源量)作为评估陕西省天然可供水状况的指标。陕西省 1961—2009 年多年平均产水模数 $2.18 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 远低于全国平均水平^[15](全国平均产水模数 $2.95 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$), 说明陕西省天然可供水状况低于全国平均水平。近 50 a, 陕西省降水减少, 气温升高, 水资源量减少, 产水模数也呈减小趋势, 自 20 世纪 90 年代以来产水模数显著减小, 1991—2009 年平均产水模数为 $1.79 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 较 1991 年之前偏低 $6.30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。从产水模数看天然可供水量的年代际变化, 受降水量变化影响, 1960s 和 1980s 陕西省天然可供水量较丰富, 1970s 偏少, 1990s 至今偏少最明显。说明随着气候趋向暖干, 陕西省天然可供水量减少, 尤其是 20 世纪 90 年代以来天然供水量显著减少(图 4)。

本研究定义^[15]以保证生态用水的水资源最大限度利用率 40% 作为划分标准, 按照水资源利用率常年大于 40%, 部分年份大于 40%, 全部年份小于等于 40% 的标准, 将我国水资源情况分为 3 类: (1) 常年缺水, 不论天然供水条件如何, 如果用水量常年大于水资源总量的 40%, 则表示水资源利用影响到生态

用水, 环境受到威胁; (2) 早年缺水, 一个地区在部分年份的用水量大于水资源总量的 40%, 或者虽然用水量常年小于水资源总量的 40%, 但天然可供水条件差, 低于国家平均水平; (3) 常年不缺水, 表明常年用水量没有超过水资源总量的 40%, 且天然可供水条件丰富, 高于国家平均水平。

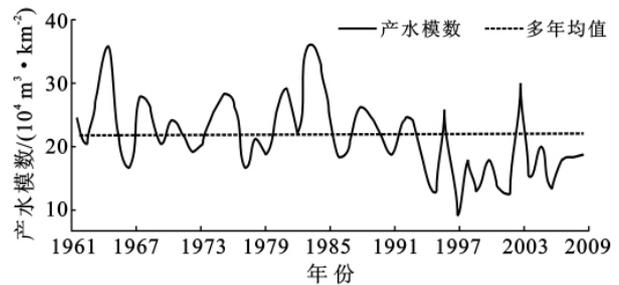


图 4 1961—2009 年陕西省年产水模数

陕西省 1999—2004 年水资源利用率(用水量/水资源总量)均在 40% 以下(表 4), 水资源利用率与水资源量呈显著负相关关系, 水资源量越丰富, 利用率越低, 水资源量越少, 利用率越高。2003 年水资源丰富, 是近 50 a 来第 4 丰水年, 利用率 13.1%, 1999 年水资源偏枯, 是近半个世纪来第 4 枯水年, 利用率 34.3%。由此推断, 陕西省年水资源利用率基本在 40% 以下, 同时, 陕西省天然可供水条件差, 低于国家平均水平, 按照高歌^[15]的定义, 陕西省属于早年缺水类型。近年来, 随着水资源量减少, 生活、工农业水资源利用率随之增加, 水资源需求压力增大。

表 4 陕西省 1999—2004 年用水量与水资源量

项目	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年
水资源量/ 10^8 m^3	231.90	354.60	242.80	255.40	574.60	309.40
用水量/ 10^8 m^3	79.48	78.66	77.88	78.01	75.10	75.50
利用率/%	34.3	22.2	32.1	30.5	13.1	24.4

注: 1999—2004 年用水量和水资源量来源于 1999—2004 年《中国水资源公报》。

5 结论

(1) 近 50 a 来, 陕西省年平均气温升高, 1996 年前后出现转折性增暖, 降水减少, 1988 年前后显著减少, 气候趋于暖干。

(2) 同时考虑降水、气温的水资源评估模型具有对陕西省水资源科学评估的能力, 且评估效果好于只考虑降水的评估模型; 降水减少、气温升高, 陕西省水资源量减少, 1991 年前后水资源量突变减少; 1991 年之前, 陕西省水资源量正常偏多, 之后水资源正常偏枯, 且年际变化越来越显著, 年水资源量越不稳定。

(3) 陕西省属于早年缺水, 天然供水量减少增加了水资源利用率, 尤其是 20 世纪 90 年代连续降水偏少对陕西省工、农、生活用水造成严重影响, 因旱受灾情况严重, 水资源供需压力增大。

(4) 本研究对陕西省水资源的基本状况给出了科学评价, 有利于水资源利用和管理, 为缓解水资源供需矛盾奠定了基础。但目前研究只考虑了该区域平均状态, 陕西省气候区域特征明显, 水资源区域分布极不均匀, 而水文资料缺乏无法进一步对水资源区域特征进行分析, 有待进一步研究。

(下转第 121 页)

知, 研究区崩滑体的滑移距离与其坡高之间存在着显著的线性增长关系, 二者的相关性较高, 可决系数为 0.885 9。

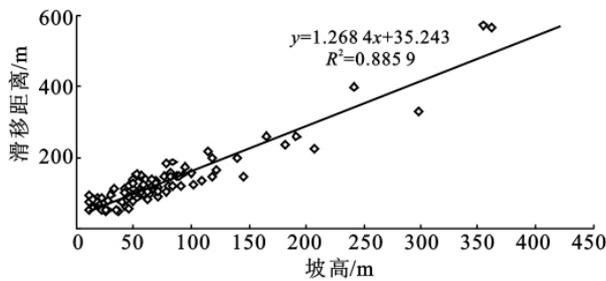


图 5 崩塌滑坡滑移距离与其坡高的关系

4 结论

通过汶川地震灾区崩塌滑坡体积与其特征指标的关系分析研究表明, 崩塌滑坡体积与其面积、坡高等特征指标关系显著, 崩滑体滑移距离与坡高呈线性增长关系。灾区大量崩塌滑坡分布于人员难以到达的地方, 野外调查难度大, 利用遥感技术结合 DEM 数据可以定量获取崩滑体的相关特征信息, 并运用崩滑体体积与其相关特征的经验统计关系, 可以在大范围内初步估算崩塌滑坡体的体积。

[参 考 文 献]

- [1] 唐晓春. 四川 5.12 地震灾害链探讨[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2008, 34(6): 1091-1095.
- [2] 崔鹏, 韦方强, 何思明, 等. “5·12”汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 280-282.
- [3] 范建容, 田兵伟, 程根伟, 等. 基于多源遥感数据的 5.12 汶川地震诱发堰塞体信息提取[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 257-262.
- [4] 谢洪, 钟敦伦, 矫震, 等. 2008 年汶川地震重灾区的泥石流[J]. 山地学报, 2009, 27(4): 501-509.
- [5] 崔鹏, 韩用顺, 陈晓清. 汶川地震堰塞湖分布规律与风险评估[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(3): 35-42.
- [6] 马东涛, 石玉成. 试论地震在泥石流形成中的作用[J]. 西北地震学报, 1996, 18(4): 39-42.
- [7] 赵英时, 李小文, 陈冬梅, 等. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [8] Fausto G, Francesca A, Mauro C, et al. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 279: 222-229.
- [9] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239-1249.

(上接第 117 页)

[参 考 文 献]

- [1] 毕银霞. 陕西省水资源管理问题探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(4): 112-115.
- [2] 徐东霞, 章光新, 尹雄锐. 近 50 年嫩江流域径流变化及影响因素分析[J]. 水科学进展, 2009, 3(20): 416-421.
- [3] 陈桂亚, Derek C. 气候变化对嘉陵江流域水资源量的影响分析[J]. 水资源研究, 2006, 27(1): 25-30.
- [4] 张济世, 康尔泗, 姚尽忠. 气候变化对洮河流域水资源的影响[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 263-267.
- [5] 陈剑池, 金蓉玲, 管光明. 气候变化对南水北调中线工程可调水量的影响[J]. 人民长江, 1999, 30(3): 9-11.
- [6] 陈军锋, 张明. 梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对径流影响的模拟研究[J]. 地理研究, 2003, 22(1): 1-6.
- [7] 朱利, 张万昌. 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化响应的研究[J]. 资源科学, 2005, 27(2): 16-27.
- [8] 国家气候中心气候变化影响评估部. 气候变化影响综合评估方法[M]. 2 版. 北京: 国家气候中心气候变化影响评估部, 2009: 15-40.
- [9] 李志, 刘文兆, 张勋昌, 等. 未来气候变化对黄土高原黑河流域水资源的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3456-3464.
- [10] 井涌. 近 50 年陕西省水资源变化情势及对策[J]. 水资源管理, 2008(7): 44-46.
- [11] 井涌. 秦岭生态保护区水文水资源特征[J]. 长江职工大学学报, 2003, 20(2): 9-11.
- [12] 王国庆, 王军平, 荆新爱, 等. SMHYD 模型在清河流域的应用[J]. 人民黄河, 2006, 28(3): 29-30.
- [13] 程磊, 徐宗学, 罗睿, 等. SWAT 在干旱半干旱地区的应用: 以窟野河流域为例[J]. 地理研究, 2009, 28(1): 65-74.
- [14] 程肖侠, 方建刚, 孙娴, 等. 陕西省可利用降水资源的气候变化特征及敏感性分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 45-50.
- [15] 高歌, 黄朝迎. 中国水资源年景评估方法及其应用研究[J]. 应用气象学报, 2005, 16(S): 105-110.