

# GCM 降尺度预测泾河流域未来降水变化

赵 姹<sup>1</sup>, 李 志<sup>1</sup>, 刘文兆<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

(2. 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**利用统计降尺度模型 SDSM 确定预报因子, 建立预报量与预报因子之间的统计关系, 用独立的观测资料验证模型, 并将其应用于 HadCM3 在 A2 和 B2 两种排放情景下的输出生成未来气候变化情景, 预测了泾河流域未来 3 个时段(2020s, 2050s, 2080s)的降水变化, 以期为流域未来气候变化情景的构建及当地农业的可持续发展提供参考依据。结果表明, 泾河流域未来年降水量呈不显著的减少趋势且存在一定的季节差异。夏季降水减少趋势最明显, 减幅随时间的推移逐渐增大; 冬季呈现微弱增加趋势; 春季与秋季变化趋势类似, 均有增有减, 减少的时期较增加的时期多。流域降水变化的空间差异大体呈现由东南部向西北部减小的趋势。

**关键词:**泾河流域; 气候变化; 降水量; 统计降尺度; 情景分析

**中图分类号:** P468.0<sup>+</sup>24

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2014)01-0023-06

## Downscaling GCMs to Project the Potential Changes of Precipitation in Jinghe Basin

ZHAO Cha<sup>1</sup>, LI Zhi<sup>1</sup>, LIU Wen-zhao<sup>2</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to predict the future precipitation change to improve the construction of the future climate change scenario and sustainable development of local agriculture, we built the statistical relationship between large-scale climatic elements and precipitation variables, identified predictor variables used in the model, then tested the model reliability by applying independent observation data, applied previous statistical relation to the output of A2 and B2 emission scenarios of HadCM3, and to predict future precipitation change in the Jinghe Basin at last. Results show that future precipitation of Jinghe Basin will be bound to reduce; however, there was no significant difference compared with base period (1961—1990). There were some seasonal differences. The decreasing trend of summer precipitation was obvious, and the change increased gradually over time. Winter precipitation increased weakly. The precipitation change trend of spring was similar to the trend of autumn, and reductive months were more than increased months. There was spatial difference in precipitation change of watershed. The increase reduced from the southeast to the northwest part of the basin. It was shown that the future precipitation spatial difference would be larger.

**Key words:** Jinghe Watershed; climate change; precipitation; statistical downscaling; scenario analysis

气候变化对人类生存环境、经济发展和社会进步有着深远影响, 因此成为各领域的研究热点和重点。随着气候变暖, 干旱半干旱地区的降水和水资源将进一步减少<sup>[1]</sup>, 所以定性定量地研究未来气候变化对于

旱区水资源的影响成为亟待解决的问题。

少部分研究对泾河流域降水量进行了分析。董彦雄等<sup>[2]</sup>采用数理统计方法分析了泾河流域 11 个气象站 1960—2000 年的降水资料, 得出了流域各季节

降水年代际的变化规律和空间分布情况。李志等<sup>[3]</sup>基于 Mann-Kendall 和小波分析等方法分析了泾河流域 1965—2005 年极端降水事件的变化趋势,发现流域极端降水时间的整体变化趋势不显著,但其发生频率和强度等都可能呈上升趋势,且存在空间差异。曹颖等<sup>[4]</sup>通过 5 个大气环流模式在 A2 和 B2 两种情景下对泾河流域未来 3 个时期(2020s,2050s,2080s)的降水进行了模拟,各模式模拟结果与 1961—2006 年平均值相比有所增加。目前在全球气候变化显著<sup>[5]</sup>的背景下,鲜有研究基于大气环流模式(GCM)对泾河流域的降水量进行降尺度预测分析。由于泾河流域处于夏季风影响的边缘地带,降水波动较大,对该区降水量的预测对于提出应对气候变化的措施具有一定的指导意义。

GCM 是目前进行气候预测的主要手段,能较好地模拟大尺度气候信息最重要的平均特征,特别是高层大气场,近地面温度和大气环流<sup>[6]</sup>。基于 GCM 输出生成的未来气候变化情景已广泛应用于气候变化对水文水资源的影响研究<sup>[7-13]</sup>,但由于分辨率低,模拟降水和地表温度的误差在区域尺度上比大尺度更显著<sup>[14-17]</sup>,因此,非常有必要将 GCM 信息通过降尺度转移到区域尺度<sup>[18-20]</sup>。目前常用的降尺度方法主要有动力降尺度和统计降尺度<sup>[18]</sup>两种技术。统计降尺度能够将 GCM 输出中物理意义较好、模拟较准确的气候信息应用于统计模式,从而减小 GCM 的系统误差,且无需考虑边界条件对预测结果的影响,较动力降尺度计算量小,省机时,但需足够的观测资料建立统计关系,且不能应用于大尺度气候要素与区域气候要素相关不明显的地区。统计降尺度方法简单易行,效果较好,应用广泛<sup>[18,20]</sup>。

本文以泾河流域为研究区,对 HadCM3 在 A2 和 B2 情景下输出的降水量进行降尺度处理,生成流域各气象站点 2020s(2011—2040 年)、2050s(2041—2070 年)和 2080s(2071—2099 年)的降水序列,分析该区 21 世纪降水变化趋势,旨在为当地开展气候变化的水文响应研究和气候变化的适应性研究提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况及方法

泾河流域地处黄土高原中部(图 1),绝大部分属于陇东黄土高原,流经陕甘宁 3 省(区)31 个县(市)。流域面积 45 421 km<sup>2</sup>,水土流失面积 33 220 km<sup>2</sup>,占流域面积的 73.14%。流域为典型的温带大陆性气

候,处于半湿润—半干旱过渡地带,冬季干旱少雨,夏季多暴雨<sup>[4]</sup>。温度南高北低,降水南多北少。流域年平均温度为 8~13℃,年平均降水量为 350~600 mm,主要集中于夏、秋汛期季节的 5—9 月。泾河流域是世界上水土流失最严重的地区之一,80%以上的土地面临水土流失。

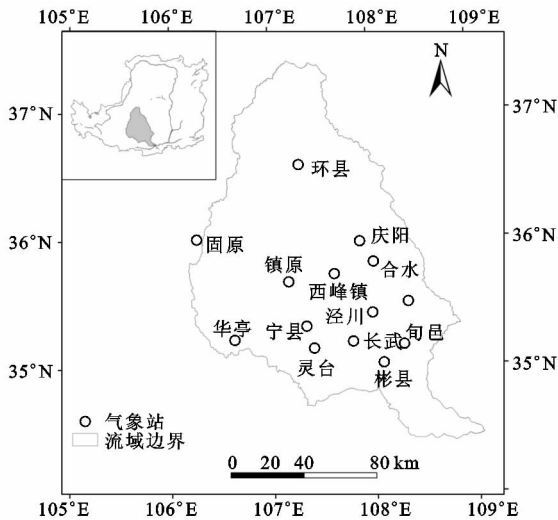


图 1 泾河流域位置及气象站点分布

研究需要 3 类数据:站点实测降水数据、NCEP 再分析资料和 GCM 模拟的当前和未来气候条件下的输出数据。实测资料来自中国国家气象局,流域站点分布情况见图 1。研究中需要借助反映实际气候状况的再分析资料,由美国环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)联合提供,时段与实测数据同期,包括平均海平面气压、地表平均气温、比湿、相对湿度等。有研究表明,英国 Hadley 中心的海气耦合模式(HadCM3)对东亚地区模拟效果较好<sup>[21-22]</sup>,因此本研究在 GCM 模式上选择 HadCM3,同时基于泾河流域快速发展的趋势,选择政府间气候变化专门委员会(IPCC)在 2000 年温室气体排放情景特别报告(SRES)<sup>[23]</sup>中提出的 A2(高温室气体排放情景)和 B2(低温室气体排放情景)两种情景。GCM 采用 HadCM3 在 A2 和 B2 排放情景下的数据,包括两个时段:1961—2000 年和 2011—2099 年,前段数据用于模型的校准和验证,后段数据用于未来降水预测。

### 1.2 降水的降尺度方法

基于 SDSM (Statistical Downscaling Model, Version 4.2)对未来降水进行预测。由于西北地区降水严重偏离正态分布<sup>[24]</sup>,故在模型中采用四次方根法将原有数据转化为正态分布后再进行降尺度处理。具体操作包括 5 个步骤:预报因子的选择、统计降尺度模型的选择和率定、利用独立的观测资料检验

模型、将模型应用于 GCM 输出产生未来气候情景、分析未来气候情景<sup>[6]</sup>。其中:

(1) 选择预报因子。选择日降水量作为预报量,从 NCEP 再分析资料提供的 26 个大气环流因子中,通过偏相关系数、校准和验证效果等选择最佳预报因子组合。

(2) 校准与验证模型。使用泾河流域 1961—1980 年实测降水数据与 NCEP 再分析数据建立统计关系校准模型。将建立的统计关系应用于 1981—2000 年的 NCEP 再分析数据,生成预报量在该时段的日序列,与实测数据进行比较,来评估降尺度模型的效果。

(3) 生成未来降水情景。针对未来 3 个时段(2020s,2050s,2080s),将 HadCM3 在 A2 和 B2 情景下的输出输入 SDSM 建立的统计模型中,生成各个站点的未来降水日序列数据,对未来降水变化趋势进行分析。

按步骤对每个站点和月份进行重复操作,即可得到每个站点及全流域的降水变化趋势预测结果。

1.3 数据分析方法

使用解释方差,标准误差和决定系数分析统计模型的校准和验证效果,同时辅以图表。使用  $t$  检验( $\alpha=0.05$ )分析未来降水变化的显著性,比较其与基准期降水差异的显著程度。基于降尺度预测的数据分析泾河流域的降水变化时,使用站点平均值。使用反距离权重插值法分析未来降水趋势变化的空间分布。

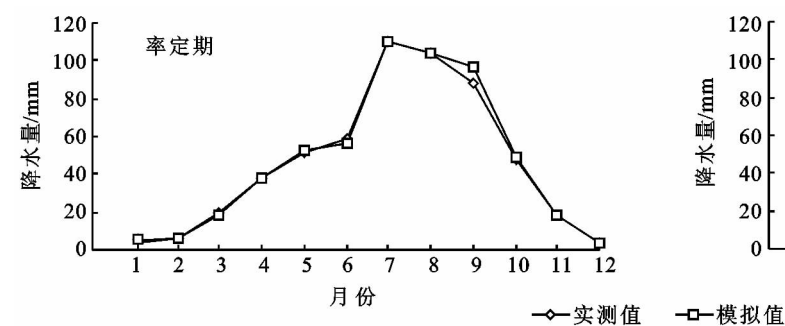


图 2 泾河流域率定期及验证期降水量实测值与模拟值比较

以上结果表明,SDSM 模型在泾河流域具有较好的适用性,降尺度效果良好,用于预测泾河流域未来降水的变化是可行的,生成的未来气候变化情景比较可靠。

2.2 未来降水的时间变化趋势

应用率定的统计降尺度模型对 HadCM3 在 A2 和 B2 两种气候情景下输出的泾河流域降水量进行降尺度处理,分别生成泾河流域未来降水序列。图 3 给出了泾河流域 1961—2099 年 A2 和 B2 两种排放情景下的年降水量变化。将未来 90 a 分为 3 个时期进

2 结果与分析

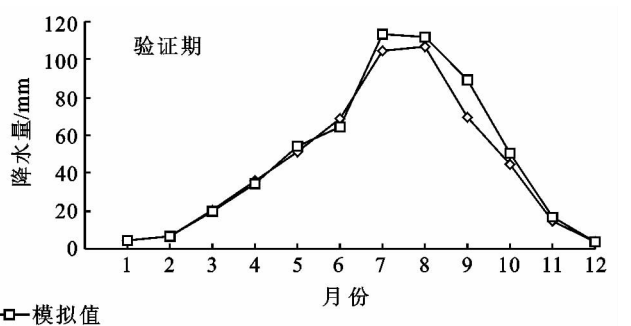
2.1 SDSM 降尺度效果评估

模型的解释方差表征预报量与大尺度预报因子间相关性的 大小。由表 1 可以看出,所有站点的解释方差均较小,这主要是因为降尺度过程中选择的预报因子存在很大的不确定性,且降水过程比较复杂,受到多方面因素的影响。同时从表 1 中还可以看到所有站点标准误差均小于 0.4 mm,表明本研究在泾河流域建立的模型具有一定的可靠性。

表 1 率定期 1961—1980 年的解释方差和标准误差

站点	解释方差	标准误差/mm	站点	解释方差	标准误差/mm
彬县	0.199	0.398	宁县	0.262	0.388
固原	0.162	0.361	庆阳	0.259	0.384
合水	0.253	0.383	西峰	0.257	0.376
华亭	0.200	0.389	旬邑	0.203	0.392
环县	0.243	0.368	长武	0.217	0.386
泾川	0.255	0.376	镇原	0.243	0.379
灵台	0.279	0.388	正宁	0.228	0.390

由泾河流域的降水序列率定期及验证期实测值和 NCEP 再分析模拟值的吻合程度(图 2)可以看出,在率定期和验证期内,泾河流域降水量的实测值和模拟值拟合较好。线性回归的斜率和决定系数均接近 1 而截距接近 0(率定期  $R^2=0.995\ 6$ ,验证期  $R^2=0.98$ )。



行研究,与 1961—1990 年(WMO 推荐)进行对比。由图 3 可以看出,年降水量在 21 世纪总体上处于逐渐减少的趋势。两种情景下预测的年降水量变化趋势相似,基准期(1960—1990 年)以后,2020s 在 B2 情景下流域未来降水的减少程度总体上超过 A2 情景,而 2050s 和 2080s 则相反。对未来 3 个时期降水量与基准期降水量进行  $t$  检验,结果显示差异不显著,表明无论哪种情景下,泾河流域降水量在未来若干年内的减少趋势不可避免,但相对于基准期而言,未来降水量的减幅不明显。

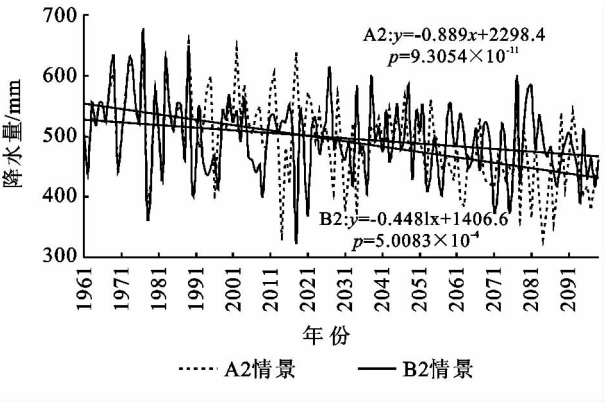
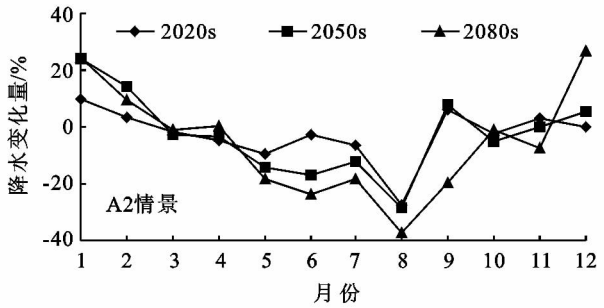


图 3 泾河流域 1961—2099 年 A2、B2 两种排放情景下的降水量变化

由未来 3 个时期降水量相较于基准期的变化(图 4)可以看出,泾河流域未来 3 个时期降水变化具有明



显的季节差异。与基准期相比,A2 和 B2 两种情景下未来 3 个时期的降水皆呈减少趋势。各站点未来夏季降水减少趋势最明显,A2 情景和 B2 情景下减幅均随着时间的推移逐渐加大。冬季降水呈现微弱的增加趋势,春季降水量有增有减,减少的时期较增加的时期多,其中减少最多的是 A2 情景下 2080s,增加最多的为 B2 情景下的 2050s。秋季降水与春季降水变化趋势类似,其中 A2 情景下的 2080s 减少量最多,A2 情景下的 2020s 增加量最多。

未来大部分时期降水峰值出现的月份由 8 月份推迟至 9 月份。A2 情景下,降水量峰值从 2020s 到 2080s 逐渐降低,B2 情景下,峰值从 2020s 到 2080s 先减少,后增加。

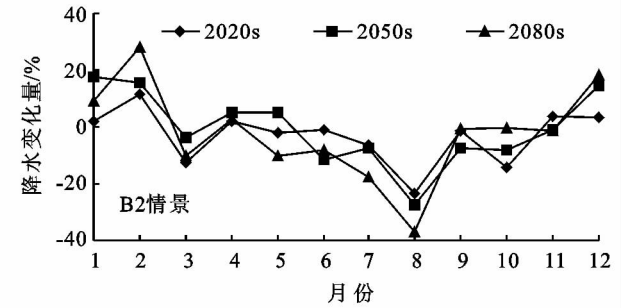


图 4 泾河流域未来 3 个时期的降水量相较于基准期的变化情景

2.3 未来降水变化的空间分布

泾河流域降水量在未来 3 个时期和两种情景下的空间分布类似,2080s 降水变化的空间分布如图 5 所示。整体而言,未来时期年降水量在泾河流域呈减

少趋势。年降水量减幅由流域东南部向西北部递减。A2 情景下减幅比 B2 大。泾河流域未来降水量的区域差异将随时间推移不断增大。

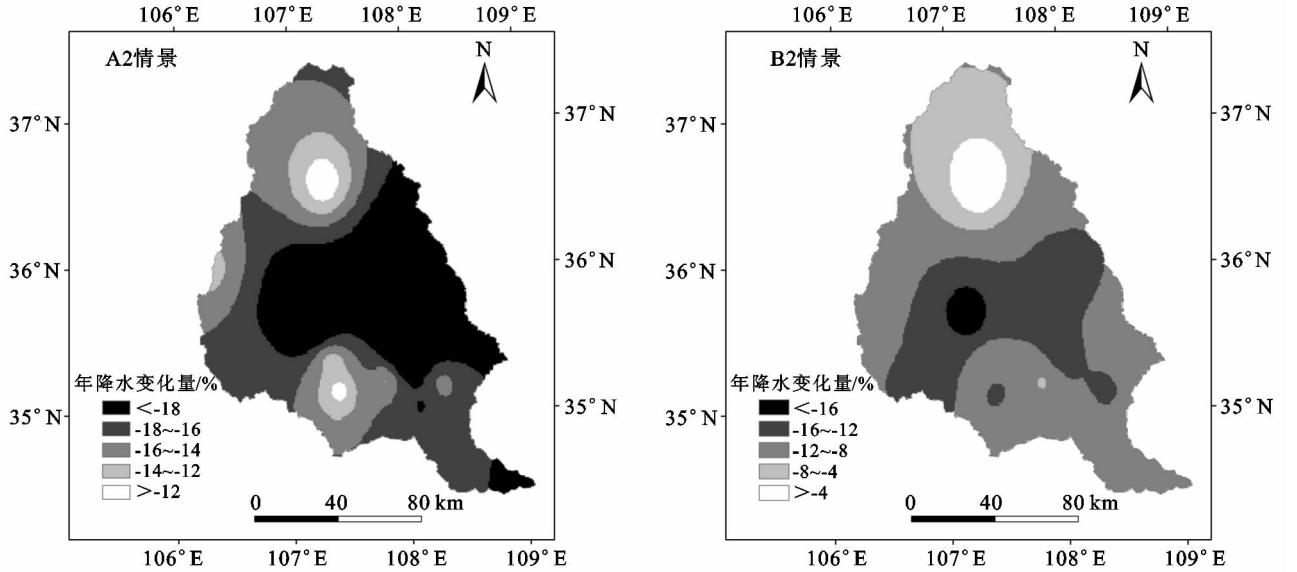


图 5 A2 和 B2 情景下泾河流域 2080s 年降水量的空间分布

3 讨论

泾河流域未来降水量呈微弱减少趋势,与黄河流域上中游未来降水量变化趋势相似<sup>[25]</sup>,与全国降水

量总体变化趋势不一致<sup>[26]</sup>,说明泾河流域未来降水量在受全球变化影响的背景下,具有一定的区域性特征。本研究与曹颖等<sup>[4]</sup>对泾河流域未来降水预测得到的结论不一致,可能是由于未来气候变化的不确定

性及预测方法的不同造成的。Delta 方法和 SDSM 统计降尺度方法模拟生成的气候情景存在一定的差异。Delta 方法生成未来降雨情景时,处于同一个 GCM 网格内的气象站采用同一变化比例,而本研究各气象站的变化比例均不相同。同时曹颖等采用的是 5 个 GCM 模式,而本研究只采用 HadCM3 这一大气环流模式,因此在结论上有所出入。本研究的结论虽为下降趋势,但趋势并不显著。

研究中存在一定不确定性。气候预测及影响评价中不确定性主要来自 GCM。为此,通常使用多个 GCM 来尽量减少此方面的不确定性。由于数据可得性,本研究只采用了 HadCM3 这一模式,不能与其他 GCM 和排放情景的结果进行比较。但由于 HadCM3 在中国具有较好的适用性,可在一定程度上降低此种不确定性。

目前,高分辨率的 GCM 实际上已经接近某些区域气候模式(RCM)的分辨率,气候模式分辨率的发展是否能提高统计降尺度的可靠性,以及提高到怎样的程度,还有待研究<sup>[27]</sup>。

降尺度方法也是产生气候预测不确定性的一个重要来源。SDSM 是基于预报量与预报因子之间的关系恒定不变的假设,然而年际间的降水变率非常大,这是 SDSM 一个潜在的缺陷。SDSM 模型中所用的预报因子变量没有包含地形因素<sup>[28]</sup>,同时由于目前无法得知未来气候下站点之间的相关结构及其变化,因此,SDSM 是分析小尺度下未来气候变化的一种较为简单、经济的方法。

仅通过分析降水的变化趋势还难以确定流域水资源时空分布,还应该通过气候水文模型的模拟预估,进一步研究流域的水资源变化,才能得出较为明确的结论,从而提出更全面的应对与适应气候变化的措施<sup>[25]</sup>。

## 4 结论

本文应用 SDSM 统计降尺度模型对泾河流域未来的降水量进行模拟,取得了较好的效果。对 HadCM3 的 A2、B2 情景下泾河流域未来的降水量变化趋势进行预测,结果表明:

与基准期相比,泾河流域未来 3 个时期降水量在 A2 和 B2 两种排放情景下变化总体上呈不显著的减少趋势,两种情景下预测的年降水量变化趋势相似。流域未来 3 个时期(2020s,2050s,2080s)降水量与基准期(1960—1990 年)相比,A2 和 B2 情景减幅均随着时间的推移逐渐增大。各站点未来夏季降水量减幅最明显;冬季降水量呈现微弱的增加趋势;春季降

水量与秋季降水变化趋势类似,均有增有减,减少的时期较增加的时期多。未来大部分时期降水量最大月份从 8 月份推迟至 9 月份,8 月份的降水明显减少。未来降水量减幅在 A2 和 B2 情景下大体呈现出由流域东南向西北逐渐减少的趋势。

### 参考文献:

- [1] Dai A, Trenberth K E, Qian T A. A global dataset of palmer drought severity index for 1870—2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming [J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5 (6): 1117-1130.
- [2] 董彦雄,马鹏里,白虎志,等. 泾河流域近 60 年降水演变规律[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(3):154-159.
- [3] 李志,刘文兆,郑粉莉. 1965 年至 2005 年泾河流域极端降水事件的变化趋势分析[J]. 资源科学,2010,32(8): 1527-1532.
- [4] 曹颖,张光辉,罗榕婷. 全球气候变化对泾河流域径流和输沙量的潜在影响[J]. 中国水土保持科学,2010,8(2): 30-35.
- [5] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press,2007.
- [6] 范丽军. 统计降尺度方法的研究及其对中国未来区域气候情景的预估[D]. 北京:中国科学院研究生院大气物理研究所,2006.
- [7] Arnell N W. Climate change and global water resources [J]. Global Environmental Change,1999,9(S1):31-49.
- [8] Varis O, Kajander T, Lemmelä R. Climate and water: from climate models to water resources management and vice versa [J]. Climate Change,2004,66(3):321-344.
- [9] Wilby R L, Whitehead P G, A J Wade, et al. Integrated modelling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet, UK [J]. Journal of Hydrology,2006,330(1):204-220.
- [10] 刘春葵. 气候变化对我国水文水资源的可能影响[J]. 水科学进展,1997,8(3):220-225.
- [11] 吴金栋,王馥棠. 气候变化情景生成技术研究综述[J]. 气象,1998,24(2):3-8.
- [12] 王国庆,王云璋,康玲玲. 黄河上中游径流对气候变化的敏感性分析[J]. 应用气象学报,2002,13(1):117-121.
- [13] XU C Y. From GCMs to river flow: A review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches[J]. Progress in Physical Geography,1999,23(2): 229-249.

- [14] Houghton J T. Climate Change 1995: The Science of Climate Change Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [15] Robock A, Turco R P, Harwell M A, et al. Use of general circulation model output in the creation of climate change scenarios for impact analysis [J]. Climatic Change, 1993, 23(4): 293-335.
- [16] Randall D A, Wood R A, Bony S, et al. Climate Models and Their Evaluation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [17] 刘浏, 徐宗学, 黄俊雄. 2 种降尺度方法在太湖流域的应用对比[J]. 气象科学, 2011, 31(2): 160-169.
- [18] 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-Atmospheres, 1999, 104(D6): 6603-6621.
- [19] Willby R L, Wigley T M L. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations [J]. Progress in Physical Geography, 1997, 21(4): 530-548.
- [20] 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.
- [21] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 近 30 年人类活动对东亚地区气候变化影响的检测与评估[J]. 应用气象学报, 2002, 13(5): 513-525.
- [22] 施小英, 徐祥德, 徐影. 中国 600 个站气温和 IPCC 模式产品气温的比较[J]. 气象, 2005, 31(7): 49-53.
- [23] IPCC. Emissions Scenarios, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [24] 曹杰, 陶云. 中国的降水量符合正态分布吗[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 115-120.
- [25] 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.
- [26] 丁一汇, 任国玉, 石广玉. 气候变化国家评估(D): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [27] Chen J, Brissette F P, Lalonde R. Coupling statistical and dynamical methods for spatial downscaling of precipitation [J]. Climatic Change, 2012, 114(3/4): 509-526.
- [28] 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.

(上接第 22 页)

- [11] 刘黎明, 林培. 黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀定量方法与模型的研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 73-79.
- [12] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
- [13] 李婷, 张世熔, 廖明辉, 等. 基于 3S 和 USLE 的沱江流域中游土壤侵蚀定量评价[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 24-27.
- [14] Wischmeier W, Smith D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]// Agriculture Handbook No. 537. Washington D C: United States Department of Agriculture, 1978.
- [15] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 706-708.
- [16] 张旭群, 陈耀强, 陈浩昆, 等. 基于 GIS 和 RUSLE 的粤东黄冈河流域土壤侵蚀评估[J]. 中国水土保持, 2013(2): 34-37.
- [17] 李天宏, 郑丽娜. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1164-1175.
- [18] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算: 以江西省泰和县灌溪乡为例[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62-68.
- [19] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 (SL190—2007)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [20] 秦伟, 朱清科, 张岩. 基于 GIS 和 RUSLE 的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 157-163.
- [21] 王思远, 王光谦, 陈志祥. 黄河流域土地利用与土壤侵蚀的耦合关系[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(1): 32-37.