氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

农田灌溉过程与土壤参数更新对中亚费尔干纳盆地WRF/Noah模拟精度的提升

丁娜娜 胡召玲 张学珍

Improvement of WRF/Noah Simulations for the Fergana Basin in Central Asia Based on Irrigation Schemes and Soil Data Update

DING Nana HU Zhaoling ZHANG Xuezhen

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20074

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

上海市土地利用资料优化方案对WRF模式模拟高温过程的影响

Influence of Land Use Data Optimization Schemes on WRF Model Simulations of High Temperature Processes in Shanghai

气候与环境研究. 2020, 25(4): 443 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20013

模式云参数化方案对一次深对流系统模拟的验证和改进

Verification and Improvement of Cloud Microphysics Parameterization Schemes in WRF Model for Simulation of a Deep Convection System

气候与环境研究. 2019, 24(5): 626 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19001

北京地区一次空气重污染过程的气象条件模拟参数化敏感性试验

Sensitivity Experiments of Meteorological Parameterization Schemes for WRF Model during a Heavy Air Pollution Episode in Beijing

气候与环境研究. 2020, 25(3): 253 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19053

土壤数据集对全球陆面过程模拟的影响

Impact of Soil Datasets on the Global Simulation of Land Surface Processes

气候与环境研究. 2020, 25(5): 555 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20025

基于HRCLDAS/CLM陆面数据同化系统的青藏高原地区土壤湿度模拟研究

Simulation Analysis of Soil Moisture in the Tibetan Plateau Based on the HRCLDAS/CLM Land Data Assimilation System

气候与环境研究. 2018, 23(4): 442 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17139

秸秆焚烧对区域城市空气质量影响的模拟分析

Impact of Crop Straw Burning on Urban Air Quality Based on WRF-Chem Simulations

气候与环境研究. 2017, 22(2): 149 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16024

关注微信公众号，获得更多资讯信息

丁娜娜, 胡召玲, 张学珍. 2021. 农田灌溉过程与土壤参数更新对中亚费尔干纳盆地 WRF/Noah 模拟精度的提升 [J]. 气候与环境研究, 26(2): 202−216. DING Nana, HU Zhaoling, ZHANG Xuezhen. 2021. Improvement of WRF/Noah Simulations for the Fergana Basin in Central Asia Based on Irrigation Schemes and Soil Data Update [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (2): 202−216. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20074

农田灌溉过程与土壤参数更新对中亚费尔干纳盆地 WRF/Noah 模拟精度的提升

丁娜娜[1, 2] 胡召玲[2] 张学珍[1, 3]

1 中国科学院地理科学与资源研究所，中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室，北京 100101
2 江苏师范大学，江苏徐州 221116
3 中国科学院大学，北京 100049

摘 要 通过中亚费尔干纳盆地 2007～2011 年气候的模拟试验，揭示了新增农田灌溉过程与更新土壤参数对 WRF（Weather Research and Forecasting）/Noah 模式模拟精度的提升作用。通过对比标准版本与嵌入灌溉过程参数化方案后的 WRF/Noah 模式的模拟结果，研究发现农业灌溉提升了土壤含水量，导致地表蒸发增强，潜热增加，感热减少，致使近地层大气降温、增湿，这一效应降低了 WRF/Noah 模拟的暖、干偏差，模拟 2 m 气温和大气比湿均方根误差分别由 6.52°C 降低至 5.81°C，由 1.66 g/kg 降低至 1.13 g/kg。进而针对 WRF 默认配置的费尔干纳盆地内土壤数据精度欠佳的问题，再利用国际土壤参比与信息中心（ISRIC）数据（主要是粉砂粘壤土和粉砂壤土）替换了 WRF 默认的数据（主要是粘土和壤土），降低了土壤凋萎系数，使得有效土壤水增多，缩小了灌溉需水量的模拟误差，并使得蒸散发进一步增强，潜热增多，感热减少，导致近地层降温、增湿，进一步降低了 WRF/Noah 模拟的暖、干偏差，模拟温度、湿度的均方根误差分别由 5.81°C 降低至 5.46°C，由 1.13 g/kg 降低至 1.08 g/kg。上述结果表明：充分农业灌溉对陆面过程产生影响，以及采用高精度的土壤数据能够显著提高 WRF/Noah 模式在中亚费尔干纳盆地的模拟精度。

关键词 WRF/Noah 模式 灌溉 土壤质地 模拟误差
文章编号 1006-9585(2021)02-0202-15 **中图分类号** P461.4 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20074

Improvement of WRF/Noah Simulations for the Fergana Basin in Central Asia Based on Irrigation Schemes and Soil Data Update

DING Nana[1, 2], HU Zhaoling[2], and ZHANG Xuezhen[1, 3]

1 *Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Beijing* 100101
2 *Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu Province* 221116
3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049

收稿日期 2020-06-12；**网络预出版日期** 2020-11-15
作者简介 丁娜娜，女，1994 年出生，硕士研究生，主要从事区域气候模拟研究。E-mail: dnn1994@163.com
通讯作者 张学珍，E-mail: xzzhang@igsnrr.ac.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41790424，中国科学院战略性先导科技专项 XDA20020202，中国科学院前沿科学重点研究项目 QYZDB-SSW-DQC005
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41790424), Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA20020202), Key Research Program of Frontier Sciences from CAS (Grant QYZDB-SSW-DQC005)

Abstract　This study aims to identify the improvements of WRF/Noah simulations for the Fergana basin in central Asia resulting from the implementation of an irrigation scheme and update of soil data in climate simulations for the period of 2007–2011. First, simulations with the WRF/Noah model within which an irrigation scheme was implemented were compared with those involving the default WRF/Noah model. The results indicated that the irrigation enhanced soil moisture and thus intensified evapotranspiration and latent heat and reduced sensible heat; under these conditions, cooling and wetting effects occurred on surface air. The warming and drying biases were partly corrected. The root mean squared error (RMSE) of air temperature at 2 m decreased from 6.52°C to 5.81°C. Meanwhile, the RMSE of the specific humidity of air at 2 m decreased from 1.66 g/kg to 1.13 g/kg. Second, on the basis of the implemented irrigation scheme, the soil texture and hydraulic parameters were updated with the data from the International Soil Reference and Information Centre. Clay and loam were replaced with silty clay loam and silty loam for the plain area of the Fergana basin. Hence, the wilting point declined, and the amount of available water in the soil increased. The bias of the water demand of the simulated irrigation was partly corrected. Moreover, the evapotranspiration and latent heat intensified, and the sensible heat decreased. Hence, intensified cooling and wetting effects were observed on surface air. The warming and drying biases were corrected further. Under these conditions, the RMSE of air temperature at 2 m decreased from 5.81°C to 5.46°C whereas, that of the specific humidity of air at 2 m decreased from 1.13 g/kg to 1.08 g/kg. These findings suggest that implementing an irrigation scheme and updating soil data may improve the performance of the WRF/Noah model for the Fergana basin in central Asia.

Keywords　WRF/Noah model, Irrigation, Soil texture, Modelling bias

1　引言

下垫面是气候系统的重要组成部分，为大气提供能量、水分、气溶胶/沙尘，同时通过动力摩擦改变近地层的风速、风向与湍流，并通过生物地球化学过程影响大气的 C、N 等元素组成。陆地约占地球总面积的 1/3，是下垫面的重要组成部分，发生于陆面的辐射收支、能量分配、动力摩擦、碳源汇等过程可显著影响天气和气候，具有重要的气象学意义（Bonan and Doney, 2018; Forzieri et al., 2020）。作为陆面过程的重要组成部分，土壤水文过程对近地层大气温度和湿度的影响备受关注，因为土壤的蒸发、入渗过程是地表水量平衡和能量平衡的重要组成部分，是气候变化与水文水循环耦合的关键过程，同时土壤水分又深受人为灌溉活动的调控，成为链接人类活动与天气、气候的重要纽带。大量研究指出包括灌溉、蒸发在内的土壤水文过程对区域天气、气候具有极为重要的影响（Yang et al., 2017; Zhang et al., 2017）。土壤水文过程的精度成为影响陆面模型乃至气候系统模式模拟精度的重要因素（Ficklin et al., 2012; Bierkens, 2015; Huang et al., 2019）。

WRF（Weather Research and Forecasting）模式是美国国家大气科学研究中心（NCAR）联合多个机构共同研制的新一代中尺度气象模式，其高等研究版（Advanced Research WRF）被广泛应用于天气和气候模拟研究（高笃鸣等, 2016; Zhang et al., 2017; Qiu et al., 2017; 许鲁君等, 2018; Pithani et al., 2020）。尽管 WRF 模式保持了较高的更新频率，并且每次更新均不同程度的完善物理过程参数化方案，但是直到最新的 4.0 版本，其内嵌的主要陆面模型，如 Noah、Noah-MP 仍缺失农田灌溉过程，造成 WRF 对灌溉农业区的模拟误差较大。为此，大量研究根据需要自行加入了灌溉过程，并发现加入灌溉过程之后 WRF 的模拟精度大幅提升（Kioutsioukis et al., 2016; Zhang et al., 2017, 2020）。

基础地理数据集是 WRF 模式的重要组成部分，与 WRF 模式代码一并公开发布。其中有两套可供用户选用的土壤类型数据集，一个是美国农业部的 STATSGO 土壤数据集（Miller and White, 1998 年），另一个是联合国粮食及农业组织（FAO）发布的土壤数据集（Dy and Fung, 2016）；各类土壤的水文学参数（饱和含水量、凋萎系数等）来自美国 23 个州共 35 个采样点土壤样品数据的分析结果（Cosby et al., 1984）。先前有研究发现，因其部分地区反映的土壤类型及相匹配的水文参数与实际相差较大，对模拟结果造成了较大的偏差（Bastidas et al., 2006; Kishné et al., 2017; 卢冰等, 2019）。因而，在开展区域气候模拟研究中，有必要采用本地高精度的土壤数据，以降低模拟偏差。

由此来看，在应用 WRF 开展灌溉农业区气候模拟时，新增农田灌溉过程并更新土壤数据将有助

于降低模拟误差。中亚费尔干纳盆地是中亚典型农业区，在 1300 多千万的居民中，从事农业生产的占 70%。该地区属于干旱半干旱气候，年降水量为 109～502 mm，而蒸散量高达 1133～1294 mm，因而灌溉成为该地区农业发展的必要支撑（Ibrakhimov et al., 2018）。前苏联在盆地内修建了庞大的水利系统，灌溉土地约为 1.653×10^8 km^2，绿洲灌溉用水占盆地用水的 90%（Conrad et al., 2013）。先前仅有少数大范围的区域气候模拟研究涵盖了这一地区（Huang et al., 2014; Ozturk et al., 2017），其中部分采用了标准版本的 WRF（Qiu et al., 2017），少有专门针对这一地区开展气候模拟研究。新增农田灌溉过程和更新土壤数据能否显著提高 WRF 模式模拟精度，知之甚少，这为进一步利用 WRF 模式开展区域气候变化预测造成了一定障碍。

在此背景下，本文拟通过敏感试验研究新增农田灌溉过程与更新土壤参数对中亚费尔干纳盆地 WRF/Noah 模拟精度的提升作用，以期为建立基于 WRF 模式的区域气候变化预测平台提供科学参考。

2　数据与方法

2.1　研究区概况

费尔干纳盆地位于乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦的交界处（40°15′N～41°50′N，70°30′E～73°15′E），呈狭长形，面积 22000 km^2（图 1），是前苏联时期重点发展的棉花生产基地，是当前中亚最重要的农业地区之一。盆地北、东、南三面是山地，海拔较高，西部开口，地形总体呈东高西低的特征，农田主要分布于盆地平原，绝大部分归属于乌兹别克斯坦。盆地内有数十条河流，形成了中亚地区最为复杂的水网，其中锡尔河为干流，支流发源于北、东、南部山区，总径流量为 $170\sim330\times10^9$ m^3/a。前苏联时期在费尔干纳盆地修建的大费尔干纳、南费尔干纳和北费尔干纳等几条大灌渠将这些河流连接，形成了费尔干纳盆地庞大的水利系统，以支撑该地区大面积农田的灌溉。

2.2　试验设计

为研究新增农田灌溉过程与更新土壤参数对中亚费尔干纳盆地 WRF/Noah 模拟精度的提升作用，本文利用 WRF 模式（V4.0），开展了 3 组试验，

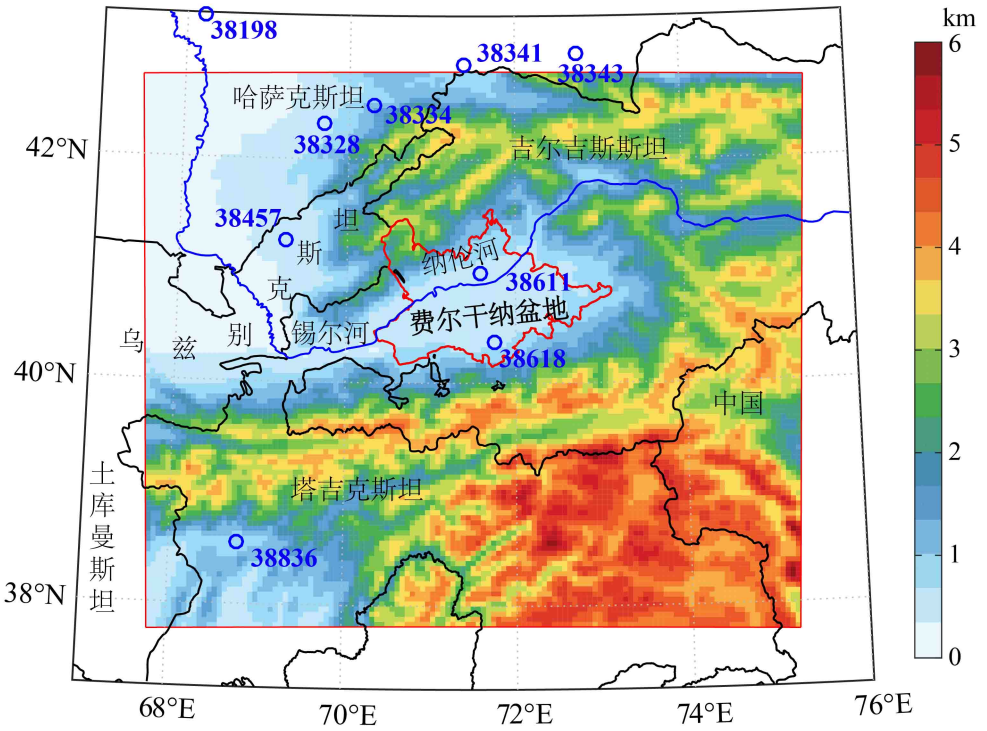

图 1　费尔干纳盆地地理位置（红色曲线包围的区域）、模拟区域空间范围（红色矩形）及其地形（填色）与气象站（蓝色空心圈，蓝色数字表示在 NOAA 气候数据集中的站点编号）

Fig. 1　Geographical position of Fergana basin (red polygon), the domain and terrain of simulation area (colored), and meteorology stations (blue circles, with blue numbers denoting the station ID in the NOAA climate dataset)

第一组是标准版本 WRF/Noah 模拟试验（以下称 NATU），第二组是嵌入灌溉过程参数化方案的 WRF/Noah 模拟试验（以下称 IRRG），第三组在第二组的基础上，更新土壤类型及相关参数，再进行模拟试验（以下称 IRRG_S）。除此之外的其它设置，3 组试验完全相同。其中，模拟区域中心点坐标为（40.3°N，71.5°E），东西方向 130 个网格，南北方向 110 个网格，网格大小为 5 km，区域范围完全覆盖费尔干纳盆地及周边山区（图 1），垂直方向 27 层。主要物理参数化包括：WSM6 微物理方案（Hong and Lim, 2006）、CAM3 辐射参数化方案（Collins et al., 2004）、YSU 行星边界层方案（Hong and Pan, 1996）以及 Noah 陆面模型（Chen and Dudhia, 2001）。

为了降低模式噪音及不同气候背景（年景）对研究结果的影响，本文采用“集合预报”的思想，每组试验进行了 2007～2011 年（连续 5 年）的气候变化模拟，最后的结果分析采用 5 年模拟结果的平均值。其中，2009 年、2010 年为多雨年，年均降水量为 389.30 mm，2007、2010 年为正常年，年均降水量为 355.09 mm，2008 年降水量较低，年均降水量为 302.29 mm。每组试验自每年 3 月 1 日 00:00（北京时间，下同）开始，于 11 月 30 日 18:00 终止。侧边界数据来自 NCEP/FNL 数据集，更新频率为 6 h 更新一次。

模拟试验利用 MODIS 的土地利用数据（MCD 12Q1_006 数据集；https://lpdaac.usgs.gov/[2020-01-10]）（Sulla-Menashe and Friedl, 2019）替换了 WRF 模式默认配置的土地利用数据，并开启了 WRF/Noah 的陆面次网格化功能，每个模式网格内的土地利用类型上限设置为 5 种。在 Noah 陆面模型框架下，绿色植被覆盖度是一个极其关键的参数，不仅用于计算植被蒸腾量的过程，而且还控制着整个模式物候期。本文基于 2009 年的 MODIS 归一化差值植被指数（NDVI）（MOD13A1_006 与 MYD13A1_006 数据集：https://lpdaac.usgs.gov/[2020-01-10]）（Didan, 2015），通过象元二分法（张学珍和朱金峰, 2013）计算了 WRF 模式网格间隔 8 d 的绿色植被覆盖度，并将其插值为日数据，替换了 WRF 的默认数据。

2.2.1　灌溉参数化方案

灌溉活动通常出现在一定干旱条件下，为此本文采用了动态灌溉方案，在土壤含水量低于一定阈值时才触发灌溉过程。具体地，参考农业技术准则，本文将田间持水量的 70% 作为触发灌溉的阈值（张建国和金斌斌, 2010）。同时，灌溉一般发生在白天，且主要灌溉方式是大水漫灌，短时间内土壤含水量达到饱和，因而本文的灌溉方案仅在当地太阳直射辐射大于 0 时才被激活，且在一个积分时步内，将土壤含水量增至饱和含水量。鉴于作物根层相对较浅，本文的灌溉方案只考虑了上面 3 层（0～40 cm）土壤的水分特征，灌溉方案的数学表达式如下：

$$I=\begin{cases}0, & \theta_t \geq 0.7\theta_S \\ (\theta_S-\theta_t)D, & \theta_t < 0.7\theta_S\end{cases} \quad (1)$$

其中，$\theta_t=\sum_{k=1}^{3}\theta_k d_k/D$，$D=\sum_{k=1}^{3}d_k$；$I$是灌溉需水量（单位：m），$\theta_S\theta_t$分别是田间持水量及 t 时刻上面三层平均的土壤含水量（单位：m^3/m^3），θ_k是土壤层 k 层在 t 时刻的土壤含水量（单位：m^3/m^3），d_k是第 k 层土壤的厚度，D 是上面 3 层土层总厚度（单位：m）。由于灌溉是费尔干纳盆地内农业发展的必要条件，几乎所有农田均依赖于灌溉，因而本文将盆地内所有农田均设定为灌溉地。本文采用 MODIS 土地利用数据（MCD12Q1_006 数据集），通过统计每个模拟网格中 500 m×500 m 大小的耕地象元的数量，计算出每个模拟网格内耕地面积的百分比（图 2）。经过与世界粮农组织（FAO）发布的全球灌溉面积数据对比（Siebert et al., 2013）（数据网址：http://www.fao.org/aquastat/en/geospatial-information/global-maps-irrigated-areas/latest-version[2020-01-10]），发现本文采用的灌溉面积百分比数据更符合实际情况，其依据是，在 FAO 发布的灌溉数据中，费尔干纳盆地所有网格的灌溉面积百分比统一为 94%，这一数值明显大于其耕地面积百分比，而且也未显示出耕地的空间差异。在模拟实验过程中，灌溉方案仅用于网格内的耕地。

2.2.2　土壤类型数据

本研究采用了国际土壤参比与信息中心（International Soil Reference and Information Centre，简称 ISRIC）发布的 USDA（SoilGrids250m-Texture class system）数据集。该数据集源自 ISRIC 开发的一个基于机器学习的全球土壤自动绘图系统，提供了 7 个标准深度（0、5、15、30、60、100 和 200 cm）的土壤特性、有机碳、容重、阳离子交换容量（CEC）、pH、土壤质地份数和粗碎屑，分辨率

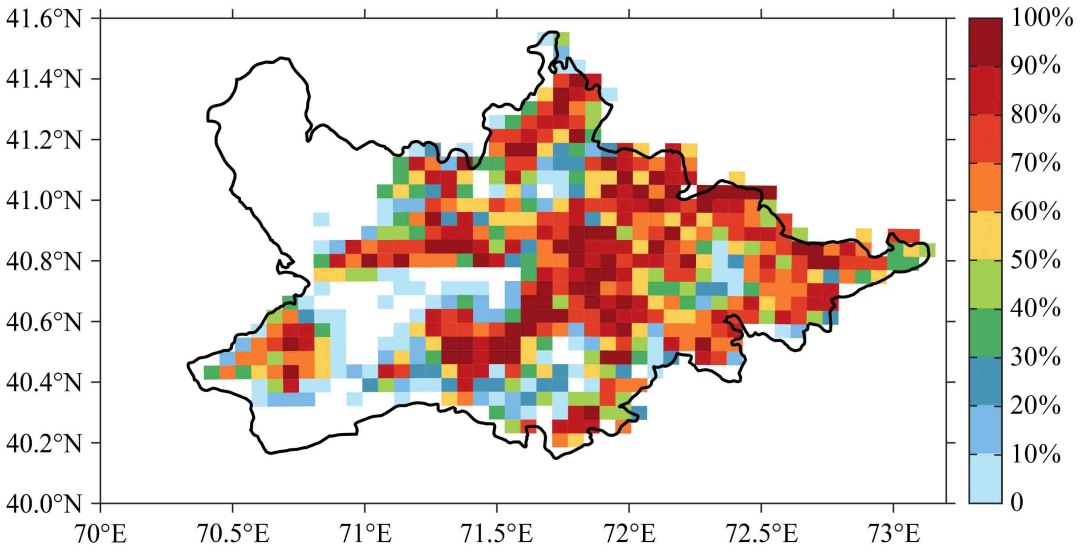

图 2 WRF 模式网格内费尔干纳盆地灌溉地面积百分比

Fig. 2 Irrigation cropland area fraction in the Fergana basin for each grid cell of WRF modelling

表 1 美国农业制土壤质地分类

Table 1 Soil texture classification of American agricultural system

编码	土壤质地名称	粘粒（土壤颗粒直径<0.002 mm）质量分数	粉粒（土壤颗粒直径0.002～0.05 mm）质量分数	砂粒（土壤颗粒直径0.05～2.0 mm）质量分数
1	粘土	55%～100%	40%～100%	0～40%
2	粉质粘土	80%～100%	40%～60%	40%～60%
3	粉质粘壤土	27%～40%	60%～73%	0～20%
4	粘壤土	27%～40%	60%～73%	20%～45%
5	粉沙土	0～12%	80%～100%	0～20%
6	粉砂壤土	0～27%	50%～89%	20%～50%
7	砂质粘土	35%～55%	0～65%	50%～100%
8	壤土	7%～27%	28%～50%	23%～52%
9	砂质粘壤土	20%～35%	0～28%	45%～100%
10	砂质壤土	15%～20%	0～50%	50%～70%
11	壤砂土	10%～15%	0～30%	70%～87%
12	沙土	0～10%	87%～100%	0～23%

为 250 m。土壤质地采用了美国农业部的分类系统（表 1）。

与 WRF 默认的土壤类型数据集相比，二者有明显差异（图 3）。在 WRF 默认的数据中，费尔干纳盆地区主要是粘土和壤土，其中粘土主要分布在研究区中部平原区，壤土主要分布在平原边缘。在 ISRIC 数据中，盆地内上面 4 层土壤（0～30 cm）类型相同，主要是粉砂粘壤土和粉砂壤土，其中粉砂粘壤土主要分布在盆地中央，粉砂壤土主要分布在南、北边缘地区。对于盆地以外的地区而言，WRF 默认的上面 3 层（0～40 cm）土壤类型主要是壤土，而 ISRIC 数据显示主要是粉砂壤土。鉴于更新后研究区的主要土壤类型是粉砂粘壤土和粉砂壤土，故本文针对 WRF-Noah 陆面模型的土壤参数中粉砂粘壤土和粉砂壤土的主要参数进行了更新（表 2），更新数据来自 Kishné et al.（2017）。

2.2.3 气象数据

地面气象观测数据是验证模拟结果的必要数据。由于研究区内的地面气象站观测数据较为匮乏，故本文采用 ERA5 再分析的 2 m 气温与比湿、土壤湿度及地表感热、潜热通量数据验证 WRF 模拟结果（数据网址：https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home[2020-01-10]）。ERA5 是第五代欧洲中尺度天气预报中心（ECMWF）的全球再分析数据集，

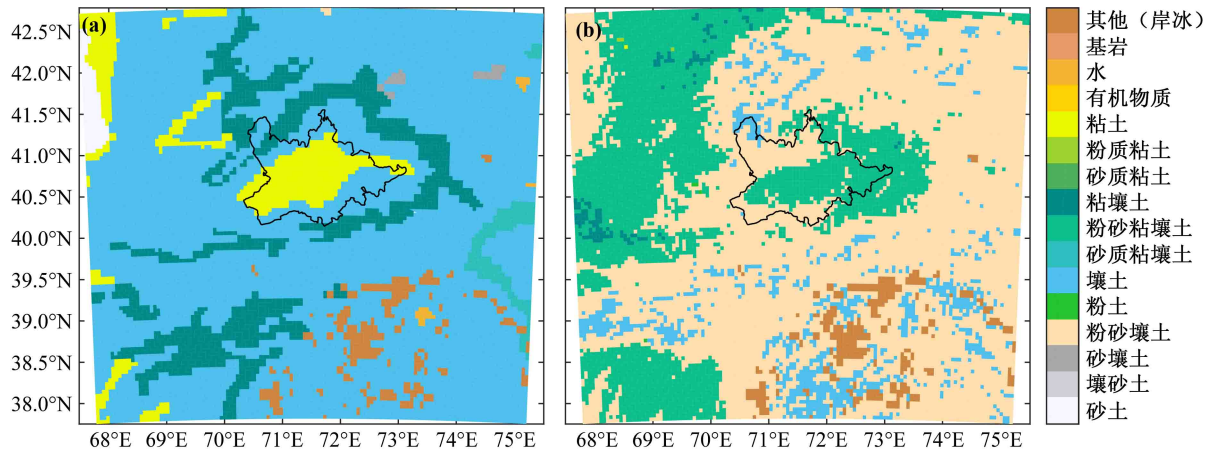

图 3　WRF 模式（a）默认及（b）更新后的土壤质地类型（黑色曲线包围区域表示费尔干纳盆地）

Fig. 3　Soil texture categories from the WRF—(a) default and (b) updated (black polygons denote the domain of the Fergana basin)

表 2　更新前后主要土壤类型的参数对比

Table 2　Comparison of the parameters of major soil types between default data and updated data

	土壤类型	BB	DRYSMC/ $m^3\ m^{-3}$	F11/ $m^2\ s^{-1}$	MAXSMC/ $m^3\ m^{-3}$	REFSMC/ $m^3\ m^{-3}$	SATPSI/ m	SATDK/ $m\ s^{-1}$	SATDW/ $m^2\ s^{-1}$	WLTSMC/ $m^3\ m^{-3}$	QTZ/ $g\ g^{-1}$
更新前	壤土	5.25	0.066	−0.327	0.439	0.329	0.355	3.38×10^{-6}	1.43×10^{-5}	0.066	0.40
	粘土	11.55	0.138	0.023	−2.138	0.412	0.468	9.74×10^{-7}	1.12×10^{-5}	0.138	0.25
更新后	粉砂壤土	5.72	0.023	0.162	0.456	0.303	0.399	2.2×10^{-6}	9.99×10^{-6}	0.123	0.25
	粉砂粘壤土	8.49	0.039	−1.118	0.457	0.350	0.517	1.48×10^{-6}	1.41×10^{-5}	0.212	0.10

注：BB表示水力函数中与水势和容积含水量有关的参数；DRYSMC表示停止表层蒸发的土壤含水量阈值；F11表示土壤热扩散系数或传导系数；MAXSMC表示饱和土壤含水量或土壤孔隙度；REFSMC表示田间持水量；SATPSI表示饱和基质电位或空气进入水电位；SATDK表示饱和水力传导度；SATDW表示饱和水力扩散系数；WLTSMC表示萎蔫点土壤含水量；QTZ表示石英含量。

时间跨度从 1950 年至今。本文采用的 ERA5 温度、土壤湿度数据网格大小为 0.1°，2 m 空气比湿、潜热通量和感热通量数据的网格大小为 0.25°。与 ERA-Interim 第四代再分析数据相比，ERA5 的集成预报系统模式（IFS）由 Cy31r2 升级到 Cy41r2，采用了 10 个集合成员的集合 4D-Var 资料同化方法。ERA5 吸收了更多的观测数据，并采用了 RTTOV-11 的卫星资料，适用于多种天气条件，与 ERA-Interim 采用的 RTTOV-7 的资料仅适用于晴空相比，大幅提升了数据量（朱景和袁慧珍, 2019）。

先前很多研究评估了 ERA5 再分析数据的适用性，结果都表明该数据与观测数据有较高的相关性，在缺乏观测资料的情况下，可以作为替代数据（支星和徐海明, 2013; 朱景和袁慧珍, 2019; Chen et al., 2019）。为进一步验证 ERA5 在本研究区的适用性，本研究利用（美国）国家海洋和大气管理局（NOAA）提供的费尔干那盆地周围仅有的 9 个站点（图 1）本文研究时段内的月均温数据（网址：https://www.climate.gov/maps-data/dataset/monthly-climatic-data-world-data-tables[2020-01-10]），计算了再分析数据与相应站点观测值的均方根误差，发现其最大为 5.39°C，最小值为 0.9°C，中位数为 2.9°C，其中平坦地形处的均方根误差较小，随海拔增加而增大，并且普遍以 ERA5 温度数据偏低为主；同时，分析发现站点观测与 ERA5 数据多年平均温度的相关系数为 0.85（$p<0.01$），表明 ERA5 较好的再现了模拟区域内温度的空间差异。

3　结果分析

3.1　近地层空气温度与比湿

如图 4a 所示，3 组试验模拟的地面温度均高于 ERA5 再分析数据，即 WRF 模拟结果系统性偏暖，但各试验偏暖程度不同。其中，NATU、IRRG 和 IRRG_S 模拟的 4～9 月盆地平均温度分别为 20.73°C、20.12°C、19.76°C，与 ERA5 再分析数据相比，分别偏高 5.65°C、5.04°C、4.68°C，均方根误差分别为 6.52°C、5.81°C、5.46°C（图 4b）。

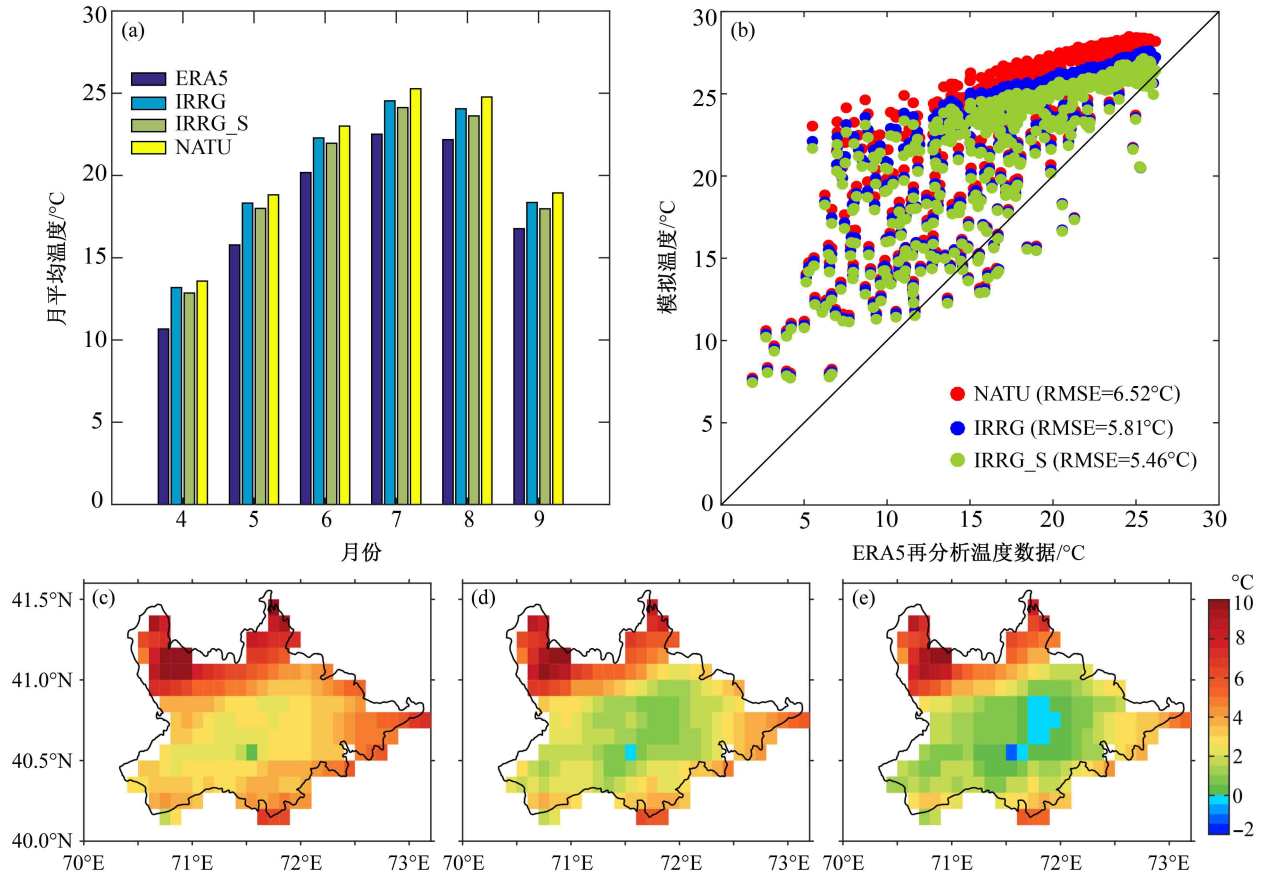

图 4 2007～2011 年（a）4～9 月 WRF 模拟与 ERA5 再分析资料的费尔干纳盆地年平均逐月温度，（b）WRF 模拟与 ERA5 再分析资料的各网格 4～9 月平均温度的对照及（c）NATU、（d）IRRG、（e）IRRG_S 试验模拟的 4～9 月平均温度误差的空间分布

Fig. 4 (a) WRF-simulated and ERA-reanalyzed monthly variations of the regional mean temperature of Fergana basin from April to September during 2007–2011; (b) grid-to-grid comparison between simulations and reanalysis of the regional mean temperature of Fergana basin from April to September during 2007–2011; spatial patterns of (c) NATU, (d) IRRG, and (e) IRRG_S simulation biases for the mean temperature from April to September during 2007–2011

由此来看，标准版本 WRF 模式暖偏差最大，加入灌溉过程的 WRF 模式居中，加入灌溉过程并更新土壤数据后的 WRF 模式最小，并且 3 组试验在每个月暖偏差的相对大小稳定。这表明，新增灌溉过程可部分减小 WRF 模拟的暖偏差，再结合更新土壤数据可进一步减小 WRF 模拟的暖偏差。

空间上，如图 4c 所示，NATU 试验的模拟温度与 ERA5 的差距最大，盆地内温度偏高 2～10°C；在加入灌溉过程之后，误差缩小，尤其是耕地集中分布（灌溉程度）的中部地区，IRRG 试验的模拟温度与 ERA5 温度之差降至 0～2°C；在此基础上更新土壤类型及参数后，IRRG_S 的模拟误差进一步缩小，模拟误差低于 2°C 的空间范围进一步扩大。特别是耕地（灌溉）较为集中的中部地区，先前的整体暖偏差转为较弱的暖、冷偏差共存。由此来看，IRRG 可大幅减小 NATU 的暖偏差，IRRG_S 则使得暖偏差进一步减小，三者相比，IRRG_S 试验模拟的温度最接近 ERA5 再分析数据。这一结果表明，在 WRF/Noah 模式中嵌入灌溉方案并更新土壤类型及参数可以提升温度模拟的精度。

图 5 展示了 2007～2011 年 4～9 月模拟与 ERA5 再分析两种数据的近地面空气比湿数据的对比结果。由图 5a 看出，NATU 模拟的 4～9 月平均空气比湿仅为 4.85 g/kg，IRRG 的模拟结果提升至 5.62 g/kg，IRRG_S 使其进一步提升至 5.70 g/kg。3 组试验模拟结果均低于 ERA5 的再分析数据，这说明 WRF 模拟结果存在干偏差。其中 NATU 模拟的干偏差最大，为−1.57 g/kg，IRRG 模拟偏差居中，为−0.8 g/kg，IRRG_S 模拟偏差最小，仅为−0.72 g/kg，3 组试验的均方根误差分别为 1.66 g/kg、1.13 g/kg 和 1.08 g/kg。由此表明，在 WRF 模式中嵌入灌溉过程方案可以大幅减小标准 WRF 模式的

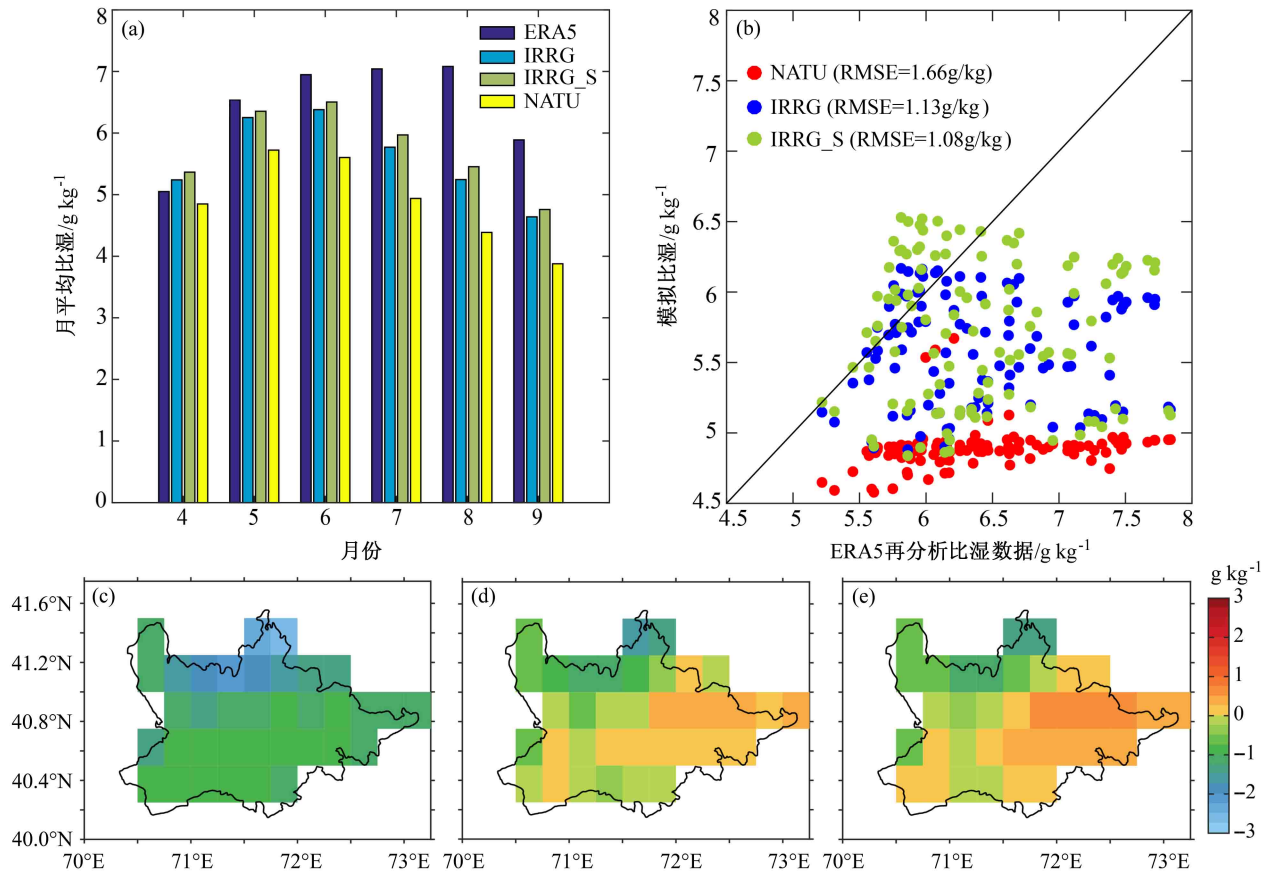

图 5　2007～2011 年（a）4～9 月 WRF 模拟与 ERA5 再分析资料的费尔干纳盆地年平均逐月 2 m 空气比湿，（b）WRF 模拟与 ERA5 再分析资料的各网格 4～9 月平均 2 m 空气比湿的对照及（c）NATU、（d）IRRG、（e）IRRG_S 试验模拟的 4～9 月平均 2 m 空气比湿误差的空间分布

Fig. 5　(a) WRF-simulated and ERA-reanalyzed monthly variations of the regional mean 2-m air specific humidity of Fergana basin from April to September during 2007–2011; (b) grid-to-grid comparison between simulations and reanalysis of the regional mean 2-m air specific humidity of Fergana basin from April to September during 2007–2011; spatial patterns of (c) NATU, (d) IRRG, and (e) IRRG_S simulation biases for the mean 2-m air specific humidity from April to September during 2007–2011

干偏差，更新土壤类型及参数可使得干偏差进一步减小；相对而言，灌溉过程远大于更新土壤类型及参数的效果。

从模拟偏差的空间分布型来看（图 6c-6e），NATU 试验的干偏差广泛出现于整个盆地，模拟比 ERA5 普遍偏低 1～3 g/kg。与此相比，嵌入动态灌溉方案的 IRRG 试验（图 6b）模拟偏差明显缩小，耕地（灌溉）较为集中的中部及东部地区由先前普遍偏干，转为干、湿偏差并存，但偏差大多未超过 0.5 g/kg；而盆地西北部，耕地（灌溉）较少，仍维持 1 g/kg 左右的干偏差。进一步，更新土壤类型及参数后，盆地中部及东部的湿偏差略有增加，而西部及西北部地区仍旧维持干偏差。由此来看，在 WRF 模式中嵌入灌溉过程方案之后，明显修正了标准 WRF 模式模拟的空气比湿偏低的现象；相对而言，更新土壤类型及参数对空气比湿的模拟结果影响较小。

3.2　地表感热与潜热通量及土壤湿度

如图 6a、6b 所示，NATU 试验模拟的平均地表潜热通量为 143.86 W/m^2，大幅低于 ERA5 再分析的 233.35 W/m^2，偏低 89.48 W/m^2，相对偏低幅度高达 38.34%。嵌入灌溉过程方案的 IRRG 试验及进一步更新土壤数据的 IRRG_S 试验大幅修正了 NATU 试验的偏差，转为小幅偏高，分别偏高 31.61 W/m^2 和 44.80 W/m^2，相对误差仅为 13.55% 和 19.20%。总体来看，NATU 试验的均方根误差为 111.12 W/m^2，而 IRRG 与 IRRG_S 的均方根误差分别降至 66.00 W/m^2、59.26 W/m^2。由此表明，嵌入灌溉过程方案及更新土壤类型与参数可明显减小标准 WRF/Noah 模式模拟的区域平均潜热通量，

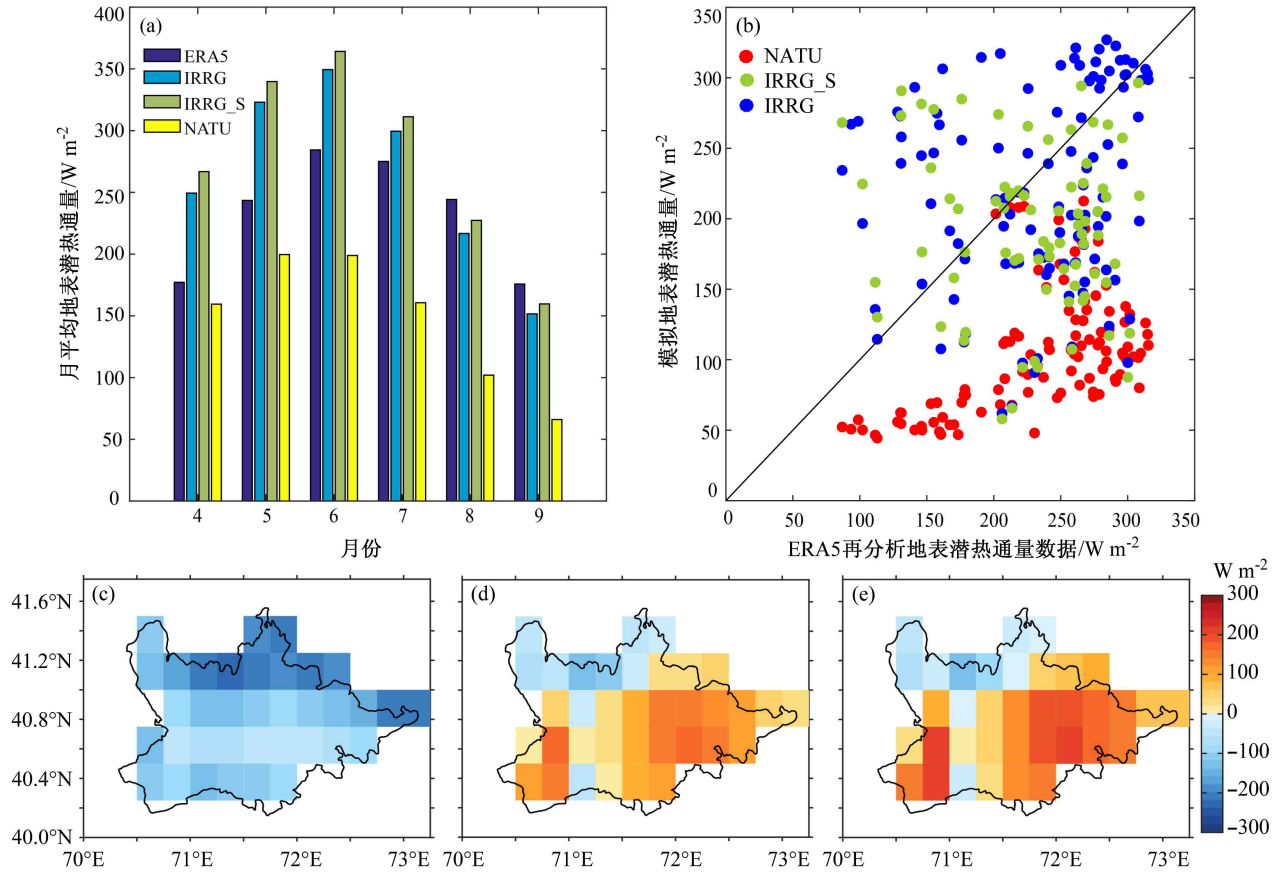

图 6 2007～2011 年（a）4～9 月 WRF 模拟与 ERA5 再分析资料的费尔干纳盆地年平均逐月地表潜热通量，（b）WRF 模拟与 ERA5 再分析资料的各网格 4～9 月平均地表潜热通量的对照及（c）NATU、（d）IRRG、（e）IRRG_S 试验模拟的 4～9 月平均地表潜热通量误差的空间分布

Fig. 6 (a) WRF-simulated and ERA-reanalyzed monthly variations of the regional mean surface latent heat flux of Fergana basin from April to September during 2007–2011; (b) grid-to-grid comparison between simulations and reanalysis of the regional mean surface latent heat flux of Fergana basin from April to September during 2007–2011; spatial patterns of (c) NATU, (d) IRRG, and (e) IRRG_S simulation biases for the mean surface latent heat flux from April to September during 2007–2011

且嵌入灌溉过程的效果明显强于更新土壤数据。

从模拟偏差的空间分布型来看（图 6c-6e），NATU 模拟的潜热通量普遍偏低，其中北部地区偏低幅度达 200～300 W/m^2，中部和南部偏低 100～200 W/m^2。嵌入灌溉过程方案后，IRRG 模拟的大部分地区潜热通量略微偏高，偏高幅度大多不超过 100 W/m^2；而耕地（灌溉）较少的西北部地区仍偏低，不过偏低幅度也未超过－100 W/m^2，明显低于 NATU 的偏差。进一步，更新土壤类型及参数之后，IRRG_S 模拟的潜热通量偏高幅度略有增加，其中东部耕地（灌溉）集中地区偏高约 200 W/m^2。这一结果表明，嵌入灌溉过程方案可大幅改变标准 WRF 模式模拟的地表潜热通量普遍偏低的现象，减小模式误差；然而，在此基础上更新土壤类型及参数之后，模拟的正偏差进一步增大。

由图 7a、7b 来看，WRF 模拟的感热通量普遍偏高，但是 3 组试验偏高的幅度有明显差异。与 ERA5 相比，NATU 试验的偏高幅度最大，为 326.51 W/m^2，IRRG 与 IRRG_S 试验的偏高幅度大致相当，分别为 203.49 W/m^2 和 191.30 W/m^2，明显小于 NATU 试验的偏差；NATU 试验的均方根误差为 244.52 W/m^2，而 IRRG 和 IRRG_S 试验仅为 172.63 W/m^2、1 69.72 W/m^2。感热通量可直接加热近地层大气，感热通量越大，近地层空气温度越高。在此，WRF 模拟的感热通量偏多与 3.1 小节发现的 WRF 模拟温度偏高现象一致，同时 3 组试验模拟的感热通量偏差的相对大小也与各试验模拟温度偏差的相对大小一致。由此表明，嵌入灌溉过程方案可减少地表感热通量，大幅纠正标准 WRF 模拟的感热通量偏多的现象，相应地也纠正

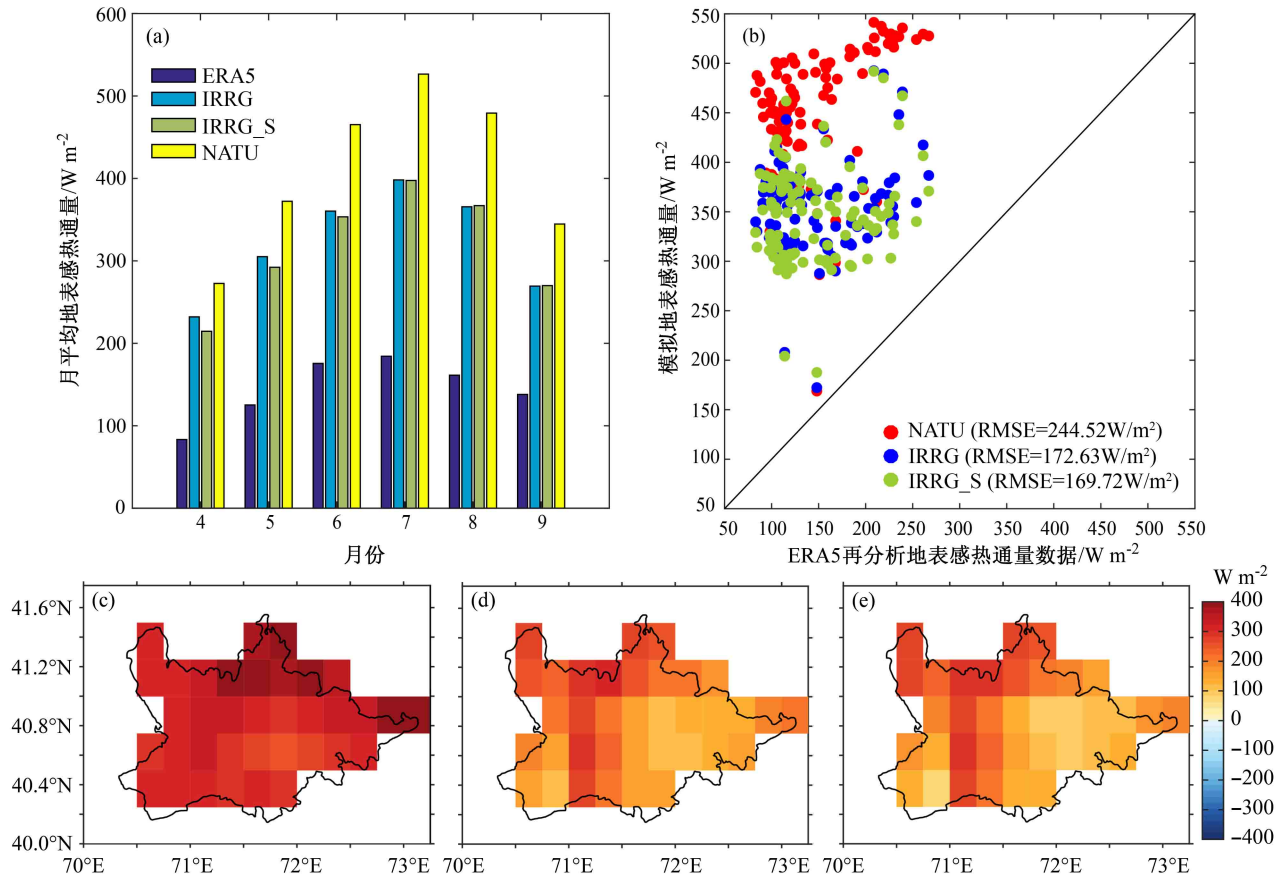

图 7　2007～2011 年（a）4～9 月 WRF 模拟与 ERA5 再分析资料的费尔干纳盆地年平均逐月地表感热通量，（b）WRF 模拟与 ERA5 再分析资料的各网格 4～9 月平均地表感热通量的对照及（c）NATU、（d）IRRG、（e）IRRG_S 试验模拟的 4～9 月平均地表感热通量误差的空间分布

Fig. 7　(a) WRF-simulated and ERA-reanalyzed monthly variations of the regional mean surface sensible heat flux of Fergana basin from April to September during 2007–2011; (b) grid-to-grid comparison between simulations and reanalysis of the regional mean surface sensible heat flux of Fergana basin from April to September during 2007–2011; spatial patterns of (c) NATU, (d) IRRG, and (e) IRRG_S simulation biases for the mean surface sensible heat flux from April to September during 2007–2011

了模拟温度偏高的现象；更新土壤数据则进一步纠正了感热通量偏多和温度偏高的现象，不过纠正幅度相对较小。

由图 7c 来看，NATU 试验模拟的感热通量在盆地内普遍偏高，其中北部地区偏高幅度较大，高达 400 W/m^2，中部和南部地区略小，约为 100～300 W/m^2。嵌入灌溉过程方案使得感热通量偏多的幅度普遍减小，其中耕地（灌溉）较为集中的中部和东部地区尤甚，偏多幅度降至 100 W/m^2 以下，北部地区偏多幅度也降至 200 W/m^2 左右（图 7d）。更新土壤类型及参数后，感热通量偏多的幅度进一步减小，但是减幅较为有限（图 7e）。

总结以上分析，新增灌溉过程与更新土壤数据致使地表潜热通量大幅度提高，感热通量大幅度降低，在较大程度上纠正了标准 WRF 模拟的潜热偏少及感热偏多的问题，提升了模拟的精度。相对而言，新增灌溉过程的效果远大于更新土壤数据的效果。

在土壤含水量方面，与 ERA5 数据相比，NATU 试验的 4～9 月平均土壤含水量整体偏低 0.013 m^3/m^3，IRRG 和 IRRG_S 的试验结果则分别整体偏高 0.021 m^3/m^3、0.019 m^3/m^3；就区域内全体网格而言，NATU 的均方根误差较小，为 0.029 m^3/m^3，IRRG_S 和 IRRG 分别为 0.076 m^3/m^3、0.07 m^3/m^3（图 8）。从月际变化来看，4～6 月 NATU 模拟的土壤含水量明显偏低，IRRG 和 IRRG_S 模拟结果更为接近 ERA5；7～9 月 NATU 模拟结果与 ERA5 更为接近，而 IRRG 和 IRRG_S 模拟结果明显偏高。

从模拟与 ERA5 数据之差的空间分布来看，NATU 试验模拟的平原腹地耕地集中地区的土壤含

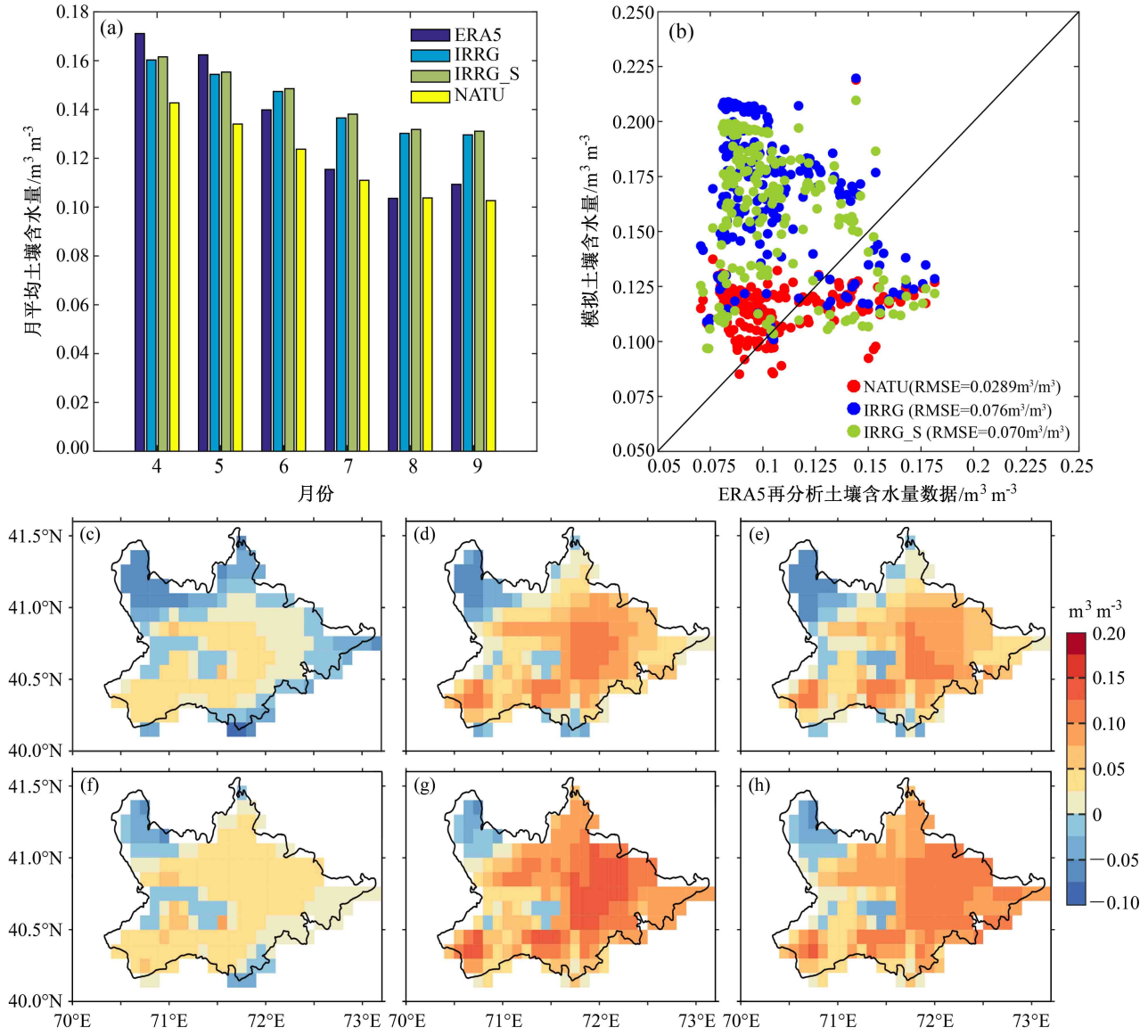

图 8　2007～2011 年（a）4～9 月 WRF 模拟与 ERA5 再分析资料的费尔干纳盆地年平均逐月根层（0～40 cm）土壤含水量，（b）WRF 模拟与 ERA5 再分析资料的各网格 4～9 月平均根层（0～40 cm）土壤含水量的对照及（c、f）NATU、（d、g）IRRG、（e、f）IRRG_S 试验模拟的平均根层（0～40 cm）土壤含水量误差的空间分布，（c–e）表示 4～6 月平均，（f–h）表示 7～9 月平均

Fig. 8　(a) WRF-simulated and ERA-reanalyzed monthly variations of the regional mean soil moisture at the root layer (0–40 cm) of Fergana basin from April to September during 2007–2011; (b) grid-to-grid comparison between simulations and reanalysis of the regional mean soil moisture at the root layer (0–40 cm) of Fergana basin from April to September during 2007–2011; spatial patterns of (c, f) NATU, (d, g) IRRG, and (e, h) IRRG_S simulation biases for the mean soil moisture at the root layer (0–40 cm) during 2007–2011, the mean of the data for (c–e) April to June and (f–h) July to September

水量略高于 ERA5，大多不超过 0.05 m^3/m^3，而 IRRG 和 IRRG_S 试验模拟结果则明显高于 ERA5，不过 IRRG_S 误差较小，IRRG 误差较大。由此表明，新增灌溉过程增加了平原腹地土壤含水量的模拟误差，但是更新土壤参数可以在一定程度上缩小这一误差，提升模拟的精度。在 4～6 月，NATU 试验模拟的研究区北部和东南边缘土壤含水量明显低于 ERA5，而增加灌溉过程之后，模拟土壤含水量转为略高于 ERA5。同样的 IRRG_S 模拟误差相对小于 IRRG 的模拟误差。由此表明，图 8a 展示的 4～6 月 NATU 模拟的土壤含水量明显低于 ERA5 主要原因是模拟的盆地边缘地区土壤含水量偏低所致，加入灌溉过程并更新土壤数据可部分提升模拟精度。总体来看，新增灌溉过程放大了 WRF 模拟

的土壤“湿偏差”，并未提升模拟精度，然而更新土壤参数则在一定程度上有助于提升模拟精度。

3.3　不同土壤数据下模拟的灌溉耗水量

图 9 展示了 WRF 默认土壤数据与 ISRIC 土壤数据下的灌溉强度。总体来说，WRF 模式配置土壤数据下，2007～2011 年 4～9 月区域平均的日均灌溉量为 8.46 mm，更新土壤数据后降至 6.28 mm。从空间分布看，WRF 默认土壤数据下，灌溉强度呈现鲜明的区域差异。在盆地内部平原区耕地集中分布地区，日灌溉量约为 5 mm，而盆地北部与东南边缘耕地较为集中分布的地区，日灌溉量普遍超过 20 mm。灌溉强度的空间分布与土壤类型分布（图 3a）基本一致，高强度灌溉区出现在壤土区，低强度灌溉区出现在粘土区。这是因为壤土的导水率较高，灌溉后大量的水分在重力作用下渗漏，相对而言持水能力较弱，所以需要较为频繁的灌溉，以满足作物生长的需求；粘土的导水率相对较低，不足壤土导水率的 1/3，持水能力较强，因而灌溉水量相对偏少。

更新土壤数据之后，灌溉强度的空间分异明显较小，其空间分布与耕地的空间分布（图 2）基本一致。在平原腹地及北部与东南部边缘耕地集中地区，日灌溉量大多 5～10 mm，盆地东北部耕地较少的地区，日灌溉量则不足 5 mm。然而，值得注意的是西北部部分网格灌溉强度明显偏大，日灌溉量高达 15 mm。究其原因，一方面是因为这些网格耕地较多，面积百分比超过 90%，另一方面则是因为这些地区更新后的土壤类型为粉砂壤土，其导水率远高于东部的粉砂粘壤土，前者的饱和水力传导系数近似于后者的 1.5 倍，灌溉后下渗水量较大，造成了大量灌溉水的“浪费”。

相比来看，如图 9c 所示，在平原腹地大部分地区，更新土壤数据之后的灌溉量普遍多于更新之前，日灌溉量略偏多 1～2 mm，仅西北部部分地区偏多 5～10 mm。而对于平原北部与东南部边缘地区，更新土壤数据之后的灌溉量明显低于更新之前，日灌溉量偏低普遍超过 5 mm，部分地区高达 10～15 mm。根据针对研究区灌溉需水量的评估研究，盆地内多年平均（1970～2003 年）棉花生长季（4 月中旬至 9 月中旬）灌溉耗水量约 700 mm，日均灌溉量约 4.6 mm；针对 2010 年的气候年景（降水量较常年略偏多）灌溉量大约为 881 mm（Conrad et al., 2013），当年棉花生长季略偏长（4 月上旬至 9 月下旬），折算日均灌溉量约为 4.9 mm。由此来看，费尔干纳盆地棉花生长季日均灌溉强度约为 5 mm，与更新土壤参数之前的 IRRG 试验模拟的平原腹地灌溉量较为接近。然而，上述研究采用的是非充分灌溉，从植物生理需求的

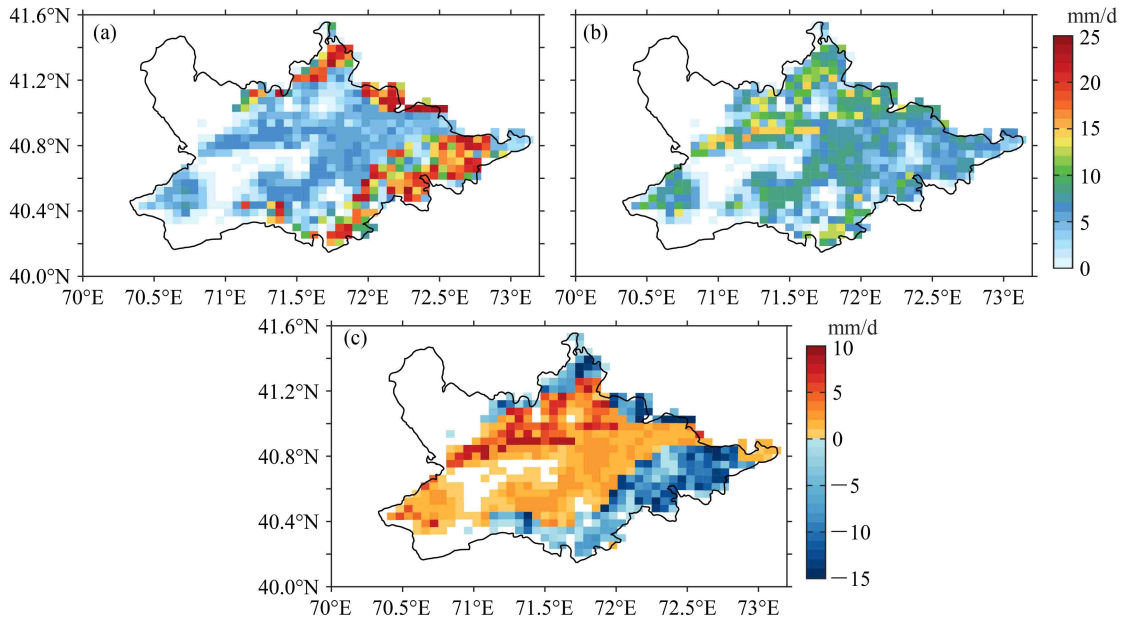

图 9　（a）WRF 默认土壤数据与（b）ISRIC 土壤数据下 2007～2011 年 4～9 月日平均灌溉强度空间分布及其（c）差异

Fig. 9　Spatial distribution of daily irrigation from 2007 to 2011 for (a) WRF default soil type and (b) ISRIC soil type and (c) the difference between daily irrigation from 2007 to 2011 for both soil types

角度，在确保一定产量基础上，尽可能的节省灌溉耗水，而本研究采用的是“充分”灌溉方案，每次灌溉均使土壤达到饱和，灌溉水量因而大于实际灌溉量。因而，从这个角度来说，更新土壤数据后的 IRRG_S 试验更接近区域实际灌溉量。同时，更新土壤数据之前的 IRRG 模拟灌溉量的巨大空间差异，与区域实际明显不一致。综合上述两方面，更新土壤数据之后的 IRRG_S 模拟的灌溉强度精度较高。

4 讨论

器测数据是模型校验的基础，但是这一研究区的地面器测数据极为匮乏，公之于众的数据更为少见。因此，本文采用了基于数据同化技术建立的再分析数据集——ERA5 进行 WRF 模拟结果的校验。虽然 ERA5 的数据同化系统相较之前的版本有了较大改进，但是毕竟是同化系统模拟的结果，而非实测数据，在一定程度上受到模型的不确定性影响。以土壤含水量为例，在北美温带地区、欧洲、非洲、澳大利亚，ERA5 与 SIMOS（ESA-led Soil Moisture and Ocean Salinity）卫星反演结果及 GLDAS-Noah 陆面模型模拟结果相比，ERA5 的数值系统性偏高（Piles et al., 2019）。更为重要的是，实测数据是数据同化的基础，同化系统数据产品的精度深受当地实测数据质量和丰富度的影响，因而当地实测数据的匮乏不可避免的对同化数据产品质量造成了不利影响。

另外，从 WRF 模拟结果与 ERA5 网格尺度上的散点图（图 4b、5b、6b、7b、8b）来看，WRF 模拟的 2 m 气温的空间变异性与 ERA5 尚有一定的一致性，NATU、IRRG 和 IRRG_S 与 ERA5 的相关系数分别为 0.80、0.81、0.81，而 WRF 模式模拟的其余各要素空间变异性与 ERA5 尚有较大差异。其中，WRF 模拟的 2 m 空气比湿的空间变异性明显低于 ERA5，NATU 试验尤为明显。ERA5 数据的变幅约 2.5 g/kg，而 NATU 试验模拟的 2 m 空气比湿变幅大约仅为 1 g/kg，IRRG 和 IRRG_S 试验模拟的 2 m 空气比湿变幅分别为 1.3 g/kg 和 1.7 g/kg。对于地表潜热通量、感热通量、土壤含水量而言，基本均表现为同样的规律：WRF 模拟的空间变异幅度小于 ERA5，其中 NATU 试验尤为明显，相对而言，IRRG_S 试验较为接近 ERA5。由此来看，WRF 模式模拟费尔干纳盆地各要素空间变异性的能力较弱，新增灌溉过程并更新土壤数据后，在一定程度上增强了 WRF 模式的模拟能力，提升了模拟结果的精度。至于导致 WRF 模式这一弱点的其他因素，可能包括：（1）本文采用的土地利用数据尚未充分表达真实的地表覆被多样性和空间异质性；（2）本文设定土壤参数完全取决于土壤类型，忽视了植被类型及农业耕作、施肥等的影响，未充分表达其空间异质性；（3）模式解析表达局地小尺度环流的能力不足，等等。

5 结论

综合以上分析，在 WRF/Noah 模式中加入动态灌溉方案并更新土壤数据可以提高费尔干纳盆地气候模拟的精度。总体来说，加入灌溉方案并更新土壤数据在很大程度上纠正了 WRF/Noah 模拟的 2 m 气温偏高、空气湿度偏低、感热通量偏多、潜热通量偏少的现象；并且更新土壤数据后，模拟的灌溉水量也更加接近实际耗水量。因而在基于 WRF 模式的费尔干纳盆地气候预测中，加入动态灌溉方案并更新土壤数据是必要的。值得关注的是，即使加入灌溉方案并更新土壤数据，WRF 模拟结果与 ERA5 再分析数据仍存在一定差异，特别是土壤含水的差异反而因为加入灌溉过程和更新土壤数据而加大。导致这些差异的原因极为复杂，其中既有 ERA5 再分析数据不确定性的因素，也有 WRF 模式不足的因素。因而，在后续研究中，应尽可能的尝试多渠道收集当地的地面监测数据，并进一步完善 WRF 模式中的物理过程参数化方案。

参考文献（References）

Bastidas L A, Hogue T S, Sorooshian S, et al. 2006. Parameter sensitivity analysis for different complexity land surface models using multicriteria methods [J]. J. Geophys. Res., 111(D20): D20101. doi:10.1029/2005JD006377

Bierkens M F P. 2015. Global hydrology 2015: State, trends, and directions [J]. Water Resour. Res., 51(7): 4923−4947. doi:10.1002/2015WR017173

Bonan G B, Doney S C. 2018. Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models [J]. Science, 359(6375): eaam8328. doi:10.1126/science.aam8328

Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. Mon. Wea. Rev., 129(4):

569−585. doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2

Chen S, Gan T Y, Tan X Z, et al. 2019. Assessment of CFSR, ERA-Interim, JRA-55, MERRA-2, NCEP-2 reanalysis data for drought analysis over China [J]. Climate Dyn., 53(1-2): 737−757. doi:10.1007/s00382-018-04611-1

Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2004. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0) [R]. NCAR/TN-464+STR. doi:10.5065/D63N21CH

Conrad C, Rahmann M, Machwitz M, et al. 2013. Satellite based calculation of spatially distributed crop water requirements for cotton and wheat cultivation in Fergana Valley, Uzbekistan [J]. Global and Planetary Change, 110: 88−98. doi:10.1016/j.gloplacha.2013.08.002

Cosby B J, Hornberger G M, Clapp R B, et al. 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils [J]. Water Resour. Res., 20(6): 682−690. doi:10.1029/WR020i006p00682

Didan K. 2015. MOD13A1 V006 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500 m SIN Grid [R]. doi:10.5067/MODIS/MOD13A1.006

Dy C Y, Fung J C H. 2016. Updated global soil map for the weather research and forecasting model and soil moisture initialization for the Noah land surface model [J]. J. Geophys. Res., 121(15): 8777−8800. doi:10.1002/2015JD024558

Ficklin D L, Luo Y Z, Stewart I T, et al. 2012. Development and application of a hydroclimatological stream temperature model within the soil and water assessment tool [J]. Water Resour. Res., 48(1): W01511. doi:10.1029/2011WR011256

Forzieri G, Miralles D G, Ciais P, et al. 2020. Increased control of vegetation on global terrestrial energy fluxes [J]. Nature Climate Change, 10(4): 356−362. doi:10.1038/s41558-020-0717-0

高笃鸣, 李跃清, 蒋兴文, 等. 2016. WRF 模式多种边界层参数化方案对四川盆地不同量级降水影响的数值试验 [J]. 大气科学, 40(2): 371−389. Gao Duming, Li Yueqing, Jiang Xingwen, et al. 2016. Influence of planetary boundary layer parameterization schemes on the prediction of rainfall with different magnitudes in the Sichuan basin using the WRF model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(2): 371−389. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14323

Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium —range forecast model [J]. Mon. Wea. Rev., 124(10): 2322−2339. doi:10.1175/1520-0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2

Hong S Y, Lim J O J. 2006. The WRF single –moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 42(2): 129−151.

Huang A N, Zhou Y, Zhang Y, C, et al. 2014. Changes of the annual precipitation over central Asia in the twenty-first century projected by multimodels of CMIP5 [J]. J. Climate, 27(17): 6627−6646. doi:10.1175/JCLI-D-14-00070.1

Huang T, Yu D, Cao Q, et al. 2019. Impacts of meteorological factors and land use pattern on hydrological elements in a semi-arid basin [J]. Science of the Total Environment, 690: 932−943. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.07.068

Ibrakhimov M, Awan U K, George B, et al. 2018. Understanding surface water–groundwater interactions for managing large irrigation schemes in the multi –country Fergana valley, Central Asia [J]. Agricultural Water Management, 201: 99−106. doi:10.1016/j.agwat.2018.01.016

Kioutsioukis I, de Meij A, Jakobs H, et al. 2016. High resolution WRF ensemble forecasting for irrigation: Multi –variable evaluation [J]. Atmospheric Research, 167: 156−174. doi:10.1016/j.atmosres.2015.07.015

Kishné A S, Yimam Y T, Morgan C L S, et al. 2017. Evaluation and improvement of the default soil hydraulic parameters for the Noah land surface model [J]. Geoderma, 285: 247−259. doi:10.1016/j.geoderma.2016.09.022

卢冰, 王薇, 杨扬, 等. 2019. WRF 中土壤图及参数表的更新对华北夏季预报的影响研究 [J]. 气象学报, 77(6): 1028−1040. Lu Bing, Wang Wei, Yang Yang, et al. 2019. Updated soil map and soil hydrologic parameters for WRF and their influences over North China during the warm season [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 77(6): 1028−1040. doi:10.11676/qxxb2019.066

Miller D A, White R A. 1998. A conterminous United States multilayer soil characteristics dataset for regional climate and hydrology modeling [J]. Earth Interactions, 2(2): 1−26. doi:10.1175/1087-3562(1998)002<0001:ACUSMS>2.3.CO;2

Ozturk T, Turp M T, Türkeş M, et al. 2017. Projected changes in temperature and precipitation climatology of Central Asia CORDEX Region 8 by using RegCM4.3.5 [J]. Atmospheric Research, 183: 296−307. doi:10.1016/j.atmosres.2016.09.008

Piles M, Ballabrera-Poy J, Muñoz-Sabater J. 2019. Dominant features of global surface soil moisture variability observed by the SMOS satellite [J]. Remote Sensing, 11(1): 95. doi:10.3390/rs11010095

Pithani P, Ghude S D, Jenamani R K, et al. 2020. Real-time forecast of dense fog events over Delhi: The performance of the WRF model during the WiFEX field campaign [J]. Wea. Forecasting, 35(2): 739−756. doi:10.1175/WAF-D-19-0104.1

Qiu Y, Hu Q, Zhang C. 2017. WRF simulation and downscaling of local climate in central Asia [J]. International Journal of Climatology, 37(S1): 513−528. doi:10.1002/joc.5018

Siebert S, Henrich V, Frenken K, et al. 2013. Global map of irrigation areas version 5. Rheinische Friedrich-Wilhelms-University, Bonn, Germany/Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy

Sulla-Menashe D, Friedl M. 2019. MCD12Q1 V006 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500 m SIN Grid [R]. doi:10.5067/MODIS/MCD12Q1.006

许鲁君, 刘辉志, 徐祥德, 等. 2018. WRF 模式对青藏高原那曲地区大气边界层模拟适用性研究 [J]. 气象学报, 76(6): 955−967. Xu Lujun, Liu Huizhi, Xu Xiangde, et al. 2018. Evaluation of the WRF model to simulate atmospheric boundary layer over Nagqu area in the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 76(6): 955−967. doi:10.11676/qxxb2018.059

Yang Z, Dominguez F, Zeng X B, et al. 2017. Impact of irrigation over the California Central Valley on regional climate [J]. Journal of Hydrometeorology, 18(5): 1341−1357. doi:10.1175/JHM-D-16-0158.1

张建国, 金斌斌. 2010. 土壤与农作 [M]. 郑州: 黄河水利出版社. Zhang Jianguo, Jin Binbin. 2010. Soil and Farming (in Chinese) [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press.

张学珍, 朱金峰. 2013. 1982～2006 年中国东部植被覆盖度的变化 [J]. 气候与环境研究, 18(3): 365−374. Zhang Xuezhen, Zhu Jinfeng. 2013. Variations in fractional vegetation coverage over eastern China during 1982-2006 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18(3): 365−374. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11174

Zhang X Z, Xiong Z, Tang Q H. 2017. Modeled effects of irrigation on surface climate in the Heihe River Basin, Northwest China [J]. J. Geophys. Res., 122(15): 7881−7895. doi:10.1002/2017JD026732

Zhang X Z, Ding N N, Han S J, et al. 2020. Irrigation —induced potential evapotranspiration decrease in the Heihe River basin, Northwest China, as simulated by the WRF model [J]. J. Geophys. Res., 125(2): e2019JD031058. doi:10.1029/2019JD031058

支星, 徐海明. 2013. 3 种再分析资料的高空温度与中国探空温度资料的对比: 年平均特征 [J]. 大气科学学报, 36(1): 77−87. Zhi Xing, Xu Haiming. 2013. Comparative analysis of free atmospheric temperature between three reanalysis datasets and radiosonde dataset in China: Annual mean characteristic [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(1): 77−87. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.01.009

朱景, 袁慧珍. 2019. ERA 再分析陆面温度资料在浙江省的适用性 [J]. 气象科技, 47(2): 289−298. Zhu Jing, Yuan Huizhen. 2019. Applicability of ERA reanalysis data of land surface temperature in Zhejiang Province [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 47(2): 289−298. doi:10.19517/j.1671-6345.20180171