文章编号: 0455-2059(2013)04-0437-11

WRF 和 GLDAS 降水数据在黑河上游山区流域的比较与分析

侯玉婷[1], 南卓铜[2], 潘小多[2]

1. 兰州大学 资源环境学院 干旱区气候变化与水循环研究中心, 兰州 730000
2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

摘 要: 参考黑河上游 4 站点的观测数据, 用包含多统计指标的全面评价方法评价了 2004−2009 年 WRF 制备的 5 km, 1 h 降水数据和空间插值后的 5 km, 3 h GLDAS 降水数据. 结果表明两者对降雨的时空分布表现均优. WRF 产生的 < 1 mm 和 >8 mm 降水的总日数、总量更符合实际降水情况, 但缺少 1∼8 mm 的降水, 春季降水峰值偏大, 总降水日数偏少. GLDAS 降水和观测的相关系数更高, 但年降水量偏少; < 1 mm 降水日数、总量过多, > 2 mm 降水日数偏少, 春季降水峰值过大. 由此两组数据驱动模型模拟时, 需考虑数据本身的特点, 同时黑河流域仍迫切需要更精确的降水数据.

关键词: WRF; GLDAS; 降水数据; 黑河上游
中图分类号: P426.6 **文献标识码:** A

Comparative evaluation of WRF and GLDAS precipitation data over the upper Heihe River basin

HOU Yu-ting[1], *NAN Zhuo-tong*[2], *PAN Xiao-duo*[2]

1. Center for Climate Change and Hydrologic Cycle in Arid Region, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: A comprehensive comparative evaluating approach, consisting of a set of statistical indicators and comparisons against *in situ* observations from four established meteorological sites in the upper Heihe River basin, was proposed in this study. Hourly WRF precipitation and 3 h GLDAS precipitation in the same 5 km resolution, the latter being interpolated, were evaluated in the period of 2004−2009. It was shown that both the WRF and GLDAS data had well captured the time and spatial distribution characteristics of precipitation. WRF data were closer to observed precipitation in representing < 1 mm and > 8 mm precipitation in terms of annual rainy days and annual total amount. But WRF detected less 1∼8 mm precipitation, larger peaks in spring, and fewer total rainy days. GLDAS precipitation had a higher correlation and less annual total amount to that observed, overestimated rainy days and the amount for < 1 mm events and generally underestimated rainy days for > 2 mm. GLDAS data also detected larger peaks in spring. It is necessary to take the characteristics of the two datasets into account when they are used for the model. Meanwhile, it is urgent to produce more accurate precipitation data to meet the demands from eco-hydrological studies in HRB.

Key words: WRF; GLDAS; precipitation data; upper Heihe River basin

收稿日期: 2012-09-13; **修回日期:** 2012-10-29
基金项目: 国家自然科学基金项目(91125006); 国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201009)
作者简介: 南卓铜(1977−), 男, 浙江乐清人, 研究员, 博士, e-mail: nztong@lzb.ac.cn, 研究方向为空间决策支持系统、水文建模等, 通信联系人.

降水是气候气象模型、水文和陆面过程模型重要的驱动数据, 随着模型向详细的物理过程、分布式和高分辨率应用的发展, 对格网化的高时空分辨率降水数据的需求也已十分突出. 并且, 降水数据的质量严重影响模型的模拟效果[1], 是限制模型应用的最主要原因之一[2]. 虽然当前已可获得免费的全球高分辨率降水数据产品, 在具体的研究流域上也有多种方法, 如空间插值、统计降尺度、动力降尺度、多元信息融合等制备高分辨率的降水驱动[3], 但数据来源、制备方法、区域和参数等的不同也会导致数据产生各种差别[4−6], 特别在降水分布更为复杂的山地[7]和小流域[8]上差别更显著.

美国国家航空航天局开发的全球陆地数据同化系统[9](Global Land Data Assimilation System, GLDAS)提供3个可选的陆面过程模型, 融合多种来自地面和卫星的观测数据, 提供优化的近实时地表状态变量(降水、辐射、温度等), 分辨率达3 h, 0.25°, 其模拟产生的驱动数据集在全球范围内被广泛使用. Wang等[10]对松花江2000−2006年的GLDAS降水的分析表明GLDAS日降水、月降水的数据质量均很好, 但Yang等[11]与蒙古的比对结果则反映出GLDAS对实际的降水频率和降水量存在低估, 这表明GLDAS降水数据质量在不同区域上也有差异. 当GLDAS降水应用在特定区域时, 需要进行谨慎的评价.

中尺度天气研究与预报模型(The Weather Research and Forecasting Model, WRF. http://www.wrf-model.org)是美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)发展的新一代中尺度数值天气预报模型. 应用WRF动力降尺度可获得可靠的驱动数据集[12], 但也有评价认为WRF模拟的降雨位置准确, 对降雨面积则存在高估现象[13]. Caldwell等[14]在北美的比对显示WRF高估了高强度的降雨和降雨量, 但对降雨的地形分布表现得很好.

黑河流域是西北干旱区第二大内陆河流域, 有限的水资源是制约当地社会经济发展的重要因素, 水文、生态问题一直是黑河流域的研究热点. 中国国家自然科学基金委于2009年启动了"黑河流域生态—水文集成研究"重大研究计划, 在黑河流域开展了许多水文、陆面过程模型的应用和研究. 其中黑河上游是产流区, 上游水资源状况是研究的重点, 但目前黑河流域上游降水观测有限, 远不能满足模型模拟对高质量、高分辨率降水数据的需求. 基于这种需求, 已有研究使用WRF动力降尺度制备驱动数据的方法, 产生了一套完整的驱动数据集[15−17]. 目前, WRF制备的降水数据以及GLDAS降水数据作为降水驱动, 不断被应用于黑河流域相关研究中[16−17]. 事实上, 此两组降水数据在黑河上游的数据质量并不清楚, 缺少系统的工作来比较此两组数据的特点和优劣. 本文以黑河流域上游4个站点的观测数据为参考, 应用多种统计指标从时间和空间的角度详细分析和评价了WRF动力降尺度制备的降水数据和GLDAS降水数据, 为黑河流域上游降水驱动的合理选择提供依据. 本文的评价方法也可以被用于其他区域的降水数据评价.

1 研究方法

1.1 研究区

黑河流域是中国西北干旱区第二大内陆河流域. 黑河上游(图1)是指流域南部莺落峡以上区域, 是黑河流域的产流区, 属祁连山区北缘, 面积约1×10^4 km^2, 海拔1 700∼5 079 m, 半干旱森林草原气候, 年均温−3∼7 °C, 85%的降水主要发生在5−9月, 降水量由东南向西北递减[18].

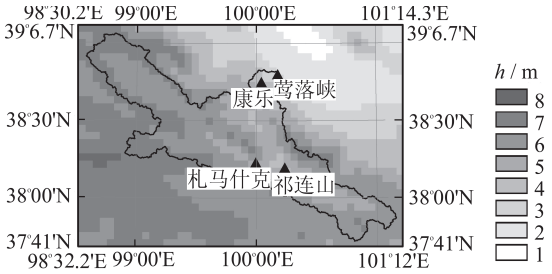

图1 研究区高程分布和台站位置

Figure 1 Topographic map and locations of the observation sites of the study area

黑河上游研究区内有4个雨量观测站: 莺落峡站(100.18°N, 38.80°W, 1 684 m)、祁连站(100.24°N, 38.20°W, 2 694 m)、康乐站(100.04°N, 38.75°W, 2 201 m)和札马什克站(100.00°N, 38.23°W, 2 827 m), 4个站点均有2004−2009年完整的逐日降雨量记录.

1.2 降水数据

本文采用WRF 3.0版本对降水进行模拟. 初始数据采用全球预报系统GFS(Global Forecast System)的FNL(Final Operational Global Analysis)全球分析资料, 分辨率6 h, 1°, 作为预报的初始场. 输入的高程来自30 m Aster GDEM. 土壤分类图来自联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)等机构联合构

建的世界和谐土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD), 分辨率为 1 km. 输入的土地覆盖数据以 2000 年 1∶10 万土地覆盖数据库为基础, 结合其他数据(MODIS 资料和 NDVI 资料等)补充缺少的信息, 从中国科学院资源环境分类系统转换为国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)制定的分类系统, 从而生成黑河流域 1 km 的土地覆盖数据. 高程、土壤分类和土地覆盖数据根据面积占优原则重采样到 5 km. 模拟时的格网覆盖整个黑河流域, 采用 25, 5 km 的嵌套, 物理过程配置方案见表 1.

模拟得到 2004−2009 年分辨率 5 km, 1 h 的驱动数据集, 其中气温、气压及湿度验证精度较高[15]. 从中提取黑河上游的降水量数据, 即本文用于比较分析的 WRF 降水.

本文使用的是 GLDAS-NOAH 的 0.25°, 3 h 降水数据, 即全球数据同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS)数据和 NOAA 气候预测中心的全球综合分析降水集(Climate Prediction Centers Merged Analysis of Precipitation, CMAP)的结合[19]. 用 MicroMet 模型[20]将 GLDAS 的降水数据插值到 5 km.

表 1　WRF 模式物理过程配置方案[15]

Table 1　WRF configuration

物理过程	水平维数	时间间隔/s	微物理过程	积云方案	PBL	辐射方案	陆面过程	初始场和边界条件	投影方式
25 km	40×54	150	Lin et al.	Kain-Fritsch	YSU	Dudhia	Noah LSM	NCEP/FNL	Lambert
5 km	100×120	30	Lin et al.	Kain-Fritsch	YSU	Dudhia	Noah LSM	NCEP/FNL	Lambert

MicroMet 是专为插值大气驱动而设计的半物理过程模型, 使用非线性的降雨—高程方程来插值降水. 输入到 MicroMet 的高程数据由 SRTM DEM 90 m 重采样得到(图 1), 降水调整系数由上游及周边站点 10 年平均的降水量根据文献[21]计算得到.

WRF 和 GLDAS 采用 UTC 时间, 台站观测为北京时间, 后续分析中均已考虑到了时间换算.

1.3　评价方法

本文从时间、空间的多个角度进行全面的评价, 建立了如表 2 的评价体系, 对比分析了 2004−2009 年共 6 年的数据. 与以往其他研究中的降水评价方法对比, 本文的评价方法有以下特点:

1) 全面统计降水分析中的常用指标, 如降水量、降水日数、月降水量百分率, 以及与观测的相关系数及均方根误差.

2) 综合时间和位置的分析, 包括在降水发生时间、高程位置和强度上的分析.

3) 分析多时间尺度的数据质量, 包含年尺度、月尺度、日尺度的数据质量分析, 以及当数据时间分辨率改变时的数据质量变化情况.

本文建议的方法既能表现黑河流域需要关注数据的重点, 如春冬的降水量、高强度降水的时空分布、降水随高程的变化和降水时间的一致性, 同时也是一套比较完整、全面的降水数据分析方法范例, 可为其他降水数据的分析评价做参考.

表 2　分析方法

Table 2　Evaluation methods

		指标
WRF, GLDAS 与观测的对比	年尺度	年均、逐年降水量 5−9 月降水占全年的百分比 与观测的相关系数 年均降水日数
	月尺度	6 年逐月降水量曲线
	日尺度	各月内日降水量的变化范围 各强度日降水的年均降水日数及降水总量
	降水时间一致性	指标命中率(POD)/空报率(FAR)/临界成功指数(CSI) 按降水是否同时发生统计的降水日数及降水量
	时间尺度变化	与观测的相关系数的变化
WRF 与 GLDAS 对比	年尺度	年降水的空间分布 年均、逐年降水量的差别 年降水量和年降水日数随高程的变化
	月尺度	高程区间内月降水量的变化
	日尺度	高程区间内日降水强度的分布

2　结果和讨论

2.1　年尺度

2.1.1　空间分布

图 2 展示了 WRF 和 GLDAS 逐年降水量的空间分布. 两组数据均有明显的流域地形纹理, 降水量空间分布的趋势一致, 降水最丰的区域都是东、南边缘, 可见两组数据均较好地表现了流域的空间特征.

WRF 和 GLDAS 降水在各个年份均有较大差别. 2005 年 WRF 降水空间分布异常, 研究区中

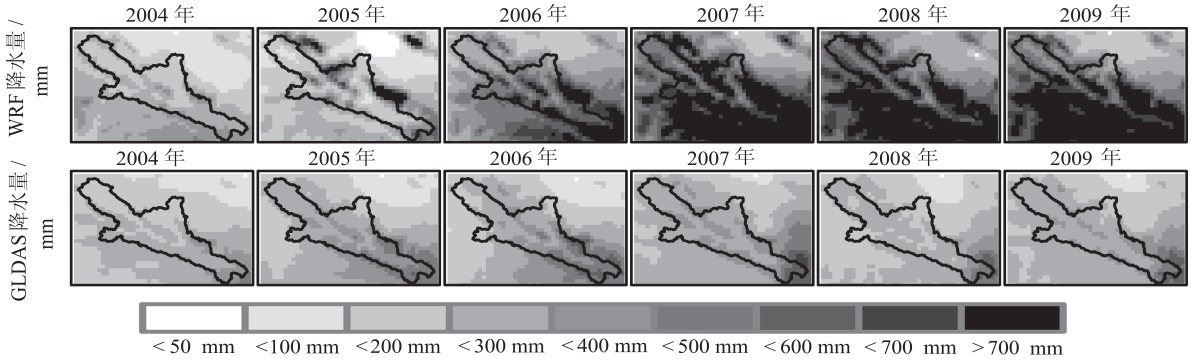

图 2 2004−2009 年WRF 和GLDAS 逐年降水量的空间分布

Figure 2 Spatial distribution of annual precipitation of WRF and GLDAS of 2004−2009

心年降水量低于100 mm, 同时临近地区则迅速升至700 mm, 这是不符合实际的. 2006年以后的WRF年降水量与2004, 2005年的差距明显, 流域东、南边缘的年降水量都维持在700 mm以上, 同时流域内年降水量大于600 mm的区域占相当大的比重. WRF模拟得到的降水在2004−2009年变化强烈, 并不稳定. 相对地, GLDAS的年降水在6年间变化幅度较小, 比较稳定. GLDAS数据在流域东南有较高的年降水量, 最高可达700 mm, 但总体上, 大多数区域的年降水都在400 mm以内. 根据研究区内实际观测站点情况, GLDAS数据的年降水量总体偏小.

图3是覆盖研究区的所有格点上(图2), WRF与GLDAS的逐年(图3a)、6年平均(图3b)降水量对应情况, 可以看出两组数值上的明显差异, 逐年降水量的均方根误差达到273 mm, 年均降水量均方根误差为188 mm. WRF和GLDAS逐年降水量的线性回归方程斜率为0.24, 可见WRF年降水量普遍比GLDAS的大. 如图可见仅在少部分格点、年份上GLDAS年降水量高于WRF的, 两者的相关系数为0.54, 表明了一定的相关性, 而6年平均相关系数达0.83, 说明两组数据在年尺度上的空间分布相关性好, 但存在总体的放大或缩小的情况.

由图2−3可以看出, GLDAS与WRF降水数据的空间分布特征表现较一致. 原始GLDAS数据的空间分辨率是0.25°, 远低于WRF模拟的5 km空间分辨率. 但上述结果表明, 尽管两者的年降水量有较大区别, 使用MicroMet插值后的GLDAS降水完全能够表现出与WRF降水相当的空间分布格局.

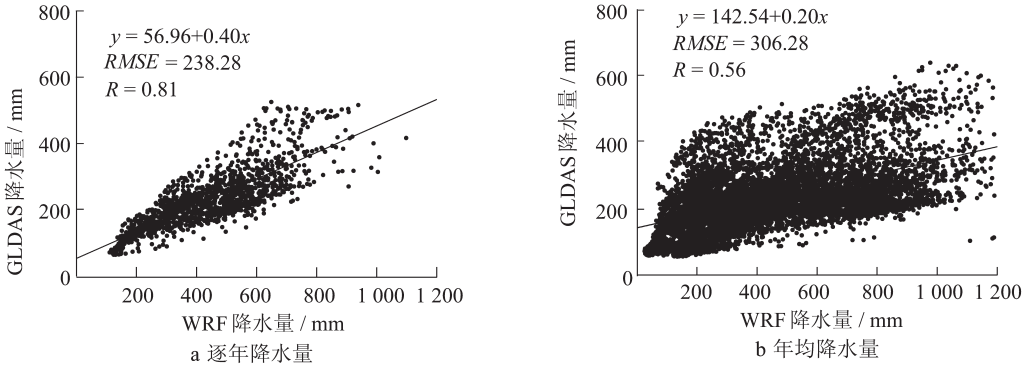

图 3 2004−2009 年所有格点上WRF 和GLDAS 的降水量

Figure 3 Precipitation of WRF and GLDAS on each grid cell of 2004−2009

2.1.2 和观测的对比

根据4个站点的逐日降水观测资料, 分析台站位置格点上的WRF, GLDAS降水. 从统计的逐年降水量(表3)上可见, 2005, 2008年降水最丰, 无降水明显偏少的年份. WRF降水则是2007, 2008年最丰, 2004, 2005年过少, 和图2中年降水空间分布异常的现象一致. GLDAS降水2006, 2007年最丰, 但2008年是降水最少的年份, 和实际不符. WRF降水与观测的偏差在各年变动幅度较大, 除2004, 2005年偏小外, 其余年份总体偏大. GLDAS降水的偏差波动较小, 但总体偏小. 总体偏差的水平, WRF和GLDAS降水两者相当.

从统计的5−9月降水量占相应年降水量的百分比(表3)中可见, 在莺落峡站上WRF, GLDAS降水的统计结果和观测较接近; 在康乐站上则是

表 3　4 站点上 WRF, GLDAS 模拟的和观测的年降水量及其相关系数、均方根误差和 5−9 月降水量占相应数据年降水的百分比

Table 3　Comparison of annual total precipitation, correlation coefficient and the percentage of May to September precipitation between WRF, GLDAS and observations

站点	年份	年降水量/mm			5−9 月降水量占比/%			R		$RMSE$/mm	
		观测	WRF	GLDAS	观测	WRF	GLDAS	WRF	GLDAS	WRF	GLDAS
康乐	2004	175.40	114.98	186.86	66	81	86	0.29	0.45	1.72	1.76
	2005	299.30	151.55	193.15	71	89	88	0.23	0.36	2.70	2.54
	2006	131.10	332.27	218.78	73	93	91	0.44	0.40	2.75	1.58
	2007	140.80	496.90	278.63	77	82	76	0.44	0.32	3.91	2.00
	2008	319.80	447.82	195.16	76	80	77	0.64	0.54	3.33	2.41
	2009	167.50	303.69	202.35	82	90	91	0.43	0.40	2.28	1.53
祁连	2004	354.20	171.34	281.74	92	87	83	0.37	0.34	2.97	3.03
	2005	404.80	102.76	357.13	95	94	87	0.27	0.56	3.31	2.72
	2006	389.10	438.89	379.58	94	96	91	0.49	0.50	3.69	2.70
	2007	371.40	496.03	347.37	90	92	75	0.41	0.42	3.60	2.62
	2008	477.50	455.29	239.33	88	87	77	0.50	0.50	3.55	3.16
	2009	433.00	521.91	269.91	91	95	89	0.39	0.46	4.23	2.99
札马什克	2004	443.60	151.17	255.09	88	88	83	0.36	0.36	3.48	3.43
	2005	510.10	117.07	313.79	91	90	87	0.19	0.59	3.99	3.17
	2006	504.30	412.60	312.41	93	97	91	0.47	0.53	3.76	2.95
	2007	379.80	504.26	311.60	90	92	77	0.43	0.44	3.54	2.55
	2008	458.30	466.17	217.59	91	88	77	0.50	0.52	3.83	3.35
	2009	407.20	505.00	243.82	94	94	89	0.43	0.46	3.64	2.74
莺落峡	2004	108.80	62.06	118.16	82	74	85	0.42	0.44	1.04	1.17
	2005	218.90	51.60	105.01	84	84	86	0.18	0.76	2.61	1.68
	2006	168.90	166.54	113.23	86	90	90	0.47	0.32	2.37	2.39
	2007	240.60	264.33	163.22	73	78	74	0.60	0.64	2.31	1.78
	2008	206.20	259.95	113.96	72	72	77	0.60	0.62	2.65	1.65
	2009	178.00	168.64	120.60	85	92	90	0.33	0.50	2.31	1.78

2004−2006 年的 3 年内两者的统计数值同时大幅度高于观测的; 在祁连和札马什克站上, 则是 GLDAS 降水的统计数值偏低, WRF 降水的则比较接近观测的. 总体可见, 尽管 WRF 模拟得到的年降水量偏差较大, 但年降水在时间上的集中分布情况更准确, 更符合黑河流域的实际情况.

从逐年降水相对观测的相关系数(表 3)来看, 两者都可达较高的相关系数, GLDAS 降水单站、单年的最高达 0.76, WRF 降水单站、单年的最高可达 0.64. 在各年份上, 两组相关系数在 2005 年差异最大, WRF 降水 2005 年的相关系数非常低, 符合此前数据异常的判断, 2008 年两者的相关系数均很高. WRF 降水相关系数除格外低的 2004−2005 年外, 其他年份的仅总体略偏小于 GLDAS 降水的. 同时计算的均方根误差($RMSE$)GLDAS 降水的比 WRF 降水的要小. 可见从与观测的相关性及方差而言, GLDAS 降水数据优于 WRF 降水数据.

统计了观测、WRF 和 GLDAS 的年平均降雨日数, 分别为 92.50, 77.05, 155.15 天. 小于 0.1 mm 的降水可忽略不计, 故统计时去掉了 WRF, GLDAS 降水数据中小于 0.1 mm 的值. 结果可见 WRF 模拟得到的年均降水日数低于观测的, GLDAS 的则大幅高于观测的. 显示出 WRF 模拟的降水频率有偏低的现象, 这与 Caldwell 等[14]的对比结果相同. GLDAS 高估降水频率的结果, 与 Yang 等[11]对蒙古 2003 年 5−9 月数据的分析结果相反, 可能是由于研究区差异和研究时段的不一致造成的.

2.1.3　年降雨日数和降雨量随高程的变化情况

图 4 反映了 WRF 和 GLDAS 降水数据的年降水日数和年降水量随高程的变化, 可见两者都有明显的海拔分布规律, 但两者间亦有差别. WRF 的降水日数始终随高程升高单调递增, 最高达 160 天/年, 而 GLDAS 的降水日数随高程的变化不是单调递增的, 在高程 4 000 m 时达到最大, 4 000 m 以后下降, 最高达 180 天/年. 但 WRF 与 GLDAS 的年降水在 4 000 m 处同时出现高峰(图 4b).

GLDAS 年降水量随高程分布曲线的形状和年降水日数随高程分布曲线一致, 和刘勇等[22]依

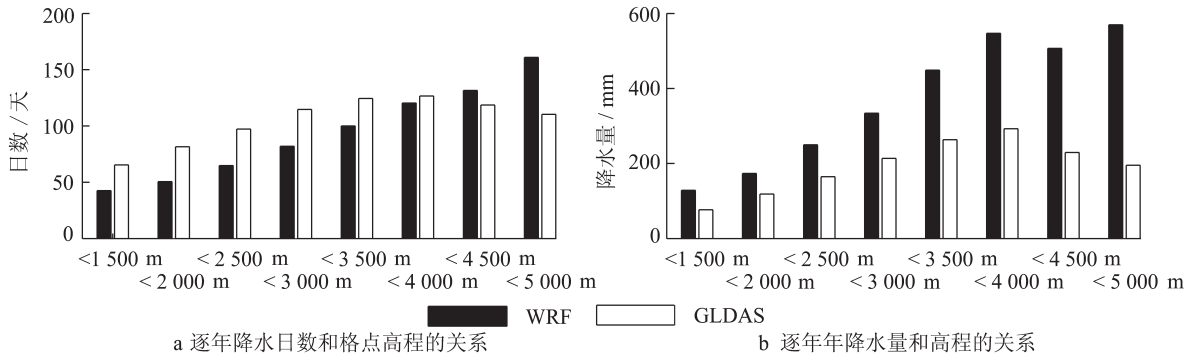

图4 2004−2009年全部格点上WRF和GLDAS降水

Figure 4 Precipitation of WRF and GLDAS on each grid cell of 2004−2009

据现有台站和高程资料建立高分辨率降水量分布模型统计的降水—高程曲线形状相似. WRF年降水量的曲线形状则呈S型, 和王宁练等[23]依据在3 500 m以上布设的观测点资料统计的夏季降水曲线相似. 在黑河上游高至3 500 m的区域占很大比例, 而现有台站的位置高程通常较低, 故参考王宁练等[23]的结果, 认为WRF降水数据更符合实际状况. 但众多研究表明, 黑河上游山区最大降水高度应在4 000~4 500 m[22−24], GLDAS降水的最大降水高度在4 000 m以下, WRF的在3 500~4 000 m和>4 500 m位置, 略有不同.

2.2 月尺度

2.2.1 和观测的对比

从图5可见, WRF 2004, 2005年降水量十分少, 不同于其他年份, 且2005年降水曲线形状明显与其他年份不一致. 通常4−5月起降水量已有明显增加, 但2005年WRF降水数据则推迟到了7月, 这与当年GLDAS降水和观测降水也不相同, 故从年降水曲线的形状上亦可见WRF在2005年的预报存在异常. 在2006−2009年的WRF降水数据中, 10月−次年3月的降水往往和观测的较接近, 7−9月的则常有过高估计, 4, 5月的也有高估的现象. GLDAS降水相对观测的则通常偏小, 仅在4, 5月有偏大的现象. 但是从相关系数上看, GLDAS的表现更好. 综合上述分析, 从月尺度的降水序列上看, 两组数据的表现相当.

2.2.2 随高程的变化

图6比对WRF和GLDAS月降水在高程上的分配. 由于GLDAS降水量比WRF的少许多, 因此使用了不同的图例范围, 凸显降水在高程上的相对分配. WRF年降水量比GLDAS的更大, 但两者在6−9月的降水在高程上的相对分配比较相似, 特别在2006−2009年尤为明显. 可见两组数据表现了相似的山地降水分布特征. 文献[22, 25]表明黑河流域降水极大高度在各月上有明显的变化, 有夏季高、冬季低的特征, 在4−5月突然跳升, 9−10月又突然降低. 但此特征在WRF降水数据中则刚好相反, 11−6月的降水基本集中在海拔4 500~5 000 m的位置, 7月后降低到3 500~4 000 m位置, 是夏季低、冬季高. 相较之下, GLDAS逐月降水量随高程的变化则和文献[22, 25]中的更相近.

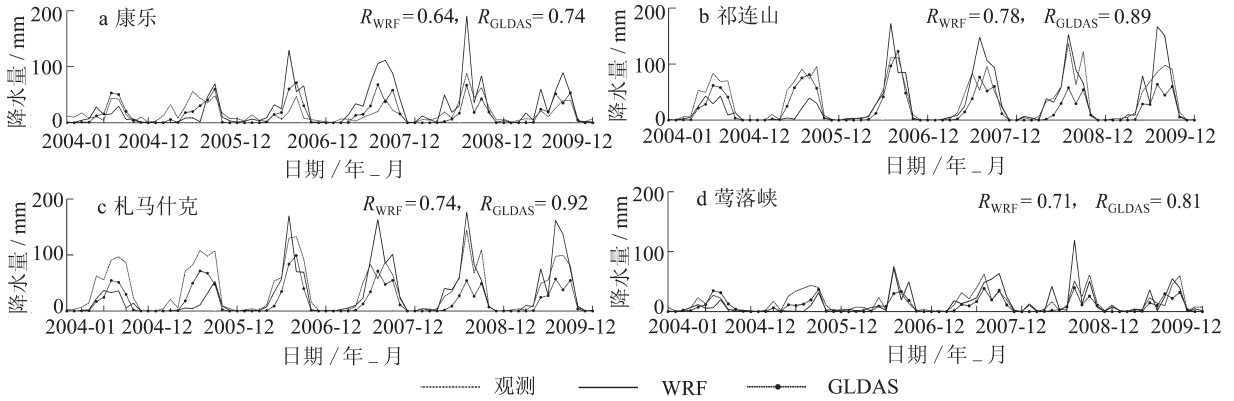

图5 2004−2009年4个站点上WRF, GLDAS降水和观测的月降水序列及相关系数

Figure 5 Monthly precipitation from WRF, GLDAS and observations in 2004−2009 and their correlation coefficients at four sites

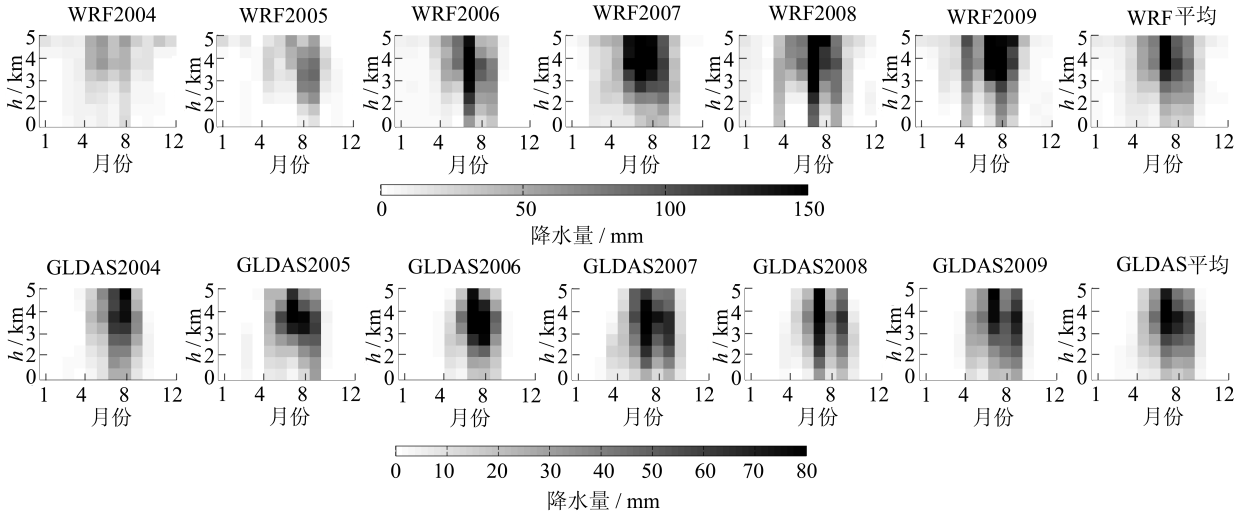

图 6　WRF 与 GLDAS 逐月降水量随高程的变化

Figure 6　Changes of precipitation amount with elevation from the WRF and GLDAS

2.3　日尺度

2.3.1　2004–2009 年内日降水强度的分布特征

图 7 统计了 WRF, GLDAS 和观测的各强度降水的年降水日数和累计降水总量. 先对 0.1~1.0 mm, 1~10 mm, 10~25 mm, >25 mm 的各强度降水按每隔 0.1, 0.5, 2.0, 5.0 mm 的距离划分区间, 再按区间统计. 图 7 为平均到单年、单站的统计结果.

WRF 和 GLDAS 模拟的日降水都主要集中在 0~5 mm 的范围内, 与文献[26]描述的状况一致. GLDAS 模拟的<1 mm 的降水的发生频率非常高, 其总数可达观测的 3 倍左右, 而 WRF 模拟的<1 mm 的降水日数和总量都和观测的较接近. 在 1~8 mm 的降水强度区间上, WRF 模拟的降水日数和总量基本上都小于观测的, >8 mm 的降水则和观测的较相似, 但总体略偏多, 特别是在>20 mm 的降水强度上, 这与 Caldwell 等[14]的 WRF 的降水强度偏大的结论一致. GLDAS 模拟的<2 mm 的降水日数多大于观测的, 但在>2 mm 的降水强度上则基本上都少于观测的, 10 mm 以上降水的日数、频率和观测的差别很大, 几乎无>20 mm 的降水.

观测中降水频率最高的是 1~2 mm 的降水, WRF 和 GLDAS 模拟的则都是 0.2 mm 以下的降水, 说明 WRF 和 GLDAS 模拟都存在低强度的降水偏多的问题. 但 WRF 和 GLDAS 模拟的降水日数都在 1~2 mm, 10~15 mm 出现峰值, 这与观测一致, 说明两组数据能够捕捉到实际的降水强度分布特征.

结合年平均降水日数的统计, 可以判断

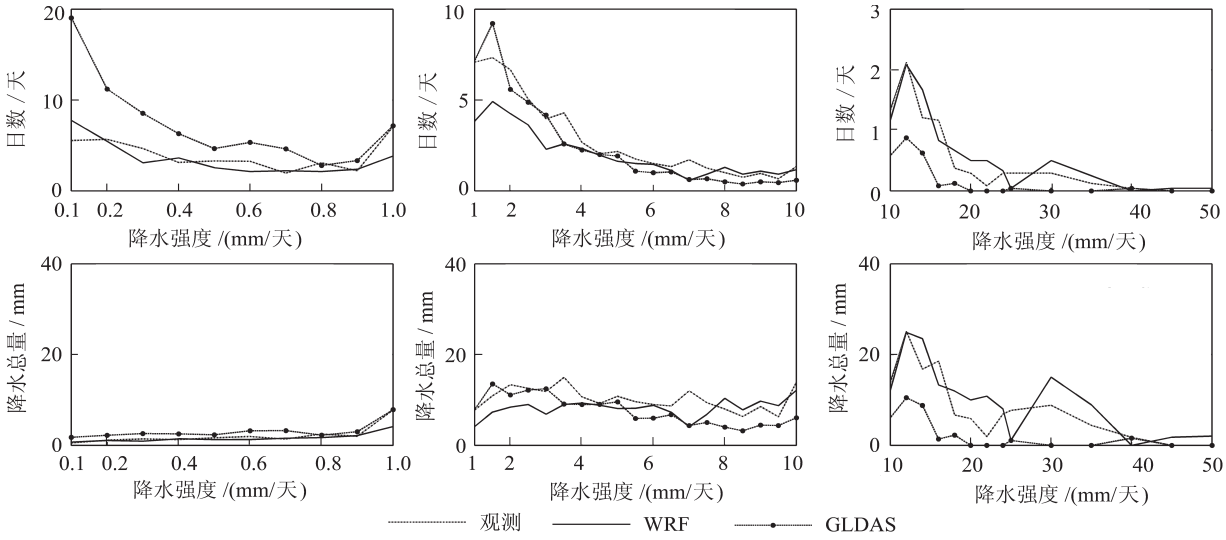

图 7　WRF, GLDAS 降水和观测在各雨强区间上的降水日数、降水量

Figure 7　Precipitating days and magnitude of WRF, GLDAS and observations at each intensity range

GLDAS多估计的降水日主要是0.1~1.0 mm强度的降水, 而WRF模拟的高强度降雨略有偏大, 正是带来很大的年降水偏差的主要原因.

2.3.2 日降水强度在各月上变化

由图8可见, GLDAS模拟的日降水在全年各月上都集中在比WRF模拟的和观测的更小的降水强度上, 各月的降水强度中值也十分低. 这正是由于前述的GLDAS模拟的<1 mm降水的降水频率过高造成的, 但同时GLDAS模拟的最高强度的降水也一般发生在7, 8月, 和观测一致. GLDAS数据在9月却出现了观测中未有记录的>25 mm降水, 是比较异常的.

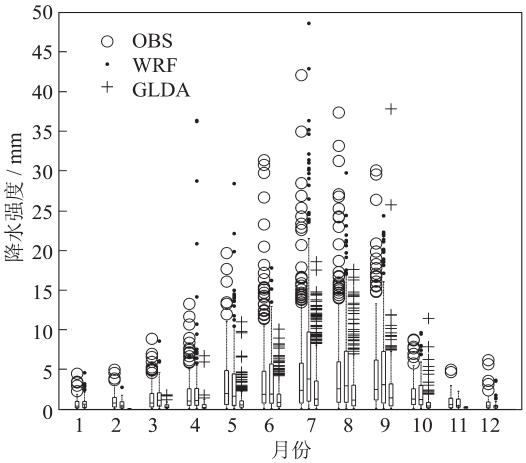

图8 2004−2009年内各强度日降水在各月上的分布

Figure 8 Daily precipitation intensity on each month of 2004−2009

WRF降水数据在6−10月都比观测的大, 同时中值也偏大, 意味着同时期的WRF降水强度多高于观测的. WRF模拟的年内最大降水强度也发生在7月, 与观测的相同. 但WRF降水数据自4月起已出现>20 mm的日降水, 但在观测中大于20 mm的降水则在6月后才出现, 同时在GLDAS降水数据中, 4月也出现了相对强度较大的降水. 可见WRF和GLDAS都有将高强度的降水提前到春季的特点, 这应是导致前述WRF和GLDAS数据中春季降水量偏大的原因. 但总体而言, 从日降水强度的月份变化上讲WRF模拟的降水表现更好.

2.3.3 高程区间上降水强度的分布

图9a统计了各降水强度的年均降水日数随高程的变化, 可以看出WRF和GLDAS两者的统计结果有明显不同. GLDAS降水数据在高程上有三处明显的集中, 0~0.2 mm降水在海拔4 500 m处集中, 1~2 mm降水以3 500~4 000 m为中心集中, 10~14 mm降水在3 500~4 000 m处集中. WRF降水数据在高程上的集中程度比GLDAS的更强, 集中位置也更高, 0~0.2 mm, 1~2 mm降水在4 500~5 000 m强烈集中, 10~14 mm降水则集中在3 500~5 000 m.

图9b统计了各降水强度的年降水量随高程的变化, 可见两者的降水空间分布格局相差很大,

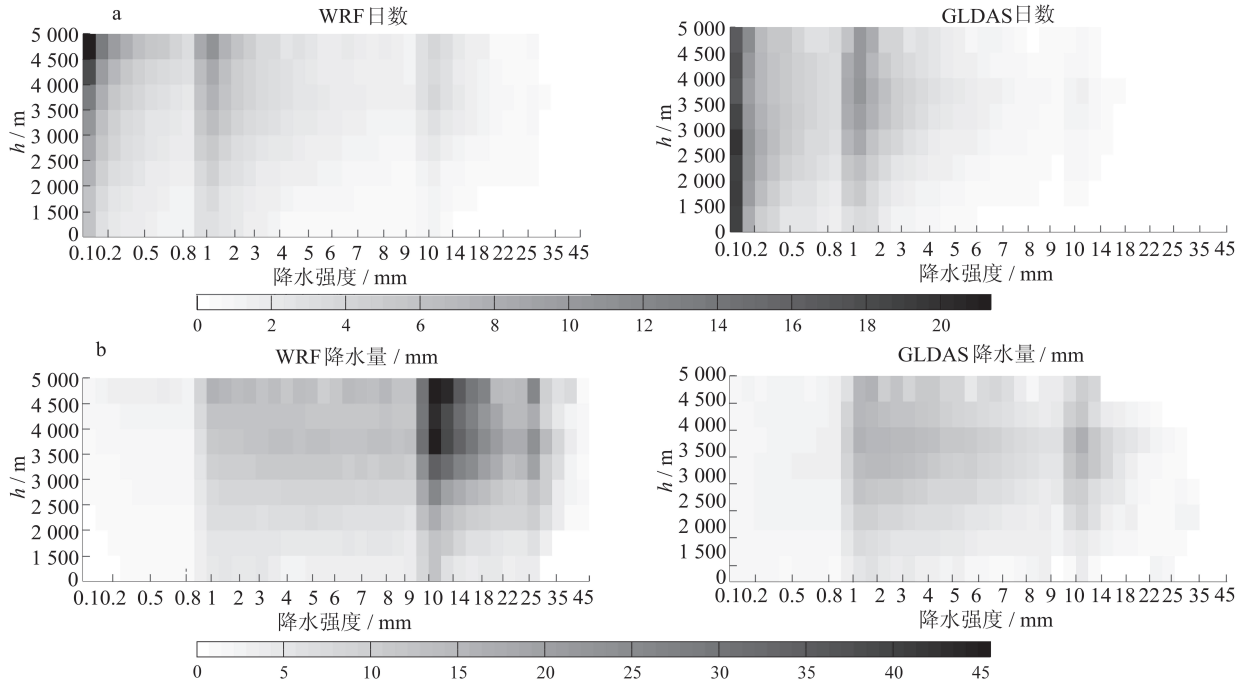

图9 2004−2009年研究区内8高程区间上统计的各强度降水的年均降水日数和降水量

Figure 9 Averaged precipitating days and averaged total precipitation over 8 altitude intervals based on daily precipitation of 2004−2009

同时两者1 mm 以下的降水集中起来都不足以影响年降水量的空间分布. 而WRF 降水数据主要影响年降水量的是在3 000~5 000 m 处的10~16 mm 降水和在3 500~5 000 m 处的30 mm 左右降水, 正是前述略偏多的高强度降水. GLDAS 降水数据主要影响年降水量的是3 500~4 000 m 处的1~3 mm 降水, 以及在3 000~4 000 m 处的10~14 mm 降水.

2.4　降水时间的一致性及时间尺度变化

根据WRF 或GLDAS 降水数据与观测是否同时侦测到降水, 划分为4 个时间段(T1−T4): T1 表示WRF 或GLDAS 降水数据与观测同时有降水(预报成功); T2, T3 分别表示仅有观测和仅有WRF 或GLDAS 降水数据出现了降水(预报失败和虚假警报); T4 指两者均无降水. 根据台站资料, 表4 统计各时间段的降水日数百分比, 以及各时间段内总降水量占全部降水量的百分比. 表5 用天气模拟中常用的指标命中率(POD)、空报率(FAR)和临界成功指数(CSI)评价了两组降水.

表 4　WRF 和GLDAS 降水数据与观测的日降水的对应情况

Table 4　Detection of precipitation of WRF/GLDAS vs daily observations

数据集	时段	观测降水量占比/%	WRF 降水量占比/%	降水日数占比/%
WRF	T1	68.35	82.73	13.73
	T2	31.65		11.61
	T3		17.16	6.06
	T4			68.60
	T1+T4			82.33
GLDAS	T1	91.94	74.49	20.53
	T2	8.06		4.81
	T3		24.50	16.88
	T4			57.78
	T1+T4			78.31

表 5　WRF, GLDAS 降水数据的POD/FAR/CSI 值比较

Table 5　FOD/FAR/CSI of WRF and GLDAS

数据集	POD	FAR	CSI
WRF	0.54	0.31	0.44
GLDAS	0.81	0.45	0.49

WRF, GLDAS 降水数据和观测在时间上对应一致的时段(T1, T4)分别占到了82.33% 和78.31%, 说明两组数据和观测在降水时间上均比较一致. 从POD/FAR/CSI 上看, GLDAS 的命中率比WRF 的高, 然而空报率亦比WRF 的高, 同时临界成功指数也略高于WRF 的, 说明从时段的对应上, 两者并无太大的优劣区别.

GLDAS 的T3 降水(虚假警报的降水)占据了全部降水的很大一部分, 高达24.50%, 说明其虚假警报的降水不全为多估计的0~1 mm 降水. WRF 降水则因其年平均降水日数偏少, 且多估计了高强度的降水, 所以T1 和T3 时段, 有更少的降水日数和更高的降水量. 同时少估计的1~8 mm 降水在全年内最常发生, 因此T2 的降水日数百分比更高, 降水量占的百分比也高达31.65%.

图10 显示了WRF 和GLDAS 降水事件在时间尺度上的表现能力. 我们计算了降低数据时间分辨率时与观测的相关系数, 据此以判断数据总体对长时间跨度降雨事件的表现能力[27]. WRF 和GLDAS 两组数据均随时间分辨率增长相关系数有明显提高, 且WRF 降水与观测的相关系数可达0.7 以上, GLDAS 的可达0.8 以上, 可见两组数据对降雨事件表现能力均十分好. 在3 天的分辨率上, 两组数据的曲线斜率同时有明显改变, 到6 天时均达到第一个峰值, 6~10 天基本持平或略有降低. WRF 和GLDAS 降水数据的统计曲线斜率在3, 6 天时一致的变化趋势, 也可表明3, 6 天都是黑河流域上游适于表现降水事件的分辨率.

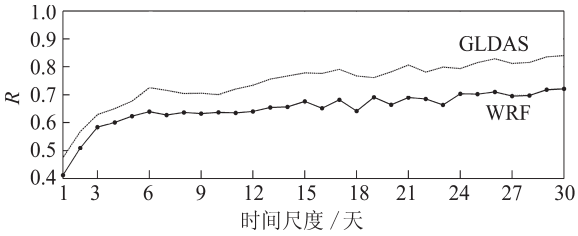

图 10　改变空间分辨率时相关系数的变化

Figure 10　Changes of correlation coefficients while changing time scale

3　数据特点总结

WRF 和GLDAS 降水数据的相似性在于年降水空间分布相关性很高, 均能很好地表现降水空间分布特征; 年降水量随高程的变化趋势一致, 均能模拟出某些年内的最长连续降雨; 和观测的年降水量总体偏差水平相当, 都随时间分辨率的增长数据质量可有很大提升. 不同的在于两组数据本身时间分辨率不同, 降水日数随高程的分布趋势不同, 在各月、全年和高程带上降水强度的分布不同.

WRF 和GLDAS 降水数据的优势和不足总结于表6. 综合考虑两组数据的优缺点, 建议模拟工作选用高时空分辨率的降水数据时, 如所需年份较长, 采用年际间更稳定的GLDAS 降水; 如所需时间较短, 鉴于GLDAS 降水在总降水量、频率上

的误差, 以及WRF降水也能有十分好的表现, 推荐将两组数据做简单分析后再作选择. 但受限于可用的观测资料, 对两组数据各强度降水在高程上的降水频率、总量的分布格局无法进一步评价, 对水文模拟效果的具体影响还未知, 未来需要将其驱动模型, 做进一步的评价和检验.

表6 WRF和GLDAS降水数据的优势和不足

Table 6 Advantages and disadvantages of WRF and GLDAS precipitation datasets

数据集	优势	不足
WRF	春冬两季降水正常, 对降雨时间估计的更准确, <1 mm和>8 mm降水的日数、总量和实际更吻合	数据质量在年际上不稳定, 总降水日数偏少, 春季降水高峰偏大, 主要缺少1~8 mm的降水, 高强降水发生频率略偏高带来年降水量的显著增加
GLDAS	总体与观测的相关系数更高	春季降水高峰偏大, <1 mm降水日数、降水总量过多, >2 mm降水日数整体偏少, 年降水总量偏少, 虚假警报的降水量偏多

4 结论

本文提出了一套比较完整、全面的降水数据分析方法, 参考黑河流域上游4个站点的观测数据, 依据多个统计指标从时间、空间的多个角度详细分析评价了2004−2009年的5 km, 1 h WRF动力降尺度获得的降水数据和空间插值后的5 km, 3 h GLDAS降水数据. 本文的方法对其他降水数据的分析评价有参考意义.

分析评价表明, 两者的空间分布特征表现均优, 能够对应大部分的降水时段, 对降雨事件表现性好. WRF降水数据中<1 mm和>8 mm的降水总日数、总量更符合实际, 但数据质量在年际上不稳定, 总降水日数偏少, 缺少1~8 mm的降水, 春季降水高峰偏大. GLDAS降水和观测的相关系数总体更高, 但降水总量偏少, <1 mm降水日数、降水总量过多, >2 mm降水日数整体偏少, 春季降水高峰偏大.

因为GLDAS数据是在全球范围上制作, 对黑河独特的陆面状况描述不够精确, 同时WRF动力降尺度的方法受限于输入的驱动、下垫面信息、参数化方案的选择, 因而本文比较的两组数据都有各自的局限. 但在可用数据十分缺乏的情况下, 应用此两套方法获得驱动数据时, 可参考本文工作, 选择研究时间、空间范围内最合适的降水驱动, 结合本文总结的降水数据特点解释分析模拟结果.

参考文献

[1] Das T, Bardossy A, Zehe E, et al. Comparison of conceptual model performance using different representations of spatial variability[J]. Journal of Hydrology, 2008, 356(1/2): 106−118.

[2] Moulin L, Gaume E, Obled C. Uncertainties on mean areal precipitation: assessment and impact on streamflow simulations[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(2): 99−114.

[3] 潘小多, 李新, 钞振华. 区域尺度近地表气候要素驱动数据研制的研究综述[J]. 地球科学进展, 2010, 25(12): 1383−1393.

[4] Nan Zhuo-tong, Wang Shu-gong, Liang Xu, et al. Analysis of spatial similarities between NEXRAD and NLDAS precipitation data products[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, 3(3): 371−385.

[5] Gourley J J, Hong Yang, Flamig Z L, et al. Hydrologic evaluation of rainfall estimates from radar, satellite, gauge, and combinations on Ft. Cobb Basin, Oklahoma[J]. Journal of Hydrometeorology, 2011, 12(5): 973−988.

[6] Fekete B M, Vörösmarty C J, Roads J O, et al. Uncertainties in precipitation and their impacts on runoff estimates[J]. Journal of Climate, 2004, 17(2): 294−304.

[7] Taylor P, Dinku T, Ceccato P, et al. Challenges of satellite rainfall estimation over mountainous and arid parts of east Africa[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 32(21): 5965−5979.

[8] Yilmaz K K, Hogue T S, Hsu K L, et al. Intercomparison of rain gauge, radar, and satellite-based precipitation estimates with emphasis on hydrologic forecasting[J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(4): 497−517.

[9] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The global land data assimilation system[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381−394.

[10] Wang Fu-xing, Wang Lei, 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, 2011, 116(D21): 1−20.

[11] Yang Kun, Koike T, Kaihotsu I, et al. Validation of a dual-pass microwave land data assimilation system for estimating surface soil moisture in semiarid regions[J]. Journal of Hydrometeorology, 2009, 10(3): 780−793.

[12] Kesarkar A P, Dalvi M, Kaginalkar A, et al. Coupling of the weather research and forecasting model with AERMOD for pollutant dispersion modeling: a case study for PM10 dispersion over Pune, India[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(9): 1976−1988.

[13] Famiglietti J S, Syed T H, Rodell M, et al. Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS[J]. Water Resources Research, 2008, 44(2): 1−10.

[14] Caldwell P, Chin H-N S, Bader D C, et al. Evaluation of a WRF dynamical downscaling simulation over California[J]. Climatic Change, 2009, 95(3/4): 499−521.

[15] 潘小多. 黑河流域高分辨率大气驱动数据的制备: 模拟与数据同化[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2012.

[16] 潘小多, 李新, 冉有华, 等. 下垫面对 WRF 模式模拟黑河流域区域气候精度影响研究[J]. 高原气象, 2012, 31(3): 657−667.

[17] Pan Xiao-duo, Li Xin. Validation of WRF model on simulating forcing data for Heihe River basin[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2011, 3(4): 344−357.

[18] 梁友嘉, 徐中民. 基于 GIS 的降水多元回归模型在黑河干流山区的应用[J]. 草业科学, 2011, 28(9): 1581−1588.

[19] Rui Hua-lan. README document for global land data assimilation system version 1 (GLDAS-1) products[EB/OL]. (2011-11-21)[2012-06-28]. http://hydro1.sci.gsfc.nasa.gov/data/s4pa/GLDAS_V1/README.GLDAS.pdf.

[20] Liston G E, Elder K. A meteorological distribution system for high-resolution terrestrial modeling (MicroMet)[J]. Journal of Hydrometeorology, 2006, 4(7): 217−234.

[21] Thornton P E, Running S W, White M A. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain[J]. Journal of Hydrology, 1997, 190(3/4): 214−251.

[22] 刘勇, 邹松兵. 祁连山地区高分辨率气温降水量分布模型[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2006, 42(1): 7−12.

[23] 王宁练, 贺建桥, 蒋熹, 等. 祁连山中段北坡最大降水高度带观测与研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 395−403.

[24] 刘俊峰, 陈仁升, 卿文武, 等. 基于 TRMM 降水数据的山区降水垂直分布特征[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 447−454.

[25] 汤懋苍. 祁连山区降水的地理分布特征[J]. 地理学报, 1985, 40(4): 323−332.

[26] 张立杰, 赵文智. 黑河流域日降水格局及其时间变化[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 741−747.

[27] Tian Y, Peters L C D, Choudhury B J, et al. Multitemporal analysis of TRMM-based satellite precipitation products for land data assimilation applications[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(6): 1165−1183.

(责任编辑:　王春燕)