

曹丽娟, 董文杰, 张勇, 等. 2013. 未来气候变化对黄河流域水文过程的影响 [J]. 气候与环境研究, 18 (6): 746–756, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12071. Cao Lijuan, Dong Wenjie, Zhang Yong, et al. 2013. Impacts of climate change on hydrological processes over the Yellow River basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (6): 746–756.

未来气候变化对黄河流域水文过程的影响

曹丽娟¹ 董文杰² 张勇³ 冯锦明⁴

1 国家气象信息中心, 北京 100081

2 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

3 国家气候中心, 北京 100081

4 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

摘 要 使用 NASA/NCAR 有限区域大气环流模型 FvGCM 结果驱动高分辨率区域气候模式 RegCM3 (20 km), 进行 1961~1990 年当代气候模拟 (控制试验) 和 2071~2100 年 IPCC A2 排放情景下未来气候模拟 (A2 情景模拟试验)。将 RegCM3 径流模拟结果同大尺度汇流模型 LRM [分辨率 0.25° (纬度) $\times 0.25^\circ$ (经度)] 相连接, 模拟预估未来气候变化对我国黄河流域水文过程的影响。结果表明: 相对于当代气候, 未来黄河流域呈现气温升高、降水增加 (夏季 7~8 月降水减少) 和蒸发增大的趋势, 且空间分布极不均匀, 造成河川径流在 5~10 月减少, 加剧流域夏季的水资源短缺; 未来气温升高使得融雪径流增加, 可能导致更早和更大的春季径流, 使径流过程发生季节性迁移, 引起黄河流域水资源年内分配发生变化。

关键词 气候变化 A2 情景 黄河流域 径流

文章编号 1006-9585 (2013) 06-0746-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12071

Impacts of Climate Change on Hydrological Processes over the Yellow River Basin

CAO Lijuan¹, DONG Wenjie², ZHANG Yong³, and FENG Jinming⁴

1 National Meteorological Information Center, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875

3 National Climate Center, Beijing 100081

4 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract To investigate the hydrological processes in the Yellow River basin that may be affected by climate change in the future, the regional climate model (RegCM3) is nested in one-way mode within a NASA/NCAR finite volume element AGCM (FvGCM) to carry out two 30-year simulations (with a resolution of 20 km) for present day (1961–1990) and the future (2071–2100) under the IPCC SRES A2 scenario. In this scenario, runoff outputs are used to drive a large-scale routing model [0.25° (latitude) $\times 0.25^\circ$ (longitude)] to project changes in future climate and hydrological processes and extreme hydrological events over the Yellow River basin. The results show that on average the temperature will increase when precipitation is augmented (decreasing in July and August) and evapotranspiration will also increase in the future, with a highly nonuniform spatial distribution over the whole basin in summer. Streamflow will also decrease, especially in

收稿日期 2012-04-19 收到, 2012-07-03 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950501, 国家高技术研究发展计划项目 2010AA012305, 国家自然科学基金项目 40805060、40975048

作者简介 曹丽娟, 女, 1980 年出生, 博士, 高工, 主要从事气候变化影响及资料均一化研究。E-mail: caolj@cma.gov.cn

flood season from May to October, which may aggravate a crisis of water resources shortages throughout the basin. The increased temperature will also augment snow melt runoff, which may lead to more and earlier spring runoff, and ultimately give rise to changes in the seasonal rainfall-runoff processes and the allocation of intra-annual water resources.

Keywords Climate change, A2 scenario, Yellow River basin, Streamflow

1 引言

气候变化国家评估报告(《气候变化国家评估报告》编写委员会, 2007)指出: 在全球增暖背景下, 近百年来中国年平均地面气温明显增加, 升温幅度约为 $0.5\sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比同期全球平均值略高。20 世纪 80 年代以来, 随着全球气候观测系统的不断完善和高性能计算机的飞速发展, 气候数值模拟得到了迅猛的发展, 并广泛应用于气候变化研究。由于区域气候模式(RCMs)比全球气候模式(GCMs)有更高精度的空间分辨率, 能够更加细致地描述地形和海陆分布以及地表植被分布特征, 更好地刻画气候的区域特征, 使得区域气候模式的模拟能够更加接近于观测(Gao et al., 2008; 徐璇等, 2011)。

大部分 RCMs 模拟的是流域的表面径流, 而不是河川径流, 因此, 有必要利用水文汇流模型把每个 RCMs 网格上模拟的径流深转化成流域出口断面的流量(Lohmann et al., 1998), 从而可以用来将 RCMs 模拟的径流结果同观测进行直接对比来评估 RCMs 对径流的模拟能力。假设 RCMs 估计的降水和其他变量是真实的, 对径流的估计可以用来评估陆面参数化过程的完善性(Liston et al., 1994; Nijssen et al., 1997; Wood et al., 1998)。国外已有许多工作利用简单汇流机制来预报全球某些主要河流长期平均径流(Russell and Miller, 1990; Miller et al., 1994; Sausen et al., 1994; Hagemann and Dümenil, 1998; Arora et al., 1999; Ducharne et al., 2003), 这些研究中, 气候模拟的径流被用来驱动汇流模型。目前利用 RCMs 同大尺度汇流模型连接, 进行大尺度流域的模拟研究相对较少, 如 Zhang et al. (2003) 和 Cao et al. (2007) 开展了区域气候模式 RIEMS 及 RegCM3 中径流模拟的检验, Li et al. (2012) 通过对区域气候模式 PRECIS 降尺度, 研究了黄河源区径流对气候变化的响应。随着计算机水平的提高, 利用区域气候模式进行长期积分试验已成为可能, 因此, 利用 RCMs 同大尺度汇流模型连接来计算和评估未来全球气候变暖引起的河流量变化就显得尤为重要。

黄河是中国第二大河, 流域的河川径流主要由大气降水补给。由于受大气环流及季风影响, 流域降水量少而蒸发能力很强。流域年径流量的地区分布不均匀, 径流深由流域的南部向北部逐渐递减。黄河流域由于流域面积大、含沙量高、洪水频发, 独特的下游“悬河”以及有限的水资源而受到科学家的广泛关注(Fu et al., 2004; 黄荣辉等, 2006; 周德刚和黄荣辉, 2006; 赵芳芳和徐宗学, 2009)。近年来, 受气候变化和人类活动的影响, 特别是 20 世纪 70 年代以来发生的黄河下游断流现象对黄河中、下游地区生态环境及工农业生产造成了深远的影响(徐宗学和张楠, 2006)。大量研究集中于分析观测数据或者降尺度气候模式变量的变化趋势, 并使用大尺度水文模型(VIC)等研究长期气候变化及其它原因引起水文变化(郑红星和刘昌明, 2003; Liu and Zheng, 2004; Xia et al., 2004; Xu, 2005; Xu et al., 2007)。根据黄河流域的水文特征, 采用统计降尺度模型将 GCMs 的气候情景模拟结果同水文模型连接预估黄河流域在未来气候情景下的气候及水文过程的研究大多重点关注黄河上游或源区流域(郝振纯等, 2006; 赵芳芳和徐宗学, 2009; 唐芳芳等, 2012)。

为了将高分辨率的区域模式模拟结果用于黄河流域的气候水文研究, 曹丽娟等(2008)利用区域气候模式(RegCM3)和大尺度汇流模型(LRM)连接, 研究了中国土地利用/植被覆盖变化对黄河流域降雨径流过程的影响。在此基础上, 本文使用更高分辨率的区域气候模式(RegCM3)并延长模拟时段, 对未来气候变化在 SRES A2 高排放情景下引起的黄河流域气候及水文要素的影响进行了数值模拟和分析。重点分析气候变化引起的黄河流域年、冬季、夏季平均气温、降水、蒸散发等的变化, 随后将区域气候模式 RegCM3 与大尺度汇流模型 LRM 连接, 分析黄河流域水文站月平均径流的变化, 研究气候变化对河川径流的影响。

2 试验设计

全球气候模式的强迫通过边界提供给区域气候模式, 形成区域气候模式大尺度大气结构, 区域

气候模式在内部又将产生和发展自己的天气尺度和中尺度系统。一般来说,全球气候模式和区域气候模式水平分辨率之间的差距,以 3~5 倍比较合适,通常不能超过 10 倍。此外全球模式所进行的气候变化试验,需要保存有每隔 6 h 一次的输出场才能够驱动区域模式。因此,目前能够用来嵌套 20 km 分辨率的区域气候模式进行气候变化试验的选择并不是很多。本研究应用意大利国际理论物理中心 (ICTP) 使用 NASA/NCAR 的全球环流模式 FvGCM 所进行的气候变化试验得到的结果作为区域气候模式 RegCM3 的大尺度强迫场。FvGCM 的动力框架采用有限体积元方法,物理过程除云辐射方案外,其它主要环节和 NCAR CCM3 (Kiehl et al., 1996) 相同,如晴空辐射传输方案以 Kiehl 参数化方案为基础,考虑了温室气体、大气气溶胶和云的相互作用的影响;边界过程采用非局地的 Holtslag 方案;陆面过程则通过 Bonan (1996) 的陆面模型来描述等。FvGCM 使用了一个新的云方案 McRAS,它是基于松弛的 Arakawa-Schubert 方案上的一种预测方法,并耦合更新了 Chou et al (1999) 云辐射方案;FvGCM 模式水平分辨率为 1° (纬度) $\times$ 1.25° (经度),垂直方向分为 18 层,模拟试验分为两个时间段,一是从 1961~1990 年,即控制试验阶段 (RF 试验);另一时间段是 21 世纪末 (2071~2100 年),在 IPCC SRES A2 温室气体和气溶胶排放情景下的试验阶段 (A2 试验),采用模式两个时段模拟结果作为区域气候模式 RegCM3 的驱动场。SRES 排放情景于 2000 年提出 (IPCC, 2001),本研究选择的 A2 情景是排放情景中区域经济发展引起温室气体浓度高排放的情景,至 2100 年 CO_2 的含量达到 850×10^{-6} (工业革命前约为 280×10^{-6} , 1990 年为 355×10^{-6} , 2005 年为 379×10^{-6})。区域气候模式的中心点取 (35°N , 107°E),南北方向的格点数为 275,东西方向为 360,水平分辨率取为 20 km,范围覆盖包括整个中国大陆及周边地区;模式垂直方向分 18 层,顶层高度为 100 hPa;模式中的辐射过程采用 NCAR CCM3 方案,海表通量参数化方案使用 Zeng 方案、行星边界层使用 Holtslag 方案、积云对流参数化方案选择基于 Fritsch and Chappell 闭合假设的 Grell 方案、大尺度降水采用 SUBEX 方案;模式使用的地形由美国地质勘探局 (USGS) 制作的 10° (纬度) $\times$ 10° (经度) 地形资料插值得到。植被覆盖资料在中国区域内使用中国农业科学

院遥感中心提供的实测资料,中国区域外使用 USGS 基于卫星观测反演的全球陆地覆盖特征 (Global Land Cover Characterization, GLCC) 数据库资料;初始场和侧边界值均由全球环流模式 FvGCM 得到,其中侧边界场采用指数松弛边界方案,每 6 h 输入模式一次。

首先对控制试验结果采用同期 (1961~1990 年) 气候资料进行分析验证,随后应用 RegCM3 模拟的控制试验和 A2 情景模拟试验的日地表径流和次表层径流结果驱动大尺度汇流模型 LRM,研究未来气候变化对黄河流域河川径流的影响。为与 RegCM3 的分辨率 (20 km) 相匹配,本研究中使用的 LRM 的水平分辨率为 0.25° (纬度) $\times$ 0.25° (经度)。LRM 模型来自于美国亚利桑那州大学水文水资源系,模型假设某一网格中的径流只能从指向临近 8 个网格的其中一个方向流出,然后流入河流,并汇入下游。该河网是对自然状态的水流方向的极大概括,认为网格的产流是点源 (即网格中心点),河道则用一维的线来描述。无论在某一网格还是河道汇流过程中,模型都是线性的和时不变的。模型用基流分离技术来表示地面径流和地下径流对时间的不同响应。对于地面径流的坡面汇流主要采用无因次单位线方法计算,一旦水流出网格将通过河网进一步汇流,河道汇流计算采用圣维南方程 (曹丽娟, 2007; 曹丽娟等, 2008),将 RegCM3 模拟结果中日平均地表和次表层径流采用克里金插值方法插值到 0.25° (纬度) $\times$ 0.25° (经度) 网格来驱动 LRM。汇流模型使用的 0.25° (纬度) $\times$ 0.25° (经度) 流向数据是采用中国 1:100 万数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 高程数据根据 D8 算法 (O'Callaghan and Mark, 1984; 李翀和杨大文, 2004) 提取得到,该模型已应用于对未来黄河和长江流域极端径流影响的模拟 (曹丽娟等, 2013)。

已有研究结果表明:高分辨率的 RegCM3 (20 km) 能够更好地模拟黄河流域的气温局地分布特征,对气温由南向北、由东向西的递减趋势等细节也模拟较好,模式模拟的系统性冷偏差误差较小 (曹丽娟, 2007)。高分辨率的 RegCM3 (20 km) 对黄河流域降水的模拟更为细致,能够反映较多小尺度地形对降水产生的影响,模拟值同观测值的偏差也较小,但高原山区的大值降水中心依然存在。详细的模式和试验介绍及区域模式对中国地区地面气温和降水的模拟能力的验证分析等参见文献

(曹丽娟, 2007; 石英和高学杰, 2008), 本文重点研究未来气候变化对黄河流域气温、降水、蒸散发及河川径流等水文过程的影响。

3 SRES A2 情景下未来气候变化对黄河流域的影响

3.1 黄河流域气温的变化

未来气候变化引起黄河流域年平均气温总体

表现为增温趋势(图 1a), 年平均增温幅度在 3~3.8 °C, 呈现梯度增温分布, 由流域东南向西北增温幅度逐渐增大, 以上游地区的增温最为明显。在 SRES A2 情景下, 黄河流域夏季增温幅度大于冬季增温幅度, 夏季最大增温幅度可以超过 5 °C。夏季, 兰州及以下上游干流沿线主要以干旱区气候为主, 包括沙漠和半沙漠地区, 呈现出极大的增温趋势, 表明未来 SRES A2 温室气体和气溶胶排放情景引起的气候变化将会加剧黄河流域的高温事件, 可

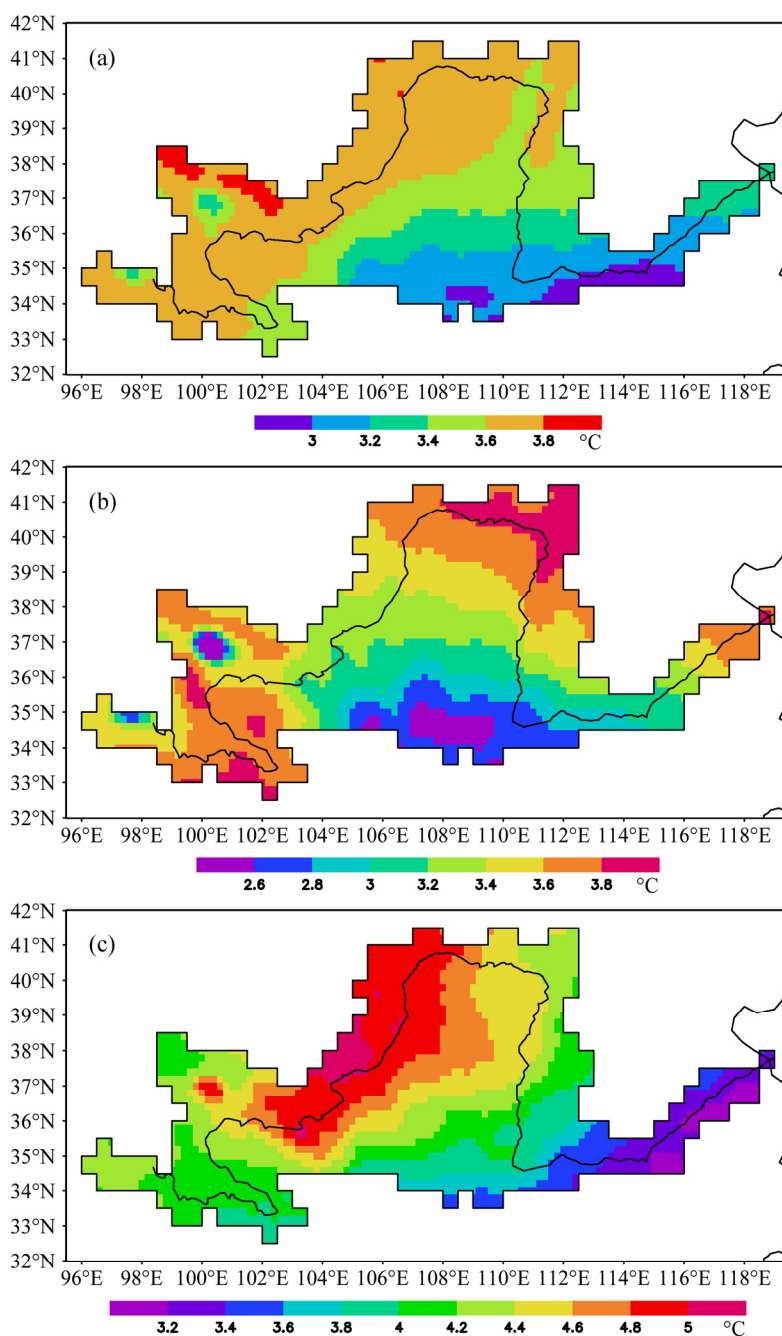


图 1 黄河流域在 SRES A2 排放情景下相对于当代气候的 (a) 年平均气温、(b) 冬季平均气温、(c) 夏季平均气温变化

Fig. 1 Effects of climate change on (a) annual, (b) winter, and (c) summer mean temperature under A2 scenario in the Yellow River basin

能出现越来越多的酷暑天气。

3.2 黄河流域降水的变化

未来气候变化引起黄河流域年平均降水在流域大部分地区表现为增加趋势(图 2a), 增加的幅度一般在 5%~10%左右, 在流域下游湿润区, 降水增加可以达到 15%。而在以兰州为中心的上游地区, 降水则呈现减少趋势, 减少幅度相对较小, 在兰州以东六盘山区为 5%。冬季, 黄河流域上中游地区降水均为增加趋势, 增加幅度在大部分地区可

以达到 20%, 且在兰州以上的半湿润地区以及兰州以下西北部的干旱区, 降水增加可以达到 40%。流域下游湿润区降水呈现减少趋势。夏季, 黄河流域降水变化趋势与冬季呈现反向变化, 上中游地区降水以减少为主, 而下游地区降水则有增加趋势, 但增加幅度较小, 约为 10%。未来 SRES A2 情景下, 冬季降水的增加, 并不能抵消夏季降水减少带来的水资源短缺, 由于夏季人畜等需水量远远大于冬季, 夏季降水的减少势必恶化当地的生存环境, 带

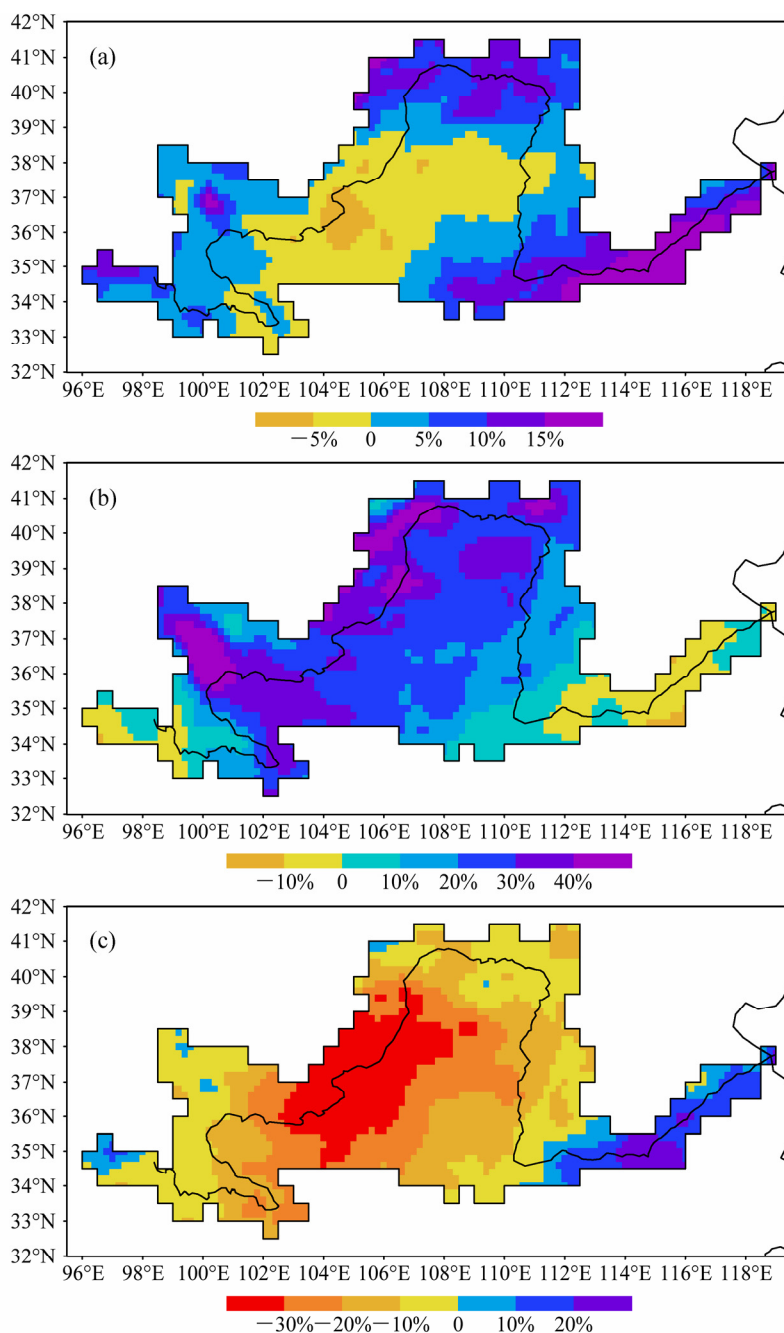


图2 同图1, 但为降水

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for precipitation

来一系列生存危机。

3.3 黄河流域蒸散发的变化

蒸散发是水文循环、水量转化中的一个关键环节，黄河流域由于光照充足，太阳辐射较强，整个流域湿度较小，蒸发能力很强。年平均蒸散发的变化以流域中部地区的减少和流域总体蒸散发的增加为主（图 3a）。蒸散发增加最大的地区位于黄河源区、祁连山区、河套地区以及流域东南部的湿润地区。冬季，气候变化引起黄河流域大部分地区蒸

散发量增加，增加最大的地区位于银川盆地、河套地区，以及流域南部秦岭山脉北坡地区，这些地区蒸散发增加幅度均超过 40%。夏季，气候变化引起黄河流域蒸散发变化在黄河源区、祁连山区以及下游湿润区呈现增加趋势，增加幅度在 10%~20%，其余地区蒸散发变化为减少趋势，在兰州以下干旱区减少幅度最大，超过 30%。

3.4 黄河流域河川径流的变化

为了验证 RegCM3 同 LRM 连接对黄河流域河

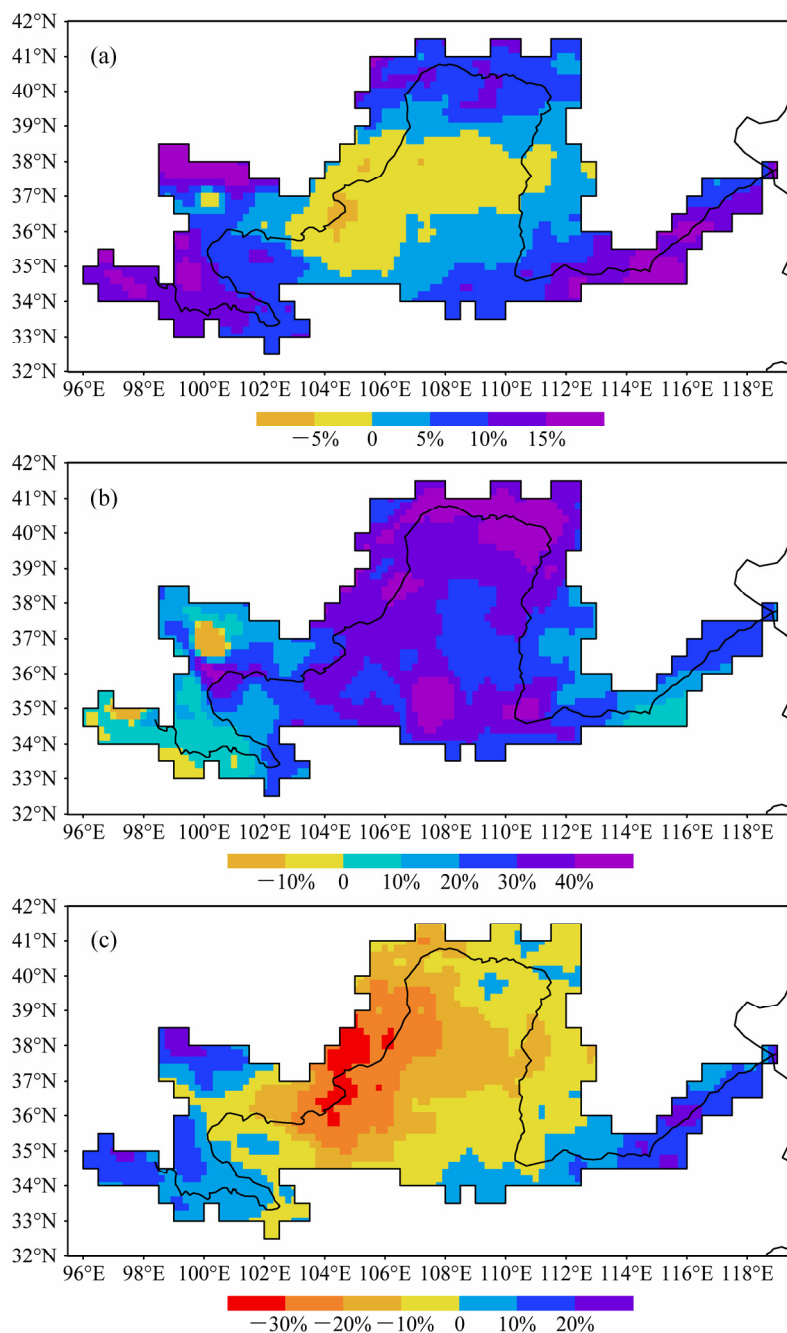


图3 同图1，但为蒸散发

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for evapotranspiration

川径流的模拟能力, 选取兰州以上资料完整 (1961~1990 年), 且受人类活动影响相对较小的 4 个水文站: 玛曲、唐乃亥、贵德、小川站, 对比了实测值同 30 a 月平均径流量模拟值的年内过程曲线 (图 4)。由图中可以看出, 模式对黄河流域径流的模拟能力较好, 模拟值同观测值比较接近, 径流年内分配模拟与观测基本一致, 但模拟峰值较观测峰值提前出现。总体来说, 4 站观测值同模拟值相关系数较高, 分别为: 0.64、0.67、0.57 和 0.69, 均通过 95% 的信度检验。这说明高分辨率的区域气候模式 RegCM3 (20 km) 对于描述黄河流域的径

流水文过程较为合理, 由于黄河流域水库调节, 也使得用于验证模式的径流资料存在人为影响的可能, 如采用天然径流量应该能够获得更好的验证效果。

选取黄河流域花园口以上代表性水文站循化、兰州、石嘴山、头道拐站, 对当代气候 (RF) 与未来气候情景 (A2) 下月平均径流量的年内变化进行比较 (图 5)。由图中可以看出, 未来 A2 情景下, 各站河川径流量相对于当代气候表现出一致的变化趋势, 即冬、春季节径流有所增加, 而夏季径流量则呈现减少趋势。6 月进入夏季, 各站河川径

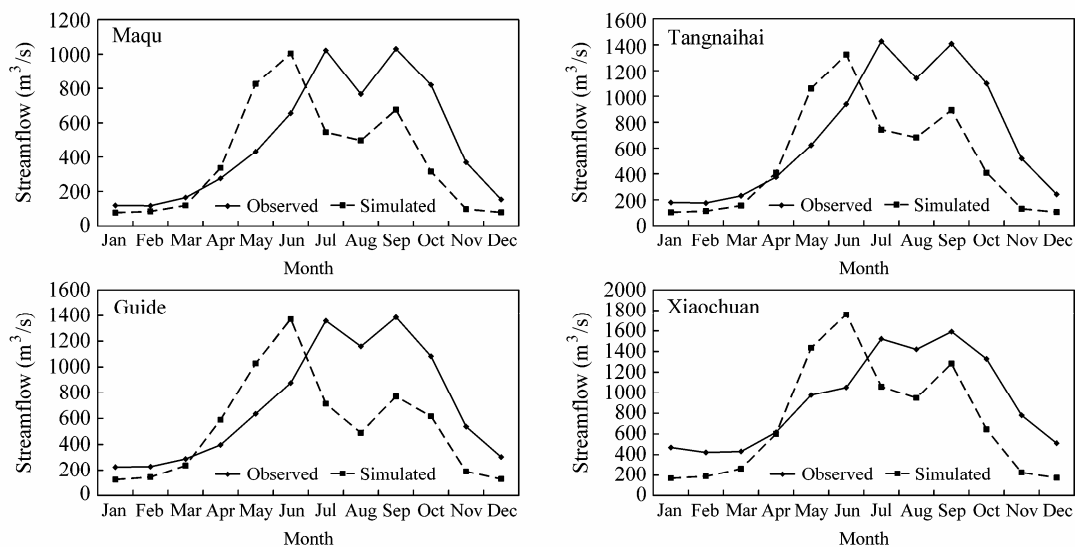


图 4 黄河流域月平均径流模拟结果与实测值比较

Fig. 4 Comparison of simulated and observed monthly mean streamflow in the Yellow River basin

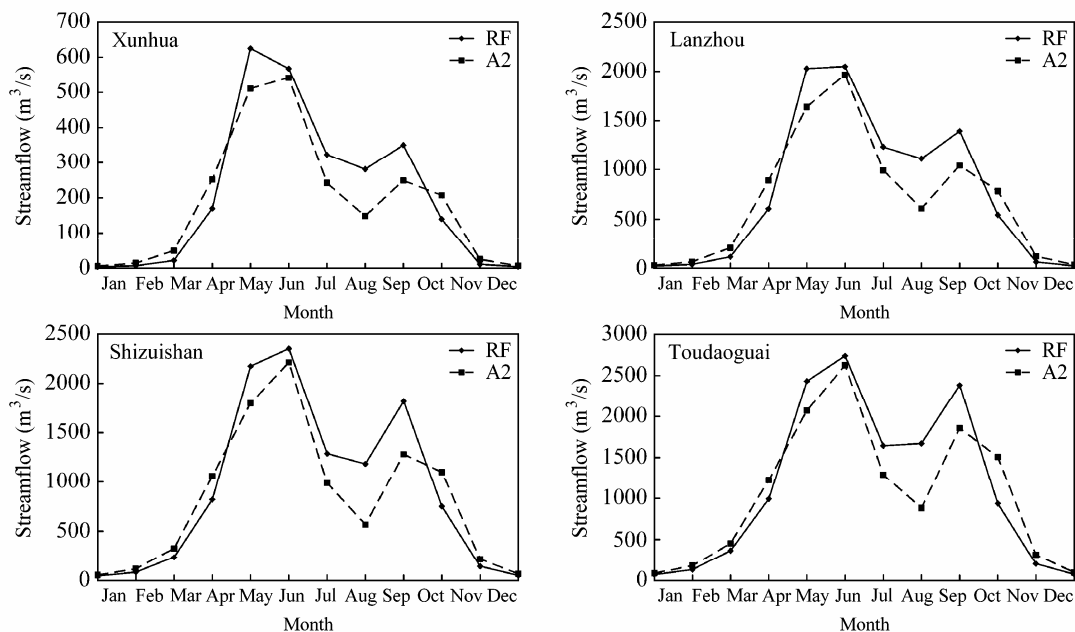


图 5 黄河流域当代气候 (RF, 1961~1990 年) 与未来气候情景 (A2, 2071~2100 年) 下月平均径流量比较

Fig. 5 Differences of monthly mean streamflow between A2 scenario (2071-2100) and reference (1961-1990) simulations in the Yellow River basin

流量迅速减少,至8月减少最大,如兰州站径流量由 $1112.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 减少成为 $608.0 \text{ m}^3/\text{s}$,夏季正是用水量较大的季节,预示着未来夏季水资源的短缺。

为分析未来河川径流相对于当代气候变化的原因,分别计算了流域平均的气温、降水、蒸散发等气候因子在未来气候情景(A2)相对于当代气候(RF)的变化。图6为黄河流域A2情景相对于当代气候月平均气温、降水、蒸散发量的绝对值的变化。可以看出,未来A2情景下,黄河整个流域气候变化表现出气温升高,降水增加(7~8月降水减少)和蒸发增大的趋势。未来黄河流域全年气温出现升高趋势,升温范围在 $2.6 \sim 5.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,升温幅度最大位于8月。降水量同蒸散发量的变化较为一致,夏季7~8月减少,其它季节均增加,其中降水量在8月减少最多,流域平均减少量达到 17 mm 。

许多研究表明黄河流域在未来气候情景下较当代气候出现气温升高、蒸发增大、降水增加的现象,但因气温上升所导致的径流蒸散发损耗超过降水量的补给而使流域特别是源区流量呈现减少趋势(郝振纯等,2006;刘彩红等,2012;王金花等,2012)。随着未来社会经济的进一步发展,黄河流域用水量将进一步增长,黄河源区乃至整个黄河流域的水资源供需形势不容乐观。本研究也得到相似的结论,但未来径流量在各个季节的变化存在差异。图7为黄河流域上游主要水文站兰州、石嘴山、头道拐站径流量的变化率。由图中可以看

出,黄河流域河川径流量在夏半年(5~9月)呈现减少趋势,而在冬半年表现为增加趋势。在A2情景下,黄河流域全年温度都可能增加,且夏季增温幅度略大于冬季。冬、春季节的增温使得黄河流域源区高原冰川积雪融化加快,造成春季河川径流的急剧增加,在3月增加值达到最大。此外,整个流域冬季降水相对于当代气候增加的绝对值并不大,但由于冬季较为干旱,未来气候情景下,降水增加相对于当代气候所占百分比比较大,蒸散发虽然在冬季也有所增加,但无法抵消降水对径流的影响,整个流域表面径流深在冬季也呈现增加趋势。综合各种因素,最终导致冬季河川径流的增加。春、秋季节整个流域降水增加绝对值较大,而蒸散发增加量相对较少,引起河川径流增加,将有利于人们的生产、生活。夏季黄河流域河川径流主要受降水补给的影响,A2情景下,夏季整个流域都可能出现较大的增温,意味着流域夏季高温的加剧。夏季降水在流域产流区以减少为主,蒸散发略有减小,但幅度不大,引起流域表面径流深的减小,最终导致河川径流的减少。

黄河上游径流量在整个黄河河川径流中占有举足轻重的地位,上游径流量的多寡,直接影响到下游的断流与否。王国庆等(2002)研究表明,对于黄河上中游地区,径流随降水的增加而增大,随气温的升高而减小;径流对降水变化的响应较对气温变化的响应更为显著;气温对径流的影响随降水

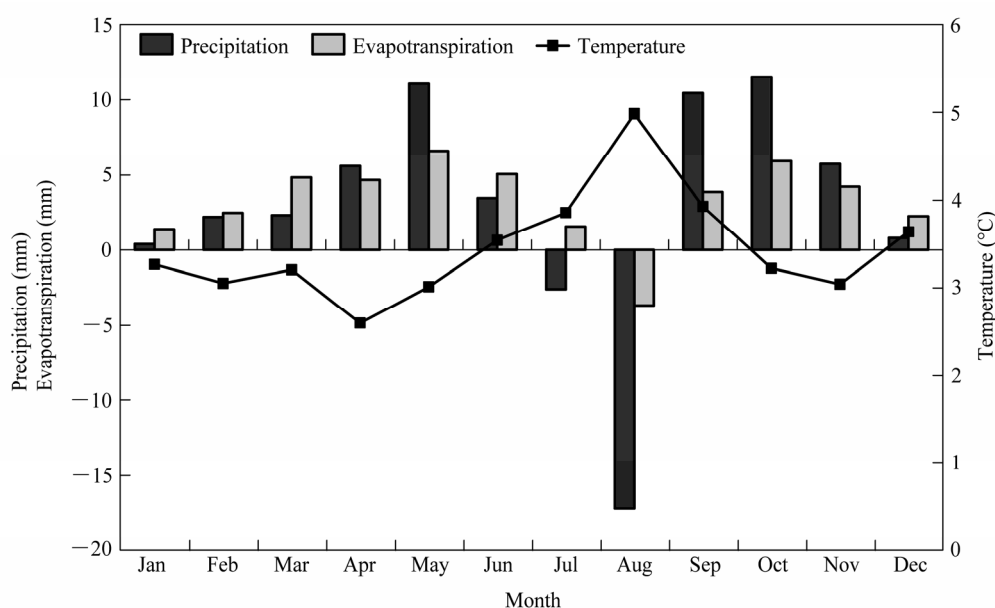


图6 黄河流域A2情景相对于当代气候月平均气温、降水、蒸散发量的变化

Fig. 6 Effects of climate change on monthly mean temperature, precipitation, and evapotranspiration under A2 scenario in the Yellow River basin

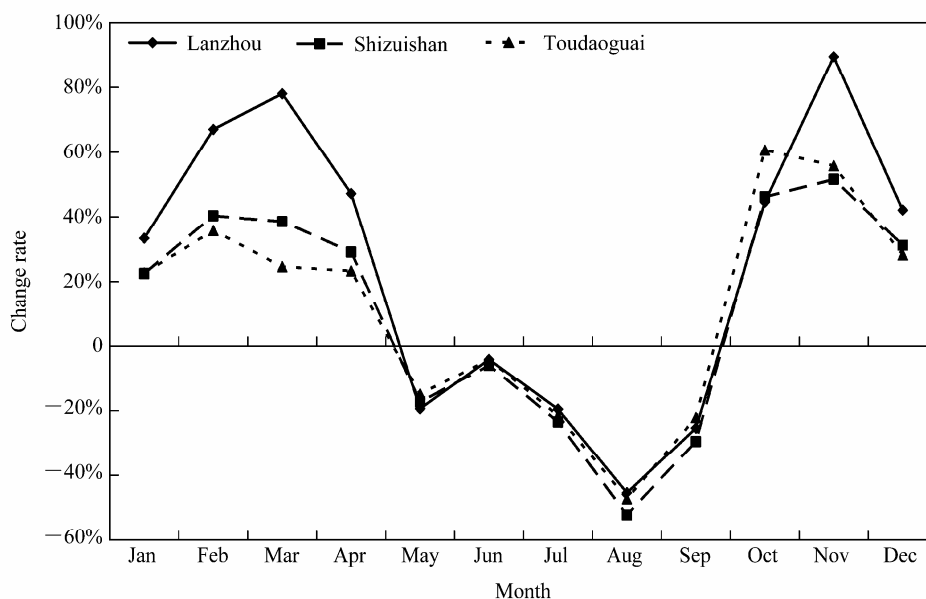


图7 气候变化引起黄河流域河川径流量变化

Fig. 7 Effects of climate change on monthly mean streamflow in the Yellow River basin

的增加而更为明显,随降水减少,气温对径流的影响不明显。本研究得到相似的结论,冬季和春季,径流随降水的增加而显著增大,夏季随降水减少而减少,夏季气温升高加剧了径流的减少。黄河流域在当代气候条件下蒸散发量已经很大,未来由于气温升高引起蒸散发量的增加对于径流的影响处于次要地位,而降水量的变化是影响未来径流变化的主要因子。

4 结论和讨论

使用区域气候模式 RegCM3 进行了中国区域 1961~1990 年当代气候模拟(控制试验)和 2071~2100 年 IPCC A2 排放情景下未来气候模拟(A2 情景模拟试验)。对人类活动引起的未来气候变化在 A2 高排放情景下引起的黄河流域气候及水文要素的影响进行了数值模拟和分析,随后将区域气候模式 RegCM3 与大尺度汇流模型 LRM 连接,重点分析气候变化引起黄河流域年、冬季、夏季平均气温、降水、蒸散发、河川径流等的变化。

研究表明:未来气候变化引起黄河流域冬季降水增加,夏季降水减少,降水减少地区位于流域上中游,降水减少最大地区位于流域西北部干旱区。气温升高会加速蒸发,黄河流域年平均蒸散发相对于当代气候有所增加,其变化趋势同年降水变化较为一致。夏季,流域降水的减少导致流域大范

围地区蒸散发的减少,减弱了夏季水循环,同时,夏季高温的出现更加剧了黄河流域的干旱。黄河流域未来气候变化的主要特征是整个流域的增暖,冬季气温升高,引起流域源区高山积雪和冰川融化,使得未来黄河流域冬季径流深有大幅度的增加。夏季降水减少,虽然蒸散发也有所减少,但仍然导致黄河流域夏季地表径流深的减少,预示着未来黄河流域水资源短缺的加剧。水文站径流反映了流域地表水资源及可用水量的变化,未来黄河流域的气候变化,将引起流域 5~10 月径流的减少,夏季高温使人类用水量加大,而径流的减少使人类可利用水资源减少,势必恶化当地的生态环境。

参考文献 (References)

- Arora V K, Chiew F H S, Grayson R B. 1999. A river flow routing scheme for general circulation models [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D12): 14374-14357.
- Bonan G B. 1996. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user's guide. NCAR Technical Note NCAR=TN-417pSTR, 150pp.
- 曹丽娟. 2007. 气候变化对黄河和长江流域水文过程影响研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 158pp.
- Cao Lijuan. 2007. Climate change impacts on the hydrological processes of the Yellow River and the Yangtze River basins [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 158pp.
- Cao L J, Dong W J, Xu Y L, et al. 2007. Validating the runoff from the PRECIS model using a large-scale routing model [J]. *Advances in*

- Atmospheric Sciences, 24 (5): 855–862.
- 曹丽娟, 张冬峰, 张勇, 等. 2008. 中国当代土地利用变化对黄河流域径流影响 [J]. 大气科学, 32 (2): 300–308. Cao Lijuan, Zhang Dongfeng, Zhang Yong, et al. 2008. The effects of current land use in China on streamflow in the Yellow River basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 300–308.
- 曹丽娟, 董文杰, 张勇. 2013. 未来气候变化对黄河和长江流域极端径流影响的预估研究 [J]. 大气科学, 37 (3): 634–644. Cao Lijuan, Dong Wenjie, Zhang Yong. 2013. Estimation of the effect of climate change on extreme streamflow over the Yellow River and Yangtze River basins [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (3): 634–644.
- Chou M D, Lee K T, Tsay S C, et al. 1999. Parameterization for cloud longwave scattering for use in atmospheric models [J]. J. Climate, 12 (1): 159–169.
- Ducharne A, Golaz C, Leblois E, et al. 2003. Development of a high resolution runoff routing model, calibration and application to assess runoff from the LMD GCM [J]. J. Hydrol., 280 (1–4): 207–228.
- Fu G B, Chen S L, Liu C M, et al. 2004. Hydro-climatic trends of the Yellow River basin for the last 50 years [J]. Climatic Change, 65 (1–2): 149–178.
- Gao X J, Shi Y, Song R Y, et al. 2008. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM [J]. Meteor. Atmos. Phys., 100 (1–4): 73–86.
- Hagemann S, Dümenil L. 1998. A parametrization of the lateral waterflow for the global scale [J]. Climate Dyn., 14 (1): 17–31.
- 郝振纯, 王加虎, 李丽, 等. 2006. 气候变化对黄河源区水资源的影响 [J]. 冰川冻土, 28 (1): 1–7. Hao Zhenchun, Wang Jiahu, Li Li, et al. 2006. Impact of climate change on runoff in source region of Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 28 (1): 1–7.
- 黄荣辉, 韦志刚, 李锁锁, 等. 2006. 黄河上游和源区气候、水文的年代际变化及其对华北水资源的影响 [J]. 气候与环境研究, 11 (3): 245–258. Huang Ronghui, Wei Zhigang, Li Suosuo, et al. 2006. The interdecadal variations of climate and hydrology in the upper reach and source area of the Yellow River and their impact on water resources in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 245–258.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis [M]. Houghton J T, Ding Y, Griggs D G, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. 1996. TN-420 description of the NCAR community climate model (CCM3) [R]. NCAR Technical Note NCAR=TN-420pSTR, 152pp.
- 李翀, 杨大文. 2004. 基于栅格数字高程模型 DEM 的河网提取及实现 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2 (3): 208–214. Li Chong, Yang Dawen. 2004. Deriving drainage networks and catchment boundaries from Grid Digital Elevation Model [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research (in Chinese), 2 (3): 208–214.
- Li L, Shen H Y, Dai S, et al. 2012. Response of runoff to climate change and its future tendency in the source region of Yellow River [J]. Journal of Geographical Sciences, 22 (3): 431–440.
- Liston G E, Sud Y C, Wood E F. 1994. Evaluating GCM land surface hydrology parameterizations by computing river discharges using a runoff routing model: Application to the Mississippi basin [J]. J. Appl. Meteor., 33 (3): 394–405.
- Liu C M, Zheng H X. 2004. Changes in components of the hydrological cycle in the Yellow River basin during the second half of the 20th Century [J]. Hydrological Processes, 18 (12): 2337–2345.
- 刘彩红, 苏文将, 杨延华. 2012. 气候变化对黄河源区水资源的影响及未来趋势预估 [J]. 干旱区资源与环境, 26 (4): 97–101. Liu Caihong, Su Wenjiang, Yang Yanhua. 2012. Impacts of climate change on the runoff and estimation on the future climatic trends in the headwater regions of the Yellow River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 26 (4): 97–101.
- Lohmann D, Lettenmaier D P, Liang X, et al. 1998. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) phase 2(c) Red–Arkansas River basin experiment: 3. Spatial and temporal analysis of water fluxes [J]. Global and Planetary Change, 19 (1–4): 161–179.
- Miller J R, Russell G L, Caliri G. 1994. Continental-scale river flow in climate models [J]. J. Climate, 7: 914–928.
- Nijssen B, Lettenmaier D P, Liang X, et al. 1997. Streamflow simulation for continental-scale river basins [J]. Water Resour. Res., 33 (4): 711–724.
- O’Callaghan J F, Mark D M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 28 (3): 323–344.
- 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 2007. 气候变化国家评估报告 [R]. 北京: 科学出版社. Compiling Committee of China’s National Assessment Report on Climate Change. 2007. China’s national assessment report on climate change [R]. Beijing: Science Press.
- Russell G L, Miller J R. 1990. Global river runoff calculated from a global atmospheric general circulation model [J]. J. Hydrol., 117 (1–4): 241–254.
- Sausen R, Schubert S, Dümenil L. 1994. A model of river runoff for use in coupled atmosphere–ocean models [J]. J. Hydrol., 155 (3–4): 337–352.
- 石英, 高学杰. 2008. 温室效应对我国东部地区气候影响的高分辨率数值试验 [J]. 大气科学, 32 (5): 1006–1018. Shi Ying, Gao Xuejie. 2008. Influence of greenhouse effect on eastern China climate simulated by a high resolution regional climate model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (5): 1006–1018.
- 唐芳芳, 徐宗学, 左德鹏. 2012. 黄河上游流域气候变化对径流的影响 [J]. 资源科学, 34 (6): 1079–1088. Tang Fangfang, Xu Zongxue, Zuo Depeng. 2012. Response of runoff to climate change in the upper Yellow River basin [J]. Resources Science (in Chinese), 34 (6): 1079–1088.
- 王国庆, 王云璋, 康玲玲. 2002. 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, 13 (1): 117–121. Wang Guoqing, Wang Yunzhang, Kang Lingling. 2002. Analysis on the sensitivity of runoff in Yellow River to climate change [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (1): 117–121.
- 王金花, 刘吉峰, 张荣刚. 2012. 黄河源区未来气候变化情景预测 [J]. 人民黄河, 34 (6): 35–37. Wang Jinhua, Liu Jifeng, Zhang Ronggang. 2012. Generation method of climate scene based in the headwater regions of the Yellow River [J]. Yellow River (in Chinese), 34 (6): 35–37.
- Wood E F, Lettenmaier D P, Liang X, et al. 1998. The Project for

- intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) phase 2(c) Red-Arkansas River basin experiment: 1. Experiment description and summary intercomparisons [J]. *Global and Planetary Change*, 19 (1-4): 115-135.
- Xia J, Wang Z G, Wang G S, et al. 2004. The renewability of water resources and its quantification in the Yellow River basin, China [J]. *Hydrological Processes*, 18 (12): 2327-2336.
- Xu J X. 2005. Temporal variation of river flow renewability in the middle Yellow River and the influencing factors [J]. *Hydrological Processes*, 19 (9): 1871-1882.
- 徐璇, 陆日宇, 石英. 2011. 全球和区域气候模式对中国东部夏季降水季节演变模拟的比较 [J]. *大气科学*, 35 (6): 1177-1186, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.16. Xu Xuan, Lu Riyu, Shi Ying. 2011. Comparison between the results on seasonal evolution of summer precipitation over eastern China simulated by a regional climate model and the driving GCM [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (6): 1177-1186.
- 徐宗学, 张楠. 2006. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析 [J]. *地理研究*, 25 (1): 27-34. Xu Zongxue, Zhang Nan. 2006. Long-term trend of precipitation in the Yellow River basin during the past 50 years [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 25 (1): 27-34.
- Xu Z X, Li J Y, Liu C M. 2007. Long-term trend analysis for major climate variables in the Yellow River basin [J]. *Hydrological Processes*, 21 (14): 1935-1948.
- Zhang J Y, Dong W J, Fu C B, et al. 2003. Streamflow simulation for the Yellow River basin using RIEMS and LRM [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20 (3): 415-424.
- 赵芳芳, 徐宗学. 2009. 黄河源区未来气候变化的水文响应 [J]. *资源科学*, 31 (5): 722-730. Zhao Fangfang, Xu Zongxue. 2009. Hydrological response to climate change in headwater catchment of the Yellow River basin [J]. *Resources Science (in Chinese)*, 31 (5): 722-730.
- 郑红星, 刘昌明. 2003. 黄河源区径流年内分配变化规律分析 [J]. *地理科学进展*, 22 (6): 585-590. Zheng Hongxing, Liu Changming. 2003. Changes of annual runoff distribution in the headwater of the Yellow River basin [J]. *Progress in Geography (in Chinese)*, 22 (6): 585-590.
- 周德刚, 黄荣辉. 2006. 黄河源区径流减少的原因探讨 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 302-309. Zhou Degang, Huang Ronghui. 2006. Exploration of reason of runoff decrease in the source regions of the Yellow River [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (3): 302-309.