

文章编号: 1001-8166(2010)12- -11

### 3 区域尺度近地表气候要素驱动数据研制的研究综述\*

潘小多<sup>1</sup>, 李 新<sup>1</sup>, 钞振华<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 南通大学, 江苏 南通 226007)

**摘 要:**区域和流域尺度的陆面、水文和生态模拟与同化, 都需要高分辨率的大气近地表层风、温、压、湿、辐射、降水等资料作为驱动。介绍了流域尺度驱动数据的重要性, 对现阶段大气驱动数据的制备方法进行评论, 总结了降水、辐射、气温和其他近地表要素的若干产品, 探讨了北美陆面数据同化系统、全球陆面数据同化系统、欧洲陆面数据同化系统和中国西部陆面数据同化系统中大气驱动数据的研究思路和研究成果, 最后提出了现阶段制备流域尺度驱动数据存在的问题, 并针对中国西部复杂地形的高时空分辨率驱动数据制备提出一些看法。

**关 键 词:**驱动数据; 再分析资料; 陆面同化系统; 降尺度方法; 中国西部

**中图分类号:**           **文献标志码:** A

## 1 引 言

在“水—土—气—生—人”各要素中, 水文、土壤和生态模型都需要近地表大气状况, 包括气温、降水、气压、水气压、风场、短波辐射和长波辐射作为边界条件, 我们通常称这一类数据为大气驱动数据<sup>[1]</sup>。大气驱动数据又叫大气强迫资料(场), 指的是在大气模型与陆面模型非耦合的离线状态下, 驱动陆面过程模型的近地表层风、温、压、湿、辐射、降水等大气状态数据。流域尺度的陆面过程、水文和生态模拟与同化, 都需要高分辨率的大气驱动数据。陆面过程模型的一个不可或缺的组成部分便是驱使陆面模型运转的驱动数据, Cosgrove 等<sup>[2]</sup>在介绍北美陆面同化系统驱动数据文章中, 强调驱动数据的重要性, 指出“无论陆面过程的物理描述多么成熟, 或者有多么准确的初始条件, 如果驱动数据不准确的话, 这种模式也不会产生理想的结果。陆面过程模式如此依赖于这些外部提供的降水、辐射、气温、风向与风速, 湿度和压力等驱动数据来预报陆面状

态, 以至这些驱动数据的任何一个要素如果存在错误, 则会严重影响土壤湿度、径流、积雪覆盖和潜感热通量的模拟。”

耦合或者利用气候模式(GCM)输出来驱动陆面过程模型是大尺度陆面过程模型驱动数据的重要来源<sup>[3-5]</sup>, 但是对于流域尺度的陆面过程模型而言, GCM 输出的大气驱动数据在空间和时间分辨率都不能满足其尺度要求, 其粗分辨率会抹杀区域环境影响评价<sup>[6]</sup>。IPCC<sup>[7]</sup>报告指出, 限制我们理解北美次大陆区域对气候变化的脆弱性, 以及为了减少脆弱性发展和制定相应的对策的一个重要的不确定性就是缺乏准确的区域气候变化的预测, 这些不确定性在世界的其他区域也同样存在着。在 IPCC<sup>[8]</sup>的第四次报告“观测到的气候变化及其影响, 以及原因”中更是指出“缺乏更高时空分辨率的更长的资料时间序列仍然是关键性的不确定原因”。虽然 IPCC<sup>[8]</sup>报告指出基于 100 km 的全球气候模式对全球气候变化的潜在影响提供了长期的气候变化预测结果, 然而对区域尺度的气候变化影响评价则需要

\* 收稿日期: 2010-05-12; 修回日期: 2010-08-26.

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目“黑河流域高时空分辨率的大气驱动数据研究”(编号: 40901202); 高技术研究发展计划专题课题“多源遥感数据同化通用软件系统研制”(编号: 2009AA12Z130); 财政部/科技部公益类行业专项“中国气候系统协同观测与预测研究——陆在数据同化方面研究”(编号: GYHY200706005)资助。

作者简介: 潘小多(1978-), 女, 浙江瑞安人, 助理研究员, 主要从事陆面过程模拟及陆面数据同化研究中的大气驱动数据集制备及降尺度方法研究. E-mail: panxiaoduo@lzb. ac. cn

约 1 ~ 10 km 分辨率的气候变化预测,但是由于计算条件的限制,同流域水文模型尺度相比,全球气候模式 GCM 分辨率一般较粗,缺少足够的区域尺度下的气候过程、地形情况及海陆分布情况等因素,所以将其直接应用到区域尺度是非常困难的,而且这样高精度的全球气候模式在现在或者不久的将来都难以实现。因此我们需要发展降尺度方法把 GCM 的输出制备成高时空分辨率的驱动数据,为区域尺度或者流域尺度的陆面过程、水文和生态模拟与同化提供高时空分辨率长时间序列的大气近地表层风、温、压、湿、辐射、降水等驱动数据。

本文目标是总结国内外在区域和流域尺度上大气驱动数据制备方法方面取得的进展。首先概述了驱动数据的制备方法及其优缺点;然后重点针对降水、辐射和气温场对文献进行概括,并详细描述一些陆面同化系统大气驱动数据制备方法,最后讨论了现阶段制备大气驱动数据存在的问题。

## 2 驱动数据制备方法

本文根据制备大气驱动数据的数据源,将制备方法归结为以下几个方面,包括:

### 2.1 空间插值

即直接利用观测资料,采用空间插值方法(大气科学领域称为客观分析),制备陆面过程模型所需的驱动数据,这些插值方法有几何方法(如最近距离法和反距离加权方法)、统计方法(如趋势面和多元回归)、空间统计方法(如 Kriging 内插和 Cokriging 内插)、函数方法(如傅里叶级数、样条函数方法、双线性内插和立方卷积法)、随机模拟方法、确定模拟、谱方法、变分法和综合方法等。空间插值方法能够利用有限的常规观测估计合理的空间分布<sup>[9]</sup>,在 20 世纪后期得到了长足的发展,但是在观测资料匮乏、站点分布不均匀的地区,基于统计的空间插值方法需要结合其他方法的辅助<sup>[10]</sup>。

### 2.2 直接使用再分析资料

“再分析”就是将全球各类资料包括地基观测、船舶观测、气球观测、无线电探空测风观测、飞机观测、卫星观测及其他一些资料用统一完备的数据同化系统进行质量控制和同化,生成一种新的、长期而连续的、具有更高时空分辨率再分析产品的过程<sup>[10~13]</sup>。目前国际上重要的再分析资料包括: NCEP-50<sup>[11,12]</sup>、ERA-40<sup>[13]</sup>、JRA-25<sup>[14]</sup> 和 NASA/DAO-RA<sup>[15]</sup>(对 NCEP-II、ERA-40 和 JRA-25 的详细介绍和比较研究见文献[16])。在世界气候研究计

划(WCRP)2 次国际会议上,对 NCEP 再分析资料的使用给予了承认和赞同,指出再分析资料已被用在气候研究的许多方面,尤其在年际变率和模式及预测研究中<sup>[17,18]</sup>。显然,直接将长期而连续的再分析资料应用于全球尺度的陆面过程模型,能够节省大量人力物力,但是人们在实践应用中也发现了再分析资料存在的一些缺陷。由于再分析期间,观测系统的改变和观测当中一些不能排除的不确定的偏差而造成长期趋势预测上存在困难。对于驱动流域尺度的陆面过程模型来说,再分析资料则存在以下几点缺陷:①时间空间分辨率不够高(即使再分析资料中分辨率相对较高的 NCEP-II,其空间分辨率也才为 1°,时间分辨率为 6 h);②高原地区和地面起伏变化较大地区误差较大<sup>[19,20]</sup>;③资料是标准等压面资料,需要插值。因此国际上发展了很多基于再分析数据进行模式模拟的驱动数据和降尺度方法。

因为陆面过程对上、下行长短波辐射和降水驱动数据比较敏感,而再分析资料中这 2 种驱动数据的质量也比较差,所以很多研究中心和学者分别针对辐射和降水这 2 种驱动数据进行制备,以遥感资料为主,采用修正算法或者融合其他信息来提高遥感资料反演精度。如全球能水循环实验(GEWEX)<sup>[21]</sup>中从 GEOS 卫星观测获取短波辐射通量驱动数据,应用由马里兰大学开发的 GEWEX SRB 算法的修改版来估计地表和大气表层的上行和下行辐射通量,其推导过程涉及到波段取舍、大气组成成分、云干扰、考虑积雪有无等问题。美国和日本合作开展的热带降水测量计划(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM),覆盖区域最初为全球 35°S ~ 35°N,目前已扩展到全球 50°S ~ 50°N 区域,其中 TRMM 3B42 卫星雷达降水产品空间网格分辨率为 0.25° × 0.25°,时间步长为 3 h。但是这些辐射、降水数据集在区域尺度和流域尺度应用上同样存在时空分辨率问题。

### 2.3 动力降尺度方法

为了弥补全球气候模式(GCM)在区域气候变化情景预测方面的不足,特别是空间和时间分辨率远远不能满足区域和流域尺度中的各种应用需求,提出了降尺度方法。大尺度(大陆尺度,甚至行星尺度)气候变化是区域气候变化的背景<sup>[22,23]</sup>,降尺度方法就是把大尺度、低分辨率的全球气候模式输出信息转化为区域尺度的地面气候变化信息(如气温,降水)<sup>[24]</sup>。现在通常有 2 类降尺度方法<sup>[24~26]</sup>: ①包括与全球气候模式嵌套的区域气候模式在内的

动力降尺度方法(简称 DDS)<sup>[27]</sup>;②在大尺度气候状态和从历史数据获得的区域变量之间建立统计关系的统计降尺度方法(简称 SDS)。

动力降尺度法是通过一个区域气候模式,利用大尺度的气候背景信息,建立更高分辨率的气象变量分布场<sup>[28]</sup>。区域气候模式被认为是获取高分辨率局地气候信息的有效动力降尺度方法<sup>[29]</sup>,区域气候模式的物理意义明确,它建立在大尺度与区域尺度要素之间非线性作用的基础上,能够分辨出由于局地地形、植被覆盖和土壤水文过程等产生的局地中尺度特征<sup>[30,31]</sup>,改进模式对区域与局地要素的描述,能应用于任何地方而不受观测资料的影响。动力降尺度对物理过程的了解以及模式模拟区域地形和下垫面分类等方面都有较高的要求,同时对计算机性能也提出了很高的要求。直接将高分辨率的区域天气气候模型耦合到水文生态模型中不失为一种便捷地产生驱动数据的方法。近期比较有代表性的区域天气/气候模型有 MM5 (Mesoscale model 第 5 代)和 WRF (Weather Research Forecast) 区域气候模型。WRF 是近年来开发的基于 MM5 的新一代预报模式,设计用于 1~10 km 格距的模拟,比之于前的大气数值模式在空间分辨率上有了很大的提高。

耦合区域天气/气候模式已经成为为水文生态模型提供高分辨率驱动数据的重要手段。耦合区域天气/气候模式做洪水预报,比如 Leander 等<sup>[32,33]</sup>在处于比利时与法国 2 国境内的 Meuse 流域对采用 3 种不同的 RCM 初始化方法,结合水文模型进行洪水预报;郭生练等<sup>[34]</sup>在汉江流域耦合集成中尺度预报模式 MM5 和 VIC 分布式水文模型建立洪水预报系统;陆桂华等<sup>[35]</sup>在淮河流域耦合加拿大区域性中尺度大气模式 MC2 和新安江模型进行洪水模拟;Lin 等<sup>[36]</sup>在耦合 MC2 和 Class 洪水预报方面做了试验研究,取得了比传统预报方法更长的预见期。耦合区域天气/气候模式做径流模拟,如 Walter 等<sup>[37]</sup>在巴西南部的 River Uruguay 流域耦合 ARPS 和分布式水文模型进行实时径流预报;Anderson 等<sup>[38]</sup>在加拿大的 Sierra Nevada 山区水库耦合 MM5 和 HEC-HMS 模型进行径流模拟;Jasper 等<sup>[39]</sup>在阿尔卑斯的 Ticino-Verzasca-Maggia 流域用 5 个 RCM 耦合 WaSiM-ETH 进行研究;Evans 等<sup>[40,41]</sup>在美国中部的 FIFE 试验期间,比较了 4 个区域气候模式分别耦合同一个水文模式得到的径流模拟结果,并在 2005 年对地表的多种状态进行模拟。耦合区域天气/气候模式做水文支持决策模拟,如 Kunstmann 等<sup>[42,43]</sup>在阿尔卑

斯山脉的 Mangfall 流域耦合 MM5 模式和分布式水文模式分别进行流域径流模拟和发展流域支持决策系统;Yu 等<sup>[44,45]</sup>结合水文模型 HMS 和 RCM 进行水文过程模拟。在黑河流域,高艳红等<sup>[46]</sup>耦合区域气候模式 MM5 和陆面水文过程模型 Noah 进行降水过程模拟;陈仁升等<sup>[47]</sup>耦合 MM5 和 DWHC 陆面水文过程模型进行径流模拟,结果表明 MM5 生产的驱动比地面资料驱动结果要好。

## 2.4 统计降尺度方法

统计降尺度法是利用多年观测气候资料建立大尺度气候因子(主要为大气环流因子)和区域气候要素(区域内的气温,降水等)之间的统计关系,并用独立的观测资料进行检验,最后应用这种关系将 GCM 输出的大尺度信息转化为区域气候变化情景,统计降尺度计算量小,节省大量机时<sup>[48~50]</sup>。用的比较多的统计降尺度数学方法:回归方法、主分量分析方法、奇异值分解方法和神经网络方法等<sup>[51~59]</sup>。但是,统计降尺度方法在建立转换函数时需要大量的观测资料,在地形复杂观测资料匮乏的山区,如中国西部山区,统计降尺度方法很难应用。同时在应用统计降尺度法时必须基于以下 3 条假设<sup>[60]</sup>:①大尺度气候场和区域气候要素场之间具有显著的统计关系;②大尺度气候场能被 GCM 模式很好地模拟;③在变化的气候情景下,建立的统计关系是有效的。所以当大尺度的气候要素与区域尺度的气候要素之间相关关系不显著时,就失去了其应用的理论依据<sup>[61]</sup>。PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slope Model) 插值模型<sup>[62,63]</sup>就是典型的统计降尺度方法,PRISM 模型是由美国气象学家 Taylor 等<sup>[62]</sup>和 Daly 等<sup>[63]</sup>提出的一种基于地理空间特征和回归统计方法生成气候图的插值模型。在 PRISM 模型中,根据观测站点的高程值与气象要素的观测值,采取线性回归的方法,建立高程与气象要素之间的回归方程,而在回归模拟过程中,又根据各观测站点相对于目标栅格点的距离权重、类群权重、垂直分层权重、地形趋势面权重、离海远近权重和有效地形权重而决定的。

动力降尺度方法相对于统计降尺度方法来说,物理意义更加突出,但是对计算机性能也提出了更高的要求,统计降尺度方法能够节省更多机时,但是对大尺度气候场和区域气候场之间的统计关系更加依赖,随着区域尺度的空间分辨率越来越高,这种统计关系的存在与否需要重新进行验证。

## 2.5 多元信息融合

综合利用各种资料,采用信息融合方法来制备驱动数据。如 NOAA 再分析中心 Xie 等<sup>[21]</sup>通过融合不同的信息来源(雨量筒、遥感资料观测和 NCEP-NCAR 再分析资料)建立了全球 1979—1994 年的空间分辨率为 2.5°降水月平均资料 CMAP(Cli-mate prediction center Merged Analysis of Precipitati-on),其中融合方法:利用最大似然估计方法线性融合遥感资料与再分析资料,结果再与观测资料进行融合(在陆地区域,利用 Reynolds 方法;在海洋区域,利用环岛观测资料来消除遥感资料与再分析资料融合的偏差),然后对各个数据源生产降水资料进行了详细介绍,最后对结果进行融合分析,现在 CMAP 数据已经扩充到 2008 年;随着降水雷达的出现,人们发展了一系列从雷达资料提取降水数据的方法<sup>[64~66]</sup>,降水资料的时空分辨率有了很大的提高,但是雷达反演降水的精度问题又引起了大家的关注<sup>[66]</sup>,利用雨量计资料来修正雷达数据是获取高时空分辨率高精度降水资料的重要手段<sup>[67~70]</sup>。综合利用各种降尺度方法,并充分发挥各种不同类型数据的优势,是多元信息融合的最大潜力。

## 3 重要近地表变量的降尺度实例

大气驱动数据的各个要素都对陆面过程模型模拟的结果产生重要的影响,其中尤其是降水、气温和辐射要素。下面分别介绍降水、气温、辐射和其他近地表气象要素的降尺度实例。

### 3.1 降水

由于降水的发生在空间和时间上高度的随机性,所以大气模式计算得到的降水资料质量都远不如其他要素好。但是降水是影响地气之间水分、热量和动量交换的作用过程最重要的变量之一,也是非常重要的天气、气候与环境变量。Chen 等<sup>[72]</sup>采用统计方法对 GCM 的降水场景进行降尺度研究。Hanssen-Bauer 等<sup>[73,74]</sup>分别采用动力降尺度和统计降尺度法在挪威和斯堪的纳维亚对 ECMWF 资料进行降水场景的降尺度研究。Ngo-Duc 等<sup>[75]</sup>利用月平均的观测数据与 NCEP 数据比值来修正 NCEP 的年、月、日、小时的降水数据。Taylor 等<sup>[62]</sup>和 Daly 等<sup>[63]</sup>针对山区降水提出的一种基于地理空间特征和回归统计方法生成气候图的 PRISM 模型,PRISM 团队已经制备了空间分辨率为 0.04°的 1890—2008 年全美大陆的月平均资料。Immerzeel 等<sup>[76]</sup>在伊比利半岛研究区域,根据粗分辨率下 TRMM 降水产品

与 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)产品之间的回归关系,基于高分辨率的 DNVI 产品来计算 2001—2007 年的高分辨率降水资料。Wilks<sup>[76]</sup>在美国的东北部采用局部权重回归法将 NCEP 资料插值成栅格大小为 2 km 的降水资料。中国国家卫星气象中心(NSMC)基于风云二号 C 卫星发展降水估算产品,其空间范围为 0°~50°N,55°~155°E,分辨率为 0.1°×0.1°,其时间范围为 2004 年 10 月—2009 年 2 月,分辨率为 6 h<sup>[78]</sup>。

### 3.2 气温

气温作为反映地球表层系统热量状况的综合环境指数,不仅是参与自然地域系统界限划分的关键指标,也是地表陆面过程模型模拟的重要驱动量。Benestad<sup>[79~81]</sup>尝试 17 种动力降尺度方法,针对来自 10 多种不同全球气候模式的气温场景,分别在北欧的瑞典、芬兰、挪威和丹麦等地进行降尺度案例研究,制备了 48 个气温场景序列。Hanssen-Bauer 等<sup>[73,74]</sup>分别采用动力降尺度和统计降尺度法在挪威和斯堪的纳维亚,对 ECMWF 资料进行气温场景的降尺度研究。范丽军等<sup>[50]</sup>采用 1961—2000 年的 NCEP 再分析资料和 49 个台站的观测资料,建立了月平均气温的统计降尺度模型,然后把建立的统计降尺度模型应用于 HadCM3 SRES A2 和 B2 两种排放情景,从而生成各个台站 1950—2009 年 1 月和 7 月气温变化情景。Ngo-Duc 等<sup>[75]</sup>利用东安格利亚大学气候研究组(Climatic Research Unit, CRU)的月平均的观测数据与 NCEP 月平均数据的增值来修正 NCEP 的年、月、日、小时的气温数据。Chung 等<sup>[82]</sup>根据太阳短波入射、漫射和反射在山区斜坡上的构成与它们在平面上的构成比值,来修正气温与辐射的函数,从而计算每个规则栅格网的逐小时气温。

### 3.3 辐射

地表辐射对地表辐射平衡、能量交换、水文循环、植被光合作用,以及天气气候的形成,具有决定性的意义。Ngo-Duc 等<sup>[75]</sup>采用东安格利亚大学气候研究组的观测数据与 NCEP/NCAR 再分析资料的比值来修正辐射资料。美国空军气象局利用 AGRMET(Agriculture Meteorology Modeling System)模型系统估算的从 2001~2008 年分辨率为每 3 h 的 0.25°的太阳长短波辐射数据。陈仁升等<sup>[83]</sup>建立了太阳入射短波辐射模型,模型采用简化的辐射传输参数化方案和 NCEP/NCAR 资料相结合的方法,生成黑河流域 2002 年逐小时、1 km×1 km 分辨率的总辐射、直接辐射和散射辐射。中国国家卫星

气象中心 (NSMC) 基于风云二号 C 卫星发展地面入射太阳辐射产品,其空间范围为  $60^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{S}$ ,  $45^{\circ} \sim 165^{\circ}\text{E}$ ,分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,其时间范围为 2004 年 10 月 ~ 2009 年 2 月,分辨率为  $3 \text{ h}^{[84]}$ ;同时发展地面射出长波辐射产品,其空间范围为  $50^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{S}$ ,  $55^{\circ} \sim 155^{\circ}\text{E}$ ,分辨率为  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ,其时间范围为 2004 年 10 月 ~ 2009 年 2 月,分辨率为  $3 \text{ h}$ ,提供实时、日、候、旬、月等 5 种产品<sup>[84]</sup>。

### 3.4 其他近地表气象要素

其他地表气象要素还包括风场、气压和相对湿度等。利用再分析资料进行统计降尺度分析获得高分辨率驱动数据,如高艳红等<sup>[86]</sup>采用客观分析对 NCEP 资料进行统计降尺度研究,制备了 2002 年 6 ~ 12 月的  $2 \text{ m}$  气温、相对湿度和  $10 \text{ m}$  水平与垂直风场;Ngo-Duc 等<sup>[75]</sup>利用东安格利亚大学气候研究组的观测数据来校正 NCEP/NCAR 再分析资料而生成时间序列长达 53 年的 NCC (NCEP/NCAR Corrected by CRU) 驱动数据,其中校正方法比较简单,采用加减方式或比率方式;Xie 等<sup>[87]</sup>利用 SCM 和 CS-RM 模型来验证 ARM SGP 点的 ECMWF 来源的再分析资料和客观分析获取的资料。以再分析资料为初始条件采用动力降尺度方法来制备驱动数据,如李艳<sup>[29]</sup>利用 NCEP/NCAR 再分析资料与江苏省 65 个地面气象观测站 1971—2000 年的观测资料,作为驱动动力降尺度区域气候模式 MM5 的初始场和边界条件,生成了江苏省水平分辨率为  $5 \text{ km}$  的风场资料;Kesarkar 等<sup>[88]</sup>利用 WRF 模式输出  $1 \text{ km}$  逐小时的边界层与陆面参数来驱动高斯空气污染分布模型,比较了模拟的与观测的气温和风场和气温等变量,结果表明 WRF 能够生成可靠的大气驱动。

## 4 陆面数据同化系统的驱动数据制备实例

陆面数据同化系统 (Land Data Assimilation System, LDAS) 是近年来将四维同化方法应用到地球表层科学和水文学中而迅速发展起来的新方法,在陆面模型和水文模型基础上,采用不同的数据同化算法同化地表观测资料、卫星和雷达数据,优化地表和根区土壤水分、气温、地表能量通量等的估算,而大气驱动数据则是陆面数据同化系统的重要组成部分之一<sup>[89,90]</sup>。因此北美陆面数据同化系统、全球陆面数据同化系统、欧洲陆面数据同化系统和中国西部陆面数据同化系统中大气驱动数据集的制备都是作为重要的研究内容之一<sup>[2,89,91,92]</sup>。这里将结合这以

下同化系统来进一步描述大气驱动数据的制备实例。

(1) 北美陆面数据同化系统 (NLDAS)<sup>[2]</sup> 制备的实时和历史北美大陆驱动数据,用于驱动 4 个陆面模型,其范围为北美大陆,其时间分辨率为  $1 \text{ h}$ ,空间分辨率为  $0.125^{\circ}$ 。在制备前向驱动数据时, $2 \text{ m}$  气温、 $2 \text{ m}$  气压、比湿、风场、和长波辐射等驱动数据直接使用 EDAS (NCEP Eta-model based) 再分析资料和部分卫星数据产品,当驱动和模拟模型的分辨率不匹配时,时间上采用线性时间插值方法,空间上利用一定的高程差建立公式进行插值。由于 NCEP 再分析资料中的降水和短波辐射数据是由模式推导而出,属于需慎用的 C 类数据<sup>[11]</sup>,所以 NLDAS 在制备降水和短波辐射驱动数据时有别于其他驱动数据。其中前向驱动的降水要素的制备方法为:结合观测数据的准确性与多普勒的时空分辨率的优势,应用多普勒逐时产品来分解逐日观测数据以获得 NLDAS 项目的降水驱动数据,其详细过程是以气候预测中心的雨量计数据为框架,分析国家气象服务中心多普勒数据的逐时分布状况以获取各个小时的权重,然后依据这个权重,将雨量计数据对各个小时的降水量进行填充。而前向的短波辐射要素的制备方法:应用基于天顶角瞬时的算法,将 NOAA GEOS 卫星遥感数据生成逐时的空间分辨率为  $0.5^{\circ}$  的下行地面短波辐射场,然后应用双线性插值方法将此场插值成空间分辨率为  $0.125^{\circ}$  能够为 NLDAS 项目所利用的短波辐射驱动数据。实时大气驱动数据除降水要素外,制备方法与前向驱动数据制备方法一致,而实时降水要素的制备方法由 PRISM 模型结合地形影响因子获得。

(2) 全球陆面数据同化系统 (GLDAS)<sup>[91]</sup> 中则指出决定通量的关键陆面状态如地表气温、土壤湿度和雪等的变化过程是由降水来决定的。降水数据来源可以是大气数据同化系统、卫星遥感、降水测量,地面雷达和混合产品,就这些产品进行优缺点进行评估并离线驱动 Mosaic 陆面模型以获得 GLDAS 系统最合适的降水驱动数据。结果表明,来自 NOAA 中心的 CMAP 合成降水驱动数据在陆面过程中推导所获得的土壤含水百分比、土壤温度和雪水当量状态量与 Higgins (观测值) 相比都是最小的,所以尽管在 Higgins 是否一定是“真值”和 CMAP 与 NEXRAD 更加吻合等问题上存有疑问,CMAP 生成的数据被认为是最接近于真实值的降水驱动数据。

(3) 欧洲陆面数据同化系统 (ELDAS)<sup>[92]</sup> 中风

速、气温、湿度和气压驱动数据源于 ECMWF 中心的 ERA-40 再分析资料, ERA-40 是垂直分辨率从 1 000 ~ 1 hPa 共 23 层, 水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 时间分辨率为 6 h 和月平均、时间尺度从 1957 年 9 月 ~ 2002 年 8 月, 总长度为 45 年(1957—2002 年)的全球格点资料<sup>[12]</sup>; 下行长波和短波辐射主要是通过 ECMWF 全球模型中的辐射传输模型和 METEOSAT/MSG 卫星的观测数据建立的; 欧洲 1999 年 10 月 1 日至 2000 年 12 月 31 日的  $0.2^\circ$  的每 3 h 的降水数据主要是基于欧洲大约 21 000 个雨量计数据以及雷达数据得到。

(4) 中国西部陆面数据同化系统 (CLDAS)<sup>[88]</sup> 制备出 2002 年大气驱动数据, 该系统采用 Newton 松弛法资料同化方法将中尺度大气模型 MM5 和 NCEP 再分析资料结合起来, 牛顿松弛项被加入到风、气温和水汽的诊断过程中。通过获取同化时段内的格点分析来实现的, 这些分析以标准的输入格式反馈给模式。模式通过对分析数据的时间线性插值来决定模式逼近值, 随着模式积分时间的延续, 模式的初始误差会不断的增长, 为了减少模式初始误差出现明显的增长对预报结果的影响, 模式模拟每 3 天进行一次。如果模式中高层的模拟结果非常接近于观测或者客观分析的结果, 则模拟结果的可信度越高, 而近地层更多地由模式模拟得到, 制备出逐小时、空间分辨率为  $0.25^\circ$  的 2002 年中国西部驱动数据。

(5) 陆面信息系统 (LIS)<sup>[93]</sup> 是由美国 NASA 哥达德太空飞行中开发, 是一个集成了先进的陆面模型、高分辨率的卫星和观测数据、数据同化技术和高性能计算工具的系统, 该系统为水汽交换过程和土壤—植被—雪盖的生物化学过程的刻画提供了平台。在耦合或预测的运作模块中, 陆面信息系统从大气模式中 (WRF) 获得气象边界条件; 在分析模式中, 长期一体化的 LIS 作为初始条件的发生器, 给 WRF 提供初始陆面条件; 在预测模块中, LIS 作为陆面组分, 与 WRF 形成双向反馈模式的交互。因为 WRF 模式能够用于 1 ~ 10 km 格距的模拟, 该系统可以为区域模拟同化提供平台。

## 5 目前存在的问题

(1) 在统计降尺度方法上, 驱动变量之间是独立的, 每个变量都采用不同的预报量来构造降尺度的统计关系<sup>[94]</sup>, 这也意味着很难有一种方法能够对驱动数据的所有变量进行降尺度得到满意的产品。

(2) 在地形复杂的山区, 辐射收支平衡、温度和湿度等驱动场受下垫面影响甚大, 动力降尺度以全球粗分辨率的土地利用、土壤结构分类系统和植被分类系统为初始数据, 会抹杀区域特征, 为动力降尺度模式提供区域高分辨下垫面初始数据的任务是迫在眉睫。

(3) 降水对地面状态如土壤湿度、地面蒸散发等影响甚大, 但是相对于驱动数据的其他要素, 不管从分布的时间上还是空间上都具有高度的随机性, 因此区域尺度和流域尺度的降水驱动量目前还不能采用动力降尺度方法获得<sup>[95]</sup>, 统计降尺度所采用的长时间序列再分析资料的降水驱动数据属于慎用数据<sup>[11]</sup>, 结合多普勒雷达资料、滴谱仪和加密的雨量计观测以提高降水驱动场的精度不失为一种重要的手段。

(4) 从遥感获得的信息在遥感技术与航空技术的结合后更凸现出应用价值, 卫星遥感技术因而迅速崛起, 成为当前遥感技术最重要的一支发展力量。遥感能迅速及时地获取大量客观的地理信息, 既可提供可见光波段的信息, 又可提供红外、紫外、微波波段的信息以及多波段信息; 既可提供图像形式的信息, 又可提供模拟或数字化的数据信息。在遥感日益成为有效而全面的观测手段时, 将动力降尺度中同化遥感资料, 生成长时间序列、完备的、高分辨率、高质量并经过严格检验的驱动数据, 将是驱动数据研制的重要趋势。

## 6 结 语

本文概述了驱动数据的制备方法及其优缺点, 然后概述了各个驱动场的降尺度方法和陆面同化系统大气驱动数据制备方法的文献, 最后讨论了现阶段制备大气驱动数据存在的问题。

国际上针对地区与陆面过程模型采用相应的降尺度方法制备驱动数据, 但是由于我国幅员辽阔, 地形特征复杂, 地貌形态多样化, 所以要根据中国地形特征来发展中国区域的驱动数据。相对于国际上大气驱动数据研究发展而言, 我国这方面的研究尚处于初级阶段, 尤其是为地形复杂的中国西部 (包括西北五省、青藏高原区、阿拉善高原区) 制备高分辨率长时间序列的大气驱动数据是一个巨大的挑战。由于中国西部地形复杂, 以山地为主, 地表异质性强, 又由于中国西部生态环境脆弱、水资源匮乏和经济相对落后, 发展该区域的生态、经济、水文、人类活动相耦合的陆面过程模型非常重要, 所以为中国西

部制备空间分辨率为 1 ~ 10 km 的大气驱动数据具有重要的意义。

制备中国西部降水、短波辐射和其他地表气象要素需要结合西部复杂的地形特征。中国西部的降水要素与经纬度、海拔高度和地形特征有很强的相关性,例如,降水随着高程的增高而增加,至某一高度达到最大值后逐渐向上递减<sup>[96,97]</sup>,在山区,迎风坡由于地形的强迫抬升而引起地面垂直速度的增大,引起降水量的增长,背风坡降水的产生是由于在一定的天气条件下有背风坡产生,在坡的上升气流处,会有不稳定能量释放,利于降水量增大<sup>[98]</sup>;而辐射则受坡地方位、地形和海拔高度影响较大。山地的这些特征给我们制备山区大气驱动数据提供信息,但是如何将这些信息对现有的制备方法做出调整确是一个巨大的挑战。

## 参考文献 (References):

- [1] Li Xin, Wu Lizong, Ma Mingguo, *et al.* Digital Heihe River Basin. 2: Data integration[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25 (3): 306-316. [李新, 吴立宗, 马明国, 等. 数字黑河的思考与实践 2: 数据集成[J]. 地球科学进展, 2010, 25 (3): 306-316.]
- [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*, 2003, 108 (D22): 1-12.
- [3] Miller J, Russell G, Caliri G. Continental scale river flow in climate models[J]. *Journal of Climate*, 1994, 7: 914-928.
- [4] Amel N. The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: A continental perspective [J]. *Global Environmental Change*, 1999, 9: 5-23.
- [5] Nijssen B, O'Donnell G M, Lettenmaier D P, *et al.* Predicting the discharge of global rivers [J]. *Journal of Climate*, 2001, 14: 3 307-3 323.
- [6] Wilby R L, Hay L E, Gutowski W J, *et al.* Hydrological responses to dynamically and statistically downscaled climate model output [J]. *Geophysical Research Letter*, 2000, 27(8): 1 199-1 202.
- [7] Brown S, Lim B, Schla-mandinger B. Evaluating approaches for estimating net emissions of carbon dioxide from forest harvesting and wood products[R]. Paris, France: IPCC, 1998: 47.
- [8] Pachauri R K, Reisinger A. IPCC fourth assessment report: Climate change 2007[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007: 104.
- [9] Li Xin, Cheng Guodong, Lu Ling. Comparison of spatial interpolation methods[J]. *Advances in Earth Science*, 2000, 15(3): 260-265. [李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 260-265.]
- [10] Li X, Cheng G D, Lu L. Spatial analysis of air temperature in the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2005, 37(2): 246-252.
- [11] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American meteorological society*, 1996, 77(3): 437-471.
- [12] Kistler R, Kalnay E, Collins W, *et al.* The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82: 247-267.
- [13] Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, *et al.* The ERA-40 re-analysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(612): 2 961-3 012.
- [14] Onogi K, Tsutsui J, Koide H, *et al.* The JRA-25 Reanalysis [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2007, 85 (3): 369-432.
- [15] Schubert S, Suarez M, Park C K, *et al.* GCM simulations of intraseasonal variability in the Pacific/north American region[J]. *Journal of the Atmospheric Science*, 1993, 50(13): 1 991-2 007.
- [16] Chao Zhenhua. The Applicability of the Reanalyzed Air Temperature Data in Western China and Its Downscaling[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2008: 130. [钞振华. 再分析气温资料在中国西部地区的适用性分析及降尺度研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008: 130.]
- [17] WCRP. Proceedings of 1st WCRP international conference on reanalyses[R]. Silver Spring, MD, WMO, WCRP-104, WMO/TD, 1998, 876: 461.
- [18] WCRP. Proceedings of 2nd WCRP international conference on reanalyses[R]. WCRP-109, WMO/TD WMO, 2000: 985.
- [19] Xu Ying, Ding Yihui, Zhao Zongci. Confidence analysis of NCEP/NCAR 50-year global reanalyzed in climate change research in China[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2001, 12(3): 337-347. [徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 美国 NCEP/NCAR 近 50 年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析[J]. 应用气象学报, 2001, 12(3): 337-347.]
- [20] Zhao Tianbao, Fu Congbin. Preliminary comparison and analysis between ERA-40, NCEP-2 reanalysis and observations over China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(1): 14-32. [赵天保, 符宗斌. 中国区域 ERA-40、NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(1): 14-32.]
- [21] Piker R T, Tarpley J D, Laszlo I, *et al.* Surface radiation budgets in support of the GEWEX Continental-scale International Project (GCIP) and the GEWEX Americas Prediction Project (GAPP), including the North American Land Data Assimilation System (NLDAS) project[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (D22): GCP5. 1-GCP5. 18.
- [22] Von Storch H. Inconsistencies at the interface of climate impact studies and global climate research[J]. *Meteorologie Zeitschrift*, 1995, 4 NF: 72-80.
- [23] Von Storch H, Flüser G. The global and regional climate system [C]// Anthropogenic Climate Change. Springer Verlag, 1999: 3-36.
- [24] Wilby R L, Wigley T M. Downscaling general circulation model

- output: A review of methods and limitations [J]. *Progress in Physical Geography*, 1997, 21: 530-548.
- [25] Wilby R L, Wigley T M. Precipitation predictors for downscaling: Observed and general circulation model relationships [J]. *International Journal of Climatolog*, 2000, 20(5): 641-661.
- [26] Wilby R L, Dawson C W, Barrow E M. SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impact [J]. *Environmental Modeling and Software*, 2002, 17: 145-157.
- [27] Leung L R, Qian Y, Bian X, *et al.* Mid-Century ensemble regional climate change scenarios for the western united states [J]. *Climate Change*, 2004, 62: 75-113.
- [28] Giorgi F, Mearns L O. Introduction to special section: Regional climate modeling revisited [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 6 335-6 352.
- [29] Li Yan, Tang Jianping, Wang Yuan, *et al.* Application of dynamical downscaling method for assessment of wind energy resources [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(2): 192-200. [李艳, 汤剑平, 王元, 等. 区域风能资源评价分析的动力降尺度研究 [J]. 气候与环境变化, 2009, 14(2): 192-200.]
- [30] Giorgi F, Bates T. The climatological skill of a regional model over complex terrain [J]. *Monthly Weather Review*, 1989, 117: 2 325-2 347.
- [31] Hong S Y, Juang H H, Lee D K. Evaluation of a regional spectral model for the east Asian monsoon case studies for July 1987 and 1988 [J]. *Journal of the Meteorological Society Japan*, 1999, 77: 553-572.
- [32] Leander R T, Buishand A, Bart J, *et al.* Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 351(3/4): 331-343.
- [33] Leander R T, Buishand A. Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 332(3/4): 487-496.
- [34] Guo Shenglian, Zhang Jun, Guo Jing, *et al.* Flood forecasting system of Hanjiang basin based on meteorological model [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2009, 29(3): 1-5. [郭生练, 张俊, 郭靖, 等. 基于气象模式的汉江流域洪水预报系统 [J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(3): 1-5.]
- [35] Lu Guihua, Wu Zhiyong, Wen Lei, *et al.* Application of a coupled atmospheric-hydrological modeling system to real-time flood forecast [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(6): 847-852. [陆桂华, 吴志勇, 文雷, 等. 陆气耦合模型在实时暴雨洪水预报中的应用 [J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 847-852.]
- [36] Lin C A, Wen L, Beland M, *et al.* A couple of atmospheric-hydrological modeling study of the 1996 Haha river basin flash flood in Quebec, Canada [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(2): 1-4.
- [37] Walter C, Reinaldo H, Ivanilo A, *et al.* Forecasting river Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 305: 87-98.
- [38] Anderson M L, Chen Z Q, Kavvas M L, *et al.* Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, (4): 312-318.
- [39] Jasper K, Gurtz J, Lang H. Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 267: 40-52.
- [40] Evans J P. Improving the characteristics of streamflow modeled by regional climate models [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 284(1/4): 211-227.
- [41] Evans J P, Oglesby R J, Lapenta W M. Time series analysis of regional climate model performance [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: D04104 1-23.
- [42] 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*, 2008, 33: 165-174.
- [43] Kunstmann H, Stadler C. High resolution distributed atmospheric-hydrologic modeling for Alpine catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 314: 105-124.
- [44] Yu Z B, Lakhtakia M, Yamal B, *et al.* Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological and hydrologic model system [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 218: 72-91.
- [45] Yu Z B, Barron E J, Yarnal B, *et al.* Evaluation of basin-scale hydrologic response to a multi-storm simulation [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 257: 212-225.
- [46] Gao Yanhong, Cheng Guodong, Cui Wenrui, *et al.* Coupling of enhanced land surface hydrology with atmospheric mesoscale model and Its implement in Heihe river basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(12): 1 283-1 292. [高艳红, 程国栋, 崔文瑞, 等. 陆面水文过程与大气模式的耦合及其在黑河流域的应用 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(12): 1 283-1 292.]
- [47] Chen Renshen, Gao Yanhong, Kang Ersi, *et al.* A Distributed Water-Heat Coupled (DWHC) model for mountainous watershed of an inland river basin ( III ): Model results using the results from MM5 model [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(8): 830-837. [陈仁升, 高艳红, 康尔泗, 等. 内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型( III ): MM5 嵌套结果 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(8): 830-837.]
- [48] Von Storch H, Hewitson B, Mearns L. Review of empirical downscaling techniques [C] // Iversen H Øiskar B A K, eds. Regional Climate Development under Global Warming, Conference Proceedings RegClim Spring meeting. General Technical Reports, 2000, 4: 29-46.
- [49] Fan Lijun, Fu Zongbin, Chen Deliang. Review on creating future climatic change scenarios by statistical downscaling techniques [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 320-329. [范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 320-329.]
- [50] Fan Lijun, Fu Zongbin, Chen Deliang. Estimation of local tem-



- perature change scenarios in north China using statistical downscaling method [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(5): 887-897. [范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 统计降尺度法对华北地区未来区域气温变化情景的预估[J]. 大气科学, 2007, 31(5): 887-897.]
- [51] Winkler J A, Palutikof J P, Andresen J A. The simulation of daily temperature time series from GCM output. Part II: Sensitivity analysis of an empirical transfer function methodology [J]. *Journal of Climate*, 1997, 10: 2 514-2 532.
- [52] 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: 67-91.
- [53] Schubert S. Downscaling local extreme temperature changes in south-eastern Australia from the CSIRO Mark2 GCM-international [J]. *Journal of Climatology*, 1998, 18: 1 419-1 438.
- [54] Murphy J. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate [J]. *Journal of Climate*, 1999, 12: 2 256-2 284.
- [55] Bergant K, Kajfez-Bogataj J, Crepinsek Z. Statistical downscaling of general-circulation-model-simulated average monthly air temperature to the beginning of flowering of the dandelion (*Taraxacum officinale*) in Slovenia [J]. *International Journal of Biology*, 2001, 46: 22-32.
- [56] Mo K C, Straus D M. Statistical-dynamical seasonal prediction based on principal component regression of GCM ensemble integrations [J]. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(9): 2 167-2 187.
- [57] Busuioc A, Chen D, Hellström C. Performance of statistical downscaling models in GCM validation and regional climate change estimate: Application for Swedish precipitation [J]. *International Journal of Climatology*, 1999, 21: 557-578.
- [58] Oshima N, Kato H, Kadokura S. An application of statistical downscaling to estimate surface air temperature in Japan [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D10): 1-10.
- [59] Mpelasoka F S, Mullah A B, Heerdegen R G. New Zealand climate change information derived by multivariate statistical and artificial neural networks approaches [J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21: 1 415-1 433.
- [60] Giorgi F, Hewitson B, Christensen J H, et al. Regional climate information-evaluation and projections [C] // Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, eds. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 583-638.
- [61] Mearns L O, Bogardi I, Giorgi F, et al. Comparison of climate change scenarios generated from regional climate model experiments and statistical downscaling [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D6): 6 603-6 621.
- [62] Taylor G H, Daly C, Gibson W P. Development of an isohyetal analysis for Oregon using the PRISM model [C] // 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, American Meteorological Society, 1993: 126-127.
- [63] Daly C, Neilson R P, Phillips D L. A Statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous Terrain [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33: 140-158.
- [64] Xie P P, Arkin P A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observation, satellite estimates, and numerical model outputs [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78: 2 539-2 558.
- [65] Brissette F P, Khalili M, Leconte R. Efficient stochastic generation of multi-site synthetic precipitation data [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 345: 121-133.
- [66] Chiang Y M, Chang F J, Jou B J D, et al. Dynamic ANN for precipitation estimation and forecasting from radar observations [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 334: 250-261.
- [67] Gerstner E M, Heinemann G. Real-time areal precipitation determination from radar by means of statistical objective analysis [J]. *Journal of hydrology*, 2008, 352: 296-308.
- [68] Salek M. The radar and raingauge merge precipitation estimate of daily rainfall-first results in the Czech republic [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 2000, 25(10/12): 977-979.
- [69] Shimizu S, Oki R, Igarashi T. Ground validation of radar reflectivity and rain rate retrieved by the TRMM precipitation radar [J]. *Advances Space Research*, 2001, 28(1): 143-148.
- [70] Llasat M, Ceperuelo M, Rigo T. Rainfall regionalization on the basis of the precipitation convective features using a raingauge network and weather radar observations [J]. *Atmospheric Research*, 2007, 83: 415-426.
- [71] Haberlandt U. Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 332: 144-157.
- [72] Chen D, Achberger C, Räisänen J, et al. Using statistical downscaling to quantify the GCM-related uncertainty in regional climate change scenarios: A case study of Swedish precipitation [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 2006, 23(1): 54-60.
- [73] Hanssen-Bauer I, Førland E J, Haugen J E, et al. Temperature and precipitation scenarios for Norway: Comparison of results from dynamical and empirical downscaling [J]. *Climate Research*, 2003, 25: 15-27.
- [74] Hanssen-Bauer I, Achberger C, Benestad R, et al. Empirical-statistical downscaling of climate scenarios over Scandinavia: A review [J]. *Climate Research*, 2005, 29(0): 255-268.
- [75] Ngo-Duc T, Polcher J, Laval K. A 53-year forcing data set for land surface models [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D6): 13.
- [76] Immerzeel W W, Rutten M M, Droogers P. Spatial downscaling of TRMM precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 362-370.
- [77] Wilks D S. High-resolution spatial interpolation of Weather generator parameters using local weighted regressions [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 111-120.

- [78] You Ran, Lu Naimeng. FY-2C Accumulated Total Precipitation [EB/OL]. Beijing: National Satellite Meteorological Center, 2009[2010-09-06], <http://satellite.cma.gov.cn/jsp/basic/onlinehelp.jsp#>. [游然, 卢乃锰. FY-2C 卫星降水估计产品 [EB/OL]. 北京: 国家卫星气象中心, 2009 [2010-09-06], <http://satellite.cma.gov.cn/jsp/basic/onlinehelp.jsp#>. ]
- [79] Benestad R E. Empirically downscaled climate scenarios for northern Europe[J]. *Climate Research*, 2002, 21: 105-125.
- [80] Benestad R E. Empirically downscaled multi-model ensemble temperature and precipitation scenarios for Norway[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15: 3 008-3 027.
- [81] Benestad R E. Tentative probabilistic temperature scenarios for northern Europe[J]. *Tellus*, 2004, 56A: 89-101.
- [82] Chung U, Yun J I. Solar irradiance-corrected spatial interpolation of hourly temperature in complex terrain[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126: 129-139.
- [83] Chen Rensheng, Kang Ersi, Li Xin, *et al.* Hourly incident solar radiation model under actual weather and terrain conditions; A case study in Heihe river basin[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(5): 773-779. [陈仁升, 康尔泗, 李新, 等. 任意地形实际天气条件下小时入射短波辐射模型——以黑河流域为例[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(5): 773-779. ]
- [84] Yuan Wanping. FY-2C Downward Short Wave Flux at Ground Surface [EB/OL]. Beijing: National Satellite Meteorological Center, 2009[2010-09-06], <http://satellite.cma.gov.cn/jsp/basic/onlinehelp.jsp#>. [袁晚平. FY-2C 卫星地面入射太阳辐射产品 [EB/OL]. 北京: 国家卫星气象中心, 2009 [2010-09-06], <http://satellite.cma.gov.cn/jsp/basic/onlinehelp.jsp#>. ]
- [85] Wu Xiao. FY-2C Outgoing Longwave Radiation [EB/OL]. Beijing: National Satellite Meteorological Center, 2009 [2010-09-06], <http://satellite.cma.gov.cn/jsp/basic/onlinehelp.jsp#>. [吴晓. FY-2C 卫星射出长波辐射产品 [EB/OL]. 北京: 国家卫星气象中心, 2009 [2010-09-06], <http://satellite.cma.gov.cn/jsp/basic/onlinehelp.jsp#>. ]
- [86] Gao Yanhong, Cheng Guodong, Li Xin, *et al.* Comparison of atmospheric data scaling transfer scheme in Heihe River Basin[J]. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(4): 563-569. [高艳红, 程国栋, 李新, 等. 黑河流域大气资料尺度转换的对比分析[J]. *高原气象*, 2005, 24(4): 563-569. ]
- [87] Xie S, Cederwall R T, Zhang M, *et al.* Comparison of SCM and CSRM forcing data derived from the ECMWF model and from objective analysis at the ARM SGP site[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(D16): 4 499.
- [88] 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: 1 976-1 988.
- [89] Li Xin, Huang Chunlin, Che Tao, *et al.* Progress and Prospect of Chinese land data assimilation system [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(8): 163-173. [李新, 黄春林, 车涛, 等. 中国陆面数据同化系统研究的进展与前瞻[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(2): 163-173. ]
- [90] Huang Chunlin, Li Xin. A review of land data assimilation system[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(5): 424-430. [黄春林, 李新. 陆面数据同化系统的研究综述[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(5): 424-430. ]
- [91] Gottschalk J, Meng J, Rodell M, *et al.* Analysis of multiple precipitation products and preliminary assessment of their impact on global land data assimilation system land surface states[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6: 573-598.
- [92] Hurk V D, Ettema J, Viterbo P. Analysis of soil moisture changes in Europe during a single growing season in a new ECMWF soil moisture assimilation system[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9: 116-131.
- [93] Kumar S V, Peters-Lidard C D, Eastman J L, *et al.* An integrated high-resolution hydrometeorological modeling testbed using LIS and WRF[J]. *Environmental Modeling and Software*, 2007, 23: 169-181.
- [94] Timbal B, Fernandez E, Li Z. Generalization of a statistical downscaling model to provide local climate change projections for Australia[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24: 341-358.
- [95] Wetterhall F, Halldin S, Xu C Y. Statistical precipitation downscaling in central Sweden with the analogue method[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 306: 174-190.
- [96] Tang Maocnag. The distribution of precipitation in mountain Qilian[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1985, 40(4): 323-332. [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. ]
- [97] Wang Genxu, Cheng Guodong. The spatial difference features of eco-environment in Inland river basins[J]. *Scientific Geographica Sinica*, 1998, 18(4): 355-361. [王根绪, 程国栋. 内陆河流域生态环境的空间分异特征[J]. *地理科学*, 1998, 18(4): 355-361. ]
- [97] Fu Baopu. Mountain Climate [M]. Beijing: Science Press, 1983:271. [傅抱璞. 山地气候 [M]. 北京: 科学出版社, 1983:271. ]

## Review on Research of Forcing Data for Regional Scale Hydrological Model

PAN Xiaoduo<sup>1</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, CHAO Zhenhua<sup>1,2</sup>

(1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 2. *Nantong University, Nantong 226007, China*)

**Abstract:** Hydrometeorological forcing data with high spatio-temporal resolution, such as wind, temperature, pressure, humidity, radiation, precipitation, is needed for driving regional-scale and watershed-scale hydrological, ecological, land models or data simulations system. In this paper, the importance of regional-scale and watershed-scale forcing data is clarified; methods of producing forcing data, such as interpolation based on observation data, reanalysis data, dynamical downscaling method, statistical downscaling method and multi-source information fusion method, are described in detail; some cases about precipitation, radiation, temperature and other variables are given; some case studies on producing forcing data for land data assimilation systems are introduced, such as Global Land Data Assimilation System (GLDAS), European Land Data Assimilation System to predict Floods and Droughts (ELDAS), North American Land Data Assimilation System (NLDAS), Chinese Land Data Assimilation System (CLDAS) and Land Information System (LIS). Finally, existing problems of producing high spatio-temporal forcing data for regional-scale and watershed-scale hydrological, ecological, land models or data simulations system are pointed out in detail, and four proposals are put forward: ①it is difficult to satisfy all forcing variables by one simple method; ②it is urgent to provide proper land surface initial condition for dynamical downscaling model; ③it is a major method to combine with Doppler radar data, drop size meter and rain gauge observations to improve the accuracy of rainfall; ④it is a trend to input remote sensing images into dynamical downscaling model by data assimilation method to generate high spatio-temporal forcing data. Ideas on preparing forcing data for land surface model of Western China are proposed.

**Key words:** Forcing data; Reanalyzed data; Land data assimilation system; Downscaling method; Western China.