

# Impact of Climate Change on Runoff in the Wei River Basin, China\*

Depeng Zuo, Zongxue Xu<sup>#</sup>, Jie Zhao, Xiaojing Yang

Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education,  
College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing  
Email: dpzuo@bnu.edu.cn, <sup>#</sup>zxxu@bnu.edu.cn

Received: Sep. 30<sup>th</sup>, 2013; revised: Nov. 20<sup>th</sup>, 2013; accepted: Nov. 26<sup>th</sup>, 2013

**Abstract:** In this study, Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was selected to set up a hydrological model in the Wei River basin (WRB), calibrated and validated with Sequential Uncertainty Fitting program (SUFI-2) based on river discharge, then future daily precipitation, maximum and minimum air temperature data series at each station, generated by the Statistical Downscaling Method (SDSM), were inputted to drive the SWAT model for analyzing the spatiotemporal characteristics of runoff during the future periods (2046-2065 and 2081-2100) under three climate scenarios including CSIRO, INM and MRI. Two emission scenarios (SRES A2 and SRES B1) were also included. The results show that average values of mean annual runoff in the periods of 2046-2065 and 2081-2100 were  $80.4 \times 10^8 \text{ m}^3$  and  $104.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ , which were greater than runoff in the base period by 12.4% and 45%, respectively. In both of the future periods, low flows would be much lower, while high flows tend to be much higher than that in the base period. In other words, there would be more extreme events (droughts and floods) in the future. For the spatial distribution of runoff over the WRB, it showed consistency for runoff changes under most combined scenarios, with runoff decreased at some areas of upstream and the upstream of Beiluo River, while increased at mid-lower stream of the WRB.

**Keywords:** Climate Change; Runoff; SWAT; GCMs; Wei River

## 气候变化对渭河流域径流的影响\*

左德鹏, 徐宗学<sup>#</sup>, 赵捷, 杨晓静

北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京  
Email: dpzuo@bnu.edu.cn, <sup>#</sup>zxxu@bnu.edu.cn

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2013年11月20日; 录用日期: 2013年11月26日

**摘要:** 本文采用 GCMs 和水文模型耦合的方式, 基于 SWAT 在渭河流域构建分布式水文模型, 并采用 SUFI-2 算法进行参数敏感性分析、参数率定、模型验证以及不确定性分析, 从而对渭河流域 1961~2008 年的径流过程进行模拟。然后将 GCMs 降尺度生成不同情景下降水、最高、最低气温日序列输入 SWAT 模型, 模拟流域未来径流量, 从而分析未来不同气候变化条件下流域径流可能的变化。研究表明: 2046~2065 和 2081~2100 时期不同情景下流域多年平均径流量分别为 80.4 与 104.3 亿  $\text{m}^3$ , 较基准期增加 12.4% 和 45%。未来两个时期, 枯季流量较基准期更低, 而洪峰流量则将较基准期更高, 即流域内极端事件(干旱与洪水)在未来两个时期有加剧趋势。不同情景下渭河流域径流深空间变化较为一致, 即上游部分子流域和北洛河上游地区径流量较基准期有所减少, 而流域中下游地区径流量均呈一定的增加趋势。

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51309010, 51279005); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013NT46)。

作者简介: 左德鹏(1985-), 男, 宁夏石嘴山人, 讲师, 主要从事生态水文方面研究。

<sup>#</sup>通讯作者。

**关键词:** 气候变化; 径流; SWAT; GCMs; 渭河

## 1. 引言

许多学者研究表明, 人类活动对黄河流域水资源锐减的影响非常显著, 如水土保持工程建设、水库和灌溉设施等<sup>[1,2]</sup>。然而, 气候变化在黄河流域径流变化过程中也起到了至关重要的作用, 如降水的减少, 气温的增加等<sup>[3]</sup>。水文循环作为联结大气圈和生物圈的重要纽带, 必然受到由气候变化引起的降水时空分布、强度和总量的变化、蒸散发以及土壤水等变化的影响<sup>[4]</sup>。全球气候变化对环境、生态和社会经济具有深远的影响, 对于现在及未来的水资源规划和管理而言, 研究径流对气候变化的响应至关重要<sup>[5]</sup>。

渭河是黄河第一大支流, 涉及甘肃、宁夏、陕西三省区, 是关中平原主要供水水源地, 也是我国西部地区经济中心。渭河在黄河治理开发中占有重要地位, 同时作为西北经济发达地区, 在区域经济发展和西部大开发中也具有重要作用和战略意义。因此, 研究渭河流域气候变化对保护和改善我国西部地区生态环境、高效合理利用水资源以及维护河流生态系统健康等具有重要意义<sup>[6]</sup>。

目前评估气候变化的水文响应基本都遵从“未来气候情景设计 - 水文模拟 - 影响研究”模式。由于GCMs能提供未来气候变化更为可靠的信息, 且水文模拟能获得更详细的水文变化过程, 因此将GCMs和水文模型相耦合的方法被认为是最有效评估气候变化对水文水资源影响的方法<sup>[7]</sup>。尽管拥有更精细分辨率的分布式水文模型与GCMs在时间和空间上本并不兼容, 但统计降尺度方法通过将GCMs模拟的大尺度气候特征与区域/站点气候变量建立经验统计关系, 从而为这两种不同尺度的模式建立连接<sup>[8]</sup>。

本文采用GCMs和水文模型耦合的方式评估未来气候变化情景的水文响应, 在渭河流域建立GCMs输出数据 - 统计降尺度方法 - 分布式水文模型单向连接系统。首先通过统计降尺度方法将GCMs输出数据生成未来气候情景数据; 然后基于基准期径流数据率定并验证分布式水文模型SWAT; 最后基于未来气候情景数据驱动SWAT模型预估未来气候变化条件下渭河流域水文变化趋势, 以期为水资源管理部门提供参考依据。

## 2. 研究区概况

渭河(图1)是黄河第一大支流, 发源于甘肃省渭源县鸟鼠山, 流经甘肃、宁夏、陕西三省区, 在陕西省潼关县注入黄河。流域总面积13.48万 $\text{km}^2$ , 位于 $104^{\circ}00'E\sim 110^{\circ}20'E$ ,  $33^{\circ}50'N\sim 37^{\circ}18'N$ 之间, 三省区分别占44.1%, 5.8%和50.1%, 干流全长818 km。流域西高东低, 北部为黄土高原, 南部为秦岭山脉。渭河两岸支流众多, 其中泾河是渭河最大支流, 河长455.1 km, 流域面积4.54万 $\text{km}^2$ , 占流域总面积33.7%。北洛河为渭河第二大支流, 河长680 km, 流域面积2.69万 $\text{km}^2$ , 占流域总面积20%。渭河流域地处干旱和湿润地区过渡地带, 属大陆性季风气候, 冬季干燥寒冷, 降水稀少; 夏季炎热多雨。多年平均气温 $7.8^{\circ}\text{C}\sim 13.5^{\circ}\text{C}$ , 降水量400~800 mm, 水面蒸发量660~1600 mm, 陆地蒸发量500 mm左右<sup>[9]</sup>。

## 3. SWAT模型径流分布式模拟

### 3.1. 分布式水文模型 SWAT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型是由美国农业部(USDA)农业研究局(ARS)在CREAMS和SWRRB模型基础上发展起来的分布式水文模型<sup>[10]</sup>。模型将流域划分为多个子流域, 每个子流域由不同水文响应单元(HRU)组成。模型能够模拟冠层截留、入渗、蒸散发、土壤水、地表径流以及河道径流等。模型包含气象、水文、泥沙输移、植被生长、营养物质、污染物和农作物管理等模块<sup>[10]</sup>。文中选用SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Version 2)算法作为参数估计优化方法<sup>[11]</sup>。

### 3.2. 渭河流域径流模拟

本文所用DEM、土地利用、土壤数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心。气象资料包括降水、最高、最低气温、辐射、风速和相对湿度逐日数据, 取自中国气象局数据共享网22个国家基本气象站, 水文数据选取1961~2008年林家村、魏家堡、咸阳、临潼、华县五个水文站逐日流量。

根据DEM及水系分布, 模型将流域划分为106

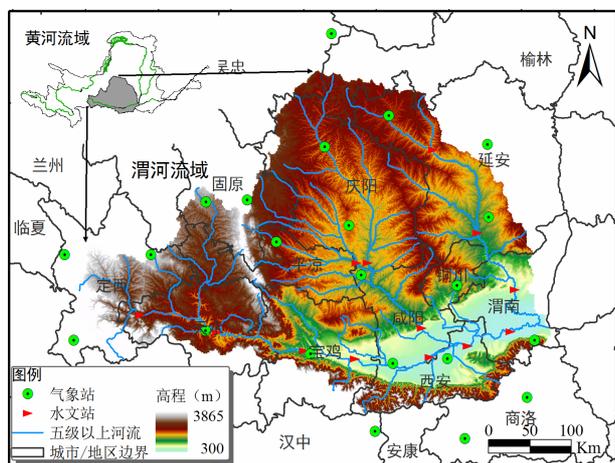


Figure 1. Sketch map of the Wei River basin  
图 1. 渭河流域地理位置及水文气象测站分布图

个子流域, 并基于不同土地利用、土壤类型以及坡度将子流域进而划分为 565 个 HRU。根据流域水文气象特点, 潜在蒸散发计算采用 Penman-Monteith 法, 地表径流计算采用 SCS 径流曲线数法, 河道汇流计算采用 Muskingum 法。基于 SUFI-2 算法对 SWAT 模型进行了参数敏感性分析、率定、验证以及不确定性分析。以 1990~2008 年为率定期对模型参数进行率定, 1961~1989 年为验证期对径流模拟结果进行验证, 率定验证期均采用前 3 年数据作为模型预热。模型参数较多, 采用敏感性分析确定径流较为敏感的参数十分必要。敏感性分析结果表明 28 个水文相关参数与流量都有不同程度相关性, 如 CN2, ALPHA\_BF 等是最敏感的参数。

华县站率定和验证期径流模拟与实测值对比如图 2。Nash-Sutcliffe 效率系数( $E_{NS}$ )、确定性系数( $R^2$ )和  $\phi$  用于评价模型径流模拟结果。率定和验证期 5 个水文站  $R$ -factor 均较小, 但林家村和魏家堡站率定期  $P$ -factor 也很小, 表明两个站实际不确定性较大。率定期(验证期)多数站  $\phi$  和  $E_{NS}$  均高于 0.6(0.7), 所有站  $R^2$  均高于 0.7(0.8), 总体来说模型评价指标较为令人满意。林家村和魏家堡站模拟结果相对较差, 主要分布在渭河上游地区。基于实地考察、咨询当地专家及研究区之前研究成果, 不确定性较大原因是由于水库建设和运行以及农业用水考虑不足。模型模拟相关内容详见文献<sup>[12]</sup>。

#### 4. 气候变化情景下流域未来径流变化特点

利用统计降尺度生成各站降水量、最高和最低气

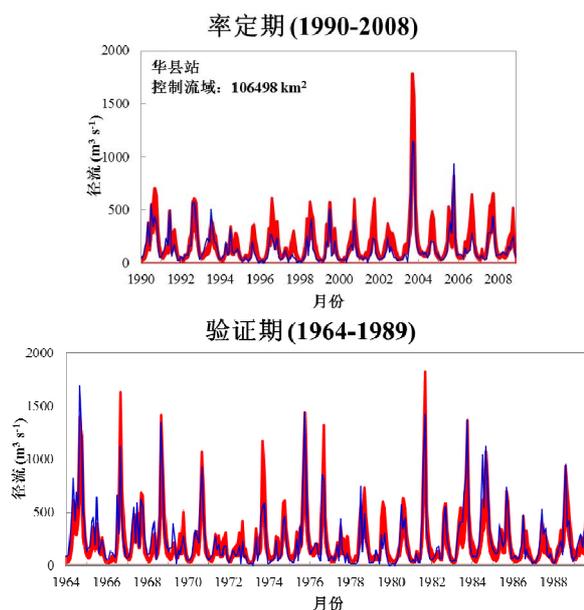


Figure 2. Comparison between observed and simulated prediction uncertainty band monthly hydrographs at Huaxian station  
图 2. 率定期和验证期华县水文站实测值(蓝色)与不确定性模拟区间(红色区间)的月径流过程图

温日序列, 驱动率定后的 SWAT 模型, 进而模拟未来气候变化条件下流域水文过程。未来气象日序列包括 2046~2065 年和 2081~2100 年两个不同时期。统计降尺度用到三个气候模式, 分别是 CSIRO:MK30, INM:CM30 和 CGCM2.3.2, 以下分别用 CSIRO, INM 和 MRI 代替。温室气体排放情景包括 SRES A2 和 B1 两种。径流量变化主要基于华县站流量数据计算得到。

#### 4.1. 流域径流量对未来气候变化情景的响应

未来多种气候变化组合情景下, 2046~2065 和 2081~2100 时期流域多年平均径流量见表 1。基准期流域多年平均径流量为 72 亿  $m^3$ 。2046~2065 年不同情景下流域多年平均径流量最大值 97.6 亿  $m^3$  (CSIRO-B1 情景), 多年平均径流量最小值 68 亿  $m^3$  (MRI-B1 情景)。2081~2100 年 INM-B1 情景下流域多年平均径流量最高, 达 145.6 亿  $m^3$ , CSIRO-B1 情景下最低, 为 68.4 亿  $m^3$ 。由此可见未来两个时期流域径流量最高和最低值均出自 B1 情景。总的来看, 流域未来径流量整体呈增加趋势, 2080s 增幅较 2050s 略大, 2050s 和 2080s 流域多年平均径流量在多种情景下均值分别为 80.4 与 104.3 亿  $m^3$ , 较基准期分别增加 12.4%和 45%。流域未来径流量在 A2 和 B1 情景下

**Table 1. Quantile and mean values for annual runoff in the basin during the periods of 2046-2065 and 2081-2100 (10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a)**  
**表 1. 未来两个时期不同情景下流域年径流量均值与百分位值 (亿 m<sup>3</sup>/年)**

未来时期	百分位数	A2			B1		
		CSIRO	INM	MRI	CSIRO	INM	MRI
2046~2065	R10	53.2	53.2	52.8	45.2	55.6	54.8
	R50	78.4	78.0	74.0	80.8	66.0	62.8
	均值	92.4	81.2	77.2	97.6	68.4	68.0
	R90	132.4	106.8	95.2	154.0	77.6	83.6
2081~2100	R10	62.4	56.4	66.4	37.6	100.0	65.2
	R50	91.2	79.2	88.8	64.4	126.0	130.4
	均值	94.8	85.6	94.4	68.4	145.6	136.8
	R90	120.4	109.6	124.8	91.2	188.4	195.6

差异并不十分明显, 尤其 2081~2100 时期。

除多年平均径流量外, 表 1 也给出未来两个时期年径流量序列代表分位数, 包括第 10, 50 和 90 百分位数值(分别记作 R10, R50 和 R90)。此处年径流量序列第 10 和 90 百分位数(R10 和 R90)分别代表偏旱和偏湿年, 而正常年则由 R50 和多年平均径流量表示。不同情景下流域偏旱年径流量最低值为 37.6 亿 m<sup>3</sup>(CSIRO-B1 情景), 而偏旱年径流量最高达到了 100 亿 m<sup>3</sup>(INM-B1 情景)。与多年平均径流量特点一致, 未来两个时期不同情景下 R10 最高和最低值也分别为 INM-B1 和 CSIRO-B1 情景。总的来看流域未来两个时期所有情景下 R10 均值分别为 52.5 和 64.7 亿 m<sup>3</sup>。由表 1 可以看出, 2046~2065 年所有情景下 R90 最高值达 154 亿 m<sup>3</sup>(CSIRO-B1 情景), 而最低值为 77.6 亿 m<sup>3</sup>(INM-B1 情景)。总的来看流域未来两个时期所有情景下 R90 均值分别为 108.3 和 138.3 亿 m<sup>3</sup>。

除年径流量均值和百分位数外, 也对日流量序列代表百分位值在未来两个时期变化特点进行分析。表 2 给出了未来两个时期不同情景下华县站日流量第 10 和 90 百分位值(分别记作 Q10 和 Q90)。从表中可以看出 2050s 所有情景下 Q10 均呈减少趋势, 多数情景下 Q90 (除 CSIRO-B1 情景)呈增加趋势, 这意味着 2050s 枯季流量将较基准期更低, 而洪峰流量则将较基准期更高, 即流域极端事件(干旱与洪水)2050s 有加剧趋势。所有情景下 Q10 最低值为 11.5m<sup>3</sup>/s (MRI-B1 情景), 较基准期减少 27.9%, Q90 最高值达 837.7 m<sup>3</sup>/s

**Table 2. Quantile values for daily runoff at Huaxian station during the periods of 2046-2065 and 2081-2100**  
**表 2. 未来两个时期不同情景下华县站日流量百分位值**

未来时期	百分位数	A2			B1		
		CSIRO	INM	MRI	CSIRO	INM	MRI
2046~2065	日流量 (m <sup>3</sup> /s)	15.9	13.3	16.8	12.8	12.8	14.3
	变化量 (%)		-16.2	5.8	-19.4	-19.7	-10.3
	日流量 (m <sup>3</sup> /s)	460.2	768.4	582.5	582.5	837.7	464.8
	变化量 (%)		67.0	26.6	26.6	82.0	1.0
2081~2100	日流量 (m <sup>3</sup> /s)	15.9	14.1	17.9	16.4	9.9	28.7
	变化量 (%)		-11.5	12.4	3.0	-38.0	80.7
	日流量 (m <sup>3</sup> /s)	460.2	653.0	476.1	563.0	507.6	900.9
	变化量 (%)		41.9	3.5	22.3	10.3	95.8

(CSIRO-B1 情景), 较基准期增加 82%。2080s 所有情景下 Q90 均呈增加趋势, Q10 则无明显趋势, 这与 2050s 变化特点较为一致, 且 2080s 流域洪水呈加剧趋势。2080s 所有情景下 Q10 最低值为 9.9m<sup>3</sup>/s (CSIRO-B1 情景), 较基准期减少 38%, Q90 最高值达 963.9m<sup>3</sup>/s (MRI-B1 情景), 较基准期增加近 1 倍。

#### 4.2. 未来气候变化情景下流域径流深空间分布

图 3 至图 5 分别给出三个气候模式两种排放情景下未来两个时期各子流域多年平均径流深较基准期变化空间分布。CSIRO 模式下流域多年平均径流深较基准期变化空间分布见图 3, 由图中可以看出, CSIRO 模式下流域径流深变幅在-9~129.2 mm 之间, 其中大多数地区径流深变幅为正。整体来看, 不同情景下流域径流深变化趋势较为一致, 均表现为上游部分子流域及北洛河上游地区径流深呈减少趋势, 而中下游大部分地区径流深则较基准期有所增加。径流深呈减少趋势的地区减幅较小, 不足 10 mm; 中下游地区增加趋势非常明显, 尤其是 B1 情景, 最大增幅约为 100 mm。总的来讲, CSIRO 模式下流域径流深在上游子流域呈减少趋势, 而在中下游子流域则呈增加趋势, B1 情景下流域径流深变幅高于 A2 情景。

图 4 给出 INM 情景下未来两个时期各子流域多年平均径流深较基准期变化空间分布。由图可看出,

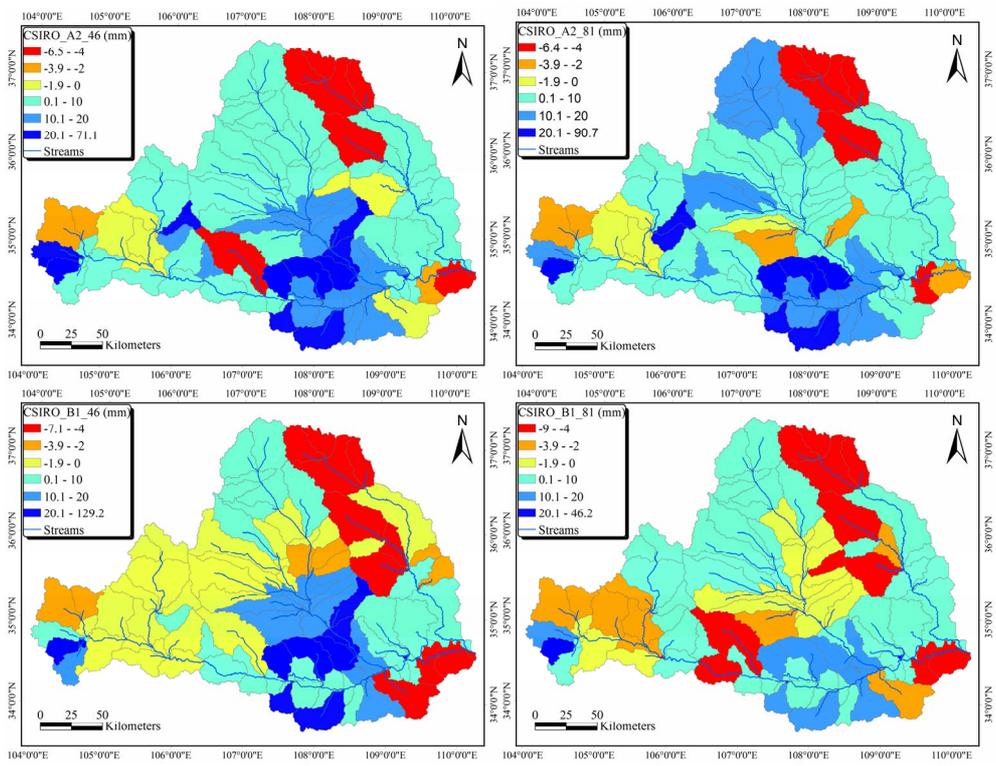


Figure 3. Spatial changes of mean annual runoff under CSIRO scenarios during the two future periods  
图 3. 未来两个时期 CSIRO 模式不同情景下流域多年平均径流深较基准期变化空间分布

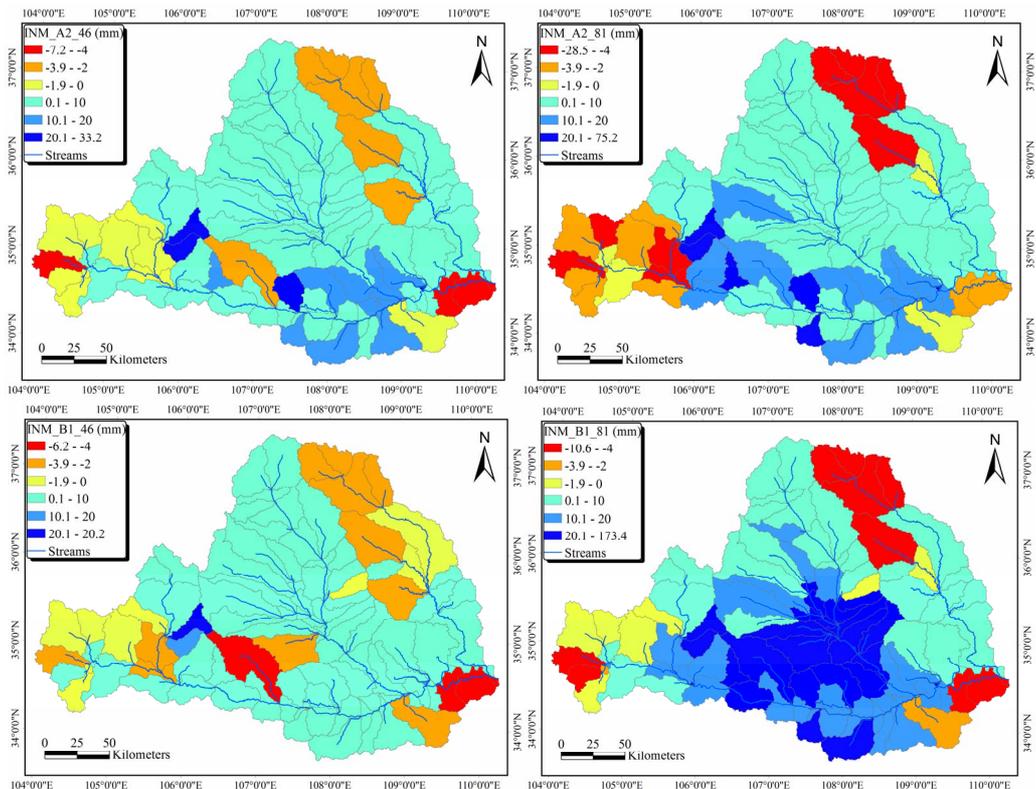


Figure 4. Spatial changes of mean annual runoff under INM scenarios during the two future periods  
图 4. 未来两个时期 INM 模式不同情景下流域多年平均径流深较基准期变化空间分布

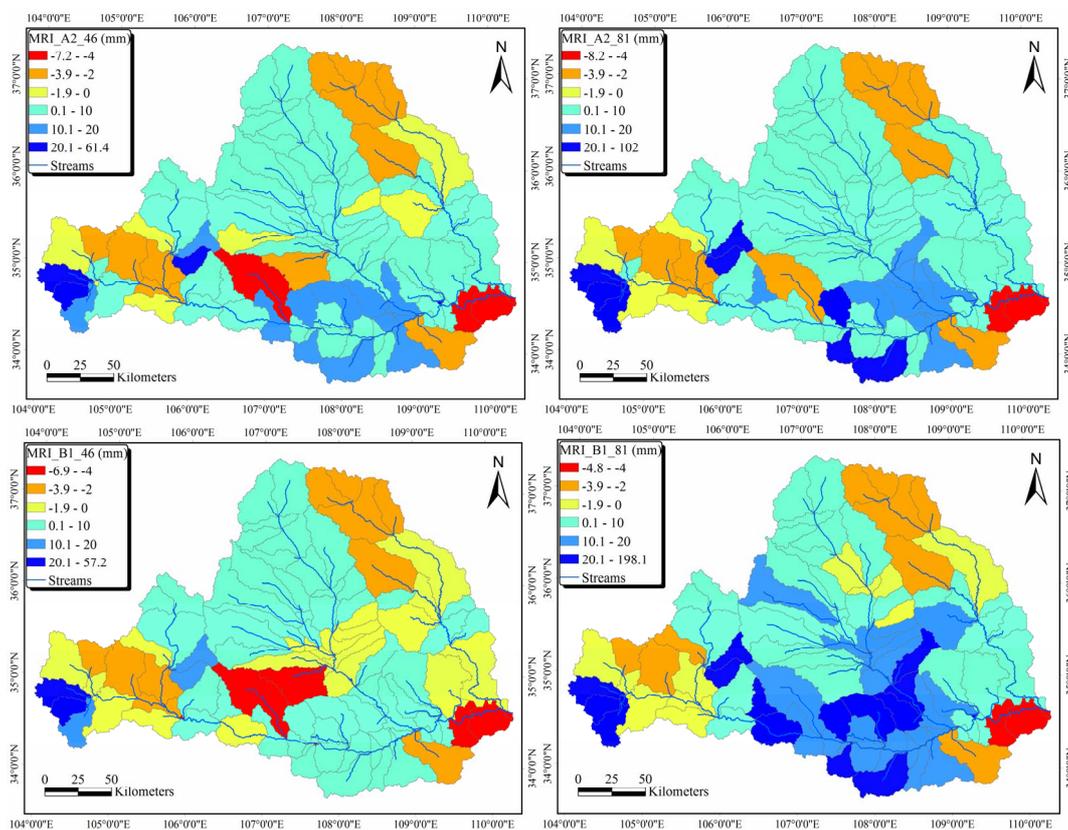


Figure 5. Spatial changes of mean annual runoff under MRI scenarios during the two future periods  
图 5. MRI 模式不同情景下流域多年平均径流深较基准期变化空间分布

INM 情景下流域径流深变幅在-28.5~173.4 mm 之间, 其中大多数地区径流深变幅为正。不同情景下流域径流深变化趋势也较为一致, 均表现为上游部分子流域和北洛河上游地区径流深呈减少趋势, 而中下游子流域径流深较基准期有所增加。径流深呈减少趋势地区减幅约为 10 mm, 最大减幅不足 30 mm, 而呈明显增加趋势地区增幅基本大于 20 mm, 最大增幅达 173.4 mm。

MRI 模式不同情景下未来两个时期各子流域多年平均径流深较基准期变化空间分布图 5。整体来看, MRI 模式下流域多年平均径流深变化空间分布与 CSIRO 和 INM 模式一致性较高, 所有情景均表现为上游部分子流域和北洛河上游地区径流深呈减少趋势, 而其它地区径流深则较基准期有所增加。MRI 模式情景下流域径流深变幅在-8.2~198.1 mm 之间, 流域大部分地区径流深变幅为正, 增幅最大超过 190 mm, 而呈减少趋势地区减幅不足 10 mm。总的来说, MRI 模式情景下大多数子流域径流深增幅大于 CSIRO 和 INM 模式。

### 5. 结论

本文首先构建渭河流域基准期 SWAT 模型, 然后将降尺度生成不同情景下未来降水、气温日序列数据输入 SWAT 模型, 模拟流域未来(2050s 和 2080s)径流变化过程, 得到结论如下:

- 1) SWAT 模型在渭河流域径流模拟的表现令人较为满意, 模型较好地模拟了流域径流时空变化特点。
- 2) 渭河流域未来径流整体呈增加趋势, 且 2080s 增幅较 2050s 大, 两时期不同情景下流域多年平均径流量均值分别为 80.4 与 104.3 亿 m<sup>3</sup>, 较基准期增加 12.4%和 45%。
- 3) 未来两时期多数情景下 Q10 呈减少趋势, 而 Q90 则呈增加趋势, 意味枯季流量较基准期更低, 洪峰流量较基准期更高, 即未来两时期流域极端事件(干旱与洪水)有加剧趋势。
- 4) 不同情景下渭河流域径流深空间变化较为一致, 即上游部分子流域和北洛河上游地区径流深较基准期有所减少, 而中下游地区呈增加趋势。不同情景

下径流深最大减幅约为-10 mm, 增幅差异较为明显, 约为 100 mm。

## 6. 致谢

感谢国家自然科学基金项目、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目的支持, 感谢第十一届中国水论坛推荐!

## 参考文献 (References)

- [1] XU, Z.X., TAKEUCHI, K., ISHIDAIRA, H., et al. Sustainability analysis for Yellow River water resources using the system dynamics approach. *Water Resources Management*, 2002, 16(3): 239-261.
- [2] RINGLER, C., CAI, X.M., WANG, J.X., et al. Yellow River basin: Living with scarcity. *Water International*, 2010, 35(5): 681-701.
- [3] LIU, Q.A., CUI, B.S. Impacts of climate change/variability on the streamflow in the Yellow River Basin, China. *Ecological Modelling*, 2011, 222(2): 268-274.
- [4] XU, C.Y., WIDÉN, E. and HALLDIN, S. Modelling hydrological consequences of climate change-progress and challenges. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(6): 789-797.
- [5] XU, Z.X., TAKEUCHI, K., ISHIDAIRA, H., et al. An overview of water resources in the Yellow River basin. *Water International*. 2005, 30(2): 225-238.
- [6] ZUO, D.P., XU, Z.X., YANG, H, et al. Spatiotemporal variations and abrupt changes of potential evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Wei River basin, China. *Hydrological Processes*, 2012, 8(26): 1149-1160.
- [7] BRONSTERT, A., NIEHOFF, D. and BURGER, G. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes*, 2002, 16(2): 509-529.
- [8] XU, Y., GAO, X.J., SHEN, Y., et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(4): 763-772.
- [9] 左德鹏, 徐宗学, 李景玉, 等. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. *水科学进展*, 2011, 22(4): 455-461. ZUO Depeng, XU Zongxue, LI Jingyu, et al. Spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration in the Weihe River basin under future climate change. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 455-461. (in Chinese)
- [10] NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005. Temple, Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2005.
- [11] ABBASPOUR, K.C. SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty programs. Duebendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, 2007: 95.
- [12] 左德鹏, 徐宗学. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的渭河流域月径流分布式模拟[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(5): 490-496. ZUO Depeng, XU Zongxue. Distributed hydrological simulation using SWAT and SUFI-2 in the Wei River basin. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2012, 48(5): 490-496. (in Chinese).