

基于径流对气候变化敏感性指标的多源数据质量评估

倪宁淇^{1,2}, 谢佳鑫^{1,2}, 刘小莽¹, 王恺文¹, 田 巍^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 准确评估径流对气候变化的敏感性对水资源管理至关重要。多源气象水文数据集已被广泛应用于径流对气候变化敏感性的分析中,但目前尚无研究从径流敏感性的角度评价不同数据集。基于中国6个不同气候条件流域的实测气象水文资料,本文计算了径流对降水和潜在蒸散发变化的敏感性,并以此为基准评估4类数据集GLDAS、ISIMIP2a、ISIMIP2b、CMIP6共45套子数据集的径流敏感性模拟效果。结果表明:GLDAS数据集模拟精度较低,CMIP6、ISIMIP2a、ISIMIP2b数据集模拟精度差异较小;3套子数据集ISIMIP2a中的CLM4.0、CMIP6中的UKESM1-0-LL、MIROC6在6个流域均具有较好的径流敏感性模拟效果,可适用于不同气候条件下的径流敏感性模拟与演化趋势分析。本文研究结果可为气候变化影响下中国稀缺资料流域的径流和水资源变化预估提供参考。

关键词: 径流敏感性;Budyko;GLDAS;ISIMIP2a;CMIP6;ISIMIP2b;数据评估

DOI: 10.11821/dlxb202209010

1 引言

水文要素观测网络和水文数据产品是理解水循环过程的重要工具。观测网络记录了水文要素的真实值,但空间覆盖范围有限,而模型模拟的水文数据产品因具有较高的时空分辨率,被广泛用于水循环研究,如全球陆面数据同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)数据集^[1]、跨部门影响模型比较计划(Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, ISIMIP)数据集^[2]、耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)数据集等^[3]。

径流是河流重要的水文要素,大量研究基于径流的大小、周期、趋势等指标评估了不同数据集的质量^[4-6]。如Alkama等基于径流大小指标评估了CMIP5数据集,发现CMIP5数据集在全球尺度上可以较好地模拟径流大小,但在区域尺度上的偏差高达50%^[7]。Bai等基于径流的季节周期指标评估了GLDAS数据集中4个陆面模型在青藏高原的径流模拟质量,发现Noah模型表现最佳^[8]。Davie等基于径流的变化趋势指标评估了ISIMIP数据集,发现ISIMIP数据集在全球大部分地区可以重现观测径流的变化趋势^[9]。

径流如何响应气候变化是水循环研究的重要内容,直接影响到未来水资源可利用量的变化预估^[10-14]。径流对气候变化的敏感性是反映这一响应的重要指标,是指“气候变化下径流影响因素一定比例的变化导致径流变化的比例”^[15-18]。如Beighuijs等基于全球水文

收稿日期: 2021-12-24; 修订日期: 2022-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41922050) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41922050]

作者简介: 倪宁淇(1996-), 女, 重庆酉阳人, 硕士生, 研究方向为水文学与水资源。E-mail: 1041731266@qq.com

通讯作者: 刘小莽(1983-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 研究员, 研究方向为水文学与水资源。E-mail: liuxm@igsrr.ac.cn

2280-2291 页

模型 WATCH 数据集发现, 中国大部分地区降水变化 10% 导致径流变化 50% 以上^[11]; Zhang 等基于 CMIP5 数据集发现, 中国大部分地区降水变化 10% 仅导致径流变化 10%~40%^[19]。不同数据集对于同一地区径流对气候变化敏感性的刻画往往不一致, 这会导致这一地区未来水资源变化预估的不确定性。遗憾的是, 尽管存在大量研究基于各种数据集来分析径流敏感性, 但仅有少量文献提出不同数据集的径流敏感性差异较大, 且目前尚无研究从径流敏感性的角度来评估数据集质量^[20-22]。

本文旨在以实测资料计算的径流敏感性指标为基准, 评估全球不同数据集对径流响应气候变化模拟的质量。研究区为中国六大典型流域, 分别是淮河吴家渡控制流域、黄河兰州控制流域、长江汉口控制流域、松花江哈尔滨控制流域、塔里木河阿拉尔控制流域、珠江梧州控制流域, 待评价数据集包括 GLDAS、ISIMIP2a、ISIMIP2b、CMIP6 四类数据集共 45 套子数据集, 研究结果可为中国稀缺资料地区径流和水资源对气候变化的响应研究提供参考。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区与实测资料介绍

研究区控制水文站基本信息如表 1 所示, 研究区的选取标准主要有 3 点: ① 气候代表性: 根据气候分区^[23], 淮河吴家渡、长江汉口、珠江梧州控制流域为湿润区, 黄河兰州、松花江哈尔滨控制流域为半湿润区, 塔里木河阿拉尔控制流域为干旱区, 研究区气候条件从湿润到干旱有较大的跨度, 具有气候代表性; ② 靠近中上游: 所选控制水文站尽量靠近中上游, 以减弱人类取水灌溉等活动对径流敏感性计算结果的影响; ③ 流域面积大: 所选研究区流域面积足够大, 满足待评价数据集的分辨率需求。

表 1 研究区水文站的基本信息
Tab. 1 Basic information of hydrological stations in the study area

序号	河流	站名	纬度(N)	经度(E)	面积(km ²)
1	淮河	吴家渡	32°57′	117°22′	121330
2	黄河	兰州	36°03′	103°49′	222551
3	长江	汉口	30°33′	114°17′	1488036
4	松花江	哈尔滨	45°46′	126°35′	389769
5	塔里木河	阿拉尔	40°32′	81°17′	191222
6	珠江	梧州	23°27′	111°19′	327006

根据各类数据模拟时间段的重叠时期, 选择 1981—2010 年作为研究区间, 收集整理 1981—2010 年研究区的径流资料, 所用气象数据为中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集 (China Meteorological Forcing Dataset, CMFD)^[24], 空间分辨率为 0.1°×0.1°。

2.2 多源数据集

待评估的数据集分为 4 类, 分别是 GLDAS、ISIMIP2a、ISIMIP2b、CMIP6, 共包括 45 套子数据集。ISIMIP2a 和 ISIMIP2b 出自同一计划, 但 ISIMIP2a 由实测再分析数据驱动, ISIMIP2b 由 CMIP5 中地球系统模式输出的气象数据驱动, 本文将 ISIMIP2a 与 ISIMIP2b 视为两类数据集。

2.2.1 GLDAS 全球陆面数据同化系统 (GLDAS) 侧重于陆面过程的模拟。本文选择了 GLDAS1.0 提供的 CLM、NOAH、MOSAIC、VIC 模型生成的 1°×1°分辨率的水文气象数据进行研究 (包含逐月降水、温度、比湿、风速、气压、径流 7 项数据, 下同)。

2.2.2 ISIMIP2a与ISIMIP2b 跨部门影响模型比较计划 (ISIMIP) 目标在于全面评估气候变化对多个部门的影响。本文选择 ISIMIP2a 与 ISIMIP2b 中侧重于径流模拟的全球水文模型数据集进行研究。在 ISIMIP2a 中, 选择了普林斯顿数据 (PGFv2.1) 驱动 CLM4.0、H08、LPJmL、MATSIRO、MPI-HM、PCR-GLOBWB、WaterGAP2、SWBM、VIC、DBH、JULES-W1 模型, 生成的 11 套子数据集, 分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$; 在 ISIMIP2b 中, 选择了 IPSL-CM5A-LR 地球系统模式输出的气象数据驱动 CLM5.0、H08、LPJmL、MATSIRO、MPI-HM、PCR-GLOBWB、WaterGAP2 模型, 生成的 7 套子数据集, 分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 其中 1981—2005 年的驱动数据为历史期的 IPSL-CM5A-LR 数据, 2006—2010 年的驱动数据采用与该时期观测辐射强迫相似的 RCP6.0 情景的 IPSL-CM5A-LR 数据^[25]。

2.2.3 CMIP6 耦合模式比较计划 (CMIP) 的目标在于模拟过去、现在和未来由自然波动和辐射强迫变化引起的气候变化, 其模拟用到的地球系统模式能够耦合大气、海洋、陆地等多个圈层的相互作用。本文选择了 CMIP6 中 ACCESS-CM2、ACCESS-ESM1-5、BCC-CSM2-MR、CanESM5、CanESM5-CanOE、CESM2、CESM2-WACCM、CNRM-CM6-1、CNRM-ESM2-1、EC-Earth3、EC-Earth3-Veg、GISS-E2-1-G、HadGEM3-GC31-LL、INM-CM4-8、INM-CM5-0、IPSL-CM6A-LR、MIROC6、MIROC-ES2L、MPI-ESM1-2-HR、MPI-ESM1-2-LR、MRI-ESM2-0、NorESM2-MM、UKESM1-0-LL, 共 23 套地球系统模式子数据集。

3 方法介绍

3.1 Choudhury-Yang 方程计算径流敏感性

本文采用 Budyko 框架下的流域水热耦合平衡方程 Choudhury-Yang 公式计算径流对气候变化的敏感性, 包括径流对降水变化和潜在蒸散发变化的敏感性 (简称降水敏感性和潜在蒸散发敏感性), 与常用于水文分析的数学统计方法相比, Choudhury-Yang 方程物理意义明确、计算方式简单, 且考虑了流域空间异质性的影响, 在径流敏感性分析中得到广泛应用, 公式如下^[26]:

$$ET = \frac{PET \times P}{(P^n + PET^n)^{1/n}} \quad (1)$$

式中: ET 是流域多年平均蒸散发 (mm); P 是多年平均降水 (mm); PET 是多年平均潜在蒸散发 (mm); n 是反映流域下垫面特征的参数 (无量纲)。在足够长的时间尺度 (本文为 30 年), 流域多年平均蒸散发可表示为多年平均降水 P 与径流 R 的差值, 上述方程可改写为:

$$R = P - \frac{PET \times P}{(P^n + PET^n)^{1/n}} \quad (2)$$

假设上式中 P 、 PET 和 n 是相互独立的变量, 不考虑流域特征 n 的年际变化时, 式 (2) 中径流 R 的变化可以表示为以下全微分形式:

$$\frac{dR}{R} = \left(\frac{P}{R} \frac{\partial R}{\partial P} \right) \times \frac{dP}{P} + \left(\frac{PET}{R} \frac{\partial R}{\partial PET} \right) \times \frac{dPET}{PET} \quad (3)$$

根据 Schaake 的定义^[18], 降水敏感性 εP (‰/‰) 和潜在蒸散发敏感性 εPET (‰/‰) 分别为:

$$\varepsilon P = \frac{P}{R} \frac{\partial R}{\partial P}, \quad \varepsilon PET = \frac{PET}{R} \times \frac{\partial R}{\partial PET} \quad (4)$$

结合式 (2) ~ 式 (4), 可以得到 εP 和 εPET 的表达式:

$$\varepsilon P = \frac{P}{R} \frac{\partial R}{\partial P} = \left(\frac{PET \times P^n}{(PET^n + P^n)^{\frac{1}{n}+1}} - \frac{PET}{(PET^n + P^n)^{\frac{1}{n}}} + 1 \right) \times \frac{P}{R} \quad (5)$$

$$\varepsilon PET = \frac{PET}{R} \times \frac{\partial R}{\partial PET} = - \left(\frac{P}{(PET^n + P^n)^{\frac{1}{n}}} - \frac{PET^n \times P}{(PET^n + P^n)^{\frac{1}{n}+1}} \right) \times \frac{PET}{R} \quad (6)$$

式中: 敏感性可根据流域多年平均降水 P 、多年平均潜在蒸散发 PET 和下垫面参数 n 推求。其中, 下垫面参数 n 可由多年平均降水 P 、径流 R 和潜在蒸散发 PET 结合式 (2) 拟合而得。

3.2 Penman-Monteith 模型

本文采用联合国粮农组织 (FAO) 推荐的 Penman-Monteith 公式计算逐月潜在蒸散发 $PET^{[27]}$, Penman-Monteith 公式物理机制完备, 适应性强, 已有大量研究证明 Penman-Monteith 公式在中国地区的适用性^[28], 公式如下:

$$PET = \frac{0.408s(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 VPD}{s + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (7)$$

式中: PET 为潜在蒸散发 (mm); Rn 为冠层表面净辐射 ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \text{ d})$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \text{ d})$), 在月 PET 计算中, G 可忽略不计; T_a 为距地面 2 m 处日平均温度 ($^{\circ}\text{C}$); U_2 为距地面 2 m 处风速 (m/s); $VPD = e_s - e_a$, e_s 为饱和水汽压 (kPa), e_a 为实际水汽压 (kPa); s 为饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); γ 为湿度计常数 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)。

3.3 误差评价指标

本文主要利用相对误差 ($|bias|$) 评估数据集计算的径流敏感性与实测资料计算的径流敏感性之间的差异。

$$|bias| = \left| \frac{y - x}{x} \right| \quad (8)$$

式中: y 代表数据集计算的径流敏感性; x 代表实测资料计算的径流敏感性; $|bias|$ 反映两者的偏离程度, $|bias|$ 越接近 0 越优; 文中 $|bias|_{median}$ 代表多个数据集 $|bias|$ 的中位数。将 $|bias|$ 分为 4 个等级, $|bias| \leq 0.20$ 为优, $0.20 < |bias| \leq 0.40$ 为良, $0.40 < |bias| \leq 0.60$ 为一般; $|bias| > 0.60$ 为差。除相对误差外, 还使用了均方根误差 (Root Mean Squard Error, $RMSE$)、平均相对误差 (Mean Relative Error, MRE)、平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 作为评价指标^[29]。

3.4 双线性插值法

双线性插值法适用于连续型数据的尺度转换, 被广泛应用于气象水文数据的处理^[30]。为便于 CMIP6 数据的统一处理, 文本利用双线性插值法将 CMIP6 中的模型统一重采样为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

4 结果

4.1 实测资料计算的径流敏感性

淮河吴家渡、黄河兰州、长江汉口、松花江哈尔滨、塔里木河阿拉尔、珠江梧州控制流域的降水敏感性分别为 3.31、2.07、1.60、2.68、2.09、1.89, 即降水变化 1%, 研究区径流变化 1.60%~3.31%; 潜在蒸散发敏感性分别为 -2.31、-1.07、-0.60、-1.68、

-1.09、-0.89，即潜在蒸散发变化1%，研究区径流变化-2.31%~-0.61%（表2）。结果表明，淮河吴家渡控制流域的径流对降水和潜在蒸散发的变化最为敏感；长江汉口控制流域的径流对降水和潜在蒸散发的变化最不敏感。

表2 1981—2010年研究区水文气候特征及径流敏感性计算结果
Tab. 2 Hydrological and climate characteristics and runoff sensitivity calculation results of the study area from 1981 to 2010

地区	<i>R</i> (mm)	<i>P</i> (mm)	<i>PET</i> (mm)	<i>PET/P</i>	<i>n</i>	径流敏感性(%/%)	
						εP	εPET
淮河吴家渡	218.45	943.06	784.74	0.83	4.53	3.31	-2.31
黄河兰州	129.67	487.21	651.49	1.33	1.58	2.07	-1.07
长江汉口	484.77	956.49	681.26	0.71	1.34	1.60	-0.60
松花江哈尔滨	97.35	519.90	630.13	1.21	2.37	2.68	-1.68
塔里木河阿拉尔	12.21	137.63	800.63	5.82	1.21	2.09	-1.09
珠江梧州	640.87	1371.94	811.19	0.59	2.40	1.89	-0.89

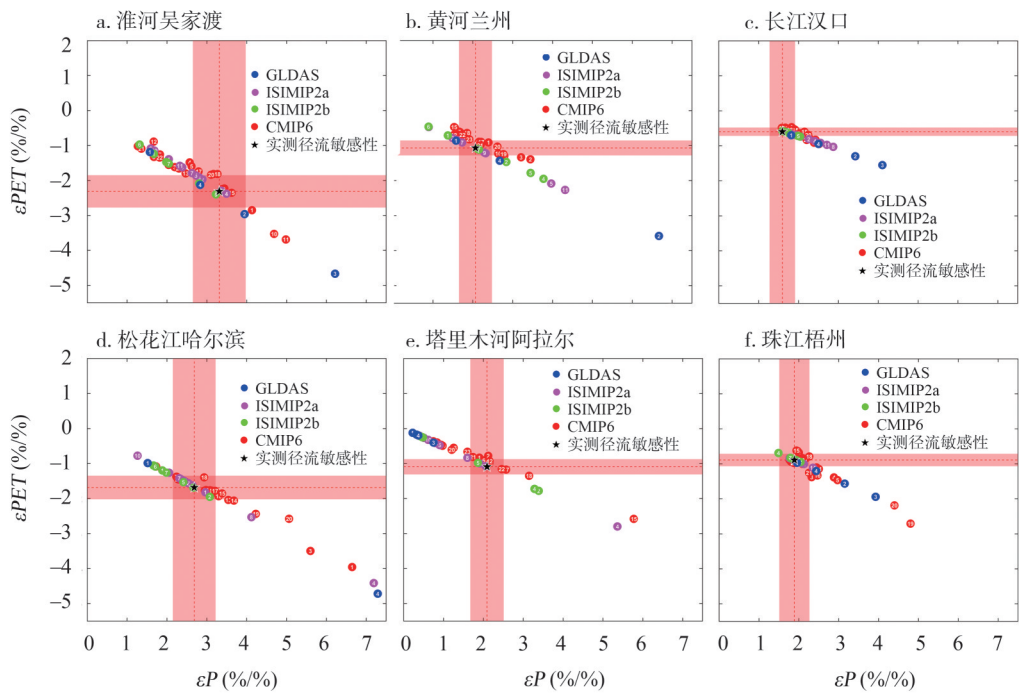
注：*P*、*PET*、*R*分别为多年平均降水、潜在蒸散发和径流；*PET/P*为干燥指数；*n*为流域下垫面参数； εP 与 εPET 分别为降水敏感性和潜在蒸散发敏感性。

4.2 多源数据集计算的径流敏感性

图1显示不同数据集计算的径流敏感性差异较大，在淮河吴家渡控制流域，当降水增加1%时，基于数据集计算的径流增加1.27%~6.22%，潜在蒸散发增加1%时，径流减少0.89%~4.67%，在其他5个流域也有类似现象。与实测资料计算的径流敏感性相比，在塔里木河阿拉尔与淮河吴家渡控制流域，大部分数据集计算的降水与潜在蒸散发敏感性绝对值偏低；在长江汉口与珠江控制流域，大部分数据集计算的降水与潜在蒸散发敏感性绝对值偏高；在黄河兰州与松花江哈尔滨控制流域，无明显高低偏向。同一流域不同数据集计算的径流敏感性与实测资料计算的径流敏感性存在较大差异，如松花江哈尔滨控制流域，CMIP6中编号为1的ACCESS-CM2子数据集计算的降水敏感性为6.65，潜在蒸散发敏感性为-3.96，而该流域实测资料计算的降水、潜在蒸散发敏感性分别为2.68与-1.68。这表明一些数据集的水文模拟可能不符合流域实际情况，用此类数据集进行径流变化预测可能会产生较大误差。

4.3 多源数据集的径流敏感性评估

4.3.1 多源数据集分类评估 图2展示了4类数据集（GLDAS、ISIMIP2a、ISIMIP2b、CMIP6）在径流敏感性模拟方面的差异。图2a和2b分别展示了4类数据集在所有流域的降水敏感性的相对误差（ $\varepsilon P|bias|$ ）和潜在蒸散发敏感性的相对误差（ $\varepsilon PET|bias|$ ）。由图2a可知，在降水敏感性方面，数据集模拟效果从优到劣排序为CMIP6（ $|bias|_{median}=0.21$ ）> ISIMIP2a（ $|bias|_{median}=0.23$ ）> ISIMIP2b（ $|bias|_{median}=0.26$ ）> GLDAS（ $|bias|_{median}=0.75$ ）；由图2b可知，在潜在蒸散发敏感性方面，数据集模拟效果从优到劣排序为CMIP6（ $|bias|_{median}=0.23$ ）= ISIMIP2a（ $|bias|_{median}=0.23$ ）= ISIMIP2b（ $|bias|_{median}=0.23$ ）> GLDAS（ $|bias|_{median}=0.79$ ）。由此可知，GLDAS数据集在径流敏感性模拟方面表现不佳，CMIP6、ISIMIP2a、ISIMIP2b数据集的表现则差异较小。进一步使用3种指标RMSE、MAE、MRE计算各类数据集的径流敏感性模拟误差，可得到相似结论，结果如表3所示。GLDAS数据集的降水和潜在蒸散发敏感性误差明显高于其他3类数据集，整体上3类数据集ISIMIP2a、ISIMIP2b、CMIP6的径流敏感性误差差异较小，CMIP6与ISIMIP2b稍优于ISIMIP2a数据集。



GLDAS: 1 CLM 2 VIC 3 Mosaic 4 Noah
ISIMIP2a: 1 CLM4.0 2 H08 3 LPJmL 4 MATSIRO 5 MPI-HM 6 PCR-GLOBWB
7 WaterGAP2 8 SWBM 9 VIC 10 DBH 11 JULES-W1
ISIMIP2b: 1 CLM5.0 2 H08 3 LPJmL 4 MATSIRO 5 MPI-HM 6 PCR-GLOBWB 7 WaterGAP2
CMIP6: 1 ACCESS-CM2 7 CESM2-WACCM 14 INM-CM4-8 20 MPI-ESM1-2-LR
2 ACCESS-ESM1-5 8 CNRM-CM6-1 15 INM-CM5-0 21 MRI-ESM2-0
3 BCC-CSM2-MR 9 CNRM-ESM2-1 16 IPSL-CM6A-LR 22 NorESM2-MM
4 CanESM5 11 EC-Earth3-Veg 17 MIROC6 23 UKESML-0-LL
5 CanESM5-CanOE 12 GISS-E2-1-G 18 MIROC-ES2L
6 CESM2 13 HadGEM3-GC31-LL 19 MPI-ESM1-2-HR

注：横坐标为径流对降水的敏感性(εP),纵坐标为径流对潜在蒸散发的敏感性(εPET)。黑色星形为实测资料计算的径流敏感性(实测径流敏感性),红色阴影为实测径流敏感性的 $\pm 20\%$ 区间($|bias| < 0.20$)。

图1 1981—2010年基于多源数据集计算的径流敏感性结果

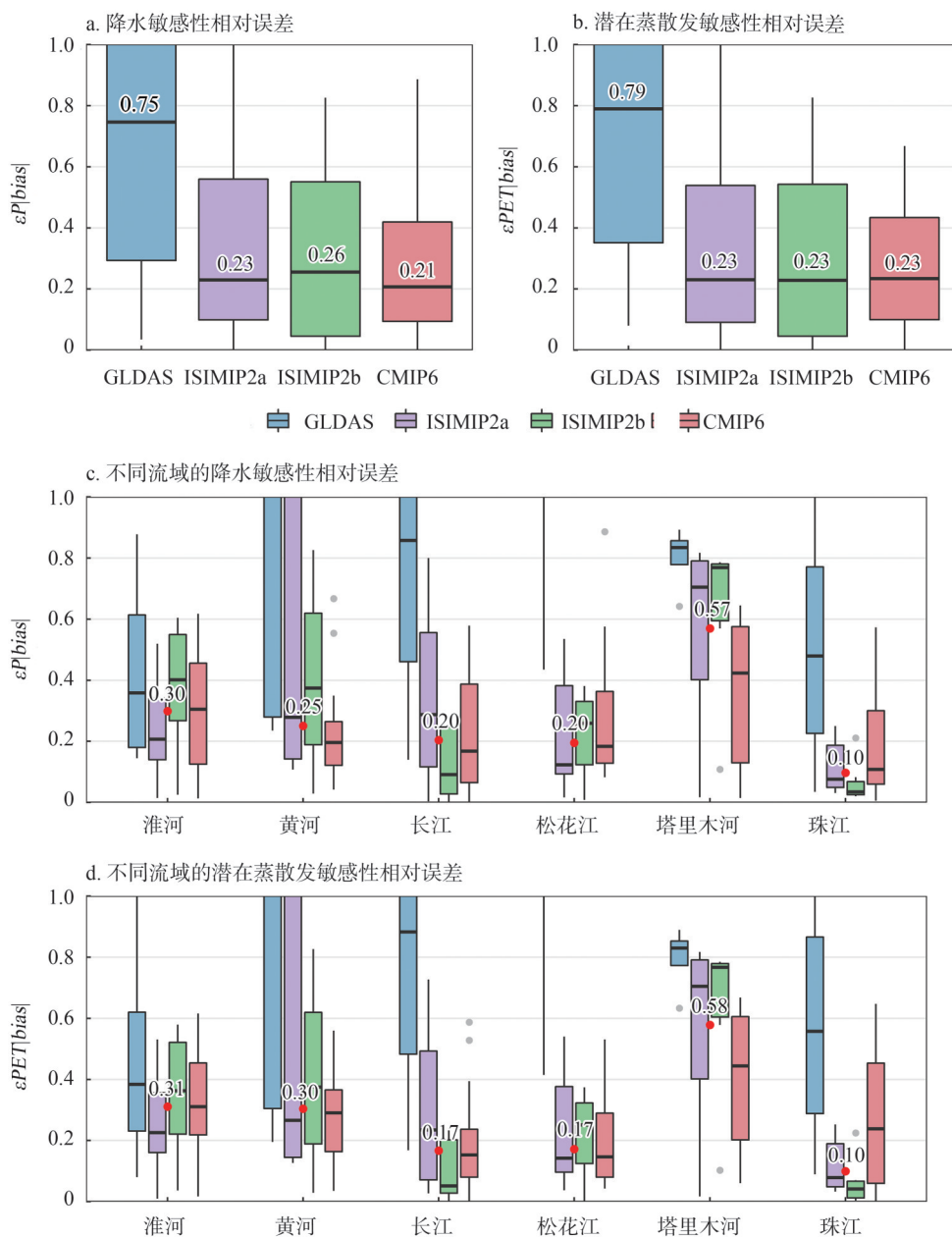
Fig. 1 Runoff sensitivity estimated by multi-source datasets from 1981 to 2010

表3 多源数据集径流敏感性的RMSE、MAE、MRE误差

Tab. 3 RMSE, MAE, MRE errors of runoff sensitivity for multi-source datasets

指标	εP				εPET			
	GLDAS	ISIMIP2a	ISIMIP2b	CMIP6	GLDAS	ISIMIP2a	ISIMIP2b	CMIP6
RMSE	3.33	1.12	0.89	0.86	2.04	0.64	0.49	0.52
MAE	2.24	0.77	0.66	0.63	1.30	0.43	0.36	0.37
MRE	1.00	0.34	0.28	0.27	1.04	0.34	0.27	0.28

图2c和2d分别展示了4类数据集在不同流域 $\varepsilon P|bias|$ 和 $\varepsilon PET|bias|$ 。从流域角度来看,多源数据集在湿润的珠江梧州控制流域径流敏感性表现最好($\varepsilon P|bias|_{median}=0.10$ 、 $\varepsilon PET|bias|_{median}=0.10$),在干旱的塔里木河阿拉尔控制流域径流敏感性表现最差($\varepsilon P|bias|_{median}=0.57$ 、 $\varepsilon PET|bias|_{median}=0.58$)。在淮河吴家渡、黄河兰州、长江汉口、松花江



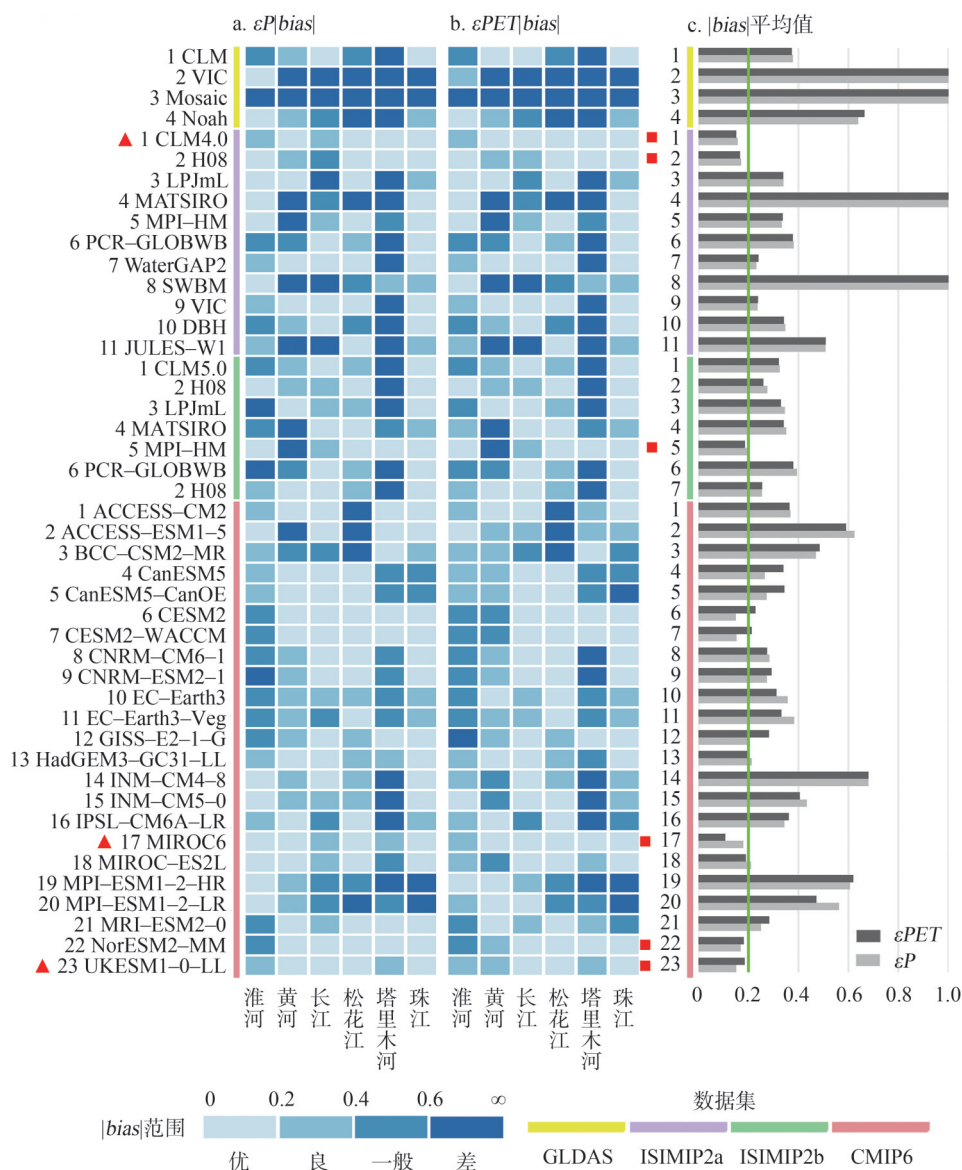
注：图c和图d中的红点代表该流域所有数据集相对误差的中位数($|bias|_{median}$)。

图2 1981—2010年多源数据集的径流敏感性的相对误差箱型图

Fig. 2 Box plot of the relative error of the runoff sensitivity of the multi-source datasets from 1981 to 2010

哈尔滨、塔里木河阿拉尔、珠江梧州控制流域，降水敏感性表现最好的数据集分别为 ISIMIP2a ($\varepsilon P|bias|_{median}=0.21$)、CMIP6 ($\varepsilon P|bias|_{median}=0.20$)、ISIMIP2b ($\varepsilon P|bias|_{median}=0.09$)、ISIMIP2a ($\varepsilon P|bias|_{median}=0.12$)、CMIP6 ($\varepsilon P|bias|_{median}=0.42$)、ISIMIP2b ($\varepsilon P|bias|_{median}=0.03$)，潜在蒸散发敏感性有相似结论。

4.3.2 多源数据集评估 图3展示了45套子数据集径流敏感性的相对误差热图。图3a和3b分别展示了数据集的降水敏感性相对误差 ($\varepsilon P|bias|$) 和潜在蒸散发敏感性相对误差



注：图a为径流对降水敏感性的相对误差($\varepsilon P|bias|$)，图b为径流对潜在蒸散发敏感性的相对误差($\varepsilon PET|bias|$)，图c为各数据集在6个流域的 $\varepsilon P|bias|$ 、 $\varepsilon PET|bias|$ 平均值；图a红色三角形表示红色正方形标记的数据集在6个流域的降水和潜在蒸散发敏感性表现均为良或优($|bias| < 0.4$)的数据集，图c红色正方形表示数据集在6个流域的降水、潜在蒸散发敏感性平均表现均为优($|bias|$ 平均值 < 0.2)。

图3 1981—2010年多源数据集的径流敏感性相对误差热图

Fig. 3 Heat map of relative error of runoff sensitivity of multi-source dataset from 1981 to 2010

($\varepsilon PET|bias|$)，图3c展示了数据集在各流域的 $|bias|$ 平均值。为了筛选能够适应不同气候条件径流敏感性模拟的子数据集，本文设定两条筛选规则，规则1：数据集在6个流域 $\varepsilon P|bias|$ 、 $\varepsilon PET|bias|$ 的平均值均小于0.20（对应图3c）；规则2：数据集在每个流域的 $\varepsilon P|bias|$ 、 $\varepsilon PET|bias|$ 均小于0.40（对应图3a、3b），这两条规则保证了所筛选的子数据集在6个流域平均表现为优，且在每个流域表现为良以上。满足规则1的子数据集在图3c中以红色正方形标记，分别为：ISIMIP2a中的CLM4.0、H08子数据集，ISIMIP2b中的

MPI-HM 子数据集, 以及 CMIP6 中的 MIROC6、NorESM2-MM、UKESM1-0-LL 子数据集。在满足规则 1 的数据集里进一步筛选同时满足规则 2 的子数据集, 发现 ISIMIP2a 中的 CLM4.0 以及 CMIP6 中的 UKESM1-0-LL、MIROC6 在 6 个流域均能将降水和潜在蒸散发的敏感性控制在良以上, 表明这 3 套子数据集能适应各种气候条件的径流敏感性模拟。

图 3 展示的子数据集在各流域的表现情况与 4.3.1 节的分析结果相符, 可明显看出在珠江梧州控制流域评估为优的子数据集最多, 45 套子数据集中仅 5 套子数据集在降水敏感性或潜在蒸散发敏感性方面表现为差, 分别是 GLDAS 中的 VIC、Mosaic, CMIP6 中的 CanESM5-CanOE、MPI-ESM1-2-HR、MPI-ESM1-2-LR 数据集; 而在塔里木河阿拉尔控制流域, 大部分子数据集均不能模拟好该地区的径流敏感性, 整体上超过 70% 的数据集表现在一般及以下, 大量表现为差的数据集中在 GLDAS, ISIMIP2a、ISIMIP2b 数据集中, CMIP6 在塔里木河的表现优于其他 3 类数据集。总体而言, 子数据集在湿润区模拟较好, 在干旱区模拟较差, 但在湿润的淮河流域, 也有相当数量子数据集模拟的径流敏感性效果一般。淮河地区下垫面参数 $n = 4.53$, 远高于其它地区, 下垫面参数代表了下垫面土壤、地形、植被等条件, 推测可能是复杂的下垫面条件导致各数据集不能较好地模拟淮河流域的径流敏感性。径流敏感性模拟效果区域差异性的原因需要进一步探讨。在分析过程中, 也发现了一些径流敏感性远远偏离观测值的子数据集, 如 ISIMIP2a 中的 SWBM 子数据集, 其径流敏感性计算结果表明, 黄河流域降水增加 1% 时, 径流增加 24.83%, 潜在蒸散发增加 1% 时, 径流减少 25.27%, 与实测径流敏感性误差高达 4 倍以上, MATSIRO 子数据集与实测径流敏感性的误差也将近两倍以上, 此类误差较高的数据集在图 3c 呈现的 $|\text{bias}|$ 平均值大于 1, 未来径流变化预估分析中要注意规避此类数据集, 以免对研究结果带来显著误差。

5 讨论

5.1 数据集模拟效果的区域差异性原因

数据集对径流敏感性的模拟在最湿润的珠江梧州控制流域表现最好, 而在最干旱的塔里木河阿拉尔控制流域表现不佳, 这与前人对水文模型在径流模拟方面的评估结果具有相似性^[31]。可能是因为干旱地区植被覆盖状况差, 土壤湿度低, 包气带较厚, 下垫面情况复杂, 为典型的超渗产流机制, 当前的模型无法准确刻画干旱地区复杂的水力和水文过程^[32-33], 导致水文模型、陆面模型和地球系统模型对于干旱区的径流响应模拟较差。此外, 观测径流受到水土保持、大坝建设、调水工程等人类活动影响, 而不同流域受人类活动的影响程度不一, 可能也导致了数据集模拟的区域差异性^[34-35], 未来研究可以探究径流敏感性模拟效果与干旱指数、植被覆盖指数、人类活动情况等多因子的相关性, 进一步分析各类数据集在径流敏感性模拟效果方面产生区域差异性的具体原因。

5.2 如何提高径流敏感性模拟能力

前人研究中指出径流敏感性模拟效果与相应模型的数据驱动、物理机理、参数率定等多方面因素有关。ISIMIP 数据集考虑了水库、灌溉等人类活动影响, CMIP6 数据集耦合了陆气相互作用, 这可能是本文中 ISIMIP 与 CMIP6 数据集的径流敏感性模拟效果优于 GLDAS 数据集的原因之一。此外, 研究表明模型参数率定能够提高径流模拟能力^[36], 可能同样能改善径流敏感性的模拟能力。已有较多的研究表明, ISIMIP2b 中的 WaterGAP2 模型经过参数率定后, 在径流模拟上有较好的表现^[37]。本文中这两项数据集同样在大部分流域径流敏感性表现良好。因此, 模型参数率定可能是提高敏感性模拟的方法之一。

除了改进模型结构和参数率定外,也有研究建议采用多模型的集合平均值进行气候变化研究^[38]。本文对这一观点进行了初步探索,对4类数据集的降水、潜在蒸散发、径流分别进行集合平均,得到4套集合平均数据集。结果发现在大部分流域集合平均数据集降低了误差,在潜在蒸散发敏感性方面,与4类数据集在各流域的 $\varepsilon_{PET}|bias|$ 中位数相比,GLDAS、ISIMIP2a、ISIMIP2b、CMIP6集合平均数据集在各流域的 $\varepsilon_{PET}|bias|$ 平均降低了41%、10%、6%、37%,降水敏感性有相似结论。其中,CMIP6集合平均数据集在各流域的降水和潜在蒸散发敏感性表现均提高到良以上,这表明多模式集合平均方法可以改善数据集径流敏感性模拟效果。

5.3 研究的不确定性

径流敏感性计算方法的选择是本文不确定性的来源之一。目前的径流敏感性方法主要分为3类,分别是水文模型法、数理统计法以及基于Budyko的解析方法。水文模型法是通过改变水文模型输入得到径流敏感性;数理统计法主要是指基于线性回归等统计方法,构建径流和降水、潜在蒸散发的关系得到径流敏感性;基于Budyko的解析方法是基于不同的Budyko解析公式,构建径流和降水、潜在蒸散发的关系得到径流敏感性。不同方法可能得到不一样的径流敏感性计算结果,未来研究要进一步比较不同敏感性计算方法带来的评估差异。此外,文中基于 $|bias|$ 的评级分类标准有一定的主观性,但评估结果具有参考价值。

6 结论

本文选择了中国气候条件差异较大的6个流域,以1981—2010年实测气象水文资料计算的径流敏感性为标准,评估GLDAS、ISIMIP2a、ISIMIP2b、CMIP6 4类共45套数据集的径流敏感性表现,得出以下主要结论:①以每类数据集降水和潜在蒸散发敏感性相对误差中位数为评估指标,GLDAS数据集在径流对降水和潜在蒸散发敏感性方面模拟较差,ISIMIP2a、ISIMIP2b、CMIP6数据集模拟效果差异较小。②ISIMIP2a中的CLM4.0数据集、CMIP6中的UKESM1-0-LL和MIROC6数据集在6个流域表现均为优或良,表明这3套数据集能适应各种气候条件的径流敏感性模拟,推荐这3套数据集用于中国稀缺资料地区径流变化的预估研究。

本文结果可为气候条件相似的稀缺资料流域径流变化预估分析提供参考,未来可拓宽研究区范围,探究不同数据集产生区域模拟差异的原因,尝试从模型参数率定、结构改善等方面提高径流敏感性模拟效果。

参考文献(References)

- [1] Rodell M, Houser P R, Jambor U E A, et al. The global land data assimilation system. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381-394.
- [2] Warszawski L, Frieler K, Huber V, et al. The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework. PNAS, 2014, 111(9): 3228-3232.
- [3] Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development, 2016, 9(5): 1937-1958.
- [4] Wang Wen, Cui Wei, Wang Peng, et al. Comparison of GLDAS Noah Model Hydrological Outputs with ground observations and satellite observations in China. Water Resources and Power, 2017, 35(5): 1-6. [王文, 崔巍, 王鹏. GLDAS Noah模型水文产品与中国地面观测及卫星观测数据的对比. 水电能源科学, 2017, 35(5): 1-6.]
- [5] Chen H, Liu J G, Mao Q G, et al. Intercomparison of ten ISI-MIP models in simulating discharges along the Lancang-Mekong River basin. Science of the Total Environment, 2021, 765(3): 144494. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144494.
- [6] Lyu Ruizhe, Zhao Xiaoxiang, Weng Baisha, et al. Climate model suitability evaluation and drought and flood forecast in Wuliangsuhai basin. Yellow River, 2017, 39(4): 53-57. [吕睿喆, 赵晓祥, 翁白沙, 等. 乌梁素海流域气候模式适用性

- 评价及旱涝预估. 人民黄河, 2017, 39(4): 53-57.]
- [7] Alkama R, Marchand L, Ribes A, et al. Detection of global runoff changes: Results from observations and CMIP5 experiments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(7): 2967-2979.
- [8] Bai P, Liu X, Yang T, et al. Evaluation of streamflow simulation results of land surface models in GLDAS on the Tibetan plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(20): 12180-12197.
- [9] Davie J C S, Falloon P D, Kahana R, et al. Comparing projections of future changes in runoff from hydrological and biome models in ISI-MIP. *Earth System Dynamics*, 2013, 4(2): 359-374.
- [10] Yang H B, Qi J, Xu X Y, et al. The regional variation in climate elasticity and climate contribution to runoff across China. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 607-616.
- [11] Berghuijs W R, Larsen J R, van Emmerik T H M, et al. A global assessment of runoff sensitivity to changes in precipitation, potential evaporation, and other factors. *Water Resources Research*, 2017, 53(10): 8475-8486.
- [12] Zheng H X, Zhang L, Zhu R R, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): 56-64.
- [13] Bharat S, Mishra V. Runoff sensitivity of Indian sub-continental river basins. *Science of the Total Environment*, 2021, 766: 142642. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142642.
- [14] Tang Y, Tang Q H, Zhang L. Derivation of interannual climate elasticity of streamflow. *Water Resources Research*, 2020, 56(11): e2020WR027703. DOI: 10.1029/2020WR027703.
- [15] Dooge J C I, Bruen M, Parmentier B. A simple model for estimating the sensitivity of runoff to long-term changes in precipitation without a change in vegetation. *Advances in Water Resources*, 1999, 23(2): 153-163.
- [16] Fu G B, Charles S P, Chiew F H S. A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow. *Water Resources Research*, 2007, 43(11): 2578-2584.
- [17] Milly P C D, Dunne K A. Macroscale water fluxes 2. Water and energy supply control of their interannual variability. *Water Resources Research*, 2002, 38(10): 1206. DOI: 10.1029/2001WR000760.
- [18] Schaake J C. From Climate to Flow: Climate Change and US Water Resources. New York: John Wiley, 1990: 177-206.
- [19] Zhang X J, Tang Q H, Zhang X Z, et al. Runoff sensitivity to global mean temperature change in the CMIP5 models. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(15): 5492-5498.
- [20] Lehner F, Wood A W, Vano J A, et al. The potential to reduce uncertainty in regional runoff projections from climate models. *Nature Climate Change*, 2019, 9(12): 926-933.
- [21] Liu D, Mishra A K, Zhang K. Runoff sensitivity over Asia: Role of climate variables and initial soil conditions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(4): 2218-2238.
- [22] Nash L L, Gleick P H. Sensitivity of streamflow in the Colorado Basin to climatic changes. *Journal of Hydrology*, 1991, 125(3/4): 221-241.
- [23] Zhang Cunjie, Liao Yaoming, Duan Juqi, et al. The progresses of dry-wet climate divisional research in China. *Climate Change Research*, 2016, 12(4): 261-267. [张存杰, 廖要明, 段居琦, 等. 中国干湿气候区划研究进展. 气候变化研究进展, 2016, 12(4): 261-267.]
- [24] He J, Yang K, Tang W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 25. DOI: 10.1038/s41597-020-0369-y.
- [25] Gudmundsson L, Boulange J, Hong X D, et al. Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. *Science*, 2021, 371(6534): 1159-1162.
- [26] Yang Dawen, Zhang Shulei, Xu Xiangyu, et al. Attribution analysis for runoff decline in Yellow River Basin during past fifty years based on Budyko hypothesis. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2015, 45(10): 1024-1034. [杨大文, 张树磊, 徐翔宇, 等. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(10): 1024-1034.]
- [27] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [28] Wang Liping, Wen Ming, Song Jinxi, et al. Spatial-temporal variation of aridity index during 1961-2014 in China. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(9): 1488-1498. [王利平, 文明, 宋进喜, 等. 1961—2014年中国干燥度指数的时空变化研究. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1488-1498.]
- [29] Cheng Lu, Shen Runping, Shi Chunxiang, et al. Evaluation and verification of CMORPH and TRMM 3B42 precipitation estimation products. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(11): 1372-1379. [成璐, 沈润平, 师春香, 等. CMORPH和TRMM 3B42降水估计产品的评估检验. 气象, 2014, 40(11): 1372-1379.]
- [30] Hu Yunfeng, Xu Zhiying, Liu Yue, et al. A review of the scaling issues of geospatial data. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(3): 297-304. [胡云锋, 徐芝英, 刘越, 等. 地理空间数据的尺度转换. 地球科学进展, 2013, 28(3): 297-304.]
- [31] Kan G Y, He X Y, Ding L Q, et al. Study on applicability of conceptual hydrological models for flood forecasting in humid, semi-humid semi-arid and arid basins in China. *Water*, 2017, 9(10): 719. DOI: 10.3390/w9100719.

- [32] Liu Song, Zhang Liping, She Dunxian, et al. Applicability of catchment hydrologic models in arid and semi-arid regions. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2019, 52(5): 384-390. [刘松, 张利平, 余敦先, 等. 干旱半干旱地区流域水文模型的适用性. *武汉大学学报(工学版)*, 2019, 52(5): 384-390.]
- [33] Huang Pengnian, Li Zhijia, Yao Cheng, et al. Application and comparison of hydrological models for semi-arid and semi-humid regions. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(4): 4-9. [黄鹏年, 李致家, 姚成, 等. 干旱半湿润流域水文模型应用与比较. *水力发电学报*, 2013, 32(4): 4-9.]
- [34] Cheng H, Wang W, van Oel P R, et al. Impacts of different human activities on hydrological drought in the Huaihe River Basin based on scenario comparison. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021, 37: 100909. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100909.
- [35] Tian Jing, Guo Shenglian, Liu Dedi, et al. Impacts of climate and land use/cover changes on runoff in the Hanjiang River basin. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2307-2318. [田晶, 郭生练, 刘德地, 等. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响. *地理学报*, 2020, 75(11): 2307-2318.]
- [36] Hattermann F F, Krysanova V, Gosling S N, et al. Cross-scale intercomparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins. *Climatic Change*, 2017, 141(3): 561-576.
- [37] Mateo C M, Hanasaki N, Komori D, et al. Assessing the impacts of reservoir operation to floodplain inundation by combining hydrological, reservoir management, and hydrodynamic models. *Water Resources Research*, 2014, 50(9): 7245-7266.
- [38] Gudmundsson L, Tallaksen L M, Stahl K, et al. Comparing large-scale hydrological model simulations to observed runoff percentiles in Europe. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(2): 604-620.

Multi-source data quality assessment based on the index of runoff sensitivity to climate change

Ni Ningqi^{1,2}, XIE Jiaxin^{1,2}, LIU Xiaomang¹, WANG Kaiwen¹, TIAN Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Accurately assessing the sensitivity of runoff to climate change is critical for water resource management. In recent years, multi-source meteorological and hydrological datasets have been widely used in the analysis of runoff sensitivity to climate change, but no studies has evaluated different datasets from the perspective of runoff sensitivity. Based on the observed meteorological and hydrological data of six watersheds in China with different climatic conditions, the sensitivity of runoff to changes in precipitation and potential evapotranspiration were estimated. The sensitivity index was then used as the benchmark to evaluate the simulation capability of runoff sensitivity of 45 datasets in GLDAS (Global Land Data Assimilation System), ISIMIP2a (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project Phase 2a), ISIMIP2b, CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6). The results showed that the simulation accuracy of the GLDAS dataset was low, and the simulation accuracies of CMIP6, ISIMIP2a, and ISIMIP2b datasets had little difference. For specific datasets, CLM4.0 in ISIMIP2a, UKESM1-0-LL and MIROC6 in CMIP6 had good runoff sensitivity simulation results in the six watersheds, and they can be applied to runoff sensitivity simulations under different climatic conditions. The results can provide reference for the predictions of runoff and water resources changes in watersheds with limited observation data under the influence of climate change.

Keywords: runoff sensitivity; Budyko; GLDAS; ISIMIP2a; CMIP6; SIIMIP2b; data evaluation