DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.05.05

尼尔基水库上游格点降水数据适用性评估

唐 榕, 王运涛, 李 敏, 周惠成
(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 以尼尔基水库上游流域为研究对象,评估了国家气象信息中心空间分辨率为0.5°×0.5°格点的逐日降水产品数据在该流域的适用性。基于格点降水产品提供的逐日降水量资料和该流域17个雨量站的相应资料,应用相关系数 *R*、相对误差 *RE* 和均方根误差 *RMSE* 3个指标分别对应用格点降雨产品数据的流域面雨量值及旬径流预报值进行精度分析。结果表明:基于格点数据的面雨量值与实测面雨量间相关系数 *R* 为0.70,相对误差 *RE* 为16.64%,均方根误差 *RMSE* 为4.09 mm,精度满足检验标准,可以用于描述该流域的面雨量值;基于格点面雨量值预报旬径流量时,预报径流值与实测径流值间高度相关;拟合期、检验期径流预报值略微偏大,而外推期存在低估的现象,误差相对较大,但与应用实测面雨量得到的预报径流值误差相差仅3%,该格点降水数据可以替代实测站点的雨量数据用于研究流域。

关键词: 格点降水数据; 径流预报; 精度评估; 降水数据适用性; 尼尔基水库

中图分类号:TV121⁺.1; P332 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2019)05-0026-06

Suitability evaluation of gridded precipitation dataset for the upstream of Nierji Reservoir

TANG Rong, WANG Yuntao, LI Min, ZHOU Huicheng
(*School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *China*)

Abstract: This study evaluates the suitability of a gridded daily precipitation dataset with 0.5°×0.5° resolution for the upstream basin of Nierji Reservoir. Based on the gridded daily precipitation data and observed data of 17 gauge stations in the studied area, this study analyzed the precision of the gridded data on two aspects: one is the area precipitation value, and the other is 10 days´forecast runoff using three statistical indices, i.e., correlation coefficient (*R*), relative bias (*RE*) and root mean square error (*RMSE*). The results showed that: when using the gridded data to calculate area precipitation, the *R*, *RE* and *RMSE* values between area precipitation with gridded data and the observed area precipitation are 0.7, 16.64%, and 4.09 mm, respectively, which meet the inspection standard of the assessment indices, and the area precipitation with gridded data can describe the precipitation for this area overall though there exists overvaluation. When applying the gridded data to forecast 10 days´runoff, the predicted runoff has a high correlation with the observed runoff. The predicted runoff is slightly larger than the observed runoff in training period and testing period while it underestimates the observed runoff in extrapolation period. The error is relatively large, but it is only 3% different from the predicted runoff value by applying the measured area precipitation. In general, the gridded precipitation data can replace the observed precipitation for this study area.

Key words: gridded precipitation dataset; runoff forecast; accuracy evaluation; suitability of precipitation dataset; Nierji Reservoir

---

收稿日期:2019-06-17; **修回日期**:2019-07-07
基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0400906); 国家自然科学基金项目(51709036); 中国博士后科学基金项目(2017M611226)
作者简介:唐 榕(1990-),女,云南曲靖人,博士研究生,主要从事水文预报及水库优化调度研究。
通讯作者:王运涛(1987-),男,河南周口人,博士后,主要从事洪水模拟研究。

1　研究背景

降水是水文过程模拟的关键因素,降水数据的精度影响着水文模拟预报的准确性[1]。获得高精度的雨量站点观测降水数据[1]往往受到观测站点分布不均、观测数据代表性差、观测数据的起始时间不一、观测资料缺失、部分站点数据难以获取等因素的影响,从而限制了部分流域(尤其是面积较大流域)的长系列水文模拟预报[2]。为此,部分机构开始推出长系列、多精度、广覆盖的降水产品数据,提供了一种数据获取新途径。国际上提供降水产品的有欧洲的 ERA – Interim[3]、美国的 NCEP/NCAR[4]、日本的 JRA – 55[5]等降水再分析数据、GPCP[5]、TMPA[2]、TRMM[6]、GPM[7]等卫星遥感数据集及 GPCC[5]等基于地面观测数据的产品等[2,5],国内有中国气象局陆面数据同化实时产品数据集(CLDASV2.0 产品)[8]和中国地面降水日值 0.5°×0.5°格点的数据集等等。然而由于上述降水产品的数据来源不同、数据推出过程中使用的同化、插值、反演等计算方法不同,且在不同地形地势的区域中的表现不同,因此在具体应用中的精度各有差异[5]。在应用降水产品之前应针对具体研究区域进行必要的误差分析,并探究其在相应区域水文模拟预报中的适用性[2,5]。

目前,已在不同流域开展了不同降水产品的适应性研究。王书霞等[6]从年、月、日尺度评估了 TRMM 3B42 V7、TRMM 3B42 RT、CMORPH、PERSIANN 4 种遥感降水产品在澜沧江流域的精度。吴倩鑫等[5]对比了 CMFD、ERA – Interim、GPCC、GPCP V2.3 和 JRA –55 这 5 种降水产品的月尺度数据在疏勒河流域的精度。任英杰等[9]、王汉涛等[7]、许风林等[10]分别开展了 GPM IMERG 卫星产品在中国大陆地区、三峡区间渠溪河、黄淮海平原的适用性评估研究。朱红雷等[1]进行了辉发河流域的 TRMM 降水数据在日、月尺度上的径流模拟适宜性评价研究,张小丽等[11]评价了 GLDAS、TMPA 和 ERA – Interim 中日、月尺度数据在浑江流域水文模拟中的适用性。此外,还有对其他地区或流域的降水产品适用性评估研究[3-4,12]。尽管开展了不同流域不同降雨产品的适用性研究,但该方面的研究表明诸多降水产品在许多流域的精度不高、难以满足流域尺度水文模拟分析预测的需求[5-6,13],原因在于对降水产品来源、数据处理方式、数据用途上未做仔细分析,选择降水产品时多选用几种常用的降水产品数据,不能做到因地制宜。因此,对于不同流域不同降水产品的适用性探究仍须继续深入。

尼尔基水库位于黑龙江省与内蒙古自治区交界的嫩江干流中游,该水库坝址右岸为内蒙古自治区的尼尔基镇。为实现该水库考虑旬入库径流预报信息的长系列模拟优化调度,相应地,需要入库径流预报中起主要作用的长系列降水数据。不过,该流域面积较大,能获取的站点降水量数据有限,站点数据长度参差不齐,利用站点数据来进行长系列研究比较困难。而国家气象中心提供的中国地面降水日值 0.5°×0.5°格点数据集提供自 1961 年至今共 55 a 的逐日降水数据,数据长度足够[14-15]。此外,该数据是基于地面国家级高密度台站插值而来,提供的是中国经纬度边界内的降水数据,会比诸多全球范围的降水产品更有针对性、系统误差更小,精度可能更高,因此拟使用该降水产品数据代替该流域实测站点数据。本文以尼尔基水库上游控制流域为研究区,利用收集到的站点测雨数据与该格点数据集中的数据进行流域面雨量的对比分析,评估格点数据应用到径流预报中的适用性,为后期预报调度中降雨数据的收集使用提供依据。

2　数据来源与研究方法

2.1　研究区概况

本文研究区域为嫩江干流上的大型控制性水利工程尼尔基水库以上控制流域(见图 1),流域面积达 6.64×10^4 km^2,占嫩江流域面积(28.95×10^4 km^2)的 22.9%。嫩江流域从大兴安岭伊勒呼里山中段南侧至三岔河,全长 1370 km。除了本文研究区涉及的上段和中段,还有下段,3 段划分如下:上游段从河源到嫩江县,长 661 km,左岸有卧都河、固固河、门鲁河和科洛河注入,右岸有那都里河、大小古里河和多布库尔河注入,该段有 80% 以上面积为茂密的森林覆盖,河流的含沙量较小;中段从嫩江县到莫力达瓦达斡尔族自治旗,长 122 km,该河段支流很少,右岸主要有较大支流甘河汇入,是山区到平原区的过渡地带,两岸多低山、丘陵,地势比上游平坦,两岸不对称;下游段由莫力达瓦达斡尔族自治旗到三岔河,长 587 km,下游支流较多,有诺敏河、雅鲁河、霍林河、乌裕尔河、洮儿河等等,该段为广阔的平原,河道蜿蜒曲折,沙滩、沙洲、江岔多。尼尔基水库多年平均径流量 106.54×10^8 m^3,占嫩江流域多年平均径流量的 44.5%;多年平均降水量为 400 ~ 500 mm,年内降水量分配极不均匀,6 – 9 月降水量

占全年降水量的 80% 以上，冬季降水量极少，仅占年降水量的 5% 以下[16]。

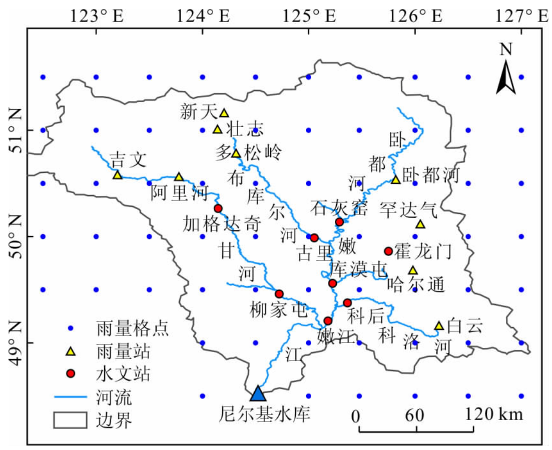

图 1　尼尔基水库上游流域及雨量站、水文站分布

2.2　数据来源与处理

2.2.1　降水产品数据　本文采用的降水产品数据为中国地面降水日值 0.5°×0.5°格点数据集(V2.0)，该数据集主要基于 2 472 个国家级气象观测站的降水资料、利用 ANUSPLIN 软件的薄盘样条法(TPS, Thin Plate Spline)进行空间插值所得，并结合数字高程资料来尽可能地消除高程对降水空间插值精度的影响。它可提供 1961 年 1 月 1 日开始至今 59 a 的地面格点的逐日(08:00－08:00，北京时间)降水值数据，即地面水平分辨率 0.5°×0.5°(纬度 1°约为 111km，经度 1°约为 111×cos a km，其中 a 为对应纬度)的日值降水格点数据。数据覆盖范围为中国最西经度 72°E 到最东经度 136°E、最北纬度 54°N 至最南纬度 18°N。

2.2.2　实测站点数据　通过多种途径收集到 17 个测站的日降雨数据，其中包含卧都河、罕达气、哈尔通、松岭、壮志、新天、白云、阿里河及吉文 9 个雨量站和霍龙门、古里、科后、柳家屯、加格达奇、石灰窑、库漠屯、嫩江 8 个水文站的雨量数据。各测站所在河流、收集到的资料起止时间、测站类型如表 1 所示，其具体分布见图 1。由表 1 可知搜集到的站点实测降水资料长度不统一，难以通过上述测站资料获得该流域较完整的长系列面雨量资料。

表 1　尼尔基水库上游流域水文站及雨量站基本信息表

序号	名称	河流	年份	类型
1	卧都河	嫩江	1959－1961、1979－1980、1982－1992、2007－2013	雨量站
2	罕达气	泥鳅河	1963－1963、1980－2001、2006－2014	雨量站
3	哈尔通	门鲁河	1956－1957、1978－1993、1997－1998、2007－2013	雨量站
4	霍龙门	泥鳅河	1961、1963－2001、2006－2014	水文站
5	古里	多布库尔河	1974－2014	水文站
6	松岭	多布库尔河	1973－2014	雨量站
7	壮志	多布库尔河	1974－2014	雨量站
8	新天	查拉巴奇河	1983－2009	雨量站
9	科后	科洛河	1952－2014	水文站
10	白云	科洛河	1979－2001、2007－2014	雨量站
11	柳家屯	甘 河	1951－1953、1955－2005、2006－2014(6－9 月)	水文站
12	加格达奇	甘 河	1966－2005、2006－2014(6－9 月)	水文站
13	阿里河	甘 河	1960－1967、1969－2005、2006－2014(6－9 月)	雨量站
14	吉文	甘 河	1961－2006、2007－2014(6－9 月)	雨量站
15	石灰窑	嫩江干流	1954－2014	水文站
16	库漠屯	嫩江干流	1941－1944、1951－2001、2006－2009	水文站
17	嫩江	嫩江干流	1951－2005、2006－2014	水文站

注：年份后括号内的月份表示仅收集到相应月份数据。

2.2.3　数据处理　基于已有的站点实测降水数据，提取其中时间尺度统一的数据作为本文研究所用的实测数据，经对比选择 2007－2013 年 6－9 月的各测站逐日降水量，利用其加权求和得到该流域实测面雨量值系列，对系列中 854 d 的面雨量值求和平均，得到多日面雨量均值为 2.78 mm。

中国地面降水日值 0.5°×0.5°格点数据集(V2.0)提供的是整个中国范围的数据,而研究区域主要位于 122.5°E ~127°E、48.5°N ~51.5°N 内,该范围内的控制格点见图 1。首先提取上述范围内 2007 -2013 年 6 -9 月的所有格点数据,通过各格点数据加权求和得到格点数据下的面雨量值(文中简称格点面雨量值),多日格点面雨量均值为 3.24 mm。其中各格点降雨值的权重按以下步骤确定:假设各格点控制面积均等,以格点为中心作 0.5°边长的正方形,与研究流域重叠的部分作为该格点的有效贡献部分,将其相应面积占研究流域面积的比例作为各格点的权重。

2.3 研究方法

2.3.1 *运用方法*　流域面雨量精度是降水产品自身精度的直接体现,是降水产品是否可替代雨量测站实测降雨的基础,而降水产品在研究流域水文模拟预报的应用中能否达到水文模拟预报的要求是降水产品适用性的进一步衡量。为此,本文首先采用简单加权法计算降水产品数据应用下流域面雨量值,与雨量测站所得的面雨量值进行对比,评估格点降雨产品下的面雨量精度。其次,本文应用 BP 神经网络进行尼尔基水库 6 -9 月份旬入库径流量预报,分别采用实测面雨量值和格点降雨产品所得面雨量值作为前期降雨因子,以确定本文所用格点降水产品在水文模拟预报中应用时是否能保持应用实测降雨时的效果、达到水文模拟预报的要求。

径流预报的基本假设[17]为:(1)前期后 m 天的径流量大小代表旬初土壤蓄水量,来反映前期降雨及径流对本旬初土壤蓄水量的影响;(2)前期后 n 天降雨量加上本旬未来前 k 天降雨量是本旬径流产生的主要因素。其中 m、n、k 主要通过分析因子与径流的相关性来确定,例如,如图 2 所示的实测和格点两种面雨量数据下,前期后 n 天降水量与旬径流量的相关系数 R 均随着 n 的增大而逐渐增大,且达到 20 d 的 R 值最大,因此确定前期后 20 d 降水量为径流预报的预报因子,即 $n = 20$。同样地,确定 $m = 1$,$k = 7$。这样,下文利用前期后 1 d 径流量、前期后 20 d 累积降水量及未来 7 d 累积降水量 3 个预报因子来预测旬径流量。

根据选用的预报因子,本文 BP 神经网络旬径流预报利用 2007 -2009 年 6 -9 月的数据作为预报中的拟合样本,2010 -2011 年作为检验样本,用于共同率定 BP 神经网络中学习率、训练次数、隐含层节点数等参数,以 2012 -2013 年作为外推样本用以验证该 BP 神经网络预报模型的预报能力。直接采用上述年份相应数据预测时样本数量较少,为了增加样本数量,提高预报精度,采用逐日滚动获取的 10 d 量来生成旬径流系列数据,即如果以 6 月 1 日 -6 月 10 日数据作为第 1 个旬径流数据,则以往后滚动 1 日的 6 月 2 日 -6 月 11 日数据作为第 2 个数据,以此类推。相应地,3 个预报因子也做类似处理。除此之外,为了减少预报降水量的不确定性对此处结果的影响,未来 k 天降雨量直接利用实测雨量代替[18]。

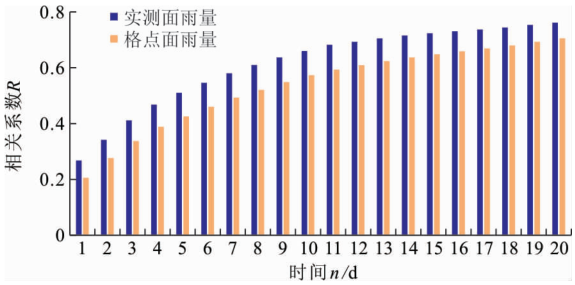

图 2　前期后 n 天累积降水量与旬径流量相关关系

2.3.2 *精度评估指标*　相关系数 R 能够反映模拟值与实测值间的相关性程度,表征模拟值数据序列与实测值序列整体变化趋势的一致性程度[5];R 越大,模拟值数据序列与实测值序列变化越一致。相对误差 RE 可以反映模拟值与实测值间的偏差程度[6],RE 为正值说明模拟值大于实测值,即模拟值高估了实测值;RE 为负说明整体看来模拟值小于实测值,即低估了实测值。均方根误差 $RMSE$ 能够用来衡量模拟值与实测值之间的误差量[5],体现的是模拟值数据序列与实测值序列之间的靠近程度,$RMSE$ 值越小说明模拟值与实测值越靠近,越能替代实测值。本文应用 R、RE 和 $RMSE$ 作为精度评估的指标[2]。3 个指标计算公式分别如下。

相关系数 R 的计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{M}(obs_i - \overline{obs})(sim_i - \overline{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M}(obs_i - \overline{obs})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{M}(sim_i - \overline{sim})^2}} \tag{1}$$

式中:obs_i 和 sim_i 分别为第 i 个实测值和模拟值;$\overline{obs}$ 和$\overline{sim}$ 分别为整个实测值系列均值和整个模拟值系列均值;M 为系列中实测值个数。R 越接近 1,则两数据间关系越密切,数据间线性吻合程度越高;R 越接近于0,则两变量间线性相关越弱,R一般可按5级划分:$|R| \leqslant 0.2$ 为极弱相关或不相关,$0.2 < |R| \leqslant 0.4$ 为弱相关;$0.4 < |R| \leqslant 0.6$ 为中等相

关;0.6 <| R| ≤0.8 为较高相关;0.8 <| R| ≤1 为高度相关[5]。

相对误差 RE 的计算公式为:

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^{M}(obs_i - sim_i)}{\sum_{i=1}^{M} obs_i} \times 100\% \qquad (2)$$

均方根误差 $RMSE$ 的计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}(obs_i - sim_i)^2} \qquad (3)$$

3 适用性结果分析

适用性分析即应用相关系数 R、相对误差 RE 以及均方根误差 $RMSE$ 3 个评估指标分别对应用降雨产品数据得到的流域面雨量值和未来 10 d 径流量预报值进行精度评估。

3.1 流域面雨量精度评估结果

经计算得出格点数据下的面雨量值与实测面雨量之间的相关系数 R 为 0.70,相对误差 RE 为 16.64%,均方根误差 $RMSE$ 为 4.09 mm,按 R > 0.6、-20% < RE <20% 作为检验标准[2],格点降雨数据满足要求。然而,根据指标值可以看出,虽然格点面雨量与实测面雨量相关程度较高,但相对误差为相对较大的正值且均方根误差大于实测面雨量均值 2.78 mm,说明格点数据虽然能够较好地描述实际降雨数据的变化过程,但存在一定程度的高估现象,即对降雨的整体估计偏大,这样将该降雨信息用于水库调度中时容易引导水库下泄较多水量。从防洪安全角度看,比较有利,但从兴利角度,下泄较多水量可能导致后期水库蓄水不足,易造成较多时段不能达到供水或发电等兴利目标。因此为确定其在实际中是否可替代实测数据,仍需根据其在实际水文模拟预测中的结果来判定其是否适用。

此外,从图 2 所示的前期后 n 天降雨量与旬径流量的相关系数 R 上可以看出:(1) 格点面雨量数据下的相关系数均略小于实测面雨量值下的相关系数,这也论证了水文站及雨量站得到的面雨量值更能体现该流域的实际面雨量值;(2) 格点面雨量数据下的相关系数变化规律与实测面雨量下的变化规律一致,随着累积降水天数的增长而增大,且也在 n = 20 的时候达到最大,说明格点面雨量数据能代替实测面雨量来表征该流域降雨与径流之间的关系:前期较长时间的降水量(达两旬)都会对径流产生贡献,这与该流域面积较大且流域上游为蓄水能力较强的大面积森林、汇流时间较长有关[19]。

3.2 径流预报精度评估结果

表 2 为分别应用实测面雨量和气象格点面雨量进行 10 d 径流预报的预报径流量与实测径流量的相关系数、相对误差和均方根误差。由表 2 可知:(1)两种数据应用下拟合期、检验期、外推期预测径流值与实测径流值的相关系数 R 基本相同,均在 0.87 以上,即预测值系列与实测值系列高度相关。(2) 格点数据面雨量应用下的相对误差绝对值略大于雨量站实测面雨量应用下的相对误差绝对值,说明实测面雨量应用时径流预报偏差更小;两种数据在拟合期和检验期相对误差 RE 均为正值,说明两种降雨数据应用下均存在高估实测径流量的现象,不过 RE 均小于 6%,说明径流预报值较实测径流值偏大不多;在外推期两种数据应用下的 RE 分别为 -7.45%、-10.25%,均为负值,说明在该时期无论使用何种降雨数据均会低估实际径流值,这主要是因为 2013 年 6 - 9 月实际入库径流量属于历史记录中最大值,外推期包含了 2013 年中的较大径流,模型难以准确预测。(3) 两种数据在拟合期、检验期的均方根误差 $RMSE$ 均远小于 2007 - 2013 年 6 - 9 月日径流量均值 737.98 m^3/s,在外推期 $RMSE$ 较大,分别为498.98和 514.94 m^3/s,误差较大,这主要与 2013 年较大径流难以准确预报有关,不过格点数据面雨量应用下的均方根误差与雨量站实测面雨量应用下的均方根相差不大,仅为 3%。

表 2 两种面雨量值应用下 10 d 径流量预报评价指标值

降雨数据来源	时段	R	RE/%	$RMSE$/($m^3 \cdot s^{-1}$)
雨量站实测面雨量值	拟合期	0.93	5.40	176.40
	检验期	0.87	0.57	236.69
	外推期	0.94	-7.45	498.98
格点数据面雨量值	拟合期	0.92	5.73	187.82
	检验期	0.87	5.38	251.15
	外推期	0.94	-10.25	514.94

根据上述分析结合表 2 可知:格点数据面雨量应用时与实测面雨量应用时同样能够满足 R > 0.6、-20% < RE < 20% 的检验标准;尽管其相对误差绝对值大于雨量站实测面雨量应用时的相应值,均方根误差 $RMSE$ 也相应较大,但两者差值不大,均在可接受范围内。这说明尽管格点面雨量值高估了实测面雨量值,但在径流预报中该高估量对

径流预报的结果影响不大。原因是 6 - 9 月的径流除受降水影响外,还受融雪、退水等多个因子的影响[20],综合考虑其他因子时,减弱了该降水量的高估对预报径流结果的影响。因此,格点面雨量值可以代替雨量站点所得的实测面雨量值。当进行尼尔基水库上游流域长系列径流预报而无法获取相应的测站雨量观测值时,可直接使用中国地面降水日值 0.5°×0.5°格点数据集中的数据。

4 讨　论

上述面雨量、径流预报值精度评估结果表明,中国地面降水日值 0.5°×0.5°格点数据集在尼尔基水库上游流域的应用表现良好,可以替代雨量站点来提供降水数据。此外,在日尺度降雨产品数据上,该格点降水数据面雨量拟合结果中相关系数达0.7,比其他降水产品在国内其他流域应用中的相关系数高,如 TRMM 3B42 V7、TRMM 3B42 RT、CMORPH、PERSIANN 4 种遥感降水产品在澜沧江流域与实测降水的相关系数均低于 0.5[6]。原因除了流域差异外,极可能是本文采用的格点降水数据是国内地面观测台站数据直接插值而来,同等情况下国内流域采用该降水产品时精度能够得以保证。尽管该降水产品插值存在误差,用于插值的站点也不一定能完全面描述研究流域径流,但与卫星雷达反演得到的降水产品以及经多种来源数据同化处理而来的再分析数据集所提供的降水产品相比,其精度高的可能性要更大。因此,在今后在选择实测降水数据的替代降水产品时,应当明晰降水产品来源,尽可能选择融合更多研究流域地面观测降水资料的降水产品,以保证替代降水产品的精度。

5 结　论

本文主要评估了国家气象信息中心提供的降水产品——中国地面降水日值 0.5°×0.5°格点数据集(V2.0)在尼尔基水库上游流域的适用情况。评估包括格点降雨产品数据下的格点面雨量精度及格点降雨产品数据在 10 d 径流预报中的预报精度两方面。具体结论如下:

(1)在考虑该流域范围内的面雨量时,格点面雨量值与实测面雨量值间 R 为 0.70,相对误差 RE 为 16.64%,均方根误差 $RMSE$ 为 4.09 mm,相关系数及相对误差基本满足 $R > 0.6$、$-20\% < RE < 20\%$ 的检验标准,尽管格点数据存在高估实际降水量的现象,但格点面雨量值可以大体描述该流域面雨量的量值。

(2)在预报 10 d 径流量中,应用格点面雨量值得到的径流预报值与应用实测面雨量所得到的结果相差不大,拟合期、检验期、外推期 R 均大于等于 0.87、相对误差的绝对值小于 11%,均满足检验标准;应用格点面雨量值得到的预测径流值的相对误差、均方根误差均较小,不过均稍劣于应用实测面雨量时的相应值;均方根误差在外推期较大,但与实测面雨量时的均方根误差差异不大,仅为 3%。当进行尼尔基水库上游流域长系列径流预报时,可直接采用格点面雨量值代替实测面雨量值。

参考文献:

[1] 朱红雷,史晓亮,李英臣,等. 基于 SWAT 模型的 TRMM 降水数据径流模拟适宜性评价[J]. 水土保持研究,2017,24(5):105 - 112.
[2] 张小丽. 水电站不同预见期径流预报及优化调度研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.
[3] 何奇芳,曾小凡,赵 娜,等. ERA - interim 再分析数据集在长江上游的适用性[J]. 人民长江,2018,49(12):30 - 33.
[4] 陈胜东,章开美,彭王敏子,等. NCEP/NCAR 再分析资料在江西金华山风资源评估中的应用[J]. 气象与减灾研究,2015,38(1):53 - 58.
[5] 吴倩鑫,马思煜,张智华,等. 五种降水产品在疏勒河上游山区和中下游月尺度降水的适用性对比研究[J]. 冰川冻土,2019,41(2):470 - 482.
[6] 王书霞,张利平,喻笑勇,等. 遥感降水产品在澜沧江流域径流模拟中的适用性研究[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(6):1365 - 1374.
[7] 王汉涛,张潇潇. 渠溪河流域 GPM IMERG 卫星降水对地面站点降水的可替代性研究[J]. 水电能源科学,2019,37(6):9 - 11.
[8] 崔园园,敬文琪,覃 军. 基于 TIPEX Ⅲ资料对 CLDAS - V2.0 和 GLDAS - NOAH 陆面模式产品在青藏高原地区的适用性评估[J]. 高原气象,2018,37(5):1143 - 1160.
[9] 任英杰,雍 斌,鹿德凯,等. 全球降水计划多卫星降水联合反演 IMERG 卫星降水产品在中国大陆地区的多尺度精度评估[J]. 湖泊科学,2019,31(2):560 - 572.
[10] 许凤林,郭 斌,叶 贝,等. GPM IMERG 卫星降水产品在黄淮海平原的适用性研究[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(4):79 - 86.
[11] 张小丽,彭 勇,王本德,等. 基于 SWAT 模型的降雨数据适用性评价[J]. 农业工程学报,2014,30(19):88 - 96.
[12] 刘世杰. 不同卫星遥感降水产品在甘肃武威地区的适用性及修正方法研究[J]. 地下水,2019,41(3):94 - 96 + 173.

(下转第 39 页)

对流域水文过程影响的模拟研究——以深圳市布吉河流域为例[J]. 自然资源学报,2009,24(9):1560－1572.
[6] 徐光来,许有鹏,徐宏亮. 城市化水文效应研究进展[J]. 自然资源学报,2010,25(12):2171－2178.
[7] 权瑞松,刘 敏,侯立军,等. 土地利用动态变化对地表径流的影响——以上海浦东新区为例[J]. 灾害学,2009,24(1):44－49.
[8] SURIYA S , MUDGAL B V . Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed － A case study [J]. Journal of Hydrology, 2012, 412－413:210－219.
[9] ARNOLD C L , GIBBONS C J . Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator[J]. Journal of the American Planning Association, 1996, 62(2):243－258.
[10] VERBEIREN B , VAN D V T , CANTERS F , et al. Assessing urbanisation effects on rainfall－runoff using a remote sensing supported modelling strategy [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 21:92－102.
[11] BRUN S E , BAND L E . Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2000, 24(1):5－22.
[12] CHOI W , PAN F , WU C . Impacts of climate change and urban growth on the streamflow of the Milwaukee River (Wisconsin, USA) [J]. Regional Environmental Change, 2017, 17(3):889－899.
[13] DU Shiqiang, SHI Peijun, VAN ROMPAEY A, et al. Quantifying the impact of impervious surface location on flood peak discharge in urban areas [J]. Natural Hazards,2015,76(3):1457－1471.
[14] 刘珍环,曾祥坤. 深圳市不透水表面扩展对径流量的影响[J]. 水资源保护,2013,3(29):44－50.
[15] 司巧灵,杨传国,顾荣直,等. HEC－HMS 模型在城市化流域洪水模拟中的应用[J]. 人民长江,2018,49(4):17－22.
[16] DIAZ－RAMIREZ J N , MCANALLY W H , MARTIN J L . Analysis of hydrological processes applying the HSPF model in selected watersheds in Alabama, Mississippi, and Puerto Rico[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(6):937－954.
[17] 董延军,陈文龙,杨 芳,等. HSPF 流域模型原理与模拟应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2014.
[18] 韩 莉,刘素芳,黄民生,等. 基于 HSPF 模型的流域水文水质模拟研究进展[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2015,3(2):40－47＋57.
[19] 董延军,邓家泉,李 杰,等. 基于 HSPF 的东江分布式水文模型构建[J]. 长江科学院院报,2011,28(9):57－63.
[20] 李兆富,刘红玉,李 燕. HSPF 水文水质模型应用研究综述[J]. 环境科学,2012,33(7):2217－2222.

(上接第 31 页)

[13] LIU Junzhi, ZHU Aling, DUAN Zheng. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation product using rain gauge data in meichuan watershed, Poyang Lake Basin, China[J]. 资源与生态学报(英文版),2012,3(4):359－366.
[14] 熊秋芬,黄 玫,熊敏诠,等. 基于国家气象观测站逐日降水格点数据的交叉检验误差分析[J]. 高原气象,2011,30(6):1615－1625.
[15] 孔云峰,仝文伟. 降雨量地面观测数据空间探索与插值方法探讨[J]. 地理研究,2008,27 (5):1097－1108.
[16] 刘 涛,孟凡龙,胡宝军. 基于 BP 神经网络的尼尔基水库短期洪水预报研究[J]. 黑龙江水利科技,2012,40(10):13－16.
[17] 梁国华,习树峰,王本德. 基于 BP 神经网络的旬降雨径流相关预报模型[J]. 水力发电,2009,35(8):10－12＋39.
[18] 卢 迪. 耦合中长期径流预报信息的水库调度方式研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
[19] 白云天,孟祥国,孙万光. 尼尔基水库非枯季节中期入库径流预报研究[J]. 东北水利水电,2018,36(10):27－29.