

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.03118

统计降尺度方法研究进展综述

张明月, 彭定志, 胡林涓

(北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 统计降尺度方法是将大气环流模式 GCMs 输出的低分辨率的气象资料转换为流域尺度的主要方法之一, 现已发展成为气候学中较为完善的领域。简要介绍了统计降尺度方法的基本原理, 包括基本假设条件及主要步骤和关键点; 重点介绍统计降尺度方法, 大致分为转换函数法、天气分析技术和天气发生器这三类, 并对几种方法的国内外应用进展做了阐述; 对统计降尺度方法的不确定性研究做了简要介绍。指出未来研究应重点研究统计降尺度模型的适用条件及范围、提高降水模拟的精度; 统计降尺度与动力降尺度两种降尺度结合的方法将是降尺度主要发展方向之一。

关键词: 统计降尺度; 研究进展; 统计降尺度方法; 不确定性分析

中图分类号: P333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0118-05

Research Progress on Statistical Downscaling Methods

ZHANG Ming yue, PENG Ding zhi, HU Lin juan

(College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Statistical downscaling method is one of the methods that transform the meteorological data with low resolution GCMs output to the basin scale data, and this method has been studied in depth and widely used in the area of climatology. In this paper, the basic principles of the statistical downscaling method were introduced, including the basic assumptions, main steps, and key points. The statistical downscaling methods can be classified into the transfer function method, weather typing method, and weather generator model, and the applications of each method were also introduced. The uncertainty analysis of the statistical downscaling method was briefly introduced. Moreover, the future study of the statistical downscaling method should focus on its applicable conditions and range and the improvement of precision of precipitation simulation. Finally, it was pointed out that the coupling approach of statistical and dynamic downscaling methods is one of the main development directions of the downscaling study.

Key words: statistical downscaling; research progress; statistical downscaling method; uncertainty analysis

近年来, 气候变化及其对水文水资源的影响一直是研究热点。大气环流模式(Global atmospheric general circulation models, GCMs) 为气候变化研究提供了全球尺度的信息, 但其输出的分辨率较低, 无法将 GCMs 提供的气候要素信息直接输入相应模型中。目前, 应用较广的方法是通过降尺度技术将 GCMs 大气尺度或全球尺度信息转变为区域尺度, 以提高 GCMs 输出的气候信息的分辨率。降尺度方法通常分为动力降尺度法、统计降尺度法以及动力统计降尺度相结合的方法。统计降尺度法是建立区域或流域变量与大尺度气候信息间的统计关系, 并利用这种关系获得区域或流域未来气候变化情景, 其计算量相对较小、省机时, 应用较广^[1]。

1 统计降尺度法的原理

统计降尺度利用多年大气环流的观测资料建立大尺度气候要素和区域气候要素之间的统计关系, 并用独立的观测资料检验这种关系的合理性, 再把这种关系应用于 GCMs 中输出大尺度气候关系来预估区域未来的气候变化情景。其实质就是建立大尺度气候预报因子与区域气候变量的统计关系。一般地, 统计降尺度法基于 3 个假设条件: 大尺度气候场和区域气候观测场之间具有显著的统计关系; 大尺度气候场能被 GCM 较好地模拟; 在变化的气候情景下, 建立的统计关系是有效的^[2]。

收稿日期: 2012-11-21 修回日期: 2013-05-03 网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1016.005.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB428402); 国家科技支撑计划课题(2012BAC21B02)

作者简介: 张明月(1989), 女, 四川内江人, 硕士研究生, 主要从事气候变化对水文水资源影响研究。E-mail: zhang1105108@126.com

通讯作者: 彭定志(1977), 男, 河南新乡人, 副教授, 博士, 从事气候变化对水文水资源影响研究。E-mail: dzpeng@bnu.edu.cn

对 GCMs 输出进行统计降尺度时,主要步骤及关键点如下。

(1) 预报区域选择和预报因子筛选。这是统计降尺度法的第一步,其它预报因子的选择在很大程度上决定了未来气候情景的特征^[3]。因此,选取的预报因子必须具备以下特点:对大尺度气候变化足够敏感;易于获取、连续且能被准确模拟;与水文气象变量有良好的相关性;与降尺度参数保持显著的相关性^[4]。对于不同的降尺度模型,预报因子选择的方法也不同。如 SDSM (Statistical Downscaling Model) 模型运用迭代法筛选预报因子,有一定的人为主观判断性^[3]。而 ASD (Automated Statistical Downscaling) 模型则采取向后逐步回归法和偏相关分析法筛选预报因子^[5]。

(2) 统计降尺度模型的选择。现有统计降尺度模型众多,各有其优缺点,对预报因子的模拟效果不尽相同。应选择最适宜当地条件的模型,准确地预测未来的气候情景。

(3) 模型率定和检验。选定统计降尺度模型后,将长序列实测资料(如降水、气温等)输入模型并与已选定的预报因子确立统计关系。一般将长序列实测资料分为两段,前段用来模型率定,建立与预报因子的统计关系;后段用来模型检验,检验已建立的统计关系是否合理。

(4) 未来气候情景生成。将建立的统计关系应用于 GCMs 输出,生成一系列天气序列。不同的气候模式有不同的时间序列长度,如 HadCM2 以 360 d 为一个年长度,而 CGCM1 以 365 d 为一个年长度。

2 统计降尺度模型应用研究

统计降尺度研究方法较多,常用的主要包括 3 类:转换函数法、天气分类法和天气发生器。

转换函数法是最早的降尺度方法之一,其原理是运用线性或非线形模型建立大尺度气候信息与局域尺度变量之间函数关系,因此,转换函数法分为线性和非线性的转换函数法。最常用的是线性回归法,包括多元线性回归、逐步线性回归、主成分分析等。Sailor 和 Li^[6] 用多元线性回归法模拟了美国站点的气温。运用同样方法, Murphy^[7] 模拟了欧洲月平均气温和降水。Wilby 等^[8] 运用逐步线性回归法对三种数据进行统计降尺度,并比较了三种数据不同的现在与未来降雨径流情景。非线性转换函数法中常见的人工神经网络法 (Artificial Neural Network, ANN)。Mpelasoka 等^[9] 用 ANN 模型模拟了新西兰的日平均气温和降水。Tolika 等^[10] 分析了多元 ANN 在希腊地区降水和气温极值的模拟效果。

天气分类法是根据不同的天气特征,如海平面气压、气流指数、风向、云量等,将时间序列分为有限的、离散的天气类型或状态^[11],通过计算各环流型均值、发生概率、方差分布等来推测地表区域对应的天气状况。该方法不能体现站点预报量的连续性特征,多用来模拟极值过程,它认为大气环流与地表天气的关系是不变的。天气分类法中分为相似法和隐马尔可夫过程两种,其中相似法是应用极为广泛的统计降尺度方法。

天气发生器是用于随机生成与实际观测资料的气象数据统计特征相似的一类统计资料模型,最初是用来生成缺失历史数据的一种方法。Richardson^[12] 建立的基于一阶马尔

可夫链的 WGEN 是应用最广的天气发生器,其基本原理是将降水序列分为旱天和雨天两种状态,用一阶或二阶马尔可夫链表达两种状态的转换概率,旱天降水量为零,雨天降水量采用 Gamma 分布或指数分布描述。Wilks^[13] 基于一阶马尔可夫链随机天气发生器,利用 Gamma 分布模拟降雨量。天气发生器在统计降尺度模型中应用较广,如 SDSM 模型、ASD 模型均运用天气发生器对降水进行模拟。Fatichi 等^[14] 则应用了基于贝叶斯理论的天气发生器 AWE GEN (Advanced Weather Generator model)。

转换函数法、天气分类法和天气发生器三种降尺度方法并无严格的界限,在现有统计降尺度模型中,多数均融合了三种方法。

近年来,研究比较不同统计降尺度方法模拟效果的较多,其中大多是对降水和气温降尺度的研究,而有关多元变量同步降尺度研究较少。较早对降水降尺度方法研究是 Wilby 和 Wigley^[15],他们比较了两种 ANNs 模型,两种基于二元马尔可夫过程的 WGS WGEN WG 方法和基于 spell length 方法以及两种基于日湿度值的半随机分类过程对降水进行模拟。Zorita 和 von Storch^[16] 比较分析了相似法、CCA 法、ANNs、线性多元法、分类法等多种方法的模拟效果。Harpham 和 Wilby^[17] 用类似于天气发生器的基于 RBF 和 MLP 法的 ANN 模型,将降水发生概率及降水量分开处理。关于平均气温的降尺度研究也较多。比如 Huth^[18] 比较了 CCA、SVD 和主成分逐步回归等几种线性方法对欧洲中部地区 39 个站点冬季日平均气温的降尺度模拟,Beesead^[19] 比较了 CCA 和 EOFs 两种经验降尺度法对月平均气温的模拟。大多数气温降尺度的研究结果显示平均气温呈增加趋势。虽然降尺度研究方法众多,但模拟效果却不尽人意。Tareghian^[20] 等运用分位数线性回归方法对加拿大 5 个气象站点的降水进行了降尺度研究,结果表明,该方法对夏季降水的模拟效果优于传统回归模型,而对冬季降水的模拟却几乎没有差别。Mehrotra^[21] 等选用一种多站点降尺度模型 (MMM-KDE) 对印度克利须那流域西部的 Malaprabha 子流域的降水进行了降尺度模拟,结果表明,该区域降水在未来时段内没有显著变化,另外,在气候变化的大背景下,季风降水量呈现减少趋势,季风前后降雨均呈现增加趋势,但增加幅度不同。应用降尺度方法进行多个变量的比较研究较少,少数学者如 Dibike 和 Coulibaly^[22] 比较了 SDSM 和随机 WG (LARS-WG) 对加拿大一个流域的降雨和气温的模拟。最新降尺度的研究已延伸到对遥感影像的降尺度。如 Peter M. Atkinson^[23] 和 W. Essa^[24] 等针对遥感影像以及热影像进行的降尺度研究。

国内对统计降尺度方法的研究起步较晚。2005 年范丽军等^[25] 较系统的阐述了统计降尺度和统计-动力相结合的降尺度方法。其后刘永和等^[26] 对统计降尺度方法及其各自的特点和应用价值进行了阐述。朱宏伟等^[27] 则总结了统计降尺度方法在区域气候变化中的应用,并介绍了降尺度在生态预报中的应用。同时越来越多的学者开展了统计降尺度的应用研究:吕海等^[28] 运用主分量分析与逐步回归相结合的统计降尺度方法,估计了中国 562 台站的当前和未来气温变化情景,并与区域气候模式 PRECIS 的模拟结果进行了比

较,结果表明,对于 1 月份未来气候情景,统计降尺度模拟的 B2 情景增温趋势比 A2 明显,即:当前气候条件下统计降尺度明显优于动力降尺度;刘绿柳等^[29]针对气候变化预估常用的 GCM 难以提供区域或更小尺度上可靠的逐日气候要素序列这一问题,应用统计降尺度模型 SDSM 将 HadCM3 的模拟数据(包括 A2、B2 两种情景)处理为具有较高可信度的逐日站点序列,分析了 21 世纪黄河流域上中游地区未来最高气温、最低气温与年降水量的变化,结果显示, A2 情景下,日最高气温、日最低气温的升高趋势较 A1 更为明显, A2 情景下降水量增加和减少的面积基本相等, B2 情景下大部分区域降水减少;赵芳芳等^[30]分析了统计降尺度方法的优缺点及适用性,利用 SDSM 模型生成了黄河源区 7 个站点未来 3 个时段 2011-2040 年, 2041-2071 年, 2071-2100 年的气温变化情景,结果显示,日最低气温、日最高气温均呈升高趋势,但日最低气温变化相对不明显,日最高气温已春、秋季变化最明显,日最低气温以夏、秋季变化最为显著;陈华等^[31]利用主成分分析方法和多元线性回归模型建立大尺度 GCMs 模型的日降水统计降尺度方法,预测和分析了汉江流域未来降水变化,结果显示,相对于 1091-2000 年实测降水量均值,上游 2001-2020 年、2021-2040 年和中游 2001-2020 年的降水量均减少,中游 2021-2040 年及下游降水量均增加;刘兆飞等^[32]利用统计降尺度模型 SDSM 对塔里木河流域未来最高气温和最低气温变化趋势进行了分析,结果显示,研究区域未来日最低气温、日最高气温均成升温趋势, A2 情景下升温幅度普遍比 B2 情景大,两种情景下,最高气温增幅比最低气温达,且夏季变化最大,冬季变化最小;郭靖等^[33]利用 ANN 统计降尺度方法预测 A2 情景下汉江流域为了降水变化,研究发现汉江上游未来降水在 2011-2040 年和 2041-2070 年时期较基准年减少, 2071-2100 年时期则比基准年增加,中游降水在 2011-2040 年较基准年减少, 2041-2070 年和 2071-2100 年较基准年增加,下游未来降水变化趋势不明显;郭家力等^[34]利用基于 ASD 统计降尺度方法预测了 A2 和 B2 排放情景下,鄱阳湖流域未来 100 年内降水变化情况,结果显示鄱阳湖流域大部分区域降水量有所增加;徐宗学、刘浏^[35]运用 SDSM 模型及 PRECIS 模型对太湖流域日降水量和日最高、最低气温进行了降尺度处理,结果显示,两种降尺度方法模拟的未来日最高、日最低气温变化情景均呈显著增加趋势,增幅总体一致,而降水变化情景差异较大,SDSM 模拟的未来降水无明显变化趋势,而 PRECIS 模拟的降水成显著增加趋势,且增幅较大。

3 统计降尺度的不确定性分析

统计降尺度在应用过程中,模拟结果会出现一些不确定性,主要包括:模型输入不确定性和降尺度模型的不确定性。统计降尺度模型的输入大多是 GCM 输出,包括当前情景值及未来情景的预估值,是引起降尺度模拟不确定性的主要来源。原因在于存在对未来大气温室气体的浓度估算不够准确、全球平均辐射强迫的计算值变幅较大、可用于气候研究和模拟的气候系统资料不足、用于预测未来气候变化的气候模式系统不够完善、以及对自然气候变化幅度认识不清楚,导致了气候变化预测的不确定性^[36]。

目前对于 GCM 输出不确定性的研究较多。Graham 等^[37]分析了包括 2 种 GCM 输出在内总共 15 种气候变化模拟的不确定性。Christensen 和 Lettenmaier^[38]利用两种排放情景下,11 个 GCM 输出降尺度得到的气候变化情景驱动小尺度的水文模型,探讨了 GCM 输出的不确定性;Minville 等^[39]运用 5 个 GCM 和两种温室气体排放情景的结合得到的 10 种等权重气候预测结果来对未来水文变量的不确定性分析;Rowell^[40]比较了包括排放情景、GCM、RCM 等在内的不同不确定性来源的影响,结果发现 GCM 不确定性最大。

单纯进行统计降尺度模型的不确定性的研究较少,如 Khan 等^[41]比较了 SDSM、LARS-WG 和 ANN 模型的不确定性。也有将统计降尺度模型不确定性和 GCM 来源不确定性一起分析研究的,如 Wilby 和 Harris^[42]对包括 GCM、排放情景、降尺度技术等不同来源的不确定性做了研究,结果表明:GCM 来源的不确定性最大,降尺度技术紧随其后;Prudhomme 和 Davies^[43]探讨了 3 种 GCM、两种温室气体排放情景和两种降尺度技术对河道流量模拟的不确定性,结果表明 GCMs 的不确定性大于其他两种不确定性;Kay 等^[44]对气候变化对洪水频率影响的不确定性做了分析,包括 GCM、排放情景、降尺度技术等;Deepashree Raje 和 P. P. Mujumdar^[45]对 GCM、气候变化情景以及降尺度的不确定性做了研究;Klemen Berganta 等^[46]对降尺度过程中未来温室气体排放情景、GCM、降尺度过程等引起的累计不确定性做了分析说明;Kazi Farzan Ahmed^[47]等运用 SDBC(Statistical Downscaling and Bias Correction)方法对美国东北部地区的 6 个 GCMs 及 4 个 RCMs 输出的气象数据进行了降尺度分析,结果表明,偏差修正模型对预测极端气候事件的空间分布更为有效,并且动力降尺度与统计降尺度在研究中没有明显差别。气候变化预测的不确定性决定着气候变化的可靠性与精度。因此,提高气候变化预测的精度是以后研究工作的重点之一。

4 前景与展望

经过几十年的发展,统计降尺度已成为气候学中较为完善的领域,也被越来越多的应用于对降水、气温等未来气候情景的预测,但仍有许多方面需进一步改进和完善。首先,降尺度模型的适用条件及范围需进一步研究。降尺度模型多种多样,不同的降尺度模型对同一地区的模拟研究结果往往相差较大,需进一步对降尺度模型进行对比研究,找出其适用的条件或范围。其次,大气环流因子与地面气候要素之间统计关系的时间和空间尺度问题。统计降尺度是建立在假设大气环流因子与地面气候要素统计关系不变的条件之上,而当时间和空间变化时,如何重新建立他们之间的统计关系十分重要。再次,对降水模拟的精度问题。现有大部分研究对气温变量的模拟较为准确,大部分研究模拟的气温均呈现增加趋势,但对降水的模拟效果不理想。虽然对降水的模拟已分为降水概率与降水量,但雨天发生概率及降水量模拟的精度却不尽人意。因此,降水模拟精度有待提高。最后,统计-动力降尺度技术结合问题。统计降尺度与动力降尺度各有其优缺点,两种降尺度结合的方法将是主要发展方向之一。

降尺度方法现已不仅应用于对降水、气温等气象资料,

也应用于遥感影像的降尺度。对未来气候变化的预测研究上,不仅要依靠大尺度的 GCM 输出,更要进一步与较为精确的遥感影像结合,实现超精度结果的输出,以提高未来气候预测的精度。

参考文献(References):

- [1] 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): 6603-6621.
- [2] Fowler H J, Blenkinsop S, Tebaldi C. Linking climate change modeling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling [J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(12): 1547-1578.
- [3] Wilby R L, Dawson C W, Barrow E M. SDSM a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2002, 17: 147-159.
- [4] Wilby R L, Hassan H, Hanaki K. Statistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 205: 1-19.
- [5] Hessami M, Gachon P, Ouarda T, et al. Automated regression based statistical downscaling tool [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2008, 23: 813-834.
- [6] Sailor D J, Li X S. A semi empirical downscaling approach for predicting regional temperature impacts associated with climatic change [J]. *Journal of Climate*, 1999, 12: 103-114.
- [7] Murphy J. Predictions of climate change over Europe using statistical and dynamical downscaling techniques [J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20: 489-501.
- [8] 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.
- [9] Mpelasoka F S, Mullan 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(11): 1415-1433.
- [10] Tolika K, Anagnostopoulou C, Maheras P, et al. Simulation of future changes in extreme rainfall and temperature conditions over the Greek area: A comparison of two statistical downscaling approaches [J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 63: 132-151.
- [11] Wilby R L, Charles S P, Zorita E, et al. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting material of the IPCC. 2004.
- [12] Richardson C W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation [J]. *Water Resources Research*, 1981, 17(1): 182-190.
- [13] Wilks D S. Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies [J]. *Climate Change*, 1992, 22: 67-84.
- [14] Fatichi S, Ivanov V Y, Caporali E. Simulation of future climate scenarios with a weather generator [J]. *Advances in Water Resources*, 2011, 34: 448-467.
- [15] Wilby R L, Wigley T M L. Downscaling of general circulation model output: a review of methods and limitations [J]. *Progress in Physical Geography*, 1997, 21: 530-548.
- [16] Zorita E, von Storch H. The analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated method [J]. *Journal of Climate*, 1999, 12: 2474-2489.
- [17] Harham C, Wilby R L. Multi site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 312: 235-255.
- [18] Huth R. Statistical downscaling in central Europe: evaluation of methods and potential predictors [J]. *Climate research*, 1999, 13: 91-101.
- [19] Benestad R E. A comparison between two empirical downscaling strategies [J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21: 1645-1668.
- [20] Reza Tareghian, Peter F. Rasmusen. Statistical downscaling of Precipitation using Quantile Regression [J]. *Journal of Hydrology*, 2013.
- [21] R. Mehrotra, Ashish Sharma, D. Nagesh Kumar, et al. Assessing future rainfall projections using multiple GCMs and a multi site stochastic downscaling model [J]. *Journal of Hydrology*, 2013.
- [22] Dibike Y B, Coulibaly P. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 307: 145-163.
- [23] Peter M. Atkinson. Downscaling in remote sensing [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013, (22): 106-114.
- [24] W. Essa, J. van der Kwast. B. Verbeiren, et al. Downscaling of thermal images over urban areas using the land surface temperature impervious percentage relationship [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013, (23): 95-108.
- [25] 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. (FAN Lijun, FU Congbin, CHEN Deliang. Review on Creating Future Climate Change Scenarios by Statistical Downscaling Techniques [J]. *Advance in Earth Science*. 2005, 20(3): 320-329. (in Chinese))
- [26] 刘永和, 郭维栋, 冯锦明, 等. 气象资料的统计降尺度方法综述 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(8): 837-847. (LIU Yonghe, GUO Weidong, FENG Jinming, et al. A Summary of Methods for Statistical Downscaling of Meteorological Data [J]. *Advance in Earth Science*. 2011, 26(8): 837-847. (in Chinese))
- [27] 朱宏伟, 杨森, 赵旭喆, 等. 区域气候变化统计降尺度研究进展 [J]. *生态学报*, 2011, 31(9): 2602-2609. (ZHU Hongwei, YANG Sen, ZHAO Xuzhe, et al. Recent Advances on Regional Climate Change by Statistical Downscaling Methods [J]. *Acta Ecologica Sinica*. 2011, 31(9), 2602-2609. (in Chinese))
- [28] 吕海, 龚振彬, 倪雷. 统计降尺度法在我国未来区域气温变化预测中的应用研究 [J]. *现代商贸工业*, 2007, 19(6): 190-191. (LV Hai, GONG Zhenbin, NI Lei. Application of Statistical Downscaling Method in Prediction of Future Region Temperature

- ture Change in China [J]. *Modern Business Trade Industry*, 2007, 19(6): 190-191. (in Chinese)
- [29] 刘绿柳, 刘兆飞, 徐宗学. 21 世纪黄河流域上中游地区气候变化趋势分析 [J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(3): 167-172. (LIU Lvliu, LIU Zhaofei, XU Zongxue. Trends of Climate Change for the Upper Middle Reaches of the Yellow River in the 21st Century [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(3): 167-172. (in Chinese))
- [30] 赵芳芳, 徐宗学. 黄河源区未来地面气温变化的统计降尺度分析 [J]. *高原气象*, 2008, 27(1): 153-161. (ZHAO Fangfang, XU Zongxue. Statistical Downscaling of Future Temperature Change in Source of the Yellow River Basin [J]. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(1): 153-161. (in Chinese))
- [31] 陈华, 郭靖, 郭生练, 等. 应用统计学降尺度方法预测汉江流域降水变化 [J]. *人民长江*, 2008, 39(14): 53-55. (CHEN Hua, GUO Jing, GUO Shenglian, et al. Application of Statistical Downscaling Method in Precipitation Prediction for the Hanjiang River Basin [J]. *Yangtze River*, 2008, 39(14): 53-55. (in Chinese))
- [32] 刘兆飞, 徐宗学, 刘绿柳, 等. 塔里木河流域未来最高和最低气温变化趋势 [J]. *干旱区地理*, 2008, 31(6): 822-829. (LIU Zhaofei, XU Zongxue, LIU Lvliu, et al. Temporal Trends of Future Maximum and Minimum Air Temperature in the Tarim River Basin. [J] *Arid Land Geography*, 2008, 31(6): 822-829. (in Chinese))
- [33] 郭靖, 郭生练, 陈华, 等. ANN 统计降尺度法对汉江流域降水变化预测 [J]. *武汉大学学报 (工学版)*, 2010(2): 148-152. (GUO Jing, GUO Shenglian, CHEN Hua, et al. Prediction of Changes of Precipitation in Hanjiang River Basin Using Statistical Downscaling Method Based on ANN [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2010(2): 148-152. (in Chinese))
- [34] 郭家力, 郭生练, 郭靖, 等. 鄱阳湖流域未来降水变化预测分析 [J]. *江科学院院报*, 2010, (8): 20-24. (GUO Jiali, GUO Shenglian, GUO Jing, et al. Prediction of Precipitation Change in Poyang Lake Basin [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, (8): 20-24. (in Chinese))
- [35] 徐宗学, 刘浏. 太湖流域气候变化检测与未来气候变化情景预估 [J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(1): 1-7. (XU Zongxue, LIU liu. Detection of Climate Change and Projection of Future Climate Scenarios in Taihu Lake Basin [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(1): 1-7. (in Chinese))
- [36] 秦大河. 中国气候与环境演变 (上卷): 气候与环境的演变及预测 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 45-47. (QIN Dàhé. Climate and Environment Changes in China (Volume 1): Climate and Environment Changes and Prediction [M]. Beijing: Science Press, 2005: 45-47. (in Chinese))
- [37] Graham L P, Andreasson J, Carlsson B. Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods a case study on the Lule River basin [J]. *Climatic Change*, 2007, 81: 293-307.
- [38] Christensen N S, Lettenmaier D P. A multi-model ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River basin [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(4): 1417-1434.
- [39] Minville M, Brissette F, Leconte R. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a Nordic watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 358: 70-83.
- [40] Rowell D P. A demonstration of the uncertainty in projections of UK climate change resulting from regional model formulation [J]. *Climatic Change*, 2006, 79: 243-257.
- [41] Khan M S, Coulibaly P, Dibike Y. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods [J]. *Journal of Hydrology*, 319: 357-382.
- [42] Wilby R L, Harris I. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*, 2006, 42, W02419. doi: 10.1029/2005WR004065.
- [43] Prudhomme C, Davies H. Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: future climate [J]. *Climatic Change*, 2009, 93: 197-222.
- [44] Kay A L, Davies H N, Bell V A, Jones R G. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England [J]. *Climatic Change*, 2009, 92: 41-63.
- [45] Deepashree Raje, P. P. Mujumdar. Hydrologic drought prediction under climate change: Uncertainty modeling with Dempster-Shafer and Bayesian approaches [J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33: 1176-1186
- [46] Klemen Bergant, Lučka Kajfčič Bogataj and Stanislav Trdan. Uncertainties in modeling of climate change impact in future: An example of onion thrips (*Thrips Tabaci* Lindeman) in Slovenia [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 94: 244-255.
- [47] Kazi Farzan Ahmed, Guiling Wang, John Silander, et al. Statistical downscaling and bias correction of climate model change impact assessment in the U. S. northeast. [J] *Global and Planetary Change*, 2013, (10): 320-332.