



项目批准号	41830967
申请代码	D0502
归口管理部门	
收件日期	



20230241830967

国家自然科学基金 资助项目结题/成果报告

资助类别： 重点项目

亚类说明： _____

附注说明： 天气、气候与大气环境过程、变化及其机制

项目名称： 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

负责人： 谢正辉 BRID: 08891.00.76362

电子邮件： zxie@lasg.iap.ac.cn 电话： 010-82995179

依托单位： 中国科学院大气物理研究所

联系人： 李慧群 电话： 010-82995409

直接费用： 305.0000（万元） 执行年限： 2019.01-2023.12

填表日期： 2024年01月08日

国家自然科学基金委员会制（2023年）



项目摘要

中文摘要:

调水灌溉、作物种植收割、地下水开采利用等人类用水活动,引起土壤湿度、地下水位、地表蒸发、地表反照率等时空分布的改变,以及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。本项目拟针对中国区域,构建考虑人类取水用水、作物种植与灌溉、地下水侧向流动的大尺度陆面水文过程模型与区域气候模式,从用水影响下的大气、土壤水、地表水、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中国陆地水循环的影响,预估未来变化环境下中国陆地水循环特征及变化,评估用水与气候情景下中国水资源状况。这既是前沿科学问题也有重要的国家需求,对于增加气候变化与水循环过程的理解、提高地球系统模式对水文气象模拟和预测水平具有重要的科学意义和应用价值,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。

Abstract:

Climate feedbacks of human activities of water utilization and their impacts on the terrestrial water cycle over China. Human activities of water utilization including water transfer for irrigation, crop planting and harvesting, development and utilization of water resources, causing changes in the spatial and temporal distributions of soil moisture, groundwater level, surface evapotranspiration, surface albedo, as well as changes in water and energy exchanges between the land surface and the atmosphere, will have an important feedback on the climate, and significantly alter the terrestrial water cycle. This project intends to construct a large scale land hydrological process model and a regional climate model over China, considering anthropogenic water withdrawal and consumption, irrigation and crop planting, groundwater lateral flow, and quantitatively assess how the utilization of water for human activities can affect the regional climate and the terrestrial water cycle under the closely coupled system among atmosphere, soil moisture, surface water and groundwater with the effects of water utilization, and explore the mechanism simultaneously. Also the project will distinguish the impact of human activities and climate change on China's terrestrial water cycle, estimate the future characteristics and changes of China's terrestrial water cycle, and assess water shortage in China under the water consumption and future climate scenarios. This is cutting-edge scientific issues and urgently needed by our country. The project is of significance in science and application for strengthening the understanding of climate change and the water cycle, and improving the hydro-meteorological simulations and projections using earth system models. This project will also provide a scientific basis for adaption to climate change and management of sustainable development of water resources.

关键词 (用分号分开): 陆面过程参数化; 陆气交换; 水分循环; 区域气候模式;

Keywords (separated by;): Parameterization of land surface process; Exchanges between land surface and atmosphere; Water cycle; Regional climate model;



结题摘要

中文摘要（对项目的背景、主要研究内容、重要结果、关键数据及其科学意义等做简单概述）：

调水灌溉、地下水开采利用等人类用水活动，引起土壤湿度、地下水位、地表蒸散发、地表反照率等时空分布的改变，以及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影响陆地水循环过程。本项目针对中国区域，在考虑多种过程及人类活动作用的陆面过程模式与气候系统模式研发与应用方面开展研究，从大气、土壤水、地表水、地下水相互作用这一完备耦合系统角度，研究并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。项目实施以来取得主要成果包括：(1) 构建了考虑人类取水活动、地下水侧向流动、土壤冻融界面动态变化、河流氮输送、城市规划实施影响的陆面过程模式CAS-LSM；(2) 实现了陆面过程模式CAS-LSM与气候系统模式CAS-FGOALS-g3的耦合，由此发展了考虑人类取水活动和地下水侧向流的气候系统模式，研究并揭示了人类用水活动和地下水侧向流对陆地水循环和气候的影响；(3) 构建了未来情景下人类取水数据集，研究并揭示了未来不同情景下人类取水活动对陆地水循环以及气候的影响；(4) 揭示了气候变化与人为扰动对河流温度及河流氮输送的影响，量化了不同环境因子对河流氮输送变化的贡献；(5) 阐明了气候变暖背景下土壤冻融界面的时空变化特征并揭示了城市规划实施对城市区域气候的影响及其机制。研发的陆面过程模式CAS-LSM，为评估人类取水活动对陆地水循环过程的影响、预估未来全球变化背景下中国陆地水循环特征及变化、调水灌溉与城市规划实施效应、监测河流水环境等提供了重要的陆面过程模式模拟平台。研发的考虑人类取水活动和地下水侧向流影响的气候系统模式，为评估人类取水活动对陆地水循环与气候的影响提供了气候系统模式平台。

Abstract (Brief description of research background, main methods, contributions, and research data):

Human water use activities such as water diversion irrigation and groundwater exploitation and utilization cause changes in the spatiotemporal distribution of soil moisture, groundwater level, surface evapotranspiration, and surface albedo, as well as changes in water and energy exchange between land and atmosphere, which have important feedback on climate and significantly affect land water cycle processes. This project focuses on the development and application of land surface process models and climate system models that consider various processes and human activities in the Chinese region. From the perspective of a complete coupled system of atmospheric, soil water, surface water, and groundwater interactions, it studies and quantitatively evaluates the climate feedback of human water use activities and their impact on land water cycle processes, and explores their mechanisms. The main achievements since the implementation of the project include: (1) constructing a land surface process model CAS-LSM that takes into account human water intake activities, lateral groundwater flow, dynamic changes in soil freeze-thaw interfaces, nitrogen transport in rivers, and the impact of urban planning implementation; (2) The coupling of land surface process model CAS-LSM and climate system model CAS-FGOALS-g3 has been achieved, thus developing a climate system model that considers human water use activities and lateral groundwater flow. The impact of human water use activities and lateral groundwater flow on land water cycle and climate has been studied and revealed; (3) We constructed a dataset of human water use in future scenarios and studied and revealed the impact of human water use activities on land water cycle and climate in different future scenarios; (4) Revealed the impact of climate change and human disturbance on river temperature and nitrogen transport, quantified the contribution of different environmental factors to changes in river nitrogen transport; (5) The spatiotemporal variation characteristics of soil freeze-thaw interface under the background of climate warming were elucidated, and the impact and mechanism of urban planning implementation on urban regional climate were revealed. The developed land surface process model CAS-LSM provides an important land surface process model simulation platform for evaluating the impact of human water intake activities on



land water cycle processes, estimating the characteristics and changes of land water cycle in China under the background of future global changes, implementing effects of water diversion irrigation and urban planning, and monitoring river water environment. The climate system model developed considers the impact of human water use activities and lateral groundwater flow, providing a climate system model platform for evaluating the impact of human water use activities on land water cycle and climate.

关键词（用分号分开）： 陆面过程模型； 陆气交换； 水分能量循环交换；
气候模式； 人类用水活动

Keywords (separated by;): Land Surface Model; Exchanges between Land Surface and Atmosphere; Water and Energy Exchanges; Climate System Model; Human Water Use Activities and Impacts



人类用水活动的气候反馈及其对中国陆地水循环的影响

结题报告正文(41830967)

《结题/成果报告》正文分为两个部分：**结题部分**和**成果部分**。请按照《结题/成果报告》填报说明及撰写要求填写。

(一)结题部分

1. 研究计划执行情况概述。

(1)按计划执行情况。

本项目按计划执行，**研究进展顺利**：围绕人类取用水活动的气候反馈及其对中国陆地水循环的影响开展研究，构建了考虑人类取用水活动、地下水侧向流动、土壤冻融界面动态变化、河流氮输送、城市规划实施方案的陆面过程模式与气候模式，模拟了不同时间尺度陆地水循环过程各分量的时空演变特征，定量评估了人类取用水活动对气候的反馈及其对陆地水循环过程的影响，以及基于未来全球变化背景预估中国陆地水循环特征及变化。

(2)研究目标完成情况。

本项目研究的主要目标：构建考虑人类取水用水、灌溉与作物种植、地下水侧向流动影响的大尺度陆面水文过程模型与气候模式，从人类用水影响下的大气、土壤水、地表水、以及地下水相互作用这样一个完备耦合系统的角度，定量评估人类用水活动对区域气候的反馈及其对陆地水循环过程的影响，预估未来全球变化背景下中国陆地水循环特征及变化，依据给定情景评估地表水地下水变化状况。**项目执行五年以来，围绕上述科学目标开展研究，完成了预期目标。**取得如下主要成果：(1)构建了考虑人类取用水活动、地下水侧向流动、土壤冻融界面动态变化、河流氮输送、城市规划实施影响的陆面过程模式 CAS-LSM；(2)实现了陆面过程模式 CAS-LSM 与气候系统模式 CAS-FGOALS-g3 的耦合，由此发展了考虑人类取用水活动和地下水侧向流的气候系统模式，研究并揭示了人类用水活动和地下水侧向流对陆地水循环和气候的影响；(3)构建了未来情景下人类取用水数据集，研究并揭示了未来不同情景下人类取用水活动对陆地水循环以及气候的影响；(4)揭示了气候变化与人为扰动对河流温度及河流氮输送的影响，量化了不同



环境因子对河流氮输送变化的贡献；(5)阐明了气候变暖背景下土壤冻融界面的时空变化特征并揭示了城市规划实施对城市区域气候的影响及其机制。本项目为研究人类取用水活动的气候反馈及其对陆面生态水文过程的影响提供大尺度陆面水文模式及气候系统模式平台,实现包含了人类取用水活动、地下水侧向流动、土壤冻融界面动态变化、河流氮输送、城市规划实施的天气与气候效应的定量评估,对于进一步增加气候变化与水循环过程的理解、提高地球系统模式对水文气象的模拟和预测水平具有重要的科学意义和应用价值。

本项目研究工作已经先后发表于 *Journal of Hydrology*、*Journal of Advances in Modeling Earth Systems*、*Global Change Biology*、*JGR-Atmosphere*、*Earth System Dynamics* 等杂志,共发表论文 30 篇(其中:SCI 论文 25 篇,第一标注 12 篇),并出版专著 1 部。被 *PNAS* 等国际顶级期刊多次引用,其中“人为热排放影响河流温度”的研究被《*Nature Climate Change*》作为研究热点(research highlights)报道。项目负责人及主要成员多次参加重要国际国内会议并作口头报告或特邀报告。通过本项目的实施,1 名项目主要成员获得国家自然科学基金优秀青年项目资助,培养出 6 名博士生毕业,1 名博士后出站,3 名博士生及 2 名硕士生正在学习并已得到该项目的资助。

2. 研究工作主要进展、结果和影响。

(1)主要研究内容。

本项目拟针对中国区域开展研究,构建考虑人类取水用水、灌溉、地下水侧向流动影响的大尺度陆面水文过程模型与气候模式,从人类用水影响下的大气、土壤水、地表水、以及地下水相互作用这样一个完备耦合系统的角度,定量评估人类用水活动对区域气候的反馈及其对陆地水循环过程的影响,预估未来全球变化背景下中国陆地水循环特征及变化,依据给定情景评估中国地表水地下水变化状况。本项目在以下几个方面开展研究:(1)中国陆地水循环要素及水资源变化特征;(2)考虑人类取用水灌溉影响的陆面过程模型建立与验证;(3)考虑人类取用水灌溉、种植制度影响的气候系统模式建立与验证;(4)人类用水活动的气候反馈及其对中国陆地水循环的影响;(5)未来陆地水循环变化预估。

(2)取得的主要研究进展、重要结果、关键数据等及其科学意义或应用前



景。

1) 构建了考虑人类取用水活动、地下水侧向流动、土壤冻融界面动态变化、河流氮输送、城市规划实施影响的陆面过程模式 CAS-LSM;

地形作用下的地下水侧向流动改变地下水位，引起近地表及根区的土壤水分含量发生变化，与生产生活密切相关的人类用水活动如干旱区河流输水、城市规划实施、灌溉与农业施肥、点源污染排放，影响陆地碳氮水循环过程及河流水生生态系统，进而影响陆面与大气之间的水分与能量交换与大气过程；另一方面，土壤冻结/融化界面位置的变化影响陆地生态碳循环过程以及局部甚至全球气候的改变。在气候系统模式中合理表示这些过程意义重大，目前用于气候模拟的陆面过程模式缺乏整体考虑这些过程及人类活动的作用。本项目发展了人类取用水活动、地下水侧向流、河流氮输送、土壤冻融界面变化、城市规划实施参数化方案并将其耦合集成，研发了考虑人类取用水活动、地下水侧向流、土壤冻融界面变化、河流氮输送、城市规划实施作用的陆面过程模式 CAS-LSM，参看图 1。这些成果主要发表在中国科学院地球系统模式 JAMES, JGR-Atmosphere, JGR-Ocean 联合专辑 The Chinese Academy of Sciences Climate and Earth System Models (CAS-FGOALS and CAS-ESM) and Applications(Xie et al., JAMES, 2020; Li et al., JAMES, 2021; Wang et al., JAMES, 2020)。各参数化方案如下：

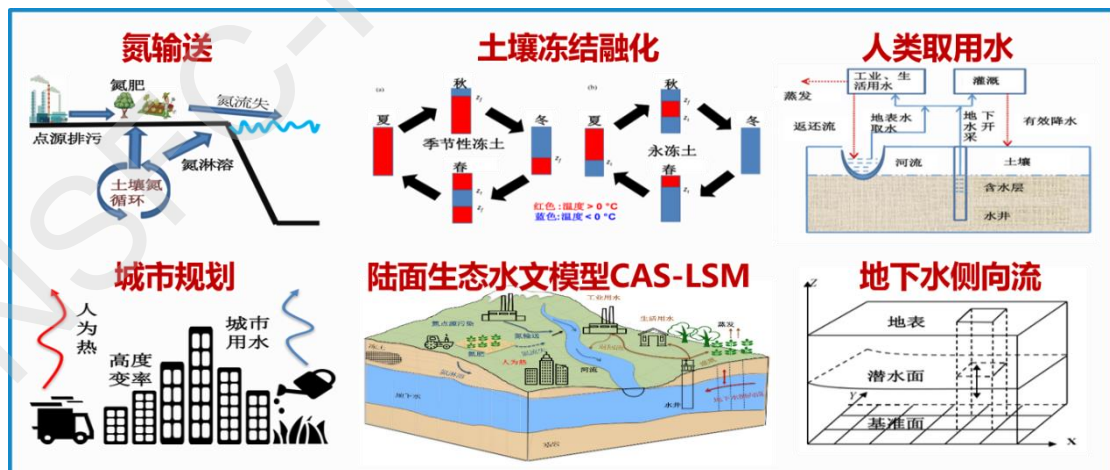


图 1 人类取用水活动、地下水侧向流动、土壤冻融界面动态变化、河流氮输送、城市规划实施方案的陆面过程模式 CAS-LSM。

(a)人类取水用水方案

为了在陆面过程模式中考虑人类取用水过程，将人类的取水活动分为地表水



取水和地下水取水。人类用水可以分为灌溉用水，生态建设用水，渔业畜牧业用水，工业用水，生活用水和城镇公共用水。根据水量平衡，总取水量应该等于总用水量。在模式中，农业灌溉和生态建设用水视为直接落到土壤表层的有效降水，其余的人类用水活动，即渔业畜牧业用水、工业用水、生活用水和城镇公共用水，有两个汇。第一个汇是产生的废水，这部分加入模式的地表产流，第二个汇是净水量消耗，这部分在模式中视为蒸散发，排入大气。地下水取水后引起土壤含水量与蒸散发的改变，通过水量平衡和相应参数化进行计算(Xie et al., JAMES, 2020)，参看图 2。

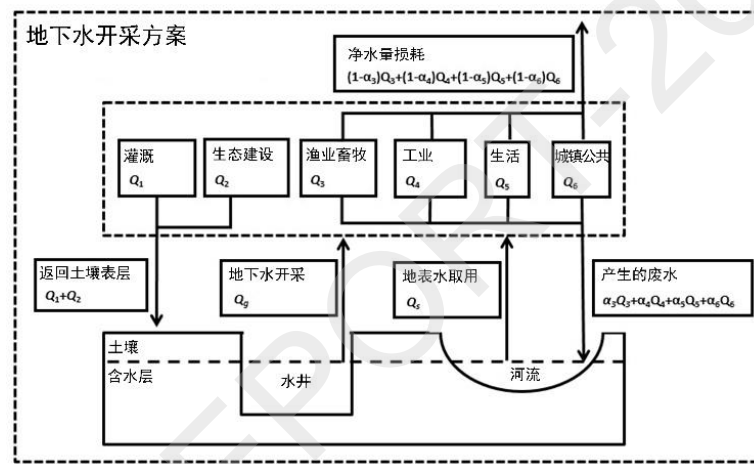


图 2 人类取水用水方案。

(b)地下水侧向流方案

拟三维地下水侧向流动模型是基于达西定律和 Dupuit 近似得到的，为了将地下水侧向流模型与陆面过程模式耦合，需要将地下水水平侧向输水率计算方程进行离散化，下述方程为离散后的方程：

$$R_{i,j} = \sum_{n=1}^8 \frac{w_{i,j} T_{i,j} (h_n - h_{i,j})}{S_{i,j} l_n} \quad (1)$$

其中*i,j*分别表示模式水平网格的行号和列号， $R_{i,j}(\text{m s}^{-1})$ 表示该网格受到的地下水侧向补给率(或者该网格对周围网络的补给率)，*n*是 8 个相邻网络的编号， $w_{i,j}$ 是每个网格与相邻网络交换边界的长度， $T_{i,j}(\text{m}^2 \text{s}^{-1})$ 是透水率， $h_{i,j}(\text{m})$ 是该网格地下水水位， $h_n(\text{m})$ 是相邻第*n*个网络的地下水水位， $S_{i,j}(\text{m}^2)$ 是网格面积， $l_n(\text{m})$ 是该网格和相邻网络的距离。将每个网格划分为 8 个方向，即每个格点可以与其

周围 8 个方向发生水量交换, 通过离散拟三维模型中水平侧向输水率计方程, 计算当前网格与周围 8 个网格的侧向输水率。使用计算的侧向输水率修改陆面过程模式计算的地下水水位和含水层水储量, 进而影响其他陆面生态水文变量(Wang et al., JGR-Atmosphere, 2020), 见图 3。

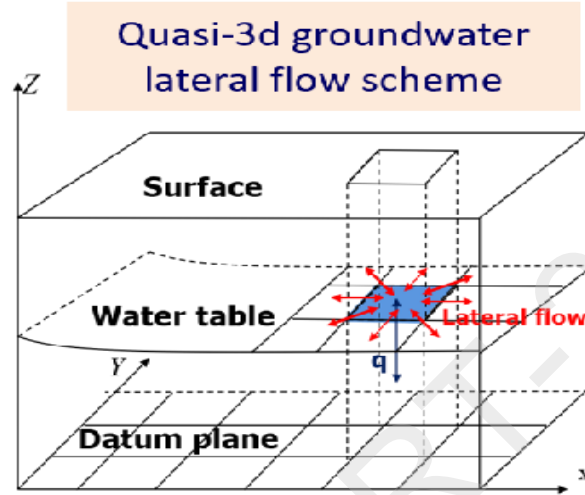


图 3 拟三维地下水侧向流方案。

(c) 河流氮输送参数化方案

CAS-LSM 中的汇流模型(River Routine Model, RTM)将总径流从陆地输送到海洋或边缘海域。RTM 采用线性水库方案将水从每个网格单元的水传输到其下游相邻的网格单元。在汇流框架的基础上, 将陆面模块计算出的土壤氮流失和氮点源污染排放传入 RTM 模型, 考虑河流中氮的相互转化以及由于分解、植被吸收和沉积物吸附等过程造成的损失, 构建了河流氮输送方程(Wang et al., JAMES, 2020):

$$\frac{dS_N}{dt} = \sum F_{N,in} - F_{N,out} + Runoff_N + Leaching_N + Pollution_N + Deposition_N - Loss_N \quad (2)$$

其中等式左边表示网格氮储量随时间的变化状态(kg s^{-1}); $F_{N,in}$ 表示单位时间内周围七个网格向当前网格的输入氮通量(kg s^{-1}); $Runoff_N$ 表示单位时间内网格面积上氮元素随地表产流产生的流失量(kg s^{-1}); $Leaching_N$ 表示氮元素随地下产流产生的淋溶量(kg s^{-1}); $Deposition_N$ 表示氮沉降直接落入河流的量(kg s^{-1}); $Pollution_N$ 表示点源污染排放直接进入河流的通量(kg s^{-1}); $Loss_N$ 代表氮传输过程中由于水体植被吸收或化学脱氮作用导致河流氮损耗的通量(kg s^{-1}), 见图 4。

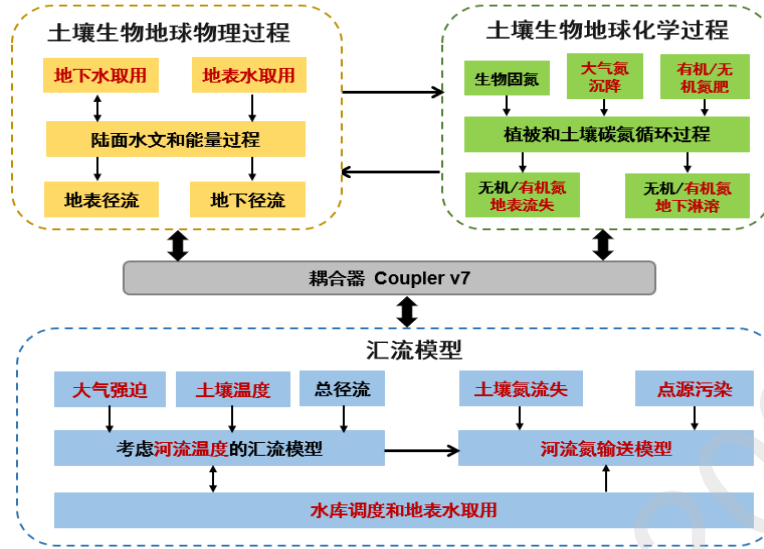


图 4 河流氮输送方案与陆面过程模式 CAS-LSM 耦合示意图。

(d) 土壤冻融界面参数化方案

将计算土壤冻结融化界面变化的多层土壤 Stefan 算法与土壤热扩散模型耦合，利用局部自适应变网格法进行数值离散，并耦合到陆面过程模式 CAS-LSM 中，发展考虑土壤冻结融化界面变化的陆面过程模式。在耦合过程中，首先将多层土壤 Stefan 算法耦合到陆面过程模式 CAS-LSM 中的土壤温度计算模块，模拟土壤冻结融化界面的变化。然后将模拟的土壤冻结融化界面的位置信息加入到原有土壤分层中，更新土壤分层，改进较厚土壤层的温度模拟能力。在计算过程中，将每个时间步模拟的冻融界面位置视为 0°C 等温线深度，以此更新土壤温度廓线分布，从而提升土壤温度的模拟能力。计算土壤冻结融化界面变化的多层土壤 Stefan 算法与陆面过程模式耦合(Li et al., JAMES, 2021)，见图 5。

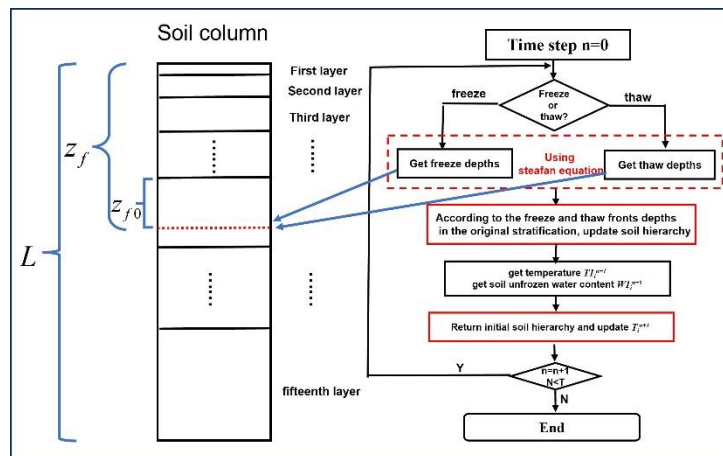


图 5 考虑冻融界面变化的陆面过程模式耦合计算流程图。



(e)考虑城市规划实施的参数化方案

基于人口密度分布、能源消耗及突变温度对人为热排放的影响，发展了具有时空动态变化的人为热排放方案；基于土壤含水量与不透水层水分供需关系，研发了包含城市灌溉及道路洒水的城市用水方案；构建高分辨城市形态数据，发展了考虑高度变率的地表粗糙度方案；改进城市冠层辐射参数；基于能量、水分和动力过程，将上述考虑城市规划的参数化方案与陆面过程模式耦合，由此构建了考虑城市规划实施影响的陆面过程模式(Liu et al., HESS, 2021)，见图 6。

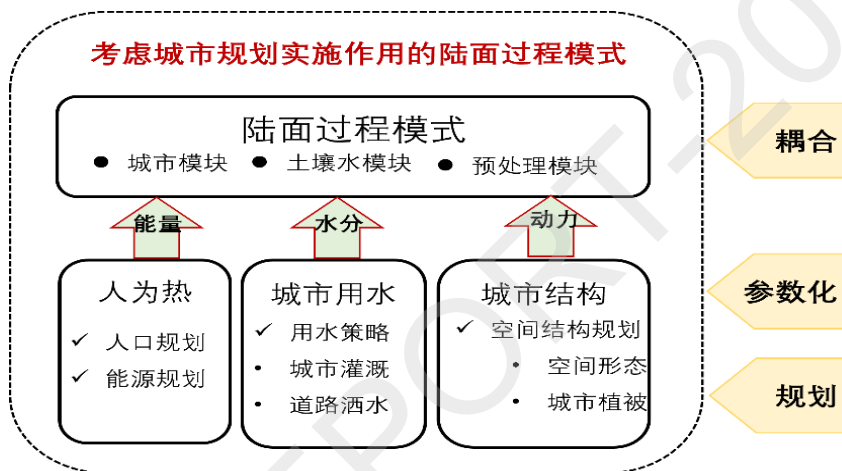


图 6 考虑城市规划的陆面过程模式示意图。

2)实现了陆面过程模式 CAS-LSM 与气候系统模式 CAS-FGOALS-g3 的耦合，由此发展了考虑人类取用水活动和地下水侧向流影响的气候系统模式，研究并揭示了人类取用水活动和地下水侧向流对陆地水循环和气候的影响；

(a)发展了考虑人类取用水活动和地下水侧向流的气候系统模式

将包含人类取用水、地下水侧向流、土壤冻融界面变化、河流氮输送、城市规划实施作用的陆面过程模式 CAS-LSM，与中国科学院地球系统模式 CAS-FGOALS-g3 耦合，由此构建了考虑人类取用水活动与地下水侧向流作用的气候系统模式。参看图 7。这些成果主要发表在中国科学院地球系统模式 JAMES, JGR-Atmosphere, JGR-Ocean 联合专辑 The Chinese Academy of Sciences Climate and Earth System Models (CAS-FGOALS and CAS-ESM) and Applications(Xie et al., JAMES, 2021; Wang et al., JGR-Atmosphere, 2020)。

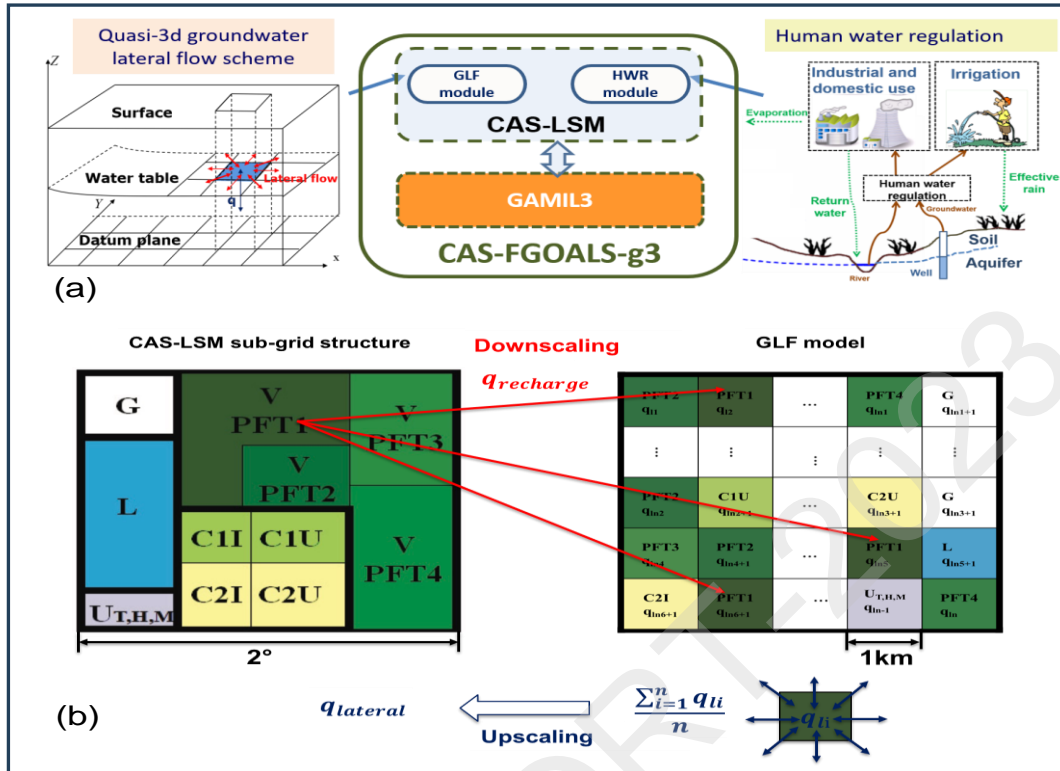


图 7 (a)考虑地下水侧向流动和地下水开采的气候模式耦合框架示意图；(b) CAS-LSM 与地下水模型尺度转换方案示意图。

(b)人类取水用水对京津冀地区水文过程的影响

作为我国五大城市群之一的京津冀地区，地下水开采极其严重，面临严重的水资源短缺等问题，2000年至2012年间，人类取水用水使太行山前平原的地下水位深度加深了约0.5-2 m，并迅速降低了陆地水储量。保定、石家庄、北京东南部等开采较为严重的地区地下水埋深下降4 m以上，陆地水储量也受到严重影响。地下水抽水造成的缺水量超过24 cm/m²。在保定、石家庄和北京东南部，用于灌溉的地下水抽取使表层土壤水分增加了约12%，非灌溉用水产生的废水使径流增加了26%。地下水位深度的增加表明，人类活动密集地区的地下水开采造成了地下水预算的赤字，可能造成水的供需冲突。人类取水用水也改变了土壤水分。在大多数灌溉区，表层和深层土壤水分均比2000-2010年有所增加。农业灌溉导致了京津冀平原的湿润土壤，表层土壤的响应强于深层土壤。此外，北京、唐山、保定等地深层土壤水分下降，地下水开采率高导致地下水位迅速下降，土壤与含水层的水力关系发生变化。需要强调的是，与自然土壤水分相比，土壤水分变化显著，而变化值较小。径流的变化与非灌溉用水的空间分布相似，例如工



业和城市公共用水。原因是这些活动产生的废水被添加到径流中。主要工业城市(北京、保定、石家庄、天津)的径流量增加高达每年 32 毫米。主要成果发表在 (Wang et al., JH, 2020), 见图 8。

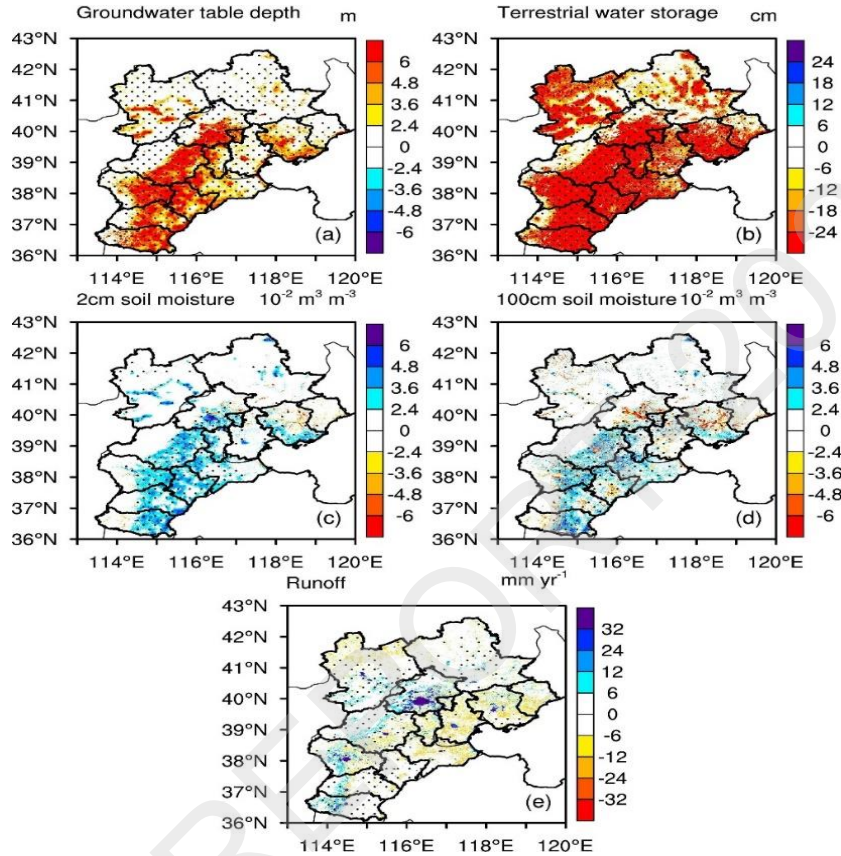


图 8 地下水开采引起的(a)地下水位深度、(b)陆地储水量、(c)2 cm 土壤水分、(d) 100 cm 土壤水分和(e)径流方面变化的空间分布。圆点表示差值通过了 t 检验的 95% 置信水平。

(c)气候变化和人类取水用水对土壤水分趋势的贡献

人类取水用水的贡献主要发生在北非、华北平原和美国中部。人类取水用水对表层土壤湿度的影响:华北平原趋势明显(干燥,高达-62.39%,润湿,77.74%),印度北部(干燥,高达-13.56%;润湿,72.1%),以及美国中部(干燥,-57.42%,润湿,38.51%)。人类取水用水对深层土壤湿度的贡献如下:华北平原(干燥,15.12%;润湿,-18.16%),印度北部(干燥,56.54%;润湿,2.07%),以及美国中部(干燥,23.8%;润湿,-20%)。人类取水用水可以增加表层土壤的含水量,从而导致潮湿和干旱地区的水分增加。结果表明,人类取水用水对土壤湿度趋势的贡献更大,典型的开采区域比没有人类取水用水的地区要多。气候变化主导了土



壤湿度趋势，而区域尺度的人类取水用水量远大于全球规模，特别是在人类取水严重的地区(Wang et al., ESD, 2019)，见图 9。

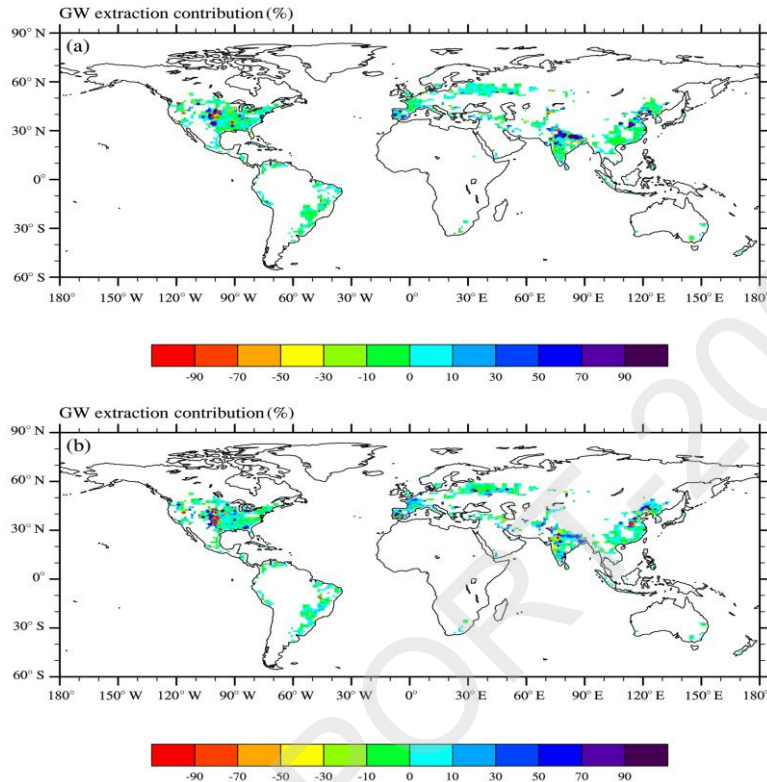


图 9 地下水开采对(a)地表和(b)深层土壤水分趋势的相对贡献(%)。

(d)水文气候对地下水侧向流的响应

地下水侧向流增强了全球地下水埋深的空间变异性。北美东部和南美洲东部的地下水位上升了约 1-5 米，而在欧洲和澳大利亚的大部分地区，在考虑地下水侧向流后，地下水埋深都有不同程度的加深。地下水埋深增幅最大的是北半球的低纬度地区，特别是撒哈拉地区。这主要是由于干旱地区接受的补给较少，而地下水侧向流更明显。在世界大部分地区，地下水埋深的差异在 t 检验中超过了 95% 的置信水平(点状区域)。地下水位深度的变化会引起土壤水分的相应变化。在北美东部和南美洲北部土壤湿度增加了约 $0.01-0.1\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ，地下水位深度降低，土壤水分减少约 $0.005\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ，在撒哈拉沙漠，当考虑地下水侧向流时，地下水埋深增加(Wang et al., JGR-Atmosphere, 2020)，见图 10。

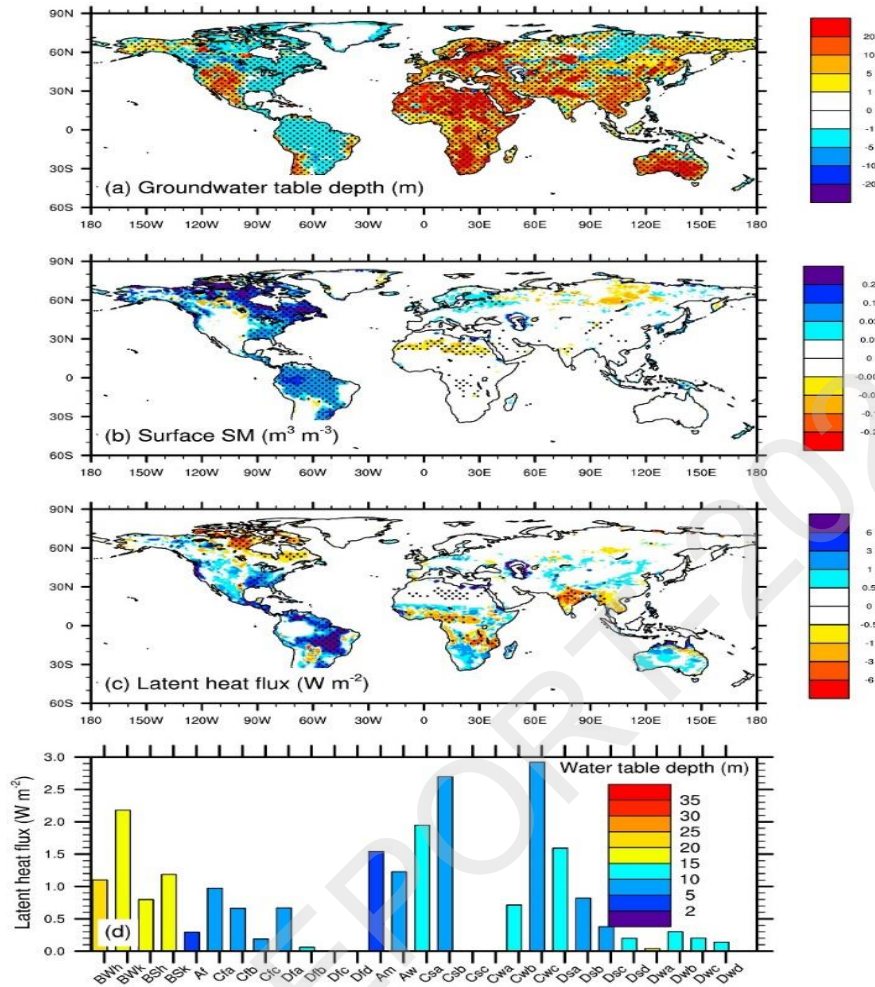


图 10 地下水侧向流引起的 1976-2010 年地下水位深度、土壤湿度和潜热通量平均值的变化(a、b 和 c)。(d) 28 种柯本-盖革气候类型潜热通量模拟之间的差异。对于每种类型，条形的颜色表示地下水位深度。圆点表示差值在 t 检验中通过了 95% 的置信水平。

3)研究并揭示了未来不同情景下人类取水活动对陆地水循环以及气候的影响;

(a)未来情景下人类取水用水对陆地水循环的影响

结合未来人口和 GDP 数据以及未来不同 CMIP6 情景，估算不同社会经济情景下农业灌溉，工业用水和生活用水的时空分布，构建人类取水未来数据集。研究未来不同情景下人类取水活动对陆地水循环以及气候的影响。研究发现未来所有情景中，地下水开采对于表层土壤湿度的影响仍然集中在美国中部、华北平原和印度北部地区，尽管华北平原的地下水开采在 SSP460 情景中呈现下降趋势，但是，仍显著影响该地区的土壤湿度。尽管土壤湿度增加的量级为 0.03 mm³mm⁻³左右，但对于华北平原和印度北部地区，土壤湿度增加了约 40%。对于



美国中部，土壤湿度增加相较于华北平原和印度北部地区并不明显，但也增加了 5-10%左右。在开采严重区，美国中部、印度北部和巴基斯坦地区以及华北平原地区，地表径流增加了大概 $10-20 \text{ mm year}^{-1}$ ，对于 SSP370、SSP585 情景，由于人口和制造业的发展，工业生活用水增多，而地表径流又来自于工业和生活废水的排放，整体来看，这两个情景地下水开采对于地表径流的影响更为显著。在地下水开采较为严重的地区，蒸散发明显增加，增强的量级约为 $0.1-0.3 \text{ mm day}^{-1}$ ，并且通过了置信度为 95% 的显著性 t 检验。蒸散发的增强主要是灌溉区土壤湿度的增加导致的。对于 SSP585 情景，由于灌溉用水较多，因此，地下水开采对于蒸散发的影响也更为强烈，尤其在中东地区，蒸散发增加了约 30% 左右。见图 11。

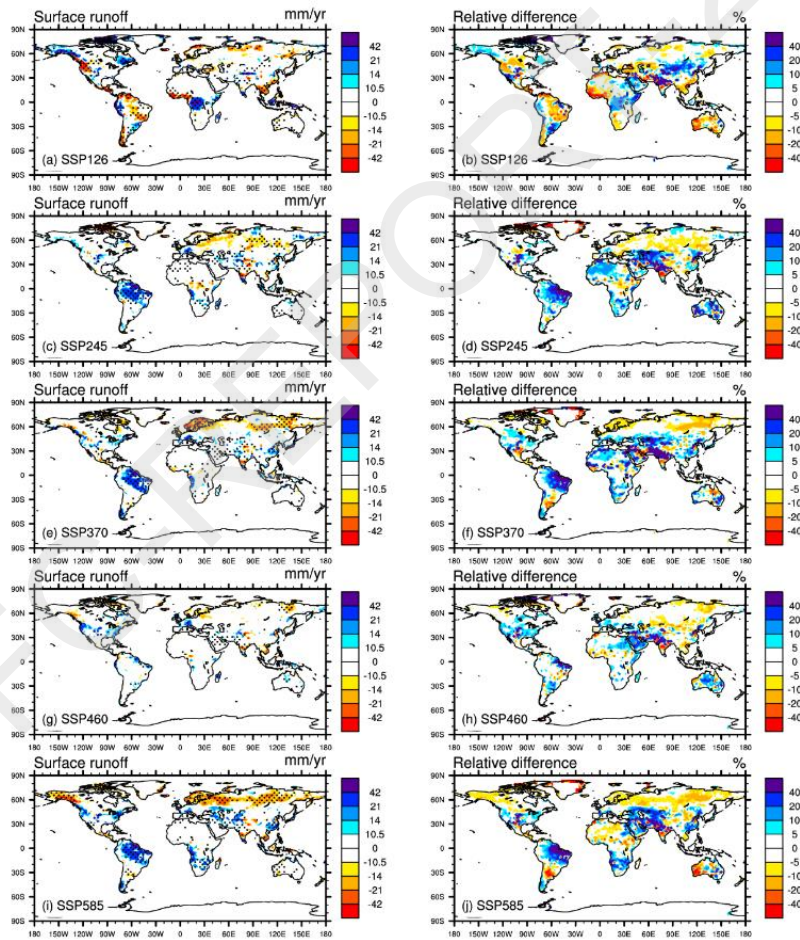


图 11 人类取水用水对 2015-2100 年气候态平均的地表径流影响(a, c, e, g, i) 及相对差(b, d, f, h, j)，阴影区域代表通过置信度为 95% 的显著性 t 检验。

(b)未来情景下地下水开采对气候的影响

从历史时期地下水开采对气候的影响，可以发现印度和巴基斯坦地区地下水



开采带来的降温效应最明显。考虑了地下水开采后,可以发现近期(2015-2040 年)地下水开采带来的冷却降温效应仍然显著,同时中等强迫情景(SSP245、SSP460)及中高等强迫情景(SSP370、SSP585)下降温的幅度差别并不明显,这是因为在这些情景下印度地区地下水开采量的差别也不显著。然而,在中期(2041-2066 年)及末期(2067-2100 年),中等强迫情景(SSP245、SSP460)下地下水开采的降温效应逐渐减弱,这可能是因为在中等强迫情景下 21 世纪中末期灌溉面积的减少使得灌溉用水量趋于稳定,进而灌溉的降温效应减弱,见图 12。

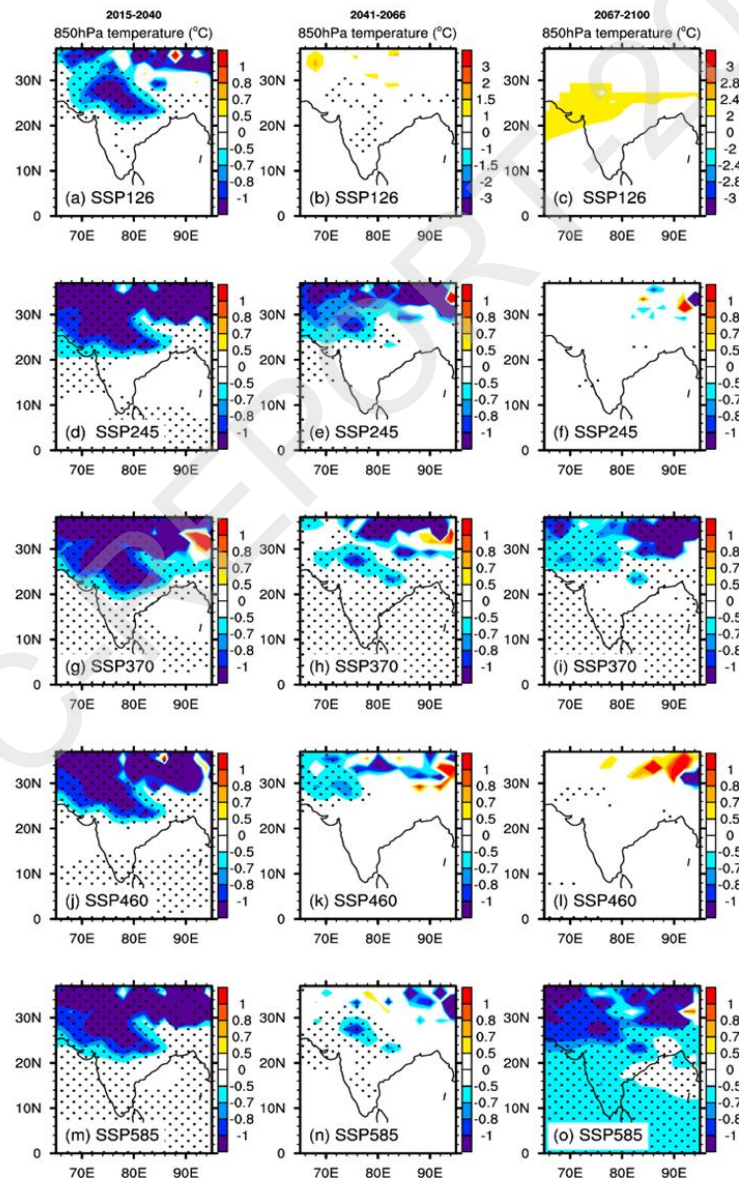


图 12 人类取水用水对 2015-2100 年气候态平均的 850hPa 温度的影响,阴影区域代表通过置信度为 95%的显著性 t 检验。

4)研究并揭示了气候变化与人为扰动对全球河流温度及河流氮输送的影响;

(a)探讨了人为热排放对河流温度的影响

热电站等直流冷却系统排除的热量会直接加热附近的水温,引起生态环境问题。较高的水温会导致淡水生态系统受到威胁。然而目前气候系统模型没有考虑到这些热源。基于估算的包括来自 565 个发电厂的人为热排放数据开展数值模拟试验,量化了发电厂对河流的影响。图 13 给出了人为热排放影响下河流温度升高值的全球气候态分布。结果表明,北半球美国东部、欧洲及中国东部等地河流受到较为明显的热污染,温度升高最大可达 2°C 以上,这对部分水生生物是致命的;而南半球只有在阿根廷出现了明显的热污染现象。此外,也能看出在纬度更高、自然河流温度较低的地方这种热污染的增温效应最为明显。该成果发表在 Liu et al.(Global Planetary Change, 2020)。该结果被 Nature Climate Change 于 2020 年作为研究热点进行引用报导(Langenbrunner, Nat. Clim. Chang, 2020)。

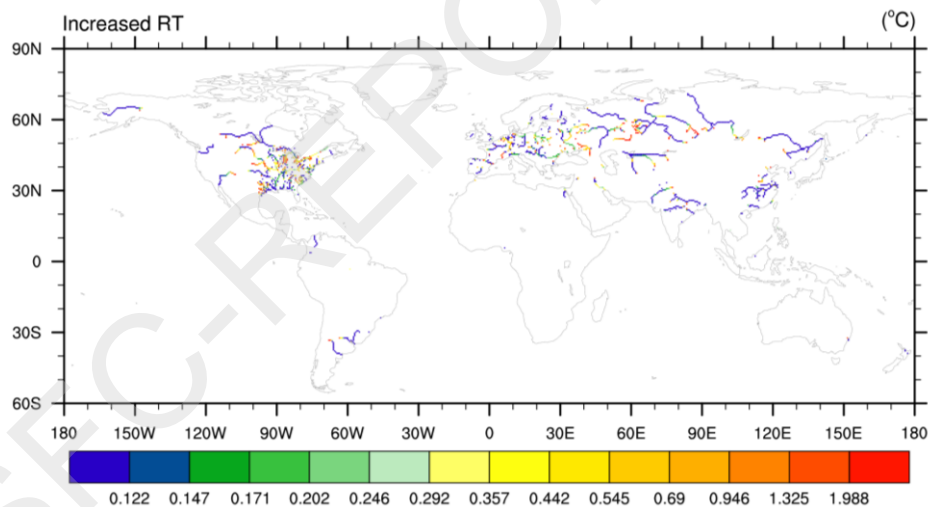


图 13 1981-2010 年人为热排放对河流温度影响的气候态空间分布。

(b)定量评估了人为扰动对河流氮输送的影响

大气氮沉降、施肥、污染排放、水调节等人为扰动引起的陆地氮输入和水文系统的变化,改变氮在土壤及河流中的运输,最终影响其向海洋的输送。图 14 展示了人为扰动(包括人为氮输入和水调节)对土壤氮流失和河流氮输送的综合影响。一般而言,人为扰动增加了温带地区大多数地区的土壤 DIN 损失,特别是在中国华北地区、西欧和中亚,相应地,温带河流的 DIN 输出量有所增加。相反,由于水调节的影响,在其他纬度(特别是热带和亚热带地区)的河流中, DIN

通量显著下降。尽管土壤 DON 损失表现为增加,但由于水调节的作用,全球大多数河流 DON 通量减少。总的来说,在人为扰动的影响下,北半球温带河流的 DN 通量显著增加,而其他纬度带 DN 通量减少(Liu et al., GCB, 2019), 见图 14。

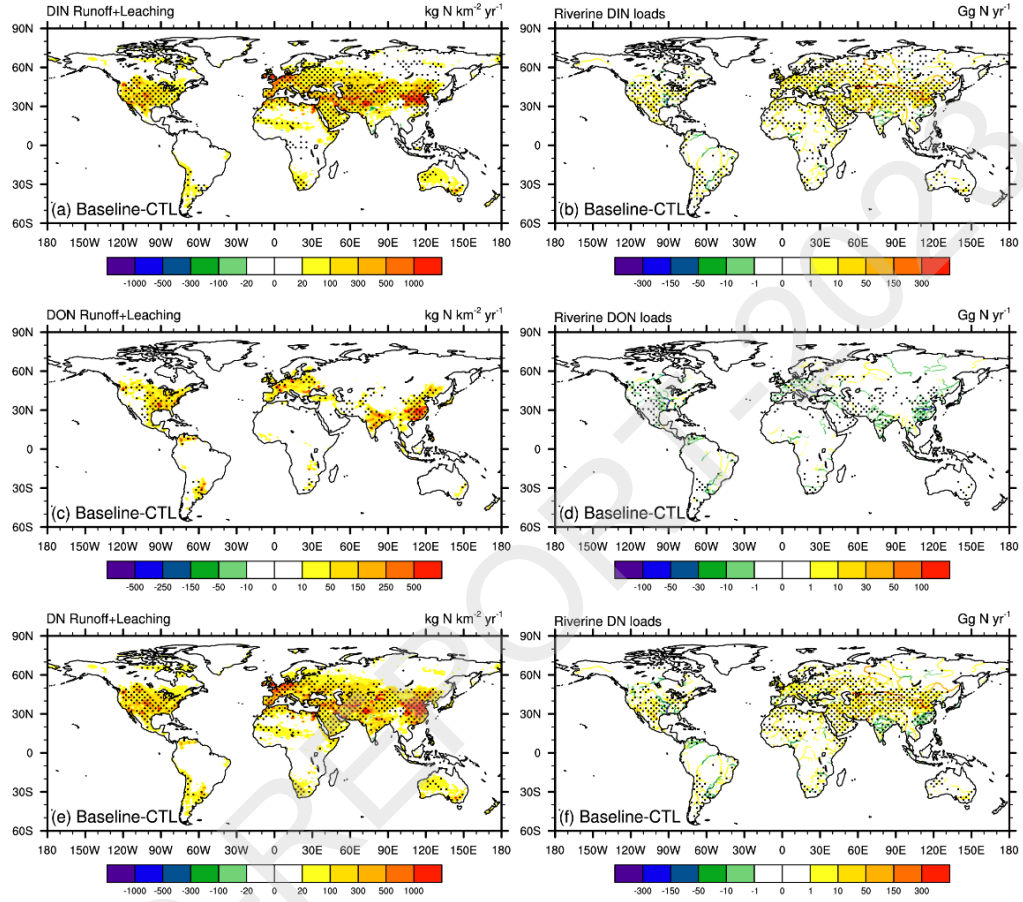


图 14 1981-2013 年人为扰动引起的土壤氮流失及河流氮通量变化的多年平均空间分布: (a)土壤 DIN 流失; (b)河流 DIN 通量; (c)土壤 DON 流失; (d)河流 DON 通量; (e)土壤 DN 流失; (f)河流 DN 通量, 阴影部分为通过置信度 95%显著性 t 检验的区域。

(c)量化了不同气候变化与人类活动因子对河流氮输送变化的贡献

为了更好地理解社会经济和气候变化对河流养分输出的综合影响,研究并揭示气候、CO₂ 浓度、大气氮沉降、施肥(无机氮肥和有机肥料)、点源污染和水调节的变化对 1981-2013 年河流氮输送的变化的贡献(图 15)。整体来看,过去 33 年全球河流 DIN 输送量的变化主要受气候变化、CO₂ 浓度升高和施肥增加的影响,而大气氮沉降、点源污染和水调节的影响较小,且在不同时期主要驱动因子不同。在 1981-1994 年,全球河流 DIN 输送量下降,主要是由气候变化、CO₂ 浓度升



高和施肥量的减少造成的；1994-2013 年，尽管 CO₂ 浓度升高的负效应不断增加，全球河流 DIN 输送量呈上升趋势，主要的贡献因子是气候变化和施肥量的增加，且施肥的贡献越来越大，从 1994 年的 0.18 Tg N yr⁻¹ 增加到 2013 年的 2.65 Tg N yr⁻¹。点源污染对增加也有贡献，但相对较小。从图 18(b)可以看出，过去 33 年全球河流 DON 通量的变化主要由气候变化控制，同时也受到 CO₂ 浓度升高的影响，除了点源污染，其他人为扰动几乎对 DON 输送的变化没有贡献。这些发现表明，减少河流氮负荷的策略必须明确考虑气候变化的作用，而不是基于长期平均的气象水文条件。此外，气候因素的强烈影响意味着减少有害藻华和沿海缺氧等环境问题的水质管理战略必须具有适应气候变化的能力(Wang et al., JAMES, 2019)。

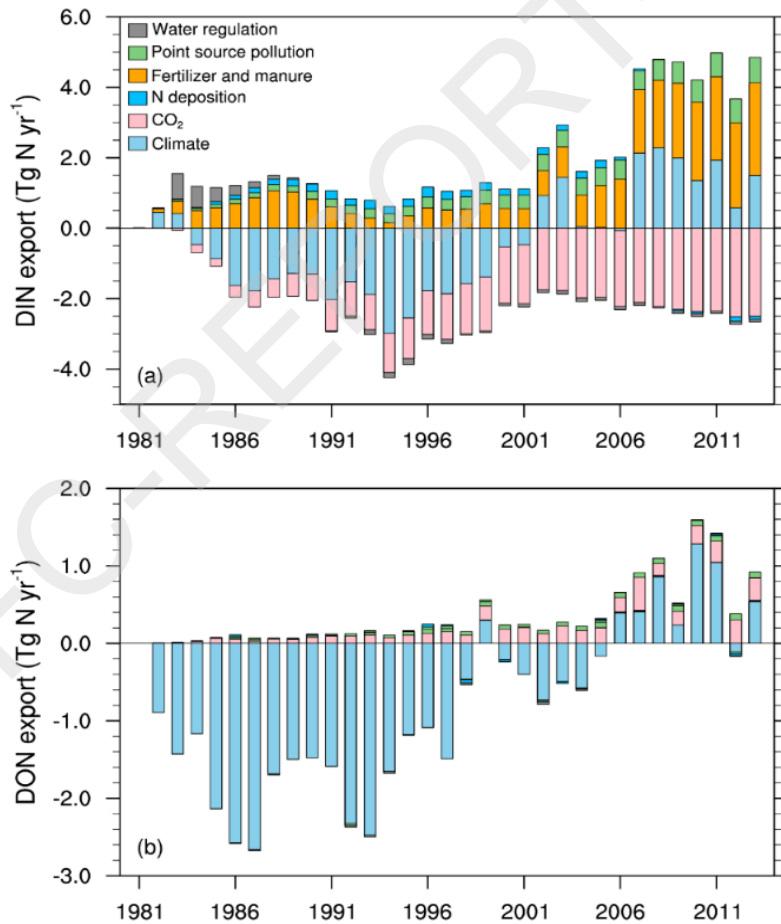


图 15 1981-2013 年各个环境因子对全球河流 DIN 和 DON 输送变化的贡献：(a) 河流 DIN 通量；(b)河流 DON 通量。



5)阐明了气候变暖背景下土壤冻融界面的时空变化特征并揭示了城市规划实施对城市区域气候的影响及其机制。

(a)研究了不同大气强迫作用下陆面模式 CAS-LSM 多年冻土活动层厚度模拟与不确定性

利用包含土壤冻结融化界面动态变化的陆面过程模式 CAS-LSM，采用 $0.9^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 分辨率，结合四种大气强迫数据(GSWP3、CRUNCEP、Princeton、WFDEI) 针对 1960 年至 2009 年进行全球模拟，研究不同大气强迫作用下多年冻土活动层厚度变化趋势及其不确定性。结果表明：不同大气强迫作用下活动层厚度都呈现增加的趋势，基于强迫数据 WFDEI 模拟的活动层厚度增加趋势最大。不同大气强迫数据模拟的活动层厚度和变化趋势范围分别为 1.1m-1.25m 和 0.27 cm/year–0.51 cm/year，相对变化的不确定性范围为 11.2%–23.5%。其中青藏高原地区、俄罗斯以及欧洲北部、美国和加拿大地区的活动层厚度和变化趋势范围分别为 2.26m-2.81m, 1.07m-1.31m、1.32m-1.48m 和 0.47cm/year-1.04cm/year, 0.29cm/year-0.48cm/year, 0.25cm/year-0.55cm/year(李锐超等，2021)，见图 16。

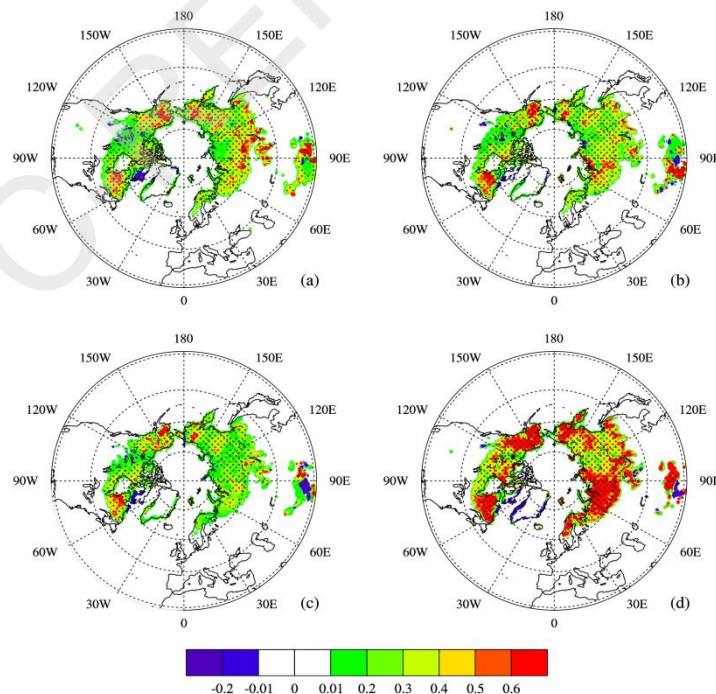


图 16 1960–2009 年活动层厚度变化趋势 (a) CRU-NCEP (b) GSWP3 (c) Princeton (d) WFDEI。

(b)研究了多年冻土活动层厚度对气候变化的响应

多年冻土区活动层厚度影响水分和能量的交换,是评估水文过程、寒区工程和气候变化的关键变量。利用中国科学院陆面模式(CAS-LSM)和中国科学院气候系统模式(CAS-FGOALS-g3),模拟并分析了活动层厚度的变化趋势和相对变化。结果表明,活动层厚度呈现增加的趋势。1979-2014年,多年冻土区平均活动层厚度为1.08 m,活动层厚度变化趋势为0.33 cm/year。活动层厚度相对变化范围为1%~58%,相对变化为10.9%。活动层厚度的变化趋势与2 m气温的变化趋势基本一致。在4种气候情景下(SSP-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5),预测到2100年的活动层厚度相对变化分别为10.3%、14.6%、30.1%和51% (Li et al., AOSL, 2021),见图17。

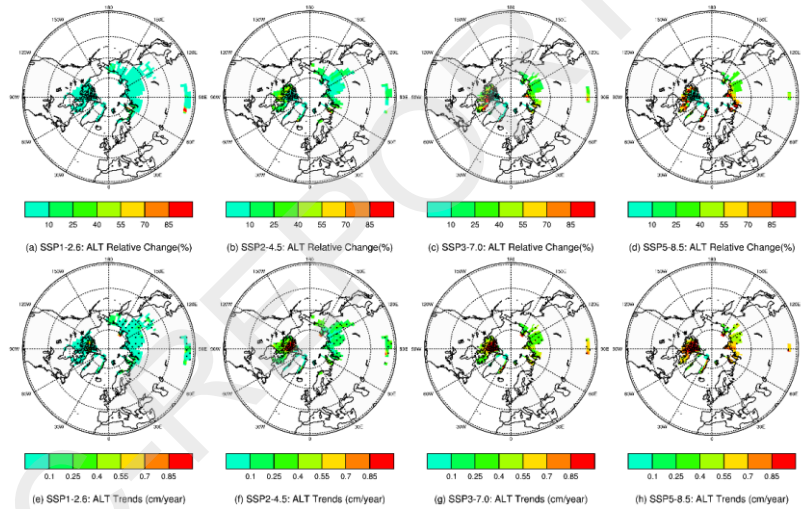


图17 2100年相对于2015年的活动层厚度的相对变化,以及ssp2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5气候变化情景下活动层厚度的变化趋势(cm/年)。

(c)研究并揭示了土壤冻融界面的时空分布变化

利用所发展考虑冻融界面动态变化的陆面过程模式CAS-LSM以及中科院气候系统模式模拟分析了土壤冻融界面的时空分布变化特征。在多年冻土区,春天冻土开始融化,出现融化界面。夏季达到最大融化深度,秋季冻土开始冻结,出现冻结界面,冬天土壤完全冻结,冻融界面消失。季节性冻土区,秋季土壤开始冻结,出现冻结界面,冬季达到最大冻结深度,春季冻土开始融化,出现融化界面,夏季完全融化,融化界面消失。除青藏高原外,活动层厚度随纬度的增加而减小。1979-2016年和1901-1979年冻土区的平均活动层厚度分别为1.25 m和



1.55 m。随着气温升高 2 m，活动层厚度呈 0.001 cm/yr (1901-1979)和 0.003 cm/yr (1979-2016)的增长趋势。在季节性冻土区，最大冻结深度随纬度的增加而增加，最大冻结深度在多年冻土区和季节冻土边界附近更深。最大冻结深度分别为 1.95 m 和 1.65 m。随着气温升高 2 m，最大冻结深度呈减小趋势。1901-1979 年最大冻结深度变化趋势为- 0.000.01 cm/yr，1979-2016 年最大冻结深度变化趋势为- 0.000.05 cm/yr (Li et al., JAMES, 2021)，见图 18。

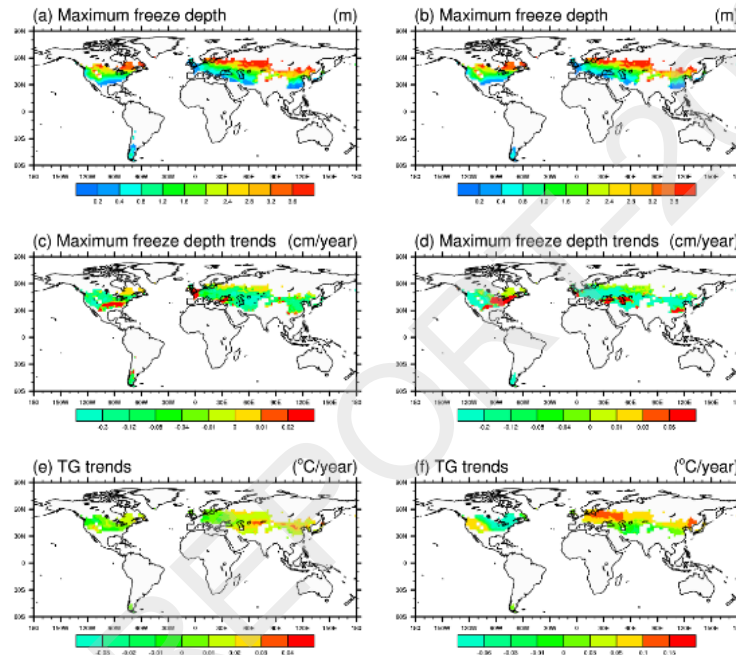


图 18 1901 - 1979 年(a, c, e)和 1979 - 2016 年(b, d, f)季节冻土区最大冻结深度(a, b)、最大冻结深度变化趋势(c, d)和 2 m 气温变化趋势(e, f)的空间分布。

(d)人为热排放影响城市热环境的机制分析

人为热的增温作用改变了边界层大气动力过程。人为热排放模拟变量、无人热模拟变量和两组试验变量差异的空间分布见图 18。边界层高度(PBLH)受人为热的增加而上升(图 18(a)-(c))，城区这种变化超过了 100 米。地表 10 米风速也相应增强(图 18(g)-(i))，受人为热影响空气在城区辐合并被抽吸到高层大气，加强了垂直能量交换。此外，更高的边界层高度和更强的风使得近地表大气不稳定，垂直输送的增强使得近地表向高层大气的热传递更容易，会降低近地表温度，产生所谓的冷却效应。但人为热对动力过程的影响不足以抵消其直接加热作用，仍然体现出近地表的加热作用。人为热是影响城市热岛效应的主要因素之一，已有研究发现城市热岛效应与热浪之间存在协同效应。因此，当高温达到某一特定水



平时，人为热可能与极端热事件有关，极端热事件的发生是由于蒸散发增强和近地表湿度的降低导致更多的热量汇聚。然而，这里结果表明，比湿没有明显变化(图 19(d)-(f))，表明人为热排放通过直接加热作用影响极端温度事件(Liu et al., AAS, 2021)，见图 19。

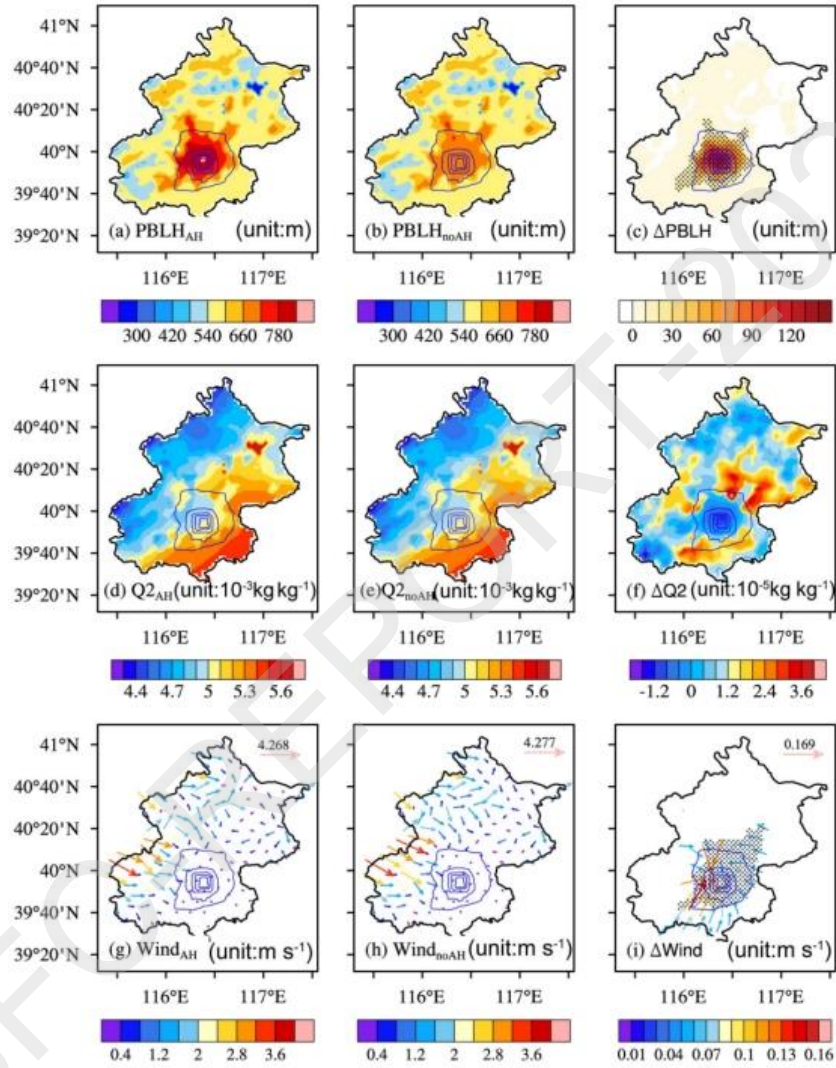


图 19 人为热排放模拟变量、无人热模拟变量和两组试验变量差异的空间分布，这些变量分别为(a)–(c)：行星边界层高度 (PBLH)；(d)–(f)2 m 高度比湿 (Q2)；和(g)–(i)10 风速空间分布(U10)。

(e)城市用水与降温效应之间的关系

对 3 个城市区域不同用水量与降温幅度进行二次线性拟合(图 20)，从而得到不同城市区域道路洒水与城市灌溉用水量与降温之间的关系。图中横坐标水量已经过标准化，城市中心、近郊和远郊单位标准水量为 0.528×10^8 、 0.039×10^8 和



$1.72 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{month}$ (道路洒水); 0.2868×10^8 、 0.81×10^8 、 $4.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{month}$ (城市灌溉)。实际水量为 x 轴坐标数据与标准单位水量的乘积。研究表明在城市的三个区域,道路洒水降温效果相似,降温幅度最大约为 0.55°C ,而在郊区和农村地区,降温效果洒水量增多保持稳定。相比于在郊区与农村地区,城市中心的道路洒水更快的改变当前区域温度,然而冷却效率并没有随着水量的增多而加大(对于单位标准的水量,城市中心道路洒水水量是郊区的 2 倍,是农村地区的 10 倍,但降温幅度较为接近,故城市中心道路洒水的降温效率较其他两个地区小)。可能原因是,城市中心道路洒水集中在很小区域,由于风速的降低导致蒸散发减弱,进而导致降温效率的减弱。城市灌溉的降温效应相比于道路洒水更大,并且在农村地区更加显著。然而,农村地区城市灌溉的降温效率小于郊区及城市中心。原因是虽然三者灌溉量都在各自区域进行了归一化后的标准单位水量,但农村地区有大量农田灌溉,实际水量农村是城市中心的 5 倍,郊区的 2 倍。但降温幅度仅城市中心和郊区的 1.5 倍。因此,城市灌溉的降温效率在城市中心最高。与道路洒水的效果略有不同的是,城市中心和郊区的降温效果随着用水量的增加而增加(Liu et al., HESS, 2021)。

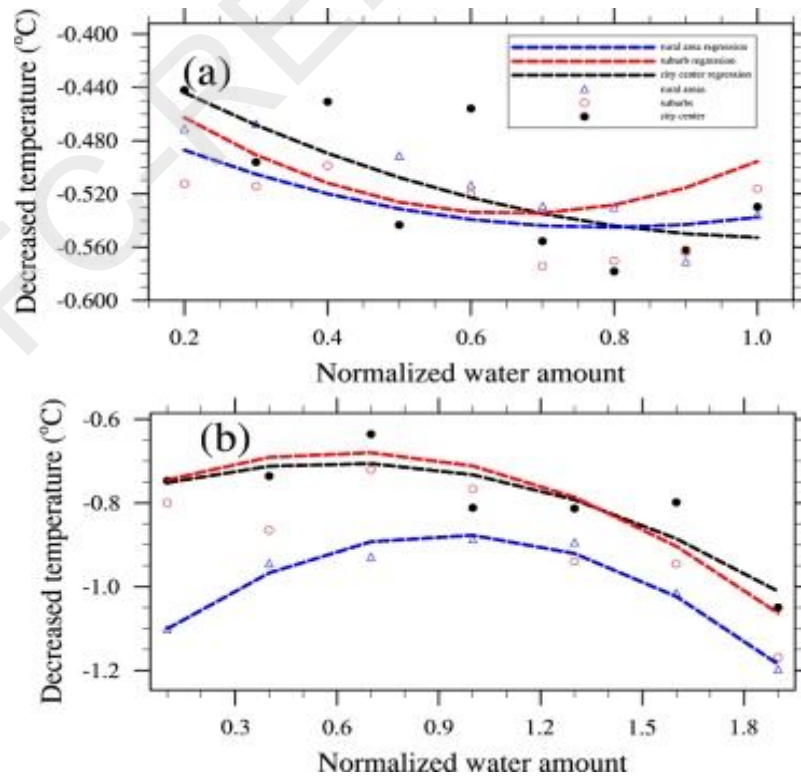


图 20 水量与降温关系; (a)道路洒水(b)城市灌溉。



(f)城市化和复杂地形共同作用对夏季热环境的影响

通过图 21 可以看出地形对温度格局的影响与夏季月平均气温的分布格局基本一致，复杂地形在刻画成渝城市群(CCUA)的夏季平均气温时起着主导作用，是决定温度格局的主要因素。由于复杂地形的存在，CCUA 内部的温度与平坦地形相比增加了最高约 10°C 。同时，CCUA 周围的高原和山区则由于海拔升高，形成了高原气候、气温下降 10°C 。而城市扩张导致了夏季变暖，整个城市群区域内的温度升 $\approx 0.8^{\circ}\text{C}$ (23)。特别是在城市群的核心区域成都和重庆，气温显著升高，主城区气温升高接近 1.0°C 。城市群内部的温度远高于外部，证明了“热岛效应”的实际存在，而城市群外围郊区地区，温度有不到 0.5°C 的降低。城镇化导致土地利用类型从自然地表变成了不透水面，热属性的改变，导致了城市地区温度的升高。最后，在复杂地形和城镇扩张同时存在的条件下，地形会决定热环境空间格局，与城市化造成的微弱增温效应相比(由单一城市化因素引起)，在叠加了复杂地形条件后，城市核心区的增温效应更加明显，变暖区域更大，在城市群的核心城区，平均温度上升了 1.5°C 以上，比单一平坦地形区域的城市化热岛效应更强更明显，热岛效应增强了一倍。

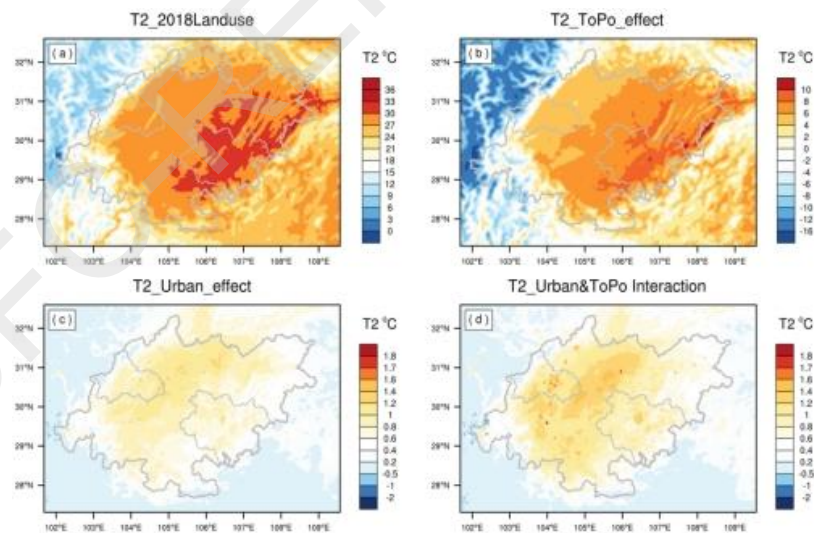


图 21 成渝城市群历史时期复杂地形条件下城镇化的综合升温效应：(a)夏季平均 2 米气温分布；(b)单一城镇扩张因素对夏季平均 2 米气温的影响；(c)单一地形因素对 2 米气温的影响；(d)复杂地形与城镇扩张共同作用对夏季 2 米平均气温的影响。



3. 研究人员的合作与分工。

- 1) 项目负责人**谢正辉**研究员全面负责整个项目的研究与总体设计，根据总体研究任务和目标协调各个项目成员骨干的研究工作；
- 2) 主要参与者**贾炳浩**研究员在本项目中承担陆面模式发展的指导工作，指导分析水文气候模拟；
- 3) 项目主要参加人**秦佩华**副研究员主要承担陆面过程分析与水文气候的分析工作；
- 4) 项目主要参加人**谢瑾博**博士主要承担陆面过程模型与气候系统模式的耦合模拟与分析工作；
- 5) 项目主要参加人**刘双**博士主要负责发展陆面模式发展与氮磷输送方案研究；
- 6) 项目主要参加人**刘斌**博士主要负责发展陆面模式中的城市规划方案以及城市规划实施效应分析研究；
- 7) 项目主要参与人**李锐超**博士主要负责发展陆面模式中的土壤冻融方案以及土壤冻融与气候效应评估；
- 8) 项目主要参与人**王龙欢**博士主要负责发展陆面模式中的人类用水方案及其气候效应评估；
- 9) 项目主要参加人**王妍**博士主要负责河流氮磷输送方案的研发及及其对水文气候影响的分析工作。
- 10) 项目主要参加人**陈思**博士主要负责城市规划实施对区域气候影响及机制的研究；
- 11) 项目参加人**田雨航、尤艳彬、闫衡、卢梦臣、王辰璞**分别参与了城市规划影响评估、人类活动的河流碳输送影响评估、影响土壤碳循环的土壤水阈值分析研究。

4. 国内外学术合作交流等情况。

研究人员多次参加了国内外学术交流会议并在会议上做了与本项目研究内容相关的学术报告。

- 1) 2019年6月在美国博尔德参加 The 24th Annual CESM Workshop, 谢正辉做题为“A high-resolution land model with groundwater lateral flow,



- water use and soil freeze-thaw front dynamics and its applications in an endorheic basin” 的报告。
- 2) 2019 年 6 月在美国博尔德参加 The 24th Annual CESM Workshop, 王龙欢做题为 “Effects of climatic and anthropogenic changes on riverine dissolved inorganic nitrogen transport” 的报告(oral)。
 - 3) 2019 年 6 月在美国博尔德参加 The 24th Annual CESM Workshop, 王妍做题为 “Implementation of Groundwater Lateral Flow and Human Water Regulation in CAS-FGOALS” 的报告(poster)。
 - 4) 2019 年 7 月在长春参加第十七届 LASG 气候系统模式研讨会, 王龙欢做题为 “Implementation of Groundwater Lateral Flow and Human Water Regulation in CAS-FGOALS” 的报告(oral)。
 - 5) 2019 年 7 月在长春参加第十七届 LASG 气候系统模式研讨会, 王妍做题为 “Sensitivity of Snow Simulations to Atmospheric Forcing in a Land Surface Model CAS-LSM” 的报告(oral)。
 - 6) 2019 年 7 月在长春参加第十七届 LASG 气候系统模式研讨会, 李锐超做题为 “冻融界面时空变化的分析与研究” 的报告(oral)。
 - 7) 2019 年 7 月在张掖参加第 19 届全国流体力学数值方法研讨会, 王龙欢做题为 “Implementation of Groundwater Lateral Flow and Human Water Regulation in CAS-FGOALS” 的报告(oral)。
 - 8) 2019 年 7 月在张掖参加第 19 届全国流体力学数值方法研讨会, 李锐超做题为 “考虑冻融界面变化的陆面过程模式” 的报告(oral)。
 - 9) 2019 年 7 月在张掖参加第 19 届全国流体力学数值方法研讨会, 王妍做题为 “Effects of climatic and anthropogenic changes on riverine dissolved inorganic nitrogen transport” 的报告(oral)。
 - 10) 2019 年 9 月在青海西宁参加青海环境厅应对气候变化工作座谈会, 谢正辉做题为 “气候变化与人类用水活动共同作用下的青海区域水资源影响评估研究应对气候变化的城市规划研究” 的报告。
 - 11) 2019 年 11 月在云南昆明参加第 18 届生态学大会, 谢正辉做题为 “A New Frozen Soil Parameterization including Frost and Thaw Fronts CAS-



- LSM”的分会主题邀请报告。
- 12) 2019年11月在湖北武汉参加中国科学院前沿科学与教育局:数理和地学前沿交叉领域学术研讨会,谢正辉做题为“陆面过程及其数值模拟-陆面过程模式CAS-LSM及其应用”的报告。
 - 13) 2019年11月在北京参加第十七届中国水论坛,谢正辉做题为“Effects of anthropogenic nitrogen discharge on the dissolved inorganic nitrogen transport in global rivers”的报告。
 - 14) 2019年11月在北京参加第十七届中国水论坛,王龙欢做题为“Contributions of climate change and groundwater extraction to soil moisture trends”的报告(oral)。
 - 15) 2019年12月在美国旧金山参加2019年American Geophysical Union会议,谢正辉做题为“Effects of anthropogenic and climatic changes on riverine dissolved inorganic nitrogen transport”的报告。
 - 16) 2019年12月在美国旧金山参加2019年American Geophysical Union会议,李锐超做题为“Simulated the spatial and temporal distribution of freeze and thaw fronts”的报告(poster)。
 - 17) 2020年11月在北京参加第十八届LASG气候系统模式研讨会,王龙欢做题为“Implementation of Groundwater Lateral Flow and Human Water Regulation in CAS-FGOALS-g3”的报告(oral)。
 - 18) 2020年11月在北京参加第十八届LASG气候系统模式研讨会,王妍做题为“气候变化与人为扰动对全球河流温度及无机氮输送的影响”的报告(oral)。
 - 19) 2023年7月24日在天津,参加第四届表层地球系统模拟与数据同化大讲堂,谢正辉做题为“包含多种过程及人类活动作用的陆面过程模式CAS-LSM研发及应用”的1小时邀请报告。
 - 20) 2023年8月8日在天津,参加第四届表层地球系统科学国际学术研讨会,谢正辉做题为“包含多种过程及人类活动作用的陆面过程模式CAS-LSM研发及其与全球气候模式的耦合研究”的邀请报告。
 - 21) 2023年12月11-15日在美国旧金山参加American Geophysical Union



(AGU)会议，谢正辉做题为“Land surface model CAS-LSM that includes multiple processes and human activities”的报告。

22) 2023年12月11-15日在美国旧金山，参加 American Geophysical Union (AGU)会议，尤艳彬做题为“Impacts of anthropogenic water regulation on global riverine dissolved organic carbon transport”报告。

23) 2023年12月11-15日参加 American Geophysical Union (AGU)会议，田雨航做题为“Attribution of the Land Surface Temperature Response to Urban Morphological Changes: A Case Study in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration”的报告(poster)。

24) 2023年12月11-15日参加 American Geophysical Union (AGU)会议，闫衡做题为“Estimation of soil moisture threshold for amplifying losses of global terrestrial carbon uptake”的报告(poster)。

5. 存在的问题、建议及其他需要说明的情况。

无。

(二)成果部分

1. 项目取得成果的总体情况。

项目按计划开展了相应的研究任务，围绕人类用水活动的气候反馈及其对中国陆地水循环的影响开展研究，从人类用水影响下的大气、土壤水、地表水、以及地下水相互作用这样一个完备耦合系统的角度，构建了考虑人类取用水活动、地下水侧向流动、土壤冻融界面动态变化、河流氮输送、城市规划实施方案的陆面过程模式 CAS-LSM，研究并揭示了人类用水活动和地下水侧向流对陆地水循环和气候的影响，为评估人类取用水活动对陆地水循环过程的影响、调水灌溉与城市规划实施效应、监测河流水环境等提供了重要的陆面过程模式模拟平台。实现了陆面过程模式 CAS-LSM 与气候系统模式 CAS-FGOALS-g3 的耦合，由此发展了考虑人类取用水活动和地下水侧向流的气候系统模式，研究并揭示了人类用水活动和地下水侧向流对陆地水循环和气候的影响，为研究人类取用水活动的气候反馈及其对陆面生态水文过程的影响提供了气候系统模式平台。构建了未来情景下人类取用水数据集，研究并揭示了未来不同情景下人类取用水活动对陆地水循环以及气候的影响。揭示了气候变化与人为扰动对河流温度及河流氮输送的影



响，量化了不同环境因子对河流氮输送变化的贡献。阐明了气候变暖背景下土壤冻融界面的时空变化特征并揭示了城市规划实施对城市区域气候的影响及其机制。对于进一步增加气候变化与水循环过程的理解、提高地球系统模式对水文气象的模拟和预测水平具有重要的科学意义和应用价值。发表论文 30 篇，其中 SCI 论文 25 篇，出版专著 1 部。成果被 PNAS 等国际顶级期刊多次引用，其中“人为热排放影响河流温度”的研究被《Nature Climate Change》作为 research highlights 报道。项目负责人及主要成员多次参加重要国际会议并作口头报告或特邀报告。通过本项目的实施，1 名项目主要成员获得国家自然科学基金优秀青年项目资助，培养出 6 名博士生毕业，1 名博士后出站，3 名博士生及 2 名硕士生正在学习并已得到该项目的资助。

2. 项目成果转化及应用情况。

研发考虑多种过程及人类活动作用的陆面过程模式目前正在与中国气象局气象信息中心合作应用于陆面数据同化，有望取得进展。

3. 人才培养情况。

项目在实施过程中贾炳浩博士 2022 年晋升为研究员，中国科学院青年创新促进会会员并于 2023 年获得国家自然科学基金优秀青年项目资助，培养博士后出站 1 名(谢瑾博)，培养毕业博士研究生 6 名(刘双，刘斌，李锐超，王龙欢，王妍，陈思)，在读博士研究生 3 名(田雨航，尤艳彬，闫衡)、硕士生 2 名(卢梦臣、王辰璞)，在站博士后 2 名(李锐超，王龙欢)。

4. 其他需要说明的成果。

无。

5. 项目成果科普性介绍或展示网站。

项目成果科普性介绍见：<http://zxie.lasg.ac.cn/>中本项目介绍与展示。



研究成果目录

项目负责人通过系统，从文献库中检索研究成果或者按要求格式自行填入。请按照期刊论文、会议论文、学术专著、专利、会议报告、标准、软件著作权、科研奖励、人才培养、成果转化的顺序列出，其它重要研究成果如标本库、科研仪器设备、共享数据库、获得领导人批示的重要报告或建议等，应重点说明研究成果的主要内容、学术贡献及应用前景等。

项目负责人不得将非本人或非参与者所取得的研究成果、与受资助项目无关的研究成果、未标注国家自然科学基金资助和项目批准号的论文以及取得时间早于项目资助期开始时间的研究成果列入报告中。发表的研究成果（包括专利），项目负责人和参与者均应如实注明得到国家自然科学基金项目资助和项目批准号，科学基金作为主要资助渠道或者发挥主要资助作用的，应当将自然科学基金作为第一顺序进行标注。

期刊论文

(1) **Xie Zhenghui**; Longhuan Wang; Yan Wang; Bin Liu; Ruichao Li; Jinbo Xie; Yujin Zeng; Shuang Liu; Junqiang Gao; Si Chen; Binghao Jia; Peihua Qin; Land surface model CAS-LSM: Model description and evaluation, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2020, 12. SCIE. 第一标注

(2) Xie, Jinbo; **Xie, Zhenghui**; Jia, Binghao; Qin, Peihua; Liu, Bin; Wang, Longhuan; Wang, Yan; Li, Ruichao; Chen, Si; Liu, Shuang; Zeng, Yujin; Gao, Junqiang; Li, Lijuan; Yu, Yongqiang; Dong, Li; Wang, Bin; Xie, Zhipeng; [Coupling of the CAS - LSM Land - Surface Model With the CAS - FGOALS - g3 Climate System Model](#), *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, 13(1): 1-22. SCIE. 第一标注

(3) Wang, Longhuan; **Xie, Zhenghui**; Jia, Binghao; Xie, Jinbo; Wang, Yan; Liu, Bin; Li, Ruichao; Chen, Si; Contributions of climate change and groundwater extraction to soil moisture trends, *Earth System Dynamics*, 2019, 10: 599-615. SCIE. 第一标注

(4) Wang, Yan; **Xie, Zhenghui**; Wang, Longhuan; Li, Ruichao; Chen, Si; Effects of anthropogenic disturbances and climate change on riverine dissolved inorganic nitrogen transport, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2020, 12. SCIE. 第一标注



- (5) Li, Ruichao; Xie, Jinbo; **Xie, Zhenghui**; Gao, Junqiang; Jia, Binghao; Qin, Peihua; Li, Lijuan; Wang, Bin; Yu, Yongqiang; Dong, Li; Wang, Longhuan; Wang, Yan; Liu, Bin; Chen, Si; [Simulated Spatial and Temporal Distribution of Freezing and Thawing Fronts in CAS-FGOALS-g3](#), *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, 13(10): 1-22. SCIE. 第一标注
- (6) Wang, Longhuan; Jia, Binghao; **Xie, Zhenghui**; Wang, Bin; Liu, Shuang; Li, Ruichao; Liu, Bin; Wang, Yan; Chen, Si; [Impact of groundwater extraction on hydrological process over the Beijing-Tianjin-Hebei region, China](#), *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127689. SCIE. 第一标注
- (7) Wang, Yan; **Xie, Zhenghui**; Jia, Binghao; Wang, Longhuan; Li, Ruichao; Liu, Bin; Sensitivity of snow simulations to different atmospheric forcing data sets in the land surface model CAS - LSM, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125. SCIE. 第一标注
- (8) Liu, Shuang; **Xie, Zhenghui**; Liu, Bin; Wang, Yan; Gao, Junqiang; Zeng, Yujing; Global river water warming due to climate change and anthropogenic heat emission, *Global and Planetary Change*, 2020, 193(July). SCIE. 第一标注
- (9) Gao, Junqiang; **Xie, Zhenghui**; Wang, Aiwen; Liu, Shuang; Zeng, Yujin; Liu, Bin; Li, Ruichao; Jia, Binghao; Qin, Peihua; Xie, Jinbo; A New Frozen Soil Parameterization Including Frost and Thaw Fronts in the Community Land Model, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, 11: 1-12. SCIE. 第一标注
- (10) Tian, Yuhang; **Xie, Zhenghui**; Xie, Jinbo; Jia, Binghao; Chen, Si; Qin, Peihua; Li, Ruichao; Wang, Longhuan; Yan, Heng; You, Yanbin; Liu, Bin; Analyzing the Land Surface Temperature Response to Urban Morphological Changes: A Case Study of the Chengdu - Chongqing Urban Agglomeration, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2024, 129(in press). SCIE. 第一标注
- (11) **谢正辉**; 陈思; 秦佩华; 贾炳浩; 谢瑾博; [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](#), *地球科学进展*, 2019, 34(8): 801-813. 北大中文核心期刊. 第一标注



- (12) 王龙欢; **谢正辉**; 贾炳浩; 王妍; 李锐超; 谢瑾博; 陈思; 秦佩华; 师春香;
陆面过程模式研究进展——以CAS-LSM为例, *高原气象*, 2021, 40(6): 1347-1363. 北大中文核心期刊. 第一标注
- (13) 李锐超; 谢瑾博; **谢正辉**; 不同大气强迫作用下陆面模式CAS-LSM多年冻土活动层厚度模拟与不确定性研究, *气候与环境研究*, 2021, 26(1): 31-44. 北大中文核心期刊. 第一标注
- (14) **谢正辉**; 刘斌; 延晓冬; 孟春雷; 徐宪立; 刘宇; 秦佩华; 贾炳浩; 谢瑾博; 李锐超; 王龙欢; 王妍; 陈思;
应对气候变化的城市规划实施效应评估研究, *地理科学进展*, 2020, 39(1): 120-131. 北大中文核心期刊. 第二标注
- (15) 狄振华; **谢正辉**; 陈亚宁; 塔里木河下游长期输水条件下河流剖面地下水埋深估算, *干旱区地理*, 2021,
44(3): 659-669. 北大中文核心期刊. 第二标注
- (16) Liu, Bin; **Xie, Zhenghui**; Qin, Peihua; Liu, Shuang; Li, Ruichao; Wang, Longhuan; Wang, Yan; Jia, Binghao; Chen, Si; Xie, Jinbo; Shi, Chunxiang; Increases in Anthropogenic Heat Release from Energy Consumption Lead to More Frequent Extreme Heat Events in Urban Cities, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021,
38(3): 430-445. SCIE. 第二标注
- (17) Liu Bin; **Xie Zhenghui**; Liu Shuang; Zeng Yujing; Li Ruichao; Wang Longhuan; Wang Yan; Jia Binghao; Qin Peihua; Chen Si; Xie Jinbo; Shi Chunxiang; Optimal water use strategies for mitigating high urban temperatures, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(1). SCIE. 第二标注
- (18) Longhuan Wang; Zhenghui Xie; Jinbo Xie; Yujin Zeng; Shuang Liu; Binghao Jia; Peihua Qin; Lijuan Li; Bin Wang; Yongqiang Yu; Li Dong; Yan Wang; Ruichao Li; Bin Liu; Si Chen; [Implementation of Groundwater Lateral Flow and Human Water Regulation in CAS - FGOALS - g3](#), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020,
125(18): 1-24. SCIE. 第二标注
- (19) Liu, Shuang; **Xie, Zhenghui**; Zeng, Yujin; Liu, Bin; Li, Ruichao; Wang, Yan; Wang, Longhuan; Qin, Peihua; Jia, Binghao; Xie, Jinbo; Effects of anthropogenic nitrogen discharge on dissolved inorganic nitrogen transport in global rivers, *Global Change Biology*, 2019, 00: 1-21. SCIE. 第二标注



(20) Chen, Si; **Xie, Zhenghui**; Xie, Jinbo; Liu, Bin; Jia, Binghao; Qin, Peihua; Wang, Longhuan; Wang, Yan; Li, Ruichao; Impact of urbanization on the thermal environment of the Chengdu - Chongqing urban agglomeration under complex terrain, *Earth System Dynamics*, 2022, 13(1): 341-356. SCIE. 第二标注

(21) Tariq, Mahmood; **Xie, Zhenghui**; Jia, Binghao; Ammara, Habib; Rashid, Mahmood; A Soil Moisture Data Assimilation System for Pakistan Using PODEn4DVar and CLM4.5, *Journal of Meteorological Research*, 2019, 33(6): 1182-1193. SCIE. 第二标注

(22) Zhang, Xia; **Xie, Zhenghui**; Ma, Zhuguo; Greg, A. Barron - Gafford; Russell, L. Scott; Niu, Guo - Yue; A Microbial - Explicit Soil Organic Carbon Decomposition Model (MESDM): Development and Testing at a Semiarid Grassland Site, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2022, 14(1): 1-31. SCIE. 第二标注

(23) You, Yanbin; **Xie, Zhenghui**; Jia, Binghao; Wang, Yan; Wang, Longhuan; Li, Ruichao; Yan, Heng; Tian, Yuhang; Chen, Si; [Impacts of anthropogenic water regulation on global riverine dissolved organic carbon transport](#), *Earth System Dynamics*, 2023, 14(5): 897-914. SCIE. 第二标注

(24) Jia, Binghao; Wang, Longhuan; Wang, Yan; Li, Ruichao; Luo, Xin; Xie, Jinbo; **Xie, Zhenghui**; Chen, Si; Qin, Peihua; Li, Lijuan; Chen, Kangjun; CAS-LSM Datasets for the CMIP6 Land Surface Snow and Soil Moisture Model Intercomparison Project, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(5): 862-874. SCIE. 第三标注

(25) Jia, Binghao; Cai, Ximing; Zhao, Fang; Liu, Jianguo; Chen, Si; Luo, Xin; **Xie, Zhenghui**; Xu, Jianhui; [Potential future changes of terrestrial water storage based on climate projections by ensemble model simulations](#), *Advances in Water Resources*, 2020, 142: 103635. SCIE. 第三标注

(26) Li, Ruichao; Xie, Jinbo; **Xie, Zhenghui**; Gao, Junqiang; Jia, Binghao; Qin, Peihua; Wang, Longhuan; Wang, Yan; Liu, Bin; Chen, Si; Simulated response of the active layer thickness of permafrost to climate change, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2021, 14(1): 1-6. SCIE. 第三标注



(27) Luo Xin; Jia Binghao; LAI Xin; Contributions of climate change, land use change and CO₂ to changes in the gross primary productivity of the Tibetan Plateau, *ATMOSPHERIC AND OCEANIC SCIENCE LETTERS*, 2020, 13(1): 8–15. SCIE. 第三标注

(28) Luo, Xin; Jia, Binghao; Lai, Xin; Quantitative analysis of the contributions of land use change and CO₂ fertilization to carbon use efficiency on the Tibetan Plateau, *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*, 2020, 728: 1–10. SCIE. 第三标注

(29) Liu, Ying; Yang, Haijian; Xie, Zhenghui; Qin, Peihua; Li, Rui; Parallel simulation of variably saturated soil water flows by fully implicit domain decomposition methods, *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 2020, 582. SCIE. 第三标注

(30) Jia, Binghao; Luo, Xin; Cai, Ximing; Atul Jain; Deborah N. Huntzinger; Xie, Zhenghui; Zeng, Ning; Mao, Jiafu; Shi, Xiaoying; Akihiko Ito; Wei, Yaxing; Tian, Hanqin; Benjamin Poulter; Dan Hayes; Kevin Schaefer; Impacts of land-use change and elevated CO₂ on the interannual variations and seasonal cycles of gross primary productivity in China, *Earth System Dynamics*, 2020, 11(1): 235–249. SCIE. 第四标注

学术专著

(1) 谢正辉; 贾炳浩; 王龙欢; 李锐超; 谢瑾博; 陆面过程模型及其在黑河流域模拟中的应用, 科学出版社, 2021.

会议报告

(1) 谢正辉; 包含多种过程及人类活动作用的陆面过程模式CAS-LSM 研发及应用, 第四届表层地球系统模拟与数据同化大讲堂, 天津大学 (卫津路校区, 天津市南开区卫津路92号), 2023-7-22至2023-7-25.

(2) 谢正辉; 包含多种过程及人类活动作用的陆面过程模式 CAS LSM 研发 及其与全球气候模式的耦合研究, 第四届表层地球系统科学国际学术研讨会, 天津富力万达文华酒店 (地址: 天津市河东区大直沽八号路486 号), 2023-8-6至2023-8-9.



科研奖励

(1) **谢正辉**(5/15); 气候变化对我国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策, 水利部, *科技进步*, 省部一等奖, 2020 (夏军; 罗勇; 刘志雨; 李原园; **谢正辉**; 段青云; 莫兴国; 姜彤; 占车生; 尹志杰; 沈福新; 田向军; 徐宗学; 章光新; 苏布达)。

(2) **谢正辉**(3/4); 陆面水文过程集合模拟及不确定性研究, 湖南省自人民政府, *自然科学*, 其他, 2022 (刘建国; 贾炳浩; **谢正辉**; 师春香)。

人才培养

1. 出站博士后/毕业博士/毕业硕士/在站博士后/在读博士/在读硕士

- (1) 谢瑾博; 出站博士后, 地球系统模式的研发与应用, 刘海龙, 2019-1至2022-12.
- (2) 刘双; 毕业博士, 包含人为扰动和氮磷输送的陆面过程模式研究, 谢正辉, 2012-9至2019-12.
- (3) 刘斌; 毕业博士, 考虑城市规划的陆面模式及其与区域气候模式耦合, 谢正辉, 2016-9至2019-12.
- (4) 李锐超; 毕业博士, 考虑冻融界面变化的陆面模式及其与CAS-ESM耦合, 谢正辉, 2017-9至2021-8.
- (5) 王龙欢; 毕业博士, 地下水开采对陆地水循环的影响及气候反馈, 谢正辉, 2016-9至2021-8.
- (6) 王研; 毕业博士, 人为扰动和气候变化对土壤及河流氮输送的影响, 谢正辉, 2016-9至2021-6.
- (7) 陈思; 毕业博士, 土地利用变化及城镇化对成渝城市群热环境的影响, 谢正辉, 2018-9至2022-6.
- (8) 田雨航; 在读博士, 2020-9至2023-12.
- (9) 尤艳彬; 在读博士, 2020-9至2023-12.
- (10) 闫衡; 在读博士, 2020-9.
- (11) 李锐超; 在站博士后, 2021-9.



(12) 王龙欢; 在站博士后, 2021-9.

2. 中青年学术带头人 (优青、杰青、创新群体、其他)

(1) 贾炳浩; 优秀青年科学基金, 42322502, 陆面生态水文过程数值模拟和数据同化, 2024-1至2026-12, 200.0000万元.

学术交流

(1) 2019-10-14至2019-10-18, 举办The International Conference on Regional Climate-CORDEX 2019 (ICRC-CORDEX 2019), 北京国家会议中心, International Conference on Regional Climate-CORDEX, 中国科学院大气物理研究所, Victor DIKE, Erik KJELLSTRÖM, Gaby LANGENDIJK, Zhenghui XIE等.

(2) 2019-6-17至2019-6-19, 参加The 24th Annual CESM Workshop, Boulder, Colorado, USA, 谢正辉, 王龙欢, 王妍.

(3) 2019-12-9至2019-12-13, 参加AGU Fall meeting 2019, San Francisco, USA, 谢正辉, 王龙欢, 李锐超.

(4) 2023-12-11至2023-12-15, 参加AGU Fall meeting 2023, San Francisco, USA, 谢正辉, 尤艳彬, 田雨航, 闫衡.

项目成果应用前景

本项目成果拟应用领域: 1、水文气象 2、人类活动对陆地生态水文影响评估 3、人类用水活动对气候反馈影响评估
预计在5年以内推广使用



附表：研究成果统计数据表（本表针对各种类型资助项目收集数据以便进行整体资助效果分析使用，并非要求每类项目都具有以下各类成果。）

获奖(项)	国家级						省部级				其他			
	自然科学奖		科技进步奖		发明奖		自然科学奖		科技进步奖					
	一等	二等	一等	二等	一等	二等	一等	二等	一等	二等				
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		1		
学术报告/论文/专著/其他(篇)	特邀学术报告		学术论文						学术专著		其他			
	国际学术会议	国内学术会议	发表论文数		论文检索收录情况				中文	外文	标本库	数据库	科研仪器设备	重要报告
			期刊论文	会议论文	SCIE/SSCI	EI	北大中文核心期刊	CSSCI						
	0	2	30	0	25	0	5	0	1	0	0	0	0	0
专利/标准/软著/成果转化	专利(项)				标准				软件著作权	成果转化				
	国内		国外		国际	国内				技术转让	技术许可	作价投资	经济效益(万元)	
	申请	授权	申请	授权		国家	行业	地方						企业
	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
人才培养及学术交流	人才培养(人)						举办和参加学术会议							
	中青年学术带头人				出站博士后	毕业博士	毕业硕士	举办国际学术会议		举办国内学术会议		参加国际学术会议		
	优青	杰青	创新群体	其他				次数	人数	次数	人数	次数	人数	
	1	0	0	0	1	6	0	1	300	0	0	3	10	



国家自然科学基金项目资金决算表

项目批准号：41830967

项目负责人：谢正辉

金额单位：万元

序号	科目名称	预算数			累计支出数 (4)	结余数 (5) = (3) - (4)	结余占比 (6) = (5) ÷ (3)
		批准预算	预算调整	调整后预算			
		(1)	(2)	(3) = (1) + (2)			
1	项目总经费	358.0400	0.0000	358.0400	-	-	49.97%
2	项目直接费用	305.0000	-20.4000	284.6000	105.6838	178.9162	-
3	1、设备费	39.8000	0.0000	39.8000	15.4445	24.3555	-
4	其中：设备购置费	39.8000	0.0000	39.8000	15.4445	24.3555	-
5	2、业务费	161.6000	-20.4000	141.2000	49.2553	91.9447	-
6	3、劳务费	103.6000	0.0000	103.6000	40.9840	62.6160	-
7	项目间接费用	53.0400	20.4000	73.4400	-	-	-

- 注：1. 本表仅填列自然科学基金批准资助的项目经费决算情况，其他来源资金的经费决算情况不属于本表填报范围；
2. 本表中（1）、（3）、（5）、（6）栏为系统自动生成，不需项目负责人填写；本表中（2）栏填列预算调整数；本表中（4）栏填列项目的实际支出数；
3. 本表中第7行数值由系统自动生成，不需项目负责人填写；
4. 第7行“预算调整”栏请参照《国家自然科学基金预算制项目决算表编制说明》中有关要求填列。



决算说明书

(请按照《国家自然科学基金预算制项目决算表编制说明》等的有关要求,说明项目预算支出情况、预算调整情况、资金结余情况、合作研究外拨资金情况、单价50万元(含)以上的设备情况、资金管理和使用过程中的问题建议,以及其他需要说明的事项。)

一. 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”预算执行情况

本项目基金委批准总预算358.0400万元已足额拨付。截止2023年12月31日累计支出179.1238万元,共结余178.9162万元,结余占比49.97%。具体预算执行情况如下:

设备费预算39.8000万元,支出15.4445万元,主要用于购买本项目所需的移动工作站等设备。业务费原预算161.6000万元,调减20.40万元,调整后的预算为141.2000万元,业务费支出49.2553万元,结余91.9447万元,主要用于材料费,文献出版和检索费,差旅费等方面的支出。结余主要原因是由于疫情的原因,减少了出差次数、举办的会议在线上举行。劳务费预算103.6万元,支出40.9840万元,结余62.6160万元,主要用于聘用研究生和博士后等参与了本项目研究工作的劳务费用,以及邀请相关领域专家进行学术交流的费用。间接费用原预算53.0400万元,调增预算20.4000万元,调整后预算为73.4400万元,支出为73.4400万元。

二. 预算调整情况

本项目执行期间进行了预算调整,调增间接费20.4000万元,同时调减直接经费-业务费20.4000万元,调整后间接费未超过按新政策规定的核定比例上限。具体情况如下:2021年12月,根据《国家自然科学基金委员会关于国家自然科学基金项目经费管理相关事宜的通知(国科金财函【2021】23号)》文件精神,研究所对2020年以前年度批准资助且核定间接费用的基金项目,经与项目负责人协商一致后,集中补提了间接费用,本项目调增间接经费20.4000万元。

**签字及审核意见表****项目负责人承诺：**

我所承担的项目（编号：41830967 名称：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）结题报告内容真实，数据准确，未出现《国家科学技术保密规定》中列举的属于国家科学技术秘密范围的内容。在今后的研究工作中，如有与本项目相关的成果，将如实注明得到国家自然科学基金项目资助和项目批准号，并报送国家自然科学基金委员会。

项目负责人（签章）：

日期：

依托单位科研管理部门：

负责人（签章）：

日期：

依托单位财务管理部门：

负责人（签章）：

日期：

依托单位审查意见：

依托单位公章：

科学处审核意见：完成情况
综合评分
(划√)

优

良

中

差

负责人（签章）：

日期：

科学部核准意见（对重点项目等）：

负责人（签章）：

日期：

分管委领导意见（对重大项目等）：

委领导（签章）：

日期：



电子附件目录

序号	附件类型	附件名称	备注
1	论著	代表性论文1	
2	论著	代表性论文2	
3	论著	代表性论文3	
4	论著	代表性论文4	
5	论著	代表性论文5	
6	论著	论文6首页与资助页	
7	论著	论文7-首页与资助页	
8	论著	论文8-首页与资助页	
9	论著	论文9-首页与资助页	
10	论著	论文10-首页与资助页	
11	论著	论文11-首页与资助页	
12	论著	论文12-首页与资助页	
13	论著	论文13-首页与资助页	
14	论著	论文14-首页与资助页	
15	论著	论文15-首页与资助页	
16	论著	论文16-首页与资助页	
17	论著	论文17-首页与资助页	
18	论著	论文18-首页与资助页	
19	论著	论文19-首页与资助页	
20	论著	论文20-首页与资助页	
21	论著	论文21-首页与资助页	
22	论著	论文22-首页与资助页	
23	论著	论文23-首页与资助页	
24	论著	论文24-首页与资助页	
25	论著	论文25-首页与资助页	
26	论著	论文26-首页资助页	
27	论著	论文27-首页与资助页	
28	论著	论文28-首页与资助页	
29	论著	论文29-首页与资助页	
30	论著	论文30-首页与资助页	
31	论著	学术专著1-首页与资助页	
32	奖励	大禹水利科学技术进步奖证书	大禹水利科学技术进步奖-科技进步奖一等奖



33	奖励	湖南自然科学奖奖	湖南自然科学奖奖三等奖
34	其他	博士后出站报告	
35	其他	博士学位论文1	
36	其他	博士学位论文2	
37	其他	博士学位论文3	
38	其他	博士学位论文4	
39	其他	博士学位论文5	
40	其他	博士学位论文6	
41	其他	人才项目-优秀青年基金 项目	
42	其他	研究亮点报导	

NSFC-REPORT-2023