

李双林,韩乐琼,卞洁.基于IPCC AR4部分耦合模式结果的21世纪长江中下游强降水预估[J].暴雨灾害,2012,31(3):193-200

LI Shuanglin, HAN Leqiong, BIAN Jie. Projecting heavy rainfall events in the middle and lower reach of the Yangtze River valley in the 21st century based on IPCC AR4 simulations [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2012, 31(3): 193-200

## 基于IPCC AR4部分耦合模式结果的21世纪 长江中下游强降水预估

李双林<sup>1,2</sup>, 韩乐琼<sup>3</sup>, 卞洁<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029; 2. 中国科学院 大气物理研究所竺可桢-南森  
国际研究中心, 北京 100029; 3. 成都信息工程学院 大气科学学院, 成都 610225)

**摘要:**利用IPCC AR4气候模式诊断和相互比较项目(PCMDI)20世纪模拟试验资料,通过模式气候态与观测(再分析)气候态的对比,从存有完整逐日降水资料的14个模式中挑选出7个对东亚模拟较好的模式(即gfdl cm2.0、gfdl cm2.1、cgcm、miroc(m)、cnrm、echam、cgcmt47)。然后,利用这7个模式在A1B、A2、B1三种不同温室气体排放情景下21世纪预估试验结果,分析长江中下游强降水的未来演变。结果表明:不同模式模拟结果有较好的一致性。相对20世纪后20年(1980—1999年)的平均而言,21世纪不仅年平均强降水日数、单次强降水强度呈现上升趋势,且其年际变率也增强;就不同排放情景比较而言,A1B、A2情景下强降水频次与强度的增强趋势均比B1情景下要大;就多模式平均来看,在A1B、A2、B1排放情景下,强降水频次分别增加约30%、20%、15%,强降水强度分别增加约20%、20%、10%,强降水频次的年际标准差在三种情景下均增加约20%,强降水强度年际标准差分别增加约20%、20%、10%。这些结果意味着,未来不仅强降水增加,且极端暴雨、大暴雨易于出现,旱涝也将更为频繁。

**关键词:**气候变化;长江中下游;强降水;预估;IPCC AR4 试验

**中图分类号:** P467 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-9045(2012)03-0193-08

## Projecting heavy rainfall events in the middle and lower reach of the Yangtze River valley in the 21<sup>st</sup> century based on IPCC AR4 simulations

LI Shuanglin<sup>1,2</sup>, HAN Leqiong<sup>3</sup>, BIAN Jie<sup>1,2</sup>

(1. *Climate Change Research Center of Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100029;*

*2. Nansen-Zhu International Research Center of Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029;*

*3. School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)*

**Abstract:** By comparing the modeled climatological states in IPCC AR4 PCMDI simulations with the observed (reanalyzed) climatological states, seven models including gfdl cm2.0, gfdl cm2.1, cgcm, miroc(m), cnrm, echam, and cgcmt47 are selected, due to the better performance over East Asia, from all the fourteen coupled climate system models which have daily precipitation data. The Projection of the heavy rainfall events in the middle and lower reaches of the Yangtze River valley in the 21<sup>st</sup> century is derived from the experimental runs with the seven models under the three emission scenarios, A1B, A2 and B1. The results suggest an overall agreement among the models, and averagely the occurrence of the events, the rainfall intensity in a single event, and the interannual variability of events are predicted to be relatively an upward tendency by comparison with that in the latest twenty years of the 20th century (1980-1999). When the different emission scenarios are concerned, the predicted occurrence frequency and intensity under A1B and A2 are higher than that under B1. As for the multiple model ensembles, the occurrence rate of the events is predicted to be increased by 30%, 20%, and 15%, and the intensity in a single event is predicted to be increased by 15%, 10%, and 5% under the emission scenarios A1B, A2, and B1 respectively. Correspondingly, the interannual standard deviations of the event occurrences and the rainfall intensity in a single event are predicted to be increased by 20% and 5% respectively. These indicate there will be not only more occurrence of heavy rainfall events, but also a larger potential increase of extreme heavy rainfall events, as well as more frequent emergence of drought and floods in the future.

**Key words:** climate change; the middle and lower reaches of the Yangtze River valley; heavy rainfall; prediction; IPCC AR4 simulations

收稿日期: 2012-03-17; 定稿日期: 2012-08-06

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05090406)

第一作者: 李双林, 主要从事气候动力学研究。E-mail: shuanglin.li@mail.iap.ac.cn

## 0 引言

长江中下游是我国重要的工农业生产基地,也是暴雨频发区域之一<sup>[1]</sup>。强降水往往引起区域洪涝,不仅对基础设施造成严重破坏,且对人民群众生命财产构成很大威胁,是制约我国经济社会可持续发展的主要气象灾害之一。为了给国家制定未来防灾减灾战略提供科学依据,有必要对长江中下游地区强降水发生频率、强度、范围的未来演变进行较为量化的预估。

政府间气候变化专门委员会(IPCC)关于未来不同温室气体排放情景下耦合模式试验结果,为了解未来长江中下游强降水预估提供了可能。基于IPCC评估报告的试验结果,人们对东亚降水的未来趋势已做过不少研究<sup>[2-10]</sup>。尽管大多数研究表明,在全球变暖的大背景下东亚夏季降水是增加的,但对雨日、强度的预估分析研究相对较少,仍然存在一定的不确定性<sup>[11-13]</sup>。考虑近年来国际上在气候系统模式发展方面已取得很大进步,模式对观测气候的模拟又有新的改善,因此本文利用2007年IPCC第四次评估报告(IPCC AR4)气候模式诊断和相互比较项目(PCMDI)中全球海气耦合模式A1B、A2、B1未来三个排放情景下的试验结果,分析长江中下游未来强降水的演变趋势。A1B、A2、B1三个排放情景分别大致对应适度排放、高排放和低排放,其相应的CO<sub>2</sub>浓度到21世纪末从现在的约380 ppm分别上升到约850、1250、600 ppm(详见IPCC第四次评估报告)。需要指出的是,PCMDI实际参与评估的模式有23个,但因为只能获取其中14个模式的逐日降水资料,故本文的分析资料均基于这14个模式试验的结果。

## 2 资料与方法

### 2.1 观测资料

本文使用的观测资料包括:1)国家气象信息中心提供的752站逐日降水量观测数据集,所取时段为1980年1月至1999年12月;2)1980年1月至1999年12月美国国家环境预报中心下属的气候预测中心提供的逐月降水量格点资料(CPC Merged Analysis of Precipitation)<sup>[14]</sup>;3)1948—2010年美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心全球再分析格点资料(NCEP/NCAR Reanalysis I)<sup>[15]</sup>;4)1979年1月至2010年12月美国国家环境预报中心和能源部再分析资料(NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2))<sup>[16]</sup>。文中将长江中下游区域范围确定为27°—32°N, 105°—122°E。

### 2.2 IPCC AR4耦合模式资料

本文所用到的IPCC AR4耦合模式资料包括:1)

20世纪的模拟资料,即14个全球海气耦合模式在给定历史强迫下对20世纪的模拟(20c3m模拟),主要包括月降水、风场、高度场以及逐日降水;2)21世纪预估资料,即14个耦合模式对未来40年(2046—2065年及2081—2100年两个时段)A1B、A2、B1三种排放情景下的逐日降水预估。这些模式大多采用不同初始条件进行了集合试验,但所用的集合成员数目不尽相同,本文只选取其中第一组试验结果,表1为这14个模式的主要信息(详见[http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model\\_documentation/ipcc\\_model\\_documentation.php](http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/ipcc_model_documentation.php))。

### 2.3 分析方法

本文主要采用合成、相关等分析方法。在模式评估方面,采用Taylor图分析方法<sup>[17]</sup>。Taylor图从三个方面即两个场的相关系数、各自的变率(标准差)以及中心化的均方根误差提供对比,能较为直接地看到模式优劣。

## 3 模式对气候态的模拟评估

全球海气耦合模式由于分辨率低,不能很好地反映中小尺度系统的活动情况。考虑大尺度环流是强降水发生的背景条件,模式对大尺度背景场的模拟能力直接影响其对强降水的模拟能力,因此,首先对模式降水、模式强降水过程与强降水形成紧密相关的大尺度环流背景场等气候态的模拟情况进行评估。所考虑的大尺度环流背景因素包括低层风,高低层风配置及西太平洋副热带高压等。本文中的气候态系指1980—1999年共20年的平均。

### 3.1 降水

通过模拟的20世纪东亚夏季降水气候与CMAP观测降水的对比(图略)可知,14个模式基本上都能再现降水从东南沿海至中国西北内陆减少的空间分布特点;但对于降水的大值中心,不论是位置还是强度,模式之间存在很大差异。从各模式模拟降水与观测的差值场来看,大部分模式模拟的东亚降水是偏少的。在我国,降水偏少中心主要位于南方,北方夏季降水模拟相对实际观测稍微偏强。从模式间差异比较来看,csiro-mk3.0、csiro-mk3.5、ccsm3以及pcm相对较差,负差值中心位置和范围比观测偏离很多。

上述特点在图1上有很好反映。首先,模式中东亚降水场与观测的空间相关系数在0.3~0.6之间。相关系数较高即对于空间型模拟相对较好的模式有gfdl cm2.1、echam以及miroc(m),而模拟较差的是giss\_er和pcm。就标准差分布而言,cgcm t47、gfdl cm2.0和gfdl cm2.1与观测很接近,而miroc(m)和ccsm3模拟值过低,giss\_er模拟的变率范围偏大。从均方根误差来看,miroc(m)、csiro mk3.0、gfdl cm2.0、gfdl cm2.1以及

表1 本文使用的14个全球海气耦合模式

编号	研发机构或组织,国家	IPCC I.D.	大气模式分辨率	海洋模式分辨率	通量调整
1	Bjerknes Center for Climate Res, Norway	BCCR-BCM2.0 2005	top=10 hPa T63(1.9° × 1.9°)L31	0.5°-1.5° × 1.5° L35 density, free surface	无
2	Canadian Centre for Climate Modeling & Analysis, Canada	CGCM3.1(T47) 2005	top=1 hPa T47(~ 2.8° × 2.8°)L31	1.9° × 1.9° L29 depth, rigid lid	有(热量和淡水)
3	Météo-France / Centre National de Recherches Météorologiques, France	CNRM-CM3 2004	top=0.05 hPa T63(~ 1.9° × 1.9°)L45	0.5°-2° × 2° L31 depth, rigid lid	无
4	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Atmospheric Research, Australia	CSIRO-MK3.0 2001	top=4.5 hPa T63(~ 1.9° × 1.9°)L18	0.8° × 1.9° L31 depth, rigid lid	无
5	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Atmospheric Research, Australia	CSIRO-MK3.5 2006	top=4.5 hPa T63(~ 1.9° × 1.9°)L18	0.8° × 1.9° L31 depth, rigid lid	无
6	US Department of Commerce/ NOAA/ Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	GFDL-CM2.0 2005	top=3 hPa 2.0° × 2.0° L24	0.3°-1.0° × 1.0° depth, free surface	无
7	US Dept. of Commerce/ NOAA/ Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	GFDL-CM2.1 2005	top=3 hPa 2.0° × 2.5° L24	0.3°-1.0° × 1.0° depth, free surface	无
8	National Aeronautics and Space Administration/Goddard Institute for Space Studies, USA	GISS-ER 2004	top=0.1 hPa 4° × 5° L20	4° × 5° L13 mass/area, free surface	无
9	Institute Pierre Simon Laplace, France	IPSL-CM4 2005	top=4 hPa 2.5° × 3.75° L19	2° × 2° L31 depth, free surface	无
10	Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change, Japan	MIROC3.2 (medres) 2004	top=30 km T42(~ 2.8° × 2.8°)L20	0.5°-1.4° × 1.4° L43 sigma/depth, free surface	无
11	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	ECHAM5/MPI-OM 2005	top=10 hPa T63(~ 1.9° × 1.9°)L31	1.5° × 1.5° L40 depth, free surface	无
12	Meteorological Research Institute, Japan	MRI-CGCM2.3.2 2003	top=0.4 hPa T42(~ 2.8° × 2.8°)L30	0.5°-2.0° × 2.5° L23 depth, rigid lid	有(热量,淡水,动量)
13	National Center for Atmospheric Research, USA	CCSM3 2005	top=2.2 hPa T85(~ 1.4° × 1.4°)L26	0.3°-1° × 1° L40 depth, free surface	无
14	National Center for Atmospheric Research, USA	PCM 1998	top=2.2 hPa T42(~ 2.8° × 2.8°)L26	0.5°-0.7° × 1.1° L40 depth, free surface	无

注: IPCC I.D. 一列中的模式外文名称缩写,文中一律用小写缩写形式

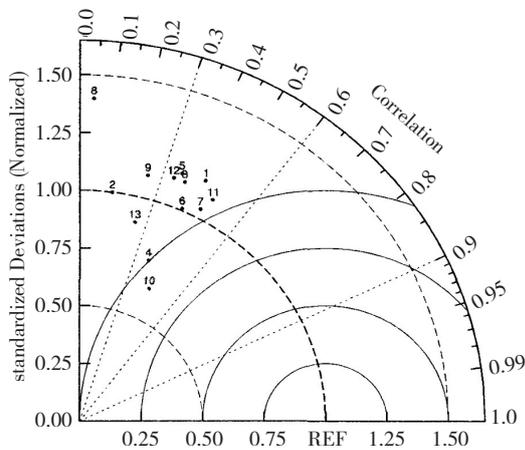


图1 东亚夏季平均降水和观测降水场 Taylor图(REF为参考尺寸)

图中1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14分别代表bcm、cgcm3\_1 t47、cnrm、csiro mk3.0、csiro mk3.5、gfdl cm2.0、gfdl cm2.1、giss\_er、ipsl、miroc(m)、echam、mricgcm、near ccsm、near pcm模式

echam模拟相对较好,模拟较差的则为giss\_er。

同时,本文对模式对强降水气候学特征的模拟进行评估。考虑到模式模拟的降水普遍偏小,定义日降水量大于等于25 mm为一次强降水(日)过程。夏季强降水频次为所有站点(对模式来说是格点)的平均。对强降水强度的定义是:先将每天每个站点(格点)大于50 mm (25 mm)的值记录下来;然后,将单个站点(格点)整个夏季的强降水值相加记为该站点(格点)的强降水总量;再用这一总量除以该点发生强降水的次数,记为该点的强降水强度。之后,再做区域平均,得到区域平均强降水强度。由于个别模式有格点整个夏季日降水没有达到25 mm,所以该点强降水强度很小。

表2给出模式与观测强降水频次和强度多年气候平均的比较。作为参考,将观测中大雨(25 mm·d<sup>-1</sup>)以

上的过程列出。从中可见,在模式中通过降低强降水标准后,多数模式强降水频次与观测比较接近(1~3

次),但强降水强度普遍偏小。此外,模式之间表现出很大差异。较差的模式有 *csiro mk 3.0* 和 *ipsl\_cm4*。

表2 观测与14个海气耦合模式的强降水频次与强度气候态比较(括号中为观测中大雨以上的过程)

要素	观测	模式1	模式2	模式3	模式4	模式5	模式6	模式7	模式8	模式9	模式10	模式11	模式12	模式13	模式14
频次	2.63 (4.36)	2.65	0.79	2.72	0.04	1.16	0.94	0.96	2.04	0.45	3.40	2.67	0.85	0.76	1.01
强度	70.2 (34.6)	20.3	1.61	29.0	1.1	20.3	20.9	17.7	43.2	9.9	32.6	32.5	16.3	14.2	20.9

注:模式1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14分别为 *bcm*、*cgcm t47*、*cnrm*、*csiro 3.0*、*csiro3.5*、*gfdl cm2.0*、*gfdl cm2.1*、*giss\_er*、*ipsl*、*miroc(m)*、*echam*、*mri\_cgcm*、*ncar\_ccsm*、*ncar\_pcm*;阴影显示的模式其模拟的气候态相对较好;下同。

### 3.2 大尺度大气环流

低层水平风与降水有着极为密切的关系。从模式与观测的比较来看(图略),除 *csiro mk3.0*、*csiro mk3.5*、*ccsm3* 以及 *pcm* 所模拟的低层风向与观测相反外,其余模式均模拟出东亚夏季的偏南、偏东风及西太平洋上空的反气旋环流。

为了更量化模式模拟东亚风场的的能力,采用文献[18]中定义的东亚夏季风指数,即区域(20°—40°N、110°—140°E)平均的850 hPa与200 hPa的纬向风切变来分析。在观测(再分析资料)中,20世纪70年代末东亚夏季风由正位相转变为负位相,且整个时间序列表现为一个下降趋势。14个海气耦合模式中,有9个模式模拟出这种下降趋势,而剩余5个模式(*bcm*、*csiro mk3.5*、*giss\_er*、*ccsm3*、*pcm*)模拟趋势则相反(表2,第1行)。

西北太平洋副热带高压(简称副高)对东亚水汽输

送有着重要影响。对比分析模式模拟的副高变率,从1980—1999年850 hPa高度场的年际标准差来看,在观测资料中,与同纬度其它地区相比,西北太平洋副高区域的年际变率要大得多。模式模拟的副高年际变率大多都能抓住观测中的大值中心,但变率强度却有很大的差别。*bcm*和*gfdl cm2.1*模拟的变率相对较低,而模式*csiro mk3.0*、*csiro mk3.5*、*mirco(m)*、*mpi\_echam*、*ccsm*以及*pcm*模拟的变率远远大于观测值。

综上所述, *gfdl cm2.0*、*gfdl cm2.1*、*cgcm*、*miroc(m)*、*cnrm*、*echam*、*cgcm47*等7个模式(在表2、3中,用阴影显示),尽管它们对副高及长江中下游降水及强降水频率、强度等年际变化的模拟不够理想(表3),但它们比其它模式好。这与张莉等<sup>[20]</sup>的评估结果有较好的一致性。这些模式均是分辨率较高的模式。因此,以下对未来强降水的预估,将基于这7个较好模式的数据结果。

表3 14个海气耦合模式模拟的各要素逐年演变与其实际观测的相关系数

要素	模式1	模式2	模式3	模式4	模式5	模式6	模式7	模式8	模式9	模式10	模式11	模式12	模式13	模式14
<i>EASM</i>	-0.08	0.24	0.09	0.03	-0.13	0.02	0.09	0.06	0.12	0.17	-0.06	0.03	-0.10	-0.07
<i>WPSH</i>	0.15	0.44	-0.22	0.28	0.05	0.15	0.41	-0.32	0.07	-0.24	-0.04	0.06	0.22	0.00
<i>YRR</i>	-0.13	0.27	-0.32	-0.23	-0.13	-0.28	-0.24	-0.14	0.04	-0.25	-0.19	0.05	0.07	0.18
<i>YRHRF</i>	-0.30	-0.01	-0.10	0.32	-0.30	-0.19	0.12	0.02	0.15	-0.15	-0.45	0.28	0.16	0.14
<i>YRHS</i>	-0.10	-0.02	-0.56	-0.06	-0.02	0.07	-0.21	0.30	0.26	0.26	0.01	-0.17	-0.23	-0.10

注: *EASM*为东亚夏季风指数, *WPSH*为西太副高强度指数(依据文献[19],定义为区域10°—30°N、110°—150°E 850 hPa高度场异常的均值), *YRR*为长江中下游夏季降水量, *YRHRF*为长江中下游强降水频次, *YRHS*为长江中下游强降水强度

## 4 未来长江中下游强降水预估

### 4.1 强降水频次的变化

张莉等<sup>[20]</sup>的研究结果表明:在夏季,全球海气耦合模式模拟的50 mm以上的强降水日数相比实际观测明显偏少,其中半数以上的模式还不到1天。因此,有必要将暴雨事件的定义降低。此研究中,规定日降水量≥25 mm为强降水。考虑到不同模式的空间分辨率差别大,不便于多模拟结果的集合或合成分析,首先对不同空间分辨率的日资料进行空间插值。另外,由于选择的区域面积小、包含格点少,分析主要基于区

域平均值来进行。

图2为各单个模式及多模式集合平均(MME)的区域暴雨频次变化的盒须图。从中可以看到:除模式*cgcm*外,其他6个模式均显示未来40年强降水频次均值相对于20世纪是增加的,但模式间存在明显差异。在A1B的情景下, *gfdl cm2.0*、*echam*所预估的强降水均值增长较为明显,尤其是前者,强降水日数由20世纪的1.8天增至3天;而*echam*模拟出未来40年有极端值出现,频次达到8次。A2情景下, *gfdl cm2.0*、*echam*均模拟出极端值,而强降水频次的变化幅度相对A1B更集中。B1情景下,尽管 *gfdl cm2.0*、*gfdl cm2.1*、*cgcm*、

echam均模拟出有极端值出现,但与前两种排放情景相比,其均值增长还是相对较小。多模式集合平均值(mme)也表明(图2h):未来40年强降水频次表现为增长的趋

势。盒须图虽然既能较好地反映出强降水频次均值的变化,又能大致体现不同数据变化的大小,但却不能定量反映其年际变率。

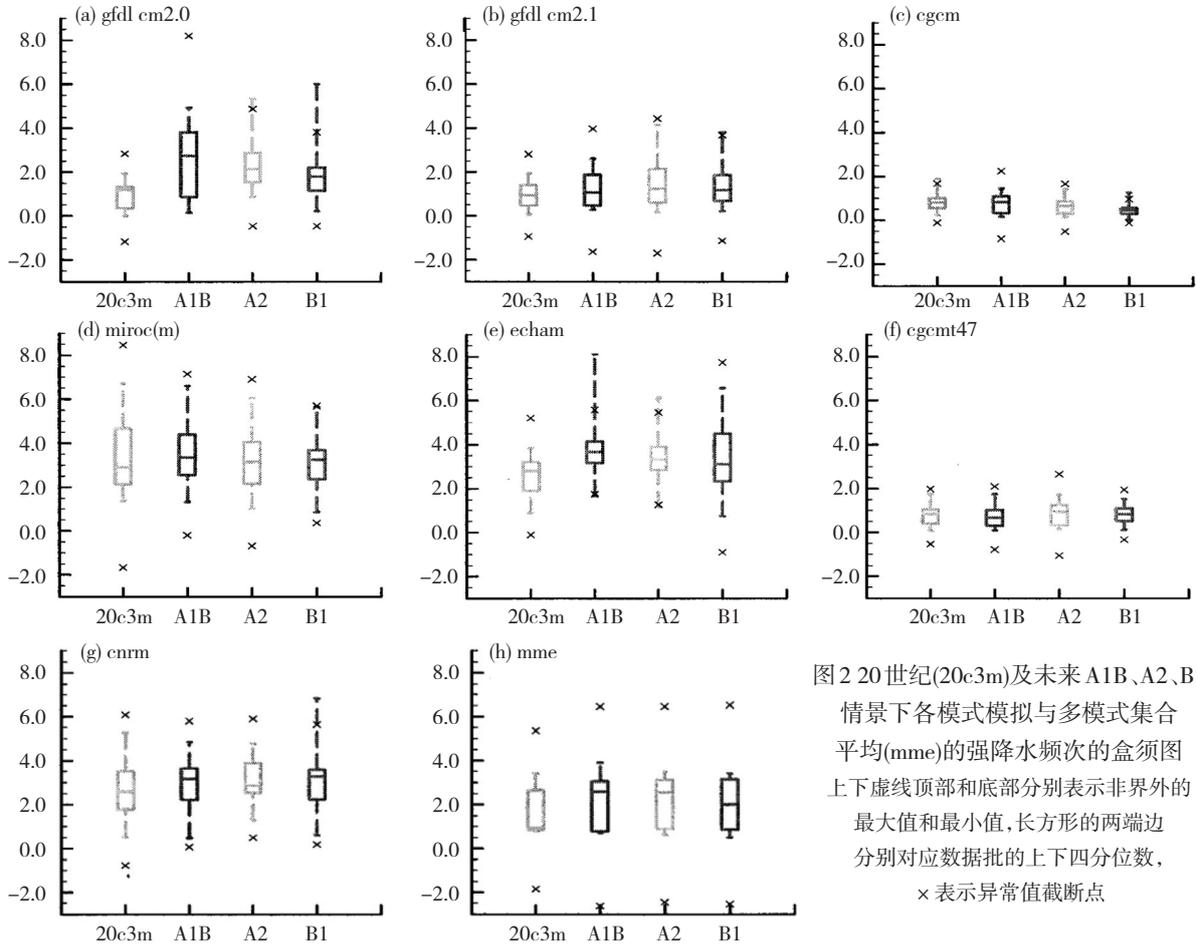


图2 20世纪(20c3m)及未来A1B、A2、B1情景下各模式模拟与多模式集合平均(mme)的强降水频次的盒须图  
上下虚线顶部和底部分别表示非界外的最大值和最小值,长方形的两端边分别对应数据批的上下四分位数,  
×表示异常值截断点

对该区域的强降水频次年际变率作定量分析如下:表4为各模式模拟的长江中下游强降水频次的年际标准差。7个模式所模拟的20世纪暴雨频次的年际变率相对于观测值均增大。在未来三个排放情景下,一半以上的模式预估的年际变率均增强。在A1B情景下,gfdl cm2.0、gfdlcm2.1、cgcm以及echam模拟的年际变率增强通过90%显著性检验。A2情景下,模式gfdl cm2.0、gfdlcm2.1、echam以及cgcm t47模拟的年际变率显著增强。在B1情景下,有4个模式所得的年际标准差有增长趋势。从多模式平均来看,三种排放情景下,年际标准差相比20世纪(20c3m)均明显增加(约20%)。

图3显示三种情景下各模式强降水频次平均值和标准差在21世纪和在20世纪的比值。从中可见,大多数模式这两个比值均大于1,说明预估的长江中下游强降水频次及年际变率在增加,与图2、表2的结果相一致。从多模式平均来看(mme,图3中h点),在三种排放情景下,横坐标值大约为1.3,1.2,1.15,这意味着强降水频次将分别增加约30%、20%和15%。另外,

表4 长江中下游地区区域平均强降水频次在20世纪(20c3m)模拟及在A1B、A2、B1情景下各模式模拟和多模式集合平均(mme)的比较(单位: d)

模式	长江中下游强降水频次年际标准差			
	20c3m	A1B	A2	B1
gfdl cm2.0	0.62	1.48	1.42	1.32
gfdl cm2.1	0.60	0.82	1.02	0.88
cgcm	0.39	0.42	0.36	0.33
miroc	1.56	1.55	1.53	1.21
echam	0.86	1.43	1.36	1.40
cgcm t47	0.47	0.45	0.49	0.41
cnrm	1.20	1.15	0.94	1.42
mme	0.81	1.05	1.02	1.00

图3还表明,相对于20世纪,在A1B、A2两种情景下,未来40年强降水频次的年际变率是增长的,gfdl cm2.0、gfdl cm2.1、cgcm、echam模式模拟的标准差比值结果均大于1。gfdl cm2.0甚至预估的标准差增长了2.5倍。而B1情景下,所模拟的强降水频次年际变率增长相比前两种情景明显减弱了。gfdl cm2.0、gfdl

cm2.1、cnrm 所模拟的强降水频次的均值变化基本上与年际变率一致。从多模式平均来看,A1B、A2、B1 三

种排放情景下,标准差比值均在 1.2 附近,即增加约 20%,与表 4 中的结果一一致。

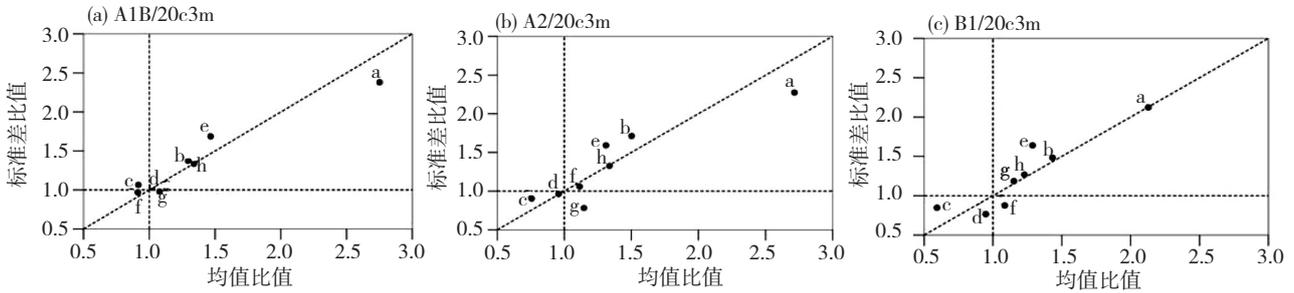


图3 各模式及多模式平均(mme)21世纪(21st)与20世纪(20th)强降水频次比值散点图

横坐标为平均值的比值(21st/20th),纵坐标为标准差的比值(21st/20th);

图(a),(b),(c)分别对应 A1B、A2、B1 三种排放情景;a、b、c、d、e、f、g、h 分别代表

gfdl cm2.0、gfdl cm2.1、cgcm、miroc(m)、echam、cgcm t47、cgcm 模式和 mme

### 4.2 强降水强度的变化

图4为各模式以及模式平均的20世纪长江中下游强降水强度的盒须图。从中看到,除cgcm、miroc(m)外,其他模式模拟的强降水强度均值在未来40年均是增大的。A1B情景下,强降水强度的最大值相对于20世纪均有所增加,但各模式强度的集中范围差别较大。模式gfdl cm2.0、gfdl cm2.1、echam和cnrm所模拟的强降水集中强度在30~40 mm·d<sup>-1</sup>,而cgcm47则在10~20 mm·d<sup>-1</sup>的范

围。另外在cnrm模拟中,还出现强降水强度极端值,达到48 mm·d<sup>-1</sup>。A2情景下,强降水强度均值与A1B相比,差别不大,但gfdl cm2.0、gfdl cm2.1、cgcm、echam模拟结果均显示,强降水强度集中程度相对于A1B更集中,变化范围较小。在B1情景下,强降水强度均值与A1B、A2相比,4个模式均表现出强度变小的趋势。而多模式集合平均结果(图4h)显示,未来40年强降水频次的均值在各个情景下均有所增长,变化范围略微增大。

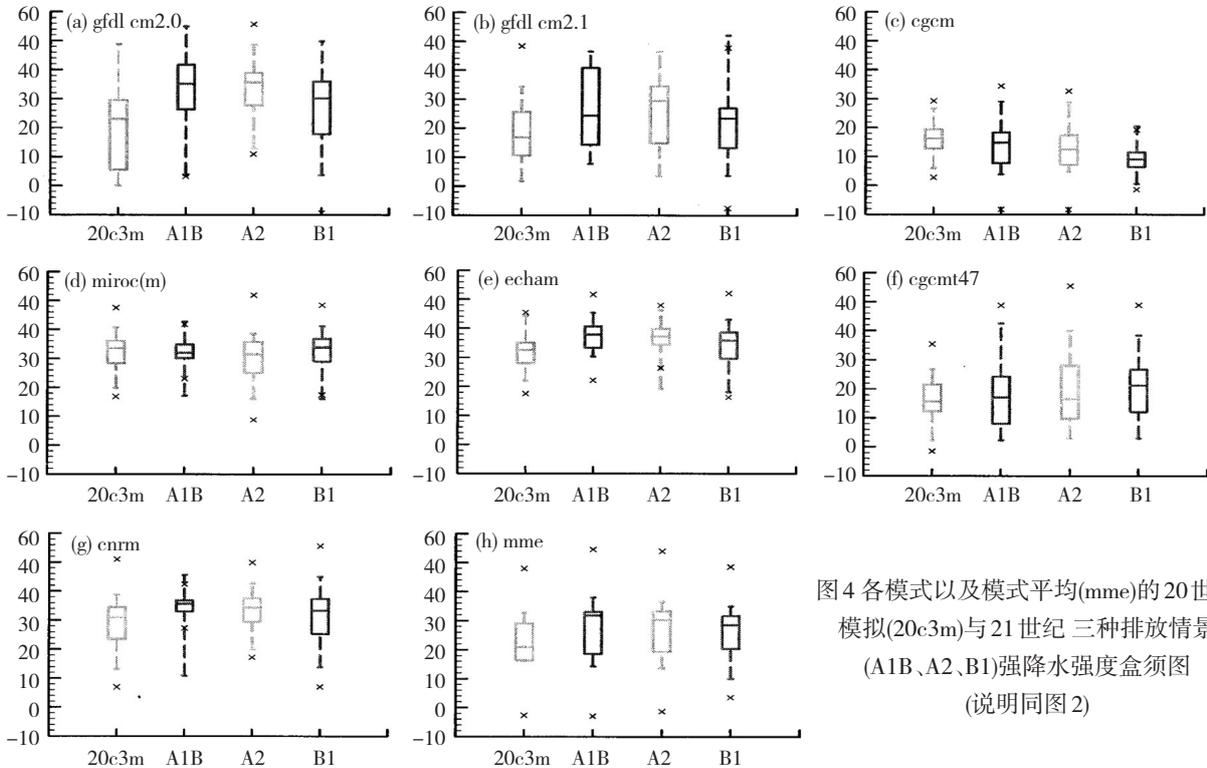


图4 各模式以及模式平均(mme)的20世纪模拟(20c3m)与21世纪三种排放情景(A1B、A2、B1)强降水强度盒须图(说明同图2)

为了更好地分析各模式预估的强度变化,给出强降水强度的概率分布图(图5)。从中可清晰地看到,未来40年相对于20世纪各模式模拟的强降水强度、发生频率的变化。纵观所有模式强降水强度的概率分

布发现,除了模式cgcm、miroc(m)外,其它5个模式以及模式平均结果相对于20世纪的分布型均呈现较为明显的右偏状态,即未来40年强降水强度在更大值区域分布越来越广。其中gfdl cm2.0、cnrm不仅出现右偏

的形式,还出现频率也比20世纪高出2%左右。echam模拟的强度,在3个情景下集中分布范围由20世纪的25~35 mm·d<sup>-1</sup>偏移至35~40 mm·d<sup>-1</sup>的范围,但其出现频率并没有很大变化。模式集合平均结果显示:在

未来40年,所有3种排放情景下,强降水强度集中分布于25~30 mm·d<sup>-1</sup>,相比20世纪有明显增强,且其出现频率也远高于20世纪的值。相比之下,在B1情景下的变化比A1B、A2要小。

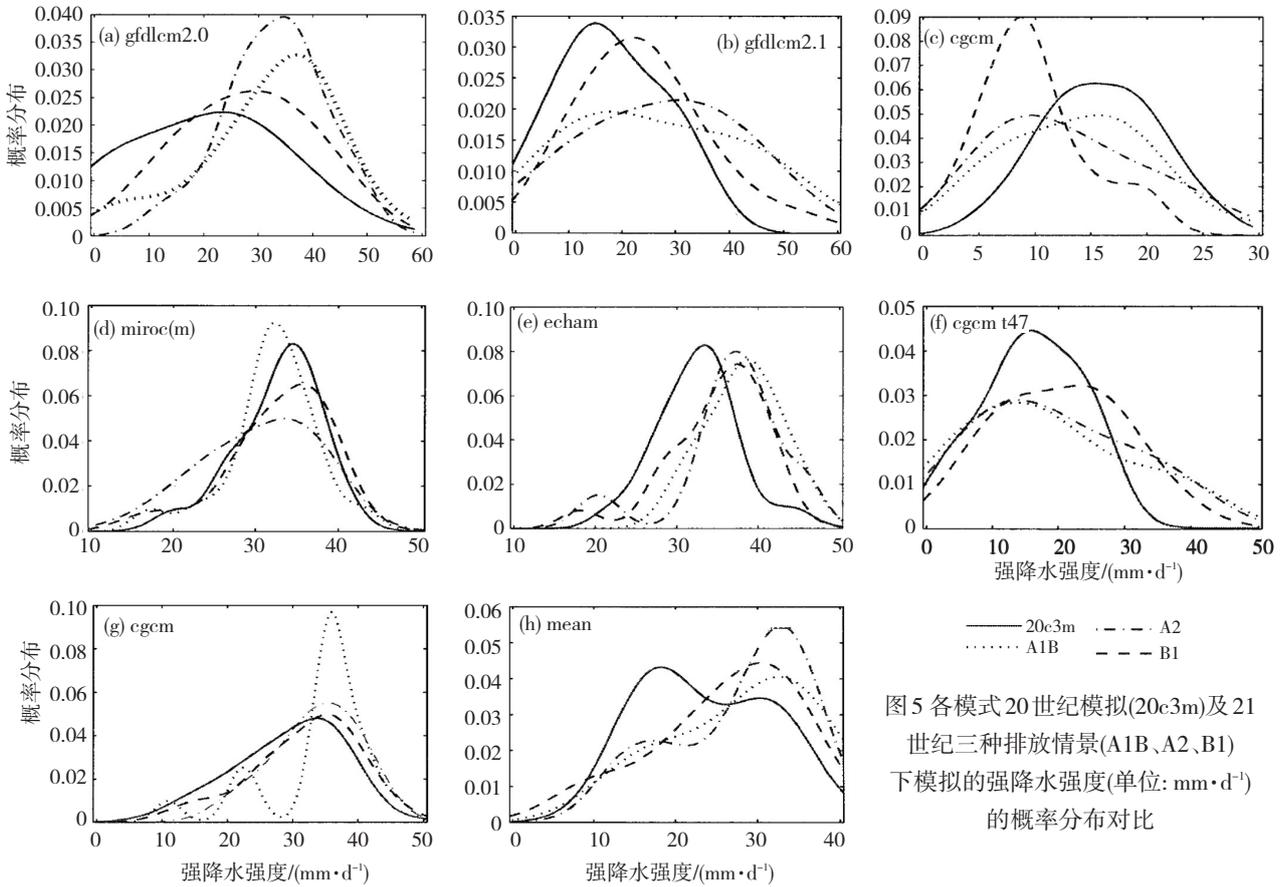


图5 各模式20世纪模拟(20c3m)及21世纪三种排放情景(A1B、A2、B1)下模拟的强降水强度(单位: mm·d<sup>-1</sup>)的概率分布对比

图6分别为预估的A1B、A2、B1三种排放情景下21世纪强降水强度平均值和标准差与20世纪气候平均值和标准差的比值。从中可见,在3个情景下,除cgcm、miroc(m)外,其余5个模式预估的强降水强度的均值均是增加的,而年际变率除gfdl cm2.0、cnrm,其余模式也同样表现为增加趋势。此外,各种情景下,模式模拟的强降水强度变率的增强明显大于均值的增

长。在情景B1下,除gfdl cm2.0、cgcm外,其余模式模拟结果的均值与年际变率位于虚线附近,与A1B、A2情景相比,变化幅度明显要小。从几个模式平均来看,横坐标值大约为1.2、1.2和1.1,说明在A1B、A2、B1三种排放情景下强度分别增加约20%、20%、10%。纵坐标值均大约为1.2、1.2、1.1,意味着强度年际标准差三种排放情景下分别增加约20%、20%、10%。

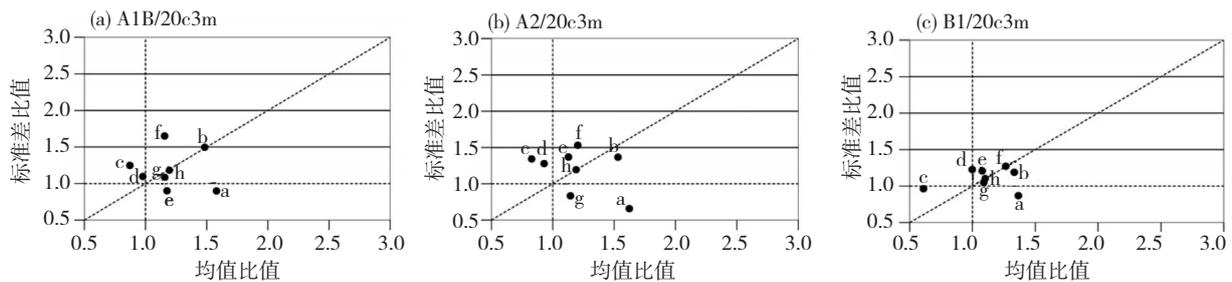


图6 各模式与多模式平均(mme)预估的三种排放情景(A1B、A2、B1)下21世纪(21st)与20世纪(20th)强降水强度比值散点图  
横坐标为平均值的比值(21st/20th),纵坐标为标准差的比值(21st/20th);其他说明同图3

## 5 结论

通过对IPCC AR4多个模式对20世纪的模拟与观测(再分析)的对比及未来40年(2046—2065年、2081—2100年)预估结果的分析,得到以下结论:

(1) 从东亚降水及主要环流系统的比较来看,在所有模式中有7个模式对东亚夏季的气候态模拟较好,它们分别为gfdl cm2.0、gfdl cm2.1、cgcm、mirc(m)、cnrm、echam、cgcm47。这一结果与之前的研究有一定的相似性。这些模式均是分辨率较高的模式。

(2) 相对20世纪后20年的模拟,未来长江中下游强降水频次呈现上升趋势,年际变率也将增大。

(3) 长江中下游强降水强度的概率分布在未来40年呈现右偏形态,集中程度越来越偏向于大值区,强度在增大,强度的年际变率也呈较大增长。

(4) 绝大多数模式以及多模式平均结果均表明,未来40年在A1B、A2情景下强降水频次与强度的变化强度要比在B1情景下的大。

值得注意的是,未来40年,A1B的排放情景可能与人类社会发展实际更为贴近,本文分析表明在此情景下,强降水频次以及强度的预估结果均呈现增大、增强的趋势,且各模式表现出较高的一致性。于是,未来长江中下游地区强降水易于多发,大暴雨事件也将增多。从物理条件上讲,这一结果与全球变暖的大背景是一致的。因为伴随气温升高,空气达到饱和时所需要的水汽含量将大为增加,这将提供有利于形成暴雨、大暴雨发生的水汽条件。此外,本文还得到强降水频次及强度的年际变率均增加的结论,考虑强降水过程引起的降水量占总降水的比率很大,这意味着极端旱涝事件可能变得更为频繁。

### 参考文献:

- [1] 陶诗言,等.中国之暴雨.北京:科学出版社,1980.
- [2] Hu Z Z, Latif M, Roeckner E, et al. Intensified Asian summer monsoon and its variability in a coupled model forced by increasing greenhouse gas concentrations. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 2681–2684.
- [3] Bueh C, Cubasch U, Lin Y, et al. The change of North China climate in transient simulations using the IPCC SRES A2 and B2 scenarios with a coupled Atmosphere–ocean general circulation model. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20: 755–766.
- [4] Min S K, Park E H, Kwon W W. Future projections of East Asian climate change from multi-AOGCM ensembles of IPCC SRES scenario simulations. *J Meteor Soc Japan*, 2004, 82: 1187–1211.
- [5] Kimoto M. Simulated change of the East Asian circulation under global warming scenario. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L16701.
- [6] Kitoh A, Hosaka M, Adachi Y, et al. Future projections of precipitation characteristics in East Asia simulated by the MRI CGCM2. *Adv Atmos Sci*, 2005, 22: 467–478.
- [7] Kripalani R, Oh H, Chuadhari H S. Response of the East Asian summer monsoon to doubled atmospheric CO<sub>2</sub>: Coupled climate model simulations and projections under IPCC AR4. *Theor Appl Climatol*, 2007, 87: 1–28.
- [8] Lu R, Li Y, Dong B. East Asian precipitation increase under the global warming. *J Korean Meteor Soc*, 2007, 43: 267–272.
- [9] Lee E J, Kwon W T, Baek H J. Summer precipitation changes in North-east Asia from AOGCM global warming experiments. *J Meteor Spr Japan*, 2008, 86: 475–490.
- [10] Lee S M, Jhun JG, Kwon M H, et al. Change in the western North Pacific summer monsoon circulation due to the CO<sub>2</sub> increase in IPCC AR4 CGCMs. *AsiaPac Atmos Sci*, 2008, 44: 351–368.
- [11] Kitoh A, et al. Future projections of precipitation characteristics in East Asia simulated by the MRI CGCM2. *Adv Atmos Sci*, 2005, 20: 467–478.
- [12] Dai A. Precipitation in eighteen coupled climate models. *J climate*, 2006, 19: 4605–4630.
- [13] 江志红,陈威霖,宋洁,等.7个IPCC AR4模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估[J].*大气科学*,2009,33(1): 109–120.
- [14] Xie P, Arkin P A. Global Precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78: 2539–2558.
- [15] Kalnay E, Coauthors. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77: 437–471.
- [16] Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Wollen J, et al. NCEP–DOE AMIP–II Reanalysis (R-2). *Bull Amer Meteor Soc*, 2002, 83: 1631–1643.
- [17] Taylor K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J Geophys Res*, 2001, 106: 7183–7192.
- [18] Han J, Wang H. Interdecadal variability of the East Asian summer monsoon in an AGCM. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24: 808–818.
- [19] Lu R, Fu Y H. Intensification of East Asian summer rainfall interannual variability in the twenty-first century Simulated by 12 CMIP3 Coupled Models. *J climate*, 2010, 23: 3316–3331.
- [20] 张莉,丁一汇,孙颖.全球海气耦合模式对东亚降水模拟的检验[J].*大气科学*,2008,32:99–117.