

doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0036

Wu Xuejiao, Pan Xiaoduo, Shen Yongping, et al. Validation of WRF model on simulating forcing data for Kayiertesi River basin, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(2): 332–340. [吴雪娇, 潘小多, 沈永平, 等. WRF模式制备的气象驱动数据在新疆喀依尔特斯河流域的验证[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 332–340.]

WRF模式制备的气象驱动数据在新疆 喀依尔特斯河流域的验证

吴雪娇¹, 潘小多¹, 沈永平^{2*}, 张伟¹, 贺建桥¹, 贺斌³

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 新疆阿勒泰水文水资源勘测局, 新疆 阿勒泰 836500)

摘 要: 随着寒区水文模拟研究的深入, 空间分布式模型的快速发展, 迫切需求高分辨率的气象驱动数据. 研究基于WRF模式动力降尺度和Micromet统计降尺度方法, 制备了阿尔泰山额尔齐斯河源区喀依尔特斯河流域春季1 km分辨率气象驱动数据, 并利用地面观测资料从小时尺度上对其进行了验证, 为该流域春季分布式融雪径流模型做充分准备. 结果表明: 小时尺度上2 m气温、2 m相对湿度、10 m风速、地表接收的短波辐射和长波辐射的平均绝对误差MBE分别为0.43℃、-2.9%、3.7 m·s⁻¹、28.2 W·m⁻²和-36.2 W·m⁻², 其平均均方根误差RMSE分别为3.81℃、18.2%、4.8 m·s⁻¹、163.5 W·m⁻²和52 W·m⁻², 与实测对比拟合的R²分别为0.84、0.32、0.03、0.7和0.3. 在小时尺度上, 2 m温度和地表接收短波辐射的模拟结果比较理想, 可以用于高时间分辨率水文模拟.

关键词: 驱动数据; 降尺度; 分布式; 喀依尔特斯河流域

中图分类号: P435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2016) 02-0332-09

0 引言

近地表大气要素, 主要包括气温、降水、气压、相对湿度、风速和辐射被称为水文、陆表和生态模型的驱动数据^[1]. Cosgrove等^[2]在介绍北美陆表数据同化系统时强调了驱动数据的重要性并指出陆面过程模型对驱动数据非常依赖. 随着遥感技术的快速发展, 生态、水文模拟研究的深入, 空间分布式模拟得到越来越广泛的重视^[3]. 而空间分布式模拟中, 空间气象驱动数据是生态水文模拟不可缺少的重要组成部分之一, 尤其对于流域尺度上的模拟, 更需要高时空分辨率的气象数据的支持^[4]. 但目前的难点在于高时空分辨率气象数据相对较难获得, 这也一直是分布式生态水文模拟的难点之一.

目前做分布式模型驱动的方法, 包括点上气象站的气象数据空间插值、用递减率进行递推获得面上的气温、降水等空间气象数据、耦合或者使用GCM(General Circulation Model)模型的输出结果^[5]. 前两者都会受到观测数据的限制, 而且递减率也需要先验知识的积累, 而选择耦合GCM模式输出作为陆表模型驱动成为了主要的方法. 但GCM模式输出的时空分辨率更适合大尺度陆面过程模拟, 不能满足区域尺度陆表模型的需要, 它粗糙的分辨率忽略了对区域环境的评估^[6]. 因而, 区域陆表模型或者地表数据同化系统就需要更高时空分辨率的驱动数据. 因此, 对GCM结果进行降尺度是非常必要的, 可以为区域或者流域尺度的陆表、生态水文模拟和同化准备高时空分辨率的驱动数据. 降尺度是一种从相对粗分辨率的GC-

收稿日期: 2015-11-23; 修订日期: 2016-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271083; 41471292; 41201062); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201412); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所“丝绸之路经济带的水资源综合利用与生态建设”项目(HHS-135-16-T2)资助

作者简介: 吴雪娇(1986—), 女, 黑龙江五大连池人, 助理研究员, 2015年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 现从事冰冻圈遥感应用研究. E-mail: xjwu@lzb.ac.cn

*通讯作者: 沈永平, E-mail: shenyp@lzb.ac.cn.

Ms 获得高分辨率气候或者气候变化信息的方法^[7]. 从由 GCMs 产生的全球气候情景获得区域尺度驱动信息的方法主要有两种: 一种是动力降尺度(用区域气候模式); 另一种是统计降尺度(利用大尺度气候变量和区域历史记录数据建立关系). 统计降尺度方法需要大量的观测数据来建立小尺度变量和大尺度变量之间的统计关系, 并且很难在山区, 如在中国的西部很多地区应用统计降尺度方法, 也没有理论根据. 动力降尺度是依赖 GCMs 用大尺度气候背景信息估计高分辨率气象分布场^[8]. 区域气候模型是一个有效的获得高分辨率区域气候信息的动力降尺度方法^[9], 模型的物理意义清楚, 是基于非线性的大尺度和区域尺度之间的相互作用关系, 可以通过区域地形、植被覆盖状况和土壤水文过程来辨别区域特点, 可以用在任何独立于观测数据的区域.

随着计算机软硬件的快速发展, 区域气候模型也被广泛的应用和推进. 已经有学者在流域尺度分布式水文模型中耦合 MM5 来完成高分辨率径流模拟^[10]. Yu 等^[11]把 HMS 耦合到 RCM, 用来提供高分辨率的水文和其他应用, 来模拟一系列暴风雨事件、模拟各种土壤、陆表和地下水文过程.

然而, 关于驱动数据的验证还不是充分的, 特别是对降尺度后的高分辨率数据的验证. 因此, 对于驱动数据的精度验证是非常重要的, 尤其在进入陆面过程模型之前. 本研究所选的研究区在新疆北部的中国阿尔泰山喀依尔特斯河源区喀依尔特斯河流域, 这是一个典型的积雪流域, 是进行寒区水文模拟的天然试验场^[12]. 由于本研究区有小时尺度的观测数据, 因此在本研究区对气象驱动数据进行验证, 可以为后期的高时间分辨率寒区水文模拟提供数据参考. 本研究主要应用 WRF 模式与 MicroMet 的降尺度方法得到高时空分辨率气象驱动数据, 而后在基于实测的气象站点资料基础上对本研究的降尺度数据结果的适用性进行了验证, 探讨动力降尺度与统计降尺度相结合得到的高时空分辨率气象驱动在该流域的精度, 为本研究区的分布式水文模拟工作做准备.

1 研究区与数据制备

1.1 研究区概况

本研究所选的研究区在新疆北部的阿尔泰山喀依尔特斯河流域, 流域位于阿尔泰山中段南

坡, 该流域在额尔齐斯河源区(图 1). 同为额尔齐斯河支流的还有喀拉额尔齐斯河、克兰河等. 喀依尔特斯河流域下垫面无冰川分布, 土壤以砂质土壤分布为主, 土壤层较浅. 流域地表植被状况较为丰富, 很大面积是低矮草地覆盖, 阳坡及半阳坡主要分布草地和灌丛, 半阴坡、阴坡及沿河道有森林分布. 优势树种主要包括西伯利亚云杉、西伯利亚落叶松, 也有部分白杨在低海拔区分布^[13]. 由于是河源区, 近些年来气候暖化引起的年内水文过程变化已经对河流下游的城市供水和农牧业生产产生了影响. 该区域的气候受到西风带的影响, 气候寒冷, 大多数的降水是以雪的形式出现, 从而在冬天形成厚而稳定的积雪层^[14]. 其中, 降水量最少的两个月份是 2 月和 3 月. 流域的集水面积是 2 350 km², 在流域的出口处有气象、水文和积雪观测场. 图 1 所示的红点处即为水文站处, 也是积雪观测场所在位置.

研究区观测点设在流域出口处库威水文站(47°20' N, 89°41' E), 海拔高度在 1 370 m, 为国家基本水文站. 2011 年夏中科院寒旱所沈永平研究员研究小组在该研究区建立了这一整套气象和积雪观测系统, 观测包括气象观测、积雪特性和冻土观测. 观测所用的传感器型号、测量范围和精度等见表 1. 气象方面的指标有距离地面 3 m 高的气温和相对湿度(Campbell HMP45C probe, Campbell Scientific, USA), 以及风速和风向(Propvane-05103 anemometer, RM Young, USA). 降水观测是用 Geonor T-200B 累计称重式雨量计(mm water equivalent)(Campbell Scientific, USA). 其中, 辐射的观测仪器是 2013 年 9 月新增的, 四分量辐射计(±1%)(CNR4, Campbell Scientific, USA)用来

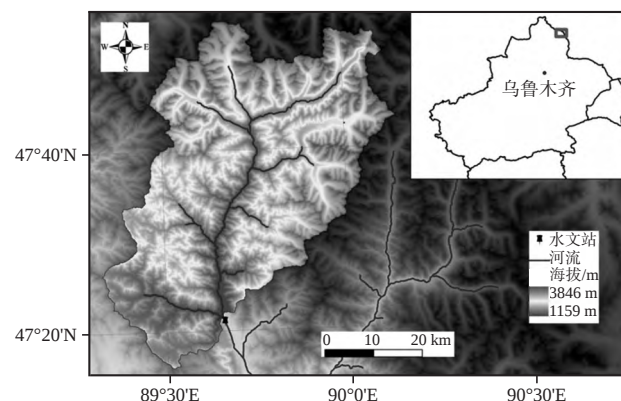


图 1 喀依尔特斯河流域概况

Fig. 1 Map of study area (Kaiyertesi River basin)

表 1 观测点传感器参数说明
Table 1 Observational parameter of sensors

传感器型号	观测参数	测量范围	精度
HMP45C	气温(°C)	- 40 ~ +60 °C	±0. 4 °C
HMP45C	相对湿度(%)	0 ~ 90%	±2%
Kipp and Zonen	短波辐射(W·m ⁻²)	0. 305 ~ 2. 8 μm	±10%日总量
Kipp and Zonen	长波辐射(W·m ⁻²)	5 ~ 50 μm	±10%日总量
Young05103	风速(m·s ⁻¹)	0 ~ 60 m·s ⁻¹	±0. 3 m·s ⁻¹
Young05103	风向(°)	0 ~ 355°	±3°
T200B	降水(mm)	0 ~ 600 mm	±0. 1%
Campbell SR50	雪深(cm)	0. 5 ~ 10 m	±1 cm

检测向下短波、向上短波、向上长波和向下长波(S↓, S↑, L↓和L↑). 气象仪器经过专业标定和调试后都与耐低温数据采集器 CR3000 (Campbell, USA)连接, 实现自动观测记录.

同时在研究区流域出口处, 还设置有积雪特性观测场, 积雪特性观测参数包括: 雪深(Campbell SR50A snow depth sensor, Campbell Scientific, USA)、雪水当量(SWE)(snow pillow)以及分层雪温(±0. 5 °C)(Campbell SI-111 infrared radiometer, Campbell Scientific, USA). 所有的传感器也都被连接在一个数据采集器(CR3000, Campbell Scientific, USA). 自动气象站(AWS)每 10 min 观测一次, 每 0. 5 h 记录 1 次. 其他参数, 如分层土壤温度和土壤湿度也同时被观测. 为详细的积雪和陆表特征模拟和分析提供了有利的地面观测支持.

1. 2 数据制备

1. 2. 1 WRF 模式简介

WRF 模式(Weather Research and Forecasting Model)是由包括美国国家环境预报中心(NCEP)和大气研究中心(NCAR)在内的多家权威机构共同努力研发的中尺度天气预报模式, 该模式集数值天气预报、大气模拟及数据同化于一体, 改进以往模式的部分缺点, 大大增强了彼此之间的互换性. WRF 模式还具有可移植、易维护、扩展性、高效率、互用性等众多特性和使用界面友好的特点, 重点考虑 1 ~ 10 km 水平网格的高分辨率数值模式, 且免费对外发布, 为模式的发展、气象工作交流和科学研究的进步奠定了基础. 为使研究成果能够迅速地应用到现实的天气预报当中去, WRF 模式框架被设计成一个完全可压缩非静力模式. 网格形式水平方向采用 ArakawaC 网格点^[15], 垂直方向则采用地形跟随质量坐标, 时间积分采用 3 阶

Runge-Kutta^[16]. 本文模拟所用模式为 WRF-V3.1.1 版本^[17], 初始场和边界场均利用 GFS-fnl 资料, 资料的水平分辨率为 1°× 1°, 时间间隔为 6 h.

1. 2. 2 数据准备

本论文中 WRF 模式的初始数据采用分辨率为 1°× 1°的 Global Forecast System (GFS) 资料, 该资料是全球预报系统的模式输出结果; 分辨率为 1°× 1°的 NCEP Final Operational Global Analysis data (FNL) 资料是在 GFS 的输出结果上同化了常规、卫星等观测的分析资料^[18]. 该资料来源于美国大气研究中心(NCAR)的数据支持部 Data Support Section (DSS), 它每天发布 4 次, 每次预报时效为 384 h(16 d), 时间间隔为 3 ~ 6 h; NCEP-FNL 的数据水平格距为 1°^[19]. 模式的预处理过程中, 除了将采用一天 4 次空间分辨率为 1°的 GFS-FNL 数据, 静态地理数据则根据嵌套方案(双层嵌套, 分别为 25 km 和 5 km)进行处理. 同时, 包括研究区高精度的其他数据: 数字高程模型、土地覆盖分类数据和土壤质地分类数据等静态数据. 所有数据均采用兰伯特投影, 经过 ./geogrid.exe, ./ungrib.exe, ./metgrid.exe 等的预处理, 获得 WRF 模式运行所需的研究领域内的动态与静态数据.

1. 2. 3 降尺度方案

降尺度方案如图 2 所示. 采用先动力降尺度再统计降尺度的方法, 最终得到水文模型所需的高分辨率空间气象场数据.

首先, 用 WRF 模式做动力降尺度. 其中, ARW 模式的处理过程中, 需要定义嵌套数与嵌套方式、输出格式与数据时间间隔等, 定义微物理方案、长短波辐射方案、边界层方案和同化方案等, 本论文中通用的物理过程配置方案见表 2. 模拟时段是 2012 年春季 3 月 1 日至 6 月 1 日, 最后得

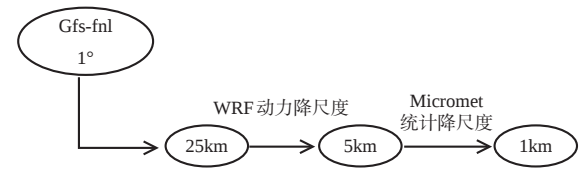


图 2 降尺度流程图
Fig. 2 Flowchart of downscaling

到了小时分辨率的空间气象数据.

第二步是为了得到更高分辨率的空间气象场数据, 需要用 Micromet 统计降尺度得到 1 km 分辨率的气象数据. 而 WRF 模式也可以直接降到 1 km, 但这样直接动力降尺度的结果并不合理, 经实践效果较差. 因此, 选用第二步的统计降尺度方案. 融雪模拟对于高空间分辨率的气象数据的需求是十分迫切的. 对于空间气象数据经 WRF 模式实现降尺度到 5 km; 为了使高分辨率的空间气象数据精度更好, 以满足融雪模拟的需求, 我们选择用 Micromet 方法将 5 km 的 WRF 数据继续降尺度得到 1 km 分辨率的气象数据. MicroMet 是一种中度复杂且有物理基础的统计降尺度方法, 已经发展成用来生产高分辨率大气驱动数据(30 m ~ 1 km 水平栅格分辨率), 以满足空间分布式陆表模型的需求. 模型的原理是用已知的气象变量和周围地形地势的关系在任何给定的地形条件下有效且物理可解释的计算这些气象变量的具体值^[20]. MicroMet 方法对可用的气象数据有两种调试方法: 1) 所有可用的气象数据在给定的时间被空间插值到给定的区域内; 2) 在一个给定的时空点上, 物理的子模型被用在每一个 MicroMet 变量上以提高参数的真实性. 模型在分配计算基本的大气驱动变量时需要转最多次地形模型. 在计算时, MicroMet 假设在某个模拟区域内至少一个变量的一个值在感兴

趣的每一个时间步长中是可用的, 这些变量有空气温度、相对湿度、风速、风向、降水. 对于气压和入射长波、入射短波. MicroMet 有两种选择: 1) 让 MicroMet 子模型在缺少观测的情况下创建分布计算结果; 2) 合并可用观测数据伴随着子模型创建分布计算之时, 作为数据同化的部分数据. 第二种选择生产出能匹配观测的(如果有数据)同时也更好的解释高分辨率信息(比如地形坡度坡向)的分布数据.

本研究中, 最终笔者得到的预报数据有很多, 比如空气温度、降水量、辐射、风向、风速, 这些数据都以 NetCDF 格式空间存储. 不过, 我们并不需要提取和处理所有的数据层, 而只需要提取所需要的数据层进行处理, 进而得到后面融雪模型运行所需的高分辨率空间数据集, 主要包括的参数有气温、风速、湿度、辐射.

2 结果分析与讨论

本研究选择 2012 年春季进行模拟试验研究. 毫无疑问月尺度的验证结果要好于日尺度, 而日尺度上的验证结果通常要好于小时尺度. 对于短期水文模拟等, 往往需要更高时间分辨率的空间气象数据, 因此, 本文仅对小时尺度的结果进行验证. WRF 模拟输出气象场作为寒区水文模型的驱动场, 与气象站的观测气温进行对比分析, 有助于评价驱动数据对模型模拟的响应能力. 本研究的对比分析可为短期寒区水文模拟做准备.

经过降尺度后得到的小时分辨率的空间气象数据后, 通过 GIS 软件(ArcGIS)将降尺度到 1 km 的空间气象数据(NetCDF 格式数据)予以空间处理, 从而得到所需格式的空间气象数据等. WRF

表 2 WRF 模式物理过程配置方案
Table 2 WRF configuration for this study

物理过程	Domain 1 (25 km)	Domain 2 (5 km)
时间间隔	150 s	30 s
微物理过程	Lin <i>et al.</i> 方案	Lin <i>et al.</i> 方案
PBL	YSU 方案	YSU 方案
辐射方案	Dudhia 方案	Dudhia 方案
积云方案	Kain-Fritsch 方案	Kain-Fritsch 方案
陆面过程	Noah LSM	Noah LSM
投影方式	Lambert 兰伯特投影	Lambert 兰伯特投影
初始场和边界条件	NCEP/FNL	NCEP/FNL

模拟的气象数据,包括2 m高的气温、相对湿度、10 m高的风速、地表接收的短波和长波辐射等,用所在阿尔泰山喀依尔特斯河流域的自动气象站观测资料进行了验证。

图3是以温度和短波辐射为例对气象空间要素的提取结果进行示意,展示的是一天中不同时刻空间气象要素的变化特征,降尺度后的空间气象场数据有随地形、海拔的变化而变化的特点。其中,温度、相对湿度和入射长波都是随海拔升高而递减的显著变化特征,而入射短波和风速则因为坡度和坡向的不同、太阳高度角的差异表现出明显的空间异质性分布特征。每一组气象数据都有显著的日变化特征,太阳入射角的不同会导致一天内不同时刻的入射短波变化很大,而阴阳坡的风速也差异明显。其他变量,如温度、相对湿度和入射长波辐射在同一点都有日变化特征。

对模拟的空间气象数据,选取有观测点所在位置进行对比验证。用对春季融雪比较重要的时段2012年3月1日至6月1日,每日24 h的气象数据与AWS自动气象站观测的小时尺度数据进行对比,逐时验证的内容包括气温、相对湿度、入射短波辐射、入射长波辐射、风速。图4是温度、相对湿度和风速的验证对比图。从图4散点验证结果中可以看出,小时尺度的温度模拟与AWS自动观

测站观测结果之间的拟合优度 R^2 值很高,模拟的很好,且 R^2 通过了99%的显著检验水平。从温度的逐小时变化对比中也可以看出,温度模拟结果可以很好的捕捉到温度的日变化过程。在关注时段内,模拟温度与实测温度对比的平均绝对误差MBE(Mean Bias Error)为0.43℃,均方根误差RMSE(Root Mean Square Error)为3.81℃。这个误差对于山区来说,是在可以接受的范围内,站点的WRF模拟输出的气温场效果较好,可以用来驱动寒区水文模型。

相对湿度也是生态、水文模型中非常重要的气象参数之一。从小时尺度上看,湿度的模拟结果与实测对比拟合优度 R^2 也通过了0.01的显著性检验, $R^2=0.32$ 。但离散程度较大,没有温度模拟结果好。模拟相对湿度与实测相对湿度对比的平均绝对误差MBE为-2.9%,均方根误差RMSE为18.2%。图4中散点图分析结果显示,风速的模拟结果与观测点的对比结果不太理想。风速模拟与AWS自动观测结果之间拟合的 R^2 仅仅为0.03。从图中看,散点分布与1:1线相差比较远。从日变化过程上来看,也是高估的非常明显,且与实测的日变化过程没有接近的吻合度。模拟风速与实测风速对比的平均绝对误差MBE为3.7 m·s⁻¹,均方根误差RMSE为4.8 m·s⁻¹。

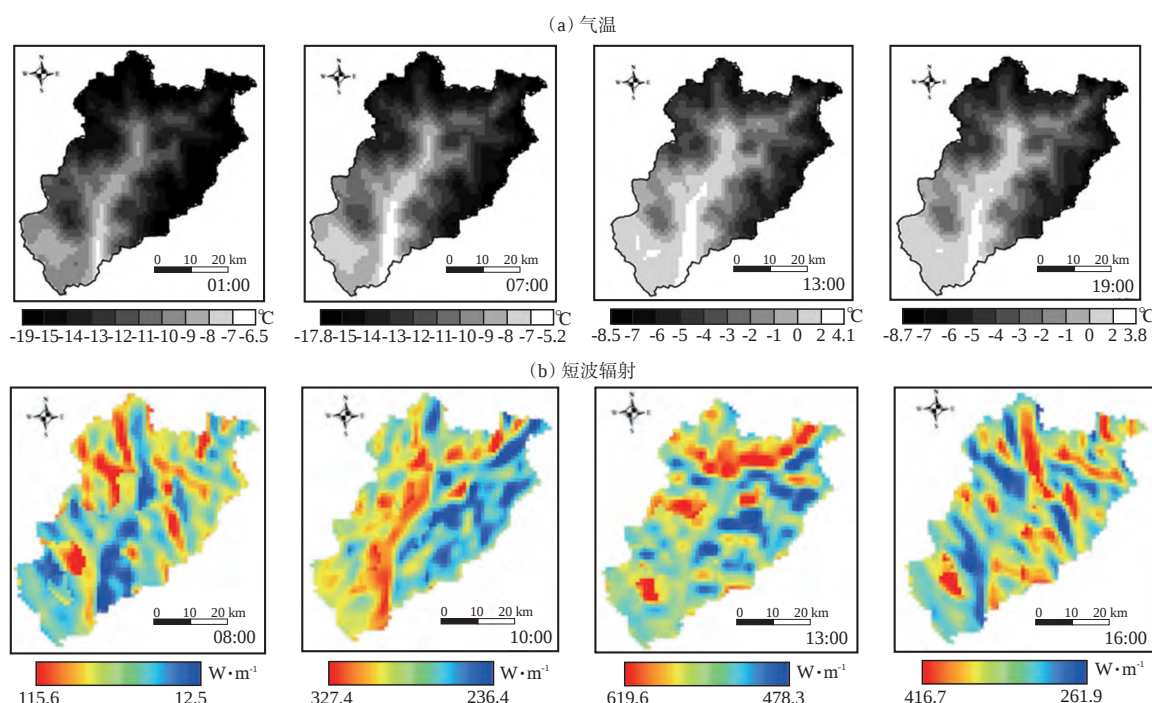


图3 喀依尔特斯河流域降尺度后1 km气温(a)、短波辐射(b)分布图(2012年3月24日)

Fig. 3 Spatial distribution of temperature and incident solar radiation in Kayiertesi River basin with 1 km resolution (March 24, 2012)

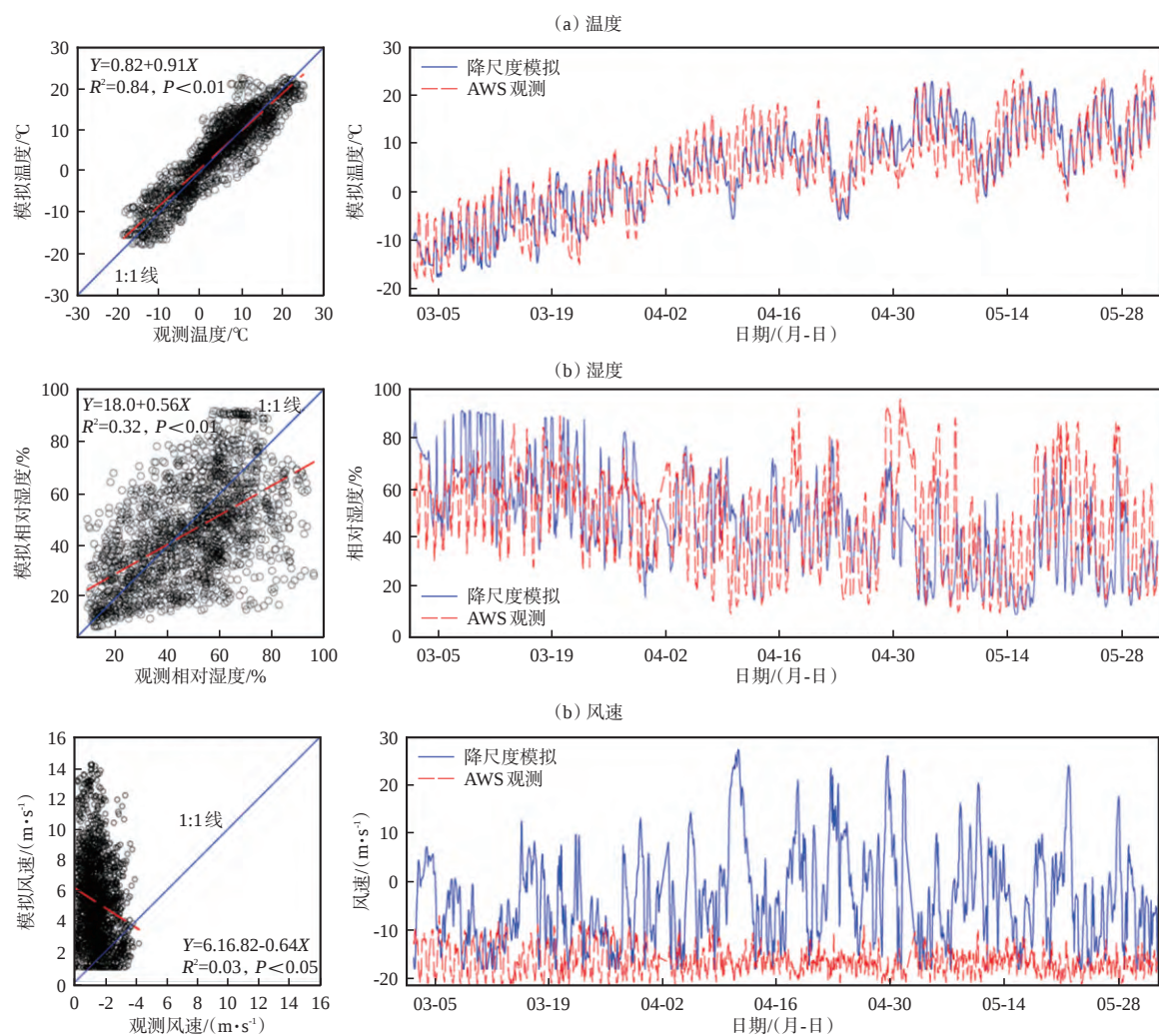


图 4 降尺度的温度、湿度、风速验证(2012年3月2日01:00—2012年6月1日00:00)

Fig. 4 Hourly validation of downscaling air temperatures, relative humidity and wind speed

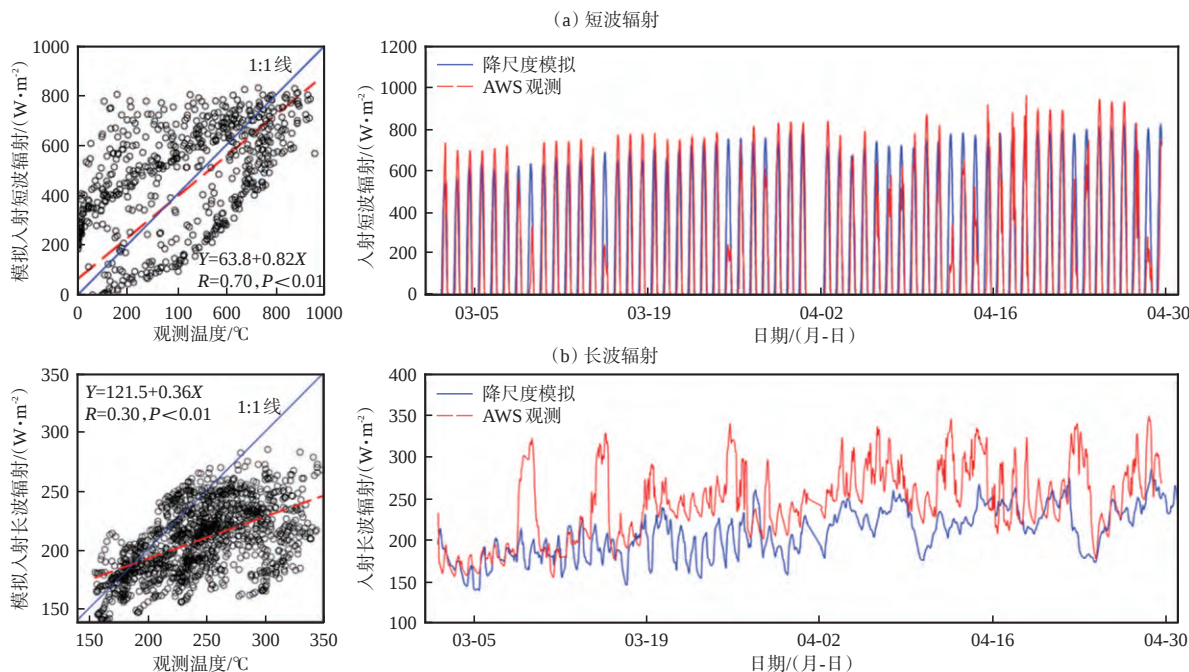


图 5 WRF 降尺度的入射辐射验证(2014年3月2日01:00—2014年6月1日00:00)

Fig. 5 Hourly validation of down scaling incident radiation

太阳高度角和地形是影响地表接收短波辐射量的主要因素,因此,不同年份同一时期的辐射数据可以做以对比,用来验证模拟结果的可靠程度.由于该研究区观测点四分量辐射计是2013年安装的,笔者选择2014年春季的观测数据予以验证.图5是地表接收到的短波和长波辐射的验证对比图.从散点结果中可以看出,小时尺度的短波辐射模拟的很好,模拟与实测的 R^2 值达0.7,同时通过了99%的显著检验水平.从逐小时变化上看,除了个别几天外入射短波辐射都与观测密切吻合,能够捕捉比较完整的日变化过程.模拟地表接收短波辐射与实测值对比的平均绝对误差MBE为 $28.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,均方根误差RMSE为 $163.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.地表接收的长波辐射的模拟结果与实测对比 R^2 值也通过了99%的显著性检验,其拟合优度为0.32.但从日变化过程上来看,没有短波辐射模拟结果好,且可以看到有明显低估的现象.模拟地表接收长波辐射与实测值对比的平均绝对误差MBE为 $-36.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,均方根误差RMSE为 $52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.由于辐射仪器本身存在着大约10%的观测误差,所以,对于山区而言,辐射对比的RMSE也在可以接受的范围内.作为流域上小时尺度的驱动数据,也是合理可行的.

本研究在喀依尔特斯河流域的验证结果与Pan等^[21]在黑河流域的验证结果进行了对比,发现大多数参数的验证结果比较相近,Pan等^[21]的风速验证结果更好一些.在小时尺度上,黑河流域验证的风速结果MBE为 $0.26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均方根误差RMSE为 $2.46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1[21]}$.分析其原因,一方面,我们风速仪器的架设高度是3 m,而WRF模拟的风速是10 m,使得对比存在一定的误差.另一方面,尺度问题,象元分辨率是1 km,这样一个面积上的风速与我们观测点相比较,必然存在一定误差.因此,还需要用更多的气象站观测资料,进一步详细进行验证,从而得到更为可靠的结论.

3 结论

基于WRF模式和MicroMet方法模拟了喀依尔特斯河流域高分辨率的空间气象数据,以便为该流域的分布式融雪径流模型做准备.利用流域的AWS气象观测数据对降尺度模拟的空间气象数据进行了时间尺度上的验证,本研究着重探讨小时尺度上的验证结果,因为小时尺度更具有时效

性,对融雪模拟更有意义.经验证,得到的主要结论有:

(1) 在小时尺度上,降尺度模拟的2 m空气温度是最理想的,地表接收的短波辐射也模拟的比较好,它们的MBE都比较小且 R^2 大于等于0.7;

(2) 2 m高度上的相对湿度和地表接收的长波辐射,这两者验证的 R^2 大于等于0.3,由于时间序列长,也通过了90%的显著性检验;

(3) 风速的模拟结果与实测对比结果不是很理想,受到仪器观测高度,以及对比的尺度等方面原因的影响,还应继续加强相关研究,从而得到更为可靠的结论.

综上,把WRF降尺度空间气象数据做短期空间分布式生态水文模型的驱动是合理可用的,尤其是温度和辐射的模拟结果比较理想.

致谢:美国国家数据中心(NSIDC)、中国科学院寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)和库威水文站上所有工作人员对本研究提供的支持,在此一并表示感谢.

参考文献(References):

- [1] Li X, Huang C, Che T, *et al.* Development of a Chinese land data assimilation system: Its progress and prospects[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(8): 881–892.
- [2] Cosgrove B A, Lohmann D, Mitchell K E, *et al.* Real time and retrospective forcing in the North American Land Data Assimilation System (NLDAS) project[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 2003, 108(D22).
- [3] He Siwei, Nan Zhuotong, Zhang Ling, *et al.* Spatial temporal distribution of water and energy fluxes in the upper reaches of the Heihe River simulated with VIC model[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 211–225. [何思为, 南卓铜, 张凌, 等. 用VIC模型模拟黑河上游流域水分和能量通量的时空分布[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 211–225.]
- [4] Wu Xuejiao, Zhou Jian, Li Yan, *et al.* Estimating the evapotranspiration in the middle reaches of the Heihe River by SEBS model based on the eddy covariance system[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(6): 1538–1547. [吴雪娇, 周剑, 李妍, 等. 基于涡动相关仪验证的SEBS模型对黑河中游地表蒸散发的估算研究[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(6): 1538–1547.]
- [5] Nijssen B, O'donnell G M, Lettenmaier D P, *et al.* Predicting the discharge of global rivers[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(15): 3307–3323.
- [6] Wilby R L, Hay L E, Leavesley G H. A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change

- scenarios in the San Juan River basin, Colorado[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 225(1): 67 – 91.
- [7] Wilby R L, Wigley T. Precipitation predictors for downscaling: observed and general circulation model relationships[J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(6): 641 – 661.
- [8] Giorgi F, Meams L O. Introduction to special section: Regional climate modeling revisited[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 – 2012), 1999, 104(D6): 6335 – 6352.
- [9] Li X, Li X, Li Z, *et al.* Watershed allied telemetry experimental research[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D22).
- [10] Kunstmann H, Jung G, Wagner S, *et al.* Integration of atmospheric sciences and hydrology for the development of decision support systems in sustainable water management[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2008, 33(1): 165 – 174.
- [11] Yu Z, Barron E, Yarnal B, *et al.* Evaluation of basin-scale hydrologic response to a multi-storm simulation[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 257(1): 212 – 225.
- [12] ShenYongping, Su Hongchao, Wang Guoya, *et al.* The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (II): Hazards Effects[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(06): 1355 – 1370. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(06): 1355 – 1370.]
- [13] ZhangWei, ShenYongping, HeJianqiao, *et al.* Assessment of the effects of forest on snow ablation in the headwaters of the Irtysh River, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1260 – 1270. [张伟, 沈永平, 贺建桥, 等. 额尔齐斯河源区森林对春季融雪过程的影响评估[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1260 – 1270.]
- [14] Wang Guoya, Mao Weifeng, He Bin, *et al.* Changes in snow covers during 1961 – 2011 and its effects on frozen ground in Altay region, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(6): 1293 – 1300. [王国亚, 毛伟峰, 贺斌, 等. 新疆阿勒泰地区积雪变化特征及其对冻土的影响[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(6): 1293 – 1300.]
- [15] Arakawa A V L. *Methods of computational physics* [M]. New York: Academic Press, 1988.
- [16] Kutta W. Beitrag zur näherungsweise integration totaler differentialgleichungen[J]. *Zeitschrift Fur Angewandte Mathematik und Physik*, 1901, 46: 435 – 453.
- [17] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, *et al.* A Description of the Advanced Research WRF Version 3 [R]. Boulder, Colorado, USA: NCAR/TN-475+STR, 2008.
- [18] Zhang Feimin, Wang Chenghai. Experiment of surface-layer wind forecast improvement by assimilating conventional data with WRF-3DVAR[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(3): 675 – 685. [张飞民, 王澄海. 利用WRF-3DVAR同化常规观测资料对近地层风速预报的改进试验[J]. *高原气象*, 2014, 33(3): 675 – 685.]
- [19] Li Changqing, Yan Zhihui, Wang Ying, *et al.* Comparison between NCEP-FNL reanalysis data and T213L31 assimilation data[J]. *Meteorological Monthly*, 2007, 33(01): 62 – 69. [李长青, 闫之辉, 王瀛, 等. NCEP-FNL与T213L31同化资料对比分析中的地形差异影响[J]. *气象*, 2007, 33(01): 62 – 69.]
- [20] Liston G E, Elder K. A meteorological distribution system for high-resolution terrestrial modeling (MicroMet)[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7(2): 217 – 234.
- [21] Pan X, Li X, Shi X, *et al.* Dynamic downscaling of near-surface air temperature at the basin scale using WRF-a case study in the Heihe River Basin, China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2012, 6(3): 314 – 323.

Validation of WRF model on simulating forcing data for Kaiyertesi River basin, Xinjiang

WU Xuejiao¹, PAN Xiaoduo¹, SHEN Yongping², ZHANG Wei¹, HE Jianqiao¹, HE Bin³

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Altay Hydrology and Water Resources Reconnaissance Bureau, Altay 836500, Xinjiang, China)

Abstract: With the improvement of hydrological simulation studies and the rapid development of distributed model, the need for high resolution meteorological forcing data were urgent. Based on the WRF model, this study simulated meteorological forcing data with 1km resolution in spring for the Kaiyertesi River basin in the headwater of Irtysh River, Altai Mountains, Xinjiang, China. The results were validated by hourly meteorological observation data in AWS to prepare for spring distributed snowmelt runoff model. The following conclusions were obtained: The average MEB (Mean Bias Error) of hourly 2-m surface temperature, 2-m relative humidity, 10-m wind speed, downward shortwave radiation and downward longwave radiation were 0.43 °C, -2.9%, 3.7 m·s⁻¹, 28.2 W·m⁻² and -36.2 W·m⁻², respectively, the average RMSE (Root Mean Square Error) of them were 3.81 °C, 18.2%, 4.8 m·s⁻¹, 163.5 W·m⁻² and 52 W·m⁻², and the average R² of them were 0.84, 0.32, 0.03, 0.7 and 0.3. Simulation results of hourly 2-m temperature and incident short-wave radiation were ideal and can be uses in hydrological simulation in high time resolution.

Key words: forcing data; downscaling; distributed; Kaiyertesi River basin