

文章编号: 2096-1618(2017)04-0453-11

# HRADC、GLDAS 和 JRA 资料热量平衡分量的对比分析

阮金帅<sup>1</sup>, 范广洲<sup>1,2</sup>, 张永莉<sup>1</sup>, 赖欣<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044)

**摘要:**为对 HRADC、GLDAS 和 JRA 资料在东北半干旱区热量平衡各分量的特征和差异进行对比研究, 采用 2005~2012 年的资料比较和分析了夏季(7月)辐射平衡分量、能量平衡分量、Bowen-ratio、地表温度等物理量的空间分布特征和彼此之间的相关关系。结果表明: GLDAS、HRADC 及 JRA 的净长波辐射和净短波辐射空间分布均为西高东低; 整体上而言, HRADC 辐射平衡分量均为最大, JRA 次之, GLDAS 为最小; 净辐射的变化和净短波辐射密切相关。感热通量表现西高东低的分布型, 地表热通量表现南低北高的分布型; HRADC 潜热通量、GLDAS 感热通量以及 JRA 地表热通量在 3 种资料横向对比中均为最大值, 潜热通量为各资料能量平衡分量的最大值; HRADC 与 GLDAS 的感热通量与地气温差具有显著的相关关系, JRA 相对偏小, Bowen-ratio 和地表温度等水平分布的差异主要与下垫面土地利用类型和地理位置有关。

**关键词:** 大气科学; 陆气相互作用; 东北半干旱区; HRADC、GLDAS、JRA; 热量平衡分量; Bowen-ratio

**中图分类号:** P461

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2017.04.017

## 0 引言

在全球气候-生态系统中, 作为过渡带的半干旱区, 其降水偏少, 水资源相对缺乏, 对全球变化和人类活动响应十分敏感敏感<sup>[1]</sup>。在全球变暖的气候变化大背景下, 不同气候区域对全球变暖的贡献中存在着明显差异, 研究表明, 干旱半干旱区是近百年来温度增加最显著的地区, 尤其是半干旱区, 在全球陆地变暖的贡献率中达到 44%<sup>[2]</sup>, 因此, 半干旱区的气候变化成为研究全球变化的重要课题之一。自 20 世纪中叶, 北方干旱化成为中国面临的重大环境问题之一, 尤其进入 20 世纪 90 年代末期, 持续的干旱化已造成这些地区生态环境退化, 水资源匮乏以及土地荒漠化等一系列问题<sup>[3]</sup>; 值得一提的是中国目前潜在荒漠化威胁最大的地区不是在西北干旱区的腹地, 而是在东北半干旱区, 尤其东北西部干旱化更为严重<sup>[4]</sup>。有的研究表明: 1950-1990 年, 整个东北地区向干旱化发展, 进入 20 世纪 90 年代, 东北地区气候进一步变湿<sup>[5-6]</sup>, 这会改变东北半干旱区的范围。IPCC 第 4 次科学评估报告多个气候模式考虑人类排放中等情景(AIB)集成预估 21 世纪后期(2080-2099 年)冬季(12-2 月)和夏季(6-8 月)中国东北地区季平均气温和降水的变化表

明: 中国东北地区冬季比夏季变暖更明显, 夏季降水大约增加 30~50 mm, 冬季降水大约增加 10~30 mm<sup>[7]</sup>。东北干旱地区的气候和环境正在显著地发生变化, 气候变化的影响将改变陆气间水热平衡, 比如降水量增多, 土壤湿度增加, 潜热和感热作用强烈, 并可能引起局地大气环流的变化<sup>[8]</sup>, 最终导致局地气候异常, 造成东北半干旱区草地-农田生态系统发生改变, 也将影响到整个东北地区。所以对该地区对气候变化过程值得深入研究。

从 20 世纪 80 年代开始, 不同生态系统的水热过程的长期观测研究成为国内外关注的重点课题, 中国已多次开展了地气间动量、能量和物质的野外观测试验研究, 如黑河地区地气相互作用试验研究(HEIFE)、内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)以及全球能量和水循环试验(GEWEX)的子计划 CEOP 计划等<sup>[9]</sup>; 由过去仅在加强期进行湍流通量的观测到现在采取全年连续性的地气间通量交换的观测, 研究地气间物理、化学、生物过程及其各通量交换过程的日、月、季及年变化规律<sup>[3]</sup>。刘辉志<sup>[10]</sup>分析了非生长季近地面层微气象能量通量资料, 比较了不同下垫面物质和能量通量交换过程的差异; 涂钢<sup>[11]</sup>讨论了近地面层气象要素和湍流观测资料并分析了农田和退化草地近地面层湍流通量的特征等。

以上的研究多限于实地观测, 对东北半干旱区大范围的数值模拟和利用数值模拟结果进行分析的工作

收稿日期: 2017-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91537214); 公益性行业(气象)科研专项资助项目(GYH201506001)

并不多见;基于此,本文采用了 HRADC、GALDS 和 JRA 三种再分析资料,对东北半干旱区夏季(7月)辐射平衡、能量平衡分量、2 m 温度、地表温度、10 m 风速等特征进行了分析和比较,以期理解 3 种资料在东北半干旱区热量平衡各分量的特征和差异。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据资料

使用的资料有:

(1) GLDAS (global land data assimilation system) 是由美国航空航天局和美国海洋大气局联合开发的全球陆面数据同化系统,其产品分为 GLDAS-1 和 GLDAS-2,时间分辨率分为 3 小时和基于累计的月尺度,空间分辨率分为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  和  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。前者选取观测数据和卫星数据作为驱动场,分别驱动 4 个陆面模式 (Mosaic、Noah、CLM、VIC),生成一套从 1979 至今的全球范围的陆面数据,包括温湿风压、降雪率、降雨率、土壤湿度、地表蒸发等数据,后者采用普林斯顿大学全球气象数据作为强迫场,也是使用 Noah 陆面模式,模拟出一套从 1948–2010 年的长时间序列的陆面资料,数据集进行了统一的偏差校正,数据在连续性上明显优于前者,文中使用的数据为 GLDAS-2/NOAH。

Wang 等<sup>[12]</sup>评估了 GLDAS/Noah 的 2000~2006 年 3 h、 $0.25^{\circ}$  数据产品在中国东北地区的应用效果,指出降水和气温产品在日月尺度上都有较高的精度。王婉昭等<sup>[13]</sup>分析了 GLDAS 的适用性,将 GLDAS 与中国地面气温和降水格点数据集在不同区域进行了相关系数等分析,指出了其适用性高较好时间段为 1979–1994 年,半湿润及半干旱区数据质量较好;尤其在中国干旱、半干旱区存在显著变湿趋势下,GLDAS-2 数据的趋势检验结果与此观测结果一致<sup>[14]</sup>。汪小菊等<sup>[15]</sup>在 GLDAS 气温数据在中国区的适用性评估中对比了 GLDAS-1 和 GLDAS-2 五套数据得出 GLDAS-2/NOAH 数据与实测值最为接近,数据质量最好,另一方面 GLDAS 土壤湿度也能够较为准确地描述中国区域土壤湿度的时间变化特征,特别是对于华北东北半干旱半湿润地区<sup>[16]</sup>。

(2) HRADC (high-resolution assimilation dataset of the water-energy cycle in China) 来自国家高技术发展研究计划(863 计划)“碳核查遥感技术体系研究”项目成果——“中国典型区域陆地生态系统碳循环资料同

化再分析数据”。制作此数据采用 WRF3.4.1 版本及其先进的三维变分同化系统 (WRF-three dimensional variational data assimilation system, WRF-3Dvar),同化全国地区 2005–2012 年 827 个自动气象站的每日定时观测的地表气压 (hPa)、空气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、相对湿度 (%)、风向 ( $^{\circ}$ ) 和风速 ( $\text{m s}^{-1}$ ) 资料,并且利用 MODIS 归一化植被指数 (NDVI) 计算得到的植被覆盖度和航天飞机雷达地形测绘任务 (SRTM) 制成的数字高程模型 (digital elevation model) 数据替换 WRF 模式默认的植被覆盖和地形高度,最终生成此再分析同化数据。数据产品分为东北地区 and 全国地区两组数据集,如图 1 所示。前者时间段为:2009 年 1 月 1 日 00:00:00 至 2009 年 12 月 31 日 18:00:00 (世界时),间隔 3 小时 1 次结果输出,共 2920 时次,范围包含经度  $116.58^{\circ}\text{E} \sim 124.23^{\circ}\text{E}$ ,纬度  $39.91^{\circ}\text{N} \sim 45.52^{\circ}\text{N}$ ,空间分辨率为 5 km。后者时间段为:2005 年 1 月 1 日 00:00:00 至 2012 年 12 月 31 日 18:00:00 (世界时),间隔 3 h 一次结果输出,共 23360 时次,范围包含经度  $70.46^{\circ}\text{E} \sim 135.53^{\circ}\text{E}$ ,纬度  $18.27^{\circ}\text{N} \sim 53.56^{\circ}\text{N}$ ,空间分辨率为 25 km。此数据类似 NCEP 全球再分析数据产品,包括了大气 19 个等压层 (100~1000 hPa),4 层土壤 (0~10 cm、10~40 cm、40~100 cm 和 100~200 cm) 和大气边界层气象要素。此数据集是将各种不同空间和时间尺度的多源数据与数值模拟进行融合,弥补了单纯利用观测进行研究的不足,也为区域气象模式在东北半干旱区非均匀下垫面上的应用提供参考。

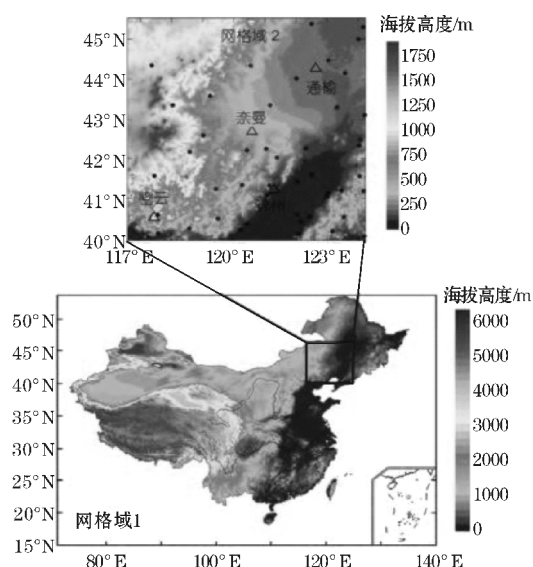


图1 HRADC 数据集在全国区域(网格域1)和东北区域(网格域2)的水平分布<sup>[17]</sup>

为验证此数据集在东北地区的适用性,文小航等<sup>[17]</sup>详细描述了此数据的制作方法,并选取了通榆、

奈曼、锦州与密云 4 个通量观测站 2009 年 6–8 月的地表通量资料与模拟值进行对比检验,表明同化自动气象站要素后,模拟的近地面气温、湿度和风速与观测值吻合较好,模拟误差比无任何更改的控制性试验有所降低。在 WRF 模式中利用卫星资料改进了下垫面植被覆盖和地形高度后,模式可以较为真实地反映出模拟区域下垫面状况,能较为准确地模拟出半干旱区下垫对大气的影 响和地表能量分配的关系,如感热、潜热、土壤热通量的分配关系,模拟结果总体比控制性试验有所改善。文小航等<sup>[18]</sup>用此数据与全球陆面数据同化系统(GLDAS)的对比检验也表明,全国典型区域如青藏高原地区的近地面气温、湿度和土壤温湿度等要素与观测值较为吻合,比 GLDAS 在青藏高原地区的模拟效果好(表 1)。

| 表 1 HRADC 与 GLDAS/观测数据的 RMSE 和 Bias               |      |       |
|---|------|-------|
| 关键变量  | RMSE | Bias  |
| 2 m 气温/°C   | 0.95 | 0.5   |
| 比湿/(g·kg <sup>-1</sup> )                          | 0.38 | 0.09  |
| 地表温度/°C   | 1.48 | 0.95  |
| 0~10 cm 土壤温度/°C                                   | 0.91 | 0.62  |
| 0~10 cm 土壤湿度/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> ) | 0.03 | 0.03  |
| 净辐射/(MJ·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )        | 0.92 | 0.57  |
| 潜热通量/(MJ·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )       | 1.20 | 1.04  |
| 感热通量/(MJ·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )       | 0.51 | -0.29 |
| 地表热通量/(MJ·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )      | 0.96 | 0.28  |

(3) JRA-55 资料是由日本气象厅研发的 55 年(1958–至今)全球大气再分析资料,时间分辨率分为 3 小时、6 小时、24 小时和基此累计的月尺度,空间分辨率分为1.25°×1.25°和 T106 高斯网格(320×160 个格点)<sup>[19–20]</sup>。采用了三维变分同化了大气常规观测资料、风场、亮温和可降水量及中国雪深资料,获得了第一套亚洲地区长时间、质量可靠的再分析资料。

JRA-55 地表温度可以很好的描述东北地区 and 内蒙古东部的变化<sup>[21]</sup>;支星等<sup>[22]</sup>在分析了东北地区 JRA、NCEP/NCAR、ERA 和探空观测资料指出 JRA 资料能更好地表征该地区探空资料温度的变化趋势。李建等<sup>[23]</sup>指出 JRA 降水资料在华北东北地区可以有效的刻画这两个区域平均的降水变化。

## 1.2 统计方法和其他变量方法简介

### 1.2.1 相关分析

通过计算东北地区陆气间不同物理量间(如感热

与地气温差或感热与10 m风速)的相关系数,从而分析它们存在的相关关系。在计算了两个变量间的相关系数以后,还需要进行统计检验来判断两个变量间的相关程度是否是显著相关。

相关系数为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

根据统计学中大样本定理,当样本量较小时,计算所得相关系数可能会与总体相关系数偏离甚远,这时,通过无偏相关系数加以订正,将无偏相关系数记为

$$r^* = r \left[ 1 + \frac{1 - r^2}{2(n - 4)} \right]$$

为证明计算得到的相关系数具有统计意义,则需要对计算得到的相关系数进行检验,进而得到两个变量的相关关系是否显著,本文用到的方法是 *t* 检验法。

$$t = \sqrt{n - 2} \frac{r}{\sqrt{1 - r^2}}$$

### 1.2.2 线性倾向估计

用  $x_i$  表示样本量  $n$  的某一气候变量,用  $t_i$  表示  $x_i$  所对应的时间,建立  $x_i$  与  $t_i$  之间的一元线性回归方程:

$$x_i = a + bt_i, \quad i = 1, 2, \cdots, n$$

对观测数据  $x_i$  及相应的时间  $t_i$ ,回归系数  $b$  和常数  $a$  的最小二乘法估计为

$$\begin{cases} b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \\ a = \bar{x} - b\bar{t} \end{cases}$$

### 1.2.3 地面热量平衡方程

地气间的能量交换是由辐射过程和湍流输送过程的平衡所决定的,辐射过程指地面一方面吸收短波辐射,另一方面向外释放长波辐射。湍流输送则是地表向大气输送热量和水汽能量。如下为常用的地表热量平衡方程

$$R_B - F_s = F_H + F_L$$

其中

$$R_B = (R_{SD} - R_{SU}) - (R_{LU} - R_{LD})$$

式中,  $R_B$  称为辐射平衡(或称净辐射、辐射差额),  $R_{SD}$  为地面吸收的太阳短波辐射也称太阳总辐射(包括太阳直接辐射和天空散射辐射),  $R_{SU}$  为反射的太阳辐射,  $R_{LU}$  为地面放出的太阳辐射,  $R_{LD}$  为长波逆辐



射,  $R_{SD}$  和  $R_{SU}$  二者之差为净短波辐射  $R_{LU}$  和  $R_{LD}$  差值称为净长波辐射。 $F_s$  是地表层土壤热通量,  $F_H$  为地面(湍流)感热通量,  $F_L$  为土壤蒸发(包括地面植被层的蒸腾)潜热。

2 结果分析

如数据介绍所言, HRADC 数据集在东北地区的适用性较好<sup>[17-18]</sup>, 其模拟的近地面气温、湿度和风速等

与观测值十分吻合, 利用卫星资料改进下垫面植被覆盖和地形高度后, 模式能够较为准确地模拟出地表能量分配的关系; 同时发现 GLDAS 和 JRA 资料<sup>[12-15, 21-23]</sup>在东北地区的适用性得到学者们的认可。所以, 分析和比较了夏季(7月)3种资料东北地区热量平衡各分量的特征的差异, 所用资料时间段为: 2005-2012 年( GLDAS 为 2005-2010 年) 7 月。

2.1 3 种资料辐射平衡各分量的对比分析

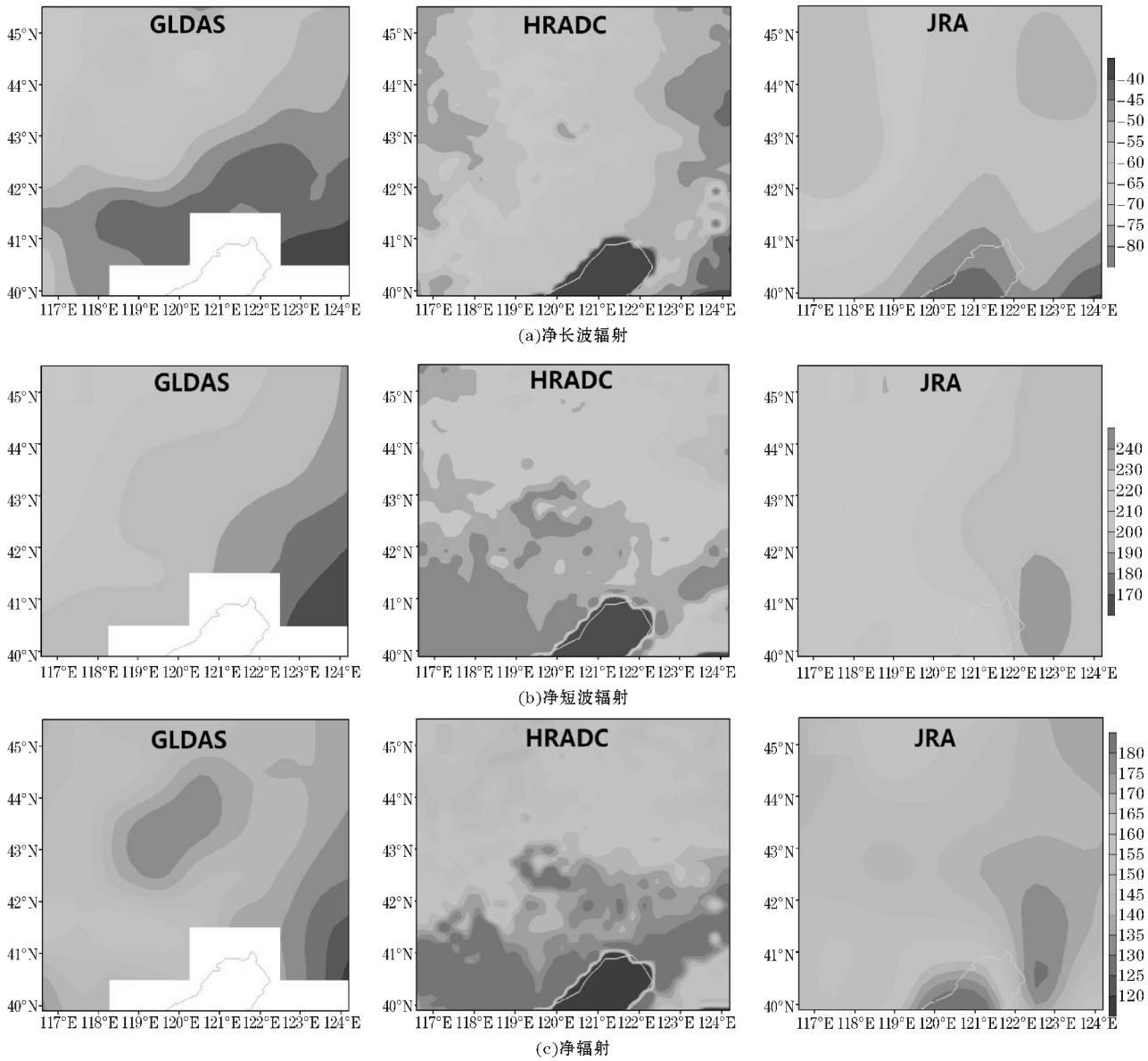
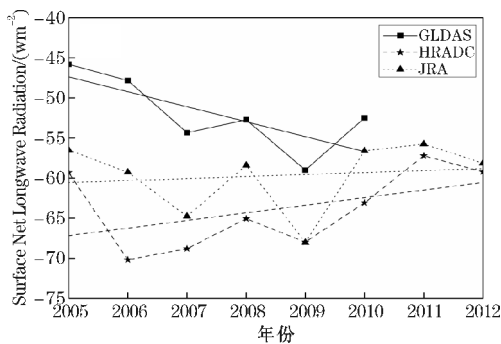


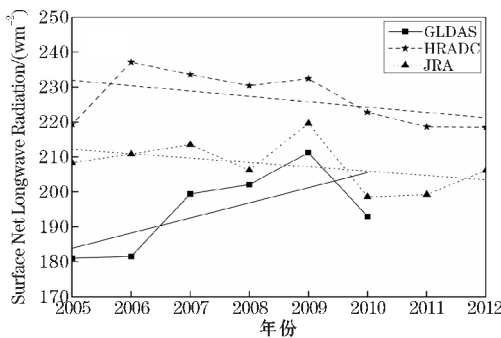
图 2 3 种资料 8 年( GLDAS 为 6 年) 平均夏季( 7 月) 东北半干旱区辐射平衡分量水平分布

净长波辐射、净短波辐射以及净辐射是模式输出或计算的结果, 由于计算方法和输入场的差异可能造成这些物理量的差异。图 2 给出了 GLDAS、HRADC 以及 JRA 3 种资料的夏季( 7 月) 东北半干旱区净长波辐射、净短波辐射和净辐射的水平分布。从分布型来看, 3 种资料的净

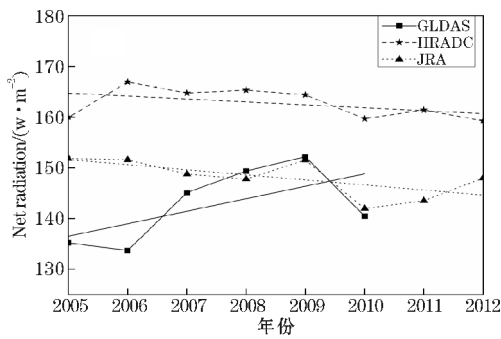
长波辐射和净短波辐射均表现西高东低, 净长波辐射主要是比较量级的大小, 负值表示其方向为上; GLDAS 和 JRA 的净辐射也表现出了西高东低的分布型, 而 HRADC 的净辐射的最大值则在南部, 且大部分区域明显大于  $180 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ , 北部为低值区( $145 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ )。



(a) 净长波辐射



(b) 净短波辐射



(c) 净辐射

图 3 3 种资料夏季(7 月)东北半干旱区辐射平衡分量年际变化趋势

表 3 同一资料中东北半干旱区夏季(7 月)净辐射分别与净短波辐射和净长波辐射的相关系数

|       | GLDAS         | HRADC         | JRA         |
|-------|---------------|---------------|-------------|
| $r_1$ | <b>0.992</b>  | <b>0.951</b>  | <b>0.87</b> |
| $r_2$ | <b>-0.944</b> | <b>-0.841</b> | -0.537      |

注:黑体为超过 95 % 置信度水平  $t$  显著检验

整体而言,HRADC 的净长波、净短波以及净辐射通量均最大(表 2),平均值为 $-63\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $226\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $162\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 。JRA 次之,GLDAS 最小,比 HRADC 分别小了 $-11\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $31\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $20\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 。这与图 2 中各分量的空间分布相一致,而且 GLDAS 净长波、净短波和净辐射标准差均为最大值,分别为 $0.89\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $2.35\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $1.59\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ ,说明其年际变化明显大于其他资料,HRADC 和 JRA 二者之间的标准差则很近似,差异最显著的为净短波辐射,二者分别小于 GLDAS  $1.25\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $1.30\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ ,净长波辐射差异很小,分别为 $0.89\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.72\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.72\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ ,说明净辐射的变化受净短波辐射较大。3 种资料的年际变化曲线各不相同,就 HRADC 资料而言,净长波辐射、净短波辐射和净辐射均呈弱减弱趋势。JRA 资料的变化趋势与之一致,而 GLDAS 数据则表现出相反的弱增强趋势。在分析数据内部的统一性(表 3)发现,HRADC 的净辐射与净短波的相关关系为 0.951,与净长波的相关性为 $-0.841$ 均通过了 95 % 置信度水平  $t$  显著检验,GLDAS 数据的分析与 HRADC 一致,与前二者相比,JRA 资料的内部相关性则表现相对较差,其中净辐射与净长波辐射的相关性仅为 $-0.537$ ,未通过  $t$  显著行检验;这从侧面说明;同时也得出不同资料给出的夏季净辐射与净长波、净短波的相关性各有不同。

2.2 3 种资料能量平衡各分量的对比分析

图 4 给出了 GLDAS、HRADC 以及 JRA 3 种资料夏季(7 月)东北半干旱区感热通量、潜热通量和地表热通量的水平分布。从分布型来看,3 种资料的感热均表现为西高东低的分布型,GLDAS 普遍大于 $50\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ ,HRADC 多数在 $30\text{--}50\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间变化,JRA 绝大部分区域小于 $50\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 。HRADC 的潜热表现西低东高的分布型,数值多大于 $100\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ ,GLDAS 与 JRA 则呈现南北相反的水平分布,GLDAS 最大值在南部,JRA 在北部;二者均小于 $100\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 。地表热通量均表现出南低北高的分布型,数值差异显著,JRA 最大均在 $18\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ ,HRADC( $9\text{--}18\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ )次之,GLDAS 为最小,小于 $9\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 。整体而言在能量平衡各分量中,HRADC 潜热通量、GLDAS 感热通量以及 JRA 地表热通量在 3 种资料的横向对比中均为最大值。

表 2 东北半干旱区夏季(7 月)净长波辐射、净短波辐射和净辐射的区域平均值、趋势线和标准差

|  |     | GLDAS | HRADC | JRA   |
|--|-----|-------|-------|-------|
| 净长波辐射/<br>( $\text{w}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | 平均值 | -52   | -63   | -59   |
|  | 趋势  | 1.87  | -0.95 | -0.25 |
|  | 标准差 | 0.85  | 0.72  | 0.72  |
| 净短波辐射/<br>( $\text{w}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | 平均值 | 195   | 226   | 207   |
|  | 趋势  | 4.33  | -1.53 | -1.25 |
|  | 标准差 | 2.35  | 1.10  | 1.05  |
| 净辐射/<br>( $\text{w}\cdot\text{m}^{-2}$ )   | 平均值 | 142   | 162   | 148   |
|  | 趋势  | 2.46  | -0.58 | -1.00 |
|  | 标准差 | 1.59  | 0.44  | 0.47  |

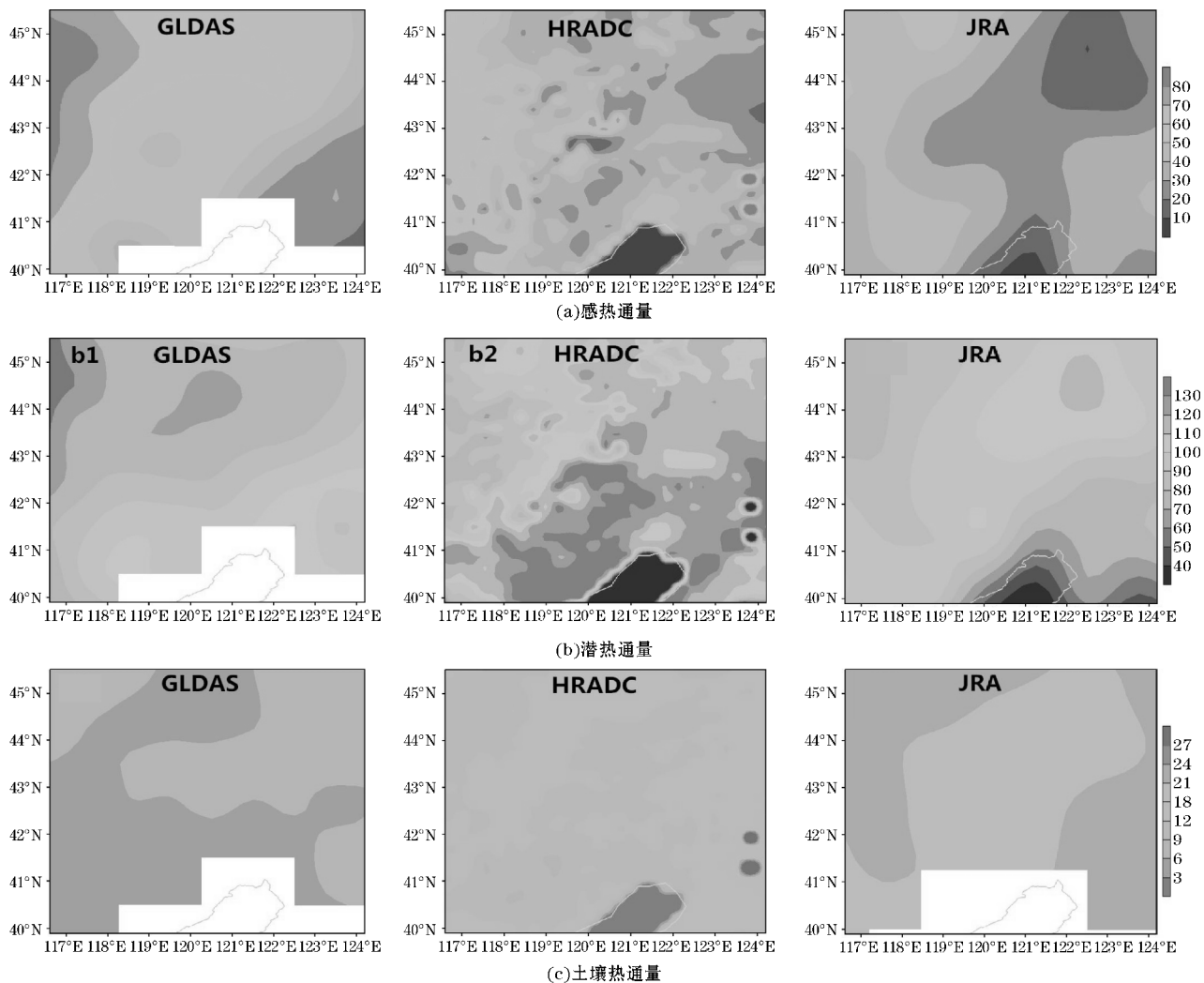


图 4 3 种资料 8 年 (GLDAS 为 6 年) 平均夏季 (7 月) 东北半干旱区能量平衡分量水平分布

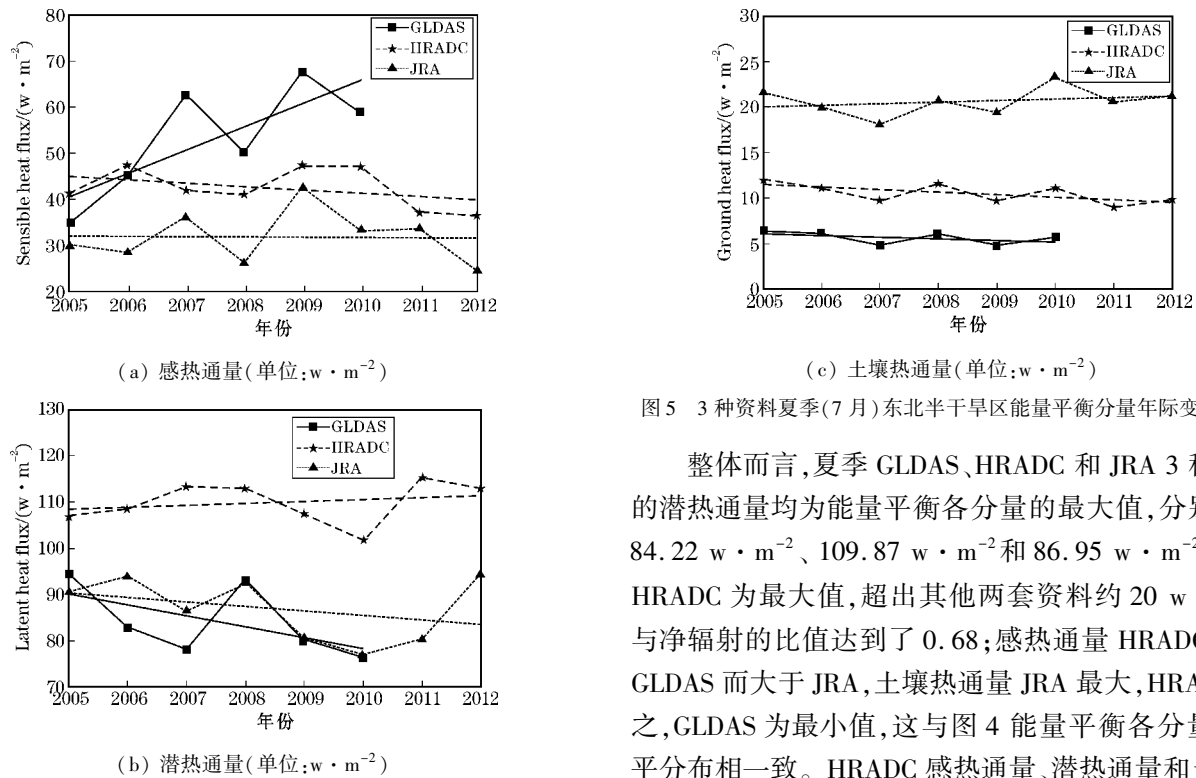


图 5 3 种资料夏季 (7 月) 东北半干旱区能量平衡分量年际变化趋势

整体而言,夏季 GLDAS、HRADC 和 JRA 3 种资料的潜热通量均为能量平衡各分量的最大值,分别达到  $84.22 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $109.87 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $86.95 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其中 HRADC 为最大值,超出其他两套资料约  $20 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ ,与净辐射的比值达到了 0.68;感热通量 HRADC 小于 GLDAS 而大于 JRA,土壤热通量 JRA 最大,HRADC 次之,GLDAS 为最小值,这与图 4 能量平衡各分量的水平分布相一致。HRADC 感热通量、潜热通量和土壤热

通量的标准差均为最小值,表明其年际变化明显小于其他资料,GLDAC 的标准差则是最大,年际变化显著。3 种资料的能量平衡分量的年际变化差异显著,就感热而言,HRADC 表现出弱减弱趋势( $-0.72 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ),JRA 线性趋势不显著( $-0.058 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ),GLDAS 近年来感热显著增加,年际变化率为  $5.06 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ 。HRADC 的潜热弱增强( $0.44 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ )年际变化趋势与其他两套资料呈现完全相反的变化趋势,JRA 的年际变化率为  $-0.96 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ ,相对而言,GLDAS ( $-2.37 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ )则减少更明显;HRADC 和 GLDAS 土壤热通量均呈现弱减少的趋势( $-0.288 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ,  $-0.178 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ),JRA ( $0.169 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ )则逐年增加。从以上分析可以看出,在 2005–2012 年 (GLDAS 到 2010 年),一方面,夏季 3 种资料潜热通量为各自能量平衡分量的最大值,HRADC 的标准差最小,年际变化明显小于 GLDAS 和 JRA 资料。另一方面,3 种资料能量平衡分量中 HRADC 最显著的特征是潜热弱增强的变化趋势,GLDAS 最明显的特征是感热显著增强的变化趋势,JRA 则是土壤热通量不断增加。

表 4 东北半干旱区夏季(7 月)能量平衡各分量的  
区域平均值、趋势线和标准差

|  |     | GLDAS  | HRADC  | JRA    |
|--|-----|--------|--------|--------|
| 感热/<br>( $\text{w} \cdot \text{m}^{-2}$ )        | 平均值 | 53.17  | 42.36  | 31.80  |
|  | 趋势  | 5.06   | -0.72  | -0.058 |
|  | 标准差 | 2.08   | 0.67   | 0.967  |
| 潜热/<br>( $\text{w} \cdot \text{m}^{-2}$ )        | 平均值 | 84.22  | 109.87 | 86.95  |
|  | 趋势  | -2.374 | 0.439  | -0.958 |
|  | 标准差 | 1.73   | 0.735  | 1.078  |
| 地表热<br>通量/<br>( $\text{w} \cdot \text{m}^{-2}$ ) | 平均值 | 5.64   | 10.50  | 20.62  |
|  | 趋势  | -0.178 | -0.288 | 0.169  |
|  | 标准差 | 0.157  | 0.139  | 0.247  |

表 5 同一资料中东北半干旱区夏季(7 月)净辐射分别与  
感热和、潜热和地表热通量的相关系数( $r_1$ 、 $r_2$  和  $r_3$ )

|       | GLDAS        | HRADC | JRA    |
|-------|--------------|-------|--------|
| $r_1$ | <b>0.824</b> | 0.486 | 0.05   |
| $r_2$ | -0.168       | 0.242 | 0.637  |
| $r_3$ | -0.737       | 0.06  | -0.558 |

注:黑体为超过 95% 置信度水平  $t$  显著检验

理论上净辐射可以通过感热、潜热和土壤热通量相加得到,所以这里分别计算了东北半干旱区 3 种资料净辐射与感热、潜热和地表热通量的相关系数,如表 5 所示。除却 GLDAS 净辐射与感热通量的相关系数为 0.824,并通过了 95 % 置信度水平  $t$  显著检验,其他

相关系数较小且均未通过显著性检验。说明净辐射与各能量平衡各分量的相关关系不显著,侧面证明净辐射主要与净短波辐射和净长波辐射密切相关。

2.3 3 种资料 Bowen-ratio 的对比分析

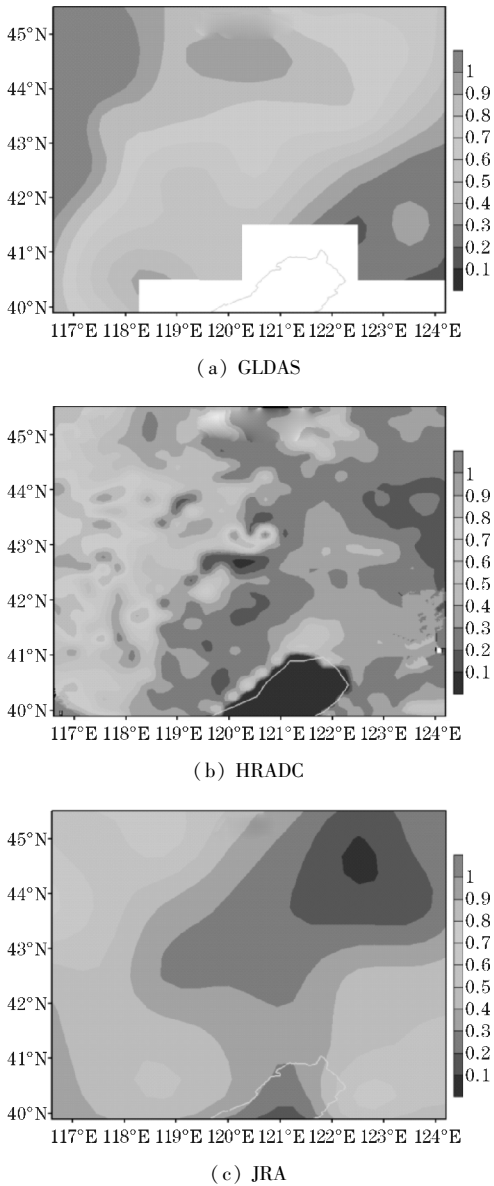


图 6 3 种资料 8 年(GLDAS 为 6 年)平均夏季(7 月)  
东北半干旱区 Bowen-ratio 水平分布

如图 6 所示,GLDAS、HRADC 及 JRA 3 种资料夏季东北地区 Bowen-ratio 的水平分布均呈现出西高东低的分布型。这主要与研究区域下垫面土地利用类型和所处地理位置有关,西部为内蒙古东部的草地,且远离海洋,降水偏少,东部多为耕地,临近海洋,水分充足。所以,西部的干旱程度明显大于东部。虽然水平分布一致,但数值却大不相同。HRADC 在东经  $117^{\circ}\text{E} \sim 118^{\circ}\text{E}$  的 Bowen-ratio 在 0.7 左右,其他大部分区域在 0.2~0.6 变化;GLDAS 和 JRA 二者迥然不同,GLDAS 的 Bowen-ratio 大部分超出 0.5,尤其在内蒙古东部,数



值更是达到 1 以上。JRA 资料显示整体 Bowen-ratio 数值偏小的分布,在内蒙古东部为 0.6 左右,研究区域的东部低值区仅为 0.1 ~ 0.3,远远小于 GLDAS。3 种资料 Bowen-ratio 的年际变化趋势。总的来说,夏季 GLDAS Bowen-ratio 最大且呈现逐年增大的趋势,标准差也为最大值,说明年际变化显著。相对而言,

HRADC 和 JRA 的表现较为近似,Bowen-ratio 分别为 0.387 和 0.371,年际变化不显著(图略)。

2.4 3 种资料地表温度、2 m 气温、地气温差和 10 m 风速的对比分析

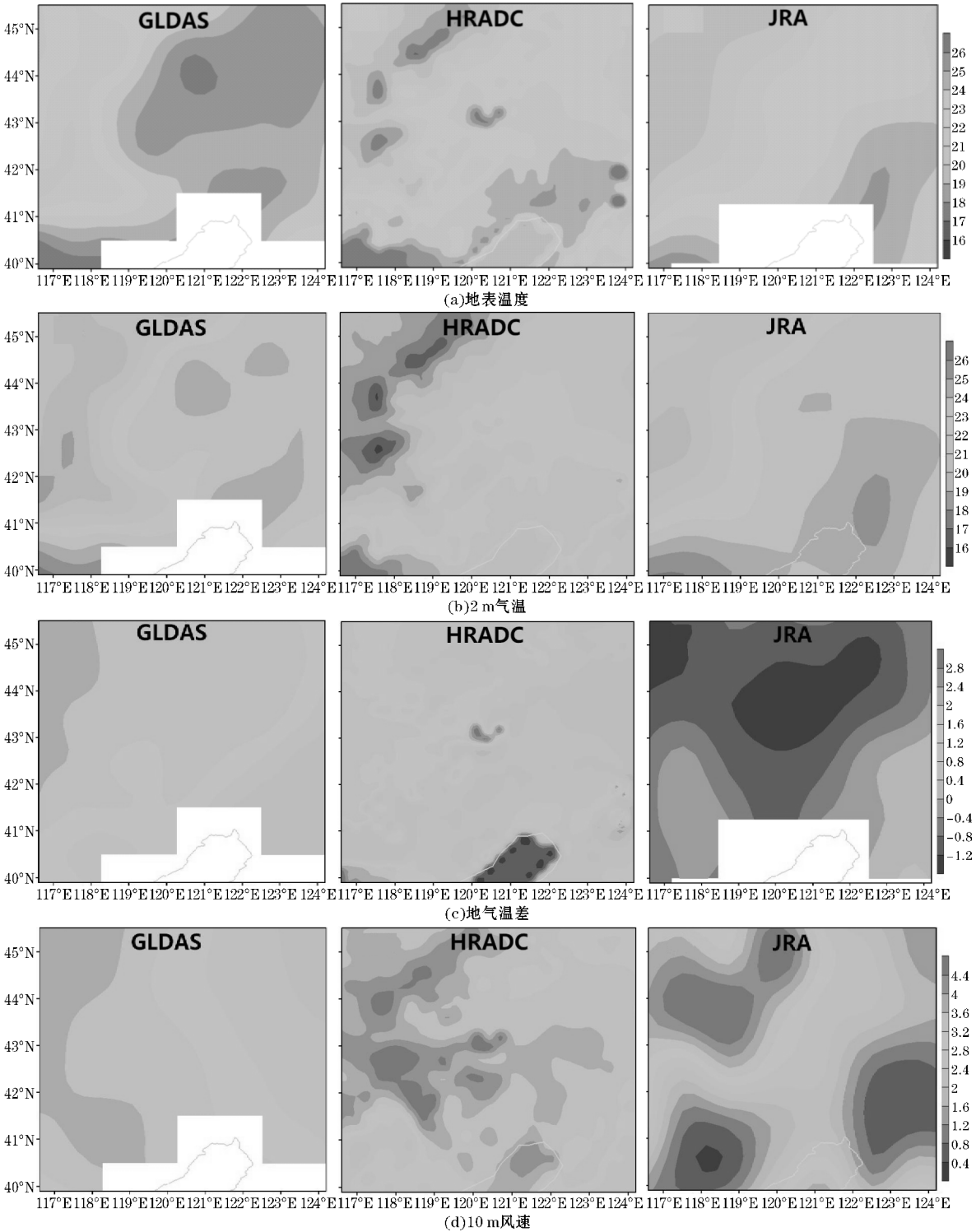


图 7 3 种资料 8 年 (GLDAS 为 6 年) 平均夏季 (7 月) 东北半干旱区地表温度、2 m 气温、地气温差和 10 m 风速的水平分布



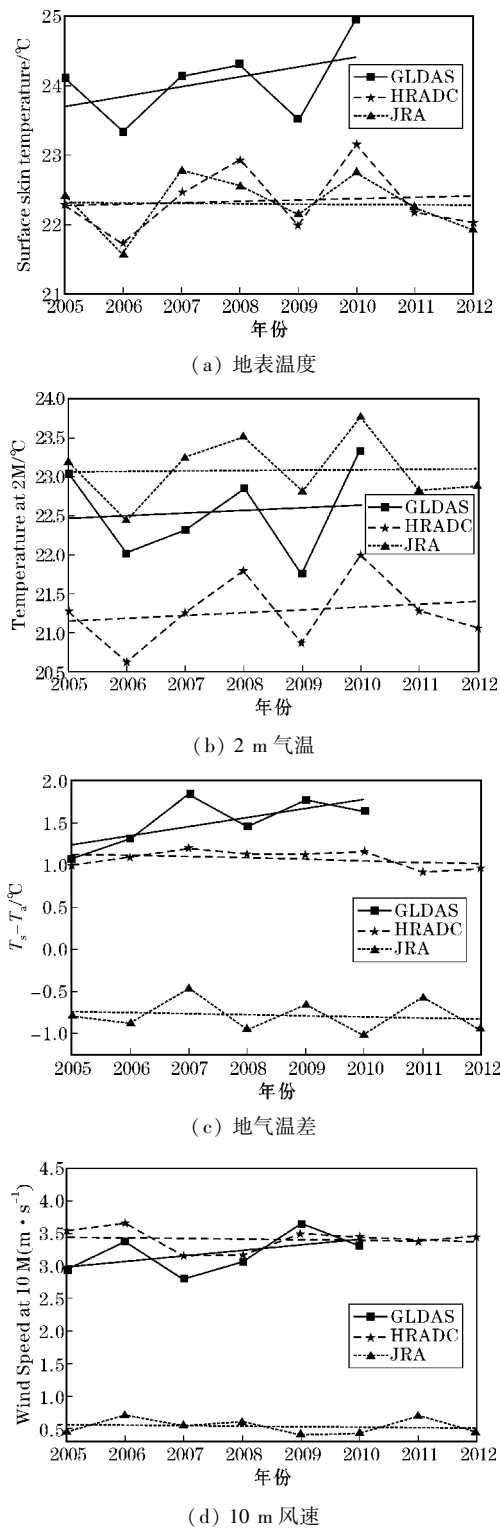


图 8 3 种资料夏季(7 月)东北半干旱区地表温度、2 m 气温、地气温差和 10 m 风速的年际变化趋势

图 7 为 GLDAS、HRADC 和 JRA 3 种资料地表温度、2 m 气温、地气温差和 10m 风速的水平分布;HRADC 与 GLDAS,JRA 的地表温度均呈现出西低东高的分布型;可能的原因是西部下垫面土地利用类型为草地,东部为耕地,地表反照率西部大于东部,地面反射太阳辐射明显,土壤吸收能量偏少,地表温度偏低,故会出现地表温度东部大于西部的分布型;南北方

向上,HRADC 和 JRA 呈现南高北低的分布型,GLDAS 南北部则均为最大值区。从数值上来看,HRADC 和 JRA 地表温度仅在 41 °N 以南存在最大值,分别为 26 °C 和 25 °C;GLDAS 在 119 °E 和 41 °N 以南区域均为最大值(24 °C 以上)。2 m 气温的水平分布与地表温度一致,均呈现出西低东高的分布型,分析了各资料 2 m 气温与地表温度的相关系数(图略),发现地表温度与 2 m 气温呈现显著的正相关关系。在分析 3 种资料的地气温差发现,HRADC 与 GLDAS 二者水平分布比较近似,数值均在 0 °C 以上,而 JRA 却出现地气温差为负的水平分布如图 C3,北部为最小值区,小于 -1.2 °C,在比较了 HRADC 和 JRA 的地表温度和 2 m 气温发现,JRA 地气温差出现负值主要是 2 m 气温偏大的原因。图 8(d)为 3 种资料的 10 m 风速的水平分布,3 种资料的 10 m 风速均呈现西高东低的水平分布,GLDAS 和 HRADC 空间变化不大,在 2.8 ~ 4.4 m · s<sup>-1</sup> 变化,HRADC 数值相对偏大点;JRA 存在明显高低值区,北部为风速的最大值区(4.4 m · s<sup>-1</sup>),南部为最小值区,数值为 0.4 m · s<sup>-1</sup>

表 6 东北半干旱区夏季(7 月)地表温度、2 m 气温、地气温差和 10 m 风速的区域平均值、趋势线和标准差

|                                    |     | GLDAS | HRADC  | JRA    |
|------------------------------------|-----|-------|--------|--------|
| 地表温度/<br>°C                        | 平均值 | 24.06 | 22.34  | 22.30  |
|                                    | 趋势  | 0.143 | 0.02   | -0.005 |
|                                    | 标准差 | 0.14  | 0.08   | 0.069  |
| 2 m 气温/<br>°C                      | 平均值 | 22.55 | 21.27  | 23.09  |
|                                    | 趋势  | 0.034 | 0.036  | 0.007  |
|                                    | 标准差 | 0.166 | 0.074  | 0.072  |
| 地气温差/<br>°C                        | 平均值 | 1.513 | 1.072  | -0.786 |
|                                    | 趋势  | 0.109 | -0.016 | -0.012 |
|                                    | 标准差 | 0.056 | 0.016  | 0.033  |
| 10 m 风速/<br>(m · s <sup>-1</sup> ) | 平均值 | 3.19  | 3.41   | 0.54   |
|                                    | 趋势  | 0.085 | -0.01  | -0.008 |
|                                    | 标准差 | 0.072 | 0.029  | 0.02   |

如图 8 所示,整体而言夏季 GLDAS、HRADC 和 JRA 3 种资料的地表温度分别为 24.06 °C、22.34 °C 和 22.30 °C,其中 HRADC 与 JRA 几乎一致,而 GLDAS 为最大值,超出其他两种资料 1.5 °C;2 m 气温,HRADC 小于 GLDAS 和 JRA,地气温差是 3 种资料差异最显著的物理量,HRADC (1.07 °C) 小于 GLDAS (1.51) 0.5 °C,JRA 却为负值(-0.79 °C);10 m 风速,HRADC 与 GLDAS 近似,分别为 3.2 m · s<sup>-1</sup> 和 3.4 m · s<sup>-1</sup>,JRA 仅为 0.54 m · s<sup>-1</sup>,这与图 7d10 m 风速的水平分布相一致。HRADC 和 JRA 地表温度、2 m 气温和 10 m 风速的标准差均较小,表明二者年际变化不明显,GLDAS 的标准差则是最大,年际变化显著。从年际变化趋势来看,HRADC、GLDAS 的地表温度和 2 m 气温均呈现了弱增加的趋势,相对而言 GLDAS 则

更明显,JRA 的地表温度 ( $-0.005\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{year}^{-1}$ ) 和 2 m 气温 ( $0.007\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{year}^{-1}$ ) 出现了完全相反的变化趋势, 尽管这种变化趋势很小, 可以忽略不计; 10 m 风速, GLDAS 呈现弱增强的趋势, 而 HRADC 和 JRA 相对而言, 无明显变化。

表 7 同一资料中东北半干旱区夏季(7 月)感热分别与地气温差和 10m 风速的相关系数( $r_1$  和  $r_2$ )

|       | GLDAS        | HRADC        | JRA           |
|-------|--------------|--------------|---------------|
| $r_1$ | <b>0.989</b> | <b>0.739</b> | <b>0.687</b>  |
| $r_2$ | 0.454        | <b>0.448</b> | <b>-0.312</b> |

注: 黑体为超过 95 % 置信度水平  $t$  显著检验

3 种资料的感热通量的计算均采用了整体输送法, 即

$$H=\rho C_p C_H V(T_s-T_a)$$

其中,  $H$  是感热通量,  $\rho$  是大气密度,  $C_p$  为定压比热,  $V$  为 10 m 风速,  $T_s$  为地表温度,  $T_a$  为 2 m 气温,  $C_H$  为整体交换系数。

发现地面风速和地气温差是感热通量计算的两个要素, 所以本章分析了东北地区感热通量与它们的相关关系, 如表 7。发现 HRADC 与 GLDAS 中感热通量与地气温差具有显著的相关关系, JRA 相对偏小, 未通过 95 % 置信度水平  $t$  显著性检验, 而与风速的相关性普遍偏差, 由此可见不同资料给出的夏季平均的感热通量与风速及地气温差的相关性存在明显差异。

3 结论

利用 HRADC、GLDAS 和 JRA 3 种资料对比和分析了夏季(7 月)东北地区辐射平衡各分量、能量平衡各分量、地表温度、2m 温度和 10m 风速等物理量的特征和差异, 得到的结果如下:

- (1) GLDAS、HRADC 以及 JRA 3 种资料的净长波辐射和净短波辐射均表现西高东低的分布型。整体而言, HRADC 的净长波、净短波以及净辐射通量均最大, JRA 次之, GLDAS 最小。GLDAS 净长波、净短波和净辐射年际变化明显大于其他资料。在分析数据内部的统一性发现, HRADC 和 GLDAS 净辐射与净短波和净长波的相关关系密切, JRA 资料的相关性则相对较差。
- (2) GLDAS、HRADC 以及 JRA 3 种资料的感热均表现为西高东低的分布型, HRADC 的潜热表现西低东高的分布型, GLDAS 与 JRA 则呈现南北相反的水平分布, GLDAS 最大值在南部, JRA 在北部。地表热通量均表现出南低北高的分布型, 整体而言, HRADC 潜热通量、GLDAS 感热通量以及 JRA 地表热通量在横向对比中均为最大值, 潜热通量为各资料能量平衡分量的最大值, HRADC 最显著的特征是潜热弱增强的变化趋势。GLDAS 最明显的特征是感热显著增强的变化趋势, JRA 则是土壤热通量不断增加。

(3) GLDAS、HRADC 及 JRA 3 种资料 Bowen-ratio 均呈现出西高东低的分布型。这主要与研究区域下垫面土地利用类型和所处地理位置有关, 西部为内蒙古东部的草地, 且远离海洋, 降水偏少, 东部多为耕地, 临近海洋, 水分充足。所以, 西部的干旱程度明显大于东部。年际变化而言, 夏季 GLDAS Bowen-ratio 逐年增大。相对而言, HRADC 和 JRA 的表现较为近似, 年际变化不显著。

(4) HRADC 与 GLDAS、JRA 的地表温度均呈现出西低东高的分布型。原因是西部下垫面土地利用类型为草地, 东部为耕地, 地表反照率西部大于东部, 地面反射太阳辐射明显, 土壤吸收能量偏少, 地表温度偏低, 故会出现地表温度东部大于西部的分布型, 2 m 气温的水平分布与地表温度一致。HRADC 与 GLDAS 二者地气温差水平分布比较近似, 数值均在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上, 而 JRA 却出现地气温差为负的水平分布。10 m 风速均呈现西高东低的水平分布。整体而言, 地气温差是三种资料差异最显著的物理量, HRADC ( $1.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 小于 GLDAS ( $1.51$ )  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , JRA 却为负值 ( $-0.79\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。HRADC 与 GLDAS 中感热通量与地气温差具有显著的相关关系, JRA 相对偏小, 而与风速的相关性普遍偏差, 由此可见不同资料给出的夏季平均的感热通量与风速及地气温差的相关性存在明显差异。

致谢: 感谢成都信息工程大学中青年学术带头人科研基金(J201516, J201518) 对本文的资助

参考文献:

[1] Zou X, Zhai P, Zhang Q. Variations in droughts over China: 1951–2003 [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(4): 353–368.

[2] Huang J, Guan X, Ji F. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2012, 12(2): 4627–4653.

[3] 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 等. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验 [J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 378–389.

[4] 符淙斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化 [J]. 大气科学, 2008, 32(4): 752–760.

[5] 张淑杰, 张玉书, 陈鹏狮, 等. 东北地区湿润指数及其干湿界线的变化特征 [J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 226–232.

[6] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 50 a 来我国干湿气候界线的空间变化分析 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 731–736.

[7] 赵宗慈, 罗勇. 21 世纪中国东北地区气候变化预估 [J]. 气象与环境学报, 2007, 23(3): 1–4.

[8] 朱艳峰, 宇如聪. 川西地区夏季降水的年际变化特征及与大尺度环流的联系 [J]. 大气科学,

- 2003,27(6):1045-1056.
- [9] 夏露,张强.黄土高原地表能量平衡分量年际变化及其对气候波动的响应[J].物理学报,2014,63(11):424-434.
- [10] 刘辉志,涂钢,董文杰,等.半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量的日变化及季节变化[J].大气科学,2006,30(1):108-118.
- [11] 涂钢,刘辉志,董文杰.半干旱区不同下垫面近地层湍流通量特征分析[J].大气科学,2009,33(4):719-725.
- [12] Wang F,Wang L,Koike T,et al. Evaluation and application of a fine-resolution global data set in a semiarid mesoscale river basin with a distributed biosphere hydrological model[J]. Journal of geophysical research-atmospheres,2011,116(D21):108.
- [13] 王婉昭,高艳红,许建伟.青藏高原及其周边干旱区气候变化特征与GLDAS适用性分析[J].高原气象,2013,32(3):635-645.
- [14] 王文,汪小菊,王鹏.GLDAS月降水数据在中国区的适用性评估[J].水科学进展,2014,25(6):769-778.
- [15] 汪小菊,王文,王鹏.GLDAS月气温数据在中国区的适用性评估[J].水电能源科学,2014,(11):10-13.
- [16] 程善俊,黄建平,季明霞,等.中国华北暖季土壤湿度的变化特征[J].干旱气象,2015,33(5):723-731.
- [17] 文小航,廖小罕,袁文平,等.中国东北半干旱区能量水分循环的同化模拟[J].中国科学:地球科学,2014,(12).
- [18] Wen X,Liao X,Dong W. Establishment and Analysis of High-Resolution Assimilation Dataset of Water-Energy Cycle over China [C]// Dragon 3Mid Term Results. Dragon 3Mid Term Results,2014.
- [19] Onogi K,Tsutsui J,Koide H,et al. The JRA-25 Reanalysis[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan,2007,85(3):369-432.
- [20] Kobayashi S,Ota Y,Harada Y,et al. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. ser. i,2015,93(1):5-48.
- [21] 朱智,师春香,张涛,等.多种再分析地表温度资料在中国区域的适用性分析[J].冰川冻土,2015,37(3):614-624.
- [22] 支星,徐海明,米卫红,等.中国东北和西北地区三种再分析资料与探空资料的温度对比[J].气象与环境学报,2014,(6):147-157.
- [23] 李建,宇如聪,陈昊明,等.对三套再分析资料中国大陆地区夏季降水量的评估分析[J].气象,2010,36(12):1-9.

## The Contrastive Analysis of the Heat Balance of the HRADC, GLDAS and JRA Datasets

RUAN Jin-shuai<sup>1</sup>, FAN Guang-zhou<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-li<sup>1</sup>, LAI Xin<sup>1</sup>

(1. Center for Plateau Atmospheric and Environmental Research, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In order to compare and analyze the characteristics and differences of the heat balance components in the semi-arid northeast China, based on the 2005-2012 data from HRADC, GLDAS and JRA datasets, we analyze the spatial distribution characteristics of physical balance, such as radiation balance component, energy balance component, bowen-ratio, surface temperature and so on in summer (July). The results show that net long-wave radiation and net short-wave radiation of GLDAS, HRADC and JRA are all high in east and low in west. Generally speaking, the radiation balance component of HRADC are the largest, followed by JRA, and GLDAS is the smallest. The changes of net radiation are closely related to net shortwave radiation. Moreover, the sensible heat are high in west and low in east, and surface heat flux are high in north and low in south. The latent heat flux of HRADC, sensible heat flux of GLDAS and JRA surface heat flux were the highest in horizontal comparison of the three datasets, and the latent heat flux is the maximum value of the energy balance component of each data. There is a significant correlation between sensible heat flux and ground temperature difference of HRADC and GLDAS, while the JRA is relatively small. The difference between the horizontal distribution of bowen-ratio and surface temperature is mainly related to the land use type and geographical location of the underlying surface.

**Keywords:** atmospheric science; land atmospheric interaction; the semi-arid Northeast China; HRADC, GLDAS, JRA; the component of heat balance; Bowen-ratio