

全球能量收支预算

Kevin E. Trenberth, John T. Fasullo, Jeffrey Kiehl

周跃武,白虎志 译

(中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,
中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,甘肃 兰州 730020)

摘 要:基于新的观测和分析给出全球年平均能量收支预算,以及陆地、海洋的能量收支贡献及其时间变化。

引 言

天气和气候取决于来自太阳的辐射能量及其分布。就一个平衡的气候系统而言,向外的长波辐射(OLR)必须与吸收的太阳辐射(ASR)平衡。入射辐射能量可能被云和气溶胶散射、反射或被大气所吸收,而透过的辐射则会被地球表面吸收或反射。太阳辐射或短波辐射能量被转换成感热、潜热(包括水的各种相态)以及潜能和动能再以长波辐射形式发射出去。能量可以储藏一定的时间,也可以各种形式传输或转换,并由此产生大气中的各种天气现象和海洋潮汐运动。更进一步说,能量平衡以各种方式失衡,从而改变天气和气候。

Kiehl 和 Trenberth(1997, 简记为 KT97)通过其气候系统研究了以往全球平均能量流的估算值,并基于各种观测和模式给出了新的全球平均能量收支预算结果。他们还进行了一些辐射量计算以检验入射辐射和出辐射的光谱特性,并确定了云和温室气体在整个辐射能量流中的作用。在大气顶(TOA)处的辐射值,主要依照 1985~1989 年地球辐射预算试验(ERBE)的观测值。文中我们基于更新的观测和反演方法,更正了那些估值并讨论了仍然存在的不确定性问题。

KT97 采用最先进的长、短波光谱辐射模式分别计算晴天和多云时的辐射能。地表感热和潜热的估算基于其它的观测和分析。在 ERBE 期间我们认为 TOA 处的不平衡很小(Levitus 等人,2005)可忽略不

计,KT97 设定为 0。KT97 计算了所有各项能量,但调整了地表感热以确保地表处能量收支总体平衡。在 TOA 处,原始 ERBE 计算值的不平衡通过对地表反照率的微小改变调整为 0,但对于 ASR,地表反照率仍然具有最大的不确定性(Trenberth,1997)。另外,当 ERBE 3 个卫星之一出故障时也作了一些调整。现在的情况已经改善。

KT97 的工作正值“异常的云吸收”研究热时期。这一说法来自几方面的观测事实(Stephens 和 Tsay,1990;Cess 等人,1995;Ramanathan 等人,1995;Pilewskie 和 Walero,1995)。事实表明云吸收的短波辐射比模式(如 KT97 用的模式)计算值大很多(约为 $20 \sim 25 \text{ Wm}^{-2}$)。自那时起辐射观测和模式已有了改进(Oreopoulos 等人,2003),关键因子如水汽(Kim 和 Ramanathan,2008)的计算也有所改进。其它观测表明气溶胶的吸收在 KT97 中被低估了 $2 \sim 5 \text{ Wm}^{-2}$ (Ramanathan 等人,2001;Kim 和 Ramanathan,2008),以至于这些量在地表处消失。

最新进展表现在对卫星资料和全球网格再分析资料提供的能量收支预算的理解(即 Trenberth 等人,2001;Trenberth 和 Stepaniak2003a, b, 2004)。Trenberth 等人(2001)基于 2 个第一代大气再分析资料和几个地表通量估值对大气能量预算进行了综合估算,并对不确定性进行了讨论。大气能量预算每年都有详细报告(Trenberth 和 Stepaniak2003a, 2004),包括 ENSO 期间及其年季变率(Trenberth 等人 2002;Trenberth 和 Stepaniak2003a)。

收稿日期:2009-11-30;改回日期:2010-02-11

基金项目:国家自然科学基金(40875046)和中国气象局气候变化专项项目“西北极端干旱事件个例库及干旱指标数据集”共同资助

译者简介:周跃武(1961-),男,甘肃张掖人,助研,从事灾害性天气的野外观测和科研工作。

张等人(2004, 2006, 2007)在几项研究中利用国际卫星云气候计划(ISCCP)的云资料和改进的辐射码资料在辐射性能方面作出开拓性工作。另外, Gupta等人(1999)对地表辐射平衡预算进行了估算,其结果在 Smith等人(2002)和 Wilber等人(2006)的研究中被采用,但这些都是基于早期 ISCCP 资料。Wild等人(2006)评估了各个气候模式的太阳辐射通量后指出仍存在很大的不确定性,即使对晴天也是如此。但是,也指出许多模式在这方面已有所改进。

许多新的观测资料一直都是来自空基探测,尤其来自装在几个卫星平台上的 CERES 仪器(Wielicki等人,1996,2006)。目前几个大气能量平衡预算的新估值都基于大气再分析资料,其中同化模式的结果最为可信。海洋热容量的几种分析有助于对此问题的认识,它们综合起来为全球热平衡过程提供了更加全面的轮廓。另外, Fasullo 和 Trenberth(2008a)综合卫星反演、再分析场、地面模拟和海洋温度估值,针对全球大气、海洋和陆地分别给出了 TOA 和地表的全球能量预算评价。他们控制 TOA 处预算以适应近期大气成份和气候变化引起的全球失衡时卫星观测的估值。通过大气从海洋输向陆地的年平均能量为 2.2 ± 0.1 PW ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$), 主要发生在冬季北半球,其值可达 5 PW。Fasullo 和 Trenberth(2008b)继续计算了大气、海洋和陆地能量经向结构和传输,得到海洋、陆地和全球的平均状况以及以年为周期的纬向平均。Trenberth 和 Fasullo(2008)深入细致地研究了海洋热平衡预算得出能量辐散的基本估值和不确定性的综合评价。

Fasullo 和 Trenberth(2008a)通过分析陆地和海洋的情况发现,当 NOAA-9 卫星出现故障时 ERBE 资料中早期调整的一个问题,同时指出有必要将海洋和陆地的资料分别均一化处理,而不是简单地全球一体均一化,得到的结果比 KT97 的全球 OLR 的值更大。然而,更大的改变出现在使用 CERES 资料后,这些改变也表示 CERES 反演更精确、反演方法(包括现场识别的 MODIS 反演方法)更完善。

本文中,我们依据 Fasullo 和 Trenberth(2008a, b) CERES 期 2000 年 3 月至 2004 年 5 月的整体能量平衡的研究结果,改变了 KT97 大气中能流图的能量循环的其它部分。为了有助于理解各个估值的误差和残余,我们也将预算分解到陆地和海洋,并分别对 ERBE 和 CERES 期进行验算,针对技术和气候

变化影响给出相关的评价。我们也较好地结合了空间结构、年和月循环的效应,这些对全球平均值有所改正。

1 资料库

卫星遥感为 TOA 处各项提供了“最好估值”。本文采用 ERBE 和 CERES 资料(Wielicki等人,1996)得到卫星反演结果(详见 Fasullo 和 Trenberth 2008a)。1985 年 2 月至 1989 年 4 月 ERBE 估算值基于 3 颗卫星的遥感资料[ERBS, NOAA-9(1987 年 1 月扫描仪曾出现故障),和 NOAA-10]。这里用的 CERES 仪器(FM1 和 FM2)置于 Terra 卫星,该卫星 1999 年 12 月发射,资料延伸到 2004 年 5 月,它在上午穿越赤道。我们将观测期间的月平均资料用于计算年平均。

CERES 资料在 TOA 存在 6.4 Wm^{-2} 的不平衡(失衡),它超出目前全球失衡估值(Willis等人,2004; Hansen等人,2005; Huang, 2006),失衡可能源自大气中观测到的二氧化碳和其它温室气体的增加。TOA 处能量失衡可以很精确地由气候模式确定, Hansen等人(2005)用模式估算这一失衡值为 $0.85 \pm 0.15 \text{ Wm}^{-2}$, 该结果得到近期海洋热容量变化估测结果的支持(Willis等人,2004; Hansen等人,2005)。Fasullo 和 Trenberth(2008a)对 CERES 平均能量收支预算(Wielicki等人,2006)进行了误差综合分析,依此调试 TOA 处各通量以适应全球失衡的估值。CERES 资料来自 SRBAVG(2D 版 1 期)资料产品。由于长波调整产生的高层误差是 1.5 Wm^{-2} , 因此 OLR 需相应增加同样大小才可构建最好的估值。我们也采用一致的反照率比例使全球平均由 0.286 增至 0.298 来处理残留误差,而不是象 Trenberth(1997)那样直接调整 ASR 比例,因此, TOA 净失衡减小到可接受的 0.9 Wm^{-2} (约 0.5 PW)。即使有此增加,全球平均反照率还是比 KT97 基于 ERBE 的值[0.298 对 0.313; 详见 Fasullo 和 Trenberth(2008a)]小很多。

最全面的全球大气温度和水汽场估算可由 NRA(Kalnay等人,1996)和第二代 ERA-40(Uppala等人,2005)以及最近的 JRA(Onogi等人,2007)资料得到。这些再分析资料给出 TOA 和地表的辐射通量估值以及地表通量,它们都可在此得到检验。

Trenberth 等人(2007a)给出全球水文循环的估

测结果,尤其对降水的估值进行了比较,给出陆地、海洋和全球的年平均和月平均的误差分析。主要的全球资料库是 GPCP (Adler 等人,2003) 和 CMAP (Xie 和 Arkin,1997),它们都有卫星观测的几种估算降水资料,当然包括海洋的降水。比较这些资料库和其它资料后(Yin 等人,2004)发现在海洋上存在很大差别,并且在热带海洋 CMAP 的平均值比 GPCP 大 10% ~ 15%。GPCP 在一些热带环型珊瑚岛偏小 16% (Adler 等人,2003),然而,GPCP 被认为更加可靠,尤其它的时间序列。因此,应用资料采用 1988 ~ 2004 年的 GPCP。从海洋向陆地的大气水分净传输和相应的河流及径流返回估计为 $40 \pm 1 \times 10^3 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ (Dai 和 Trenberth,2002; Trenberth 等人,2007a),它相当于 $3.2 \pm 0.1 \text{ PW}$ 的潜热能量(误差范围为 2 个标准方差)。我们用综合陆面模式 CML3 得到的地表热平衡估值,外加强迫条件实测降水、温度和其它大气条件模拟了地表历史状况(Qian 等人,2006)。CLM3 模式提供了令人满意的蒸散和陆地地表能量通量的信息。

其它辐射通量和地表通量估算来自卫星资料,包括 ISCCP (Rossow 和 Duenas,2004; Zhang 等人,2004) 和 CERES (Loeb 等人,2000,2007,2009; Wielicki 等人,2006) 资料。张等人(2004)利用 ISCCP 云资料和其它新的辐射代码资料计算出 ISCCP - FD 版的辐射通量资料。它是 3 h 步长 280 km 网格,自 1983 起计算的全球资料。在与 ERBE、CERES 和某些地表资料比较后,他们估计误差量级在 TOA 为 $5 \sim 10 \text{ Wm}^{-2}$,在地表为 $10 \sim 15 \text{ Wm}^{-2}$ 。对他们的资料库而言,ERBE 期间 TOA 处的净辐射是 $+4.7 \text{ Wm}^{-2}$ 。Kim 和 Ramanathan (2008) 在一模式中利用许多空基观测资料,对 2000 ~ 2002 年水汽和气溶胶吸收采用新的处理方法,得出最新的太阳辐射收支预算。其结果经地面观测证实是有效的,而且未受平衡预算的前提条件约束。近来,Loeb 等人(2009),受 Fasullo 和 Trenberth (2008a,b) 的结果启发,得出 CERES 的结论,即 TOA 辐射收支闭合(平衡)。通过制造最大变化以解释(弥补)CERES 仪器绝对标定时的不确定性,可减少最初 CERES 产品在 TOA 的不平衡。他们用了更低的值代替近期 TIM 观测(Kopp 等人,2005)的太阳辐照度。

在几本世界地图集里都有地面通量资料,但问题是在 VOS 观测产品中全球偏差可达每平方米几十瓦(Grist 和 Josey,2003),当对地表净通量场全球

平均时尤其突出。这些资料包括大量级通量方程和现场观测资料,例如 Grist 和 Josey (2003) 的 Southampton Oceanographic Center (SOC) 资料和 WHOI (Yu 等人,2004; Yu 和 Weller 2007) 资料;也包括 HOAPS 及更新的 HOAPS3 版(Bentamy 等人,2003; Schlosser 和 Houser,2007) 的卫星资料。后者发现,对全球而言,空基探测降水和蒸发量失衡(偏差)达到 5% 以内,其中包括了卫星和仪器观测系统的更新引起的虚假变化。

张等人(2006)发现 ISCCP - FD 地表辐射通量的不确定性范围为 $10 \sim 15 \text{ Wm}^{-2}$,其不确定性来自近地面温度和对流层湿度的不确定性。张等人(2007)将 ISCCP - FD 辐射结果与 HOAPS - 2、NCEP 再分析和 WHOI (Yu 等人,2004) 的 3 个地表湍流通量估值相结合,更详细地计算了海洋表面能量收支预算。平均而言,海洋表面能量通量是 $+21 \text{ Wm}^{-2}$ (向下),表明存在很大偏差。他们指出失衡原因可能是地表净辐射加热太大(张等人,2004),而且潜热通量变化也太大。

ISCCP 资料(Dai 等人,2006)存在虚假趋势和卫星中转时的不连续性。例如,张等人(2007)指出早期 ISCCP - FD 与 ERBS 对热带地区的系列探测,包括 10 a 的变率,存在非常好的一致性。然而,经过再处理的 ERBS 资料(Wong 等人,2006)的 OLR 已不存在明显的趋势,表明原先的一致性只是偶然事件(Trenberth 等人,2007b)。

利用 NRA 间接残余技术和某些偶合模式得到的海洋热传输估值与水文学观测(Trenberth 和 Carron,2001; Grist 和 Josey,2003; Trenberth 和 Fasullo,2008)有合理的一致性。然而水文学观测也包含由于很大的自然变率和间接估算热传输时用到的假设所引起的不确定性,在应用它们估算各种通量产品时必须注意。另外,由地表通量导出的海洋热传输为进一步的估算提供了有用的参考。

2 全球平均能量收支预算

ERBE 期、CERES 期的预算结果分别见表 1、表 2,图 1 给出 CERES 期的结果。表 1、表 2 给出分别针对陆地、海洋和全球的估算结果。陆面和海洋的值存在微小差别,相应的全球值也存在差异。

(1) ERBE 期间分析结果

表 1 给出 KT97 的结果,为了对比还给出 ISCCP - FD(按它原来的等面积网格计算)和 3 种再分析

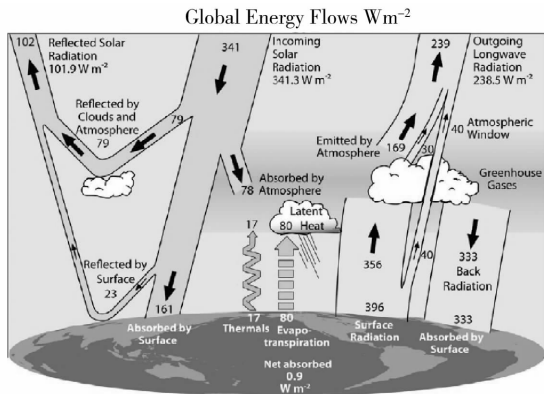


图 1 2004 年 3 月至 2004 年 5 月全球年平均能量预算 (Wm^{-2}), 箭头宽窄与能量流成正比

资料 NRA, ERA-40 和 JRA (重新按 T63 普通网格计算) 的结果。表 1 分为 TOA (表 1a) 和地表 (表 1b) 2 部分。ERBE 期海洋热容量的估算结果 (Levitus 等人, 2005) 表明它的变化很小甚至不变, 这种情况也适用于全球净值 (Fasullo 和 Trenberth, 2008a)。相反, 再分析结果失衡明显, 量级为 $10 Wm^{-2}$, 并且都导致净降温。众所周知, NRA 偏差的主要原因是海洋上太高的表面反照率 (Kalnay 等人, 1996), 尤其是 TOA (表 1) 海洋的情况, 云分布的特征是产生 ARS 和 OLR 实质误差 (Bony 等人, 1997; Weare,

1997; Trenberth 等人, 2001) 的主要原因。除了强对流区域之外, 所有 ERA-40 的 OLR 几乎都偏大 $5 \sim 30 Wm^{-2}$ 。1989 年 1 月全球的误差为 $9.4 Wm^{-2}$ (Trenberth 和 Smith, 2008a)。云的问题也是造成 JRA 误差 (Trenberth 和 Smith, 2008b) 的主要原因。

在地表部分除辐射各项还给出了潜热和感热通量 (LH 和 SH), 总净值是向下的太阳辐射和向上的净 LW、LH 和 SH 通量的总和。向陆面下方的通量以及相伴随的地球加热 (如冰川溶化等) 估计 $< 0.01 PW$ 或 $0.07 Wm^{-2}$ 。因此, 表 1b 中再分析资料得到的向陆面下方的净通量太大似不合理。在海洋上方 (表 1b) TOA 处的全球净值在 ERBE 期大约为 0, 海洋加热也应很小, 所以海洋上的地表净通量就是误差的主要量值。由 Trenberth 等人 (2007a) 的工作可知, 海洋和陆地 1988 ~ 2004 年净蒸发分别是 $89 Wm^{-2}$ 和 $41 Wm^{-2}$ 。相应地, 挥发的 LH 通量在陆地对 NRA 而言太大, 在海洋上对 ERA-40, JRA 和 HOAPS 而言也高达 $10 Wm^{-2}$; 而 WHOI 和 NRA 在海洋上的值较相近且合理。因此, 对 ERA-40、NRA 和 ISCCP-FD 而言, 在地表处其余各项隐含的误差可达 $20 Wm^{-2}$, 我们认为这与之后将讨论的 LW 向下净辐射的情况相似。与其它再分析结果不同, 由于 LH、SH 太大以及 LW 向上的净通量, 使 JRA 在海洋上有负的 (向上) 净地表通量。

表 1a 1985 年 2 月至 1989 年 4 月 ERBE 期间天顶处全球、陆地、海洋的年平均辐射预算, 依次为向下太阳辐射 (Wm^{-2}), 反射太阳辐射, 反射率 (%), 吸收太阳辐射, 向外长波辐射和净辐射。ERBE FT08 的值来自 Fasullo 和 Trenberth (2008a); 其它值来自 KT97, ISCCP-FD 和 3 个再分析资料: NRA, ERA40 和 JRA。

| | Solar in | Solar reflected | Albedo (%) | ASR | OLR | NET down |
|--------|-----------|-----------------|------------|------|-------|----------|
| | KT97 | 341.8 | 107 | 31 | 235 | 0.0 |
| | ERBE FT08 | 341.3 | 106.9 | 31.3 | 234.4 | 0.0 |
| Global | ISCCP-FD | 341.8 | 105.9 | 31.0 | 235.8 | 2.5 |
| | NRA | 341.9 | 115.6 | 33.8 | 226.3 | -11.1 |
| | ERA-40 | 342.5 | 106.0 | 31.0 | 236.5 | -8.5 |
| | JRA | 339.1 | 95.2 | 28.1 | 234.8 | -10.1 |
| | ERBE FT08 | 330.1 | 118.0 | 35.8 | 212.1 | -16.6 |
| | ISCCP-FD | 330.9 | 113.8 | 34.4 | 217.1 | -10.9 |
| Land | NRA | 330.7 | 116.4 | 35.2 | 214.4 | -18.5 |
| | ERA-40 | 330.3 | 110.0 | 33.3 | 220.2 | -18.8 |
| | JRA | 328.2 | 101.1 | 30.8 | 227.1 | -22.6 |
| | ERBE FT08 | 345.3 | 102.9 | 29.8 | 242.2 | 6.0 |
| | ISCCP-FD | 345.9 | 102.9 | 29.7 | 243.2 | 8.0 |
| Ocean | NRA | 346.0 | 115.4 | 33.3 | 230.6 | -8.4 |
| | ERA-40 | 346.9 | 104.6 | 30.2 | 242.3 | -4.9 |
| | JRA | 343.0 | 93.1 | 27.1 | 249.9 | -5.5 |

表 1b ERBE 期间地表处全球、陆地、海洋的年平均辐射预算 (Wm^{-2})。表中第一项是大气吸收的太阳辐射,其余依次为地表处吸收的太阳辐射,地表处反射的太阳辐射,地表蒸发潜热,感热,地表处向上的长波辐射,返回长波辐射,净长波辐射以及地表净能量吸收

| | Solar absorb | Solar down | Solar reflect | LH evaporation | SH | Radiation up | Back radiation | Net LW | NET down |
|----------------|-----------------|---------------|------------------|-------------------|------|-----------------|-------------------|-----------|-------------|
| KT97 | 67 | 168 | 24 | 78 | 24 | 390 | 324 | 66 | 0 |
| ISCCP - FD | 70.9 | 164.9 | 24.0 | - | - | 395.9 | 344.8 | 51.1 | - |
| Global NRA | 64.4 | 161.9 | 45.2 | 80.2 | 15.3 | 395.5 | 334.1 | 61.5 | 4.9 |
| ERA - 40 | 80.7 | 155.8 | 23.1 | 82.3 | 15.3 | 394.8 | 340.3 | 54.4 | 3.8 |
| JRA | 75.0 | 168.9 | 25.6 | 85.1 | 18.8 | 395.6 | 324.3 | 71.3 | -6.3 |
| ISCCP - FD | 69.9 | 147.2 | 42.9 | - | - | 377.8 | 318.7 | 57.5 | - |
| Land NRA | 59.1 | 155.2 | 68.9 | 52.0 | 27.1 | 369.7 | 295.9 | 73.8 | 2.3 |
| ERA - 40 | 86.0 | 134.3 | 42.9 | 40.9 | 25.8 | 370.3 | 304.9 | 65.3 | 2.3 |
| JRA | 72.2 | 154.9 | 51.5 | 39.5 | 27.3 | 372.7 | 286.7 | 86.0 | 2.1 |
| ISCCP - FD | 71.4 | 171.5 | 17.0 | - | - | 402.7 | 354.5 | 48.2 | 10.4 |
| NRA | 66.3 | 164.3 | 36.7 | 90.3 | 11.0 | 404.9 | 347.9 | 57.0 | 6.0 |
| Ocean ERA - 40 | 78.8 | 163.5 | 15.9 | 97.3 | 11.5 | 403.6 | 353.1 | 50.5 | 4.2 |
| JRA | 76.0 | 173.9 | 16.2 | 101.5 | 15.8 | 403.9 | 337.9 | 66.0 | -9.4 |
| WHOI | - | - | - | 91.2 | 9.5 | - | - | - | - |
| HOAPS | - | - | - | 98.9 | 14.0 | - | - | 54.1 | - |

再分析时正确评估云的分布及其辐射特性是长期困扰我们的问题,使我们很难为确定一个新的全球平均值提出有用的方案。目前为止,最接近真实的计算结果似乎是 Zhang 等人(2004)的结果,发表在 ISCCP - FD 资料库中的数据,用到每 3 h 观测一次的云况资料,至少对太阳辐射来说,在 TOA 观测云是最合适的。对地表长波(LW)辐射而言,结果主要取决于云底高度和辐射性质,它们不能很好地由地基观测确定。所以,沉降流 LW 通量在地表能量预算中只能是一个原则上不能确定的量。

(2) CERES 期间分析结果

CERES 期指 2000 年 3 月至 2004 年 5 月,表 2 给出的此间结果都相似,除了缺少 ERA - 40 资料外,它包括了目前最好的估算结果。在 TOA 处我们的值是根据 Fasullo 和 Trenberth (2008a) 的 CERES 值得出的。如前所述,TOA 能量失衡可通过气候模式和 Fasullo 与 Trenberth (2008a) 的工作精确地确定,使失衡已减小为 0.9 Wm^{-2} ,误差范围为 $\pm 0.15 \text{ Wm}^{-2}$ 。

在地表处我们最初的各项估算产生的失衡量级达 20 Wm^{-2} ,故此,不得不重新考虑了各种假设。首先采用 CERES 与 ISCCP - FD ARS 比值调试后的 ISCCP - FD 值,计算了大气吸收的太阳辐射、地表反射的辐射和在地表吸收的净太阳辐射。这一结果

反映在表 2b 中的地表反射项里。至于大气中吸收的太阳辐射则是 71.6 Wm^{-2} ,在地表吸收的太阳辐射是 167.7 Wm^{-2} 。Wild 和 Roeckner (2006) 指出气溶胶气候学问题具有同样的重要性。另外, Kim 和 Ramanathan (2008) 发现最新的光谱参数和连续水汽吸收相对这些值增大 $4 \sim 6 \text{ Wm}^{-2}$ 。整个对流层水汽浓度自 ERBE 期以来已经增加了约 $1.2\% / 10 \text{ a}$ (Trenberth 等人, 2005, 2007b)。他们还指出相对 KT97,气溶胶的吸收增大,而 KT97 认为大气净吸收是 67 Wm^{-2} 。因此,它们的全部太阳辐射吸收值是 78.2 Wm^{-2} (我们在此已对他们不同的总太阳辐照度和地面反照率作了调整),这里我们采用此结果后,地表净吸收减小为 161.2 Wm^{-2} 。

长期平均而言,全球降水应与全球蒸发相等,且前者的估算值似乎更为可靠。然而,无论在海洋还是在陆地降水均存在很大不确定性 (Trenberth 等人, 2007b; Schlosser 和 Houser, 2007); 后者(蒸发量)主要受风影响,存在取样问题;而前者受到遥感精度限制。GPCP 的值被认为是最可靠的 (Trenberth 等人, 2007b), 2000 ~ 2004 年它的全球平均是 2.63 mm day^{-1} , 相当于 76.2 Wm^{-2} 潜热通量。在此期间,全球 CMAP 的值与之接近为 2.66 mm day^{-1} , 但在纬度 $30^\circ \sim 90^\circ$ 处的值比 GPCP 的小,而在 $30^\circ \text{S} \sim 30^\circ \text{N}$ 处的值比 GPCP 的大。如果赤道区以外的

CMAP 值与赤道内的 GPCP 值混合,反之亦然,则全球的结果是 $2.5 \sim 2.8 \text{ mm day}^{-1}$ 。另外,来自 Cloud-Sat 的新结果(即 Stephens 和 Haynes, 2007)可能有助于观测,主要问题是由于低纬暖云的取样太少,估计降水会更大。同样,GPCP 值被认为偏低。考虑到地表能量不平衡及以上的叙述,我们人为地稍微增加了 GPCP 的值 5%,以便与 Clouds 的新结果接近并与热带地区和副热带地区的 CMAP 值接近。因此,全球的值确定为 80.0 Wm^{-2} (2.76 mm day^{-1})。

假设进入海洋的径流为 $40 \times 10^3 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ (Trenberth 等人, 2007), 我们按 Trenberth 等人(2007)的方法,在海洋和陆地之间分配潜热通量。基于 GPCP 海洋上 91.9 Wm^{-2} 的原始值当然是接近 WHOI (93.8 Wm^{-2}) 的潜热通量估值(2% 以内),但稍小。然而,我们增加的全球降水(5%)仅仅发生在海洋上,使海洋降水增加到 3.06 mm day^{-1} 时,地面降水仍保持不变为 GPCP 的 2.06 mm day^{-1} 。已知 ERA-40 的降水值偏高并且模式模拟的全球降水比蒸发量大(Uppala 等人 2005)。JRA 的值在海洋上最高,并且 JRA 与全球蒸发相关的潜能,在 CERES 期超出了降水的潜热 3.2 Wm^{-2} ,显然是不现实的。

所有年份的感热可从再分析资料中得到,全球的取值范围为 $15.7 \sim 18.9 \text{ Wm}^{-2}$, 陆地为 $26.3 \sim 27.5 \text{ Wm}^{-2}$, 海洋 $11.8 \sim 16.0 \text{ Wm}^{-2}$ 。KT97 中感热是作为残余量计算的,高达 24 Wm^{-2} , 这显然不现

实。这里,我们采用的值:全球为 17, 陆地为 27, 海洋 12 Wm^{-2} , 即使考虑 10% 的不确定性,误差也仅有 2 Wm^{-2} 。

由于“时空样本”图中所示的误差矫正效果,其它估算方法得到的全球平均向上地表长波辐射相当一致,大约比 KT97 的值高 6 Wm^{-2} 。我们采用的值是 396 Wm^{-2} , 它与所有的估算值的误差在 2.1 Wm^{-2} 内,而且取决于地面温度和地表发射率(张等人, 2006), 该值已不能再精确了。我们采用 ISCCP-FD 的比值计算陆地和海洋的贡献。

剩下向下的和净长波辐射,它是作为残余量计算的最后量。起初我们得到的向下 LW 辐射比在此期间和 ERBE 期间以及两者之间的任一时期的大多数其它估算值低很多,尤其比 ISCCP-FD 的值低 24 Wm^{-2} 。这一问题在表 2b 中,当 HOAPS 地表涡动通量值与 ISCCP-FD 辐射值相结合时更加显见,因为在海洋为净 LW 辐射 9.7 Wm^{-2} , 它包括 HOAPS 的潜热偏高 12 Wm^{-2} 。

在对潜热进行上述调整并考虑气溶胶和水汽对太阳辐射的吸收之后,我们修正后的向下长波和净长波辐射估值分别是 333 和 63 Wm^{-2} 。后者接近 ISCCP-FD 的估值且在误差范围之内。Gupta 等人(1999)的全球年平均地表辐射预算与 ISCCP-FD 的结果相似但残余稍大,他们的净长波辐射是 47.9 Wm^{-2} 。其它几个向下的长波辐射估值都接近 340 Wm^{-2} (见表 1b ERA-40), Wild 等人(2001)指出 344 Wm^{-2} 是其最优的估值。当采用校正后的 RRT-

表 2a 2000 年 3 月至 2004 年 5 月 CERES 期间天顶处全球、陆地、海洋的年平均辐射预算,依次为向下太阳辐射 (Wm^{-2}), 反射太阳辐射, 反射率(%), 吸收太阳辐射, 向下长波辐射和净辐射。表中各值分别来自 ISCCP-FD, 再分析资料 NRA, JRA 和本文

| | | Solar in | Solar reflected | Albedo (%) | ASR | OLR | NET down |
|--------|------------|----------|-----------------|------------|-------|-------|----------|
| Global | ISCCP-FD | 341.7 | 105.2 | 30.8 | 236.5 | 235.6 | 0.9 |
| | NRA | 341.8 | 117.0 | 34.2 | 224.5 | 237.8 | -13.0 |
| | JRA | 339.1 | 94.6 | 27.9 | 244.5 | 253.6 | -9.1 |
| | This paper | 341.3 | 101.9 | 29.8 | 239.4 | 238.5 | 0.9 |
| Land | ISCCP-FD | 330.9 | 111.6 | 33.7 | 219.3 | 231.3 | -12.0 |
| | NRA | 330.6 | 116.4 | 35.2 | 214.2 | 234.7 | -20.5 |
| | JRA | 328.3 | 100.6 | 30.6 | 227.7 | 250.8 | -23.1 |
| | This paper | 330.2 | 113.4 | 34.4 | 216.8 | 232.4 | -15.6 |
| Ocean | ISCCP-FD | 345.7 | 102.9 | 29.8 | 242.8 | 237.2 | 5.6 |
| | NRA | 345.9 | 117.3 | 33.9 | 228.7 | 238.9 | -10.2 |
| | JRA | 343.0 | 92.5 | 27.0 | 250.5 | 254.7 | -4.2 |
| | This paper | 345.4 | 97.8 | 28.3 | 247.7 | 240.8 | 6.9 |

表 2b CERES 期间地表处全球、陆地、海洋的年平均辐射预算 (Wm^{-2})。表中第一项是大气吸收的太阳辐射,其余依次为地表处吸收的太阳辐射,地表处反射的太阳辐射,地表蒸发潜热,感热,地表处向上的长波辐射,返回长波辐射,净长波辐射以及地表净能量吸收

| | | Solar absorbed | Net solar | Solar reflected | LH evaporation | SH | Radiation up | Back radiation | Net LW | NET down |
|--------|------------|-------------------|--------------|--------------------|-------------------|------|-----------------|-------------------|-----------|-------------|
| | ISCCP - FD | 70.8 | 165.7 | 22.8 | - | - | 393.9 | 345.4 | 48.5 | - |
| Global | NRA | 64.4 | 160.4 | 45.2 | 83.1 | 15.6 | 396.9 | 336.5 | 60.4 | 1.3 |
| | JRA | 74.7 | 169.8 | 25.6 | 90.2 | 19.4 | 396.9 | 324.1 | 72.8 | -12.6 |
| | This paper | 78.2 | 161.2 | 23.1 | 80.0 | 17 | 396 | 333 | 63 | 0.9 |
| | ISCCP - FD | 70.6 | 148.7 | 40.1 | - | - | 381.2 | 327.6 | 53.6 | - |
| Land | NRA | 59.1 | 155.1 | 70.3 | 50.2 | 26.3 | 371.0 | 296.8 | 74.1 | 4.5 |
| | JRA | 71.9 | 155.8 | 51.6 | 39.4 | 27.4 | 374.4 | 287.4 | 87.0 | 2.0 |
| | This paper | 78.0 | 145.1 | 39.6 | 38.5 | 27 | 383.2 | 303.6 | 79.6 | 0.0 |
| | ISCCP - FD | 70.8 | 172.0 | 16.3 | - | - | 398.7 | 352.0 | 46.7 | 9.7 |
| Ocean | NRA | 66.3 | 162.3 | 36.2 | 95.0 | 11.7 | 406.2 | 350.8 | 55.4 | 0.2 |
| | JRA | 75.6 | 174.9 | 16.2 | 108.5 | 16.6 | 405.0 | 337.3 | 67.7 | -17.9 |
| | HOAPS | - | - | - | 103.6 | 14.6 | - | - | 56.1 | - |
| | WHOI | - | - | - | 93.8 | 10.8 | - | - | - | - |
| | This paper | 78.2 | 167.8 | 16.6 | 97.1 | 12 | 400.7 | 343.3 | 57.4 | 1.3 |

MLW 码 (Wild 和 Roeckner, 2006) 后, 这些和其它的计算值都有所改进。然而, Wild 等人 (2001) 指出存在显而易见的不确定性, 尤其精确模拟无云时冷、干大气热, 这样本身也存在问题, 更不必说还与大气水汽含量有关。后者涉及水汽连续域方程问题。

一直以来学术界认为由于卫星无法探测到低云而使云底太高的原因, 向下的长波辐射被低估了。Wild 和 Roeckner (2006) 认为长波通量应比气候模式得到的更高而非更低, 因此, 它也应比这里的最好估值更高。然而如他们所述, 仍存在许多实质上的不确定性。张等人 (2006) 发现地表长波通量对对流层水汽和温度的假设非常敏感, 但他们没有涉及云的影响。然而, 云的反向辐射特性是至关重要的, 如云底高度, 不能由空基探测较好确定 (Gupta 等人, 1999), 因此有必要发射 CloudSat (Stephens 等人, 2002; Haynes 和 Stephens, 2007)。还有云重叠造成的误差, 处理重叠云对向下通量的影响的方法不唯一, 也导致了不确定性。对中高云层的发射度假设也将影响向下辐射的估算。另一误差来源是地面和云底之间的水汽含量。在热带地区, 水汽域吸收的效果强烈影响云发射对地表长波通量的影响。

在表 2 中, 为求解净值的需要, 大多数估值给到小数点后一位, 即使这些值不是那么精确。多数在转换到图 1 时都有近似取舍。

3 讨论

以上我们大致叙述了决定地球能量收支预算的主要问题及其原由, 利用海洋和陆地各自在地表蓄能能力相关的一些约束条件, 对陆地和海洋分别检验得到了满意的结果。在 Fasullo 和 Trenberth (2008a) 文章中, 我们确定了 CERES 期海洋向陆地传输能量的最好估值 $2.2 \pm 0.1 W$, 它是基于 TOA 探测及大气中能储量的变化得到的。再分析得到的值与它比有小量残余, 尤其在时间序列, 这与观测系统的变化和不均一性对各种再分析的影响有关。

从海洋向陆地传输的年平均能量, 主要出现在北半球冬季, 大约为 5 PW。这些海洋蓄能在向陆地输送过程中同时向太空辐射 (Fasullo 和 Trenberth, 2008a, b)。然而, Trenberth 等人 (2007a) 指出海洋向陆地年平均传输的净水分, 作为水文循环的一部分, 相当于能量 3.2 PW。因此, 干静能的净值其实是从陆地输向海洋。季风过程就是明显的例子: 暖的陆地和地面低气压使海岸水分充沛气流汇集产生季风降水和潜热释放, 同时使陆地降温, 并产生海陆温度和气压梯度。总体而言, 垂直方向累积潜能和干静能输送在季风期和低纬度哈德勒环流期是相反的 (Trenberth 和 Stepaniak, 2003a, b), 这对全球能量收支影响很大。

不太可能给出有用的估值误差图。Fasullo 和

Trenberth(2008a)曾给出 TOA 处辐射值的误差方差图,但它们基于不同的时空采样方式。而更重要的误差与仪器、标定、模式模拟等有关,只能用我们这里的定性方法给出评估,比如,提供不同的估值及各自的优缺点。Loeb 等人(2009)对这里给出的估值和误差来源提出了进一步修正。对大多数情况我们可以有把握的说某些估值肯定不精确。有许多例子,如 NRA 的海洋表面偏大的反照率导致地面反射和吸收的巨大偏差,又如再分析资料中云分布的问题,还有在再分析资料中,TOA 不平衡引起的偏差等问题。因此,我们经常忽略了这些问题。当各种值的误差扩散趋向一致时,其结果一般大大超过对最好估值所设的不确定性。所以,我们对自己设定的值比表中计算的有误差的值更有信心。TOA 各值误差在 3% 以内,而净值的误差是 $0.85 \pm 0.15 \text{ Wm}^{-2}$ (Hansen 等人,2005);地面通量的误差在 5% 以内,而太阳反射、LS 和 LW 的误差可达 10%。

我们试图把 ERBE 期和 CERES 期的能量预算结合起来。真实气候变化,如雪冰减少引起的反照率变化以及大气环流和云的变化(Trenberth 等人,2007b)造成它们预算的差异。然而反照率的变化比用这种方式所描述的还大且来自改进的 CERES 仪器和资料处理过程(Wielicki 等人,2006; Fasullo 和 Trenberth,2008a,Loeb 等人,2009)。地表蒸发的增加似乎是真实发生的(Yu 和 Weller,2007)。模式的改进会导致其它值的改变,尤其使用真实云况的 ISCCP - FD 处理过程,这也说明用于再分析模式中的云模拟仍存在很大问题。这里已考虑了大气气溶胶和水汽吸收方面的新成果。

虽然 GPCP 的全球降水估值被认为是最好的,我们仍怀疑当考虑 CloudSat 资料后这些值可能偏低,我们只在特殊情况下才用它。这里最终的海洋潜热值与最优标定的 WHOI 地表通量产品的误差在 3.5% 以内。ERA - 40 和 JRA 模式都高估了地表蒸发和水文循环。在我们的分析中,最大的不确定性和误差来自向下的长波辐射。这一不确定性很可能主要来自云。

总之,本文中我们给出了地球能量收支预算的最好估值(图 1),也对将来需解决的问题进行了讨

论。

致谢(略)。

译自《美国气象学会公报(BAMS)》2009年3月刊

附缩略词:

ASR Absorbed solar radiation
 CCM Community Climate Model
 CERES Clouds and the Earth's Radiant Energy System
 CLM: Community Land Model
 CMAP NOAA Climate Prediction Center(CPC) Merged Analysis of Precipitation
 ECMWF European Centre for Medium Range Weather Forecasts
 ENSO El Nino - Southern Oscillation
 ERA - 40 40 - yr ECWMF Re - Analysis
 ERBE Earth Radiation Budget Experiment
 ERBS Earth Radiation Budget Satellite
 FM1,FM2 CERES twin instruments Flight Models 1 and 2 on the Terra spacecraft
 GPCP Global Precipitation Climatology Project
 HOAPS Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data
 ISCCP International Satellite Cloud Climatology Project
 JRA Japanese reanalysis
 LH Latent heat
 LW Longwave
 MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
 NCAR National Centers for Atmospheric Research
 NCEP National Center for Environmental Prediction
 NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration
 NRA NCEP - NCAR reanalysis
 OLR Outgoing longwave radiation
 PW Petawatt
 RRTM Rapid radiative transfer model
 SH Sensible heat
 SOC Southampton Oceanographic Centre
 SRBAVG Surface radiation budget average
 TIM Total irradiance monitor
 TOA Top of atmosphere
 VOS Voluntary observing ship
 WHOI Woods Hole Oceanographic Institution