中国科学: 地球科学 2015 年 第 45 卷 第 3 期: 351 ~ 365
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

基于不同再分析资料的全球蒸发量时空变化特征分析

苏涛[①], 封国林[②*]

① 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000;
② 国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081
* 联系人, E-mail: fenggl@cma.gov.cn

收稿日期: 2014-05-27; 接受日期: 2014-10-10; 网络版发表日期: 2015-02-11
国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2013CB430204, 2012CB955900)、国家自然科学基金项目(批准号: 41375078, 41175084)和公益性行业科研专项(编号: GYHY201106016)资助

摘要 基于目前使用较为广泛的 8 套再分析资料, 研究了全球蒸发量的时空变化特征, 同时对比分析了各套资料的异同点, 研究结果表明: 各套资料全球蒸发量的空间分布型基本一致, 均具有明显的海陆、经向分布差异, 并且同纬度陆地上高海拔地区蒸发量小于低海拔地区. 各套资料蒸发量的时间变化形势不尽相同, 其中 MERRA, ERA-Interim, NCEP-R1 和 NCEP-R2 等资料全球平均蒸发量的逐年变化基本一致, 而 CFSR 与 ERA-40 资料更为接近; 各套资料陆地平均蒸发量的逐年变化差异较大, 其中 MERRA, CFSR 和 NCEP-R2 资料比较相似, 而海洋平均蒸发量的变化形势具有较高的一致性, 说明再分析资料对海洋蒸发量时空演变特征的再现能力更强. 整体而言, MERRA 与 NCEP-R2 资料能够同时较好地反映出全球蒸发量的时空变化特征, 具有很好的代表性; 此外, CFSR 与 ERA-40 资料也可以较好地刻画出陆地蒸发量的变化特点, 而 ERA-Interim, NCEP-R1, OAFlux 和 HOAPS 等资料比较适用于对海洋蒸发量的研究. 各套资料陆地与海洋平均蒸发量在 1958~1978 年基本都呈现显著的线性减少趋势, 而在 1979~2011 年时间段内大多是线性增加的, 其中海洋地区更加显著. 全球蒸发量也同时存在比较显著的年循环特征, 尤其是北半球低纬度地区, 而且陆地蒸发量逐月变化幅度要高于海洋.

关键词
蒸发量
再分析资料
时空变化
线性变化趋势
年循环

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(张学文和周少祥, 2010). 大气中水分主要源于自由水面蒸发、土壤蒸发以及植物表面蒸腾等(刘元波, 2011). 蒸发是水循环中的重要组成部分, 它和降水、径流一起决定着一个地区的水量平衡(郭军和任国玉, 2005), 是决定各地区天气与气候的重要过程(王艳军等, 2005; 王会军, 2010), 同时气候变化也会对蒸发产生影响, 全球变暖可能会使大气变干, 导致陆面水体蒸发量上升(IPCC, 2001); 另外, 大气中的水汽是重要的温室气体之一, 它与气温变化存在正反馈机制, 水汽增加会加剧温室效应, 导致气温升高, 进而使蒸发

中文引用格式: 苏涛, 封国林. 2015. 基于不同再分析资料的全球蒸发量时空变化特征分析. 中国科学: 地球科学, 45: 351–365
英文引用格式: Su T, Feng G L. 2015. Spatial-temporal variation characteristics of global evaporation revealed by eight reanalyses. Science China: Earth Sciences, 58: 255−269, doi: 10.1007/s11430-014-4947-8

进入大气的水汽相应增加(黄建平等, 2010). 事实上, 中国地区降水需要的水汽也源于全球各地的蒸发, 相关研究表明印度洋、南海、西北太平洋、越赤道气流和北半球西风带等的水汽输送都会对中国降水产生一定的影响(张庆云等, 2003; 廉毅等, 2001; 范可和王会军, 2006). 可见, 蒸发在全球水汽与能量收支平衡及气候变化中都具有举足轻重的作用, 因此对于全球蒸发量变化的研究具有重要的意义.

目前, 对于蒸发量的计算有很多方法, 其中最直接的方法是器测法, 即利用蒸发皿、陆地蒸发器等手段直接测定蒸发量; 而在缺乏实测资料的情况下, 也可以通过间接方式估算蒸发量, 其中经验公式是应用较为广泛的方法, 如彭曼公式(Penman, 1948)、Kuzmin公式(Kuzmin, 1957)等, 但由于各个地区的下垫面条件、水汽含量等均存在很大的差异, 计算蒸发的时空条件决定了所需气象数据的特性, 因此又出现了很多适用于不同地区的衍生公式(Monteith, 1981; 申双和和盛琼, 2008; Summer和Jennifer, 2005). 另外, 如果假定在一定时间尺度上大气中的可降水量近似保持不变, 也可根据各个地区水汽收支情况利用水汽平衡方程估算蒸发量的大小(伊兰和陶诗言, 1996; 张文君等, 2007). 以上方法各有长处, 但同时也均存在一定的局限性, 如器测法易受观测环境以及观测仪器等的限制, 并且目前还缺少蒸发量的全球观测系统, 而实际蒸发量与蒸发皿蒸发量的变化并不一致, 蒸发皿蒸发量与陆面蒸发有联系, 也有区别(郭军和任国玉, 2005), 二者在某些地区甚至会呈现出负相关关系(谢平等, 2009); 利用彭曼公式等经验方法则需要考虑各个地区的物理条件, 因此很难将其用于研究全球蒸发量的变化; 通过水汽平衡方程估算蒸发量, 虽然保证了水汽守恒, 遵循物理规律, 但蒸发的估算结果不确定性很大(张文君等, 2007). 由于存在以上多种困难, 现今很多学者都是仅针对某一局部地区的蒸发量进行研究(左洪超等, 2005), 缺少对于全球蒸发量时空变化特征的系统分析.

近些年来, 利用资料同化技术再分析过去的气象观测资料, 重建高时空分辨率的格点历史气候数据集取得了长足发展(赵天保等, 2010), 许多再分析资料都构建了全球范围的蒸发量数据, 这些数据分辨率较高、时间长度较长, 同时也满足水汽与能量收支平衡, 但是再分析资料必然包含有数值模式、同化方案和观测系统变更等所引入的误差, 因此本文将基于目前使用比较广泛的八套再分析资料的蒸发数据, 研究各套资料全球蒸发量的时空分布, 同时探讨它们的异同点, 进而诊断各套资料的质量与可信度, 并最终提取出全球蒸发量时空变化的主要特征, 这不仅对使用再分析资料进一步开展关于蒸发的天气学和气候学研究有重要的促进意义, 同时也为再分析资料的改进提供了科学的参考依据.

1 资料与方法

1.1 全球大气再分析资料发展简介

美国、英国、欧盟等自20世纪90年代中期先后组织和实施了一系列全球大气资料再分析计划及其后续升级计划(赵天保等, 2010; 朱彦良等, 2012). NCEP/NCAR(简称NCEP-R1)与NCEP/DOE(简称NCEP-R2)分别是美国国家环境预测中心(NCEP, National Centers for Environmental Prediction)与美国大气研究中心(NCAR, National Center for Atmospheric Research)、美国能源部(DOE, Department of Energy)的全球大气再分析资料研究计划, 其中NCEP-R1是最早发展的全球再分析资料, 它利用NCEP业务预报中尺度全球谱模式GSM, 采用三维变分同化技术(3D-VAR)将全球无线电测风资料、综合海洋(COADS)资料、飞机观测资料、陆面天气观测资料、卫星探测资料和SSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)资料等进行同化, 得到了1948年至今的数据产品(Kalnay等, 1996). NCEP-R2被看作是NCEP-R1再分析资料计划的延续, 它采用改进的预报模式和同化系统, 修正了NCEP-R1再分析资料中的一些误差(Roads, 2003; Trenberth等, 2011), 并提供了1979年至今的数据产品.

ERA-40再分析资料是欧洲中期天气预报中心(ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)使用ECMWF集成预报系统, 将地面、高空常规观测数据以及卫星遥感数据结合在一起建立的数值产品, 采用的也是三维变分同化技术(3D-VAR). ERA-Interim(简称Interim)再分析系统是ECMWF连接ERA-40再分析资料同化系统与下一代系统的纽带(Uppala等, 2005), 它的一个关键目标是解决ERA-40再分析系统同化卫星资料时存在的一些问题, 为ECMWF发展下一代数值产品同化系统奠定基础. Interim资料采用四维变分同化技术(4D-VAR), 利用一个以12-h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. Interim与ERA-40资料相比在很多方面都有一定的提高, 如水文循环更加合理、平流层环流在时间与空间上都有了更好的一致性等(Dee等, 2011).

由于前几代再分析资料中的水文数据在很多方面逐渐不能充分地满足水文循环的天气学与气候学研究, NASA全球模式与同化办公室(GMAO)开发了新一代数值产品MERRA(Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications), 它有两大主要目标: 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资料. MERRA使用GEOS-5(Goddard Earth Observing System)大气模式与资料同化系统, 资料同化应用的是NCEP发展的以6-h为周期的格点统计插值系统(GSI), 观测资料在进行同化之前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(Rienecker等, 2011; Bosilovich等, 2011). CFSR(Climate Forecast System Reanalysis)再分析资料与MERRA使用了几乎一样的原始数据, 但是CFSR资料使用的是NCEP耦合预报模型, 它同样地利用GSI数据同化系统得到大气同化资料, 数据广泛利用了NCEP/NCAR再分析资料(Saha等, 2010), CFSv2(Climate Forecast System Version 2)是CFSR资料进一步的延续产品(Yuan等, 2013).

OAFlux(Objectively Analyzed air-sea Fluxes)再分析资料将NCEP/NCAR, NCEP/DOE和ERA-40等再分析资料以及卫星观测数据结合在一起, 使用COARE 3.0总体通量算法得到最佳估计变量, 构建了全球海洋的潜热、感热通量以及蒸发量等数据(Yu等, 2008), 后来的研究表明它与浮标观测到的蒸发量有很好的一致性, 具有比较高的可信度(Trenberth等, 2011). HOAPS(HAMBURG OCEAN ATMOSPHERE PArameters and Fluxes from Satellite Data)再分析资料是在SSM/I数据的基础上进一步发展得到的数值产品, 除海温资料使用(RSMAS/NODC) Pathfinder资料外, 其余均源自全球无冰海洋的SSM/I卫星观测数据(Andersson等, 2011).

再分析资料的内容丰富、资料时间长、分辨率高, 并汇总了非常广泛的观测资料(徐影等, 2001), 使用再分析资料可以在全球范围内研究气候的变化特征, 但是由于再分析资料同化所使用的观测资料的起始年代并不一致, 而且空间分布也很不均匀(表1), 特别是卫星遥感资料大多起始于1979年以后, 这会对再分析资料时间上的连续性造成一定的影响, 如ERA-40资料在同化过程中, 1979年之后的数据加入了卫星观测资料, 造成赤道附近地区海洋表面的水汽含量同化结果偏大, 导致全球的降水量与蒸发量不能保持平衡, 降水量要大于蒸发量(Hagemann等, 2005). 所以本文利用再分析资料研究全球蒸发量的变化特征时, 为了得到更加准确的结果, 还对比分析了各套资料蒸发量时空变化的异同点, 探讨各套资料在不同时段、不同地区的适用性.

1.2 利用潜热通量计算蒸发量

在上述各套再分析资料中, MERRA, Interim, ERA-40, OAFlux和HOAPS等资料提供了直接的蒸发量数据, 其中MERRA, Interim, ERA-40还包括冰、雪等固态水产生的蒸发量, 但是NCEP-R1, NCEP-R2和CFSR等资料并没有直接的蒸发数据, 需要根据潜热通量间接求出蒸发量. 当水汽发生相变时, 它需要释放或吸收能量, 其中蒸发过程中吸收(或释放)的潜热被称为蒸发潜热L_e, 它会随温度变化(Jacobson等,

表 1 各套再分析资料的概况

再分析资料	数据范围	水平分辨率	时间长度	数据频次
MERRA	全球	2°/3°×1°/2°	1979~2011年	1小时, 天, 月
CFSR	全球	2.5°×2.5°	1979~2010年	1小时, 6小时, 月
Interim	全球	1.5°×1.5°	1979~2011年	6小时, 月
ERA-40	全球	2.5°×2.5°	1958~2002年	6小时, 月
NCEP-R1	全球	T62	1948~2011年	6小时, 天
NCEP-R2	全球	T62	1979~2011年	6小时, 天
OAFlux	海洋	1.0°×1.0°	1958~2011年	月
HOAPS	海洋	0.5°×0.5°	1987~2005年	月

2007). 潜热通量λE是指水汽蒸发时产生的潜热释放, 一般情况下, 可以通过(1)式利用潜热通量计算出蒸发量E(Jacobson, 2007; Lorenz和Kunstmann, 2012),

$$E=\frac{\lambda E}{L_{\mathrm{e}}}, \tag{1}$$

利用该方法计算蒸发量时, 还应同时考虑冰、雪等固态水升华产生的蒸发量, 则(1)式可进一步写为

$$E=\frac{\lambda E}{L_{\mathrm{e}}}+\frac{\lambda S}{L_{\mathrm{s}}}, \tag{2}$$

式中, λS表示升华, L_{s}是升华潜热. 本文所使用的潜热通量与升华量以及地表温度、海温等数据, 均是NCEP-R1, NCEP-R2和CFSR再分析资料中的日平均数据, 然后根据(2)式计算出上述资料所对应的日平均蒸发量.

1.3 研究与处理方法

如表1所示, 各套资料的空间分辨率并不完全一致, 文中不同分辨率的资料进行对比分析时采用了双线性插值方法将它们统一成相同的格点形式, 双线性插值是有两个变量的插值函数的线性插值扩展, 其核心思想是在两个方向分别进行1次线性插值, 插值结果能够较好地保持原始场的连续性. 为了比较各套再分析资料蒸发量大小的差异, 计算了各套资料之间的平均绝对差MAD与偏差MD, 方法如下(朱彦良等, 2012):

$$\mathrm{MAD}=\left[\sum_{i=1}^{n}\left|x_i-y_i\right|\right]\Big/n, \tag{3}$$

$$\mathrm{MD}=\left[\sum_{i=1}^{n}x_i-y_i\right]\Big/n, \tag{4}$$

式中, x, y代表不同再分析资料的蒸发量, i是格点编号.

气候趋势系数可以定量地刻画气象要素的年代际变化, 并可以使用通常的相关系数统计检验方法或蒙特卡罗方法检验气候趋势是否显著(施能等, 2003), 类似地也可以计算气象要素的气候倾向率, 它能够表示出气象要素每十年的变化率(申双和和盛琼, 2008), 本文分别用它们研究了全球蒸发量的气候变化趋势. 相关系数是用以反映变量之间相关关系密切程度的统计指标, 可以确定各套资料蒸发量逐年变化的相关性. 此外, 还利用最小二乘法线性拟合和相似系数分析了各套资料蒸发量空间分布的相似程度(施能, 2009).

2 全球蒸发量的空间分布特征

本节首先计算了各套资料日平均蒸发量的气候平均值(气候态选取为1981~2010年), 然后对各套资料蒸发量的空间分布特征进行了分析, 并探讨了各套资料蒸发量的空间相似性, 最后进一步给出了各套资料全球平均蒸发量(简称$\mathrm{E_G}$)、陆地平均蒸发量(简称$\mathrm{E_L}$)、海洋平均蒸发量(简称$\mathrm{E_O}$)与平均态的平均绝对差和偏差.

2.1 全球蒸发量空间分布的主要特征

图1给出了各套资料日平均蒸发量的空间分布, 可见各套资料的空间分布型基本一致, 具有以下四个主要特征: 一是蒸发量海陆差异明显, 海洋蒸发量要远大于陆地蒸发量, 大部分海洋蒸发量均达到3~7 mm $\mathrm{d^{-1}}$, 而陆地蒸发量则基本都在1~3 mm $\mathrm{d^{-1}}$左右, 二者约相差2~3倍. 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水的蒸发现象, 它与水面蒸发相比较, 不仅蒸发面的性质不同, 更重要的是供水条件的差异, 这也是海、陆蒸发量差别较大的主要原因; 在无冰海洋上, 供水是充足的, 此时影响海洋蒸发量的气象因素主要是饱和水汽压差、空气饱和差、风速、温度和相对湿度等(左洪超等, 2005; 任国玉和郭军, 2006), 因此不同海域的蒸发量也存在明显差别; 二是全球蒸发量具有经向分布特征, 中低纬地区蒸发量要明显高于高纬地区, 蒸发量高值区分别位于赤道至南北纬30°左右的海洋, 这些区域日平均蒸发量一般都超过5 mm; 蒸发量低值区大多位于南北极等高纬地区, 日平均蒸发量小于0.5 mm, 这与全球能量的分布大体一致, 也说明了能量对于蒸发的重要性; 三是同纬度陆地上高海拔地区蒸发量小于低海拔地区, 如青藏高原、蒙古高原、伊朗高原、阿拉伯高原、东非高原、落基山及墨西哥高原、安第斯山脉等, 这可能是由于大气温度随海拔增高递减, 蒸发需要消耗大量能量, 高海拔区蒸发能够吸收的能量较少, 蒸发量便相对较小; 最后, 赤道地区海洋蒸发量要小于其两侧地区, 而陆地与此相反, 这也体现出下垫面条件对蒸发的重要影响.

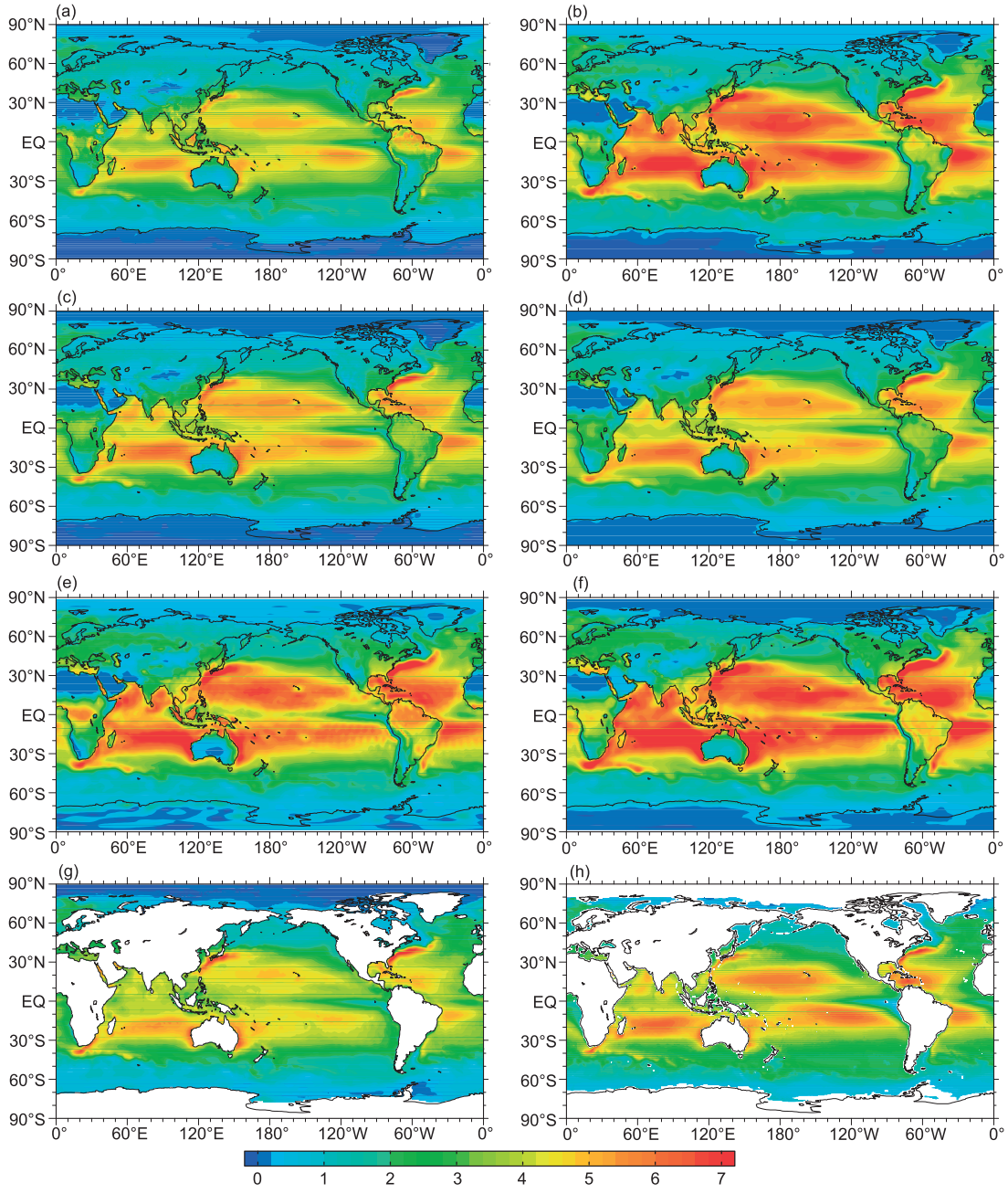

图 1　各套资料日平均蒸发量的空间分布图

(a) MERRA, (b) CFSR, (c) Interim, (d) ERA-40, (e) NCEP-R1, (f) NCEP-R2, (g) OAFlux, (h) HOAPS; 单位: mm d^{-1}

2.2　各套资料蒸发量空间分布相似性分析

为了进一步研究各套资料蒸发量空间分布上的差异, 本节首先将所有资料日平均蒸发量取平均值作为平均态(简称AVE), 然后分别计算各套资料蒸发量与AVE的差值以及在各纬圈上的相似系数(图2). 由图2(a)可见, MERRA资料蒸发量与AVE的差异主要在海洋上, 特别是赤道至南北纬30°的低纬地区, 如中国东南部海域、美国东部海域以及澳大利亚东、西两侧海域等都较AVE低1 mm d^{-1}以上, E_L与AVE差别较大的区域主要位于南美洲中南部; 它们在各纬圈上的相似系数大多都在0.9以上, 表明MERRA资

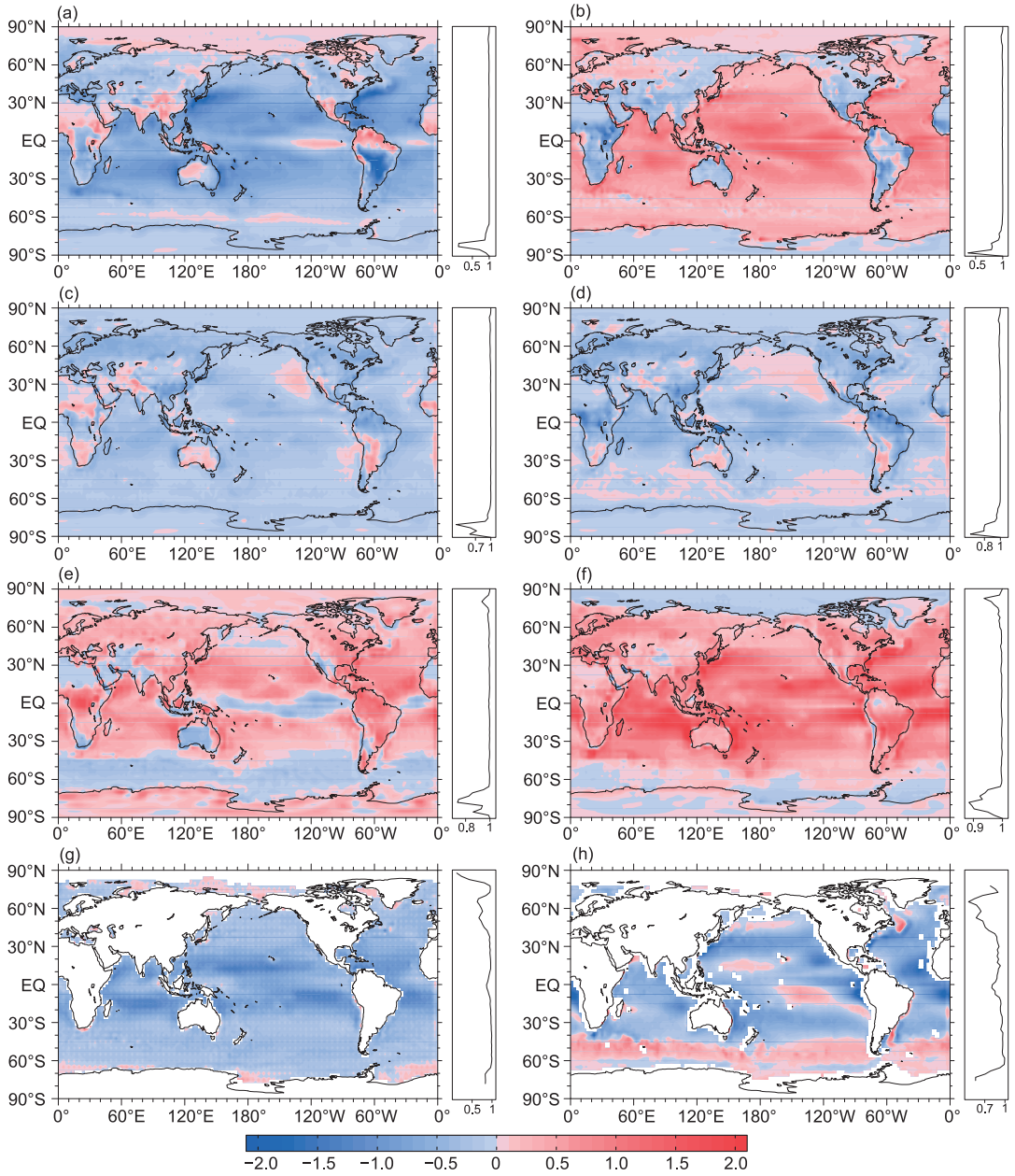

图 2　各套资料蒸发量与 AVE 的差值图

(a)~(h)同图 1, 单位: mm d^{-1}; 右侧为各纬圈上的相似系数

料蒸发量的空间分布型与AVE基本一致. CFSR资料与AVE的差别也主要在海洋上, 差别较大的区域分别位于赤道两侧的太平洋中部海域以及美国、日本和巴西东部海域, 陆地上差别较大的地区分布在索马里半岛及其以西地区. Interim资料与AVE的差别主要在陆地上, 如中国南部、北美洲与南美洲北部以及东欧平原等, E_O的差别相对较小. ERA-40与Interim资料比较相似, 只是ERA-40与AVE在刚果盆地等地区的差值较大. NCEP-R1资料与AVE相差最大的区域也主要位于刚果盆地及其附近地区, 此外, 在中国南部、美国东部、南美洲中北部以及低纬度海洋也存在较大差别. NCEP-R2资料与AVE相差较大, 特别是中低纬地区的海洋, 局部区域差值甚至达到2 mm d^{-1}以上, E_L差值相对较小, 主要分布在中国南部、南美洲中南

部等地区, 但是NCEP-R2资料与AVE在各纬圈上的相似系数基本都在0.9以上, 说明尽管它们在数值上差别较大, 但空间分布型依然基本一致. OAFlux资料E_O与AVE的差值在中低纬海洋相对较大, 而HOAPS资料E_O与AVE主要是在30°N与30°S附近的太平洋、赤道中东太平洋以及中低纬的大西洋有所不同. 整体而言, 各套资料E_G, E_L, E_O与AVE差别较大的区域主要位于南北半球低纬度海洋, 以及中国南部、北美北部、东欧平原、刚果盆地和南美洲中南部等地区.

表2进一步给出了各套资料E_G, E_L, E_O与AVE的平均绝对差(MAD)和偏差(MD). 对于E_G, Interim资料与AVE的MAD与MD均最小, 说明Interim资料的空间分布型与AVE最为接近, MAD为0.195 mm d^{-1}, 误差百分率约6%; NCEP-R2资料E_G与AVE的MAD与MD最大, MAD达到0.525 mm d^{-1}. 对于E_L, MERRA与CFSR资料与AVE的MAD与MD相对较小, MAD分别为0.225和0.206 mm d^{-1}, NCEP-R1资料与AVE的MAD与MD最大, 分别达到0.364和0.313 mm d^{-1}. Interim与ERA-40资料E_O与AVE的MAD与MD均较小, 而NCEP-R2资料E_O与AVE的MAD与MD最大.

此外, 本文还利用最小二乘法线性拟合方法分析了各套资料蒸发量空间分布型相互之间的线性关系, 如图3所示, 各套资料与其他资料蒸发量空间分布线性拟合解释方差平均值均在0.89以上, 其中最高的是Interim资料, 达到近0.96, 表明各套资料蒸发量的空间分布型均基本一致, 其中以Interim资料与其他资料的线性拟合最好, 并且它与其他资料线性拟合斜率的平均值也接近于1.0, 说明Interim资料能够在一定程度上代表其他资料全球蒸发量的空间分布形态. 另外, OAFlux与其他资料海洋蒸发量空间分布线性拟合的解释方差平均值也达到0.952, 斜率的平均值为1.15, 表明它对各套资料海洋蒸发量的空间分布形态具有较好的代表性.

3　全球蒸发量的时间变化特征

3.1　各套资料蒸发量的逐年变化

图4为各套资料逐年日平均蒸发量的时间序列. 由图4(a)可见, 各套资料E_G的时间变化形势不尽相同, 其中, MERRA资料E_G逐年差异较小, 年代际变化比较显著, E_G在1979~1998年波动上升, 1979年为2.56 mm d^{-1}, 1998年达到2.73 mm d^{-1}, 1998年之后逐渐下降, 至2011年达到最小值为2.58 mm d^{-1}. Interim与MERRA资料E_G的变化形势比较接近. 而CFSR资料E_G年际变化幅度较大, 年代际变化不明显. NCEP-R1资料E_G也具有显著的年代际变化特征, 1948~1961年波动上升, 1963~1979年逐渐下降, 1980年以后又缓慢回升. ERA-40与NCEP-R1资料E_G在1979年之前的变化形势基本一致, 但1979年之后与CFSR资料更为接近. NCEP-R2资料E_G则整体呈现出显著的上升趋势. 整体而言, MERRA, Interim, NCEP-R1和NCEP-R2资料E_G的年际变化比较一致, 而CFSR与ERA-40资料更为接近.

图4(b)是各套资料逐年E_L的时间序列, MERRA资料E_L大致在1.7 mm d^{-1}左右波动变化, CFSR与NRCP-R2资料E_L的变化形势也与之相似, 但变化幅度相对更大. Interim资料E_L逐年差异较小, 各年份均接近于1.5 mm d^{-1}. ERA-40资料E_L年代际变化比较显著, 整体呈上升趋势. NCEP-R1资料E_L也具有显著的年代际变化特征, 1948~1970年先增大后减小,

表 2　各套资料 E_G, E_L, E_O 与平均值(AVE)的对比(单位: mm d^{-1})

	E_G		E_L		E_O	
	MAD	MD	MAD	MD	MAD	MD
MERRA	0.362	–0.308	0.225	–0.107	0.432	–0.410
CFSR	0.408	0.293	0.206	–0.115	0.511	0.502
Interim	0.195	–0.166	0.245	–0.187	0.170	–0.155
ERA-40	0.197	–0.168	0.267	–0.239	0.162	–0.132
NCEP-R1	0.323	0.236	0.364	0.313	0.302	0.198
NCEP-R2	0.525	0.486	0.347	0.332	0.616	0.565
OAFlux					0.405	–0.374
HOAPS					0.431	–0.261

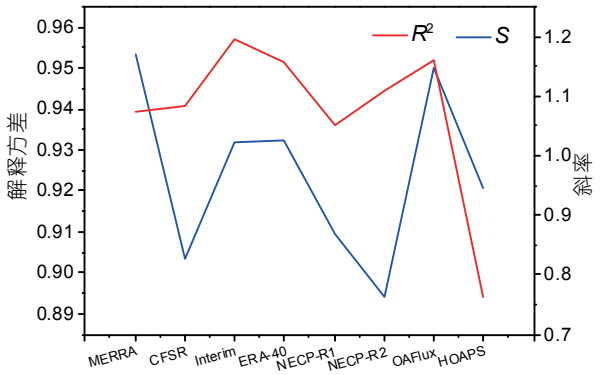

图 3　各套资料与其他资料蒸发量空间分布线性拟合解释方差(R^2)与斜率(S)的平均值

1971~1990年波动上升, 1991年之后又逐渐减小.

由图4(c)可见, MERRA资料E_O的逐年变化较小, 年代际变化特征比较显著, 最小值是1979年, 为2.95 mm d^{-1}, 1998年蒸发量最大, 达到3.21 mm d^{-1}, 整体呈现先上升后下降的变化形势, Interim, NCEP-R1, NCEP-R2和OAFlux等资料均与之比较接近, 说明各套资料E_O的时间变化特征具有较高的一致性. ERA-40与NCEP-R1资料E_O在1979年之前均缓慢减小, 但它们在1979年之后出现了显著的差异, 其中NCEP-R1资料E_O呈现明显的上升趋势, 而ERA-40资料与之相反. HOAPS资料E_O在1987~1990年基本保持不变, 但在1991年突然减小, 随后又显著回升.

图4中黑色虚线是各套资料蒸发量的逐年平均值(AVE), 表3分别给出了各套资料与它的相关系数, 由此可见, MERRA与NCEP-R2资料E_G, E_L, E_O的变化形势与AVE最为一致, 相关系数均在0.75以上, 通过0.01信度的检验. CFSR资料E_L的年际变化与AVE也比较接近, 相关系数达到0.810, 但是其E_G和E_O的变化形势与AVE存在一定的差别. 而Interim, NCEP-R1资料E_G和E_O的年际变化与AVE非常一致, 相关系数通过0.01信度的检验, 但E_L差别较大. ERA-40资料E_G, E_L, E_O与AVE整体上都是一致的, 但相关程度均不高. HOAPS与OAFlux资料E_O与AVE的相关系数分别为0.939和0.716, 均通过0.01信度的检验, 说明它们也能够在一定程度上反映出E_O的时间变化特征.

本文还分别计算了各套资料E_G, E_L, E_O逐年变化的相关系数, 相关性分析表明MERRA, Interim,

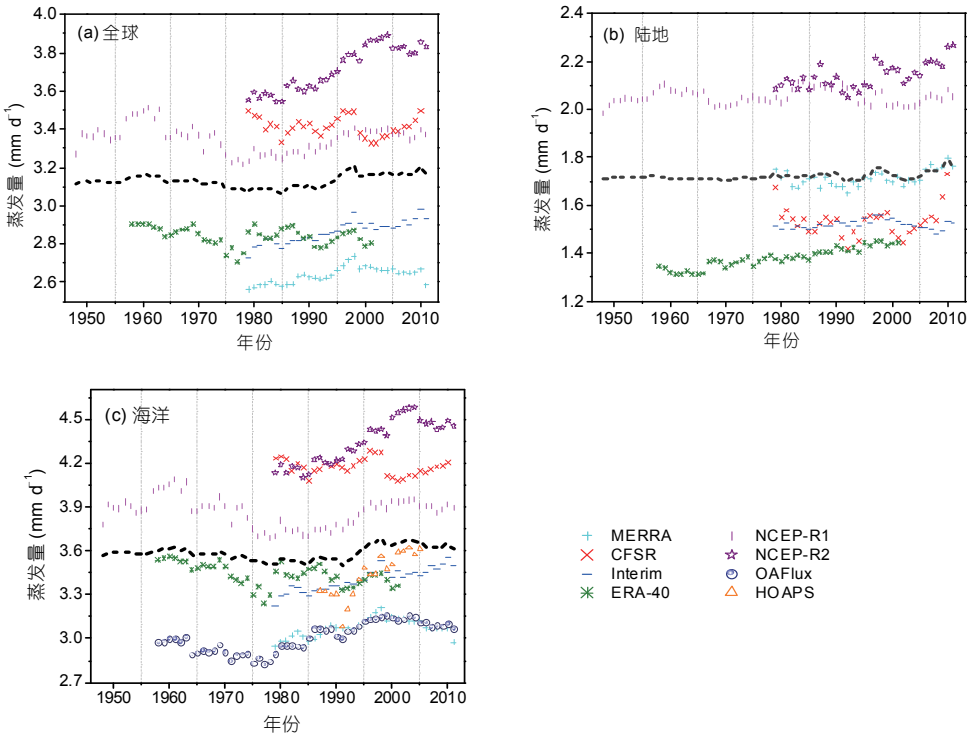

图 4　各套资料逐年 E_G(a), E_L(b)和 E_O(c)的时间序列

黑色虚线是各套资料的平均值

表 3　各套资料 E_G, E_L, E_O 分别与平均值(AVE)逐年变化的相关系数(ρ_G, ρ_L, ρ_O)[a)]

再分析资料	ρ_G	ρ_L	ρ_O
MERRA	0.835	0.785	0.753
CFSR	0.158	0.810	–0.004
Interim	0.927	0.351*	0.851
ERA_40	0.409	0.562	0.330*
NCEP_R1	0.773	0.230	0.765
NCEP_R2	0.919	0.813	0.931
HOAPS			0.939
OAFlux			0.716

a) 下画线表示通过0.01信度的检验, *表示通过0.05信度的检验

NCEP-R1和NCEP-R2等资料E_G逐年变化均比较一致, 而CFSR与ERA-40资料更为接近. 此外, MERRA, CFSR和NCEP-R2等资料E_L的逐年变化较为相似, Interim, ERA-40和NCEP-R1等资料与它们差别较大. 各套资料E_O的逐年变化具有较高的一致性, MERRA, Interim, NCEP-R1, NCEP-R2, OAFlux, HOAPS和ERA-40等资料都比较接近.

3.2　各套资料日平均蒸发量平均值及其标准差的对比

表4给出了各套资料E_G, E_L, E_O的气候平均值(μ)及其逐年变化的标准差(σ), 可见各套资料E_G由大到小的排序为: NECR-R2, CFSR, NCEP-R1, Interim, ERA-40和MERRA, 其中标准差最大的是NCEP-R2资料, 为0.12 mm d^{-1}, 标准差最小的是MERRA资料, 仅为0.04 mm d^{-1}, 表明各套资料E_G逐年变化的幅度均比较小. 各套资料E_L由大到小的排序为: NECR-R2, NCEP-R1, MERRA, CFSR, Interim和ERA-40, 其中CFSR资料的标准差最大, 为0.06 mm d^{-1}, 最小的是Interim, 仅为0.02 mm d^{-1}. E_O由大到小的排序为: NECR-R2, CFSR, NCEP-R1, ERA-40, HOAPS, Interim, MERRA和OAFlux, 标准差较大的是NCEP-R2和HOAPS资料, 最小的是MERRA和CFSR资料. 另外, 值得注意的是, 各套资料E_G, E_L, E_O的大小排序并不一致, 如MERRA资料E_G最小, 但是其E_L却相对较大; 各套资料海洋蒸发量与全球总蒸发量百分比分别为: 80.8%, 86.8%, 84.8%, 86.1%, 82.4%和83.6%, 平均约为84.1%, 说明海洋是全球大气中水汽最重要的源. 综上可知, 各套再分析资料蒸发量平均值存在一定的差别, 逐年变化的标准差也有所不同, 其中, NCEP-R2资料蒸发量明显大于其他资料, 这主要是由于NCEP-R2资料潜热通量数据相对较高(Betts等, 2006), 造成蒸发量的估算结果偏大, 也说明再分析资料的质量仍然需要进一步提高, 并且有必要对现有再分析资料的系统误差进行订正.

表 4　各套资料 E_G, E_L, E_O 平均值(μ)及其标准差(σ) (单位: mm d^{-1})

再分析资料	E_G		E_L		E_O	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
MERRA	2.64	0.04	1.71	0.03	3.07	0.06
CFSR	3.41	0.05	1.53	0.06	4.17	0.06
Interim	2.86	0.06	1.52	0.02	3.40	0.08
ERA-40	2.85	0.05	1.38	0.04	3.44	0.08
NCEP-R1	3.35	0.07	2.05	0.03	3.87	0.10
NCEP-R2	3.72	0.12	2.14	0.05	4.34	0.15
OAFlux					3.01	0.10
HOAPS					3.43	0.15
AVE	3.13	0.033	1.722	0.018	3.585	0.047

3.3　全球蒸发量的在不同年代的线性变化趋势

本文使用的8套再分析资料时间长度并不一致(表1), 其中MERRA, CFSR, Interim, NCEP-R2和HOAPS等资料的起始年份均是在1979年或以后, ERA-40和OAFlux资料的起始年份为1958年, 因此考虑到各套资料的起始时间, 本文分别计算了1958~1978和1979~2011年两个时间段内E_G, E_L, E_O的线性变化趋势(表5). 如表5所示, 各套资料E_G, E_L和E_O在1958~1978年时间段内都具有非常显著的线性减少趋势, 均通过0.01信度的检验, 其中E_O的减小趋势要略高于E_L. 对于1979~2011年时间段内, MERRA, NCEP-R2, Interim, NCEP-R1资料E_G和E_O都是显著线性增加的; 其中, MERRA和NCEP-R2资料E_L也呈现显著的线性增加趋势, 但Interim资料E_L线性增加趋势不显著, NCEP-R1资料则具有显著的线性减少趋势; ERA-40资料与其他资料明显不同, E_G, E_O均线性减少, 而E_L显著线性增加, 趋势系数为0.930; CFSR资料E_G, E_L, E_O的线性变化趋势均不显著. 综上可知, 各套资料蒸发量在1958~1978年均呈现显著的线性减少趋势, 而在1979~2011年时间段内大多都是显著线性增加的.

3.4　近 33 年全球蒸发量线性变化的空间分布

上一节的结果表明, 各套资料蒸发量在1979~

表 5　各套资料 E_G, E_L, E_O 与 AVE 在不同年代的气候趋势系数 [a)]

再分析资料	E_G	E_L	E_O
1958~1978年			
ERA-40	–0.863	0.755	–0.891
NCEP-R1	–0.898	–0.708	–0.881
OAFlux			–0.863
AVE	–0.916	–0.008	–0.907
1979~2011年			
MERRA	0.627	0.458	0.515
CFSR	–0.158	0.073	–0.235
Interim	0.888	0.101	0.904
ERA-40	–0.425*	0.930	–0.577
NCEP-R1	0.857	–0.456	0.837
NCEP-R2	0.917	0.660	0.898
OAFlux			0.757
HOAPS			0.852
AVE	0.848	0.379*	0.804

a) 下画线表示通过0.01信度的检验, *表示通过0.05信度的检验

2011年时间段内大多都是线性增加的, 因此本节就分析一下各套资料蒸发量在近33年内线性变化趋势的空间分布特征. 如图5(a)所示, 近33年MERRA资料E_L变化较大的地区主要位于中国西北部与长江中下游地区、贝加尔湖及其以东地区、欧洲中部、东非高原、刚果盆地、南非高原、南美洲中南部以及澳大利亚北部等, 其中除贝加尔湖及其以东地区、欧洲中部、刚果盆地等地是线性减少外, 其余地区均线性增加, E_O也主要呈现线性增加趋势, 如地中海、南半球低纬度太平洋中部海域、北大西洋中部海域等, 增加幅度都在0.2 mm d^{-1} $decade^{-1}$以上. CFSR资料E_O变化幅度也比较大(图5(b)), 其中赤道与30°S附近的太平洋中部海域、秘鲁西部海域、北大西洋中部海域、阿拉伯海、地中海以及巴西东部海域等地的气候倾向率都在0.2 mm d^{-1} $decade^{-1}$以上, 局部区域甚至超过0.4 mm d^{-1} $decade^{-1}$, 此外, 长江中下游地区、贝加尔湖附近地区的线性变化趋势也比较显著, 这些均与MERRA资料比较相似. Interim资料E_O的线性增加趋势更加明显(图5(c)), 地中海、赤道附近的太平洋、印度洋以及大西洋局部海域气候倾向率都超过了0.2 mm d^{-1} $decade^{-1}$, E_L变化较大的地区主要在60°N附近的欧亚大陆、刚果盆地、美国中西部以及中国西南与长江中下游地区. 由图5(d)可知, ERA-40资料蒸发量变化较大的区域相对较少, 其中赤道附近太平洋中部海域、大西洋中部海域具有显著的线性减少趋势, 赤道附近的印度洋线性增加, 此外, 欧洲西部、刚果盆地、贝加尔湖及其以北地区的蒸发量也有所增加. NCEP-R1资料E_O线性增加较大的区域主要集中在中低纬地区的广大洋面上(图5(e)), E_L变化幅度较大的地区位于亚马逊河流域, 呈现显著的线性减少趋势. NCEP-R2资料蒸发量在很多地区都是线性增加的(图5(f)), 海洋上的分布形势与上述几套资料比较接近, 另外北美洲东北部、南非、中南半岛等地区也具有显著的线性增加趋势, 贝加尔湖及其南部地区、巴西高原、南美洲南部、东非高原等地区则是线性减少. OAFlux资料E_O线性变化趋势(图5(g))显著的区域主要分布在中国东南部海域、地中海、夏威夷群岛附近海域以及赤道附近的印度洋与太平洋中部海域等. 图5(h)是HOAPS资料E_O在1987~2005年线性变化趋势的空间分布, 可以看到在很多海域都呈现显著的线性增加趋势, 尤其是南北纬30°附近的海洋, 很多海域气候倾向率都超过0.4 mm d^{-1} $decade^{-1}$.

本节的研究表明, 近33年全球蒸发量线性变化趋势比较显著的区域主要在海洋上, 如赤道至30°S的太平洋中部海域、赤道印度洋、北大西洋中部海域、地中海以及中国东南部海域等, 陆地蒸发量的变化相对较小, 变化幅度较大的地区主要分布在贝加尔湖及其附近地区、刚果盆地、亚马逊河流域以及长江中下游地区等.

4　全球蒸发量的年循环特征

由于地球有自转和绕太阳公转, 因此一年中到达地球表面各地的太阳辐射能会呈现规律性地周而复始变化, 太阳辐射能是地球水文气候的主要驱动力(刘元波, 2011), 蒸发所需要的能量最终来自于太阳辐射能, 因此非常有必要研究全球蒸发量的年循环特征.

4.1　全球各纬圈上日平均蒸发量的逐月演变

图6(a)~(f)为全球各纬圈上E_G的逐月变化, 由此可见它们的演变形势基本一致, 主要特征如下: 赤道附近的蒸发量约为4 mm d^{-1}, 逐月差异较小, 其中2~4月份最小, 然后逐渐增大, 5~9月份达到最大, 然后又逐渐减小; 北半球低纬度地区蒸发量逐月变化

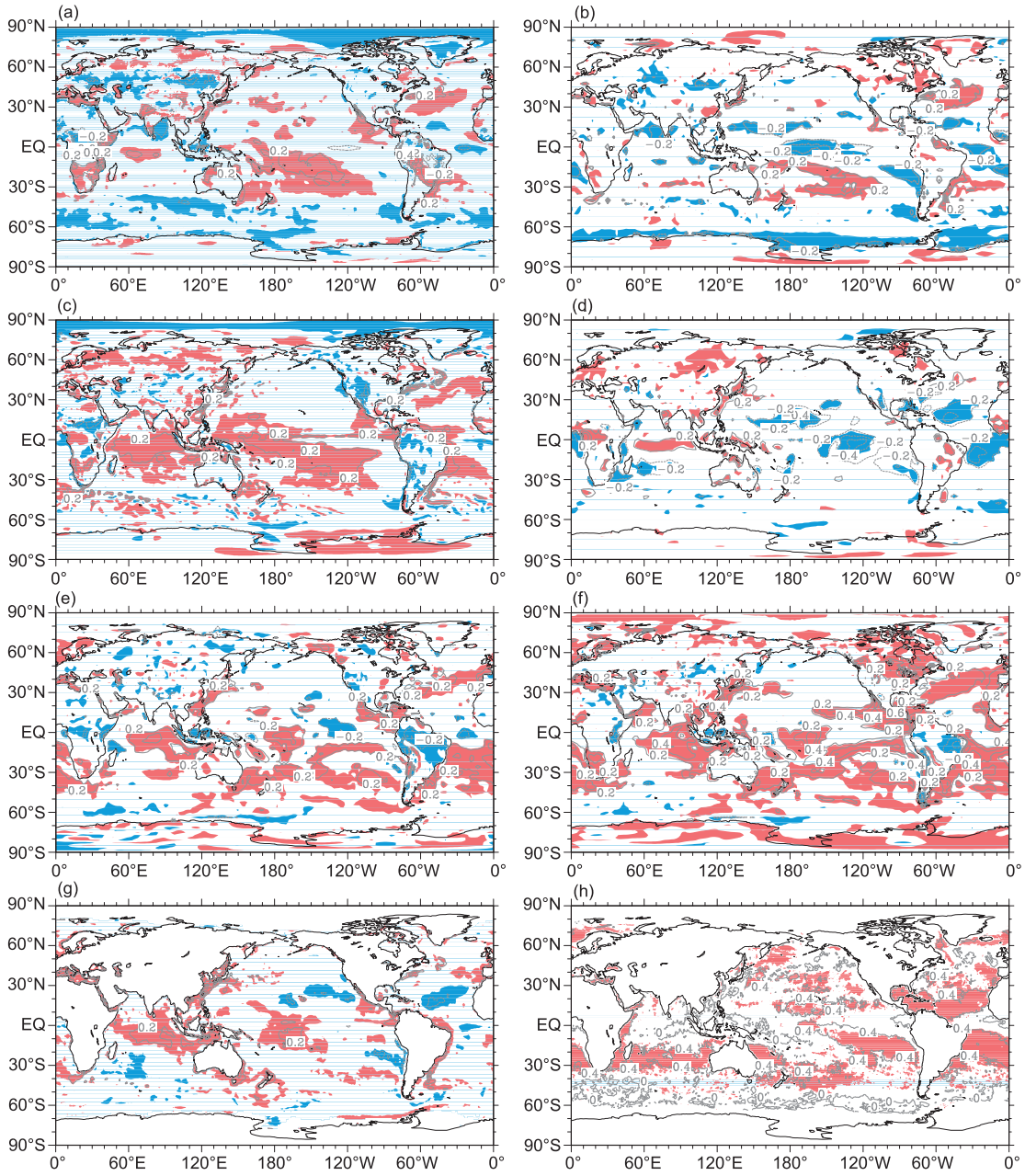

图 5　近 33 年全球蒸发量线性变化趋势的空间分布

(a)~(h)同图 1, 阴影区是气候趋势系数通过 0.01 信度检验的区域, 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: mm d^{-1} $decade^{-1}$

比较显著, 11~2月份相对较大, 各套资料均在5 mm d^{-1}左右, 然后逐渐减小, 3~4月份约为4 mm d^{-1}, 5月份之后慢慢回升, 8月份之后又有所减小. 南半球低纬度地区蒸发量的逐月变化较小, 1~6月份逐渐增大, 7~8月份达到5 mm d^{-1}左右, CFSR, NCEP-R2资料有些地区甚至超过6 mm d^{-1}, 8~12月又逐渐减小. 北半球中纬度地区蒸发量的逐月变化形势与南半球低纬度地区比较接近, 也在6~8月份达到最大, 其余月份相对较小. 南半球中纬度地区蒸发量的逐月变化较小, 约在5~7月份达到最大值, 其余月份变化幅度不大. 南北半球高纬度地区蒸发量均较小, 逐月变化不明显, 北半球高纬度地区蒸发量约在6月份左右

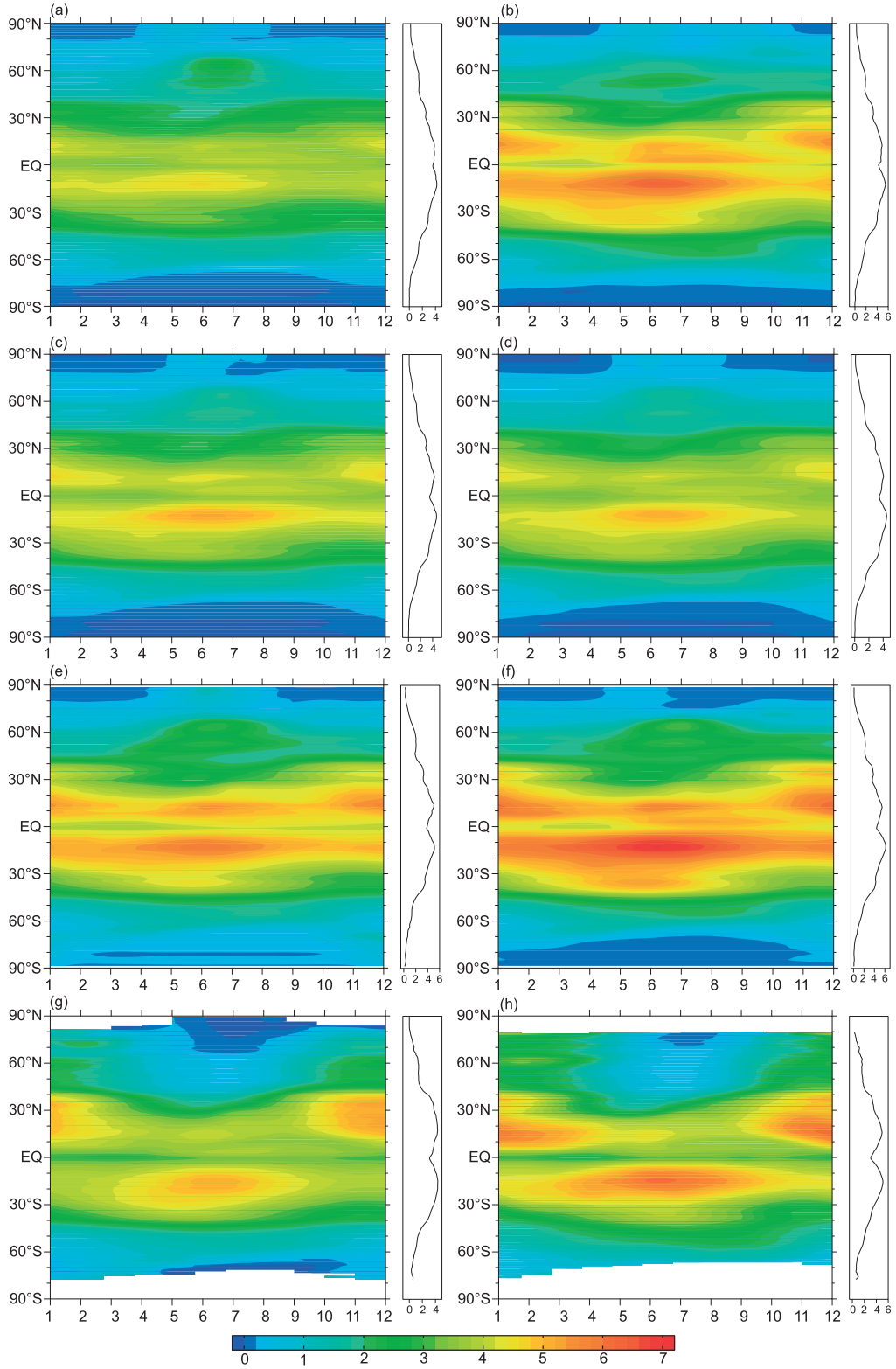

图 6　各套资料日平均蒸发量的时间-纬度剖面图

(a)~(h)同图 1，单位: mm d^{-1}

达到最大值, 南半球则是在12月份左右. 图6(g)和(h)是各纬圈上E_O的逐月变化, E_O的逐月变化形势与E_G(图6(a)~(f))大致保持一致, 主要差异体现在北半球中纬度地区, 该区域E_O在11~2月份相对较大, 而5~9月份较小. 由此可知, 全球各纬圈平均蒸发量的逐月变化均比较明显, 尤其是在北半球低纬度地区, 并且各套资料的演变形势基本保持一致.

4.2　全球日平均蒸发量的逐月变化

图7给出了各套资料E_G, E_L, E_O的逐月变化, 由图7(a)可见, E_G在1~3月份逐渐减小, 4~6月份逐渐增大, 约在6, 7月份达到最大, 7~10月份又逐渐减小, 10~12月份又慢慢增大. E_L逐月变化幅度较大(图7(b)), 但各套资料的变化形势比较接近, 均呈现倒"V"型分布, 1~6月逐渐增大, 至6, 7月份达到最大值, 8~12月份又逐渐减小. 各套资料E_O(图7(c))的逐月变化整体上也是一致的, 基本都呈现"W"型分布, 其中CFSR, Interim, NCEP-R1, NCEP-R2与OAFlux等资料在1, 6, 12月份分别形成3个波峰, 4和9月份分别是2个波谷, 峰、谷期E_O约相差0.2 mm d^{-1}; ERA-40与HOAPS资料各月E_O的变化虽然也呈现"W"型分布, 但6, 7月份要略高于1, 12月份. 由此可知, 各套资料E_G, E_L, E_O均具有显著的年循环特征, 而且E_L的变化幅度要高于E_O.

5　讨论与总结

蒸发过程要涉及大量的因子, 地表很多物质通量都会对其产生影响, 全球地形错综复杂、气候与植被条件多种, 因此各地区的蒸发量差异较大, 变化形势也不尽相同. 本文利用目前使用较广的八套再分析资料, 研究了全球蒸发量的时空分布特征, 并对比分析了各套资料的异同点, 然后进一步探讨了全球蒸发量的年循环特征, 主要结论如下:

(1) 各套资料全球蒸发量的空间分布型基本一致, 呈现出明显的海陆、纬向差异, 海洋蒸发量远大于陆地蒸发量, 相差2~3倍; 并且同纬度陆地上高海拔地区蒸发量低于低海拔地区, 赤道地区海洋蒸发量要小于其两侧地区, 而陆地则与此相反. 各套资料蒸发量差别较大的区域主要位于南北半球低纬度海洋, 以及中国南部、北美北部、东欧平原、刚果盆地

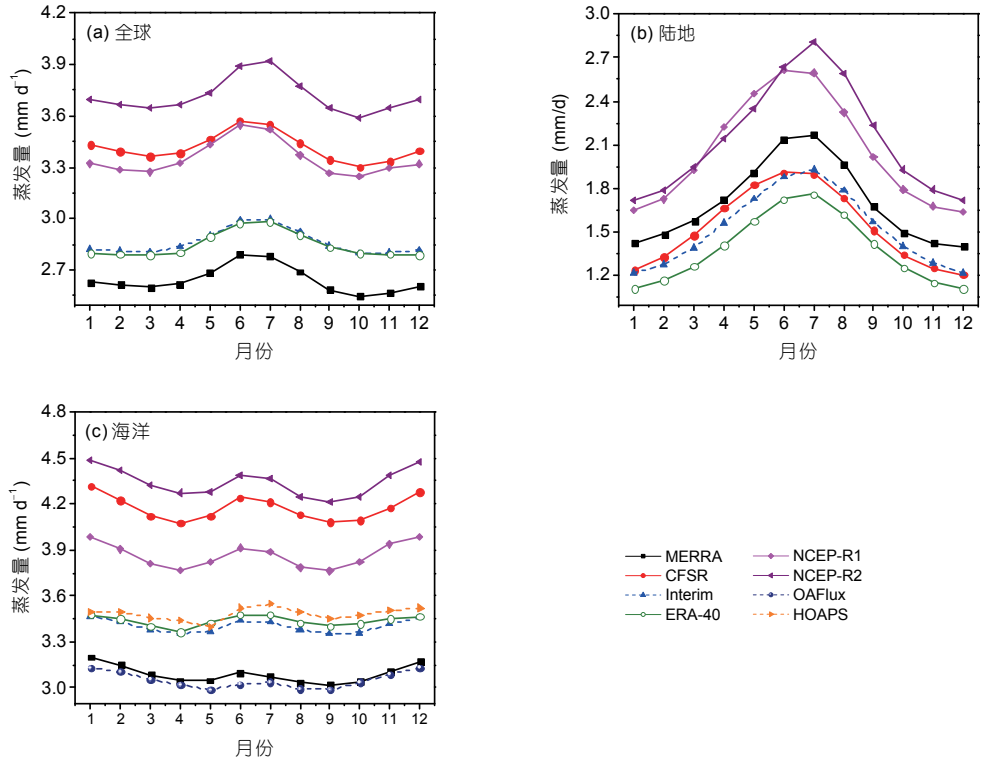

图 7　各套资料 E_G(a), E_L(b)和 E_O(c)的逐月变化

和南美洲中南部等陆地地区.

(2) 对于全球平均蒸发量, MERRA, Interim, NCEP-R1和NCEP-R2等资料的逐年变化均比较一致, 而CFSR与ERA-40资料更为接近. 另外, MERRA, CFSR和NCEP-R2等资料陆地蒸发量的变化形势也比较相似, Interim, ERA-40和NCEP-R1等资料与它们差别较大. 各套资料海洋蒸发量的变化形势具有较高的一致性, MERRA, Interim, NCEP-R1, NCEP-R2, OAFlux, HOAPS以及ERA-40等资料都比较接近, 说明再分析资料对海洋蒸发量的时间演变特征再现能力更强.

(3) 本文综合分析各套再分析资料蒸发量数据, 提取出了全球蒸发量的时空变化特征, 整体而言, MERRA与NCEP-R2资料能够同时较好地反映出全球蒸发量的主要特征, 具有较好的代表性, CFSR与ERA-40资料可以较好地刻画出陆地蒸发量的变化, 但是它们海洋蒸发量的变化形势不确定性较大. 而Interim, NCEP-R1, OAFlux和HOAPS等资料均适用于对海洋蒸发量的研究.

(4) 各套资料平均蒸发量在1958~1978年基本都呈现显著的线性减少趋势, 而在1979~2011年时间段内大多都是线性增加的, 尤其是海洋地区, 如南半球低纬度的太平洋中部海域、赤道印度洋、北大西洋中部海域、地中海以及中国东南部海域等; 陆地蒸发量线性变化趋势比较显著的地区主要位于贝加尔湖附近、刚果盆地、亚马逊河流域、中国长江中下游等.

(5) 全球蒸发量还存在比较显著的年循环特征, 尤其是在北半球低纬度地区, 并且陆地蒸发量的逐月变化幅度要高于海洋.

各套再分析资料虽然能够在一定程度上刻画出全球蒸发量的时空变化特征, 但是也应该注意到它们之间存在的差别. 由于目前还没有全球范围的蒸发量实况观测资料, 本文也只能是对比分析目前使用较为广泛的八套再分析资料, 然后提取出全球蒸发量时空变化的主要特征, 关于这方面的工作仍然需要进一步的深入研究.

参考文献

范可, 王会军. 2006. 有关南半球大气环流与东亚气候的关系研究的若干新进展. 大气科学, 30: 402–412

郭军, 任国玉. 2005. 黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析. 水科学进展, 16: 666–672

黄建平, 何敏, 阎虹如, 等. 2010. 利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究. 大气科学, 34: 548–558

廉毅, 沈柏竹, 高枞亭, 等. 2003. 东亚夏季风在中国东北区建立的标准、日期及其主要特征分析. 气象学报, 61: 548–558

刘元波. 2011. 水文气候学——视角与应用. 北京: 高等教育出版社. 69–79

任国玉, 郭军. 2006. 中国水面蒸发量的变化. 自然资源学报, 21: 31–44

施能, 黄先香, 杨扬. 2003. 1948~2000年全球陆地年降水量场趋势变化的时、空特征. 大气科学, 27: 971–982

施能. 2009. 气象统计预报. 北京: 气象出版社. 15–34

申双和, 盛琼. 2008. 45年来中国蒸发皿蒸发量的变化特征及其成因. 气象学报, 66: 452–460

王艳军, 姜彤, 许崇育, 等. 2005. 长江流域1961~2000年蒸发量变化趋势研究. 气候变化研究进展, 1: 99–105

王会军. 2010. 东亚区域能量和水分循环对我国极端气候影响研究的一些初步进展. 地球科学进展, 25: 643–670

谢平, 陈晓宏, 王兆礼, 等. 2009. 东江流域实际蒸发量与蒸发皿蒸发量的对比分析. 地理学报, 64: 270–277

徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 2001. 美国NCEP/NCAR近50年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析. 应用气象学报, 12: 337–347

伊兰, 陶诗言. 1996. 东亚季风区地气系统的水平衡. 气候与环境研究, 1: 63–80

张文君, 周天军, 宇如聪. 2007. 中国东部水分收支的初步分析. 大气科学, 31: 329–345

张学文, 周少祥. 2010. 空中水文学初探. 北京: 气象出版社. 1–9

张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2003. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件. 大气科学, 27: 1018–1030

赵天保, 符淙斌, 柯宗建, 等. 2010. 全球大气再分析资料的研究现状与进展. 地球科学进展, 25: 242–254

左洪超, 李栋梁, 胡隐樵, 等. 2005. 近40a中国气候变化趋势及其同蒸发皿观测的蒸发量变化的关系. 科学通报, 50: 1125–1130

朱彦良, 凌超, 陈洪滨, 等. 2012. 两种再分析资料与RS92探空资料的比较分析. 气候与环境研究, 17: 381–391

Andersson A, Klepp C, Fennig K, et al. 2011. Evaluation of HOAPS-3 ocean surface freshwater flux components. J Appl Meteorol Clim, 50: 379–398

Betts A K, Zhao M, Dirmeyer P A, et al. 2006. Comparison of ERA40 and NCEP/DOE near-surface data sets with other ISLSCP-II data sets. J

Geophys Res, 111, doi: 10.1029/2006JD007174
Bosilovich M G, Robertson F R, Chen J. 2011. Global energy and water budgets in MERRA. J Clim, 24: 5721–5739
Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. Q J R Meteorol Soc, 137: 553–597
Hagemann S, Arpe K, Bengtsson L. 2005. Validation of the hydrological cycle of ERA-40. In: ECMWF ERA-40 Project Report Series, No. 24. Shinfield, Reading, UK: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
IPCC. 2001. Climate Change 2001: The scientific basis, contribution of working group I to the third assessment report of the intentional panel on Climate Change. In: Hongbton J T, ed. New York: Cambridge University Press. 193–227
Jacobson M Z. 2007. Fundamentals of Atmospheric Modeling. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press. 53–62
Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteorol Soc, 77: 437–471
Kuzmin P O. 1957. Hydrophysical investigations of land waters. Int Assoc Sci Hydrol Publ, 3: 468–478
Lorenz C, Kunstmann H. 2012. The hydrological cycle in three state-of-the-art reanalyses: Intercomparison and performance analysis. J Hydrometeorol, 13: 1397–1420
Monteith J L. 1981. Evaporation and surface temperature. Q J R Meteorol Soc, 107: 1–27
Penman H L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proc R Soc A-Math Phys Eng Sci, 193: 120–145
Rienecker M M, Suarez M J, Gelaro R, et al. 2011. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. J Clim, 24: 3624–3648
Roads J. 2003. The NCEP-NCAR, NCEP-DOE, and TRMM tropical atmosphere hydrologic cycles. J Hydrol, 4: 826–840
Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. Bull Amer Meteorol Soc, 91: 1015–1057
Summer D M, Jennifer M J. 2005. Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. J Hydrol, 308: 81–104
Trenberth K E, Fasullo J T, Mackaro J. 2011. Atmospheric moisture transports from ocean to land and global energy flows. J Clim, 24: 4907–4924
Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis. Q J R Meteorol Soc, 131: 2961–3012
Yuan X, Wood E F, Roundy J K, et al. 2013. CFSv2-Based seasonal hydroclimatic forecasts over the conterminous United States. J Clim, 26: 4828–4847
Yu L, Jin X Z, Weller R A. 2008. Multidecade global flux datasets from the objectively analyzed air-sea Fluxes (OAFlux) project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables. OAFlux Project Technical Report, OA-2008-01. 1–64