物理学报 Acta Physica Sinica



中国夏季大气水分循环特征及再分析资料对比分析

苏涛 封国林

The characteristics of the summer atmospheric water cycle over China and comparison of ERA-Interim and MERRA reanalysis

Su Tao Feng Guo-Lin

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 63, 249201 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.249201 在线阅读 View online: http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.249201 当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

全球水汽再循环率的空间分布及其季节变化特征

Spatial distribution and seasonal variation characteristics of global atmospheric moisture recycling 物理学报.2014, 63(9): 099201 http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.099201

ERA-Interim 中的中国地区水分循环要素的时空演变特征分析

Spatial and temporal characteristics of moisture cycle factors over China analyzed with ERA-Interim reanalysis data

物理学报.2013, 62(19): 199202 http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.199202

中国夏季大气水分循环特征及 再分析资料对比分析*

苏涛1) 封国林2)†

(兰州大学大气科学学院,兰州 730000)
 (国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081)
 (2014年6月24日收到;2014年8月8日收到修改稿)

大气水分循环过程耦合了降水、蒸发、水汽输送等多个环节.本文利用 ERA-Interim 与 MERRA 再分析 资料,研究了中国 1979—2012 年夏季大气水分循环的时空变化特征及其对全球气候变化的响应,并对两套再 分析资料在中国地区的适用性进行了评估.结果表明:1)中国夏季降水、蒸发、可降水量均自东南沿海地区向 西北内陆递减;降水与蒸发相互联系、相互制约,由于不同地区下垫面物理条件的差异,它们之间同时存在正、 负反馈的影响机制,可降水量主要集中在地面至 700 hPa 高度,约占总量的 75%;2)近34 年大气水分循环显 著变化的区域主要集中在西部和东北地区,西部内陆地区可降水量显著增加,北方大部分地区纬向水汽输送 通量显著减小,西北北部地区经向水汽输送通量显著增大,蒸发量与水汽输送的气候变化可能是造成可降水 量增加的主要原因;3) Interim 与 MERRA 资料对降水量时空变化特征的再现能力要优于蒸发量,此外,它们 对降水与蒸发气候变化趋势的模拟结果差别较大,使用时应该慎重;两套资料对可降水量与水汽输送通量的 时空变化特征以及气候变化趋势的模拟比较一致,可信度较高;4) Interim 资料对西南、东南以及东北区域夏季水循环均有较好的描述能力;而 MERRA 资料更适用于研究西南和西北区域的水汽收支情况.

 关键词:大气水分循环,再分析资料,大气水汽收支,气候变化趋势

 PACS: 92.40.Zg, 92.60.Ry

 DOI: 10.7498/aps.63.249201

1引言

水循环是一个涉及降水、蒸发、水汽输送以及 径流等环节的动态系统,其变化深刻地影响着全球 水资源系统和生态环境系统的结构和演变,并且对 各地区的天气与气候变化起着重要的作用,旱涝降 水异常就与水循环存在直接联系^[1,2];此外,水循环 还与人类经济社会活动息息相关^[3,4],人类活动也 在很多方面影响水循环过程^[5].水循环包括了大气 分支与陆地分支^[6],大气分支是水循环系统最活跃 的部分,主要指海洋和陆地上空的水汽输送和陆地 不同区域上空的水分交换^[7].大气中的水分所占的 比例非常小,但是它的活动严重影响着地球表层的 生态环境和人类的生存^[8],水汽既是大气降水的物 质基础,也是大气中主要的温室气体^[9].由于大气 观测资料相对较少,陆地蒸发与降水数据也存在一 定程度的不确定性,近代关于水循环的研究,还主 要侧重于其陆面过程^[10].为了更加全面地认识不 同时空尺度上的水循环特征,仍需要对大气水分循 环进行深入研究.

近年来,国内学者针对大气水分循环已经开展 了一些工作. 崔一峰和刘国纬^[11]利用1983年探 空气象资料及地面水文资料,计算了中国大陆及六 大区域水汽收支的分布特征; Zhai和Eskridge^[12]

^{*} 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB955902, 2013CB430204)和公益性行业科研专项(批准号: GYHY201106016)资助的课题.

[†]通讯作者. E-mail: fenggl@cma.gov.cn

^{© 2014} 中国物理学会 Chinese Physical Society

探讨了中国地区上空大气水汽的分布特征;施小英 和施晓晖^[13]研究了夏季青藏高原东南部水汽收支 的气候特征及其影响效应;赵瑞霞和吴国雄^[6]定量 分析了长江流域水分收支各分量的季节循环、年际 变化以及线性趋势变化;伊兰和陶诗言^[14]根据水 平衡方法尝试对东亚季风区进行蒸发与土壤和地 下水含量估算及总的水量平衡分析;张文君等^[15] 同样基于水汽平衡方程估算了华北、长江流域和华 南三个典型区域的水分收支情况.综上可见,以往 的研究大多针对中国局部地区或部分水循环要素 进行分析,还缺少对中国地区大气水分循环的系统 分析.

再分析资料是资料同化的产物,具有空间分 布均匀、时间尺度长且连续、动力、热力一致性等特 点^[16].由于前几代再分析资料水文循环数据在很 多方面逐渐难以满足水循环的天气与气候研究,最 近欧洲中期天气预报中心(ECMWF)与美国国家 航空航天局(NASA)分别发展了两套新一代再分 析资料. ERA-Interim 与MERRA 是目前全球最先 进的大气再分析资料同化系统^[17],它们对前几代 再分析资料的水文循环过程做出了重要改进,其 中, ERA-Interim与ERA-40相比在很多方面都有 一定的提高,尤其是在水分收支和能量循环方面有 了显著改善^[18].同时, MERRA 的主要目标也是改 善前几代再分析资料中的水文循环数据问题. 但 是ERA-Interim与MERRA资料目前在中国地区 的应用较少, 正确认识和评价这两套再分析资料的 质量并在实际研究中合理应用是一个亟待解决的 问题. 中国地处东亚季风区, 年内降水主要集中在 夏季,因此本文结合ERA-Interim与MERRA再分 析资料对中国夏季大气水分循环进行了系统研究, 并探讨了其对全球气候变化的响应,同时鉴定了这 两套再分析资料在中国各地区的适用性与局限性, 这不仅能为中国地区水资源综合管理提供重要的 理论支持,也对再分析资料的改进提供了科学的参 考依据.

2 资料与方法

2.1 资料说明

ERA-Interim (简称 Interim) 是 ECMWF 发布的一套新型再分析资料,它解决了 ERA-40 系统同

化卫星资料时存在的一些问题,同时为ECMWF 发展下一代数值同化系统奠定了基础^[19]. Interim 资料采用四维变分同化技术(4D-VAR),利用一个 以12h为周期的连续数据同化方法,在每个同化 周期中,观测资料都会与预报模型(IFS)的初始数 据结合在一起估计全球大气与地表的变化.此外, NASA 全球模式与同化办公室(GMAO)开发了新 一代数值同化产品 MERRA, 它有两个主要目标: 一是把来自NASA 的地球观测卫星数据作为气候 背景,二是改善前几代再分析资料中的水文循环数 据^[20]. MERRA 使用GEOS-5大气模式与资料同 化系统,资料同化应用的是美国国家环境预报中 心(NECP)发展的以6h为周期的格点统计插值系 统(GSI, 观测资料在进行同化之前均进行了质量 控制与误差订正,在三种相互独立的数据上进行 增量分析得到全球再分析数据. 由此可见, Interim 与MERRA资料所使用的同化系统、同化方案以 及同化的资料均有所不同.本文使用了Interim与 MERRA 资料降水量 (P)、蒸发量 (E)、比湿 (q)、风 场(u, v)、地面气压(p)等要素的日平均数据,其 中比湿(q)与风场(u, v)资料包括由1000 hPa至 50 hPa共24层的数据,以及国家气候中心整编的 中国160站月降水资料.

2.2 水汽平衡方程

一般情况下,在任意时段内,某一地区大气的 水汽收支情况需要满足水汽平衡方程^[21,22],如(1) 式所示:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot [\boldsymbol{Q}_{\lambda} \boldsymbol{Q}_{\varphi}] = E - P, \qquad (1)$$

$$W = \frac{1}{g\rho_{\rm w}} \int_{p=0}^{p_{\rm s}} q \,\mathrm{d}p,\tag{2}$$

$$\boldsymbol{Q}_{\lambda} = \frac{1}{g\rho_{\mathrm{w}}} \int_{p=0}^{p_{\mathrm{s}}} q u \mathrm{d}p, \qquad (3)$$

$$\boldsymbol{Q}_{\varphi} = \frac{1}{g\rho_{\mathrm{w}}} \int_{p=0}^{p_{\mathrm{s}}} qv \,\mathrm{d}p, \qquad (4)$$

其中, P为降水量, E为蒸发量, W为大气可降水 量, $Q_{\lambda} \models Q_{\varphi}$ 分别为纬向与经向的水汽输送通量, u是纬向风分量, v是经向风分量, g是重力加速度, ρ_w 是液态水的密度, q表示比湿, p_s 表示地表面气 压. 水汽收支平衡是大气水分循环能够持续的基本 前提, 蒸发、降水、水汽输送等环节通过水汽平衡方 程紧密地联系为统一的整体.

表1 Interim 与 MERRA 再分析资料的概况

再分析资料	水平分辨率	同化方案	数据时次	垂直层次
Interim	T255 ($\sim 78~{\rm km})$	4DVAR	6 h, daily, monthly	37
MERRA	$1/2^{\circ} \times 2/3^{\circ}$	3DVAR	1 h, 6 h, daily, monthly	42

2.3 研究与处理方法

本文使用 Jones 网格面积加权平均法^[23] 计算 了各要素逐年的区域平均值,并进一步分别求得各 要素逐年变化的相关系数^[24]. Jones 等^[23] 网格面 积加权平均法的公式为

$$S_k = \sum_{i=1}^{n} \cos(W_i) S_{ik} / \sum_{i=1}^{n} \cos(W_i),$$
 (5)

式中, *S_{ik}* 表示第*i*个网格第*k*年的值, *W_i*表示第*i* 网格上的纬度值, *S_k* 表示某区域第*k*年的区域平均 值, *N* 为某区域包含的格点数目.

Interim与MERRA资料水平分辨率并不一致 (表1),为了比较两套再分析资料的差异,本文采用 双线性插值方法将它们统一成相同的格点形式,然 后计算了它们的相似系数与均方根误差^[24,25],这 可以反映出两套再分析资料大气水分循环要素空 间分布的相似程度.此外,通过趋势系数^[26]可以 了解气象要素的长期趋势变化,适用于研究大范围 气象场的长期变化,而气候倾向率能够表征气象要 素每10 a 的变化率,因此本文结合气候趋势系数与 气候倾向率研究了大气水分循环的气候变化特征.

3 中国夏季大气水分循环的时空变化 特征

蒸发与降水是地表与大气之间的水分通量,蕴 藏在海洋、冰雪、陆地和植被等下垫面的固态水与 液态水通过蒸发进入大气,大气中过饱和水汽上升 冷凝后形成降水回到地面,大气水汽输送则将时空 分布不均的蒸发重新输送到各个地区.大气可降水 量是一个重要的气象参数,它是产生降水的物质基 础,对降水的形成、辐射能的吸收和放射以及气候 的形成与变化都有重要的影响.降水、蒸发、水汽输 送以及可降水量是水汽平衡方程中的基本参数,同 时也是大气水分循环的基本要素,因此本节重点分 析中国夏季上述各要素时空分布的主要特征,并对 比分析两套再分析资料的时空相似性.

3.1 降水量与蒸发量的时空特征

中国受夏季风的影响,降水呈现出明显的地 域性差异,降水量(P)自东南沿海地区向西北内 陆递减(图1),对于Interim资料而言(图1(a)),华 南、江南、西南南部、四川盆地、西藏东南部以及江 汉等地区P相对较大,均在10mm/d左右,西藏 东南部地区甚至超过18mm/d,西藏东北部、西南 中北部、江淮、黄淮以及东北东南部等地区P有所 减少,在6mm/d左右,西藏中北部、华北、内蒙古 中东部以及西北东南部等地区P进一步减少至 大约2mm/d,而西北中北部的大部分地区都要小 于0.5mm/d. MERRA与Interim资料P的分布形 势基本一致(图1(b)),相似系数达到0.947,但是 MERRA资料华南与江南地区P更大,而西藏与江 汉地区P相对较小.



图 1 中国大陆夏季 (a) Interim 与 (b) MERRA 资料日 平均降水量 (P) 的空间分布形势 (单位为 mm/d)

蒸发量(E)的分布形势也具有显著的地域性 特征. Interim 资料 (图 2 (b)) E 较高的地区主要分 布在华南、江南、江淮、黄淮、华北以及东北东部等 地区,均在4mm/d左右;西藏、西南、东北西部、内 蒙古东部以及西北东南部等地区相对较小,大约 在2-3 mm/d; 西北中北部地区最小, 尤其是塔里 木盆地及其附近地区, 仅为0.2 mm/d 左右. MER-RA资料(图2(b))江南至华南中北部地区的E都 在5mm/d左右,明显高于Interim资料;此外,在 西藏东南部、西南以及东北东部等地区也相对更大, 但华北、东北西部、西藏中西部以及西北局部地区 E略低. 整体来说, Interim 与 MERRA 资料 P 的空 间分布形势比较一致,差别较大的地区主要位于西 藏、江南、华南以及江汉地区,而 E 的空间分布差异 较大, 尤其是江南、西南等地区, 差值达到1 mm/d 左右.





图 3 (a) 给出了 P 在 1979—2012 年逐年变化的 时间序列,可见 Interim 与 MERRA 资料 P 的逐年 变化形势基本相同,相关系数为 0.850,此外,它们 与中国 160 站降水观测资料的相关系数分别达到 0.745, 0.709,置信水平均超过 99%,说明再分析资 料对中国夏季降水逐年变化的再现能力较好,可信 度较高.其中,1979—1990年P在4.2 mm/d左右, 1990—1998年P逐渐增大,在1998年达到最大值, 1999年之后有明显的线性减少趋势.由图3(b)可 知,夏季E逐年变化的幅度较小,Interim资料E略 低于MERRA资料,相关系数为0.498,达到了99% 的置信水平,可见两套再分析资料P逐年变化的相 关性要优于E.



图 3 中国 1979—2012 年夏季降水量 (P) 与蒸发量 (E) 的逐年变化时间序列 (单位为 mm/d)

中国夏季 P 与 E 空间分布的地域性差异显著 (图1、图2),为了研究再分析资料 P 与 E 在不同 地区的适用性,本文参考中国气象地理区划标 准,将中国地区依110°E,35°N为界划分为四个 区域,分别为西南(WS)、东南(ES)、西北(WN)与 东北(EN)区域.表2分别是中国地区(CHN)及各 区域Interim与MERRA资料 P 与 E 逐年变化的 相关系数(ρ)与空间分布的相似系数(S)和均方根 误差(RMSE).对于WS 区域,P 逐年变化的相关 系数为0.830,空间分布的相似系数达到0.938,置 信水平均达到99%,RMSE则为2.65 mm,表明WS 区域 P 的时空分布均基本一致,但是在量值上存在 一定的差别; E 的相似系数为0.965,但相关系数仅 有0.327.可见两套资料在WS 区域 E 的空间分布 非常接近,但 E 逐年变化形势差别较大. ES 区域 P 与 E 逐年变化与空间分布均具有较高的一致性, RMSE 也相对较小,说明再分析资料在 ES 区域的 适用性较好.WN 区域 P 与 E 逐年变化的形势差别 较大,相关系数分别为0.257,0.221,相似系数与其 他区域相比也明显较低,表明再分析资料对 WN 区 域 P 与 E 时空演变特征的再现能力较弱.EN 区域 P的逐年变化形势非常接近,相关系数高达0.980, RMSE 也仅有0.79 mm; E的逐年变化也较为一 致,相关系数为0.423,置信水平达到95%.综上可 知, Interim与MERRA资料对中国夏季P时空变 化特征的再现能力要优于E,特别是WS与WN 区 域E的逐年变化形势差别较大,空间分布的相似度 较低.

表 2 中国各区域 Interim 与 MERRA 资料降水量 (P) 和蒸发量 (E) 逐年变化的相关系数 (ρ) 及空间分布的 相似系数 (S) 与均方根误差 (RMSE)

口柱		Р			E	
区域 —	ρ	S	$RMSE/mm \cdot d^{-1}$	ρ	S	${\rm RMSE}/{\rm mm}{\cdot}{\rm d}^{-1}$
WS	0.830	0.938	2.65	0.327	0.965	1.17
\mathbf{ES}	0.785	0.976	1.63	0.750	0.979	0.86
WN	0.257	0.889	0.82	0.221	0.931	0.55
EN	0.928	0.980	0.79	0.423^{*}	0.976	0.70
CHN	0.850	0.947	1.72	0.498	0.962	0.87

注: 粗体置信水平达到 99%, "*" 置信水平达到 95%.

3.2 大气可降水量与水汽输送的时空特征

图 4 为中国大陆夏季大气可降水量(W)的空间分布形势,由此可见,Interim与MERRA资料具有很高的一致性,华南、江南、江淮以及四川盆地等地区 W 均在 50—60 mm 左右,华北、西南南部等地区约为 40 mm,东北、内蒙古、西北东部与西部等地区 W 在 20—30 mm 之间,而西藏地区的可降水量相对较少,仅为 10 mm 左右.

为了研究不同高度大气可降水量的分布特征, 表3进一步计算了中国地区各层次大气水汽含量 的平均值及其逐年变化的相关系数与空间分布的 相似系数和均方根误差,两套再分析资料地表至 50 hPa大气的水汽含量非常接近,平均值分别为 25.58,25.57 mm,逐年变化的相关系数达到0.746, 空间分布的相似系数高达0.999.地面至700 hPa 的大气水汽含量分别为19.17,19.02 mm,约占据 整层大气水汽含量的75%.其余层次的大气水 汽含量相对较少,并且时空变化也基本一致.由 此可知,Interim与MERRA资料各层次大气水汽 含量的时空分布特征均具有非常高的一致性,中 国夏季大气可降水量主要集中在地面至700 hPa 高度.







图5给出了中国大陆地区大气水汽输送及其 散度的分布形势,可见Interim与MERRA资料基 本相同,经向与纬向水汽输送通量场的相似系数分 别为0.969,0.971,只是江南、台湾以及西北局部地 区的水汽输送散度存在一定差别. 主要特征表现 为华南、江南、江淮、东北东部等地区的水汽输送均 较强,其中华南地区以经向输送为主,江南、江淮以 及东北东部等地区的纬向水汽输送有所增强,而西 藏、内蒙古中西部以及西北地区基本受纬向水汽输 送控制.

表 3 中国夏季 Interim 和 MERRA 资料各层次大气平均水汽含量 (W) 及其分别对应的相关系数 (ρ)、相似 系数 (S) 与均方根误差 (RMSE)

层	$W_{\rm Interim}/{ m mm}$	$W_{\rm MERRA}/{ m mm}$	ho	S	RMSE/mm
地表—700 hPa	19.17	19.02	0.795	0.999	1.20
$700 {} 500 \ \mathrm{hPa}$	8.71	8.88	0.419^{*}	0.999	0.56
$500 {-\!\!-} 300~{\rm hPa}$	3.12	3.21	0.930	0.998	0.25
$300{-}50~\mathrm{hPa}$	0.24	0.25	0.674	0.996	0.03
地表—50 hPa	25.58	25.57	0.746	0.999	1.40

注:粗体置信水平达到99%, "*"置信水平达到95%.



图 5 中国大陆夏季水汽输送通量 (矢量,单位为 kg·m⁻¹·s⁻¹) 与水汽输送通量散度 (阴影区,单位为 10^{-8} kg·s⁻¹·m⁻²) 的空间分布形势

3.3 中国各区域夏季大气水分循环要素 逐月的平均分布

再分析资料对于全球或区域尺度上水分平衡的描述具有一定的局限性,当利用再分析资料研究 大气水分循环特征时,必须引入残差项(res)才能 严格地满足水汽平衡方程^[21,22],如(6)式所示:

au

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot [\boldsymbol{Q}_{\lambda}, \boldsymbol{Q}_{\varphi}] = E - P + \text{res.}$$
 (6)

图 6 是根据(6)式计算得到的中国各区域夏季(J-JA)以及 6, 7, 8 月份 P, E、水汽输送通量散度

(divQ)、可降水量随时间变化项 $(\partial w/\partial t)$ 以及残差 项(res)的分布,由此可见,WS区域(图6(a),(b)), 大气水分循环各要素均能较好地满足水汽平衡方 程, 各月份W基本保持不变, res 相对较小, P 与 E的差值较大,但是水汽输送具有很强的辐合趋势, 为该地区的降水提供了良好的水汽条件. ES区域 (图6(c), (d)) W也比较稳定,但res较大,特别是 MERRA 资料, 夏季 res 平均值约为1.8 mm/d, 其 中以7月份最大, P, E以及divQ均相对较大, 水 汽输送辐合趋势明显; 值得注意的是, Interim 资 料7月份降水量低于8月份,而MERRA 资料7月 份降水量高于其他月份,这可能是MERRA资料7 月份残差相对较大的原因. WN区域(图6(e), (f)) 各要素量值较小, P与E大致相等, MERRA资料 各要素基本满足水汽平衡方程,但是Interim 资 料在各个月份残差值均较大, Interim 资料 res 与 divQ均高于MERRA资料, res 各月平均值均与 divQ 接近,因此Interim资料 res 可能与 divQ 紧密 相关. Interim资料各要素在EN区域基本保持平 衡 (图 6 (g)), P 与 E 在 7 月 份 大体相等, 但在 8 月 份相差较大; MERRA资料 EN 区域P, E 以及 divQ 的逐月分布与Interim资料基本一致, Interim与 MERRA资料divQ相差较大, MERRA 资料divQ 明显较大,同时res也相对更大(图6(h)).综上可 知, Interim 资料对西南、东南以及东北区域夏季水 汽平衡均有较好的描述能力;而MERRA资料比较 适用于研究西南和西北区域的大气水汽收支情况, 水循环各要素能够很好地保持平衡,并且divQ与 res 存在很大的联系.





JJA.

4

3

1 0

-1

-2

Jun.

Jul.

 $\mathrm{mm}\cdot\mathrm{d}^{-1}$ $\mathbf{2}$

中国夏季大气水分循环的气候变化 4 特征

Jul.

Aug.

(g) EN_Interim

43

 $\mathbf{2}$

0

-1

-2

Jun.

 $mm \cdot d^{-1}$ 1

水循环对全球气候有重要的调节作用, 而气 候是水循环重要的驱动因子^[27], 气候变化可以直 接影响水资源[28],全球变暖可能导致水循环强度 增大,降水量、蒸发量以及大气水汽含量显著增 加^[5,29].因此本节计算了中国夏季大气水分循环各 要素的趋势系数与气候倾向率,然后进一步分析了 各要素的气候变化特征,并评估两套再分析资料在

Aug.

JJA.

研究中国地区水循环长期气候变化中存在的一些 质量问题.

4.1 降水量与蒸发量的线性变化趋势

图7是中国大陆地区1979—2012年夏季P与 E以及(P-E)值线性变化趋势的空间分布,由 此可见,对于Interim资料,西藏中东部、西北 中部以及西南局部地区P呈现显著的线性增 加趋势(图7(a)),而西藏东南部、塔里木盆地 中西部、内蒙古中东部以及西南南部等地区P 具有显著的线性减少趋势,气候倾向率基本 都在0.2 mm·d⁻¹·decade⁻¹,局部地区甚至超过 0.6 mm·d⁻¹·decade⁻¹;塔里木盆地中西部、华北西 部以及内蒙古局部地区的E也具有显著的线性减 少趋势(图7(c)),西北中东部局部地区和东部北部 地区E呈现显著的线性增加趋势;此外,(P-E)值 的气候变化趋势也非常明显(图7(e)),并且(P-E) 值与P线性变化显著的区域分布在整体上基本一 致. MERRA资料 P, E, (P-E) 值的线性变化趋势 与Interim有所不同,西北、西南北部和江淮东部等 地区P具有显著的线性增加趋势,而西藏中东部、 东北北部与华北北部等地区P呈现显著的线性减 少趋势, E线性变化显著的区域分布与P基本一 致,只是江南与西南南部地区 E 也具有显著的线性 增加趋势; (P-E) 值线性变化显著的区域主要分布 在西北、西藏中东部、江淮、黄淮东部等地区. 综上 可知,中国夏季P,E,(P-E)值线性变化显著的区 域主要分布在西北和东北地区,表明上述地区P, E, (P-E) 值对气候变化的响应较为敏感, 并且 P 与E显著性变化区域的空间分布形势基本一致,但 是 Interim 与 MERRA 资料 P, E, (P-E) 的气候趋 势变化在一些地区存在明显的差别, 部分地区甚至 呈现反位相,也说明再分析资料对中国夏季P与E 气候变化趋势的模拟还存在一定的问题.



图 7 中国大陆夏季降水量 (*P*)、蒸发量 (*E*) 以及 (*P*-*E*) 值的线性变化趋势 (阴影区是趋势系数置信水平分别达到 95%, 99% 的区域, 红色表示线性增加, 蓝色表示线性减少, 等值线是气候倾向率, 单位为 mm·d⁻¹·decade⁻¹)

4.2 大气可降水量与水汽输送的线性变化 趋势

如图 8 所示,中国大陆地区 1979—2012 年夏季 W以及纬向(Qu)与经向(Qv)水汽输送通量也具 有显著的线性变化趋势.其中,如图 8 (c),(d)所 示,Qu线性变化显著的区域分布基本一致,主要集 中在西北、内蒙古中西部和华北西北部等地区,气 候倾向率在 5—15 g·cm⁻¹·s⁻¹·decade⁻¹之间.此 外,Qv线性变化显著的区域也主要分布在西北 地区,尤其是西北北部地区,呈现显著的线性增 加趋势;内蒙古东部、东北西部、华北西部以及华 南局部地区Qv呈现显著的线性减少趋势.W线 性变化趋势显著的区域也主要分布在西部地区, Interim资料西藏、西北中东部等地区W线性变 化趋势的置信水平均达到了99%,气候倾向率超 过0.5 mm·decade⁻¹(图8(a)),而MERRA资料西 北、西藏北部、内蒙古西部、华南、黄淮东部等地区 W 均呈现显著的线性增加趋势(图8(b));W主要 受到本地区的蒸发和水汽输送形势的影响,西部内 陆地区受纬向水汽输送控制,Qu能够对该地区W 产生重要影响,近34年夏季西部内陆地区E显著 增加,而Qu显著减小,因此W也相应的显著增加, 可见E与Qu的气候变化是造成W显著增加的主 要原因.另外,Interim与MERRA资料对空中水 循环要素气候变化趋势的



图 8 中国大陆夏季可降水量 (W) 和纬向 (Qu) 与经向 (Qv) 水汽输送通量的线性变化趋势 (阴影区是气候趋势系数置信水平分别达到 95%, 99% 的区域, 红色表示线性增加, 蓝色表示线性减少, 等值线是气候倾向率, 单位分别为: mm·decade⁻¹, g·cm⁻¹·s⁻¹·decade⁻¹)

再现能力更强,线性变化趋势显著的区域分布基本 一致.

本节的研究表明,中国1979—2012年夏季大 气水分循环要素线性变化显著的区域主要分布在 中国西北、西藏和东北地区,体现出上述地区的水 循环要素对气候变化的响应程度相对较高,但是两 套再分析资料陆地水循环要素(*P*, *E*)的气候变化 趋势差别较大,而空中水循环要素(*W*, *Qu*, *Qv*)比 较接近,说明再分析资料对空中水循环要素气候变 化趋势的模拟更加准确,可信度更高.

5 中国夏季大气水分循环的机理分析

大气水分循环各要素紧密相连(图9),蒸发不 仅是大气中水汽的最终来源,而且蒸发过程中伴 随的能量收支变化也为大气环流提供了动力,水 汽随大气环流运动,影响大气可降水量的空间分 布,进而决定各地区的降水分布,因此全球气候变 化能够从各个方面影响大气水分循环过程,西部内 陆地区 E 与 Qu 的气候变化就是造成 W 显著增加 的主要原因(图8). 相关性研究表明,中国夏季P 与W的逐年变化呈现显著的正相关关系, Interim 与MERRA资料P与W的相关系数分别为0.711, 0.552, 置信水平均达到了99%, P与W 空间分布 的相似系数分别为0.834, 0.876, 表明充足的水汽 供应是形成降水的必要条件之一. 而某一地区大气 的W主要来源于外界的水汽输送和本地区的蒸发, 中国东部地区经向水汽输送较强,而西部地区主要 受纬向水汽输送控制, MERRA 资料 WN 区域 P与 Qu的相关系数为-0.415, 呈现显著的负相关关系, 这可能是由于Qu较小时,该地区向其他区域的水 汽输送较弱,转化为P的水汽相应增多,导致P较 大; 而对于ES区域, P 与Qv的相关性更高, 说明 Qv对该区域P的影响更大; EN区域P同时受到 *Qu*, *Qv* 的共同影响, *P*与*Qu*, *Qv*均存在显著的正相关关系.

降水与蒸发是水循环的两个基本过程,大气 降水所需要的水汽最终来自于蒸发, Interim 与 MERRA资料中国夏季P与E的相关系数分别为 0.263, 0.576, 后者置信水平达到99%, 尤其是在 WN与EN区域P与E相关系数的置信水平均超 过99%, 另外 Interim 与 MERRA 资料 P 与 E 空间 分布的相似系数分别为0.854, 0.945, 并且P与E 线性变化趋势显著性区域的空间分布也基本一致 (图7),这体现出了P与E之间存在正反馈机制; 但是在WS, ES区域P与E逐年变化的相关性较 低, 甚至存在显著的负相关关系 (WS). 蒸发量的变 化主要受到两个方面的影响:供水条件与能量条 件. 首先, 陆地蒸发主要包括土壤蒸发以及植物的 蒸散,其中土壤蒸发是发生在土壤孔隙中的水的蒸 发现象,供水条件的差异是导致蒸发量不同的重要 因素. WN 与EN 区域相对较为干旱, 土壤含水量 较低,供水条件是制约该地区蒸发量大小的主要原 因,大部分降水又会通过蒸发重新回归大气,进而 导致大气可降水量增加,因此降水与蒸发可以相互 促进; 而WS, ES区域比较湿润, 供水条件对该地 区 E 的影响相对较小, 蒸发量主要受到饱和水汽压



图 9 大气水分循环的机理分析及其对全球气候变化的响应

区域	Interim			MERRA				
	E	W	Qu	Qv	E	W	Qu	Qv
WS	-0.429^{*}	0.707	0.161	0.116	0.299	0.612	0.098	0.135
\mathbf{ES}	-0.293	0.570	0.152	0.357^{*}	-0.239	0.519	-0.024	0.319
WN	0.855	0.602	0.064	-0.010	0.954	0.856	-0.415^{*}	0.215
EN	0.457	0.513	0.293	0.483	0.881	0.449	0.360^{*}	0.561
CHN	0.263	0.706	0.132	0.297	0.576	0.550	0.035	0.254

表4 中国各区域 Interim 与 MERRA 资料降水量 (P) 与其余大气水分循环要素逐年变化的相关系数

注: 粗体置信水平达到 99%, "*" 置信水平达到 95%.

差、空气饱和差、风速、相对湿度等其他因子的影响^[30],因此P与E的相关性较低,P反而会对E产 生负作用.可见由于不同地区下垫面物理条件的差 异,降水与蒸发相互联系、相互制约,同时存在正、 负反馈的影响机制(见图9).需要指出的是,全球 变暖背景下江南与华南地区蒸发量呈现显著的增 加趋势,这与温度的变化是比较一致的,体现出湿 润地区蒸发量的变化与温度也存在着重要联系.

6 结 论

本文结合 Interim 与 MERRA 再分析资料,运 用水汽平衡方程研究了中国 1979—2012 年夏季大 气水分循环的时空变化特征,并对两套资料降水、 蒸发、可降水量以及水汽输送通量等要素的时空分 布进行了对比分析,主要结论如下.

 中国大气水分循环各要素大小存在显著的 地域性差异,均自东南沿海地区向西北内陆递减; 降水与蒸发相互联系、相互制约,由于不同地区下 垫面物理条件的差异,它们之间同时存在正、负反 馈的影响机制;大气可降水量主要集中在地面至 700 hPa高度,约占总量的75%.

2) 大气水分循环呈现显著的气候变化特征,特别是西北、西藏和东北地区,近34年大气可降水量显著增加,纬向水汽输送强度显著减弱,局部地区经向水汽输送显著增强,蒸发量与水汽输送的气候变化是造成可降水量增加的主要原因;降水与蒸发也发生了显著变化,并且线性变化显著的区域分布基本一致.

3) Interim与MERRA资料对中国夏季降水量 时空变化特征的再现能力要优于蒸发量,另外对降 水与蒸发气候变化趋势的模拟结果差别较大,使用 时应该慎重;但是它们对可降水量与水汽输送通量 的时空变化特征以及气候变化趋势的模拟结果比 较一致,可信度较高.

4) 再分析资料对中国不同区域水循环的描述 能力存在一定的差别, Interim资料对西南、东南以 及东北区域夏季水汽平衡均有较好的描述能力; 而MERRA资料适用于研究西南和西北区域的大 气水汽收支情况,水循环各要素能够很好地保持 平衡.

通过对比分析 Interim 与 MERRA 资料中国夏

季大气水分循环的时空变化特征,可以评估上述资 料对中国地区水循环过程的再现能力及其局限性, 为利用再分析资料研究中国地区水循环特征提供 一定的参考依据.目前,获取全球或区域尺度上的 水循环大气气候观测资料仍存在一定的难度,而不 同再分析资料也存在明显的差别,针对这些问题仍 需要开展进一步的深入研究.

参考文献

- Ye M, Wu Y P, Zhou J, Wu H, Tu G 2014 Acta Phys. Sin. 63 129201 (in Chinese) [叶敏, 吴永萍, 周杰, 吴浩, 涂钢 2014 物理学报 63 129201]
- [2] Feng G L, Yang H W, Zhang S X, Wang K, Shen B Z
 2012 Chin. J. Atmos. Sci. 36 1009 (in Chinese) [封国林,
 杨涵洧, 张世轩, 王阔, 沈柏竹 2012 大气科学 36 1009]
- [3] Shen B Z, Zhang S X, Yang H W, Wang K, Feng G L
 2012 Acta Phys. Sin. 61 109202 (in Chinese) [沈柏竹, 张
 世轩, 杨涵洧, 王阔, 封国林 2012 物理学报 61 109202]
- [4] Boucher O, Myhre G, Myhre A 2000 Climate Dyn. 22 597
- [5] IPCC 2013 Climate Change 2013 The Physical Science Basis (Cambridge: Cambridge University Press) p403
- [6] Zhao R X, Wu G X 2007 Acta Meteor. Sin. 65 416 (in Chinese) [赵瑞霞, 吴国雄 2007 气象学报 65 416]
- [7] Wu Y P 2011 Ph. D. Dissertation (Lanzhou: Lanzhou University) (in Chinese) [吴永萍 2011 博士学位论文 (兰州: 兰州大学)]
- [8] Zhang X W, Zhou S X 2010 Preliminary Study of Air Hydrology (Beijing: Higher Education Press) p18 (in Chinese) [张学文,周少祥 2010空中水文学初探 (北京: 高等教育出版社) 第18页]
- [9] Bengtsson L 2010 Environ. Res. Lett. 5 025002
- [10] Liu G W 1997 Atmospheric Processes in Hydrologic Cycle (Beijing: Science Press) pp19-24 (in Chinese) [刘国纬 1997 水文循环的大气过程 (北京:科学出版社) 第19-24 页]
- [11] Cui Y F, Liu G W 1990 J. China Hydrol. 4 22 (in Chinese) [崔一峰, 刘国纬 1990 水文 4 22]
- [12] Zhai P M, Eskridge R E 1997 J. Climate 10 2643
- [13] Shi X Y, Shi X H 2008 J. Appl. Meteorol. Sci. 19 41 (in Chinese) [施小英, 施晓晖 2008 应用气象学报 19 41]
- [14] Yi L, Tao S Y 1996 Climat. Environ. Res. 1 63 (in Chinese) [伊兰, 陶诗言 1996 气候与环境研究 1 63]
- [15] Zhang W J, Zhou T J, Yu R C 2007 Chin. J. Atmos. Sci. 31 329 (in Chinese) [张文君, 周天军, 宇如聪 2007 大 气科学 31 329]
- [16] Zhao T B, Fu C B, Ke Z J, Guo W D 2010 Adv. Earth Sci. 25 242 (in Chinese) [赵天保, 符淙斌, 柯宗建, 郭维栋 2010 地球科学进展 25 242]
- [17] Lorenz C, Kunstmann H 2012 J. Hydrometeor. 13 1397
- [18] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011 Q. J. R. Meteorol. Soc. 137 553

- [19] Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J 2005 Q. J. R. Meteorol. Soc. 131 2961
- [20] Rienecker M M, Suarez M J, Gelaro R 2011 J. Climate 24 3624
- [21] Su T, Lu Z Y, Zhou J, Hou W, Li Y, Tu G 2014 Acta Phys. Sin. 63 099201 (in Chinese) [苏涛, 卢震宇, 周杰, 侯威, 李悦, 涂钢 2014 物理学报 63 099201]
- [22] Bisselink B, Dolman A J 2008 J. Hydrometeor. 9 1973
- [23] Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, Plummer N, Wang W C, Karl T R 1990 Nature 347 169
- [24] Shi N 2009 Meteorological Statistical Forecast (Beijing: China Meteorological Press) pp15-34 (in Chinese) [施能 2009 气象统计预报 (北京: 气象出版社) 第 15—34 页]
- [25] Zhou J, Wu Y P, Feng G L, Hu J G 2013 Acta Phys. Sin. 62 199202 (in Chinese) [周杰, 吴永萍, 封国林, 胡经

国 2013 物理学报 62 199202]

- [26] Shi N, Huang X X, Yang Y 2003 Chin. J. Atmos. Sci.
 27 971 (in Chinese) [施能, 黄先香, 杨扬 2003 大气科学
 27 971]
- [27] Liu Y B 2011 Hydroclimatology: Perspectives and Applications (Beijing: Higher Education Press) pp3-37 (in Chinese) [刘元波 2011 水文气候学——视角与应用 (北京: 高等教育出版社) 第 3-37 页]
- [28] Mariotti A 2010 J. Climate 23 1513
- [29] Douville H, Ribes A, Decharme B, Alkama R, Sheffield J 2013 Nature Climate Change 3 59
- [30] Zuo H C, Li D L, Hu Y Q, Bao Y, Lü S H 2005 Chin. Sci. Bull. 50 1125 (in Chinese) [左洪超, 李栋梁, 胡隐樵, 鲍艳, 吕世华 2005 科学通报 50 1125]

The characteristics of the summer atmospheric water cycle over China and comparison of ERA-Interim and MERRA reanalysis^{*}

Su Tao¹⁾ Feng Guo-Lin^{2)†}

1) (College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

2) (Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081, China)
 (Received 24 June 2014; revised manuscript received 8 August 2014)

Abstract

Atmospheric water cycle process includes precipitation, evaporation, water vapor transport and other links. The temporal and spatial characteristics of the atmospheric water cycle over China in summer are investigated by using the ERA-Interim and MERRA reanalysis from 1979 to 2012. Comparison and performance analyses of these two reanalysis data are given. The obtained results are as follows. 1) the spatial distributions of precipitation, evaporation and precipitable water are highly similar to each other, and all gradually decrease from southeast coast to northwest inland regions. Because the differences in physical condition, precipitation and evaporation among different underlying surfaces, mutually promot or mutually restrict each other, the interactions among them have positive and negative feedback mechanisms. Precipitable water mainly concentrates in the ground to the 700 hPa height, accounts for about 75% of the total quantity. 2) All of the atmospheric water cycle elements have obvious characteristics of climate change, especially in these areas like Northwest China, Tibet and Northeast China. The zonal flux of water vapor transport significantly decreases in most parts of the northern, while the meridional flux of water vapor transport significantly increases in the northern region of Northwest China. 3) The reproduction ability to change characteristics of precipitation is better than that of evaporation based on these reanalyses. The temporal and spatial distribution characteristics of moisture transport situation and the various levels of atmospheric water vapor content are highly consistent with each other. The simulations of flux climate change trend of precipitation and water vapor transport are more accurate and more reliable. 4) Interim reanalysis is applicable to the study of the southwest, Southeast and northeast regional atmospheric water balance, water cycle elements can maintain balance well, while MERRA reanalysis is more reasonable in Southwest and northwest.

Keywords: atmospheric water cycle, reanalysis data, moisture budget of atmospheric, climatic variation trend

PACS: 92.40.Zg, 92.60.Ry

DOI: 10.7498/aps.63.249201

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2012CB955902, 2013CB430204) and the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant No. GYHY201106016).

[†] Corresponding author. E-mail: fenggl@cma.gov.cn