

# 区域气候模式中不同陆面过程对中国地区地表平衡模拟能力的检验

哈丽旦·喀迪尔, 黄艳飞, 艾克拉木·艾山江

鄯善县气象局, 新疆 吐鲁番

收稿日期: 2022年12月28日; 录用日期: 2023年1月24日; 发布日期: 2023年1月31日

## 摘要

WRF模式能较准确地模拟中国地区区域地面气候, 但模式中不同陆面过程模块的选择会影响模式模拟性能, 比较而言, CLM使得地面气候场偏冷偏干; WRF能较准确地再现观测的地表能量通量的空间分布; 与观测比较, 所有陆面过程模块都存在高估。WRF模式能较准确地模拟典型气候区地表能量平衡的季节变化; 能量收支是决定区域气候的重要因子。如RUC模块模拟的地面温度偏高、湿度偏大, 蒸发强烈, 表层土壤湿度的损失偏多, 这导致整层大气衰减大, 到达地表短波辐射偏少而长波辐射偏多, 净辐射偏多。地表能量分配中的潜热、感热增加多。较多的地表向上能量可能加剧局地对流, 导致降水偏多和地面温度增高。陆面过程模块模拟地表能量平衡的性能取决于模块的地表物理参数(如地表反照率、土壤热容量、土壤水热传导率等)、对冰雪过程的刻画等。

## 关键词

WRF模式, 陆面过程, 地表能量通量, CN05

# Testing the Simulation Ability of Land Surface Balance in China by Different Land Surface Processes in Regional Climate Models

Haridan·Qadir, Yanfei Huang, Aklamü·Aishanjiang

Shanshan Meteorological Bureau, Turpan Xinjiang

Received: Dec. 28<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 24<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 31<sup>st</sup>, 2023

文章引用: 哈丽旦·喀迪尔, 黄艳飞, 艾克拉木·艾山江. 区域气候模式中不同陆面过程对中国地区地表平衡模拟能力的检验[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(1): 180-192. DOI: 10.12677/ccr.2023.121019

## Abstract

WRF model can simulate accurately the China regional climate on the ground, but the pattern of different land surface process module choice will influence the reliability of model simulation. comparatively, CLM makes ground field partial slant cold dry climate; WRF can accurately reproduce the spatial distribution of the observation of surface energy flux; Compared with observation, all the land surface process module are overvalued. WRF model can accurately simulate the typical climate area of seasonal change of the surface energy balance; The energy balance of payments is a decisive factor of regional climate. As the RUC module to simulate high ground temperature and humidity is big, the strong evaporation, surface soil moisture loss, which leads to the whole layer of atmosphere attenuation, less to the surface shortwave radiation and long wave radiation, net radiation bullish. Surface energy distribution of latent heat and sensible heat increase more. More surface energy may exacerbate up local convection, lead to precipitation and the more the ground temperature increased. Land surface process module to simulate the surface energy balance depends on the performance of the surface physical parameter of the module (e.g., surface albedo, the soil heat capacity, thermal conductivity of soil water, etc.), the depiction of the process of snow and ice, and so on.

## Keywords

WRF Model, Land Surface Process, The Surface Energy Flux, CN05

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国地处气候敏感和生存环境脆弱多变的东亚地区, 受其独特的地理位置, 是世界上最早受人类活动影响以及影响最剧烈的区域之一, 气候变暖带来的环境改变、北方干旱化以及生态系统破坏等一系列气候与环境问题一直气候研究的重点之一[1]。气候模式是目前研究东亚地区区域气候和变化的最主要工具。在气候模式中, 陆面过程的处理对准确模拟气候平均态及变率模式有着非常重要的意义。正确描述陆面-大气间的感热、潜热通量交换, 可以影响模式边界层结构、底层云量、温度、湿度和降水的计算[2]。陆面过程与气候系统中其它物理过程还存在着各种反馈机制, 如低层云影响地表辐射平衡, 感热、潜热通量影响边界层交换和湿对流过程的强度等等。所有这些事实都表明准确细致地考虑陆面过程是发展大气模式、提高大气模式模拟质量的一个重要内容[3]。

中国北方地区是气候变化敏感区。局地 and 区域气候受地气交换影响显著。地表热通量的空间分布及演变规律对理解区域天气和气候有重要的科学价值。陆面通量产品是研究气候与环境问题的重要工具[4]。鉴于现有的陆面通量产品在中国区域还存在很大的差异和不确定性, 本工作选取了目前通用的通量数据集在中国区域的适用性和一致性较好的 ERA-Interim 通量数据集(加 reference)在对陆面通量产品在中国区域进行评估的基础上, 利用 973 计划《大尺度土地利用/覆盖变化区域气候效应的系统评估及未来气候情景集成预测》支持的耦合不同陆面过程模块的 WRF 模拟得到的地表能量通量, 对 WRF 模式模拟中国北方地区地表通量的能力进行初步检验[5][6]。

本文的研究意义在于：1) 评估 WRF 模式模拟地表能量通量的能力；2) 确定目前 WRF 模式中通用的三个陆面过程模块(RUC, NOAH\_LSM, CLM)在区域能量通量和气候模拟中的性能[7]。通过比较模式结果和观测，获得 WRF 模式中不同陆面模块对地面能量模拟的综合性能评估。结果研究结果，将为提高陆面模式模拟陆-气之间的物质和能量交换的能力提供数据支持，并为研究区域气候模拟中地表能量的影响提供帮助[8]。

本文利用国家 973 计划《大尺度土地利用/覆盖变化区域气候效应的系统评估及未来气候情景集成预测》支持的 WRF 模式 10 年的模拟实验结果，通过与观测的地表通量资料的对比分析，检验 WRF 对我国地表能量通量时空演变能力，并着重分析陆面过程模块对中国地区地表平衡模拟的优劣，着重对比分析观测与模拟的地表净辐射，感热，潜热通量的时空分布。

本文分析内容包括：1) 观测和模拟的地表能量通量场的空间分布，季节和年际变化特征；2) 通过比较模式模拟和观测的地表能量通量，确定不同陆面过程模拟地表能量各分量及能量平衡的性能，评估探讨影响地表能量平衡的可能机制和关键过程，参数。

具体内容和章节安排如下：第二章介绍了使用的数据资料，模式实验设计；第三章初步分析了中国地区地表通量多年年平均和季节平均空间分布以及温度，降水场的多年和季节平均的空间分布；第四章探讨了中国地区不同区域地表通量的年际变化趋势和季节变化趋势；第五章给出了本文结果。

## 2. 模式和观测数据简介

### 2.1. 地表能量通量资料

目前常用的陆面过程观测资料有 NCEP/DOE, ERA-Interim, JRA-25 等，为验证模式模拟地表能量平衡的能力，本文采用 ERA-interim 再分析资料的地表能量通量资料。资料长度为从 1979 年至 2010 年，空间范围为 10.5°N~60°N (34 格数)，70.5°E~141°E (48 格数)。资料时间分辨率为月平均，空间分辨率为 1.5° \* 1.5°，用以分析中国地区地表通量时空变化规律和检验模拟结果。ERA-Interim 是欧洲中尺度天气中心(ECMWF)的最新再分析资料，使用了四维变分同化方案，是三维变分同化方案在时间上的扩展，唯一使用四维变分同化方案的再分析资料。使用的大气模式是一个最新版本的集合预报系统(IFSCy31r2)，提高了模式预报和分析能力。

### 2.2. 模式简介

区域气候模式已经被广泛用于理解区域气候变化特征及可能存在的物理机制。本文在 WRF 模式研究我国地表能量平衡的基本状况，检验 WRF 模式模拟中国地区气温，降水，地表净辐射，感热，潜热通量等要素场年平均状态，年际变化的能力，评估了 WRF 模拟能力[9]。分析了 WRF 模式模拟中国区域气象要素和地面能量平衡的系统偏差。

本文采用的区域气候模式是由美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, 以下简称 NCAR)研制的新一代中尺度模式 WRF (Skamarock *et al.* 2008)。WRF 模式是一个可压、非静力的具有地形跟随坐标的三维数值模式，作为一个有限区域模式，它具有进行区域气候模拟所必备的几乎所有能力，包括各种详细的物理参数化方案(辐射参数化，微物理过程参数化，边界层参数化，积云对流参数化和陆面过程参数化) [10]。WRF 已被用于对从季节尺度到年代际尺度上区域气候模拟的研究。WRF 模式对于区域环流系统的模拟能力也得到了广泛的检验。

WRF 模式中陆面过程参数化方案边界层物理参数化方案提供感热和潜热通量，并可以计算土壤中冰，积雪等效应。WRF 模式的陆面过程方案有以下选择：热量扩散方案，Noah 方案，RUC (rapid update cycle)方案和 CLM 方案等。其中 Noah 陆面过程参数化是 OSU LSM 的后续版，包含四层土壤，从地表往

下每层土壤厚度分别为 0.1 m, 0.3 m, 0.6 m 和 1 m, 总土壤深度为 2 m, 其中根区在土壤上层 1 m, 模式中包含了计算冠层湿度和雪盖的模块, 可以预报土壤结冰, 积雪, 考虑地表发射体的性质。RUC 方案考虑六个土壤层和两个雪层, 可以模拟土壤结冰, 非均匀雪地, 雪的温度和密度差异, 以及植被效应和冠层水。CLM 方案为利用 NCAR 公用陆面模式(CommunityLandModel3.0, CLM3.0)及普林斯顿大学 1948~2001 年  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、3 h 一次的全球大气近地面强迫资料, 对中国地区 1948~2001 年的土壤温度进行了 off-line 模拟试验, 通过对模拟结果和全国台站观测土壤温度资料的对比, 评估了 CLM 对中国区域不同层次土壤温度的模拟能力[11]。

### 2.3. 数值试验设计

本文数值模拟区域和地表植被覆盖如图 1 所示。

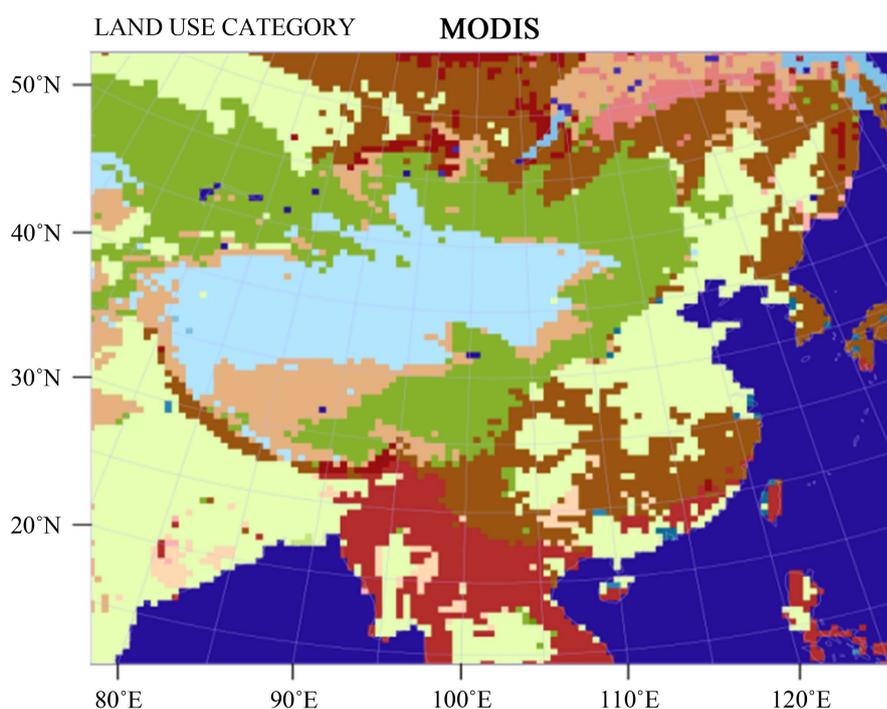


Figure 1. Numerical simulation area and surface vegetation coverage  
图 1. 数值模拟区域和地表植被覆盖

为考察模式不同物理过程对地表能力平衡的模拟能力, 本文数值实验设计如下表 1:

Table 1. Numerical test design  
表 1. 数值试验设计

数值模式	驱动场	地表植被覆盖	模拟时段	路面过程
				CLM
WRF	ERA-Interim	MODIS	1996~2006	NOAH
				RUC

### 3. 区域气候模式 WRF 对我国气候和地表能量通量空间分布的模拟

#### 3.1. 地表气候场

陆面通量交换在气候系统中扮演着重要角色，与天气和气候存在着不同时空尺度的相互作用，因而与降水，气温等气候因子有着紧密的联系。许多学者对陆面通量交换与天气和气候之间的联系和作用机制进行了研究。由于地表热通量与土壤湿度，降水等气候干湿因子存在紧密的联系，因而在气候平均态上，我们可以清楚的理解两者全球空间分布具有很强的一致性。

##### 3.1.1. 地表温度

地面降水和地面气温是区域气候预测和模拟的主要对象，近地面气温模拟结果的好坏是评价区域气候模式模拟能力的一个主要依据。图 2，图 3 中分别给出了中国地区 10 年(1996~2005)年均温度场和四个季节的温度场分布。

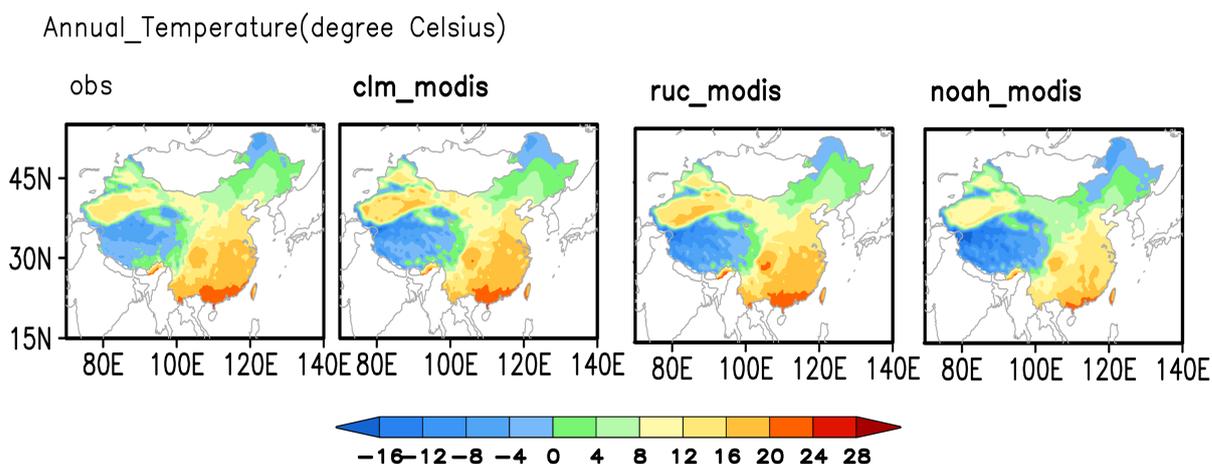
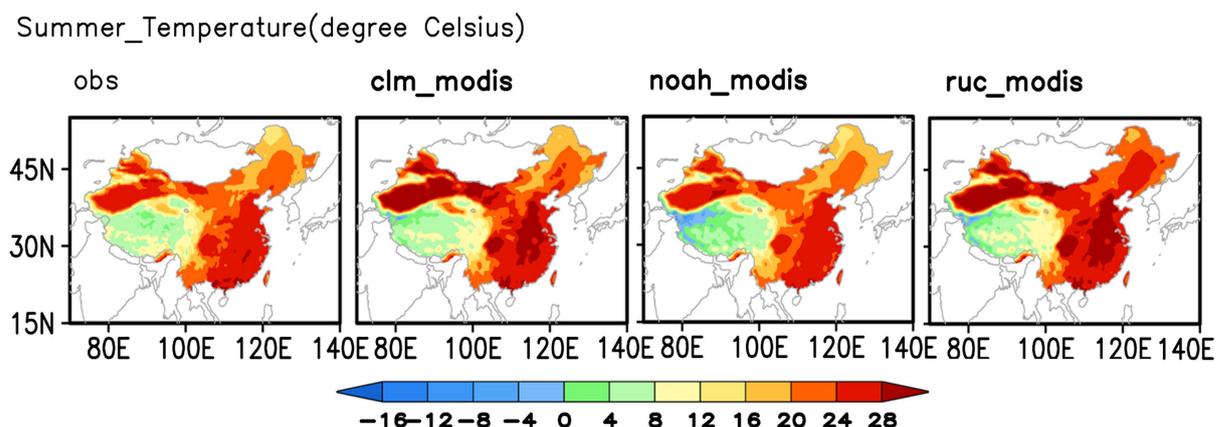
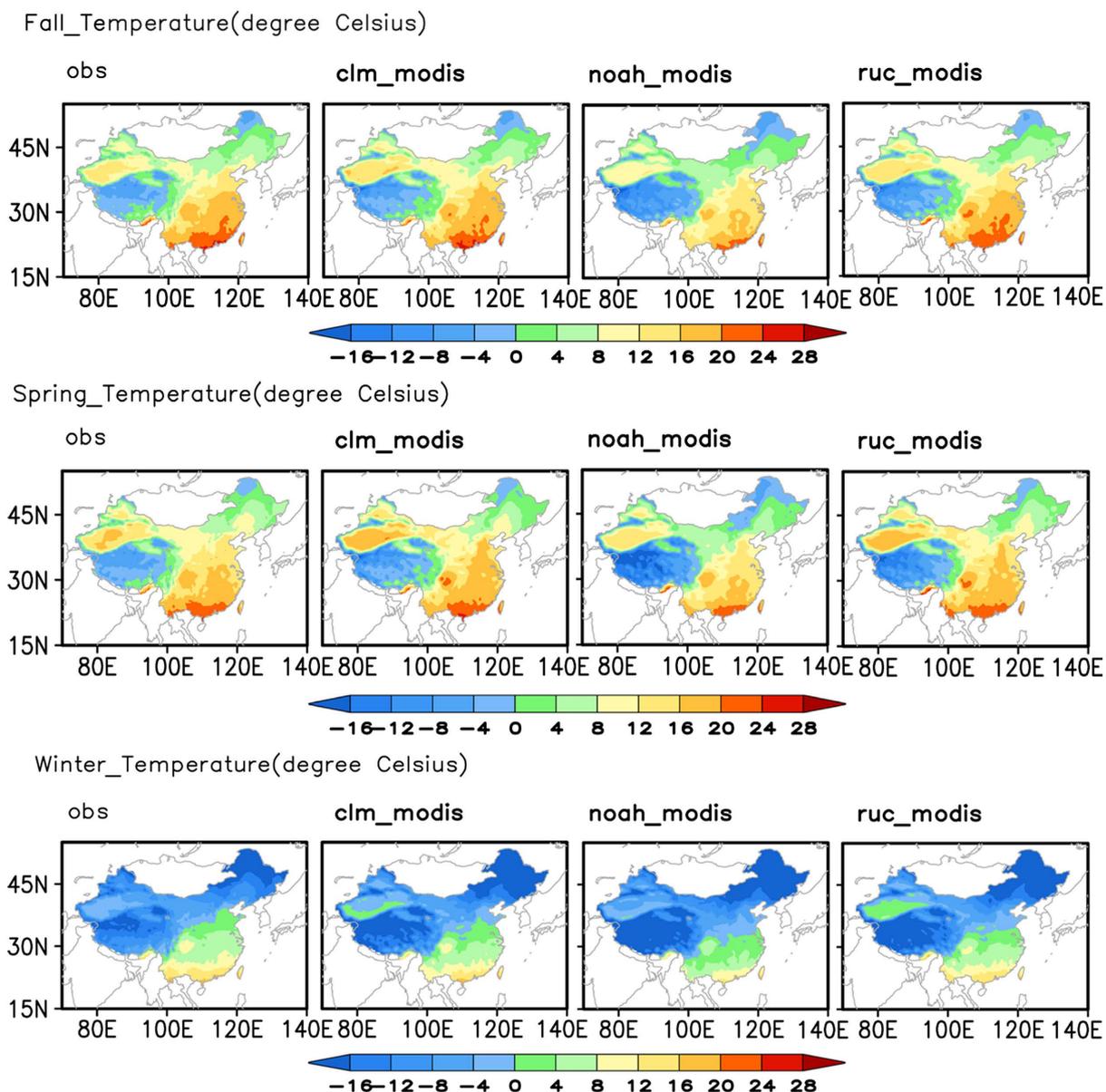


Figure 2. Average annual temperature in China

图 2. 中国地区年均温度

图 2 中比较分析观测资料和三个陆面过程模式，模式比较好的模拟出多年平均地面温度的空间分布形势。从年平均结果看，地面温度由南向北一次递减，受地形影响的缘故，青藏高原为冷中心，其北侧的塔里木盆地和东侧的四川盆地为暖中心。这种空间分布形势与观测结果基本吻合。WRF 模式对中国地区的地面气候长有一定的模拟能力，其中 Noah 模式的年均温度场偏低。





**Figure 3.** Distribution of ground temperature field in spring and summer, autumn and winter in China  
**图 3.** 中国地区春夏, 秋冬年地面温度场分布

图 3 中给出了夏冬, 春秋四个季节的地面温度多年平均气候态, 模式模拟的空间分布形势与观测结果较为一致。冬季地面温度具有与年平均温度地面温度类似的空间分布特征, 且南北温度梯度明显大于夏季。模式对夏季平均的地面温度的模拟优与冬季, 夏季平均华东地区与新疆大部分地区的模拟地面温度相对偏高。WRF 模拟夏季温度偏高, 三个陆面过程模式模拟春夏秋冬季节温度相对比较而言 NOAH 模式偏低最多。

总体而言, NOAH 模拟的地面温度较其他两种方案偏低, 在夏季跟观测比较接近, 春夏秋冬季节和年均温度较观测偏低。

### 3.1.2. 地表降水

WRF 模式能模拟出降水场的年平均和季节平均的空间分布形态, WRF 模拟年总降水有高估。图 4

中比较三种陆面过程模式，CLM 在华东 - 南地区降水偏多(最多)，RUC 与观测最为接近。对西北地区模式模拟跟观测差不多。

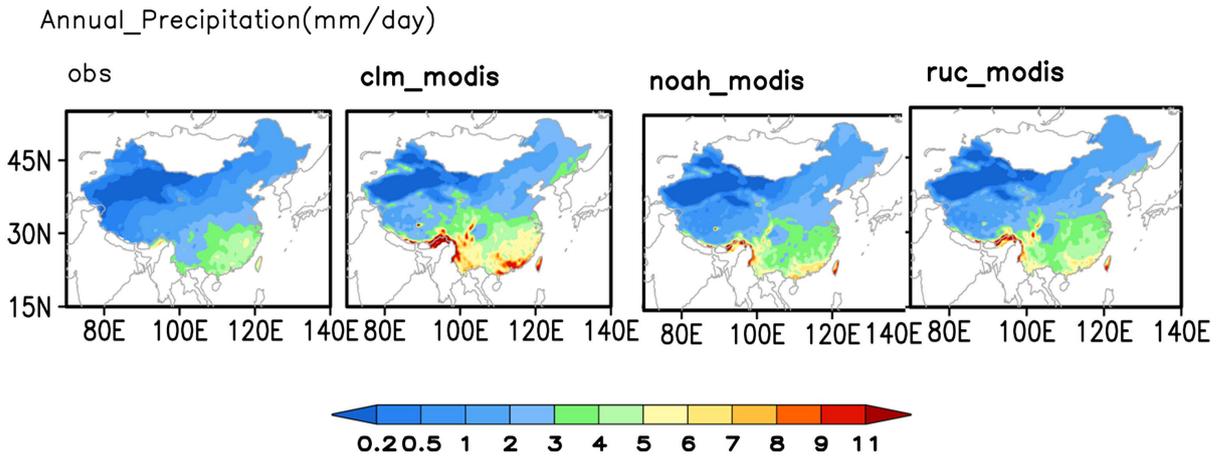
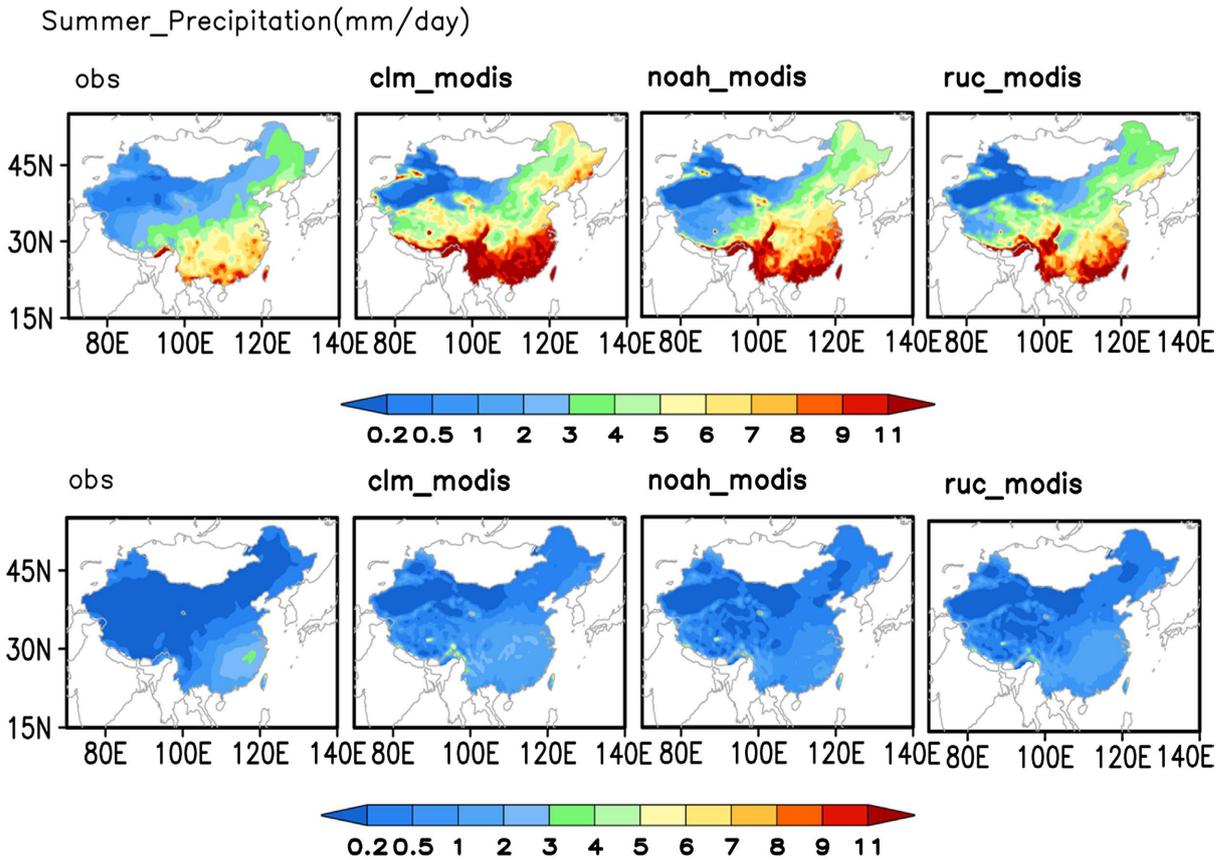
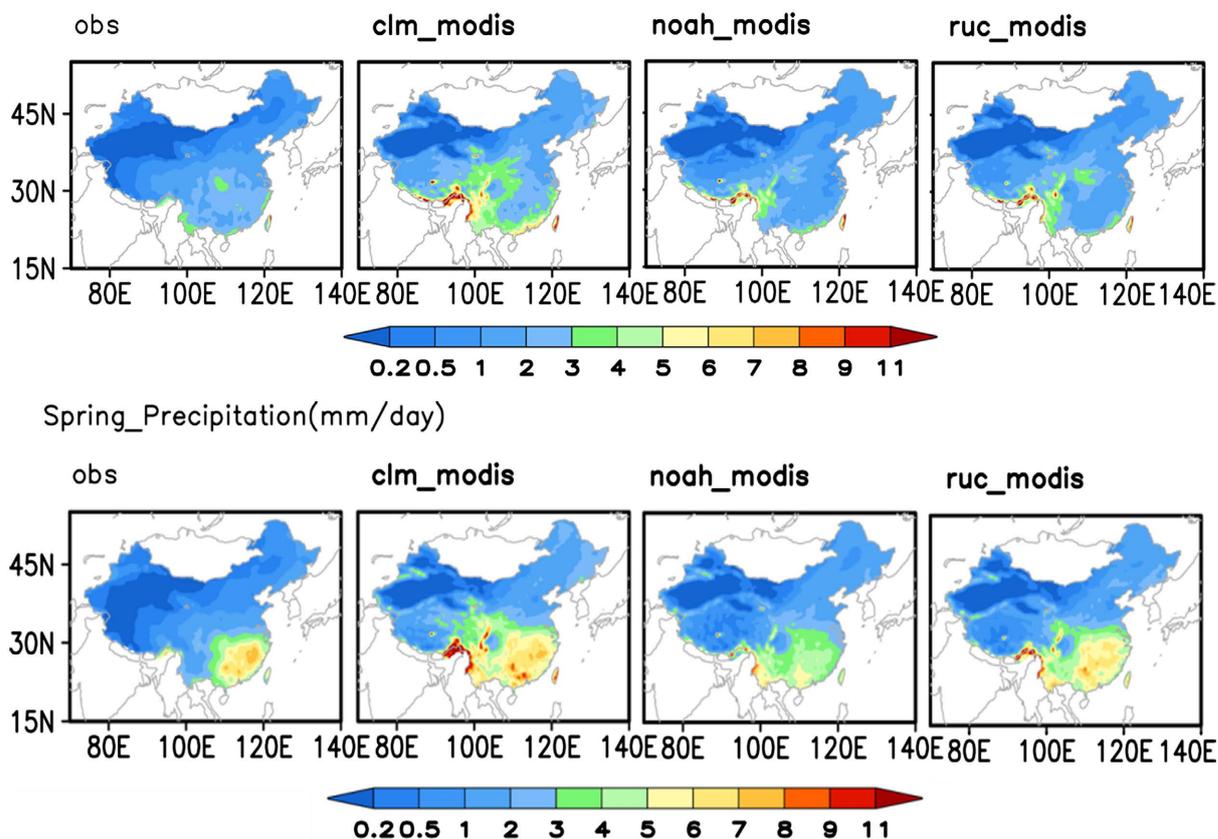


Figure 4. Distribution of total precipitation  
图 4. 总降水分布

WRF 模式对季节降水空间分布形态具有一定的模拟能力，由季节空间分布，图 5 中可以看出东南部降水普遍偏多，西北(新疆地区)偏少，三个模式中 CLM 的偏差相对最大。冬季降水偏差的空间分布与夏季相反，东南偏少，西北偏多，比较而言 RUC 模拟效果较为可靠。





**Figure 5.** Seasonal average spatial distribution of precipitation from observation and model data in China

**图 5.** 中国地区观测和模式资料降水季节平均空间分布

分析典型区域上不同陆面过程模块模拟的季节 - 年均温度降水与观测的偏差，我们可以看出在西北地区三个陆面模式中 NOAH 与观测的偏差是负值，NOAH 模拟温度偏低，春夏秋三个季节 CLM 模拟与观测的偏差比 RUC 小，CLM 模拟温度比 RUC 偏低，在冬季和年均温度 RUC 模拟与观测的偏差最小，RUC 模拟温度跟观测接近。西北地区模块模拟降水与观测的偏差来看，CLM 模拟与观测的偏差是正值，CLM 模拟降水偏高。NOAH 模拟降水比其他两个路面过程相对而言接近与观测。

而华东地区不同陆面过程模块模拟季节 - 年均温度与观测的偏差来看，还是 NOAH 模拟与观测的偏差是负值，NOAH 模拟的偏低，CLM 和 RUC 模拟与观测的偏差没有很大的差值。模块模拟降水与观测的偏差来看，春季和夏季 CLM 模拟与观测的偏差为负值，CLM 模拟的偏低。而秋季，冬季和年均中 NOAH 模拟的偏低。

### 3.2. 净辐射

太阳辐射的变化不只发生在大区域内，在小范围内同样会表现出不同的变化趋势。我国许多研究者利用不同的方法对我国的华东地区，西北地区 and 新疆地区等地面太阳辐射变化情况进行了分析[12]。

统计中国地区 10 年(1996~2005)的季节和多年年平均地表净辐射资料，所有资料中净辐射表现出由北向南增加的格局，应该与不同纬度所接受太阳辐射不同以及由土壤湿度和植被覆盖分布引起的反照率的空间分布有关系。净辐射的影响包括云覆盖，纬度，海拔高度和植被覆盖度等。观测资料的极大值在南部，而陆面模式的极大值基本都是分布在东部，可以看出，CLM 模拟净辐射偏低，而 NOAH 和 RUC 模拟的有点偏高。

净辐射无论是实测资料还是通量产品都呈现夏季为最高值的年变化。北方半湿润区主要下垫面是农田和林地, 相对于干旱区广泛的荒漠和草原来说, 较低的反照率导致较大的地表净辐射, 并抵消而且超过了半湿润区季风期较多云量削减了到达地表太阳辐射的影响。

### 3.3. 地表感热和地表潜热

统计中国地区 10 年(1996~2005)年平均, 夏季和冬季平均的中国地区地表感热的观测和三个陆面过程模式的结果。总体来看, 几种通量产品的感热均能反映出合理的空间分布和季节变化规律, 具有较好的一致性。实测资料与陆面过程产品的感热都表现出东南向西北增加的趋势, 西北荒漠区和青藏高原西部呈现最大值。荒漠地区地表土壤湿度很低, 可蒸发的水量很少, 因此净辐射基本上全部转化为感热, 形成了夏季陆地上的热垫; 在冬季, 各资料的感热表现出相似的空间分布型, 均呈现出由北向南增加的特点, 其中东北和西北是感热的低值区, 一些地区感热为负, 表现为冷源, 而冷源的范围在各通量产品的差别较大。

从观测数值上看地表感热最大处于西北地区数值达到  $60 \text{ Wm}^{-2}$ , Noah 模式的数值接近于观测数据, 而 CLM 模式和 RUC 模式的数值远远超过了观测数值。不同季节对比来看, 在夏季, 感热在整个北方区域基本上都高于其他季节。CLM 和 RUC 模拟感热相对而言比较偏高, NOAH 模拟跟实测资料接近。

前人应用气候模式(曹富强等, 2014)的研究表明, 华南地区夏季 7 月的感热普遍在  $20 \text{ Wm}^{-2}$ , 而在冬季 1 月则达到  $50 \text{ Wm}^{-2}$ , 这与平常夏季比冬季感热要大的直观印象并不相同。在冬季 CLM 和 NOAH 模拟感热偏低, 而 RUC 模拟的偏高。

但同时, 在数值上有较大的差异, 三种离线陆面模式结果总体上要大于再分析资料。由于大气强迫场相同的缘故, 虽然 CLM 和 NOAH 陆面模式具有相同的强迫场, 但在西北地区 NOAH 呈现出更大的负值分布, 可见不同陆面模式内部的物理框架和参数化也会影响感热的模拟。

当我国华北及西北部分地区的下垫面土壤为沙漠时, 虽然地面吸收的太阳辐射较少, 但由于其热容量较小, 使土壤温度较高, 相应的地表面向大气输送的感热通量数值较大, 近地层气温较高。而在下垫面土壤为沃土时, 情况正好相反。同时由于两种土壤的热力参数的差异, 使得土壤热通量差别较大, 沃土的土壤热通量为沙漠的两倍左右。这一点具有重要的气候学意义。因为土壤热通量较大时, 土壤中可以贮存较多的热量, 使得土壤具有较大的热惯性, 从而对后期地气系统的能量平衡产生重要的影响。

中国地区 10 年(1996~2005)多年年平均, 夏季和冬季平均地表潜热空间分布来看, 可以看出潜热由西北向东南逐渐增大, 并表现出与降水相似的空间分布, 反映出地表通量受到地表干湿程度的强烈制约。从多年年平均图看, 西北地区是低值中心, 最小值由  $-10 \text{ Wm}^{-2}$ , 东北和华南地区为高值中心, 最大值由  $80 \text{ Wm}^{-2}$ 。

我国近海海域月平均潜热通量在冬季(1 月)出现最大值, 在东海和日本海各有一极大值区, 东海高值区的值为  $250 \text{ Wm}^{-2}$ , 日本海高值区为  $200 \text{ Wm}^{-2}$ , 都高于热带太平洋观测的潜热通量。在夏季(7 月)潜热通量最低, 在黄海和日本海为潜热通量最低值区, 中心值为  $25 \text{ Wm}^{-2}$ 。冬季(1 月)在我国大陆除沿海地区和北纬  $30^\circ$  以南地区外, 广大北方地区潜热通量都接近于零。夏季(7 月)在大陆地区有一西南 - 东北走向的潜热通量高值带, 其值为  $125 \text{ Wm}^{-2}$ 。

夏季潜热在中国区域表现为西北向东南增加的趋势, 与感热的分布型是相反的, 而与土壤湿度的分布相同。潜热极低值在西北沙漠地区, 不超过  $20 \text{ Wm}^{-2}$ , 极大值分布在华南地区, 超过  $100 \text{ Wm}^{-2}$ ; 冬季广大的北方蒸发很弱, 而南方略强。而在东南地区, 较大的土壤湿度使地表吸收的辐射能更多的转化为潜热, 因此各资料反映的夏季感热空间分布型是合理的。

### 3.4. 波文比

波文比 - 能量平衡法是计算近地层湍流热通量的常用方法, 是由 Bowen (1926) 首先提出的。它以地表能量平衡为基础, 需要地面以上两个高度间的气温差和水汽压差的观测。波文比法简单实用, 适用于

低矮植被下垫面(Denmead and McIlroy, 1970), 已经广泛用在农田和草原的热量输送和蒸散发观测中。波文比仪广泛分布在美国大气辐射监测网络中(Cook, 2007), 已经累积了超过 10 年的感热和潜热观测资料。

这种方法简单易行, 但存在不少缺点。在大气层结特别稳定或不稳定时, 感热和潜热总体输送系数差异较大, 这种情况下二者相等的初始假定难以满足(Angus and Watts, 1984)。此外, 波文比法需要高精度的观测输入, 对气温差, 湿度差和可利用能量的误差都非常敏感(刘鹏飞等, 2010; 刘树华等, 2009)。当波文比接近-1 时, 计算结果变得很不稳定, 热通量计算值也不准确。在夜晚, 会出现大量的跳动和虚假峰值, 因此夜晚计算值需慎用(刘鹏飞等, 2010)。另外, 波文比法还需要均一理想的下垫面条件, 没有平流能量输送和植被等地表以上热存储, 以保证地表能量平衡。

波文比为地表感热与潜热之比, 从通量角度可以反映局地气候湿润程度。在地表能量平衡中, 由于土壤热通量比较小, 在年循环中可以忽略不计, 因此感热与潜热之和约等于净辐射, 波文比可以反映出净辐射在二者之间的分配情况。土壤水热性质, 植被类型和覆盖度均决定了下垫面能量的分配, 波文比是这种复杂分配情况的一种综合反映。

分析西北地区和华东地区的波文比, 从季节变化的角度, 西北地区大体上冬季的波文比小于夏季, 比 RUC 模拟相比其他再分析资料, 陆面模式将更多的净辐射分配给感热。在西北地区, 从年平均来看, 离线陆面模式中 NOAH 模式将更多的净辐射转化为感热, 最低的是 RUC 模式。在华东地区从季节变化角度分析, 大体上冬季的波文比大于夏季, 除了实测资料, 路面模式产品将更多的净辐射分配给感热。在华东地区, 从年平均来看, 不同资料能量分配的差异则相对较小。其中 RUC 模式将更多的净辐射转化为感热, 地表能量分配很大程度上受到各资料陆面模式物理过程参数化方案的影响。从波文比的角度来看, 离线陆面模式产品相对于再分析资料将更多的地面能量分配给感热。

#### 4. WRF 对我国典型地区地表能量通量时间演变的模拟能力的检验

北方通量数据的基础上, 现有的通量数据集是否能反映中国北方通量一致的年际变化以及新构建的通量数据集变化趋势如何, 都非常值得关注。为了对比各数据集地表热通量的时间变化趋势, 将它们各自的平均值去掉, 得到了中国北方不同数据集四个季节和年平均的地表热通量距平年际变化。很明显, 4 种数据集的年际变化曲线各不相同。其他数据集基本上能反映出较为一致的年际变化, 尤其是在夏季和秋季, 不过在年代际尺度上还存在一定的差异。由于地表通量在季节和年际尺度变化上更显著, 而年代际尺度上差异可能没有那么显著, 因而小的变化趋势不容易准确的表现出来, 因而地表通量集精度的提高对年代际及更大时间尺度的趋势变化非常重要。

##### 4.1. 季节变化

感热产品基本都能抓住季节变化型, 但数值上存在明显差异, 反映出了模式产品对感热模拟的不确定性, 这种不确定性在不同站点均表现的很明显。另外, 模式之间输出的感热差异随时间变化有所不同, 在北方夏季差异最大, 冬季则比较一致。在西北夏季, CLM 的感热甚至能高于 ERA-Interim。总体上再分析资料的感热要小于离线陆面模式。与潜热不同, 感热和净辐射无论是实测资料还是通量产品都呈现夏季为最高值的季节变化, 并且大多数数据集也能准确把握峰值出现的时间。

对于我国西北地区 WRF 有一定的模拟能力。感热和净辐射无论是实测资料还是通量产品都呈现夏季为最高值的季节变化。由实测资料中我们可以看出净辐射大小为约为  $140 \text{ Wm}^{-2}$ , 由求净辐射的公式:  $RN = G + \text{HFx} + \text{LH}$  感热, 潜热和加上 G 就得到净辐射大小。陆面通量产品中, CLM 的净辐射最小, 而 CLM 模拟感热偏高, 模拟潜热跟观测差不多。RUC 模拟净辐射, 感热, 潜热都比观测偏高很多。NOAH 模拟净辐射比其他两个比较接近与观测, 在冬春季 NOAH 模拟感热比观测偏低, 夏秋季比观测偏高, 对于潜

热模拟偏低。对于华南地区 WRF 模式也有一定的模拟能力，华南地区的潜热通量大于西北地区。潜热和感热表现相互夏季最高的季节变化。在实测资料中净辐射大小为  $140 \text{ Wm}^{-2}$ ，感热和潜热大小分别约为  $20 \text{ Wm}^{-2}$  和  $100 \text{ Wm}^{-2}$ 。通量产品中 CLM 模拟的净辐射最小约为  $70 \text{ Wm}^{-2}$ ，而 CLM 模拟的潜热已经超过了  $120 \text{ Wm}^{-2}$ ，感热也在约为  $40 \text{ Wm}^{-2}$  左右，与观测资料不一致。NOAH 模拟的净辐射约为  $200 \text{ Wm}^{-2}$  左右，NOAH 模拟感热，潜热之和跟净辐射差不多。RUC 模拟与观测相比偏差很多，对感热潜热净辐射模拟的都偏高。

## 4.2. 年际变化

对现有的通量数据集在平均年变化和空间分布等常规气候态方面进行了分析。由于气候变化主要反映在年际变化以及更长时间尺度的气候要素的变化上，因而人们很关心地表通量数据集的年际变化及更长时间尺度的趋势变化，这对于从陆面过程角度理解气候演变具有重要作用。

研究(Jimenez *et al.*, 2011)表明，季节变化对不同产品的相关程度有很大贡献，若去掉季节变化趋势，那么产品之间的相关度会有所降低，由此可见不同通量数据集之间的年际变化趋势的一致性和差异性在未来关注的重点。

分析西北地区不同陆面过程模块模拟与观测的年际变化，对于西北地区有实测资料中看出地表感热大小在  $40 \text{ Wm}^{-2}$  左右，由 NOAH 模拟的偏低，但是最接近与观测资料，CLM 和 RUC 模拟的都偏高。西北地区地表潜热比较第在  $20 \text{ Wm}^{-2}$  左右，CLM 模拟最接近与观测，NOAH 模拟的偏低而 RUC 模拟的远远超过了观测资料。净辐射大小由实测资料中看出是约在  $60 \text{ Wm}^{-2}$  左右，NOAH 模拟的最接近，RUC 模拟的偏高而 CLM 模拟的很低。

对于华东地区地表能量平衡变化图中看出，在华东地区潜热通量比感热通量大，由实测资料中看出潜热大小在  $60 \text{ Wm}^{-2}$  左右，RUC 模拟感热潜热，净辐射都比实测资料偏高。CLM 模拟净辐射偏低，而模拟感热潜热都偏高。NOAH 模拟净辐射比实测资料偏高，模拟潜热跟实测资料差不多，模拟感热比实测偏高。

## 4.3. 不同模块地面能量平衡的差别

计算西北地区和华东地区不同陆面过程模块模拟的季节平均地面能量平衡的差值，CLM 与 NOAH 路面过程的差值和 RUC 与 NOAH 路面过程的差值分析。在西北地区 CLM 跟 NOAH 差值比较秋季净辐射差值最大为负值，夏季差值最小也是负值，所以 CLM 模拟净辐射比 NOAH 偏低。感热和潜热差值都是正值，所以 CLM 模拟比 NOAH 模拟偏高。对于华东地区地表能量平衡变化，CLM 与 NOAH 差值分析，净辐射变化都是负值，夏季差值最大为负值，在夏季 CLM 模拟净辐射比 NOAH 偏低。春季和冬季两个路面产品的差值感热是负值，夏秋是正值，春冬季 CLM 模拟比 NOAH 偏低，而夏秋季 CLM 模拟的偏高。

在西北地区路面过程 RUC 与路面过程 NOAH 的偏差分析，感热潜热，净辐射都是为正值，RUC 模拟的比 NOAH 偏高。对于华东地区两个路面产品的偏差来看，秋季潜热是负值，在秋季 RUC 模拟偏低，净辐射感热在全部季节都是正值，RUC 模拟的高。

分析西北地区和华东地区不同路面模块模拟的年均地面能量平衡的差值的变化。由西北地区地表能量平衡的变化 CLM 模拟与 NOAH 模拟的差值来看，净辐射为负值，而感热潜热都是正值，CLM 模拟净辐射偏低，而模拟感热潜热偏高，跟观测资料的不一。对于华东地区跟西北地区的一样。由图 RUC 模拟与 NOAH 模拟的差值来看，净辐射是正值，感热潜热也是正值，对于潜热 RUC 模拟的偏高。华东地区的年均地表能量平衡的变化净辐射为正值，RUC 模拟净辐射偏高。感热潜热也是为正值，RUC 模拟偏高。由年均地面能量平衡图中我们可以看出，西北地区的年变化趋势大于华东地区。

图6中  $Eg.RUC < Eg.NOAH$ ，西北地区冬季两个陆面过程的  $Eg$  差最小，夏季最大。华东地区则秋季两个陆面过程的  $Eg$  差最小，夏季最大。土壤热通量的年变化趋势是夏季大冬季小，西北地区年变化大，华东地区年变化小；具有空间分布，四季西北大于华东；冬季北方土壤热通量为负，土壤损失热量；也就是 RUC 的土壤能量损失较 NOAH 的大。参数中，RUC 的热传导率大(传导快)，热容量小。

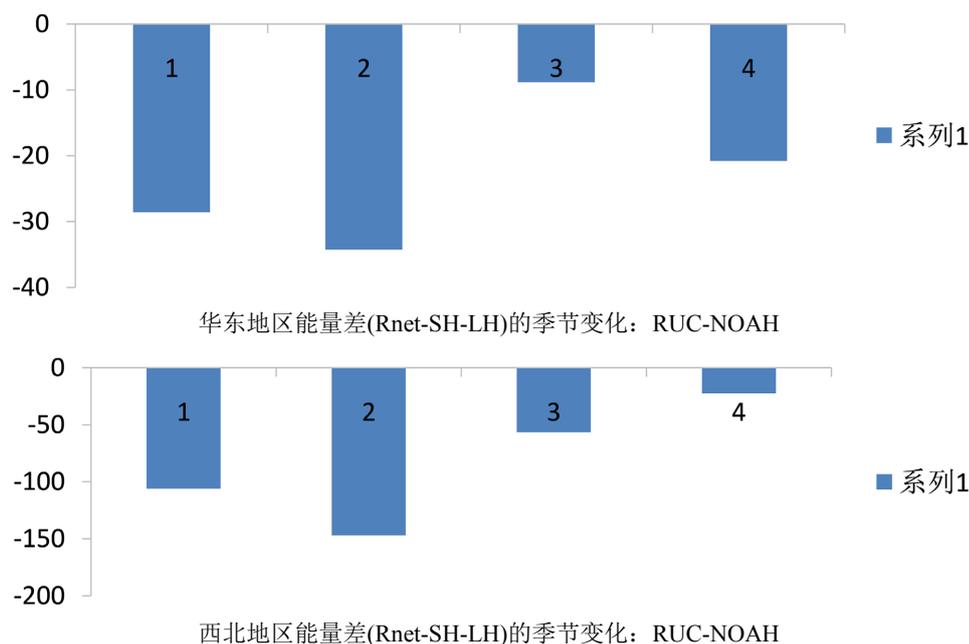


Figure 6. Seasonal variation of energy difference in northeast and northwest China  
图6. 东北地区, 西北地区能量差的季节变化图

## 5. 总结

### 5.1. 结论

1) WRF 模式能较准确地模拟中国地区区域地面气候, 但模式中不同陆面过程模块的选择会影响模式模拟性能, 比较而言, CLM 使得地面气候场偏冷偏干。

2) WRF 能较准确地再现观测的地表能量通量的空间分布; 与观测比较, 所有陆面过程模块都存在高估。对于感热通量 CLM 和 RUC 模拟的偏高, 模式模拟潜热通量相对而言 RUC 模拟的偏高, CLM 模拟净辐射偏低, 而 NOAH 和 RUC 模拟的有点偏高。

3) WRF 模式能较准确地模拟典型气候区地表能量平衡的季节变化; 对于西北地区陆面通量产品中, CLM 模拟净辐射偏低, 而模拟感热偏高。RUC 模拟净辐射, 感热, 潜热都比观测偏高很多。NOAH 模拟净辐射比其他两个比较接近与观测, 在冬春季 NOAH 模拟感热比观测偏低, 夏秋季比观测偏高, 对于潜热模拟偏低。对于华南地区 CLM 模拟净辐射偏低, 模拟感热潜热偏高。NOAH 模拟净辐射, 感热偏高, 冬季潜热模拟的偏低。RUC 模拟净辐射, 感热潜热都偏高。

4) 能量收支是决定区域气候的重要因子。如 RUC 模块模拟的地面温度偏高, 湿度偏大, 蒸发强烈, 表层土壤湿度的损失偏多, 这导致整层大气衰减大, 到达地表短波辐射偏少而长波辐射偏多, 净辐射偏多。地表能量分配中的潜热, 感热增加多。较多的地表向上能量可能加剧局地对流, 导致降水偏多和地面温度增高。

5) 陆面过程模块模拟地表能量平衡的性能取决于模块的地表物理参数(如地表反照率, 土壤热容量, 土壤水热传导率等)对冰雪过程的刻画等。

## 5.2. 未来工作展望

需进一步分析：地表水分(土壤水含量、径流、蒸发)的变化，进一步联系地表水 - 热通量变化与边界层结构的关系，确定不同陆面过程模块影响区域气候的可能机制。

## 参考文献

- [1] 李宏宇. 中国大陆地区陆面能量交换及其对大尺度气候变化响应的初步分析[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2015.
- [2] 胡伯彦, 王淑瑜. 区域气候模式对中国地区 1982-2001 年地面温度和降水模拟能力的检验[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(3): 318-329.
- [3] 丁一汇, 张晶, 赵宗慈, 等. 一个改进的陆面过程模式及其模拟试验研究第二部分: 陆面过程模式与区域气候模式的耦合模拟实验[J]. 气象学报, 1998, 56(4): 385-400.
- [4] 张耀存, 钱永甫. 陆地下垫面特征对区域能量平衡过程影响的数值试验[J]. 高原气象, 1995, 14(3): 325-333.
- [5] 周明煜, 李诗明, 钱粉兰, 等. 我国大陆地区和近海海域能量收支分布及其季节变化的数值模拟研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(3): 319-329.
- [6] 曹富强, 丹利, 马柱国. 区域气候模式与陆面模式的耦合及其对东亚气候模拟的影响[J]. 大气科学, 2014, 38(2): 322-336.
- [7] 陈海山, 熊明明, 沙文钰. CLM3.0 对中国区域陆面过程的模拟实验及评估 I: 土壤温度[J]. 气象科学, 2010, 30(5): 621-630.
- [8] 周锁铨, 代刊, 陈涛, 屠其镁, 陈万隆. 陆面过程模式的改进及其检验[J]. 气象学报, 2003, 61(3): 275-290.
- [9] 陈莹莹, 施建成, 杜今阳, 蒋玲梅. 基于 GLDAS 的中国区地表能量平衡数值试验[J]. 水平科学进展, 2009, 20(1): 25-31.
- [10] 曾剑. 中国北方地区陆面过程特征和参数化及其与气候关系[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2011.
- [11] 史学丽. 陆面过程模式研究简评[J]. 应用气象学报, 2001, 12(1): 102-112.
- [12] 齐月, 房世波, 周文佐. 近 50 年来中国地面太阳辐射变化及其空间分布[J]. 生态学报, 2014, 34(24): 7444-7453.