

长江流域水分收支以及再分析资料可用性分析^{*}

赵瑞霞^{1,2,3} 吴国雄²

1 国家气象中心,北京,100081

2 中国科学院大气物理研究所,LASG,北京,100029

3 中国科学院研究生院,北京,100039

摘 要

首先利用实测资料定量计算了长江流域水分收支的各分量,包括降水、径流、蒸发、水汽辐合等,分析其季节循环、年际变化以及线性趋势变化。结果表明,多年平均该流域是水汽汇区,主要来自平均流输送造成的水汽辐合,而与天气过程密切相关的瞬变波则主要造成流域的水汽辐散。蒸发所占比例接近于径流,对流域水分循环十分重要。大部分要素的季节变化和年际变化都很大,只有蒸发和大气含水量的年际变化较小。降水和平均流输送造成的水汽辐合一般在 6 月达到年内最大,12 月达到年内最小,而径流和大气含水量则一般滞后 1 个月于 7 月达到年内最大,1 月降为年内最小。1958—1983 年,夏半年降水略微增加,冬半年略微减少,各月实测径流为弱的增长趋势,但均不显著,年平均蒸发亦无显著的趋势变化。

然后将实测资料同 ECMWF 及 NCEP/NCAR 再分析资料作进一步对比分析,以检验两套再分析资料对长江流域水分循环的描述能力。在量值上,NCEP/NCAR 再分析资料中的降水、蒸发、径流均比实测偏大很多,大气含水量及由平均流输送所造成的水汽辐合则偏小很多;ECMWF 再分析资料中的降水量、径流量基本上与实测接近,蒸发量偏大,大气含水量及由平均流输送所造成的水汽辐合偏小,但比 NCEP/NCAR 再分析资料要接近实测。另外,该两套再分析资料均可以较好地描述长江流域水分收支的季节循环和年际变化,而且同样是 ECMWF 再分析资料与实测资料的一致性更好。但是两套再分析资料在 1958—1983 年均存在十分夸张的线性趋势变化,尤其是 ECMWF 再分析资料。

关键词: 长江流域,水分收支,再分析资料。

1 引 言

全球能量与水循环试验(GEWEX)是世界气候研究计划(WCRP)的一个核心研究项目,其目的在于观测、理解和模拟大气、地表及表层海洋的水分循环和能量交换过程。为了提高区域水分和能量收支的研究(WEBS),GEWEX 开展了大陆尺度试验(CSEs)。区域水分收支的研究,尤其是闭合流域大气和地表水分收支的全面研究,可以揭示流域水分循环的特征和机理,加强对于流域水循环的了解;同时,可促进区域水循环模式的发展,为其提供参照和验证;并且可以深入揭示流域水资源中的水量特征。

然而,观测资料的获取十分困难,尤其是土壤含水量、蒸发及径流等要素的观测,这为流域水分收支的研究带来很大困难。欧洲中期数值预报中心(ECMWF)全球再分析资料(简称 ERA)与美国国家环境预测中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)全球再分析资料(NRA)结合了地面、探空、卫星等观测资料,并经过了模式的同化,可以提供水分收支的所有要素,具有时空的连续性,并且可以用于进一步的动力和热力机制的研究,对于研究区域以及全球的水分循环具有十分重要的作用。

ERA 与 NRA 同化系统均使用固定版本的全球谱模式^[1-2],因而可以避免由模式变化引起的输出

^{*} 初稿时间:2005 年 11 月 18 日;修改稿时间:2006 年 8 月 21 日。

资助课题:国家气象局气候变化专项(CCSF2007-9);国家自然科学基金项目(40135020,90502003,40221503,40475027);国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418307)。

作者简介:赵瑞霞,主要从事水文气象与气候变化研究。E-mail: zhaorx@cma.gov.cn

物理量场的变化。但是,由于输入数据的改变,仍然会引起不真实的物理量场变化。而且,由于模式并不完美,容易向不真实的气候态漂移^[3-6],为了使模式的部分输出量与实测接近,同化过程中进行了余项订正,因而其水分收支并不平衡,均存在一个虚假“余项”^[4,6]。可见,再分析资料对于水分平衡的描述具有一定的局限性。为了找出全球分析资料存在的不足以及需要提高之处,从而能更好地描述并预报区域直至全球的水分循环,很多大陆尺度试验(CSEs)都致力于对这些资料的检验^[3,7-14],评估 EC-MWF 或 NCEP/NCAR 再分析资料对于不同地区水分循环的描述能力。

ERA 和 NRA 可以提供研究水分循环的完整数据集,国内许多学者使用两套再分析资料对中国部分地区水汽输送与旱涝的关系及视水汽源汇等问题进行过大量研究^[15-19],但是对两套再分析资料对中国具体区域水分循环描述能力的评估工作较少,尤其是缺乏针对闭合流域所做的评估工作。1999 年苏志侠等^[9]以及 2004 年韩荣青等^[13]的研究工作中也涉及到了对 NRA 水分循环中个别要素的评估,但前者缺乏准确的定量分析,后者分析时段很短,而且涉及到的水分循环要素也很有限。所以,在较长时段定量地评估 ERA 及 NRA 对中国具体流域水分循环的描述能力是很必要的工作。

长江发源于青藏高原的沱沱河,是中国最大的河流,包括 11 个支流,年径流总量约为 10^{12} m^3 ,覆盖面积 $18 \times 10^5 \text{ km}^2$,流经 19 个省,支撑着中国人口最密集地区的水分和能量资源,其水分收支与循环,直接影响到中国的水资源状况及经济的发展。本文将实测资料为准,在流域尺度上定量给出长江流域陆地分支和大气分支的水分收支,并对各要素的季节循环、年际变化以及线性趋势变化进行研究。同时通过与实测资料对比,全面评估 ERA、NRA 对长江流域水分循环的描述能力,在论证了其适用性的同时,指出其局限性,从而为使用再分析资料进行该流域水分收支分析提供参照。

2 资料和计算过程

本文使用的实测资料有 1958—1983 年和 1990—2000 年中国 555 个台站的月平均降水资料,1950—1983 年长江流域出口控制站大通站的月平均观测流量资料(图 1),1990—2000 年中国 222 个探空站 7 层等压面上(1000—300 hPa)的月平均水平风速、比湿资料和同期 730 台站的地面气压资料,

以及长江流域边界经纬度数据。

另外,本文还使用了 NRA、ERA 中 1958—2000 年 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 格点的月平均资料,包括降水、径流、蒸发(由地面潜热通量计算得到)、8 层等压面(1000—300 hPa)水平风速和比湿资料以及地面气压、水平风速和相对湿度资料,同时,为了计算和讨论瞬变波输送所造成的流域水汽辐散,还使用了 NRA 中日平均的 8 层等压面(1000—300 hPa)水平风速和比湿资料以及日平均的地面气压、水平风速和相对湿度资料,各要素所取年限与实测一致。

水分循环有两个分支,即陆地分支和大气分支,水分收支方程分别为:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P - R - E \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = E + C - P \quad (2)$$

式中 Q 为整层大气的水汽含量, E 为蒸发, P 为降水, C 为整层大气中水汽的水平辐合, W 为地表含水量, R 为径流。水分平衡各项相互制约,共同表征了区域的水分平衡状态。以下给出整层大气水汽含量(Q)、水平水汽输送(Q_v)及辐合(C)的计算过程:

$$Q = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} q dp \quad (3)$$

$$Q_v = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} q \mathbf{v} dp \quad (4)$$

$$C = -\nabla \cdot (Q_v) \quad (5)$$

式中 p_s 为地面气压, p_t 为大气柱顶层气压(此处取为 300 hPa), q 为比湿, \mathbf{v} 为水平风矢量。本文的计算是在月尺度上进行的,式(4)中各要素如果直接使用月平均值,则式(4)、(5)的计算结果为由平均流输送造成的水汽通量和辐合,如果使用的是日平均资料,则为总的水汽通量和辐合,它们之间有如下关系:

$$C = C_m + C_i \quad (6)$$

其中, C 为总水汽辐合, C_m 、 C_i 分别为平均流输送及瞬变波输送造成的水汽辐合。

本文使用实测资料在流域尺度上分别计算分析了长江流域大气和陆地分支的水分收支,并用其结果去评估 NRA 及 ERA 两套再分析资料对于长江流域水分收支的描述能力。由于实测资料的限制,大气和陆地分支水分收支的分析年限并不相同,而且并没有完全闭合水分收支方程。陆地分支水分收支的分析年限为 1958—1983 年,而大气分支为 1990—2000 年。陆地分支中,计算分析了方程(1)中降水、蒸发和径流等 3 个要素,其中实测年平均蒸发是由实测年平均降水和径流计算得到的,因为在

年尺度上,可以近似认为陆地含水量的时间变率 $\frac{\partial W}{\partial t}$ 接近于零^[8],因而由方程(1)可得到全流域实际年平均蒸发量的表达式^[20]

$$\langle \bar{E}_o \rangle = \langle \bar{P}_o \rangle - \langle \bar{R}_o \rangle \quad (7)$$

式中下标 o 表示观测值,上划线表示年平均,尖括号表示流域面积平均。大气分支中,计算分析了方程(2)中降水、水汽辐合、大气含水量等要素,但由于实测探空资料只有月平均数据,所以如上所述,文章主要计算分析了由平均流输送所造成的水汽辐合。在年尺度上,大气含水量的时间变率 $\frac{\partial Q}{\partial t}$ 也可以近似认为接近于零,由方程(1)、(2)及(6)可得

$$\langle \bar{R} \rangle = \langle \bar{C} \rangle = \langle \bar{C}_m \rangle + \langle \bar{C}_i \rangle \quad (8)$$

式(8)表达了流域水分循环大气和地表分支的密切联系,即在年尺度上,尤其是多年平均,流出流域的总流量与由平均流和瞬变波输送造成的流域总水汽辐合相等。

文中对水分收支中的所有要素都进行了流域面积平均,得到了代表长江流域的平均值,以降水为例表示如下

$$\langle P \rangle = \frac{1}{A} \sum_i P_i \cdot A_i \quad (9)$$

式中 A 表示区域总面积, A_i 表示某格点四周 $\frac{1}{2}$ 格距矩形包含于流域内的面积。格点面积和流域总面积由流域边界经纬度数据求取,图 1 给出了长江流域的范围以及大通站的位置。计算过程中,首先将各实测要素插值为格点资料,然后与再分析资料进

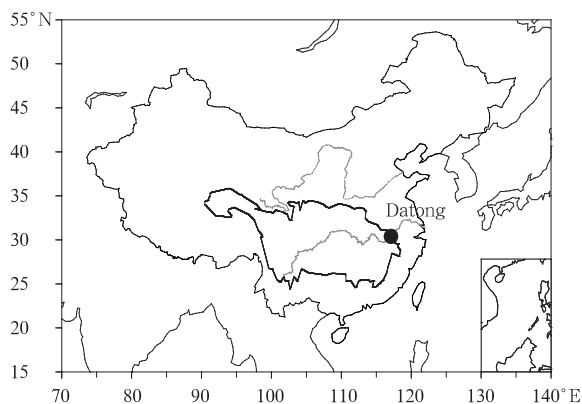


图 1 长江流域边界(粗线)及流域出口控制站大通站的位置(实心圆标记)

Fig. 1 The Yangtze River basin outline (thick curve) and the location of the Datong gauge station (solid circle) measuring the discharge of the river

行同样的计算。不过,实测流量的流域面积平均值的计算是直接用大通站流量除以流域总面积得到。

3 陆地分支

3.1 降水

3.1.1 季节循环

由图 2a 中的实测降水可知,1958—1983 年多年平均,长江流域的降水在 6 月达到年最大值(5.24 mm/d),12 月达到年最小值(0.67 mm/d),12 月的降水量只有 6 月的 12.8%。1、2 月降水量缓慢增加,3—6 月增加速度很快,6、7 月维持较强降水,8 月以后迅速减少。长江流域的年平均降水量为 2.96 mm/d(表 1),夏季的降水量最大(5.13 mm/d),占全年降水量的 43.3%,冬季降水最小(0.84 mm/d),春季降水(3.26 mm/d)大于秋季降水(2.59 mm/d)。

与实测降水相比,ERA 及 NRA 降水基本可以反映实际的季节循环特征,只是 ERA 降水一般在 7 月而不是 6 月达到年最大值。就量值而言,ERA 降水与实测降水基本接近,5—7 月略小于实测,其他月份略大于实测,而 NRA 降水则全年均远大于实测降水,年平均降水是实测的 1.51 倍。

3.1.2 年际变化

长江流域的年平均实测降水及各月月平均实测降水均存在明显的年际变化,且与降水的季节循环对应,其年际变化振幅也是夏半年(5—10 月)大,冬半年(11—4 月)小(图 2c),而且 7—9 月大于 6 月。但与各月本身量值相比,其相对振幅(即振幅占本身量值的百分比)则是冬半年大(30.3%),夏半年小(17.8%)(图略)。

ERA 及 NRA 的年降水和各月月平均降水也存在明显的年际变化,两套再分析资料年平均降水的年际变化幅度均比实测降水大很多(见表 1 中的标准差及图 2b)。具体到各个月份(图 2c),ERA 中 2、4、7、11 月降水的年际变化幅度比实测偏小,其他月份偏大,尤其是 5、6、9 月偏大很多。而 NRA 降水则只有 7 月的年际变化幅度比实测偏小,其他月份均远大于实测月平均降水的年际变化幅度。

从各月 ERA 及 NRA 降水与实测降水的相关系数(已去除趋势变化)可以看出(图 2d 和表 1),就月平均降水而言,两套再分析资料大部分月份月平均降水的年际变化均与实测降水显著相关,只有 NRA

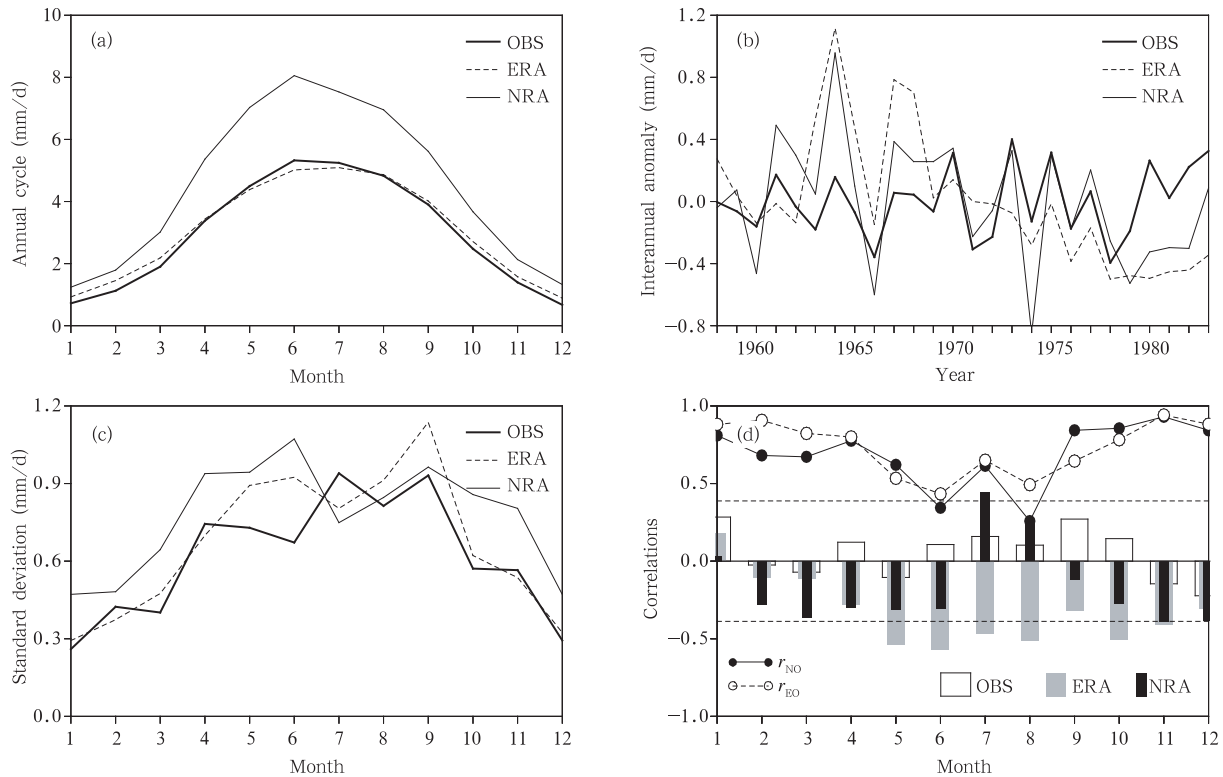


图 2 观测、ERA 及 NRA 中长江流域 1958—1983 年的降水

(a. 平均季节循环;b. 年平均降水的年际异常;c. 各月降水年际变化的标准差;d. 各月降水的线性趋势变化相关系数(直方柱),以及 ERA、NRA 各月降水与对应月份实测降水在年际变化中的相关系数 r_{EO} 和 r_{NO} (去除线性趋势后),水平虚线为 0.05 信度检验水平)

Fig. 2 OBS, ERA and NRA precipitations for the Yangtze River basin during 1958—2000

(a. Annual cycle of average monthly rainfall (mm/d); b. interannual variations of annual precipitation anomaly (mm/d); c. standard deviations of monthly precipitation (mm/d); d. linear trend coefficients (bar) and contemporaneous correlations (r_{EO} , r_{NO}) of time series of monthly precipitation of ERA and NRA with OBS with the linear trends removed, the horizontal dash lines indicate the 95% confidence level according to Student's t test)

表 1 实测、ERA、NRA 中长江流域的水分收支

Table 1 Observed (OBS), ERA and NRA annual water budget components for the Yangtze River basin

		R (mm/d)	E (mm/d)	P (mm/d)	C (mm/d)	Q (mm)
		(1958—1983 年)	(1958—1983 年)	(1958—1983 年)	(1990—2000 年)	(1990—2000 年)
OBS	Avg	1.42	1.56	2.96	2.99	34.20
	STD	0.22	0.10	0.22	0.13	0.80
	R_{trend}	0.27	0.23	0.21		
ERA	Avg	1.12	2.07	3.05	2.98	23.20
	STD	0.35	0.08	0.42	0.15	0.63
	R_{trend}	-0.66	-0.38	-0.62		
NRA	Avg	1.92	2.66	4.48	4.25	22.08
	STD	0.20	0.09	0.39	0.25	0.64
	R_{trend}	-0.03	-0.72	-0.33		
	r_{EO}	0.54	0.44	0.29		
	r_{NO}	0.74	0.28	0.64		

注: P 为降水, R 为径流, E 为蒸发, C 为由平均流输送造成的水汽辐合, Q 为整层大气水汽含量; Avg 为各要素多年平均值; STD 为各要素历年平均值在年际变化中的标准差; R_{trend} 为各要素历年平均值的线性趋势变化相关系数; r_{EO} , r_{NO} 分别为 ERA、NRA 中各要素历年平均值与 OBS 中对应要素历年平均值的相关系数(去除线性趋势后)。

中 6、8 月的月平均降水与实测降水相关性较差,两套再分析资料相比,除 5、9、10 月外,ERA 降水的年际变化与实测降水更加接近,但其年平均降水与实测的相关性并不显著,而 NRA 年平均降水的年际变化则与实测比较一致。可见,1958—1983 年,ERA 月平均降水及 NRA 大部分月份的月平均降水和年平均降水资料可以用于长江流域降水年际变化的研究。

3.1.3 线性趋势变化

从各月降水的线性趋势变化相关系数即月降水的年际变化序列与时间(即年序列:1958,1959……1983)的线性相关系数(图 2d)可以看到,26 a 中,长江流域夏半年各月降水(5 月除外)为弱的增加趋势,冬半年大部分月份(1、4 月除外)为减少趋势,但是各月降水的线性增减趋势均不显著。

ERA 及 NRA 降水在大部分月份均为减少趋势,尤其是 ERA 降水,只有 1 月为弱的增加趋势,且 5—9 月、11 月以及年平均降水的减少趋势十分显著,通过了 0.05 信度检验;NRA 中只有 1、7—8 月的月平均降水为增加趋势,其中 7 月降水显著增加,其他月份及年平均降水也均为减少趋势,其中 11 月降水的减少趋势也通过了 0.05 信度检验。由图 2b 可以看到,与实测相比,ERA 和 NRA 年平均降水在 20 世纪 60 年代明显偏多,且 ERA 降水在 80 年代明显偏少,可能正是因此导致了 ERA 和 NRA 虚假的减少趋势。

3.2 径 流

这里需要格外说明的一点是,实测流量深度应该会比 NRA 和 ERA 的格点径流有时间滞后性,因而它们的季节循环位相会存在一定差异。因此,在比较实测径流深度与再分析径流的年际变化相关性时,选取了各月实测流量深度与再分析径流的同时相关系数和各月实测流量深度与当月及超前一个月平均的再分析径流的相关系数中的较大值(图 3d 中 r_{EO} 、 r_{NO}),对再分析资料各月径流的年际变化进行评估。

另外,本文所使用的大通站流量为实测流量,并不是天然流量,所以,给出的是长江流域实测流量的统计结果和属性。人类活动可能会影响实测流量的季节分布以及年际和趋势变化,因而在评估再分析资料径流时将尽量考虑人为因素的影响。不过,1958—1983 年,人类活动对于流域出口流量的影响程度应该比现在要小很多,首先,1980 年长江流域

人口约为 3.4 亿,而 2001 年则增至 4.2 亿;虽然 20 世纪 70 年代以后长江流域兴建了一批大型水库,但其中有效库容很大的水库则主要兴建于 90 年代之后^[21]。由此可认为 1958—1983 年实测流量造成的误差小于再分析误差^[10],实测流量具有可参照性。

3.2.1 季节循环

图 3a 表明,1958—1983 年多年平均,长江流域的实测流量在 7 月达到年最大值(2.47 mm/d),1 月达到年最小值(0.5 mm/d),均比降水晚一个月,1 月径流为 7 月的 20.3%。4、5、7 月流量增加很快,6 月相对较慢,可能是由于蒸发大量增加的缘故,8 月流量大幅度减少,9、10 月流量减少稍慢,11、12 月再次加快。长江流域年平均实测流量深度为 1.42 mm/d,夏季占全年流量的 38.7%,但不到同期降水的一半,而冬季流量与同期降水量十分接近。长江流域流量秋季多于春季,与降水相反。

ERA、NRA 径流的季节循环应该与实测流量深度同位相或比后者略微超前,由图 3a 看到,再分析资料径流的季节循环规律是比较合理的。不过,ERA 径流于 2 月达到年最小值,比实测流量还滞后一个月,但 1、2 月径流相差并不大,ERA 径流比实测流量深度略微偏小。NRA 径流分别于 1、6 月达到年最小、最大值,与实测流量相同或比其超前一个月,这是合理的,但它在 2—9 月比实测径流偏大很多,其他月份小于或接近实测径流。

3.2.2 年际变化

长江流域的年平均及各月平均实测径流均存在明显的年际变化,其振幅在夏半年的各个月份较大且基本相等,冬天较小(图 3b,c),这与径流本身量值的逐月变化是基本对应的。但其年际变化的相对振幅则是春季最大(3 月为 28.4%),夏季最小(7 月为 17.9%)。

ERA 及 NRA 的年平均径流和各月月平均径流也存在明显的年际变化。ERA 径流虽然比实测径流偏小,但其年际变化振幅则比实测大很多,尤其是 5—11 月。NRA 中除 10—12 月及 1—2 月外,其他月份的月平均径流以及年平均径流的年际变化均比实测偏强(见表 1 中的标准差及图 3b,c)。

ERA 径流(当月或当月与前月平均)除在 2 月与实测流量的年际变化相关性较差外,在其他月份均可以较好地反映实测流量的年际变化,相关系数均通过 95% 的显著性检验。NRA 径流除 8、9 月

外,在其他月份的年际变化也均与实测径流显著相关。可以看到 ERA 径流在 1、5、8、9 月与实测流量的相关系数大于 NRA 径流,其他月份则是 NRA 径流与实测流量的相关系数更大,而且 NRA 的年平

均径流与实测年平均流量的相关系数(0.74)也比 ERA 大(0.54),由图 3b 也可以看出 NRA 年平均径流与实测流量深度年际变化的很好一致性。

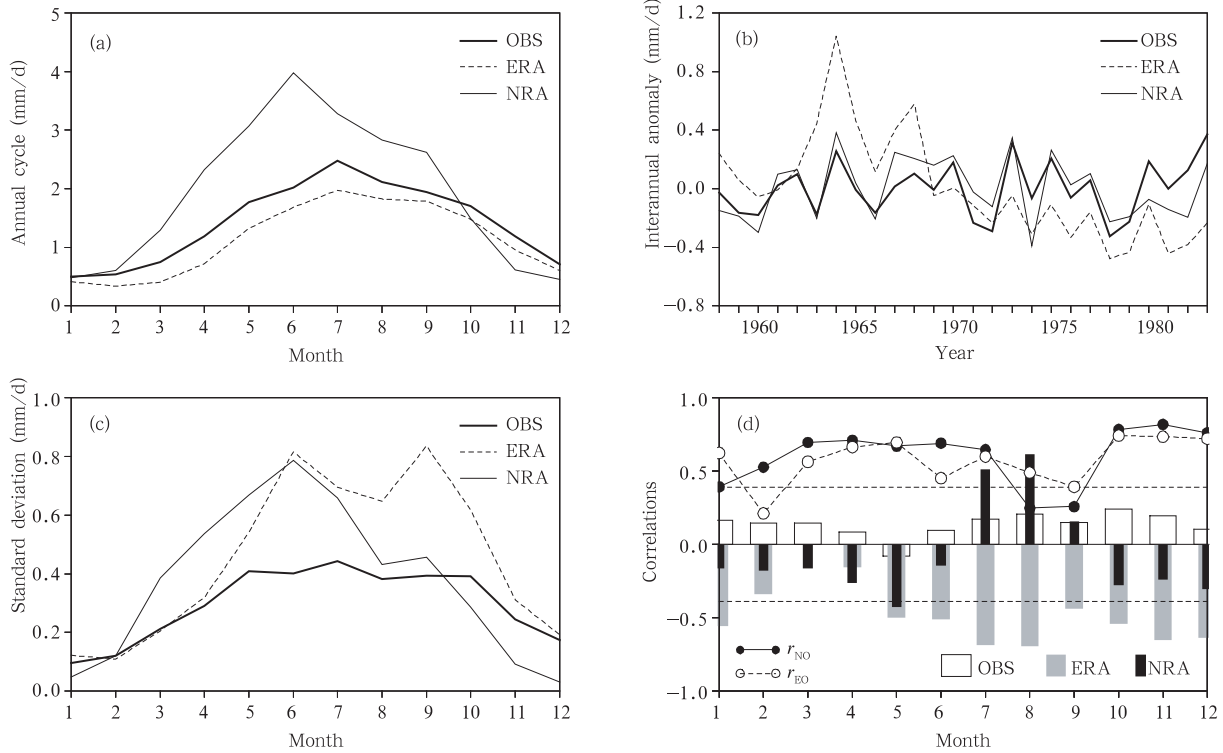


图 3 同图 2,但为 1958—1983 年的径流(图 d 中相关系数 r_{EO} 、 r_{NO} 的定义与图 2d 不同,见正文第 3 小节)

Fig. 3 As in Fig. 2 except for runoff

(The definition of correlations r_{EO} and r_{NO} in (d) is different from that in Fig. 2d, see the 3rd section of text for details)

3.2.3 线性趋势变化

由图 3d 看出,长江流域实测流量深度在 1958—1983 年的 26 a 中,除 5 月外,大部分月份以及年平均都存在一种增加的线性趋势,但都不显著。

ERA 及 NRA 中的径流则在很多月份存在十分显著的虚假趋势变化,尤其是 ERA 中,1、5—12 月及年平均径流均为十分夸张的减少趋势,比其降水的减少趋势更加明显。NRA 中 7、8 月径流显著增长,5 月径流显著减少,在其他月份,NRA 径流基本上均为与实测相反的减少趋势,只是同样并不显著,年平均径流没有明显的趋势变化,在 20 世纪 60 年代不存在像其降水那样的虚假偏大值。

3.3 蒸发

根据式(7),利用流域实测年平均降水及流量数据,计算了长江流域 1958—1983 年的年平均实测蒸

发量。同样,由于实测流量的误差,会导致实测蒸发量也存在误差,但由上面的分析结果可以看出,ERA、NRA 径流的季节循环及年际变化均与实测流量有较好的一致性,尤其是年平均 NRA 径流与年平均实测流量的年际变化,这也反过来证明了实测流量的可用性,表明其误差对于评估 NRA 没有形成十分严重的影响。所以反算得到的年平均蒸发也应该有相当的可靠性。

实际蒸发的多年平均值为 1.56 mm/d,占同期降水(2.96 mm/d)的 52.2%,与流量深度(1.42 mm/d)接近。结合图 4 及表 1 中的标准差,我们可以看到,其年际变化幅度较小,在所研究的 26 a 中,无明显的趋势变化。

ERA 及 NRA 中 1958—1983 年平均蒸发量分别为 2.07、2.66 mm/d,均比实际蒸发量偏大,NRA

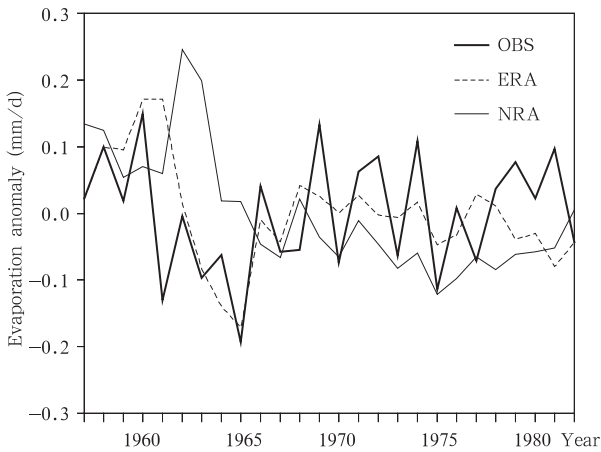


图 4 实测、ERA 及 NRA 中 1958—1983 年长江流域年平均蒸发量的年际异常

Fig. 4 Interannual variations of the annual mean evaporation anomaly (mm/d) for the Yangtze River basin during 1958—1983 in the OBS, ERA and NRA data

偏大更明显,而且两套再分析资料的年平均蒸发均存在虚假的减少趋势,尤其是 NRA,趋势显著性检验系数达到 -0.72 。

不过,与实测一致的是,两套再分析资料中长江流域年均蒸发的年际变化也特别小,远比降水及径流小,而且相对振幅比实测蒸发更小。ERA 年平均蒸发与实际年平均蒸发的年际变化显著相关(0.44),NRA 年平均蒸发量的年际变化与实际相关性较差。

4 大气分支

这里首先利用中国 222 个探空站和 730 个地面站的观测资料进行分析。由于观测资料限制,长江流域大气分支水分收支的计算分析年限为 1990—2000 年,因而在此只就其季节循环和年际变化进行讨论,然后对同期 ERA 和 NRA 再分析资料中大气分支的水分收支进行评估。

4.1 降水

由图 5a 中的实测降水可知,与 1958—1983 年(图 2a)相似,1990—2000 年 11 a 平均中,长江流域降水也是在 6 月达到年最大值(6.14 mm/d),12 月达到年最小值(0.64 mm/d),12 月降水量只有 6 月

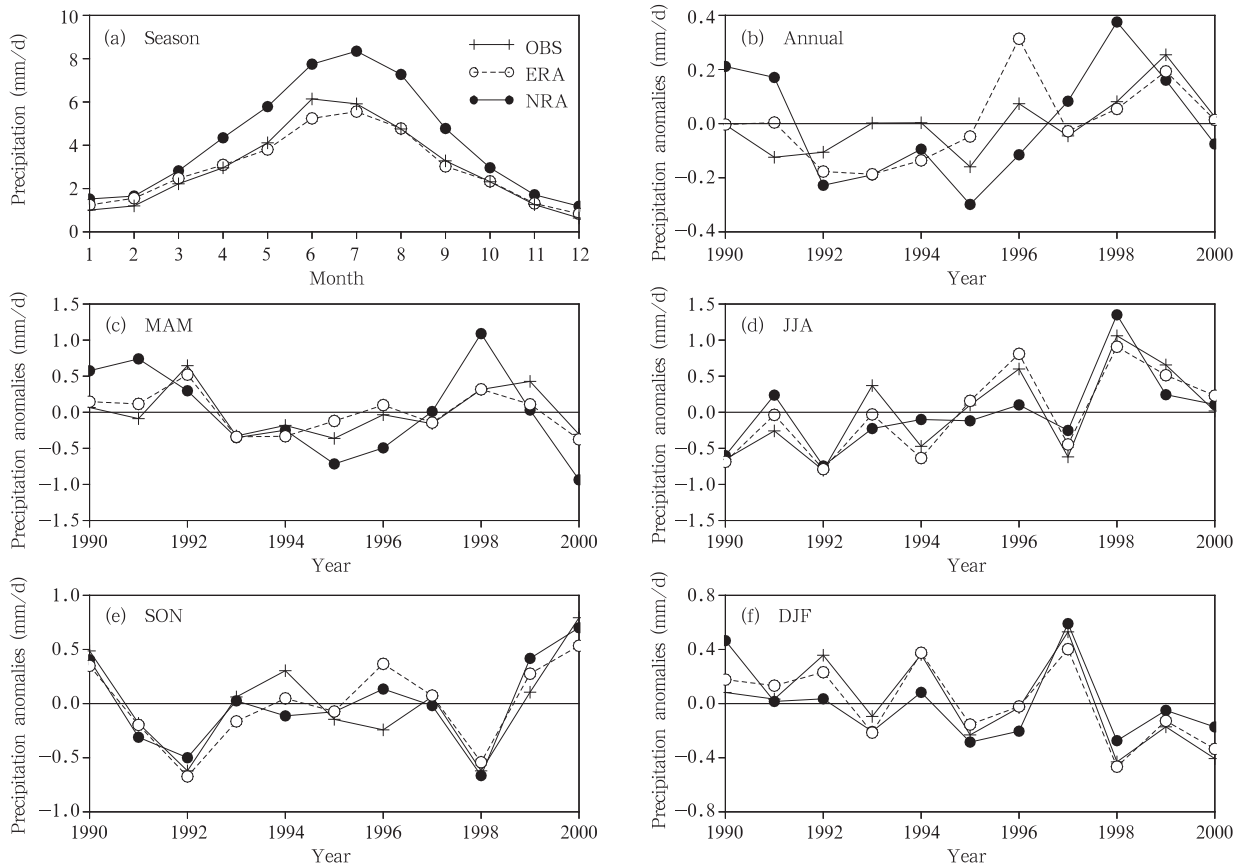


图 5 OBS, ERA 及 NRA 中长江流域 1990—2000 年的降水 (平均季节循环(a)及年平均(b)和春(c)、夏(d)、秋(e)、冬季(f)平均降水的年际异常)

Fig. 5 OBS, ERA and NRA precipitations over the Yangtze River basin for 1990—2000

(a. Seasonal cycle; b—f. Interannual variations of annual, spring (MAM), summer (JJA), fall (SON) and winter (DJF) precipitation anomalies)

的 10.4%，其他月份的季节循环位相也与 1958—1983 年基本一致，年平均降水量为 2.99 mm/d，与前一时期(2.96 mm/d)十分接近。

与实测降水相比,ERA 及 NRA 降水基本可以反映实际的季节循环特征,只是 ERA、NRA 降水一般在 7 月而不是 6 月达到年最大值。同样,就量值而言,ERA 降水与实测降水基本接近,而 NRA 降水则全年均远大于实测降水。

由图 5b-f 及表 1 可以看出,在所研究时段,不论是实测还是再分析资料,流域降水均具有明显的年际变化。NRA 及 ERA 中四个季节降水的年际变化均与实测有较好的一致性,尤其是 ERA,但年平均降水的年际变化则与实测相差较大,可见,使用两套再分析降水资料研究长江流域 1990—2000 年年平均降水的年际变化时要十分小心。

4.2 大气水汽辐合

利用 1990—2000 年月平均探空资料和地面气压资料计算了长江流域由平均大气环流输送所造成

的水汽辐合 $\langle \overline{C_m} \rangle$ 。根据式(8),由于长江流域多年来一直有大量径流流出流域,说明长江流域是水汽汇区。由图 6a 中实测 $\langle \overline{C_m} \rangle$ 可知,11 a 平均的季节循环中, $\langle \overline{C_m} \rangle$ 全年均为正值,说明平均大气环流输送全年向长江流域辐合水汽,年平均值为 4.35 mm/d,是 1958—1983 年多年平均实测流量(1.42 mm/d)的 3 倍之多,由上文可知,1990—2000 年的流域年平均实测降水量与 1958—1983 年接近,因而后一时期的实测流量不可能比前一时期成倍增长,可见 1990—2000 年的平均大气环流输送所造成的长江流域水汽辐合,也必然远大于同期的年平均径流量,结合式(8)表明,与天气过程密切相关的瞬变波输送必然造成长江流域大量的水汽辐散。通过计算分析 NRA 中的平均流、瞬变波输送造成的流域水汽辐合及流域总水汽辐合(图 7),得出与实测比较一致的结果,由图可以看出,除 11—2 月外,平均流输送总是给流域带来大量水汽,6 月最大,夏半年大于冬半年;而瞬变波输送则基本上全年(12、1 月

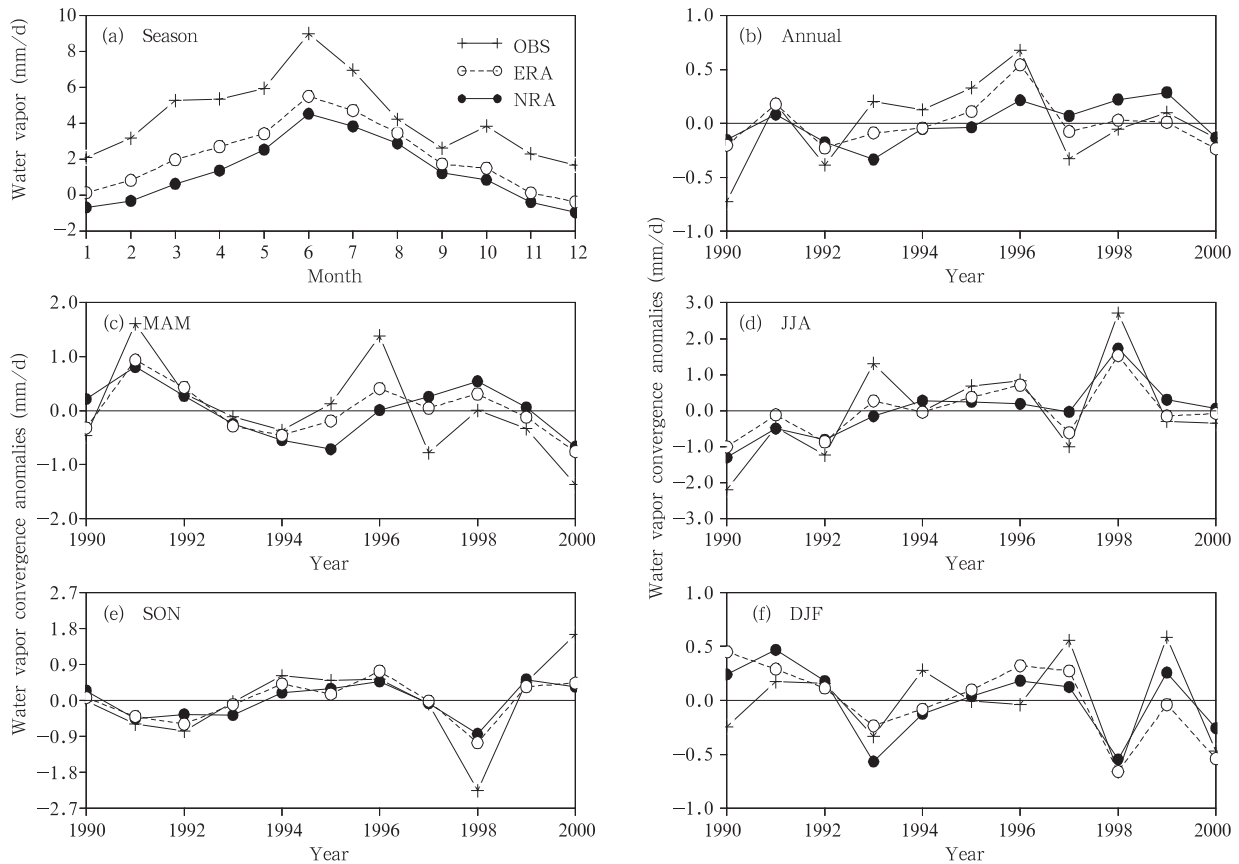


图 6 同图 5,但为 OBS,ERA 及 NRA 中长江流域 1990—2000 年的由平均流输送造成的水汽辐合
 Fig. 6 As in Fig. 5 except for water vapor convergence transported by mean circulation

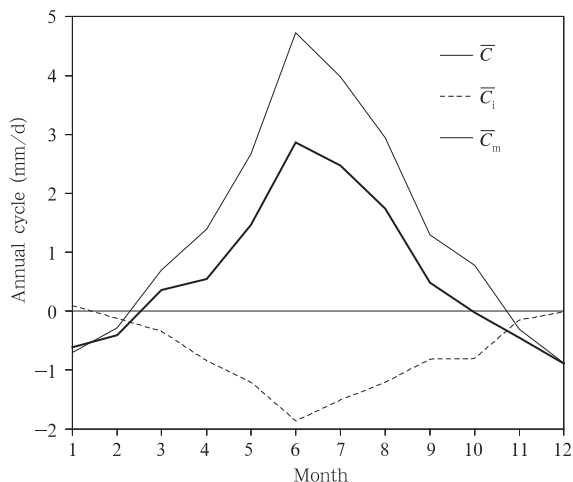


图7 NRA中1990—2000年长江流域水汽辐合的季节循环(mm/d)

Fig. 7 Annual cycle(mm/d) of water vapor convergence over the Yangtze River basin for 1990—2000 in the NRA data

除外)总是从流域带走水汽,而且其季节循环位相与 $\langle \bar{C}_m \rangle$ 基本上完全相反,6月造成流域最大的水汽辐散。可见,长江流域的水汽辐合主要来自于平均流输送,瞬变波输送则主要造成流域的水汽辐散。文章没有计算分析ERA中的瞬变波水汽输送情况,将在以后的工作中进一步考证。

与降水一致,实测 $\langle \bar{C}_m \rangle$ 在6月达到年最大值(9.00 mm/d),12月达到年最小值(1.70 mm/d),只有6月的18.9%。1—6月 $\langle \bar{C}_m \rangle$ 不断增加,其中3月增加较快,6月增加最快,增加速度为3.04 mm/d,然后迅速减少,至9月已变为2.63 mm/d,10月辐合值有所增大,然后再次减少。

NRA及ERA基本可以反映这种季节变化过程,也是于6月增加最快且达到年最大值,12月达到年最小值,不过10月并没有明显的比9月增长的现象,而且NRA中1、2、11、12月均为水汽辐散,ERA中12月也是水汽辐散。另外两套再分析资料的平均流输送造成的水汽辐合都比实测偏小,尤其是NAR,只有1.35 mm/d,ERA稍好,为2.21 mm/d。

由图6b—f及表1可以看出,在所研究时段,不论是实测还是再分析资料,由平均流输送造成的水汽辐合具有明显的年际变化。不论是全年平均还是四个季节,NRA及ERA中由平均流输送所造成的水汽辐合的年际变化均与实测有较好的一致性,尤其是ERA,可见两套再分析资料可以研究长江流域

的水汽输送及辐合。

4.3 大气水汽含量

利用1990—2000年月平均探空资料及NRA、ERA月平均资料也计算了长江流域的大气含水量。由表1可知,1990—2000年平均,长江流域实测大气含水量的年平均值为34.20 mm,春、夏、秋、冬各季节平均分别为30.99、55.47、33.81、16.56 mm。图8表明,长江流域的大气可降水量一般于7月达到年最大值58.66 mm,1月达到年最小值15.47 mm,均比降水及水汽辐合滞后一个月,1月大气含水量只有7月的24.6%。从2月开始,大气含水量逐渐增多,春季(3—5月)的增长速度较慢,每月仅增加5.5—8.6 mm,6月迅速增长,比5月增加了12.4 mm,7月比6月又增长了7 mm,然后8月略微减少,从9月开始以每月10 mm以上的速度迅速减少,其减少速度远比春季的增长速度要快,至12月大气含水量降为16.84 mm。

ERA及NRA基本可以反映这种季节变化过程,也是于7月达到年最大值,1月是年最小值,并且春季的增长速度也是比秋季的减少速度要慢,6月的增长速度也是一年中最快的。但就量值而言,两套再分析资料的可降水量均比实测要小很多,ERA年平均为23.20 mm,NRA为22.08 mm。

由图8b—f及表1可以看出,在所研究时段,不论是实测还是再分析资料,与其本身量值相比,大气可降水量的年际变化幅度很小,相对而言春季及全年平均的大气可降水量的年际变化幅度最小,夏秋季相对较大。不论全年平均还是四个季节,NRA及ERA的大气可降水量的年际变化均与实测有很好的一致性,再分析资料中的可降水量可以用于年际变化的研究。

5 结论

通过对实测资料的计算,定量描述了长江流域的水分收支,分析了其季节循环、年际变化、以及线性趋势变化。对于1958—1983年的陆地分支,多年平均,长江流域降水、径流、蒸发量分别为2.96、1.42、1.56 mm/d,蒸发与径流接近,其中,降水、径流存在明显的年际变化,蒸发的年际变化幅度较小,26年中,长江流域夏半年降水略微增加,冬半年降水略微减少,各月实测径流(除5月)为弱增长趋势,但均不显著,年平均蒸发亦无显著趋势变化。

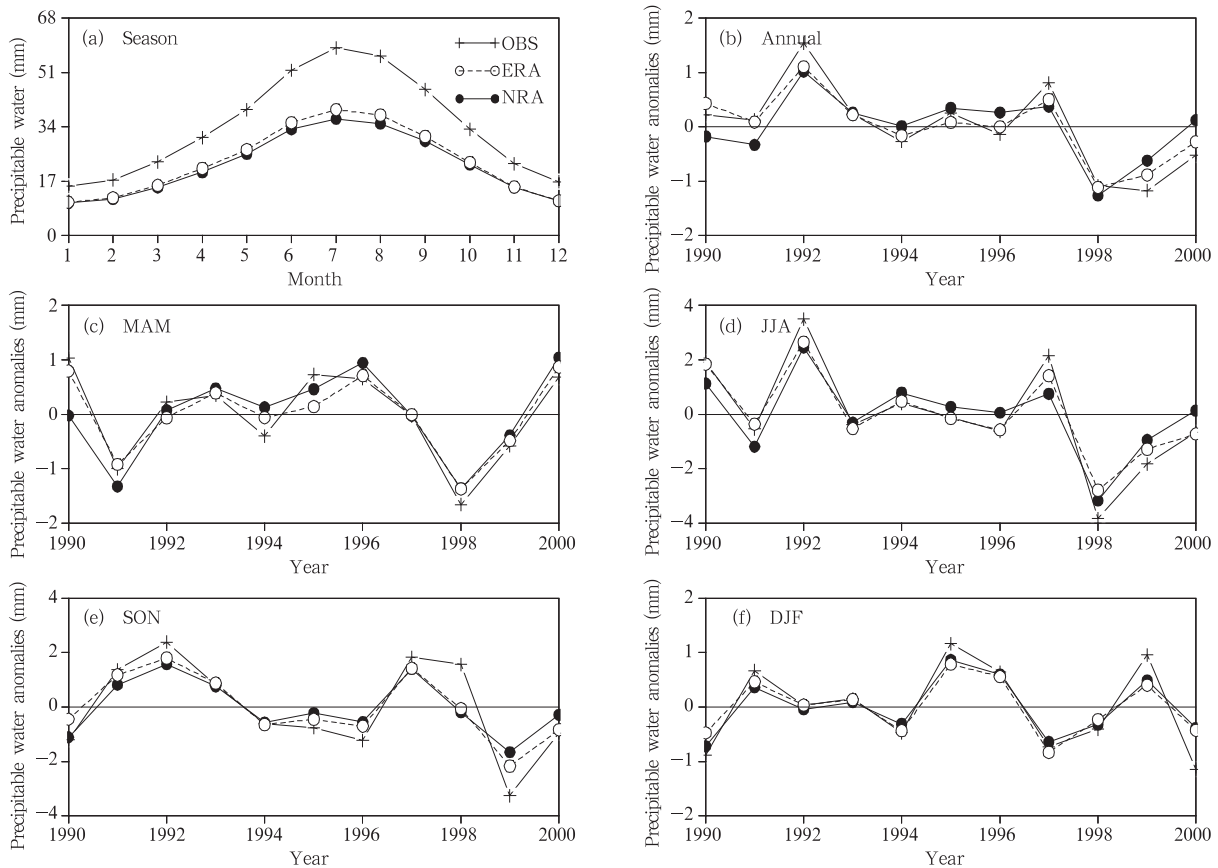


图 8 同图 5, 但为 OBS, ERA 及 NRA 中长江流域 1990—2000 年的整层大气含水量

Fig. 8 As in Fig. 5 except for precipitable water

对于 1990—2000 年的大气分支, 11 a 平均, 流域降水和由平均流输送造成的水汽辐合量为 2.99、4.35 mm/d, 大气含水量为 34.20 mm, 流域为水汽汇区, 水汽辐合主要来自于平均流输送, 而与天气过程密切相关的瞬变波输送造成水汽辐散, 降水和平均流输送造成的水汽辐合存在明显的年际变化, 尤其是后者, 与本身量值相比, 大气含水量的年际变化幅度很小。

通过与实测长江流域水分收支进行对比, 本文还对 ECMWF 和 NCEP/NCAR 再分析资料描述该区域水分收支的能力进行了检验。与实测相比, NRA 降水、蒸发、径流均偏大很多, 大气含水量及由平均流输送所造成的水汽辐合则偏小很多; ERA 降水量、径流量比较接近实测, 径流量略微偏小, 蒸发偏大很多, 大气含水量及由平均流输送所造成的水汽辐合偏小很多, 但比 NRA 要接近实测。两套再分析资料各要素的季节循环均比较合理。NRA 及 ERA 中大部分要素的年际变化均与实测资料比较

一致, 但 ERA 年平均降水、2 月径流以及 NRA 中 6、8 月降水和 7、8 月径流以及年平均蒸发的年际变化与实测相关性较差。就线性趋势变化而言, 两套再分析资料中存在虚假夸大的趋势变化, 尤其是 ERA。总体而言, ERA、NRA 均可以较好描述长江流域水分收支的季节循环和年际变化, ERA 与实测的一致性更好。由于这两套再分析资料具有时空连续性, 在气候变化和预测研究中具有广泛的应用。了解其在表述长江流域水分收支中的能力及局限性, 将有助于我们恰如其分地应用该资料去开展有限区域的气候研究。当然, 对两套再分析资料更加全面的评估, 还有待于观测资料的进一步丰富。

参考文献

- [1] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77: 437-471
- [2] Källberg P, Simmons A, Uppala S, et al. The ERA-40 Ar-

- chive, September 2004, http://www.ecmwf.int/publications/library/ecpublications/_pdf/era40/ERA40_PRS17.pdf [2004]
- [3] Roads J, Kanamitsu M, Juang H. Vertical structure of humidity and temperature budget residuals over the Mississippi River basin. *J Geophys Res*, 1998, 103: 3741-3759
- [4] Kanamitsu M, Saha S. Systematic tendency error in budget calculations. *Mon Wea Rev*, 1996, 124: 1145-1160
- [5] Schubert S D, Rood R B, Pfaendtner J. An assimilated dataset for earth science applications. *Bull Amer Meteor Soc*, 1993, 74: 2331-2342
- [6] Roads J, Chen S, Kanamitsu M, et al. Surface water characteristics in the NCEP global spectral model and reanalysis. *J Geophys Res*, 1999, 104(19):307-19327
- [7] Roads J, Kanamitsu M, Stewart R. CSE water and energy budgets in the NCEP-DOE reanalysis II. *J Hydrometeor*, 2002, 3(3): 227-248
- [8] William J Gutowski J, Chen Y, øtles Z. Atmospheric water vapor transport in NCEP-NCAR reanalyses: Comparison with river discharge in the central United States. *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78: 1957-1969
- [9] 苏志侠,吕世华,罗四维. 美国 NCEP/NCAR 全球再分析资料及其初步分析. *高原气象*, 1999, 18 (2): 209-218
- [10] Roads J, Betts A. NCEP-NCAR and ECMWF reanalysis surface water and energy budgets for the Mississippi River basin. *J Hydrometeor*, 2000, 1: 88-94
- [11] Maurer E, O'Donnell G, Lettenmaier D, et al. Comparison of NCEP/NCAR reanalysis, NCEP II AMIP water and energy budgets with macroscale hydrologic model simulations. *J Geophys Res*, 2001, 106: 17841-17862
- [12] Leung L R, Qian Y, Han J L, et al. Intercomparison of global reanalyses and regional simulations of cold season water budgets in the Western United States. *J Hydrometeor*, 2003, 4: 1067-1087
- [13] 韩荣青,李维京,胡国权等. GAME 再分析资料与 NCEP 再分析资料在 1998 年 HUBEX 试验期的对比分析. *应用气象学报*, 2004, 15 (2): 141-151
- [14] Marengo J A. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River basin water budget. *Clim Dyn*, 2005, 24: 11-22
- [15] Li W P. Moisture flux and water balance over the South China Sea during late boreal spring and summer. *Theor Appl Climatol*, 1999, 64: 179-187
- [16] 徐祥德,陶诗言,王继志等. 青藏高原—季风水汽输送“大三角扇形”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系. *气象学报*, 2002, 60(3): 257-267
- [17] Wang K L, Cheng G D, Xiao H L, et al. The westerly fluctuation and water vapor transport over the Qilian-Heihe valley. *Science in China (Ser D)*, 2004, 47: 132-138
- [18] Xu X D, Chen L S, Wang X R, et al. Moisture transport source/sink structure of MeiYu rain belt along the Yangtze River valley. *Chinese Sci Bull*, 2004, 49: 181-188
- [19] 任宏利,张培群,李维京等. 中国西北东部地区春季降水及其水汽输送特征. *气象学报*, 2004, 62(3): 365-374
- [20] Qiu X F, Zeng Y, Miao Q L, et al. Calculating surface annual evapotranspiration by conventional meteorological observations. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(3): 281-288
- [21] 刘攀,郭生练,熊立华等. 浅析三峡水库的发电能力——从气候变异与人类活动的影响来看. *水力发电*, 2004, 30(A03): 196-201

WATER BUDGET FOR THE YANGTZE RIVER BASIN AND EVALUATION OF ECMWF AND NCEP/NCAR REANALYSIS DATA

Zhao Ruixia^{1,2,3} Wu Guoxiang²

1 *National Meteorological Center, China Meteorological Bureau, Beijing 100081*

2 *LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

Abstract

The surface and atmospheric water budgets for the Yangtze River basin were examined using the available observations, ECMWF and NCEP/NCAR reanalysis data during 1958 to 1983 and 1990 to 2000 respectively, and the water budget components in this study include precipitation, runoff, evaporation, moisture convergence and so on. Based on the observations, the water budgets for the Yangtze River basin and their seasonal cycle, interannual variations, and linear trends were analyzed. On the average of long time, the river basin area is a moisture sink. It's interesting that the water vapor is transported to the basin area by the mean air flow instead of the transient eddies which are close associated with synoptic systems and always diverges moisture out of the river basin. On the surface, the evaporation is almost equal to the runoff, and plays a very important role in the water cycle of the river basin. Evident annual and interannual variabilities exist in most components of the atmospheric and surface water budgets, and only the interannual variations of evaporation and precipitable water are smaller. Precipitation and moisture convergence by the mean transport both peak in June and then decrease till December. But the maxima and minima of runoff and precipitable water occur in July and January, respectively, one month later than those of precipitation. During 1958 to 1983, precipitation slightly increased in summer half year and decreased in winter half year insignificantly, and insignificant increasing trends existed in the annual mean evaporation and stream flow.

Furthermore, the contrast analyses of ECMWF and NCEP/NCAR reanalysis data were performed to evaluate their performances in describing the hydrological cycle in the Yangtze River basin. Firstly, the NCEP/NCAR reanalysis data overestimate precipitation, runoff, and evaporation, while underestimate precipitable water and moisture convergence as compared with the observations. In the ECMWF reanalysis data, the precipitation and runoff are basically close to the observations, but the evaporation is overestimated, and the precipitable water and moisture convergence are also underestimated, but closer to the observations than the NCEP/NCAR reanalysis data. Fortunately, both reanalysis data, especially the ECMWF reanalysis data, can describe the annual and interannual variations of water budgets well, but the two sets of reanalysis data, especially the ECMWF reanalysis data exaggerate linear trends over the period of year 1958 to 1983. So in a word, the ECMWF and NCEP/NCAR reanalysis data can be used to describe the annual and interannual variations of the water budgets for the Yangtze River basin, but one must be cautious to use the reanalysis data to calculate the linear trends of water budgets.

Key words: Yangtze River basin, Water budget, Evaluation.