谢瑾博, 曾毓金, 张明华, 等. 2016. 气候变化和人类活动对中国东部季风区水循环影响的检测和归因 [J]. 气候与环境研究, 21 (1): 87-98. Xie Jinbo, Zeng Yujin, Zhang Minghua, et al. 2016. Detection and attribution of the inflence of climate change and human activity on hydrological cycle in China's eastern monsoon area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (1): 87-98, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15097.

气候变化和人类活动对中国东部季风区水循环 影响的检测和归因

谢瑾博^{1,3} 曾毓金^{2,3} 张明华^{1,4} 谢正辉²

1 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心,北京 100029

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029

3 中国科学院大学,北京 100049

4 纽约州立大学石溪分校海洋大气学院,美国纽约州 11794-5000

摘 要水文循环过程受气候变化与人类活动的共同作用,区分气候内部自然变率与人类活动作用于水循环贡献 对于增加气候变化的理解非常重要。本研究利用近期发展的考虑地下水取用水与灌溉影响的全球陆气耦合模式进 行数值模拟,基于最优指纹法分析探讨中国东部季风区黄河、淮河、海河、珠江、长江、松花江流域水循环变化 (地表温度、降水、径流、蒸散发)及归因。结果表明:大部分流域的地表温度年际变化在1965~2005 年间检测 到包括温室气体气溶胶人为排放、臭氧与土地利用变化产生的外强迫效应,显示在长期对于地表温度起主要作用 的可能为上述强迫;1965~2005 年降水年际变化仅在淮河及长江下游检测到上述强迫效应,且在长江下游效应占 主导。在1965~1984 年间,地表温度的年际变化在海河流域检测到由于地下水取水灌溉产生的外强迫效应,并且 该效应占主导。在1982~2005 年径流年际变化中,在淮河、长江下游及黄河下游处检测到了由于温室气体排放、 气溶胶人为排放、臭氧变化及土地利用变化等产生的外强迫效应但无法有效分离,显示该信号在这些地区可能不 为主导效应;1982~2005 年间的蒸散发年际变化在珠江、长江下游同样检测到了上述强迫效应,并且该效应在长 江下游占主导效应。

关键词 中国东部季风区 水循环变化 最优指纹法 检测归因
文章编号 1006-9585 (2016) 01-0087-12
中图分类号 P467
文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15097

Detection and Attribution of the Inflence of Climate Change and Human Activity on Hydrological Cycle in China's Eastern Monsoon Area

XIE Jinbo^{1, 3}, ZENG Yujin^{2, 3}, ZHANG Minghua^{1, 4}, and XIE Zhenghui²

1 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 School of Marine and Atmospheric Sciences, Stony Brook University, State University of New York, New York 11794-5000, USA

收稿日期 2015-04-21; 网络预出版日期 2015-11-02

作者简介 谢瑾博,男,1989年出生,博士研究生,主要从事年代际预测、模式发展、检测归因等研究。E-mail: xiejinbo@mail.iap.ac.en

通讯作者 谢正辉, E-mail: zxie@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 91125016、41575096,中国科学院战略性先导科技专项 XDA05110102

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 91125016, 41575096), Chinese Academy of Sciences Strategic Priority Research Program (Grant XDA05110102)

Abstract The hydrological cycle is affected by both climate change and human activity, and separation of the effects of internal variability and human activity is important to a better understanding of climate change. The current study uses an atmosphere-land interaction model that considers the effect of anthropogenic ground water exploitation and consumption to simulate the climate response to various factors. On the basis of the Optimal Fingerprint Detection and Attribution method, this study analyzes the hydrological change (presented by the annual change in surface temperature, precipitation, water resource, and evapotranspiration) in China's six major river basins within the eastern monsoon area-those of the Yellow River, Huaihe River, Haihe River, Zhujiang River, Yangtze River, and Songhuajiang River. The results are as follows: The forcing effects of greenhouse gases, anthropogenic aerosol projection, ozone change, and land-use change are detected in the surface temperature in most basins for the period 1965-2005, indicating a major influence of these forcings in long-term surface temperature change. In the annual precipitation change over the same period, these forcing effects are only detectable in the Huaihe and lower Yangtze River basins, and are a major factor in the latter of the two. During the period 1965–1984, a forcing effect of anthropogenic groundwater exploitation and consumption is detectable, being a major factor in these areas. In the water resource series of 1982-2005, the forcing effects of greenhouse gases, anthropogenic aerosol projection, ozone change, and land-use change are detectable for the Huaihe, lower Yangtze, and lower Yellow River basins, but may not be the major factor. In the evapotranspiration series for the same period, the above forcing effects are only detectable in the Zhujiang and lower Yangtze river basins, but are major effects in the latter of these two basins only.

Keywords China's eastern monsoon area, Hydrological cycle change, Optimal Fingerprint, Detection and Attribution method

1 引言

水循环是联系地球各个系统相互作用的纽带, 它通过蒸发、水汽输送、降水、下渗、地下地表径 流等一系列过程将大气圈、水圈、岩石圈、生物圈 等有机联系起来。水循环过程受气候变化和人类活 动的共同影响,并决定着径流的形成以及相关过程 的演变。影响水循环的过程包括气温升高引起的蒸 发加剧、降水及径流强度增强,土地利用变化与人 类取用水等(宋晓猛等, 2013),并且这种影响在 局地上往往更为显著。我国东部季风区土地面积占 国土的45%,居住人口占全国的95%,地势低平, 多以平原为主,土地植被多为农田,是重要的粮食 生产区。近些年东部季风区水资源状况面临严峻挑 战,多数流域的水资源处于中等或较严重脆弱状况 (雒新萍等, 2013)。与此同时, 气候变化的影响 加剧了该区域内海河一滦河流域、北京一天津一唐 山地区,黄河及淮河流域的缺水现状(刘春蓁, 2000; 雒新萍等, 2013)。因此, 针对东部季风区 各流域开展水循环变化的归因分析,对于增加气候 与水循环变化的理解,加强水资源管理及应对水资 源短缺现状具有重要意义。

针对区域气候进行的归因分析目前主要集中

于区分气候自然变率与以大气二氧化碳(CO₂)等 大范围人为排放为主的强迫作用。这些工作包括: Zhang et al. (2007)利用 CMIP5 模拟的降水结果,针 对全球 10个区域纬度带 1925~1999年降水变化进 行归因; Barnett et al. (2008)利用全球模式模拟并 进行降尺度驱动陆面水文模型 VIC(Liang et al., 1994; Liang and Xie, 2001),对美国西部地区 1950~ 1999年间水循环变化进行归因; Delworth and Zeng (2014)利用全球模型进行模拟,针对澳大利亚过去 及几十年的降水下降趋势进行归因。这些研究中所 采用的气候模式并没有考虑人类取水灌溉活动对 区域水循环过程带来的影响,同时也缺乏对于蒸散 发、径流等变量变化的归因研究。

为了在气候模拟中考虑人类用水活动的作用, Chen and Xie (2010, 2012)构建了考虑跨流域调水 效应及作物生长效应的区域气候模式,Zou et al. (2014, 2015)在此基础上发展了考虑人类取水灌溉 影响的陆面过程模型与区域气候模式,Zeng et al. (2015)^①进一步将人类取用水方案与陆面过程模型 CLM4.5与地球系统模型 CESM1.2.0 耦合,构建了 考虑地下水取用影响的地球系统模型,并将它应用 于人类活动气候效应的研究。这些工作为研究包含 人类取用水与地下水开采等人类活动的气候效应 及相应归因分析提供了基础。

① Zeng Y J, Xie Z H, Zou J. 2015. Climatic responses to anthropogenic groundwater exploitation: A case study of the Haihe River basin, Northern China [J]. Submitted to Journal of Climate.

本研究利用包含人类取用水与地下水开采的 全球陆气耦合模式进行数值模拟,并结合最优指纹法 针对东部季风区各大流域的温度、降水、蒸散发及径 流的年际变化进行分流域的检测和归因分析。

2 观测数据、模式描述和试验设计

基于最优指纹法与全球陆气耦合模式模拟探 讨中国东部季风区流域水循环变化及归因。首先介 绍用于最优指纹法分析的观测;其次介绍用于模拟 的模式发展以及试验设计。

2.1 观测数据

观测降水与温度数据分别采用国家气象信息中 心 0.5°(纬度)×0.5°(经度)降水格点数据(1961~ 2013 年),1.0°(纬度)×1.0°(经度)地表温度格 点数据(1951~2007 年)。蒸散发数据来源于 Jung et al. (2009),它是基于全球通量观测网络 FLUXNET 的连续站点通量观测数据、卫星遥感的地理空间分 布信息和地表气象数据,采用机器学习算法—模型 树集合算法进行升尺度估计的全球 0.5°(纬度) ×0.5°(经度)蒸散发(ET)数据,时长为1982~ 2010 年。径流采用降水(PR)减ET数据替代,时 长为 1982~2010 年。该近似利用了流域水量平衡 理论,假设流域蓄水量变化忽略,这在多年尺度上 是成立的(陈桂亚和 Clarke, 2007;李文运等, 2011; 郭家力等,2012)。将以上数据进行年平均处理, 形成年数据,为检测归因分析准备。

2.2 模型描述

本文采用的模型为耦合了人类取用水模块的 地球系统模型 CESM1.2.0-gw (Zeng et al., 2015)。它 是基于考虑人类取用水方案的陆面过程模型 CLM4.5 与地球系统模型 CESM1.2.0 耦合发展起来 的。该方案对人类取用水过程主要进行了如下考 虑:根据当地国内生产总值 GDP、灌溉分布等数据, 估计出人类用水需求量;然后从地下蓄水层中抽出 相应量的地下水,并把该抽出水量分为两部分—— 农业灌溉用水和工业生活用水:农业灌溉用水被作 为"有效"降水部分,在模式中直达土壤表面,补 充土壤表层水分;工业生活用水则进一步细分为直 接排到周边河流的工业及人类生活废水,以及作为 蒸发而直接进入大气的净消耗水量 (Zou et al., 2014, 2015; Zeng et al., 2015⁽⁰⁾)。通过以上方案,可以在模式中的水循环过程中考虑人类取用水的活动,进而评估和分析该因子对于气候的影响,这在以往的模式中并未予以很好考虑。

2.3 试验设计

本文主要研究区域为在中国东部季风区的6个 流域,包括黄河、淮河、海河、珠江、长江、松花 江流域等。该区域范围(20°N~49.4°N, 99.2°E~ 135°E)如图1所示,覆盖了我国重要的南方洪涝灾 害高风险区以及北方农业与生态脆弱区。模拟试验 采用了上述考虑人类取用水、灌溉影响的地球系统 模型 CESM1.2.0-gw, 其来源于英国气象局哈德利 气象研究中心的海表温度及海冰浓度数据集作为 海洋及海冰边界强迫 (Hurrell et al., 2008) 进行陆 气耦合过程的数值模拟。这里的模拟考虑如下3类 强迫因子以及所有这 3 类因子的作用: 1) 温室气 体与气溶胶排放、臭氧变化与土地利用变化的效 应,也即 ANT 信号; 2) 人类取水灌溉过程 (Zou et al., 2014) 的强迫效应,即 ANT2 信号; 3) 火山爆 发引起的自然气溶胶排放与太阳辐射照度变化的 自然强迫效应,即NAT信号;4)以上3种因子的 综合效应,即为 ALL 信号。

本研究考虑以上因子作用,进行了5组不同的 陆气耦合模拟试验:

(1) 气候内部变率模拟 CTR 试验:考虑了工 业化革命前情景的气候内部变率模拟;

(2)综合模拟 ALL 试验:考虑了土地利用变化、 温室排放(ANT)等、人类取用水过程(ANT2)、 自然强迫(NAT)及内部变率的综合模拟;

(3) 气候自然强迫模拟 NAT 试验:考虑了包括 火山爆发的气溶胶排放、太阳常数变化效应的模拟;

(4) 人类活动影响模拟 ANT 试验:考虑温室 气体、人为气溶胶排放、臭氧变化等大范围人类活 动的模拟;

(5)人类取用水过程影响模拟 ANT2 试验:采用人类取用水模块,考虑了人类取水灌溉效应。

这里仅考虑某因子的模拟试验即为将该因子 设定为实测动态变化的强迫,其它因子排放水平设 定在工业化革命前水平。除综合模拟试验 ALL 及 大人类活动模拟试验 ANT 采用实测海温及海冰浓 度(1870~2010年)外,其它试验皆采用工业化革

① Zeng Y J, Xie Z H, Zou J. 2015. Climatic responses to anthropogenic groundwater exploitation: A case study of the Haihe River basin, Northern China [J]. Submitted to Journal of Climate.



图 1 研究区域(1----松花江, 2----长江, 3----珠江, 4----黄河, 5----海河, 6----淮河)

Fig. 1 Research areas in this study (1—Songhuajiang River basin, 2—Yangtze River basin, 3—Zhujiang River basin, 4—Yellow River basin, 5—Haihe River basin, and 6—Huaihe River basin)

命前气候态海温及海冰浓度(1870~1899年气候态 平均)。ALL和ANT试验中的实测海温可以作为海 气耦合模式的近似,而ANT2和NAT的试验则是 针对单独强迫的作用而设计的。

除 CTR 试验模拟时间为 480 年外,其它模拟的时间均为 1965~2005 年。对每一类的强迫试验都 作了 6 个样本的积分, CTR 试验模拟的第 10 年起 每隔 10 年共取 6 套 12 月 31 日最后时间步长的模 拟结果,作为其它 4 组模拟 ALL、NAT、ANT、ANT2 试验的 6 个不同初始场,得到针对相应数值模拟如 ALL 试验共有 6 套不同初值模拟结果。模拟空间分 辨率均为 0.9°(纬度)×1.25°(经度)。

温室气体浓度采用 IPCC 第五次评估报告中列 出强迫(IPCC, 2007); 人为气溶胶排放清单; 臭氧 变化的强迫采用 Cionni et al. (2011)所用的臭氧变 化排放清单; 土地利用变化使用全球动态土地利用 变化及土地覆盖数据集 (Hurtt et al., 2006); 人类取 水灌溉过程的模拟是基于 Zou et al. (2014, 2015)、 Zeng et al. (2015)^①中发展的考虑地下水取水灌溉 模块,主要利用水资源公报、联合国粮食与农业组 织 (Food and Agriculture Organization, FAO)全球 灌溉分布图,以及 CLM 模式离线模拟的土壤湿度 等数据估算本地区取用水需求及地下水开采与灌 溉量 (Zou et al., 2014, 2015; Zeng et al., 2015[®]); 自 然外强迫中的太阳常数变化资料采用 Lean et al. (2005) 发展的太阳辐射照度距平时间序列,而火山 爆发外强迫则是使用了 Ammann et al. (2003) 发展 的火山活动数据集。

3 水循环变量的时空变化特征

3.1 温度和降水

图 2 显示的是综合模拟试验 ALL 以及观测的 中国区域 1965~2005 年平均温度、降水空间分布 及多年变化趋势。由观测温度(图 2a)显示,中国 东南部近海区为高温区,而东北北部和青藏高原为 低温区,其余地区为介于高温和低温之间的过渡 区,基本上呈现由北向南、由西向东逐渐升温的格 局。模拟试验 ALL(图 2b)温度显示其可以很好 地抓住观测的空间分布。观测温度的线性趋势(图 2c)显示,在该段时间内,全国呈一致升温趋势,绝 大多数地区温度升高趋势介于 0.04~0.08 °C/a,东 北、西北和东南部分地区升温趋势小于 0.04 °C/a。

① Zeng Y J, Xie Z H, Zou J. 2015. Climatic responses to anthropogenic groundwater exploitation: A case study of the Haihe River basin, Northern China [J]. Submitted to Journal of Climate.

综合模拟温度的线性趋势(图 2d)与观测一致,仅 北部部分地区较观测稍大。总体而言,综合模拟 ALL试验与观测较为接近,在空间分布和线性趋势 上都能抓住观测的时空特征。

图 2e 显示年降水呈现由东南向西北逐渐减少、

由高纬度到低纬度逐渐增加的格局。模拟降水(图 2f)总体上反映中国降水带状分布,但强度比观测 (图 2e)稍强,而在中西部出现较观测更强的降水 中心,南部降水强度比观测弱。就降水观测的线性 趋势(图 2g)而言,东部季风区大部分地区降水呈



图 2 中国区域气候态(1965~2005 年)(a)观测和(b)模拟的地表温度及其(c、d)趋势、(e)观测和(f)模拟的降水空间分布及其(g、h)趋势。黑点为通过了0.05显著性的 t 检验

Fig. 2 Spatial distribution and climatology trend (1965–2005) of surface temperature and precipitation: (a) Observed temperature; (b) simulated temperature; (c) observed temperature trend; (d) simulated temperature trend; (e) observed precipitation; (f) simulated precipitation; (g) observed precipitation trend; (h) simulated precipitation trend (black dots represent points that passed the statistical test at the 0.05 significance level)

减小趋势,但均小于-12 mm/a,而黄河和长江下 游部分地区降水有上升趋势(小于 12 mm/a)。综合 模拟 ALL 试验降水线性趋势(图 2h)则在中部及 南部部分地区与观测趋势存在差异。总体而言,西 部及青藏高原地区降水综合模拟改进空间大,在东 部地区的模拟有其合理性。

3.2 径流和蒸散发

图 3 显示的是观测与综合模拟 ALL 试验



图 3 中国区域气候态(1965~2005 年)(a)观测和(b)模拟的径流及其(c、d)趋势、(e)观测和(f)模拟的蒸散发空间分布及其(g、h)趋势。 黑点为通过了显著性 0.05 的 *t* 检验

Fig. 3 Spatial distribution and climatology trend (1982–2005) of runoff (precipitation minus evaporation) and evapotranspiration: (a) Observed runoff; (b) simulated runoff; (c) observed runoff trend; (d) simulated runoff trend; (e) observed evapotranspiration; (f) simulated evapotranspiration; (g) observed evapotranspiration trend; (h) simulated evapotranspiration trend (black dots represent points that passed the statistical test at the 0.05 significance level)

1982~2005年径流、蒸散发空间分布及趋势。由图 3a 可见,中国区域径流呈现与降水类似带状分布 ——由北向南增加格局,径流大的区域集中于东南 地区。径流综合模拟 ALL 试验(图 3b)与观测(图 3a)总体呈现较好的一致性,但中西部地区呈现较 观测更强的径流中心,而东南地区比观测较弱,这 与模式降水的偏差相吻合。观测趋势(图 3c)则显 示,自 1982年以来,全国平均径流呈现西部和南 部增长,中部、华北及东北地区降低的趋势。ALL 试验模拟趋势(图 3d)则在西北、东北地区与观测 较为相似,但华北及东南部地区则没有很好地被模 拟。总体而言,径流模拟在中西部地区较差,而在 东部地区具有一定模拟效果。

由图 3e 可见,蒸散发则由西北向东南增加, 也存在带状的分布形。蒸散发 ALL 试验模拟(图 3f)与观测(图 3e)比较一致,只是强度稍强。观 测趋势(图 3e)显示,自 1982 年以来,全国蒸散 发主要呈现增加趋势,只在西北及东北个别地区呈 降低趋势。ALL 试验模拟趋势(图 3f)则与观测较 为一致。总体而言,模式能够较好地模拟出蒸散发 的分布及趋势。

3.3 观测与模拟的相关系数

此外,我们还分析了温度、降水、蒸散发的观测与模拟 ALL 试验的相关系数空间分布(图 4)。 从图 4a 中可以看出,温度观测与综合模拟 ALL 试验的相关性较高,全国均高于 0.875。对降水(图 4b)而言,除淮河流域和长江下游的部分地区外(0.3~0.6),东部季风区大多数地区观测与综合模拟 ALL 试验的相关系数约为 0.7,西北部分地区ALL 试验的模拟能力较差,低于 0.375。

蒸散发观测与 ALL 试验的相关性(图 4c)较高,全国大部分地区高于 0.875,只在西北地区高于 0.5,在中北部地区高于 0.75,并且都通过了 95%的显著性检验。

综上所述,温度 ALL 试验的综合模拟能力非 常好,而降水 ALL 试验的模拟能力不如温度模拟, 但东部季风区大部分地区仍有较好代表性,模式对 于年径流量及年蒸散发的模拟在东部季风区具有 一定代表性。

4 水循环变化的检测与归因

4.1 方法

本研究基于观测及模拟试验结果,使用基于多



图 4 模拟 ALL 试验与观测的相关系数空间分布:(a)温度;(b)降水;(c)蒸散发。黑点为通过了 95%信度检验的点

Fig. 4 The spatial distribution of correlation coefficients between the simulation and observations: (a) Temperature; (b) precipitation; (c) evapotranspiration (black dots represent points that passed the *t* test at the 95% confidence level)

元线性回归的最优指纹法 (Allen and Tett, 1999; Allen and Stott, 2003), 针对东部季风区水循环各变 量变化进行检测与归因分析。考虑到实际样本较 小,采用整体最小二乘法 (TLS) 形式的回归方程 (Allen and Stott, 2003):

$$y = \sum_{i=1}^{m} (x_i - v_i)\beta_i + v_0, \qquad (1)$$

公式中所有输入值皆为同一变量的距平值,其中, y为观测值, x_i 为对应某一特定强迫的响应模态(即 为试验模拟结果), β_i 为对应模态的尺度因子, v_0 为内部变率, v_i 为响应模态中的噪声项。 v_i 的表示 由于采用有限集合样本所带来的噪声,该项会随着 集合数的增加以 v_i 偏离理论上无限样本集合。由于 本文中所用的样本为6个集合样本,所以 v_i 不可忽 略。观测变量的变化可分为内部变率与多个外部强 迫共同作用的结果。假设内部变率符合高斯分布, 通过计算得到尺度因子β,的置信区间进行检测 (即该置信区间是否包含1),即可检验模式模拟的 响应和观测变化的方向与振幅是否一致,并对内部 变率及外强迫因子的影响进行区分:尺度因子 β 大 于0意味着两信号方向一致,则称信号可被探测, 包含1则意味两信号振幅一致;两者都满足则表示 该因子通过了一致性检验。单信号检测归因即为同 一变量的单个响应模态代入回归方程,进行一元线 性回归。多信号检测归因则是使用同一变量的 ANT、ANT2、NAT 三信号的响应模态同时代入回 归方程,进行多元线性回归。当通过了单信号一致 性检验的变量在多信号检测归因过程中可被探测, 即可分离该信号,并意味着该因子在观测到的变化 中占主导影响。

内部变率项 vo 取自控制模拟试验的样本。本文 以 10 年为偏移间隔作为每一套数据的起点,从时 长为480年的控制模拟中选取多套与检测归因时间 段等长的内部变率数据(其中1965~2005年42套, 1965~1985年、1985~2005年各44套)。获取的 多套 CTR 数据按时间排序分为两块同等套数数据, 前者用于导出对数据进行"预白"处理的滤波算 子,后者用于余项检验 (Allen and Tett, 1999)。这 里的滤波是一种特殊处理方式 (Allen and Tett, 1999),通过使用经验正交函数分解对于控制试验 取得多套数据的套数维度 n 进行分解, 获取 k 个截 断的典型信号特征向量,然后将输入的观测与模 拟皆投射到此 k 个特征向量上。这可以提高输入 回归方程的观测及模拟信号的信噪比,也更容易 探测到外部强迫信号 (Allen and Tett, 1999)。在本 文中,选取截断 k 的标准是通过余项检验的最大 *k*数。

4.2 水循环变化检测及归因

本研究除对 1965~2005 年地表温度、降水年 际变化进行归因分析以外,为区分不同时间段因子 的作用,也以时间中段 1984 年为界限,分别在前 后两时间段中(1965~1984 年及 1985~2005 年) 对上述变化进行检测归因。径流和蒸散发由于资料 时长的限制,归因分析时段仅限于 1982~2005 年。 4.2.1 温度和降水

图 5 显示温度检测归因结果 (尺度因子 β_i 的最优估计及置信区间)。由图 5a 显示的 1965~2005

年间温度年际变化的单信号检测归因可以看出,在 松花江、珠江、海河、淮河、长江中游、长江下游、 黄河中游及黄河下游区域皆检测到了 ANT 信号; ALL 信号则在除长江、长江上游及黄河下游外区域 被检测到。由此可见,在流域尺度温度变化的长期 趋势中,温室气体、人为气溶胶排放、臭氧变化及 土地利用变化等因子的强迫效应在东部季风区各 流域的影响比较普遍,而包含了上述效应的 ALL 综合效应信号也在各流域有普遍影响。与此同时, ANT2 信号仅在长江中游及长江下游被检测到; NAT 在珠江、黄河、淮河、长江下游、黄河中游被 检测到。这显示出人类取用水及自然强迫等效应在 各处并不明显。

由图 5b 的 1965~1984 年间温度检测结果显示,ANT 信号在这段时间内仅在松花江、珠江、长江中游被检测到。而在 1985~2005 年的结果(图 5c)中,除松花江及长江上游外,其余地区在这段时间内皆检测到了 ANT 信号,显示温室气体等强迫的效应。前后两段时间内检测反差结果显示,1984 年可能是温室气体、气溶胶人为排放、臭氧变化、土地利用变化等在长期过程中由个别流域的影响转向在各流域产生普遍影响的时间转折点。除ANT 及 ALL 外,其他信号则显示出有限影响,在1965~1984 年(图 5b)及 1985~2005 年(图 5c)内都只在个别流域被检测到。这其中包括在 1965~1984 年的温度变化中,在海河流域检测到 ANT2 信号,显示人类取用水在该处温度变化中有一定影响。

温度多信号检测归因结果(图 5e、5f)显示, 在 1965~1984年(图 5b)及 1985~2005年(图 5c)内各处信号被分离结果较少,显示可能大部分 在地区效应占据主导的仍然是内部变率。值得注意 的是,在单信号检测中在海河流域检测到了 ANT2 信号,其在多元检测结果(图 5c)中也可被检测到, 这意味着该信号在海河流域温度变化长期趋势中 占主导效应。这与 20 世纪后半段华北地区(包括 海河)地下水开采较为严重 (Zou et al., 2014)的结 论具有一致性。

降水 1965~2005 年单信号检测归因结果如图 6a 所示: ANT 信号仅在淮河及长江下游地区被检 测到,并且通过了一致性检验; ALL 信号仅在长江 下游被检测到; ANT2 及 NAT 信号在各流域中都无 法被检测到。分段结果(图 6b、图 6c)也显示,



图 5 地表温度 1965~2005 年 (左列)、1965~1984 年 (中列)、1985~2005 年 (右列)(a-c)单信号和 (d-f)多信号检测归因结果。ANT、ANT2、 NAT、ALL 信号的尺度因子 β 的置信区间别用蓝色、红色、绿色和黑色的箱线表示,上、下端分别为 5%、95%置信区间,中间为最优估计值;上、 下两黑色虚线分别代表 1 和 0

Fig. 5 Surface temperature (a–c) single signal and (d–f) multiple signal detection and attribution results for 1965–2005 (left column), 1965–1984 (middle column), and 1985–2005 (right column). The confidence interval of the scale factor of the ANT (the effect of greenhouse gas, anthropogenic aerosol projection,ozone change, and land-use change), ANT2 (the anthropogenic groundwater exploitation), NAT (aerosol projection from volcano, solar irradiance change), and ALL (including the effect of all above factors) signals are represented separately by blue, red, green, and black box plots, in which the lower and upper bounds stand for the 5% and 95% confidence levels, and the middle point for the best estimate; the upper and lower dashed lines stand for 1 and 0

ANT、ANT2、NAT、ALL 等外强迫信号在各段时间降水变化中并不明显。

降水 1965~2005 年多信号结果(图 6d)也显 示,仅长江下游处 ANT 信号可被分离,显示温室 气体、人为气溶胶排放、臭氧变化、土地利用变化 等在该处有主导作用。分时间段的(图 6e、6f)降 水变化中,各信号则皆无法实现分离。上述结果表 明,各段时间内降水长期变化的影响可能仍以内部 变率为主。

4.2.2 径流和蒸散发

径流单信号检测结果如图 7a 所示: ANT 信号 在淮河、长江中游、黄河下游被检测到,且仅在后 两个流域中通过了一致性检验; ANT2 信号则在长 江下游被检测到; NAT 信号在黄河下游被检测到, 并通过了一致性检验。整体而言,径流的单信号检测仅在个别流域可以检测到外部强迫的信号,显示绝大部分地区可能为内部变率所主导。径流的多信号检测(图 7b)则在所有流域内信号皆无法实现分离。以上结果表明,在 1982~2005 年中,区域尺度上径流年际变化可能受内部变率影响较大,外部强迫影响在多数流域并不显著。

95

蒸散发单信号归因结果如图 7c 所示: ANT 信号在珠江及长江中游被检测到,并通过了一致性检验; NAT 信号在珠江及长江下游被检测到,但模式 对该两处 NAT 模拟可能存在低估; ALL 信号在珠 江流域被检测到,并且通过一致性检验。蒸散发多 信号检测结果(图 7d)则显示,仅在长江中游检测 到了 ANT 信号且通过了一致性检验,显示该信号



图 6 同图 5, 但为降水 Fig. 6 Same as Fig. 5, but for precipitation

检测可从各信号及噪声中顺利分离。值得注意的 是,由于蒸散发数据仍然存在不确定性 (Jung et al., 2009),上述结果仍然需要进行进一步的分析与验 证,才能确定 ANT 信号(即温室气体排放、气溶 胶人为排放、臭氧变化及土地利用变化)对于长江 流域蒸散发长期变化的影响。综合上述结果可以看 到,在 1982~2005 年中,区域尺度上蒸散发的检 测归因可能也受内部变率影响较大,外部强迫的影 响在多数流域并不显著。

5 总结与讨论

本文利用考虑地下水取用水效应的全球陆气 耦合模型,对 1965~2005 年间不同因子强迫下温 度、降水及 1982~2005 年间蒸散发、径流年际变 化的响应进行了模拟,并利用了最优指纹法对于各 变量进行检测归因分析。从观测及模拟 ALL 试验 结果的空间分布、趋势及相关系数对比可见,模式 对于各变量在模拟时间段内具有一定代表性。

检测归因结果表明: 大部分流域的地表温度年 际变化在 1965~2005 年间检测到包括温室气体气 溶胶人为排放、臭氧与土地利用变化产生的外强迫 效应,显示在长期对于地表温度起主要作用的可能 为上述强迫; 1965~2005 年降水年际变化仅在淮河 及长江下游检测到上述强迫效应,且在长江下游效 应占主导。在 1965~1984 年间, 地表温度的年际 变化在海河流域检测到由于地下水取水灌溉产生 的外强迫效应,并且该效应占主导。在1982~2005 年径流年际变化中,在淮河、长江下游及黄河下游 处检测到了由于温室气体排放、气溶胶人为排放、 臭氧变化及土地利用变化等产生的外强迫效应但 无法有效分离,显示该信号在这些地区可能不为主 导效应; 1982~2005 年间的蒸散发年际变化在珠 江、长江下游同样检测到了上述强迫效应,并且该 效应在长江下游占主导效应。

另外值得注意的是,本研究模拟结果仍然存在 不确定性。首先,模式对于区域各变量的模拟仍然 存在不确定性。由于在区域尺度上,范围较小且影



图 7 与图 5 类似,但为 1982~2005 年 (a、b) 径流、(c、d) 蒸散发单信号(上)和多信号(下)检测归因

Fig. 7 Similar to Fig. 5, but for (a, b) runoff and (c, d) evapotranspiration single signal (upper) and multi-signal (lower) detection and attribution results

响因子多和复杂,所以对于模式的分辨率和考虑因 子提出了更高的要求。其次,区域上信号多,存在 着信号强度相对于背景场信号并不明显(土地利 用、人类取用水等),在多信号检测归因中无法实 现对某些信号的有效检测和分离。再次,检测归因 过程中使用的蒸散发观测数据仍然具有不确定性。 该数据是 Jung et al. (2009)基于 FLUXNET 全球观 测站点及机器学习方法进行全球升尺度估算而得 的数据,在区域上的代表性仍然具有一定的不确定 性。最后,本文使用的是单一模式,对于物理过程 的模拟仍然具有不确定性。因此,在未来的研究中, 可以尝试采用多模式集合模拟的方式以及更为可 靠的观测资料,以减少检测归因中的不确定性。

致谢 感谢审稿专家提出的大量宝贵意见。

参考文献(References)

- Allen M R, Tett S F B. 1999. Checking for model consistency in optimal fingerprinting [J]. Climate Dyn., 15(6): 419–434, doi: 10.1007/ s003820050291.
- Allen M R, Stott P A. 2003. Estimating signal amplitudes in optimal fingerprinting, part I: Theory [J]. Climate Dyn., 21(5–6): 477–491, doi: 10.1007/s00382-003-0313-9.
- Ammann C M, Meehl G A, Washington W M, et al. 2003. A monthly and latitudinally varying volcanic forcing dataset in simulations of 20th century climate [J]. Geophys. Res. Lett., 30(12): 59-1–59-4, doi: 10.1029/2003GL016875.
- Barnett T P, Pierce D W, Hidalgo H G, et al. 2008. Human-induced changes in the hydrology of the western United States [J]. Science, 319(5866): 1080–1083, doi: 10.1126/science.1152538.
- Chen F, Xie Z H. 2010. Effects of interbasin water transfer on regional climate: A case study of the middle route of the South-to-North Water

Transfer Project in China [J]. J. Geophys. Res., 115(D11), D11112.1-D11112.17, doi: 10.1029/2009JD012611.

- Chen F, Xie Z H. 2012. Effects of crop growth and development on regional climate: A case study over East Asian monsoon area [J]. Climate Dyn., 38 (11–12): 2291–2305, doi: 10.1007/s00382-011-1125-y.
- 陈桂亚, Clarke D. 2007. 气候变化对嘉陵江流域水资源量的影响分析 [J]. 长江科学院院报, 24(4): 14–18. Chen Guiya, Clarke D. 2007. Impact of climate change on water resources in Jialing River of upper Yangtze River basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute (in Chinese), 24(4): 14–18, doi: 10.3969/j.issn.1001-5485.2007. 04.004.
- Cionni I, Eyring V, Lamarque J F, et al. 2011. Ozone database in support of CMIP5 simulations: Results and corresponding radiative forcing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(21): 11267–11292, doi: 10.5194/acp-11-11267-2011.
- Delworth T L, Zeng F R. 2014. Regional rainfall decline in Australia attributed to anthropogenic greenhouse gases and ozone levels [J]. Nature Geoscience, 7(8): 583–587, doi: 10.1038/ngeo2201.
- 郭家力,郭生练,李天元,等. 2012. 鄱阳湖未控区间流域水量平衡分析 及校验 [J]. 水电能源科学, 30(9): 30–58. Guo Jiali, Guo Shenglian, Li Tianyuan, et al. 2012. Water balance analysis and verification of Poyanghu Lake intervening basin [J]. Water Resources and Power (in Chinese), 30(9): 30–58.
- Hurrell J W, Hack J J, Shea D, et al. 2008. A new sea surface temperature and sea ice boundary dataset for the community atmosphere model [J]. J. Climate, 21 (19): 5145–5153, doi: 10.1175/2008JCLI2292.1.
- Hurtt G C, Frolking S E, Fearon M G. 2006. The underpinnings of land-use history: Three centuries of global gridded land-use transitions, woodharvest activity, and resulting secondary lands [J]. Global Change Biol., 12, 1208–1229.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Scientific Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jung M, Reichstein M, Bondeau A. 2009. Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: Validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model [J]. Biogeosciences, 6 (10): 2001–2013, doi: 10.5194/bg-6-2001-2009.
- Lamarque J F, Bond T C, Eyring V, et al. 2010. Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: Methodology and application [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 10 (15): 7017–7039, doi: 10.5194/acp-10-7017-2010.

- Lean J, Rottman G, Harder J, et al. 2005. SORCE contributions to new understanding of global change and solar variability [J]. Solar Physics, 230 (1–2): 27–53, doi: 10.1007/s11207-005-1527-2.
- 李文运,张伟,戈建民,等. 2011. 水量平衡分析方法及应用 [J]. 径流 保护, 27 (6): 83-87. Li Wenyun, Zhang Wei, Ge Jianmin, et al. 2011. Water balance analysis method and its application [J]. Water Resources Protection (in Chinese), 27 (6): 83-87, doi: 10.3969/j.issn.1004-6933. 2011.06.020.
- Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models [J]. J. Geophys. Res., 99 (D7): 14415–14428, doi: 10.1029/94JD00483.
- Liang X, Xie Z H. 2001. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models [J]. Advances in Water Resources, 24 (9–10): 1173–1193, doi: 10.1016/S0309-1708(01) 00032-X.
- 刘春蓁. 2000. 中国水资源响应全球气候变化的对策建议 [J]. 中国水利, (2): 36–37. Liu Chunzhen. 2000. Suggestions on response of climate change in water resources in China [J]. China Water Resources (in Chinese), (2): 36–37.
- 維新萍, 夏军, 邱冰, 等. 2013. 中国东部季风区水资源脆弱性评价 [J]. 人民黄河, 35 (9): 12–14, 20. Luo Xinping, Xia Jun, Qiu Bing, et al. 2013. Assessment of water vulnerbility under climate change in East China monsoon region [J]. Yellow River (in Chinese), 35 (9): 12–14, 20.
- 宋晓猛,张建云,占车生,等. 2013. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展 [J]. 水利学报,44 (7): 779–790. Song Xiaomeng, Zhang Jianyun, Zhan Chesheng, et al. 2013. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. ShuiLi XueBao (in Chinese),44 (7): 779–790.
- Zhang X B, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends [J]. Nature, 448 (7152): 461–465, doi: 10.1038/nature06025.
- Zou J, Xie Z H, Yu Y, et al. 2014. Climatic responses to anthropogenic groundwater exploitation: A case study of the Haihe River Basin, Northern China [J]. Climate Dyn., 42(7–8): 2125–2145, doi: 10.1007/s00382-013-1995-2.
- Zou J, Xie Z H, Zhan C S, et al. 2015. Effects of anthropogenic groundwater exploitation on land surface processes: A case study of the Haihe River Basin, Northern China [J]. J. Hydrol., 524: 625-641, doi: 10.1016/j. jhydrol.2015.03.026.