中国东部水分收支的初步分析

张文君^{1,3} 周天军¹ 宇如聪^{2,1}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029
 2 中国气象局中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081
 3 中国科学院研究生院,北京 100049

摘 要利用中国 160 站降水资料、中国气象局提供的探空资料、NCEP/NCAR 提供的再分析资料(简称 NCEP 资料)和 ECMWF 提供的再分析资料(简称 ERA40 资料),根据水汽平衡方程,估算了 1990~1999 年中国东部的 陆表水分收支,分析了华北、长江流域和华南三个典型区域的陆表水分收支,同时对 NCEP、ERA40 资料在东亚 地区的陆表水分收支进行评估。结果表明,在中国东部区域,年平均和夏季是水汽汇区,冬季降水与蒸发基本平衡;华北在年平均、夏季以及冬季均为水汽源区;长江流域在年平均、夏季及冬季均为水汽汇区;华南在年平均 和冬季为弱水汽汇区,夏季为水汽源区。两套再分析资料基本揭示出了上述特征。就区域平均的蒸发和降水的年际变化而言,两套再分析资料的结果与观测都存在显著相关,但估算的蒸发 NCEP 好于 ERA40;相对于气候态的 定量比较而言,由两套再分析资料得到的陆表水分收支距平(即降水减去蒸发的距平)的年际变化基本与观测一致。

关键词 降水 蒸发 陆表水分收支 中国东部文章编号 1006 - 9895 (2007) 02 - 0329 - 17中图分类号 P426文献标识码 A

A Preliminary Analysis on the Moisture Budget of East China

ZHANG Wen-Jun^{1, 3}, ZHOU Tian-Jun¹, and YU Ru-Cong^{2, 1}

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Moisture budget at the land surface of eastern China is evaluated by using monthly station precipitation data and radiosonde data provided by China Meteorological Administration, and two reanalysis data provided respectively by the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) and the European Center for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF). The time covers 1990 to 1999. The precipitation (P) and moisture flux divergence are directly calculated with the data, whilst the evapotranspiration (E) is estimated as a residual of the moisture budget equation. The moisture budget at the land surface of eastern China and three sub-regions, i. e. the North China ($36^{\circ}N - 41^{\circ}N$, $110^{\circ}E - 122^{\circ}E$), the Yangtze River valley ($29^{\circ}N - 32^{\circ}N$, $110^{\circ}E - 122^{\circ}E$), and the South China ($22^{\circ}N - 25^{\circ}N$, $110^{\circ}E - 117^{\circ}E$), is assessed. The analyses show that E is larger than P in annual mean and summer mean, and in winter E seems to be equivalent to P in eastern China. North China is a moisture source in context of

作者简介 张文君, 男, 1979年出生, 在读硕士, 目前主要从事陆面过程及其气候影响的观测与模拟。E-mail: zhangwj@mail. iap. ac. cn

收稿日期 2005-09-22, 2006-03-13 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2005CB321703、中国科学院创新团队国际合作伙伴计划"气候系统模式研发及应用研究",国家自然科学基金资助项目 40375029、40233031

annual, summer, and winter mean, whilst the Yangtze River valley is a moisture sink. In South China, P is slightly larger than E in annual mean and winter, while E is larger than P in summer. The results of the two reanalysis data generally coincide with the observations. For the time series of anomalous regional mean E and P, there exist significant positive correlations between reanalysis data and observations. The NCEP data are better than ERA40 in regional mean E estimation. In comparison with quantitative estimation of climate mean states, the time series of anomalous moisture budget at land surface [the anomaly of (P - E)] for the two reanalysis data are well correlated with the observations.

Key words precipitation, evapotranspiration, moisture budget of land surface, eastern China

1 引言

330

陆表水循环过程作为连接大气和陆面相互作用 的重要纽带,其作用在气候学研究中日益受到重 视。但是受观测资料匮乏等因素所限,目前我们对 大尺度水循环,特别是陆表水循环过程的理解还非 常有限。全球能量和水循环试验 (GEWEX) 中的 GCIP(GEWEX Continental-Scale International Project) 正是将改善和提高对陆地水文过程的认识、发 展和检验大尺度水文模式和相关的高精度大气模式 及耦合的大气-水文模式作为目标[1]。但由于种种 原因大尺度定量化的研究仍较少,对其认识还不 够。为了更好地认识水循环陆表分支,国外科学家 做了许多工作: Rasmusson^[2~4] 细致地分析了美国 的水汽输送及大尺度的水循环,在用水汽平衡方程 估算 P-E (即降水减去蒸发) 时,发现在美国和加 拿大南部区域,在冬季,P-E被高估了,而在夏 季, P-E 被低估了; Roads 等^[5]研究了美国区域 大尺度水循环过程及各分量间的关系,指出美国年 平均降水主要由蒸发平衡,但外部水汽输送的贡献 也很重要,尤其在冬季及美国西海岸; Zangvil 等^[6] 根据美国中西部的探空资料及降水资料,利用水汽 平衡方程估算蒸发,分析了夏季大尺度的水汽收 支,结果表明在月和季的时间尺度上蒸发大于降 水,此外,在从日到月的时间尺度上,蒸发与降水 的正相关更加显著。

在国内,水汽收支工作已经做了很多。例如, 对暴雨区水汽收支细致深入的分析表明,暴雨区都 是位于较大的水汽辐合和对流不稳定区,且在降水 过程中,局地蒸发项在水汽的供应中十分重 要^[7~9];围绕着全球水循环的海洋分量以及海气间 的水通量交换,一些学者讨论了全球海气通量的分 布^[10~12]等;此外,许多学者对东亚季风气候相关的 水汽输送作了较深入的研究,加深了我们对季风区 水循环的理解^[13~15]。对大尺度陆表水分收支的研究^[16~21]有一些,但依然很不够。

在陆表水分收支研究中,测量蒸发是十分困难 的,尽管对于一些地区而言,半经验的估计是一种 洗择,但利用经验公式估算的结果存在很大的不确 定性。利用水汽平衡方程计算蒸发为一有效的方 法,因为它遵循物理守恒规律,无需任何经验性假 设。利用水汽平衡方法研究陆表水分过程,国外已 有很多工作[4~6]。我国伊兰和陶诗言[16]根据此方 法,利用 ECMWF 的高空资料及台站的降水资料, 研究了中国地气系统的水平衡,指出南方流域降水 始终大于蒸发,北方流域蒸发有时超过降水,东北 流域的水平衡特点介于南、北方之间; 简茂球和罗 会邦^[17]利用 ECMWF 的高空资料以及台站的降水 资料研究了长江中下游的蒸发情况,分析表明,大 气热源在春季最强,夏季次之,水汽汇在春季至盛 夏以及秋季较强,凝结潜热是大气非绝热加热的主 要因子, 蒸发对大气水分循环起着重要的作用; 范 广洲等^[19] 根据此方法利用 NCEP/NCAR 资料对华 北夏季丰枯年水分收支进行了对比分析,指出干旱 年自地表经蒸发过程进入大气的水分少于湿润年, 华北干旱年略有水汽亏损,湿润年略有盈余。然 而,每套资料都保持其自身水汽守恒性,混合利用 两套资料对同一系统进行研究会破坏其守恒性,我 们曾用台站降水代替再分析资料的降水进行了分析 (图略),发现估算的蒸发出现较多负值,其原因主 要是再分析资料描述的水汽输送偏强所致;此外, ECMWF 和 NCEP/NCAR 再分析资料在东亚陆表 水分收支中的适用性,尚有待评估。

本文的主要目的是利用台站降水资料以及探空 资料,根据水汽平衡方程估算中国东部的蒸发,进 一步讨论其陆表水分收支。此外,通过与观测资料 的比较,对 ECMWF 和 NCEP/NCAR 再分析资料 在中国东部季风区的陆表水分收支研究中的适用性 进行评估也是本文的目的之一。为讨论方便,以下 把用台站降水资料和探空资料估算的蒸发称为"观 测蒸发",用再分析资料估算的蒸发称为"再分析蒸 发"。

本文其他部分安排如下,第2节介绍了所用资 料及计算方法,第3节为中国东部陆表水分收支的 分析,第4节为华北、长江流域和华南三个典型区 域陆表水分收支的分析,第5节为讨论,第6节对 全文进行总结。

2 资料及计算方法

2.1 水汽平衡方程

根据 Yanai 等^[22]研究,单位质量的水汽方程为

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla q + w \frac{\partial q}{\partial p} = e - c, \qquad (1)$$

其中, q 为比湿, v 为水平风速, w 为垂直风速, e 和 c 是单位质量云的蒸发率和凝结率。利用质量连续方程, 可得:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot (q\mathbf{v}) + \frac{\partial (qw)}{\partial p} = e - c.$$
 (2)

对水汽方程(2)进行垂直积分,再求时间平均可得:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{Q} = \bar{E} - \bar{P},$$
(3)

其中, $\overline{W} = \frac{1}{g} \int_{0}^{p_s} \overline{q} dp$, 为大气可降水量 (p_s 为地表 气压); $\overline{Q} = \frac{1}{g} \int_{0}^{p_s} \overline{q} v dp$, 为水汽通量项; \overline{E} 为表面 蒸发项, \overline{P} 为降水项。对于较长时间 (月、年), 较 大范围的平均状况而言, 大气的局地水汽储存率 $\partial \overline{W} / \partial t$ 非常小, 较之其他项至少要小一个量级^[10], 可以忽略不计, 因此, 水汽方程可简化为

$$\overline{E} - \overline{P} = \nabla \cdot \overline{Q}$$
(4)
进而,蒸发项可通过降水项及水汽散度项算得:

$$\overline{E} = \overline{P} + \nabla \cdot \overline{Q} \tag{5}$$

当然,此处我们仅考虑水文循环的大气分支,如果 考虑整个地-气系统,还应包括径流以及渗透等。

2.2 资料及计算方法

本文所用资料为中国气象局提供的 160 站月平 均降水资料及探空资料,时间跨度为 1990~1999 年,每日含两个时次 08 时和 20 时(国际协调时,下 同)。此外,还用到 NCEP/NCAR 再分析资料(简 称 NCEP 资料)^[23]、ERA40 资料^[24],时间跨度同 样为 1990~1999 年,但每日含四个时次 (06 时、 12 时、18 时、24 时)的资料。

实际计算中,将风速、温度和相对湿度由原来 的等压面线性地垂直插值到 15 层的均匀等压面上 (300 hPa, 350 hPa, ..., 950 hPa, 1000 hPa),每层 厚度为 50 hPa。然后在 15 层等压面上根据相对湿 度来计算比湿。这样做的好处,一是可以避免温度 和比湿分别插值所带来的不协调的过饱和现象,二 是能克服比湿垂直插值所带来的误差,因为大气中 比湿的变化是非线性的,随高度变化很大,而相对 湿度随高度的变化则比较均匀。

由于台站分布的不规则以及降水测量技术等原因,降水观测往往偏小^[25]。由于仪器的问题(尤其 对湿度的测量)、气球定位精度及其对大气的代表 性问题,探空资料也存在误差^[26];此外,计算亦存 在误差,这都可能导致蒸发小值区出现负值。 Zangvil 等^[6]假设蒸发的负值是由平衡方程其他项 引起,据此对其他项作同等的校正,以使得蒸发为 0。但这种校正主观性大,只能视作一种尝试。

负蒸发误差仅存在于我们所研究区域的个别格 点,对大尺度的影响几乎可忽略,尤其对探空资料 而言。参照 Zangvil 等的做法^[6],这里令负蒸发为 零,把订正后的结果通过水汽平衡方程估算其误 差,以避免高空资料和降水资料校正后的不确定 性。为了最大化地减少蒸发估算中的不确定性,本 文重点讨论其区域平均的情况。

下文在分析中国东部区域(22°N~41°N,110°E ~122°E)平均陆表水分收支的基础上,根据文献 [27],进一步把中国东部分为三个典型区域,即华 北、长江流域和华南,重点是110°E以东的典型季 风区(图1)。

3 中国东部的陆表水分收支

3.1 年平均状况及其年际变化

图 2 给出 ERA40 资料、NCEP 资料和观测资 料所揭示的降水场和散度场年平均气候态的水平分 布。由于季风气候及地形等原因,中国降水南多北 少,ERA40 和 NCEP 资料均能描述出这种经向梯 度特征,但 NCEP 在南部及四川降水明显偏强,而 ERA40 在东南部降水则偏少(图 2a~c)。整层散 度场观测资料有三个辐合中心(分别位于 106°E 附 近、115°E 附近及四川盆地),NCEP 和 ERA40 资 料都描述出了三个中心,但 NCEP 资料的三个中心 都偏强,尤其在四川盆地,106°E 附近的中心在位 置上偏南偏西; ERA40 资料的辐合中心也偏强,南 部东、西两个中心连成一片形成高值区,NCEP 资 料描述出了 108°E 附近的西南-东北向延伸的辐散 带,但强度偏强、区域偏大,这条带正好断开了两 个辐合中心,但 ERA40 没有描述出这条辐散带 (图 2d~f)。

表1是ERA40资料、NCEP资料和观测资料的降水、散度、蒸发和蒸发误差的气候值。由表1



图 1 区域划分示意图:1区(36°N~41°N,110°E~122°E)为 华北;2区(29°N~32°N,110°E~122°E)为长江流域;3区 (22°N~25°N,110°E~117°E)为华南。海洋上的值在计算中不 作考虑

Fig. 1 The diagram of subregions: Region 1 $(36^{\circ}N - 41^{\circ}N, 110^{\circ}E - 122^{\circ}E)$ is North China; Region 2 $(29^{\circ}N - 32^{\circ}N, 110^{\circ}E - 122^{\circ}E)$ is the Yangtze River valley; Region 3 $(22^{\circ}N - 25^{\circ}N, 110^{\circ}E - 117^{\circ}E)$ is South China. The values over the sea are excluded in analyses

大尺度年平均气候值可见,中国东部年平均为弱水 汽汇区,水汽辐合较小,降水基本由蒸发平衡。 ERA40和NCEP资料都表明了中国东部年平均气 候态为水汽汇区,但外部水汽输送的作用都偏强, ERA40资料降水略偏弱,蒸发偏小,NCEP资料降 水偏大,蒸发略偏大(表1)。

图 3 给出中国东部年降水、蒸发和陆表水分收 支(即降水减去蒸发)距平的年际变化。中国东部 季风区年平均气候场为水汽辐合区(图 2d~f),水 汽来自海洋上的水汽输送。由方程(4)可见,陆表 水分收支由整层散度场决定,ERA40和 NCEP资 料的辐合场在中国东部偏大(图 2d~f)直接导致 降水与蒸发的差值偏强。就年平均情况而言,中国 东部的降水一致大于蒸发,是水汽汇区,ERA40和 NCEP资料均能相对合理地反映出此特征,但强度 都偏强(图 3a)。

表 2 是区域平均降水和蒸发时间序列间的相关 系数。尽管再分析资料的降水气候平均值较之台站 观测资料有偏差,但就其距平的年际变化而言,则 与观测非常一致,相关系数达到 0.74 以上,蒸发 也存在显著的正相关。

陆表水分收支距平的趋势能反映水汽汇的变化 趋势(图 3b),就台站资料而言,1996年前距平较 稳定,1996年后呈明显的下降,即蒸发逐渐大于降 水。但ERA40和NCEP资料在1992年后均上升, 与台站资料相反,它们与观测资料都呈负相关 (表 3),而夏季和冬季两套再分析资料与观测陆表收

表 1 1990~1999 年中国东部 (22°N~41°N, 110°E~122°E) 气候平均的降水、整层水汽散度、蒸发和蒸发误差。单位:mm/d Table 1 Climate mean (1990 - 1999 average) precipitation rate, vertically integrated moisture flux divergence, evapotranspiration and evapotranspiration error for eastern China (22°N - 41°N, 110°E - 122°E). Units: mm/d

		ERA40			NCEP		OBS		
	年平均	夏季平均	冬季平均	年平均	夏季平均	冬季平均	年平均	夏季平均	冬季平均
	Annual mean	Summer mean	Winter mean	Annual mean	Summer mean	Winter mean	Annual mean	Summer mean	Winter mean
P	2.7	5.0	1.2	3.9	8.0	1.3	3.0	5.4	1.3
D	-1.3	-3.1	-0.1	-1.1	-3.6	0.4	-0.3	-0.9	0.0
E	1.8	2.2	1.2	2.9	4.4	1.8	2.7	4.6	1.3
е	-0.4*	-0.3*	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0

注: OBS代表观测资料, P、D、E和e分别表示降水、整层散度、蒸发和蒸发误差,蒸发误差为蒸发处理前与处理后的差值。*为误差处理前后的差值占处理前蒸发的百分比(误差比率)超过10%的值。

Note: OBS denotes the observations. *P*, *D*, *E* and *e* denote precipitation rate, vertically integrated moisture flux divergence, evapotranspiration and evapotranspiration error, respectively. Evapotranspiration error can be estimated through pre-disposing evapotranspiration minus disposed. The asterisk indicates that percentage of evapotranspiration error is over 10%.



图 2 降水场 (a~c) 和整层水汽散度场 (d~f) 年平均气候态的水平分布 (单位: mm/d): (a、d) ERA40 资料; (b、e) NCEP 再分析资料; (c) 观测资料; (f) 为探空资料。

Fig. 2 Climate mean (1990-1999 average) precipitation rate (a, b, c) and moisture flux divergence (d, e, f): (a, d) ERA40; (b, e) NCEP; (c) observation; (f) the sounding data. Units: mm/d

支距平的年际变化非常一致(图 5b、图 7b),它们与 观测距平的差别主要由春秋季距平的差别引起(图 略),但再分析资料在春秋两季较之观测存在偏差的 原因尚不清楚。需要指出的是,探空资料自身亦存 在不确定性,目前尚难断定是否是再分析资料的问题,这有待于利用更加精确的观测资料加以验证。

3.2 夏季平均状况及其年际变化

图4给出ERA40资料、NCEP资料、观测资



图 3 中国东部(22°N~41°N, 110°E~122°E) 年平均降水和蒸发年际变化 (a) 以及陆表水分收支距平随时间的变化 (b) Fig. 3 (a) The annual mean precipitation rate and evapotranspiration over eastern China (22°N-41°N, 110°E-122°E); (b) the anomalies of the annual mean moisture budget at the land surface of eastern China

表 2 1990~1999 年中国东部 (22°N~41°N,110°E~122°E) 区域平均降水和蒸发时间序列间的相关系数

Table 2	Correlation coefficients between precipitation and evapotranspiration over	eastern China	$1 (22^{\circ}N - 41^{\circ}N)$	110°E –	122°E)
for 1990	- 1999				

			年平均 Annual mean					
	P – NCEP	P - ERA40	E - NCEP	E - ERA40	E - OBS			
P – OBS	0.74**	0.94 ***	/	/	0.86***			
E - NCEP	0.97***	/	1.00	0.85***	0.72**			
E - ERA40	/	0.81***	0.85***	1.00	0.44			
	夏季平均 Summer mean							
	P – NCEP	P - ERA40	E - NCEP	E - ERA40	E - OBS			
P-OBS	0.81**	0.94 ***	/	/	0.74**			
E - NCEP	0.15	/	1.00	0.87***	0.44			
E - ERA40	/	0.03	0.87***	1.00	0.48			
			冬季平均 Winter mear	1				
	P – NCEP	P - ERA40	E - NCEP	E - ERA40	E - OBS			
P – OBS	0.92***	0.99***	/	/	0.84***			
E - NCEP	0.59*	/	1.00	0.65**	0.78***			
E - ERA40	/	0.21	0.65**	1.00	0.61*			

注:*、**、***分别表示相关系数通过90%、95%、99%的显著性检验。

Note: One, two, and three asterisks indicate correlation coefficients are assessed to be significant at 90%, 95%, and 99% levels, respectively.

表 3 1990~1999 年区域平均陆表水分收支年平均、夏季和冬季时间序列间的相关系数

Table 3	Correlation coefficients between moisture budgets over land surface for the annual mean,	the summer (JJ	(A) mean and the
winter (I	DJF) mean for 1990 – 1999		

中国东部	年平均 Annual mean			夏季五	平均 Summer n	nean	冬季	冬季平均 Winter mean		
Eastern China	NCEP	ERA40	OBS	NCEP	ERA40	OBS	NCEP	ERA40	OBS	
NCEP	1.00	_	_	1.00	_	_	1.00	_	_	
ERA40	0.30	1.00	_	0.91***	1.00	_	0.95***	1.00	—	
OBS	-0.26	-0.08	1.00	0.85***	0.87***	1.00	0.89***	0.86***	1.00	
华北	年平	达均 Annual me	ean	夏季五	平均 Summer n	nean	冬季	平均 Winter m	ean	
North China	NCEP	ERA40	OBS	NCEP	ERA40	OBS	NCEP	ERA40	OBS	
NCEP	1.00	/	/	1.00	/	/	1.00	/	/	
ERA40	0.90***	1.00	/	0.89***	1.00	/	0.73***	1.00	/	
OBS	0.61**	0.62**	1.00	0.62**	0.62**	1.00	0.80***	0.29	1.00	
长江流域	年平均 Annual mean			夏季五	平均 Summer n	nean	冬季	冬季平均 Winter mean		
River valley	NCEP	ERA40	OBS	NCEP	ERA40	OBS	NCEP	ERA40	OBS	
NCEP	1.00	/	/	1.00	/	/	1.00	/	/	
ERA40	0.71***	1.00	/	0.57*	1.00	/	0.89***	1.00	/	
OBS	0.28	0.15	1.00	0.75***	0.62**	1.00	0.50**	0.46	1.00	
华南	年平	之均 Annual me	ean	夏季五	平均 Summer n	nean	冬季	冬季平均 Winter mean		
South China	NCEP	ERA40	OBS	NCEP	ERA40	OBS	NCEP	ERA40	OBS	
NCEP	1.00	/	/	1.00	/	/	1.00	/	/	
ERA40	0.84***	1.00	/	0.96***	1.00	/	0.88***	1.00	/	
OBS	0.45	0.51**	1.00	0.84***	0.90***	1.00	0.75***	0.83***	1.00	

注:*、**、***分别表示相关系数通过90%、95%、99%的显著性检验。

Note: One, two, and three asterisks indicate correlation coefficients are assessed to be significant at 90%, 95%, and 99% levels, respectively.

料降水场和散度场夏季平均气候态的水平分布。夏 季(JJA)平均降水场,两套再分析资料基本描述出 了降水的分布,NCEP仍在中国南部及四川偏强, ERA40除部分地区偏小外比较接近观测(图4a~ c)。散度场有三个辐合中心:东南区域、西南 [(25°N,106°E)附近]及四川,NCEP分别描述出 了三个辐合中心,位置略有差别,但面积偏大、中 心偏强,尤其在东部及四川,NCEP也描述出了 108°E附近西南-东北向延伸的辐散带,但面积偏 大、强度偏强;ERA40描述出了西南及四川辐合 区,强度基本都偏强,西南的辐合区过于向东北延 伸,没能描述出西南区域的西南-东北向延伸的辐 散带(图4d~f)。夏季中国东部为一水汽汇, NCEP降水偏强,蒸发较好,ERA40降水偏弱,蒸 发偏小(表1)。

东亚季风在夏季最为活跃,此时中国东部正值 雨季,大量的水汽通过四条路径输送到中国境内: 印度西南季风流经孟加拉湾到我国江淮流域,沿西 太平洋副高西南侧东南季风带来的水汽,沿105°E 附近流经我国南海的跨赤道气流带来的水汽,中纬 度西风扰动带来的水汽^[13]。探空资料和两套再分 析资料一致描述出了四条水汽通道,但再分析资料 的水汽场比探空资料偏强(图略)。ERA40、NCEP 与观测一致,都表明中国东部夏季是强水汽汇区, 但强度都偏强(图 5a)。类似年平均情况,再分析 资料、观测资料的降水及蒸发的年际变化表现出很 强的一致性,再分析资料的降水距平序列与观测的 降水距平的相关系数超过 0.8 (表 2)。

由陆表水分收支距平随时间的变化(图 5b)可见,1990~1994年间陆表水分收支距平呈明显的上升,到1995年后有一很弱的下降,到1999年水汽汇仍较强,两套再分析资料很好地描述出了这种形势,NCEP资料、ERA40资料的陆表水分收支序列与观测的相关系数分别为0.85和0.87,都通过



图 4 同图 2, 但为夏季平均气候态 Fig. 4 Same as Fig. 2, except for JJA

了 99%的信度检验(表 3)。

3.3 冬季平均状况及其年际变化

图 6 是 ERA40 资料、NCEP 资料、观测资料 降水场和散度场冬季平均气候态的水平分布。冬季 (DJF)平均降水场,台站降水中心在中国的东南 部,年平均、夏季在四川的中心不再存在,NCEP 在四川附近仍存在一个中心,略有东移,在南方的 中心西移,ERA40中心偏小(图 6a~c)。冬季的 辐散场较弱,北方为弱辐散,南方为弱辐合, NCEP资料中自南而北有两条较强的辐合带,中间



图 5 同图 3, 但为夏季平均 Fig. 5 Same as Fig. 3, except for JJA

有一南北向的辐散带,相对之下,ERA40 与观测比较一致(图 6d~f)。

由表1可见,冬季大尺度水汽散度值近似为0, 降水和蒸发基本持平,ERA40与观测一致,NCEP 为弱的辐散,蒸发偏强。

图 7 是中国东部冬季降水、蒸发和陆表水分收 支的年际变化。在冬季,中国东部受北方冷空气影 响,降水少,陆表水分收支的年际变化(图 7a)表 明,冬季的蒸发与降水基本平衡,部分年蒸发略强 于降水,部分年降水略强于蒸发;ERA40与观测较 一致;NCEP的蒸发明显强于降水(1990年除外), 为水汽源区。与年平均、夏季的情形类似,再分析 资料、观测资料的降水及蒸发的年际变化一致, ERA40、NCEP的降水与观测降水的相关系数都超 过了 0.9,三套资料的蒸发有明显的正相关(表 2)。

陆表水分收支距平在十年间呈下降趋势, NCEP 资料和 ERA40 资料均一致揭示出这种年际 变化趋势(图 7b),它们与观测资料相关系数都超 过 0.86,且通过 99%的信度检验(表 3)。

4 华北、长江流域、华南陆表水分收支

中国东部区域(22°N~41°N,110°E~122°E) 受季风气候控制,但随纬度之不同,区域气候特征 亦彼此有别:华北(36°N~41°N,110°E~122°E) 纬度偏高,受大陆性气候影响较大,降水较少;长 江流域(29°N~32°N,110°E~122°E)为典型的季 风区,不同的季风年由于季风强度、进退时间的不 同直接影响其降水;华南(22°N~25°N,110°E~ 117°E)纬度低,雨水比较充沛。对三个区域的陆表 水分收支区别对待、分别加以分析是有必要的。

4.1 华北陆表水分收支

表4 是华北区域 ERA40 资料、NCEP 资料和 观测资料的降水、散度、蒸发和蒸发误差的气候 值。已有研究^[28~30]表明,华北自20世纪80年代以 来降水量呈下降趋势,反映出一种干旱化趋势。从 本文给出的近10年气候值来看,华北地区年平均、 夏季和冬季的水汽均向外输送;两套再分析资料描 述的年平均和冬季情况与观测一致,但夏季为水汽



图 6 同图 2, 但为冬季平均气候态 Fig. 6 Same as Fig. 2, except for DJF

辐合区,与观测相反,导致推算的夏季蒸发偏小 (表 4)。

图 8 是华北年平均、夏季、冬季的降水、蒸发 和陆表水分收支距平的年际变化。就年平均而言, 两套再分析资料所揭示的降水和蒸发都呈减少趋 势,与观测一致。夏季的情况,两套再分析资料与 观测资料一致,1996年前降水增加,1996年后减 少,20世纪90年代初的增加是年代际干旱化这一 大背景下的小波动,这一事实已被指出^[28,29],观测 资料蒸发与降水一致,1996年前增加,1996年后减



图 7 同图 3, 但为冬季平均 Fig. 7 Same as Fig. 3, except for DJF

表 4	同	表 I,但平均区	域力华北 (3	$36 N \sim 41 N$,	$110^{\circ}E \sim 122^{\circ}E$	
Table 4	4	Same as Table	1, except for	· North China	$(36^{\circ}N - 41^{\circ}N,$	110°E - 122°E)

		ERA40			NCEP		OBS		
	年平均	夏季平均	冬季平均	年平均	夏季平均	冬季平均	年平均	夏季平均	冬季平均
	Annual mean	Summer mean	Winter mean	Annual mean	Summer mean	Winter mean	Annual mean	Summer mean	Winter mean
P	1.2	3.1	0.1	1.4	3.6	0.2	1.4	3.6	0.1
D	0.6	-0.6	0.7	0.6	-0.9	1.1	0.6	0.4	0.6
E	1.9	2.5	0.9	2.2	2.7	1.3	2.1	4.0	0.7
е	-0.1	0.0	-0.1	-0.2	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0

小,但两套再分析资料的蒸发总体下降,没能描述 出 90 代初蒸发的增加,计算误差可能是其中的原 因之一;冬季,再分析资料与观测的降水与蒸发振 幅稳定,且年际变化一致(图 8a~c)。

陆表水分收支距平变化表明,年平均收支距平 1993年后呈上升趋势,两套再分析资料也描述出 了此趋势,与观测呈显著正相关(表 3),但都在 1994~1996年出现峰值(图 8d);无论观测还是再 分析资料,夏季的趋势与年平均类似(图 8e、表 3);冬季呈弱下降趋势,两套再分析资料与观测基 本一致(图 8f), NCEP 与观测的相关系数为 0.8, 但 ERA40 与观测相关系数为 0.29(表 3)。

4.2 长江流域陆表水分收支

表 5 是长江流域 ERA40 资料、NCEP 资料和 观测资料的降水、散度、蒸发和蒸发误差的气候 值。长江流域是典型的季风区,一般在夏季 6 月中 旬~7 月中旬进入梅雨期。从气候态来看,长江流 域年平均、夏季和冬季都为水汽汇区,夏季强、冬 季弱;两套再分析资料的年平均、夏季情况都与观 测一致,但水汽输送偏强;冬季ERA40散度约为



图 8 华北 (36°N~41°N, 110°E~122°E) 降水和蒸发年变化 (a、b、c) 以及陆表水分收支距平随时间的变化 (d、e、f): (a、d) 年平均; (b、e) 夏季平均; (c、f) 冬季平均

Fig. 8 Interannual variations of precipitation and evapotranspiration (a, b, c) and the anomalies of moisture budget at the land surface (d, e, f) in North China ($36^{\circ}N - 41^{\circ}N$, $110^{\circ}E - 122^{\circ}E$): (a, d) The annual mean, (b, e) the summer (JJA) mean, (c, f) the winter (DJF) mean

	Table 5 Same as Table 1, except for the Yangtze River valley (29 N - 32 N, 110 E - 122 E)										
		ERA40		NCEP			OBS				
	年平均 Appual mean	夏季平均 Summer mean	冬季平均 Winter mean	年平均 Annual mean	夏季平均 Summer mean	冬季平均 Winter mean	年平均 Annual mean	夏季平均 Summer mean	冬季平均 Winter mean		
	7 tiniuar mean	Summer mean	whiter mean	Tunuai mean	Summer mean	winter mean	7 unituar mean	Summer mean	whiter mean		
P	3.1	5.5	1.6	4.8	10.2	1.6	3.6	6.4	1.7		
D	-1.8	-5.3	0.0	-1.5	-5.6	0.4	-0.9	-2.3	-0.2		
Ε	1.7	0.9	1.6	3.4	4.6	2.1	2.8	4.1	1.5		
е	-0.4 *	-0.7 *	0.0	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0		

表 5 同表 1, 但平均区域为长江流域 (29°N~32°N, 110°E~122°E)

零,NCEP则较之观测有一定偏差;ERA40的蒸发 在夏季偏小,NCEP的降水和蒸发则都偏强(表5)。

图 9 是长江流域年平均、夏季、冬季的降水、 蒸发和陆表水分收支的年际变化。年平均降水在 1997 年前基本稳定,此后降水有所增加,ERA40、 NCEP 资料与观测降水的年际变化一致,相关系数 分别达到 0.93 (通过 99.9%的显著检验)和 0.55 (通过 90%的显著检验)。此外,两套再分析资料的 蒸发与观测蒸发的相关性较差,这从一个侧面表明 精确估算蒸发的困难性;夏季的情况,再分析资料 与观测资料在降水的年际变化上表现一致,且降水 有明显增加的趋势,蒸发的变化趋势与降水一致, 但这种一致性在 ERA40 资料中则不明显;冬季的 情况,再分析资料与观测一致,降水与蒸发的趋势 不明显(图 9a~c)。

由陆表水分收支距平随时间的变化(图9d~f) 可见,年平均距平总体呈弱下降趋势,两套再分析 资料与观测都呈正相关,但都没通过显著性检验 (表3);夏季两套再分析资料与观测一致,距平总 体呈上升趋势,相关系数都达到了0.62以上(表 3);冬季陆表水分收支距平随时间一致的下降,两 套再分析资料也描述出了下降趋势,与观测相关系 数分别为0.50和0.46(表3)。

341

4.3 华南陆表水分收支

表 6 是华南 ERA40 资料、NCEP 资料和观测 资料的降水、散度、蒸发和蒸发误差的气候值。华 南纬度偏低,一年四季都是雨季,水汽充沛。从气 候态来看,年平均、冬季为弱水汽汇,夏季为水汽



源;两套再分析资料所描述的夏季辐散较之观测都 有明显的偏差,且年平均、冬季的辐合偏强, ERA40降水和蒸发都偏小,尤其蒸发,NCEP降水 年平均、夏季偏大,冬季偏小,而蒸发都偏小。 图 10 是华南年平均、夏季、冬季的降水、蒸发 和陆表水分收支的年际变化。从年际变化来看, 1990~1999年间在年平均和冬季蒸发与降水差别 很小,基本平衡,只不过部分年蒸发略强于降水,

表 6 同表 1, 但平均区域为华南 (22°N~25°N, 110°E~117°E) Table 6 Same as Table 1, except for South China (22°N-25°N, 110°E-117°E)

		ERA40			NCEP			OBS		
	年平均	夏季平均	冬季平均	年平均	夏季平均	冬季平均	年平均	夏季平均	冬季平均	
	Annual mean	Summer mean	Winter mean	Annual mean	Summer mean	Winter mean	Annual mean	Summer mean	Winter mean	
Р	3.7	6.5	1.7	5.8	10.9	1.8	4.7	8.3	2.2	
D	-2.0	-1.8	-0.5	-2.5	-3.6	-0.4	-0.2	0.7	-0.2	
Ε	2.4	4.7	1.4	3.6	7.3	1.6	4.5	9.0	2.0	
е	-0.7*	0.0	-0.2*	-0.3	0.0	-0.2*	0.0	0.0	0.0	
$P, E/mm \cdot d^{-1}$	7 6 5 4 2 2				1.0 (P-E) 距平 (P-E) anomalies/mm·d ⁻¹ (P-D) -1.0 -1.0					
	1990 1991 19	92 1993 1994 年份	1995 1996 1 Year	997 1998 19	99 1	990 1991 199	92 1993 1994 年份	1995 1996 1 Year	997 1998 1999	
$P, E/mm \cdot d^{-1}$					(P-E) 題 (P-E) 即 (P-E) 即 (P-E) 即 (P-E) 即 (P-E) 即 (P-E)					
	1990 1991 19	92 1993 1994 	1995 1996 1 Vear	997 1998 19	99 1	990 1991 199	92 1993 1994 年俗	- 1995 1996 1 - Vear	997 1998 1999	
$P, E/mm \cdot d^{-1}$	4 - (c) 3	+w +w 92 1993 1994 年份 + P-OBS - P-NCEP	1995 1996 1 Year 	997 1998 19 C-OBS C-NCEP	3 $(-1)^{-1}$ 分子 (<i>P</i> - <i>E</i>) anomalies/mm····· (<i>P</i> - <i>E</i>) -2 (<i>P</i> - <i>E</i>) -2 -3 99 1	(f) 990 1991 199	+	1995 1996 1 Year + OBS = NCEP	997 1998 1999	
	o	-⊖ <i>P</i> -ERA40	⊖— —⊖ E	E-ERA40	0		Θ	€ ERA40		
		图 10	同图 8, 但为	1华南地区(22	°N~25°N, 110	°E~117°E)				



部分年降水略强于蒸发,夏季也是部分年蒸发强于 降水,部分年降水强于蒸发,但夏季整体上蒸发强 于降水;年平均和夏季情况,NCEP和ERA40都 表现出了强水汽汇区,冬季的情况,两套再分析资 料与观测一致地表述出了部分年为水汽汇部分年为 水汽源(图10a~c)。不论年平均、夏季、还是冬季 再分析资料与观测资料的降水年际变化都非常一 致,蒸发也如此(图10a~c)。

关于陆表水分收支距平随时间的变化(图 10d ~f),年平均值的距平演变,两套再分析资料与观测基本一致,有明显的年际振荡,与观测的相关系数分别为0.45 和0.51(表 3);夏季与年平均的情况类似,与观测的相关系数达到0.84 以上,且都通过99%的信度检验(表 3);冬季两套再分析资料与观测一致,有减少的趋势,与观测呈明显的正相关(表 3)。

5 讨论

5.1 误差的讨论

伊兰等[16] 对水汽平衡方法做了误差估算,认 为蒸发计算中可能出现的误差较大,大区域比小区 域的误差应该小一些。本文误差可能来源有:(1) 所用探空资料为每天 08 时和 20 时,用其代表每天 平均值,存在一定的误差;(2)风随高度观测误差 增加,导致观测高层水汽场的误差较大;(3)忽略 了大气可降水量的局地变化;(4)只考虑了平均状 态的大气状况,而没有考虑扰动量的贡献;(5) 整 层水汽散度计算中的误差。在所有误差中, 整层水 汽散度计算引起的误差最大,伊兰等[16]认为其误 差可能占总误差的 50% 左右。与本文类似, Rasumusson^[4]发现蒸发曲线有负值出现,他认为这是降 水测量偏低(尤其冬季)和整层散度的误差引起的。 Matsuyama^[31]在对刚果河流域的水分平衡计算中 发现蒸发在 3~4 月和 9~10 月出现负值, 他认为 这是 ECMWF 资料的水汽辐合在这一地区偏强所 致。Roads 等^[32]对全美大陆进行的类似的蒸发估 算中也有一2 mm/d 的值出现。Brubaker 等^[33]在 欧洲大陆计算蒸发时,发现2月份的值小于0。可 见,用水汽平衡方程分析水分收支,虽然保证了水 汽守恒, 遵循物理规律, 但误差都体现在蒸发上, 使蒸发变得很敏感。因此,本文对陆表水分收支的 估算中,蒸发的估算结果不确定性最大,随着资料 精度的提高,计算方法的发展,有关结果尚有待进 一步验证。

5.2 再分析资料的评估及讨论

再分析资料基本上反映出中国东部的陆表水分 收支,能够用来分析中国东部大尺度的水分收支。 但是具体而言:(1)NCEP的降水偏强,ERA40弱 偏小,相对而言,降水的年际变化ERA40比 NCEP更接近观测的降水;(2)整层水汽散度 NCEP与ERA40都偏强,而且NCEP的强度比 ERA40大,尤其在四川地区;(3)由余差法计算的 蒸发量值,NCEP比ERA40接近观测估算的蒸发 量,且年际变化NCEP要好于ERA40;(4)两套再 分析资料基本上一致揭示出了陆表水分收支的年际 变化。以上分析是以观测的估算值为标准得出的结 论。本文结论是在20世纪80年代以来北方干旱、 长江流域比较湿润的大背景下得出的,所以只适用 于这一背景下的20世纪90年代,对别的年代有指 示意义,但需要进一步验证。

6 总结

结合观测资料和两套再分析资料,运用水汽平 衡方程,计算了中国东部以及华北、长江流域和华 南的陆表水分收支,主要结果如下:

(1)中国东部陆表水分的收支,年平均、夏季 为水汽汇,冬季降水与蒸发基本平衡,两套再分析 资料年平均、夏季也为水汽汇,但都偏强,冬季 ERA40较 NCEP 接近观测;两套再分析资料陆表 水分收支距平的年际变化,在夏季、冬季与观测相 关性非常好,但春秋季的误差导致年平均与观测相 反。

(2) 华北陆表水分收支,年平均、夏季、冬季 都为水汽源,两套再分析资料在年平均和冬季与观 测一致,夏季则偏差较大;陆表水分收支距平的年 际变化,在趋势上,年平均、夏季有上升趋势,在 冬季有下降趋势,再分析资料与观测存在显著相 关。

(3)长江流域陆表水分收支,年平均、夏季和 冬季都为水汽汇,冬季较弱,再分析资料年平均、 夏季与观测一致但强度偏强,冬季 ERA40 与观测 一致;陆表水分收支距平的年平均、冬季平均近十 几年来有下降趋势,在夏季则有上升趋势,再分析 资料较好地揭示出了此形势。 (4)华南陆表水分收支,年平均、冬季蒸发与 降水基本平衡,夏季蒸发大于降水,再分析资料年 平均、夏季为水汽汇,冬季与观测一致;陆表水分 收支距平没有明显趋势,年际振荡明显,再分析资 料与观测呈明显的正相关。

(5)关于年平均和冬、夏平均值的年际变化, 再分析资料的降水和蒸发,与观测资料的变化都呈 显著正相关;估算的蒸发 NCEP 要好于 ERA40。

(6)相对于气候态的定量比较而言,ECMWF和NCEP/NCAR再分析资料能较好地揭示出中国东部陆表水分收支的年际变化,尽管个别时间、个别区域与观测差别较大。

参考文献 (References)

- [1] IGCP. Global Change: Reducing Uncertainties. Published by International Geosphere Biosphere Programme. Stockholm, Sweden. 1992
- [2] Rasmusson E M. Atmospheric water vapor transport and the water balance of North America. Part I: Characteristics of the water vapor flux field. Mon. Wea. Rev., 1967, 95: 403 ~426
- [3] Rasmusson E M. Atmospheric water vapor transport and the water balance of North America. Part II: Large-scale water balance investigation. Mon. Wea. Rev., 1968, 96: 720 ~ 734
- [4] Rasmusson E M. A study of the hydrology of eastern North America using atmospheric vapor flux data. Mon. Wea. Rev., 1971, 99: 119~135
- [5] Roads J O, Chen S C, Guetter A K, et al. Large-scale aspects of the United States hydrologic cycle. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1994, 9: 1589~1610
- [6] Zangvil A, Portis D H, Lamb P J. Investigation of the largescale atmospheric moisture field over the Midwestern United States in relation to summer precipitation. Part I: Relationships between moisture budget components on different timescales. J. Climate, 2000, 14: 582~597
- [7] 丁一汇,刘月贞. 7507 号台风中水汽收支的研究. 海洋学报, 1986, 8 (3): 291~301
 Ding Yihui, Liu Yuezhen. Study of water vapor budget on typhoon 7507. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1986, 8 (3): 291~301
- [8] 王启炜,丁一汇. 1982 年东亚及太平洋地区视热源及视水汽 汇的分布. 气候与环境研究, 1996, 1 (1): 160~172
 Wang Qiwei, Ding Yihui. The distribution of the apparent heat source and apparent moisture sink over East Asia and the Pacific Ocean in 1982. *Climatic and Environmental Research*

(in Chinese), 1996, 1 (1): 160~172

- [9] 丁一汇,胡国权. 1998年中国大洪水时期的水汽收支研究. 气象学报,2003,61 (2):129~145
 Ding Yihui, Hu Guoquan. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2003,61 (2):129~145
- [10] 周天军,张学洪,王绍武. 全球水循环的海洋分量研究. 气象学报,1999,57 (3): 264~282
 Zhou Tianjun, Zhang Xuehong, Wang Shaowu. The air sea freshwater exchange derived from NCEP/NCAR reanalysis data. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1999, 57 (3): 264~282
- [11] 周天军, 宇如聪, 张学洪, 等. 海气耦合气候模式对大气中 水汽输送、辐散辐合与海气间水通量交换的模拟. 大气科学, 2001, **25** (5): 596~608

Zhou Tianjun, Yu Rucong, Zhang Xuehong, et al. Features of atmospheric moisture transport, convergence and air – sea freshwater flux simulated by couple climate models. *Chinese Journal of Atmospheric Science* (in Chinese), 2001, **25** (5): 596~608

- [12] Zhou Tianjun. Comparison of the global air sea freshwater exchange evaluated from independent datasets. Progress in Natural Science, 2003, 13 (8): 626~631
- [13] 黄荣辉,张振洲,黄刚,等.夏季东亚季风区水汽输送特征 及其与南亚季风区水气输送的差别.大气科学,1998,22
 (4):460~469

Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian mosoon region in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, 22 (4): 460~469

- [14] Zhang Renhe. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China. Advances in Atmospheric Sciences, 2001, 18 (5): 1005~1017
- [15] Zhou T J, Yu R C. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China, J. Geophys. Res., 2005, 110: 1~10
- [16] 伊兰,陶诗言.东亚季风区地气系统的水平衡. 气候与环境研究, 1996, 1 (1): 63~80
 Yi Lan, Tao Shiyan. Water balance in land atmospheric system over the East Asia mosoon region. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1996, 1 (1): 63~80
- [17] 简茂球,罗会邦. 长江中下游热源和水汽汇的季节变化特征. 中山大学学报(自然科学版),1996,35(增刊):176~ 181

Jian Maoqiu, Luo Huibang. Seasonal variations of atmospheric heat sources and moisture sinks over the middle and down reaches of Yangtz River. *Acta Scientiarum Naturalium* Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 1996, **35** (Suppl.): 176~181

[18] 黄嘉佑,张镡.黄河流域旱涝与水资源分析.大气科学, 1996, **20**: 673~678

Huang Jiayou, Zhang Tan. Analysis of drought/flood and water resources in Huanghe River valley. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1996, **20**: 673~678

 [19] 范广洲,吕世华,程国栋.华北地区夏季水量丰、枯年大气水 分收支对比分析.兰州大学学报(自然科学版),2001,37
 (3):134~141

> Fan Guangzhou, Lü Shihua, Cheng Guodong. Contrasting analysis of the atmosphere hydrological cycle of drought and rainy years in summer over North China. *Journal of Lanzhou University* (Natural Science) (in Chinese), 2001, **37** (3): 134~141

- [20] 杨梅学,姚檀栋,何元庆,等. 藏北高原地气之间的水分循环. 地理科学, 2002, 22 (1): 29~33
 Yang Meixue, Yao Tandong, He Yuanqing, et al. The water cycles between land surface and atmosphere in northern part of Tibetan Plateau. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 2002, 22 (1): 29~33
- [21] 王守荣,郑水红,程磊. 气候变化对西北水循环和水资源影响的研究. 气候与环境研究,2003,8 (1):43~51
 Wang Shourong, Zheng Shuihong, Cheng Lei. Studies on impacts of climate change on water cycle and water resources in Northwest China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003,8 (1):43~51
- [22] Yanai M., Esbensen S, Chu J H. Determination of average bulk properties of tropical cloud clusters from larger-scale heat and moisture budgets. J. Atmos. Sci., 1973, 30 (4): 611~627
- [23] Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2000, 82 (2): 247~268
- [24] http://data.ecmwf.int/data/d/era40_moda/

- [25] Legates D R, Willmott C J. Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected global precipitation. Int. J. Climatol., 1990, 10: 111~127
- [26] Oort A H. Adequacy of the rawinsonde network for global circulation studies through numerical model output. Mon. Wea. Rev., 1978, 106: 174~195
- [27] Lau K M, Weng H Y. Coherent modes of global SST and summer rainfall over China: An assessment of the regional impacts of the 1997 - 98 El Niño. J. Climate, 2001, 14: 1294~1308
- [28] 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华 北干旱化趋势. 高原气象, 1999, 18 (4): 465~476
 Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, 18 (4): 465~476
- [29] 陈烈庭. 华北各区夏季降水年际和年代际变化的地域性特征. 高原气象, 1999, 18 (4): 477~485
 Chen Lieting. Regional features of interannual and interdecadal variations in summer precipitation anomalies over North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, 18 (4): 477~485
- [30] 李庆祥,刘小宁,李小泉.近半世纪华北干旱化趋势研究. 自然灾害学报,2002,11(3):50~56
 Li Qingxiang, Liu Xiaoning, Li Xiaoquan. Drought trend in North China in recent half century. *Journal of Natural Disasters* (in Chinese), 2002, 11 (3): 50~56
- [31] Matsuyama H. The seasonal change of eastern North America using atmospheric vapor flux data. Mon. Wea. Rev., 1994, 99 (2): S119~135
- [32] Roads J O, Chen S C, Guetter A, et al. Climatological aspects of the large scale U. S. hydrologic cycle. GEWEX News, 1993
- Brubaker K L, Entekhabi D, Eagleson P S. Estimation of continental precipitation recycling. J. Climate, 1993, 6: 1077~1089