

谢正辉,陈思,秦佩华,等.人类用水活动的气候反馈及其对陆地水循环的影响研究——进展与挑战[J].地球科学进展,2019,34(8):801-813. DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2019.08.0801.[Xie Zhenghui, Chen Si, Qin Peihua, et al. Research on climate feedback of human water use and its impact on terrestrial water cycles—Advances and challenges[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(8): 801-813. DOI: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2019. 08. 0801.]

# 人类用水活动的气候反馈及其对陆地水循环的影响研究——进展与挑战\*

谢正辉<sup>1,2,3</sup>, 陈思<sup>1,2,3</sup>, 秦佩华<sup>1,2</sup>, 贾炳浩<sup>1,2</sup>, 谢瑾博<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院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;

2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 陆地水循环受人类活动、太阳辐射和重力作用以及气候与环境条件的影响, 控制着淡水资源的供给。调水灌溉、农作物种植收割、地下水开采利用等人类用水活动, 引起陆面和大气之间水分和能量交换的变化, 对气候产生重要反馈并显著改变陆地水循环过程。总结人类活动对陆地水循环与水资源的影响及气候反馈研究进展, 亟需从综合考虑自然和人类活动双重影响下陆地水循环演变及其气候与生态环境效应的分析、模拟与预测方面开展研究, 深入认识陆地水循环演变及其在全球变化中的作用; 研发考虑人类取水用水、作物种植与灌溉、地下水侧向流动的陆面水文过程模型、区域气候模式、全球陆气耦合模式系统, 定量评估人类用水活动的气候反馈及其对陆地水循环过程的影响并探讨其机理, 区分人类用水活动与全球气候变化对陆地水循环演变的贡献, 揭示气候变化背景下人类活动对陆地水循环的影响及其气候与生态环境效应, 并由此提出应对气候变化的水资源适应性管理策略。

**关键词:** 人类用水活动; 气候变化; 陆地水循环

**中图分类号:** P339      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8166(2019)08-0801-13

## 1 引言

地表及近地表水分运动过程——陆地水循环, 控制着水资源时空分布的改变, 其主要自然影响因素包括气象条件和地形、土壤、植被、地质等地理条件, 并与人类生产生活活动密切相关。调水灌溉、农作物种植收割、水资源开采利用等人类活动, 通过改变土壤水、地表水、地下水各水分分量的时空分布以及陆面和大气之间物质和能量的交换影响地球系统。理解人类用水活动对气候的反馈及其

对陆地水循环的影响规律与机理对人类可持续发展至关重要<sup>[1,2]</sup>, 由此受到各国学者的广泛关注<sup>[3]</sup>。由世界气候计划(World Climate Research Program, WCRP)、国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)、全球能量与水循环实验(Global Energy and Water Cycle Experiment, GEWEX)、国际水文计划(International Hydrological Programme IHP)等活动的推动, 对此进行了大量的观测、模拟试验, 促进了对区域水循环特

收稿日期: 2019-04-22; 修回日期: 2019-07-05.

\* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目“人类用水活动的气候反馈及其对中国陆地水循环的影响研究”(编号: 41830967); 中国科学院前沿科学重点研究计划重点项目“考虑人类活动影响的陆面水文模型与全球气候模式的研制及其在年代际水文预测中的应用”(编号: QYZDY-SSW-DQC012)资助。

作者简介: 谢正辉(1963-), 男, 湖南长沙人, 研究员, 主要从事陆面过程模式发展及陆气耦合模式研究. E-mail: zxie@lasg.iap.ac.cn

征与变化的认识<sup>[4-10]</sup>。幅员辽阔的中国跨多纬度、地形复杂,使得中国区域降水时空变异大<sup>[11]</sup>,相应的地表水循环及逐年可恢复和更新的淡水资源也具有显著的时空分异特征<sup>[12-14]</sup>。年人均降水量仅为世界人均水平的 1/4,水资源时空分布很不平衡。人类活动进一步加剧水资源脆弱性与供需矛盾,对社会经济可持续发展带来严峻挑战。这些均表明,认识水循环变化对水资源利用的重要性。本文针对人类活动的气候反馈及其对陆地水循环与水资源的影响这一研究主题,阐述人类用水活动在陆地水循环中的作用,并从气候变化、陆地水循环和人类活动相互作用的角度在模式模拟、观测分析方面凝

练研究进展及未来发展方向。

## 2 人类用水活动在陆地水循环中的作用

水资源的自然分布不均以及水环境污染与人类需求之间的矛盾随着社会经济的发展日益尖锐。人类通过兴建水库储水调水、城市供水或排水、取水用水与灌溉活动、农林垦殖、城市化,控制和调配自然界的水,使水循环过程和自然资源时空分布发生改变以适应人类用水需求,并通过复杂的相互作用调节影响气候与环境<sup>[15,16]</sup>。人类用水活动对气候有重要反馈,并且深刻影响陆地水循环过程(图 1)。

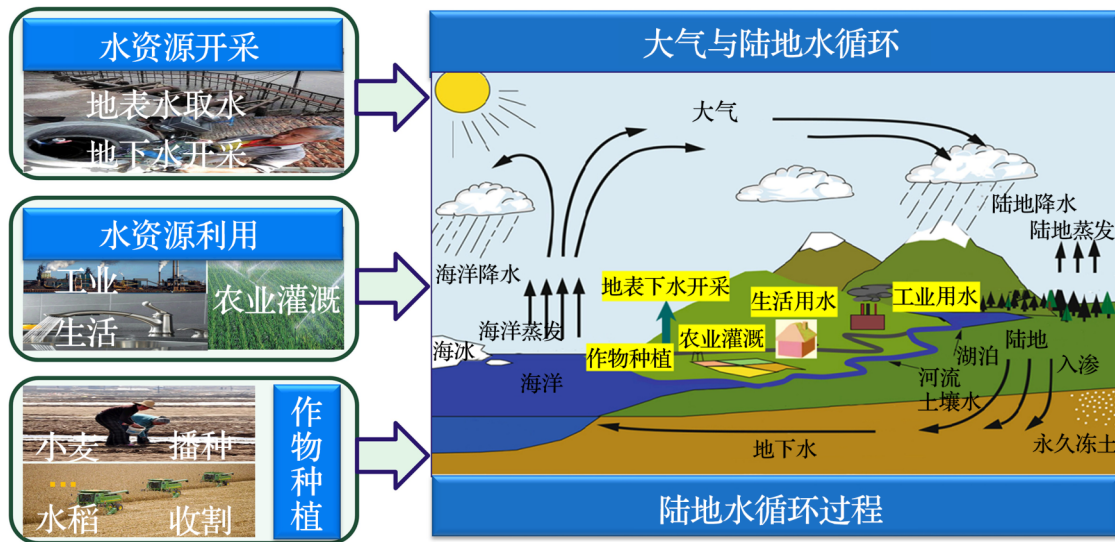


图 1 气候、陆地水循环、人类活动相互作用

Fig.1 Interactions between climate, human activities, and terrestrial water cycles

人类用水活动改变了许多区域的水文气象特征,如在干旱半干旱地区大面积的植被破坏,导致地区性气候向干旱化方向发展,直到形成荒漠。取水灌溉等人类活动与气候变化已引起干旱区内陆河——塔里木河流域水文过程发生变化:上游产流区河源冰川融化加速、可更新利用的水资源量减少;中游灌溉—蒸发超越降雨—产流成为主导水文过程<sup>[17]</sup>,以及绿洲耗散区地下水位下降、植被减少、土地沙化;绿洲无序开发加剧下游生态环境恶化成为荒漠区<sup>[18]</sup>。这些直接威胁着经济和社会可持续发展的生态基础<sup>[19-21]</sup>,导致水资源供需矛盾日益尖锐<sup>[18,22,23]</sup>。人类用水灌溉改变潜热通量、蒸散发以及水资源的消耗。灌溉耗水占用了近 90% 的人类总引水耗水量<sup>[24]</sup>,引水灌溉使得人们能够在占全球耕地面积 20% 的灌溉耕地上生产出 40% 的粮食<sup>[25]</sup>。中

国现有灌溉设施的耕地占耕地总面积的 39%<sup>[26]</sup>,用世界 7% 的土地养活世界 21% 的人口<sup>[3]</sup>,其中灌溉对粮食产量的增加无疑产生巨大作用<sup>[27]</sup>,也使得蒸散发以及水资源的消耗增加。农作物的种植、生长、收割过程也会对区域的气候产生一定的影响<sup>[28]</sup>。除此而外,水库调度和跨流域调水灌溉等可以改变径流以及土壤含水量时空分布。人类滥砍滥伐、围湖造田、过度开采地下水,致使植被破坏、湖泊缩小消失、水土流失,导致森林水资源涵养空间被破坏、湿地面积急剧减小、森林与湿地调蓄能力降低,致使洪涝灾害发生。另一方面,伴随着人类生产和社会经济的发展,大气 CO<sub>2</sub> 等温室气体浓度显著增加,使大气化学成分发生变化,改变地球大气系统辐射平衡而引起气温升高、全球性降水增加、蒸发加大和水循环加快以及区域水循环变化。

这些人类活动改变土壤水和地下水的时空分配,引起地面太阳辐射反照率、地面粗糙度、不透水面积与蒸发、径流、下渗过程的变化,改变地面及植被状况并影响大气降水到达地面的分配,从而引起地面和大气之间水分能量交换的改变,对气候产生重要反馈,加剧水文循环的时空变异性与区域水资源系统的改变,影响陆地水循环过程。人类对水循环的这些过分作用,可能导致生态环境恶化,同时也使气候条件发生变化,极端灾害事件不断发生<sup>[29-35]</sup>。这就需要人们去探讨诸如人类用水活动对气候产生怎样的反馈?这种反馈如何影响陆地水循环过程与水资源变化?因此,需要从深入研究人类活动和环境变化下的响应模式,综合考虑自然和人类活动影响对陆地水循环演变及其气候与生态环境效应进行分析、认识陆地水循环演变及其在全球变化中的作用,为从水—生态—经济的角度管好水、用好水提供科学依据。

### 3 考虑人类用水活动的陆面水文模型与气候系统模式研究

观测分析和模式模拟是研究并揭示人类用水活动对气候的反馈及对陆地水循环影响的有效方法,陆面水文模型、区域气候模式与全球气候模式是评估和预估未来陆地水循环变化不可缺少的工具。陆地表面水量储存与通量交换调节陆面与大气界面过程,影响生态系统结构、功能、碳氮循环以及其他生物化学循环,控制淡水资源的供给。认识陆地水循环变化规律取决于我们理解和预报江河流域、陆地及全球尺度水循环的能力<sup>[36]</sup>。为了研究人类用水活动的气候效应及其对陆地水循环的影响,这些模式系统需要考虑人类活动的作用。以下针对这些模式系统在人类活动影响表示方面的进展进行凝练。

#### 3.1 陆面水文模型

大尺度水循环模拟研究需要陆面水文模型与地形、土壤、植被等地标数据以及气象驱动数据结合,应用于区域尺度、大陆和全球尺度。将水分垂向运移作为研究重点的水文气象学,关注地表水、土壤入渗—蒸散过程和地下水文过程规律的理解,为此开发出能够在一定程度上解决特定区域地表水—地下水耦合过程的模型。这些包括TOPMODEL (TOPgraphy based hydrological MODEL)<sup>[37,38]</sup>, SWAT (Soil and Water Assessment Tool)<sup>[39]</sup>, SHE (System Hydrological European)<sup>[40]</sup>, WEP (Water and Energy

transfer Process)<sup>[41]</sup>, VIC-Ground (Variable Infiltration Capacity-Ground)<sup>[42]</sup>, MODFLOW (Modular three-dimensional groundwater flow model)<sup>[43,44]</sup>, PGMS (Polygon-grid finite-difference Groundwater Modeling System)<sup>[45]</sup>和GSFLOW (Groundwater and Surface-water FLOW)<sup>[46]</sup>等。这些陆面水文模型在处理地表水、土壤水和地下水方面实现了2个或3个因素的耦合模拟。地下水与土壤水是陆地水循环系统中十分重要的连接纽带<sup>[47]</sup>,它们在气候系统中的作用在一些研究中隐式地考虑,如Chen等<sup>[48]</sup>和Niu等<sup>[49]</sup>的研究,这些工作尝试改进气候模式中土壤湿度的次网格非均匀性描述。由于土壤湿度的记忆性,中纬度地区月到季节尺度的降水模拟对初始土壤湿度极为敏感<sup>[50]</sup>;地下水拥有比土壤湿度更长的记忆性,在气候系统模式中合理表示将进一步提高气候模式在中纬度地区的季节预报能力。为此,Liang等<sup>[42]</sup>和谢正辉等<sup>[51]</sup>在非饱和土壤水流的数值计算方法<sup>[52]</sup>基础上,将地下水位的动态表示问题归结为饱和、非饱和流运动边界问题并用有限元集中质量法直接求解,发展了动态表示地下水位变化的陆面水文模块。进一步将运动边界问题通过数学变换化为固定边界问题求解,构建了能够动态表示地下水位变化的经济有效数值模型<sup>[53]</sup>。将其与区域气候模式耦合,建立了考虑地下水位动态变化的区域气候模式,并探讨了地下水的变化对东亚区域气候的影响,表明地下水在气候系统中的重要作用<sup>[54]</sup>,并为气候模式中地下水位的动态表示提供了基础。

随着人们对地下水在气候系统中所起作用重要性认识的不断深入,国内外学者已经尝试在陆面过程模型和气候系统模式中动态表示地下水位<sup>[42,54-61]</sup>。然而,目前用于全球与区域气候模拟中的陆面过程模式,缺乏考虑人类用水活动的作用,这些包括BATS (Biosphere Atmosphere Transfer Scheme)<sup>[62]</sup>, SiB (Simple Biosphere Model)<sup>[63]</sup>, VIC Variable Infiltration Capacity)<sup>[64-67]</sup>, IAP94 (The Institute of Atmospheric Physics land-surface model 94)<sup>[68,69]</sup>, LSM (Land Surface Model)<sup>[70]</sup>和CLM4 (Community Land Model 4)<sup>[71]</sup>等。为了研究调水灌溉、作物生长过程与种植制度的改变等人类活动对陆面大气之间水分和能量交换的影响,研究人员构建了考虑跨流域调水、地下水取用以及作物生长影响的陆面过程模型<sup>[2,16,72]</sup>。这些模型发展工作为我们研究人类用水活动的气候效应及其对陆地水循环影响提供了基础。作为最大可获得的淡水资源

和饮用水,以及农业和工业活动供水的主要来源<sup>[73]</sup>,地下水是全球水循环的关键部分,并在满足人类社会的基本需求中起重要作用。在干旱发生期间,所储存的地下水可提供缓冲应对水资源短缺,支撑基流供给河流与湿地,维持生态系统与生物多样性。然而地下水过度开采,引起水位下降,维持河流的基流不可持续<sup>[74,75]</sup>。为了理解地下水补给的变化及人类用水活动对地下水位变化的影响,全球尺度水文模型(Global Hydrological Models, GHMs)应当包括地下水侧向流动与地下水地表水相互作用描述<sup>[59,76,77]</sup>,特别是对于高分辨率的模拟<sup>[78-80]</sup>。由于缺乏全球范围水文信息<sup>[81]</sup>,典型的GHMs没有考虑侧向流<sup>[71,82]</sup>。为此,Xie等<sup>[83]</sup>基于Dupuit假设结合质量守恒原理,将地下水侧向流问题引起的土壤水与地下水相互作用的三维运动边界问题分解为垂直一维和水平二维问题,由此研发了考虑用于气候模拟的拟三维地下水侧向流模型。Sutanudjaja等<sup>[84]</sup>提出利用表面岩性的全球数据和数字高程用于含水层参数化,并由Vergnes等<sup>[85]</sup>将其应用于特定流域进行地下水模型构建,模拟取得了满意的结果<sup>[85,86]</sup>。Pelletier等<sup>[86]</sup>于2016年利用能够获得的地形、气候与地质数据,发展了包括土壤、完整风化层、沉积层厚度的全球高分辨率土壤数据集,为全球陆面过程模型、生态与水文模型提供有用的模型参数输入。

在陆面过程模式中合理表述生物物理与生物地球化学过程有助于理解陆地生态水文过程与陆气相互作用机制。Gao等<sup>[87,88]</sup>基于Stefan方程并应用在土柱计算冻结和融化过程的Stefan方程<sup>[89]</sup>计算土壤冻结融化界面,增加了活动变化的土壤冻结融化界面层、考虑其对于土壤温度的反馈,从而更加合理地模拟高寒区域冻融状况。陆面过程模式中考虑动态根系分布和水力再分配的过程,能够揭示根系动态分布和水力再分配对陆面碳-水循环过程的影响,并与地球系统模式耦合可以探讨根系动态分布的气候效应,增强植被-气候相互作用的理解<sup>[90]</sup>。土壤与河流中营养盐输送过程,是全球生物地球化学循环必不可少的重要环节,以氮排放和取水调节为主要特征的人类活动改变陆地生态水文过程,干扰土壤与河流中氮的迁移,进而影响全球氮循环与水环境。定量评估这些人类活动对全球河流无机氮输送的影响,不但能加深我们对人类活动干扰下的物质循环过程的认识,也有助于以可持续发展为目标有效保护河流生态环境。近日,刘

双等<sup>[91]</sup>将河流无机氮输送、河流水温计算以及以施肥、灌溉、取水调节为主的人类活动等参数化方案与陆面过程模型进行耦合,发展了包含人为扰动与河流无机氮输送的陆面过程模式,由此进行了一系列数值模拟试验,在全球尺度上研究了人为扰动对全球河流无机氮输送影响,从而为陆-海-气全耦合氮循环模拟提供了重要的陆面模拟平台基础。

基于上述工作,并在陆面过程模式CLM4.5的基础上,将考虑地下水侧向流动,耦合了自主发展的考虑地下水侧向流动<sup>[83,92-94]</sup>、人类取水活动<sup>[1,2,93,95]</sup>、考虑土壤冻结融化界面变化<sup>[87,88]</sup>以及河流氮输送过程<sup>[91]</sup>影响的方案,由此发展了包含这些过程影响的中国科学院陆面过程模式(Land Surface Model for Chinese Academy of Sciences, CAS-LSM)<sup>[94,96]</sup>,并实现与中国科学院地球系统模式的耦合。

### 3.2 全球气候模式

全球气候模式、地球系统模式,是理解过去气候与环境演变机理、预估未来潜在全球变化情景的重要工具<sup>[97]</sup>。国际上开展地球系统模式主要包括美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)开发的CESM(Community Earth System Model)、英国哈德莱中心的HadCM(Hadley Centre Coupled Model)、日本气象厅的MRI-CGCM(Meteorological Research Institute-Community Global Climate Model)、中国科学院大气物理研究所的CAS-FGOALS(The Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model for Chinese Academy of Sciences)和CAS-ESM(Earth System Model for Chinese Academy of Sciences)等十几个国家的科研机构发展的几十个参与国际比较计划的全球气候模式,他们在很大程度上代表了国际地球系统模式的发展水平与未来方向<sup>[98]</sup>。

在气候系统模式中,陆面过程模式作为非常重要的一个分量,是影响大气环流和气候变化的基本物理生化过程之一,在陆面-大气相互作用过程中扮演着重要的角色。人类活动如水资源在工农业生产生活中的使用及土地利用的改变、城市化过程、污染物排放等,都深刻影响着地球陆表圈层的物理生物化学等过程,进而影响地球系统各个圈层的状态。因此需要将前述典型人类活动陆面过程模式与地球气候系统模式耦合,能够综合、更好地刻画气候变暖情景下,人类典型活动对气候的反馈以及对陆地水循环的影响,为应对全球变化下水资源安全问题提供科学依据。

### 3.3 区域气候模式

区域气候模式能更精确描述地形和下垫面区域气候特征。为此发展了多个模式,如意大利的国际理论物理中心开发的 RegCM、德国的 CCLM、REMO 和 HIRAM, 澳大利亚的 CCAM, 美国的 WRF 和中国的 RIMES 等。区域气候模式可作为动力降尺度方法, 提供比驱动区域气候模式的观测或全球模式 GCM 边界条件更为详细的区域气候变化与变率, 以及异常气候时段和旱涝极端气候事件<sup>[99-105]</sup>, 能够更细致地刻画下垫面状况, 并通过模拟试验更好地理解气候系统中各成员间的联系<sup>[103, 106-109]</sup>。特别是能不同程度地模拟出季风区大尺度环流区域特征和演变过程, 再现其主要气候区降水的年际、季节和季节内变化及主要雨带的季节进退和降水的时空演变特征<sup>[110-120]</sup>。

利用区域陆气耦合模式探讨大气水—地表水—土壤水—地下水“四水”在气候变化及陆地水循环中的相互作用及其生态水文效应, 需要进一步考虑人类用水活动对气候的反馈。然而目前的区域气候模式缺乏从人类取水用水、地下水的侧向流动、土壤水地下水相互作用的系统论角度, 表示人类活动对土壤水、地下水及地表水的影响及其气候效应。为此 Zou 等<sup>[1, 2]</sup>将人类地表与地下水取用方案与区域气候模式耦合, 考虑了人类取水对区域气候的效应。将作物生长模型 CERES (Crop-Environment Resource Synthesis) (小麦、玉米和水稻) 与区域气候模式耦合, 发展了考虑中国区域主要作物小麦、玉米、水稻生长过程的区域气候模式<sup>[40, 72, 121]</sup>。取水调水主要用于农作物灌溉, 灌溉区域需要考虑作物的种植、生长、收割过程的影响。综合考虑这些典型人类活动的气候效应, 是未来模式模拟研究的重要方向。

## 4 观测分析与同化研究

陆地水循环研究不仅依赖陆面水文模型、区域与全球气候模式的模拟及预报, 也依赖于综合性、系统性的数据分析研究以及为模拟预测提供初始条件的数据同化研究。估测水循环要素的方法主要依赖观测分析, 地表及探空实测与卫星遥感观测、模式模拟、和数据同化。

地表实测在点尺度上具有很高的准确度, 例如地—气—水循环综合观测平台是研究水分能量交换各分量非常有效的地面观测手段, 可以对降水、湿度、土壤水含量、地下水位等水文要素和与能量

相关的其他要素进行综合的观测, 能够为揭示区域水分及能量的日变化、季节变化及典型年际变化的特征提供高精度的数据。

卫星遥感技术, 在区域和全球尺度上能够观测到全球范围内连续时空分布的诸多水循环关键要素, 并已经成为研究全球变化条件下水循环过程的关键手段。遥感技术可以把传统点范围地表实际测量的有限信息扩展到大尺度全球范围的空间信息<sup>[122]</sup>, 其主要原理是根据物体对电磁波谱具有不同反射率和不同发射率的特性, 在卫星上搭载可识别不同的陆地水循环变量的电磁传感器, 并对其进行定量估算。近年来美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 联合德国航空中心研制了搭载重力传感器的重力卫星 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), 通过观测地球时变重力场的变化估测陆地水储量, 为研究深层地球结构和对全球的陆地水储量时空变化提供了新的观测研究手段。人们利用遥感技术, 反演产生了各种尺度上的大范围、长周期的水文数据产品来定量估算水循环要素的时空变化情况, 产品包括: TRMM (The Tropical Rainfall Measuring Mission) 和 GPM (The Global Precipitation Measurement mission) 等全球降雨产品; MODIS (the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 反演的蒸散发产品和积雪产品; AMSR-E (The Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS), AMSR2 (the Advanced Earth Observing Satellite-II) 和 SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) 反演的土壤水分数据; 基于 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 及 GRACE-FO (Gravity Recovery and Climate Experiment-Follow) 重力卫星的陆地水储量数据集等, 极大地推进了人们对陆地水循环过程的认识和理解<sup>[123]</sup>。

遥感、卫星和雷达等观测的数据产品在空间上可能存在缺测, 且基于不同传感器的数据产品也可能性质不一致, 或单时间点的遥感数据反演缺乏时间连续性等。陆面过程模式及气候系统可以模拟计算出时空上连续、物理一致的水循环参数<sup>[99, 124]</sup>, 但气象强迫数据、模式的参数化方案以及模式参数的不确定性都可能造成模拟的误差。在陆面及气候系统模型的动力框架内, 融合不同来源和不同分辨率的直接与间接观测, 利用数据同化技术对模型进行校准, 以获取精度更高的时空连续一致的预报值, 是目前乃至将来解决通量观测与模拟中存在问题的一个有效方法。基于控制论、优化方法和误差估计理论的陆面数据同化技术起步于 20 世纪 90 年代末

期<sup>[125,126]</sup>,最初是一种为数值天气预报提供初始场的数据处理技术,现在已发展应用于地球系统的各个领域。通过对各种同化算法的比较和分析,发展基于多种同化方法的数据同化方案,提高研究区地表净辐射通量的预报精度,是未来利用数据同化方法获取区域乃至全球时空上连续一致的准确的地表净辐射预报值的一个重要研究方向<sup>[122]</sup>。

## 5 人类用水活动的气候反馈及其对陆地水循环的影响模拟研究

调水灌溉、作物种植收割和地下水开采利用等人类用水活动,对气候产生重要反馈并显著改变陆地水循环过程。这就亟需通过构建包含人类活动的陆面水文过程模型与气候系统模式,从用水影响下大气、土壤水、地表水和地下水相互作用这一完备耦合系统的角度,定量评估人类用水活动对陆地水循环过程的影响及其气候反馈(图2)。接下来从人类用水活动对陆地水循环过程及气候影响方面的典型问题进行探讨。

### 5.1 人类用水活动对陆地水循环的影响

为了缓解区域水资源短缺,人们通过建造调水工程调节水资源分布。中国南水北调中线工程受水区位于海河流域,计划从丹江口水库每年调水  $75 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,海河流域受水  $45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ <sup>[127,128]</sup>。Zou 等<sup>[1,2,129]</sup>通过发展考虑调水灌溉作用的区域气候模式 RegCM4 并基于调水灌溉分布进行敏感性试验,探讨了中国南水北调中线调水对受水区水循环过程的影响。如果调水用于灌溉,受水区地下水位有回升,能部分缓解海河流域地下水超采现状,流域内受水区沿线的平均土壤湿度有所增加。调水试验模拟的降水在流域内有所增加,但幅度不大,陆地表层土壤湿度相应增加。海河流域 850 hPa 高度的比湿变化不大。调水试验中流域外水量的输入不仅对受水区有轻微增湿,也引起了相应的降温效应。受水区土壤温度和底层大气温度在调水前后均有轻微下降,并且降温的空间分布基本与蒸散发、土壤湿度调水前后差异分布一致。表层土壤受气候反馈的影响大于深层土壤,因而冷湿效果相对更为明显。调水如果用于生产生活用水,则减少地下水超采。

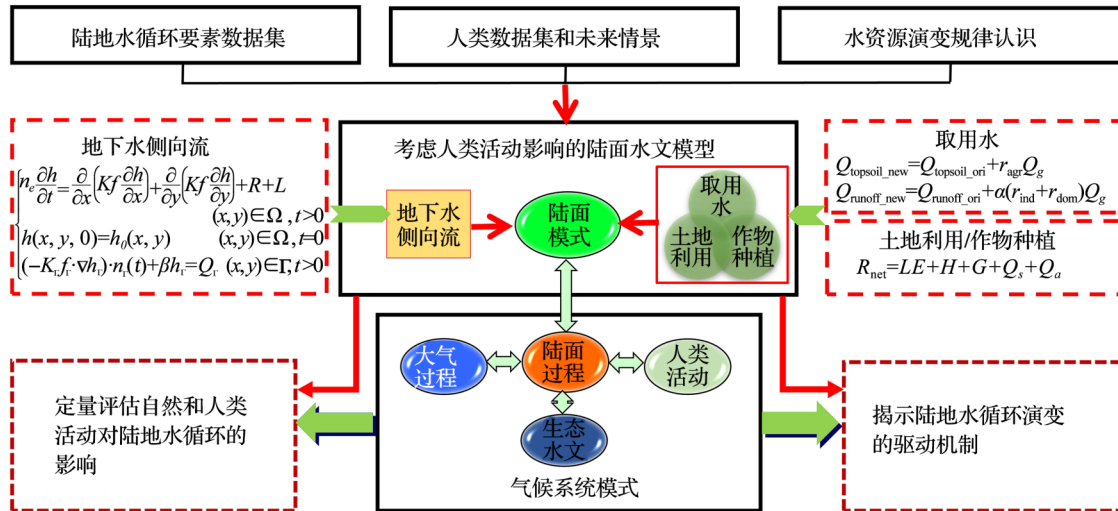


图2 人类用水活动的气候反馈及其对陆地水循环的影响研究示意图

Fig.2 Research on climate feedback of human water use and its impact on terrestrial water cycles

Zou 等<sup>[1,2,129]</sup>利用所发展考虑地下水开采影响的陆面过程模型和区域气候模式进行模拟试验,评估地下水开采的气候效应。受农业灌溉的作用,表层土壤湿度由于更多的有效降水进入土壤层而增湿。迅速下降的地下水位引起土壤层与地下含水层的水力联系减弱。随着地下水埋深的不断增加,土壤层对地下含水层的补给过程越来越接近于重力下泄,补给量也相应地接近于土壤底部的最大下

渗能力。因此,土壤湿度受土壤层上下边界通量的共同影响,其总体变化主要取决于由于灌溉引起的人渗量增加是否能抵消由于地下水位迅速下降引起的底层土壤变干的趋势。1970—2000年的地下水开采引起流域局地及周围区域气候的改变,地下水的开采量逐年增加,且被蒸发耗散,由地面向对流层底层的水汽传输也随之增加。增加的蒸散发会进一步增强局地的对流活动,从而改变区域内的

大气运动。大气湿度因为蒸散发增加而增加,从而增加了降水发生的概率,流域内以及流域以东的地区均呈现 850 hPa 大气增湿的现象,这与降水变化的空间分布是一致的。流域内及流域以东的盛行西风带下游地区均呈现降水增加的现象。另外,增加的降水中很大一部分源于对流降水,在流域东部的辽东地区对流性降水增加的比例相对较小。湿度条件的改变也引起了能量平衡的改变,冷却效应出现在流域内及邻近地区,且最明显的降温效果出现在流域平原区,流域以西地区也出现冷却效应,这与流域西部地区冬夏季均存在的北风差异有密切联系。

农作物是受人类活动影响最大的植被类型,其生长过程受到气候和人类灌溉、施肥等活动的共同影响,通过将考虑农作物生长过程的作物模型 CERES 与区域气候模式耦合,探究农作物生长过程对于区域气候的影响<sup>[130]</sup>。根据中国的农作物分布比例及耕作特征,邹靖<sup>[129]</sup>选取 CERES 系列玉米、小麦、水稻模型(CERES-Maize、Wheat、Rice)与区域气候模式 RegCM4 耦合,研究作物生长与气候的相互作用。耦合模型能够较好地模拟作物生长过程,叶面积指数的变化引起了冠层截流量和植被蒸腾的变化,同时引起反照率的变化,间接影响地表温度和能量循环的变化。

## 5.2 人类用水活动的气候效应评估

曾毓金等<sup>[92-94]</sup>利用考虑了人类用水及地下水侧向作用的陆面过程模型针对黑河流域探究了其对陆面生态水文过程的影响。地下水开采使黑河中游以及下游额济纳旗地区地下水水位显著变深,陆地水储量减少。由于地表水取水,黑河干流中下游河道水储量降低。灌溉导致黑河中游土壤湿度和潜热通量增加,地表温度和感热通量降低。地下水水位在 2003—2013 年呈线性下降趋势。在黑河流域,地下水侧向流可以补给由人类地下水开采导致的地下水漏斗。在该流域,地下水侧向补给量与地下水开采强度和地下水漏斗的深度关系不明显,但与地形关系较明显。在地形较平坦的区域,地下水漏斗更容易受到周围地下水的补给。

将上述构建的考虑人类地下水开发利用及地下水侧向流的陆面过程模型与地球系统模式耦合,进一步研究地下水侧向流动和地下水开采对关键气候要素的影响。结果表明,过去 40 年间人类地下水开采导致重度开采区的地下水水位下降,陆地水储量减少。对于典型超采区,如美国中部、中国华北和印

度北部地区,在现有地下水开采力度下,水资源不可持续利用。除了损耗可利用水资源之外,地下水灌溉会导致灌溉区土壤变湿,蒸散发增强,潜热通量增加,温度降低,感热通量降低。灌溉以及工业生活用水中的废水排放会导致地表产流增加。当考虑了人类地下水取水之后,在印度北部地区 850 hPa 等压面上,大气降温效应显著。在全球严重地下水开采利用区中,美国中部地区和中国华北地区的夏季降水有略微增加,这是由于地下水灌溉提高了土壤湿度、增强了蒸散发,并通过陆气耦合作用加强了对流性降水导致的;而印度北部地区降水减少,则可能是由于灌溉的降温效应减少了海陆热力差异,从而减弱了印度季风和季风带来的降水。

## 6 未来研究方向和重要的科学问题

前面讨论人类用水活动在陆地水循环的重要作用,总结了在观测分析和模式模拟的研究及进展。亟需在数据的构建、模式的研发和人类活动影响等科学问题的研究方面开展深入细致的工作。通过结合地面及遥感观测等手段和资料,研制陆地水循环各要素、多种人类活动资料以及植被地形等数据,构建包含人类活动的陆面水文模型、区域及全球气候模式系统,从用水影响下的大气、土壤水、地表水和地下水相互作用这一完备耦合系统的角度,定量评估气候变化与人类用水活动多重影响下的陆地水循环变化及其对水资源的影响。

陆地水循环是陆一气系统的重要组成部分。当前剧烈的人类用水活动已经显著地改变了大尺度水循环,定量评估人类用水活动的影响对认识区域水循环和水资源演变具有重要的科学意义和应用价值。然而,作为研究陆地水循环变化的重要工具,现有大尺度陆面水文模型对人类用水活动的影响考虑依然不足,使得应用模型模拟变化环境下陆地水循环变化面临挑战。因此,需要深入认识灌溉、生活和工业用水、水库调节、地下水开采利用等人类用水活动的变化规律及其影响水循环的机理,发展大尺度人类用水活动参数化方案,模拟和预估陆地水循环和水资源演变。

未来随着社会经济的不断飞速发展,人类用水活动日益强烈,预计将对陆地水循环产生更大的影响。这为开展人类用水活动对大尺度水循环和水资源的影响研究提供了天然的实验场。人类用水活动既改变了水循环,又受到水循环的制约,是水系统中独特而重要的变化过程。由于人一水系统

的复杂性,定量模拟和预估尚存在不少困难。认识水资源和经济社会发展的相互影响,面向国家重大需求,树立生态文明理念,为保障区域水安全、实现人一水和谐提供科技支撑,重点发展人类用水活动及其影响的定量观测与评估方法,加强遥感监测和科学大数据分析等新技术的应用;深化人类用水活动演变的基础理论,加强经济社会发展与水资源需求之间的关系研究,加强人一水系统的协同演化规律研究;提出区域水安全保障的解决方案,发展水系统综合评估模型,加强水资源需求趋势和水短缺风险预估,加强水—能源—粮食的关系和统筹管理研究。开发考虑人一水系统协同演化的水系统综合评估模型,预估区域水安全形势的演变趋势,将成为陆地水循环和水资源研究的长期重要任务。这对于加深对水循环过程与气候变化的理解、提高地球系统模式对水文气象要素的模拟和预测水平、定量评估人类用水活动对气候的反馈及其对陆地水循环的影响、并为适应气候变化及可持续发展的水资源管理提供科学依据等方面,具有重要的科学意义和应用价值。

#### 参考文献(References):

- [1] Zou Jing, Xie Zhenghui, Yu Yan, *et al.* Climatic responses to anthropogenic groundwater exploitation: A case study of the Haihe River Basin, Northern China [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(7/8): 2 125-2 145.
- [2] Zou Jing, Xie Zhenghui, Zhan Chesheng, *et al.* Effects of anthropogenic groundwater exploitation on land surface processes: A case study of the Haihe River Basin, Northern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 524: 625-641.
- [3] Piao Shilong, Ciais Philippe, Huang Yao, *et al.* The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. *Nature*, 2010, 467(7 311): 43-51.
- [4] Lei Jing. Water resources evolution trend of Yangtze River Basin under influences of human activities and countermeasures [J]. *Yangtze River*, 2014, 45(7): 7-10. [雷静. 人类活动影响下长江流域水资源演变趋势及对策 [J]. 人民长江, 2014, 45(7): 7-10.]
- [5] Stocker Thomas F, Qin Dahe, Plattner Gian-Kasper, *et al.* Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [6] Wang Hao. The construction of water ecological civilization is a necessary way to solve the ecological problems in Shiyang River Basin [J]. *China Water Resources*, 2013, (5): 19-21. [王浩. 水生态文明建设是解决石羊河流域生态问题的必要途径 [J]. 中国水利, 2013, (5): 19-21.]
- [7] Wang Yan, Ding Yongjian, Ye Baisheng, *et al.* Causes of water resources change in the Yellow River and Yangtze River Basins [J]. *Science in China (Series D)*, 2013, 43(7): 1 207-1 219.
- [8] Tang QiuHong, Oki Taikan, Kanae Shinjiro, *et al.* A spatial analysis of hydro-climatic and vegetation condition trends in the Yellow River Basin [J]. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2008, 22(3): 451-458.
- [9] Zhang Jianyun, Wang Guoqing. Study on the Impact of Climate Change on Hydrology and Water Resources [M]. Beijing: Science Press, 2007. [张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [10] Jia Yangwen, Wang Hao. An introduction to the research on "Evolutionary laws and dualistic evolutionary model of water resources in the Yellow River Basin" [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2006, 37(2): 45-52. [贾仰文, 王浩. "黄河流域水资源演变规律与二元演化模型"研究成果简介 [J]. 水利水电技术, 2006, 37(2): 45-52.]
- [11] Zhai Panmao, Zhang Xuebin, Wan Hui, *et al.* Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(7): 1 096-1 108.
- [12] Zhang Zengxin, Chen Xi, Xu Chongyu, *et al.* Evaluating the non-stationary relationship between precipitation and streamflow in nine major basins of China during the past 50 years [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(1/2): 81-93.
- [13] Cong Zhentao, Yang Dawen, Bing Gao, *et al.* Hydrological trend analysis in the Yellow River Basin using a distributed hydrological model [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): 335-345.
- [14] Yang Dawen, Li Chong, Hu Heping, *et al.* Analysis of water resources variability in the Yellow River of China during the last half century using historical data [J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(6). DOI:10.1029/2003WR002763.
- [15] Taylor Richard G, Scanlon Bridget, Döll Petra, *et al.* Ground water and climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 322.
- [16] Chen Feng, Xie Zhenghui. Effects of crop growth and development on land surface fluxes [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(4): 927-944.
- [17] Hu Heping, Tang QiuHong, Lei Zhidong, *et al.* Runoff-evaporation hydrological model for arid plain oasis, 1. The model structure [J]. *Advance in Water Science*, 2004, 15(2): 140-145. [胡和平, 汤秋鸿, 雷志栋, 等. 干旱区平原绿洲散耗型水文模型——I 模型结构 [J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 140-145.]
- [18] Chen Yaning, Xu Zongxue. Possible impacts of global climate change on water resources of Tarim River Basin in Xinjiang [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(11): 1 047-1 053. [陈亚宁, 徐宗学. 全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的可能性影响 [J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34(11): 1 047-1 053.]
- [19] Xiao Honglang, Cheng Guodong, Li Caizhi, *et al.* Eco-hydrological observational experiments of the Heihe River Basin and integrated eco-water management research at watershed scale [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(7): 666-670. [肖洪浪, 程国栋, 李彩芝, 等. 黑河流域生态—水文观测试验与水—生态集成管理研究 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(7):



- 666-670.]
- [20] Xia Jun, Sun Xuetao, Tan Ge. The progress and prospect of water cycle study in western China[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(1): 58-67. [夏军,孙雪涛,谈戈. 中国西部流域水循环研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 58-67.]
- [21] Zhao Wenzhi, Cheng Guodong. A review of some problems in the study of eco-hydrological processes in arid areas[J]. *Science Bulletin*, 2001, 46(22): 1 851-1 857. [赵文智,程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J]. 科学通报, 2001, 46(22): 1 851-1 857.]
- [22] Wang Hao, You Jinjun. Advancements and development course of research on water resources deployment[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(10): 1 168-1 175. [王浩,游进军. 水资源合理配置研究历程与进展[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1 168-1 175.]
- [23] Liu Chunzhen. The issues in the impact study of climate change on the terrestrial hydrological cycle[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(1): 115-119. [刘春臻. 气候变化对陆地水循环影响研究的问题[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 115-119.]
- [24] Döll Petra, Siebert Stefan. Global modeling of irrigation water requirements[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(4): 8-1-8-10.
- [25] Food and Agriculture Organization. World Agriculture: Towards 2015/2030: An FAO Perspective[M]. London: Earthscan Publications Ltd., 2003.
- [26] Cai Yunlong. Problems of farmland conservation in the rapid growth of China's economy[J]. *Resources Science*, 2000, 22(3): 24-28. [蔡运龙. 中国经济高速发展中的耕地问题[J]. 资源科学, 2000, 22(3): 24-28.]
- [27] Mueller Nathaniel D, Gerber James S, Johnston Matt, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management[J]. *Nature*, 2012, 490(7 419): 254.
- [28] Feng Chen, Xie Zhenghui. Effects of crop growth and development on regional climate: A case study over east asian monsoon area[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38:2 291-2 305.
- [29] Ye Duzheng, Zeng Qingcun, Guo Yufu. Contemporary Climate Research[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991. [叶笃正,曾庆存,郭裕福. 当代气候研究[M]. 北京: 气象出版社, 1991.]
- [30] Wang Huijun, Zeng Qingcun, Zhang Xuehong. Numerical simulation of climate change caused by doubling CO<sub>2</sub> content[J]. *Science in China(Series B)*, 1992, (6): 663-672. [王会军,曾庆存,张学洪. CO<sub>2</sub>含量加倍引起的气候变化的数值模拟研究[J]. 中国科学:B辑, 1992, (6): 663-672.]
- [31] Shi Yafeng. Effects of Climate Change on Water Resources in Northwest and North China[M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1995. [施雅风. 气候变化对西北华北水资源的影响[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1995.]
- [32] Liu Changming, He Xiwu. China's Water Strategy for the 21st Century[M]. Beijing: Science Press, 1996. [刘昌明,何希吾. 中国21世纪水问题方略[M]. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [33] Chen Yaning. Resource and environment and regional sustainable development of Tarim Basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1999, 13(1): 11-15. [陈亚宁. 塔里木盆地资源环境与区域可持续发展[J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13(1): 11-15.]
- [34] Lü Shihua, Chen Yuchun. Simulation of summer precipitation over North China in 1991 and 1994 with a NCAR regional climate model[J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(4): 632-640. [吕世华,陈玉春. 区域气候模式对华北夏季降水的气候模拟[J]. 高原气象, 1999, 18(4): 632-640.]
- [35] Chen Yiyu. Global change and sustainable social development[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(1): 1-3. [陈宜瑜. 全球变化与社会可持续发展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 1-3.]
- [36] Clark Martyn P, Fan Ying, Lawrence David M, et al. Improving the representation of hydrologic processes in earth system models[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 5 929-5 956.
- [37] Beven Keith J, Kirkby Michael J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un Modèle À Base Physique De Zone D'appel Variable De L'hydrologie Du Bassin Versant[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1979, 24(1): 43-69.
- [38] Jia Yangwen, Wang Hao, Yan Denghua. Distributed model of hydrological cycle system in Heihe River Basin[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(5): 534-542. [贾仰文,王浩,严登华. 黑河流域水循环系统的分布式模拟(1)——模型开发与验证[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 534-542.]
- [39] Arnold Jeffrey G, Allen Peter M, Bernhardt Gilbert. A comprehensive surface-groundwater flow model[J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 142(1): 47-69.
- [40] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the european hydrological system—Système hydrologique Européen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system[J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 87(1): 45-59.
- [41] Jia Yangwen, Ni Guangheng, Kawahara Yoshihisa, et al. Development of WEP model and its application to an urban watershed[J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(11): 2 175-2 194.
- [42] Liang X, Xie Z H, Huang M Y. A New Parameterization for surface and groundwater interactions and its impact on water budgets with the Variable Infiltration Capacity (VIC) land surface model[J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 2003, 108(D16). DOI: 10.1029/2002JD003090.
- [43] McDonald Michael G, Harbaugh Arlen W. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model[M]. Reston: US Geological Survey Reston, 1988.
- [44] Harbaugh Arlen W, McDonald Michael G. Programmer's Documentation for MODFLOW-96, an Update to the US Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model[R]. US Geological Survey, Branch of Information Services, 1996.DOI: 10.3133/ofr96486.
- [45] Chen Chongxi, Hu Litang, Wang Xusheng. Introduction to groundwater flow simulation system (PGMS 1.0)[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(6): 135-136. [陈崇

- 希, 胡立堂, 王旭升. 地下水模拟系统 PgmS(1.0 版)简介[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 135-136.]
- [46] Markstrom Steven L, Niswonger Richard G, Steven R R, *et al.* GSFLOW-Coupled ground-water and surface-water FLOW model based on the integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005) [J]. *US Geological Survey Techniques and Methods*, 2008, 6: 240.
- [47] Hu Litang, Wang Zhongjing, Zhao Jianshi, *et al.* Advances in the interactions and integrated model between surface water and groundwater[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(1): 54-59. [胡立堂, 王忠静, 赵建世, 等. 地表水和地下水相互作用及集成模型研究[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 54-59.]
- [48] Chen Ji, Kumar Praveen. Topographic Influence on the seasonal and interannual variation of water and energy balance of basins in North America[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(9): 1989-2014.
- [49] Niu Guoyue, Yang Zongliang. The versatile integrator of surface atmospheric processes: Part 2: Evaluation of three topography-based runoff schemes [J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 38(1/2): 191-208.
- [50] Koster R D, Suarez M J, Heiser M. Variance and predictability of precipitation at seasonal-to-interannual timescales [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2000, 1(1): 26-46.
- [51] Xie Zhenghui, Liang Xu, Zeng Qingcun. A parameterization of groundwater table in a land surface model and its applications [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(3): 374-384. [谢正辉, 梁旭, 曾庆存. 陆面过程模式中地下水位的参数化及初步应用[J]. 大气科学, 2004, 28(3): 374-384.]
- [52] Xie Zhenghui, Zeng Qingcun, Dai Yongjiu, *et al.* Numerical simulation of unsaturated flow problems [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(2): 175-180. [谢正辉, 曾庆存, 戴永久, 等. 非饱和和流问题的数值模拟研究[J]. 中国科学: D辑, 1998, 28(2): 175-180.]
- [53] Yang Hongwei, Xie Zhenghui. A new method to dynamically simulate groundwater table in land surface model VIC [J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(11): 819-825.
- [54] Yuan Xing, Xie Zhenghui, Zheng Jing, *et al.* Effects of water table dynamics on regional climate: A case study over east asian monsoon area [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D21). DOI:10.1029/2008JD010180.
- [55] Maxwell Reed M, Miller Norman L. Development of a coupled land surface and groundwater model [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(3): 233-247.
- [56] Yeh Pat J F, Eltahir Elfatih A B. Representation of water table dynamics in a land surface scheme. Part I: Model development [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(12): 1861-1880.
- [57] Tian Xiangjun, Xie Zhenghui, Zhang Shenglei, *et al.* A subsurface runoff parameterization with water storage and recharge based on the boussinesq-storage equation for a land surface model [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, 49(6): 622-631.
- [58] Yu Zhongbo, Pollard David, Li Cheng. On continental-scale hydrologic simulations with a coupled hydrologic model [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(1/2): 110-124.
- [59] Fan Ying, Miguez-Macho Gonzalo, Weaver Christopher P, *et al.* Incorporating water table dynamics in climate modeling: 1. Water table observations and equilibrium water table simulations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D10). DOI:10.1029/2006JD008111.
- [60] Niu Guoyue, Yang Zongliang, Dickinson Robert E, *et al.* Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with gravity recovery and climate experiment data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D7). DOI:10.1029/2006JD007522.
- [61] Bao Yan, Li Yaohui, Chen Rensheng, *et al.* A suppositional experiment about the impact of groundwater drawdown on regional climate change in Northwest China [J]. *Arid Zone Research*, 2007, 24(4): 434-440. [鲍艳, 李耀辉, 陈仁升, 等. 地下水位下降对区域气候影响的虚拟试验[J]. 干旱区研究, 2007, 24(4): 434-440.]
- [62] Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. Biosphere-atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model [Z]. NCAR Technical Note NCAR/TN-387+STR. DOI:10.5065/D67W6959.
- [63] Xue Y, Sellers P J, Kinter J L, *et al.* A simplified biosphere model for global climate studies [J]. *Journal of Climate*, 1991, 4(3): 345-364.
- [64] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, *et al.* A simple hydrologically based model of land-surface water and energy fluxes for general-circulation models [J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 1994, 99(D7): 14415-14428.
- [65] Liang X, Xie Z H. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models [J]. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(9/10): 1173-1193.
- [66] Xie Zhenghui, Su Fengge, Liang Xu, *et al.* Applications of a surface runoff model with Horton and Dunne Runoff for VIC [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(2): 165-172.
- [67] Xie Zhenghui, Liu Qian, Yuan Fei, *et al.* Macro-scale land hydrological model based on 50 km×50 km grids system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(5): 76-82. [谢正辉, 刘谦, 袁飞, 等. 基于全国 50 km×50 km 网格的大尺度陆面水文模型框架[J]. 水利学报, 2004, 35(5): 76-82.]
- [68] Dai Yongjiu, Zeng Qingcun. A land surface model (IAP94) for climate studies part I: Formulation and validation in off-line experiments [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, 14(4): 433-460.
- [69] Eagleson P S. Ecohydrology: Darwinian expression of vegetation form and function [J]. *EOS Transactions American Geophysical Union*, 2004, 84(35): 345-345.
- [70] Bonan Gordon B. Land Surface Model (LSM Version 1.0) for Ecological, Hydrological, and Atmospheric Studies: Technical Description and Users Guide [Z]. Technical Note. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, United State, 1996.
- [71] Lawrence David, Oleson Keith W, Flanner Mark G, *et al.* Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the community land model [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2011, 3(1): 365-375.

- [72] Chen F, Xie Z. Effects of crop growth and development on regional climate: A case study over East Asian monsoon area[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38(11/12): 2 291-2 305.
- [73] Wada Y, Wisser D, Bierkens Marc F P. Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources[J]. *Earth System Dynamics Discussions*, 2014, 5(1): 15-40.
- [74] Konikow Leonard F. Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea-level rise[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(17): 245-255.
- [75] Gleeson Tom, Wada Yoshihide, Bierkens Marc F P, et al. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint [J]. *Nature*, 2012, 488(7 410): 197-200.
- [76] Bierkens Marc F P, van den Hurk Bart J J M. Groundwater convergence as a possible mechanism for multi-year persistence in rainfall[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(2): L02402. DOI:10.1029/2006GL028396.
- [77] Schaller Morgan F, Fan Ying. River basins as groundwater exporters and importers: Implications for water cycle and climate modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D4). DOI:10.1029/2008JD010636.
- [78] Wood Eric F, Roundy Joshua K, Troy Tara J, et al. Reply to comment by Keith J. Beven and Hannah L. Cloke On "Hyper-resolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water"[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(1). DOI:10.1029/2011WR010982.
- [79] Fan Y, Li H, Miguez Macho G. Global patterns of groundwater table depth[J]. *Science*, 2013, 339(6 122): 940-943.
- [80] Krakauer Nir Y, Li Haibin, Ying Fan. Groundwater flow across spatial scales: Importance for climate modeling[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(3): 156-166.
- [81] Gleeson Tom, Moosdorf Nils, Hartmann Jens, et al. A glimpse beneath Earth's surface: GLobal Hydrogeology MaPS (GLHYMPS) of permeability and porosity [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(11): 3 891-3 898.
- [82] Niu Guoyue, Yang Zongliang, Mitchell Kenneth E, et al. The community noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D12). DOI:10.1029/2010JD015140.
- [83] Xie Zhenghui, Di Zhenhua, Luo Zhendong, et al. A quasi-three-dimensional variably saturated groundwater flow model for climate modeling[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(1): 27-46.
- [84] Sutanudjaja Edwin H, Van Beek L P H, De Jong Steven Michael, et al. Large-scale groundwater modeling using global datasets: A test case for the rhine-meuse basin[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15: 2 913-2 935.
- [85] Vergnes J P, Decharme B, Alkama R, et al. A simple groundwater scheme for hydrological and climate applications: Description and offline evaluation over france[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(4): 1 149-1 171.
- [86] Pelletier Jon D, Broxton Patrick D, Hazenberg Pieter, et al. A gridded global data set of soil, intact regolith, and sedimentary deposit thicknesses for regional and global land surface modeling[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2016, 8(1): 41-65.
- [87] Gao Junqiang, Xie Zhenghui, Wang Aiwen, et al. Numerical simulation based on two-directional freeze and thaw algorithm for thermal diffusion model[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, 37(11): 1 467-1 478.
- [88] Gao Junqiang, Xie Zhenghui, Wang Aiwen, et al. A new frozen soil parameterization including frost and thaw fronts in the community land model[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, 11(3): 659-679.
- [89] Jumikis A R. *Thermal Geotechnics*[M]. New Brunswick: Rutgers University Press, 1978.
- [90] Wang Y, Jia B, Xie Z. Impacts of hydraulic redistribution on eco-hydrological cycles: A case study over the Amazon Basin [J]. *Science in China(Series D)*, 2018, 61(9): 1 330-1 340.
- [91] Liu Shuang, Xie Zhenghui, Zeng Yujin, et al. Effects of anthropogenic nitrogen discharge on dissolved inorganic nitrogen transport in global rivers[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(4): 1 493-1 513.
- [92] Zeng Yujin, Xie Zhenghui, Yu Yan, et al. Ecohydrological effects of stream-aquifer water interaction: A case study of the Heihe River Basin, Northwestern China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(6): 2 333-2 352.
- [93] Zeng Yujin, Xie Zhenghui, Yu Yan, et al. Effects of anthropogenic water regulation and groundwater lateral flow on land processes [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2016, 8(3): 1 106-1 131.
- [94] Zeng Yujin, Xie Zhenghui, Liu Shuang, et al. Global land surface modeling including lateral groundwater flow [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10(8): 1 882-1 900.
- [95] Zeng Yujin, Xie Zhenghui, Zou Jing. Hydrologic and climatic responses to global anthropogenic groundwater extraction[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(1): 71-90.
- [96] Xie Z, Liu S, Zeng Y, et al. A high-resolution land model with groundwater lateral flow, water use, and soil freeze-thaw front dynamics and its applications in an endorheic basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(14): 7 204-7 222.
- [97] Zeng Qingcun, Zhou Guangqing, Pu Yifen, et al. Research on the earth system dynamic model and some related numerical simulations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 653-690. [曾庆存,周广庆,浦一芬,等.地球系统动力学模式及模拟研究[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 653-690.]
- [98] Wang Bin, Zhou Tianjun, Yu Yongqiang. A perspective on Earth system model development[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(6): 857-869. [王斌,周天军,俞永强.地球系统模式发展展望[J]. *气象学报*, 2008, 66(6): 857-869.]
- [99] Dickinson Robert E, Errico Ronald M, Giorgi Filippo, et al. A regional climate model for the western United States[J]. *Climate Change*, 1989, 15(3): 383-422.
- [100] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. Development of a 2Nd-

- generation regional climate model (Regcm2).1. Boundary-layer and radiative-transfer processes [J]. *Monthly Weather Review*, 1993, 121(10): 2 794-2 813.
- [101] Christensen Jens H, Christensen Ole B. Climate modelling: Severe summertime flooding in Europe [J]. *Nature*, 2003, 421(6 925): 805-806.
- [102] Leung L R, Yun Qian, Bian Xindi, *et al.* Hydroclimate of the Western United States based on observations and regional climate simulation of 1981-2000. Part II: Mesoscale ENSO anomalies [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(12): 1 892-1 911.
- [103] Wang Yuqing, Leung L R, Mcgregor John L, *et al.* Regional climate modeling: Progress, challenges, and prospects [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(6): 1 599-1 628.
- [104] Fan Lijun, Fu Congbin, Chen Deliang. Review on creating future climate change scenarios statistical downscaling techniques [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 320-329. [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.]
- [105] Seneviratne Sonia I, Lüthi Daniel, Litschi Michael, *et al.* Land-atmosphere coupling and climate change in Europe [J]. *Nature*, 2006, 443(7 108): 205.
- [106] Giorgi Filippo. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model [J]. *Journal of Climate*, 1990, 3(9): 941-963.
- [107] Christensen Ole B, Christensen Jens H, Machenhauer Benner, *et al.* Very high-resolution regional climate simulations over scandinavia—Present climate [J]. *Journal of Climate*, 1998, 11(12): 3 204-3 229.
- [108] Hong Song-You, Leetmaa Ants. An evaluation of the NCEP RSM for regional climate modeling [J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(2): 592-609.
- [109] Roads J, Chen S C, Kanamitsu M. US regional climate simulations and seasonal forecasts [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D16). DOI: 10.1029/2002JD002232.
- [110] Lü Shihua, Chen Yuchun. The influence of Northwest China afforestation on regional climate [J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(3): 416-424. [吕世华, 陈玉春. 西北植被覆盖对我国区域气候变化影响的数值模拟 [J]. *高原气象*, 1999, 18(3): 416-424.]
- [111] Tang Jianping, Su Bingkai, Zhao Ming, *et al.* Long term climate change numerical simulation in East Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(6): 752-763. [汤剑平, 苏炳凯, 赵鸣, 等. 东亚区域气候变化的长期数值模拟试验 [J]. *气象学报*, 2004, 62(6): 752-763.]
- [112] Fu Congbin, Wang Shuyu, Xiong Zhe, *et al.* Regional climate model intercomparison project for Asia [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(2): 257-266.
- [113] Liu Yiming, Ding Yihui, Li Qingquan. 10-year hindcasts and assessment analysis of summer rainfall over China from regional climate model [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(Suppl.1): 41-47. [刘一鸣, 丁一汇, 李清泉. 区域气候模式对中国夏季降水的 10 年回报试验及其评估分析 [J]. *应用气象学报*, 2005, 16(增刊1): 41-47.]
- [114] Zhang Dongfeng, Gao Xuejie, Zhao Zongci, *et al.* Simulation of climate in China by RegCM3 model [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(3): 119-121. [张冬峰, 高学杰, 赵宗慈, 等. RegCM3 区域气候模式对中国气候的模拟 [J]. *气候变化研究进展*, 2005, 1(3): 119-121.]
- [115] Ding Y, Shi X, Liu Y, *et al.* Multi-year simulations and experimental seasonal predictions for rainy seasons in China by using a nested regional climate model (RegCM\_NCC). Part I: Sensitivity study [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(3): 323-341.
- [116] Hu Yamin, Ding Yihui. The progress of RCMs simulation on East Asia region [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(9): 956-964. [胡娅敏, 丁一汇. 东亚地区区域气候模拟的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(9): 956-964.]
- [117] Qian Yun, Leung L R. A long-term regional simulation and observations of the hydroclimate in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D14). DOI: 10.1029/2006JD008134.
- [118] Shi Xueli, Xie Zhenghui, Liu Yiming, *et al.* Implementation of a surface runoff model with horton and dunne mechanisms into the regional climate model RegCM\_NCC [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(5): 750-764.
- [119] Feng Jinming, Fu Congbin. Inter-comparison of long-term simulations of temperature and precipitation over China by different regional climate models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(5): 805-814. [冯锦明, 符淙斌. 不同区域气候模式对中国地区温度和降水的长期模拟比较 [J]. *大气科学*, 2007, 31(5): 805-814.]
- [120] Huang Jianbin, Zhu Jinhong, Li Zhenhua. Numerical simulations of summer precipitation in China during 1951-2000 using a regional climate model [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(3): 351-358. [黄建斌, 朱锦红, 李振华. 用区域气候模式对 1951—2000 年我国夏季降水的模拟 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2007, 43(3): 351-358.]
- [121] Tsuji G Y, Uehara G, Balas S. DSSAT v3 [Z]. Honolulu, Hawaii: University of Hawaii, 1994.
- [122] Zhao Lifang, Shen Zhanfeng, Li Chunming, *et al.* The progress introduction on the study of surface net radiation flux observation, simulation, and assimilation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(1): 24-36. [赵丽芳, 沈占锋, 李春明, 等. 地表净辐射通量观测、模拟和同化的研究进展 [J]. *遥感学报*, 2019, 23(1): 24-36.]
- [123] Tang Qiuhong, Durand Michael, Lettenmaier Dennis P, *et al.* Satellite-based observations of hydrological processes [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(14): 3 661-3 667.
- [124] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, *et al.* A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation [J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 676-705.
- [125] Talagrand Olivier. Assimilation of observations, an introduction (Gtspecial issue) data assimilation in meteorology and oceanography: Theory and practice [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1997, 75(1B): 191-209.

- [126] Daley Roger. Atmospheric Data Analysis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [127] Commission Changjiang Water Resources. Overall Planning for the Middle Route of South-To-North Water Diversion Project [Z]. 2001. [长江水利委员会. 南水北调中线工程规划总体规划[Z]. 2001.]
- [128] Commission Changjiang Water Resources. Project Planning of Middle Route of South-To-North Water Diversion Project, Special Topic 2: Research On Water Supply Regulation and Storage [Z]. 2001. [长江水利委员会. 南水北调中线工程规划, 专题 2: 供水调度与调蓄研究[Z]. 2001.]
- [129] Zou Jing. Effects of Groundwater Exploitation and Crop Growth on Regional Climate [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. [邹靖. 地下水开采及农作物生长过程对区域气候的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.]
- [130] Zou Jing, Xie Zhenghui, Zhan Chesheng. Coupling of a regional climate model with a crop development model and evaluation of the coupled model across China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(5): 527.

## Research on Climate Feedback of Human Water Use and Its Impact on Terrestrial Water Cycles —Advances and Challenges\*

Xie Zhenghui<sup>1,2,3</sup>, Chen Si<sup>1,2,3</sup>, Qin Peihua<sup>1,2</sup>, Jia Binghao<sup>1,2</sup>, Xie Jinbo<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Beijing 100029, China; 2.Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The terrestrial water cycle is the mutual transformation of surface and near-surface water, which controls the supply of fresh water resources. It is affected by human activities, solar radiation and gravity, as well as climate and environmental conditions. Inter-basin water transfer, irrigation, crop cultivation and harvesting, exploitation of groundwater water and other human activities lead to the change of spatial and temporal distribution of soil moisture, the underground water level, surface albedo, surface evaporation, as well as water and energy exchange between land surface and atmosphere. Human water use generates important feedback on the climate and changes the processes of the terrestrial water cycle significantly. The spatial and temporal distribution of precipitation in China is uneven. In addition, human activities further exacerbate the fragility of water resources and the contradiction between supply and demand, posing a serious challenge to the sustainable development of social economy. Therefore, understanding the laws and mechanisms of terrestrial water cycle change is very important for water resources utilization and human sustainable development. From the perspective of climate change and human activities, this paper summarized the impact of human activities on terrestrial water cycle and the progress of climate feedback research. It is urgent to consider the evolution of terrestrial water cycle and its climate under the dual impact of natural and human activities, and develop the large-scale land surface hydrological models and climate models with human water use, crop planting and irrigation, lateral groundwater flow. From the perspective of a fully coupled system, we need quantitatively to assess the climate feedback of human water use and its impact on the terrestrial water cycle process, and to explore its mechanism. We need to distinguish the contribution of human water activities and global climate change to the evolution of terrestrial water cycle in the context of climate change, and to propose water resources management strategies to address climate change.

**Key words:** Human water use; Climate change; Terrestrial water cycle.

\* **Foundation item:** Project supported by the Key Projects of National Natural Science Foundation of China "Climate feedback of human water use and its impact on China's terrestrial water cycle" (No. 41830967); The Key Research Program of Frontier Science of Chinese Academy of Sciences "Land surface hydrological model considering the impact of human activities and the development of global climate model and its application in interdecadal hydrological prediction" (No. QYZDY-SSW-DQC012).

**First author:** Xie Zhenghui (1963-), male, Changsha City, Hunan Province, Professor. Research areas include land surface model development and land-atmosphere coupling study. **E-mail:**zxie@lasg.iap.ac.cn