https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.330

全球主要流域径流变化趋势分析与定量归因

任婵月[1,2],张艺帆[1],李正阳[1],鲍振鑫[2],王国庆[2],刘剑宇[1,2*]

1. 中国地质大学地理与信息工程学院,湖北武汉 430078
2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210098

摘 要: 受水文站数量与空间分布的制约,目前径流变化研究集中于区域或流域尺度,基于实测数据且综合考虑多种因子影响的全球尺度径流变化趋势归因尚待开展.基于此,本文整合多套站点实测径流数据,并提取各站点对应集水区范围的气象和植被数据,构建了当前站点数量最多、空间分布最完整的全球气象水文数据集.采用Mann-Kendall等趋势分析方法,检测了全球4 469个水文站点径流变化趋势;基于随机森林方法,建立全球径流变化趋势归因框架,定量评估了降水、潜在蒸散发、植被叶面积指数、融雪4个驱动因子对全球主要流域径流变化的影响.结果表明,全球径流变化以减少趋势为主,径流显著减少(增加)趋势站点占比28.2%(9.7%).植被变化主导了全球42.2%的水文站点径流变化趋势,高于降水(35.3%)、潜在蒸散发(12.5%)和融雪(10.0%)主导的站点.

关键词: 径流变化;定量归因;植被;融雪;全球尺度;地理分布;水文学.

中图分类号: P933 **文章编号:** 1000-2383(2023)09-3518-08 **收稿日期:** 2022-05-17

Evaluation and Quantitative Attribution of Streamflow Trends over the Global Major River Basins

Ren Chanyue[1,2], Zhang Yifan[1], Li Zhengyang[1], Bao Zhenxin[2], Wang Guoqing[2], Liu Jianyu[1,2*]

1. *School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan* 430078, *China*
2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing* 210029, *China*

Abstract: Limited by the available gauging hydrological data, most studies concerning streamflow change are restricted to the regional scale. By combining two streamflow datasets and extracting their corresponding meteorological data, we obtained the most complete global hydrometeorological dataset. Furthermore, we applied the Mann-Kendall test to examine the streamflow change at 4 469 global stations. Lastly, based on the random forest method, we developed an attribution framework to quantify the contributions of precipitation (P), potential evapotranspiration (PET), leaf area index (LAI) and snowmelt to observe streamflow change. The results indicate that the global streamflow change is mainly showing a decreasing trend, with 28.2% (9.7%) of global stations showing significantly decreasing (increasing) trends. For 42.2% of global stations, streamflow changes are dominated by the LAI, while P, PET, and snowmelt dominate 35.3%, 12.5%, and 10.0%, respectively.

Key words: streamflow change; quantitative attribution; vegetation; snowmelt; global scale; geographical distribution; hydrology.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42001042);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室"一带一路"水与可持续发展科技基金项目(No. U2020nkms01);大学生创新创业训练计划项目(No. S202210491094).

作者简介: 任婵月(2000-),女,硕士研究生,主要从事径流变化模拟与归因研究.ORCID: 0000-0003-0969-8882. E-mail: rcy@cug.edu.cn
* **通讯作者:** 刘剑宇,E-mail: liujy@cug.edu.cn.

引用格式: 任婵月,张艺帆,李正阳,鲍振鑫,王国庆,刘剑宇,2023.全球主要流域径流变化趋势分析与定量归因.地球科学,48(9):3518-3525.
Citation: Ren Chanyue, Zhang Yifan, Li Zhengyang, Bao Zhenxin, Wang Guoqing, Liu Jianyu, 2023. Evaluation and Quantitative Attribution of Streamflow Trends over the Global Major River Basins. *Earth Science*, 48(9): 3518-3525.

河川径流是水文循环的关键环节，也是可利用水资源的主要组成部分（李天生和夏军，2018），其变化直接影响水资源开发与利用，进而影响社会经济的可持续发展（夏军和石卫，2016）. 变化环境下水资源与水安全问题，已成为水文水资源学界和水资源管理部门广泛关注的全球性问题. 径流变化及其成因，是水资源高效开发利用和水资源管理当中最为基础、最为核心的科学问题（Gu *et al.*, 2020），更是难点问题. 理解径流变化及其主导机制，对区域与全球水资源规划管理、防灾减灾及保障水资源安全具有重要意义.

受限于水文站点的数量与空间分布密度，已有径流变化模拟与归因集中于区域尺度，如欧洲（Hannaford and Buys, 2012；Teuling *et al.*, 2019）、北美（Ahn and Merwade, 2014）、亚洲（杨大文等，2015；陈钟望，2017）和大洋洲（Liu *et al.*, 2019）等，取得了丰富的研究成果. 国内在径流归因方面也有较多研究，例如，郝振纯等（2007）通过建立不同的分布式水文模型，评估了未来地表的水资源变化趋势和地表径流过程，结果表明未来径流量总体趋势不断降低；李宗省等（2010）利用丽江盆地气象水文观测资料，发现融雪增加导致漾弓江流域径流量明显上升；常启昕等（2022）通过分析高寒山区河道径流的形成与水文调节机制的相关文献，认为气候变化是影响高寒山区河道径流形成过程的主导因素. 然而，区域尺度研究中采用的水文站点数据普遍较少，且采用的研究方法、研究时段各异，难以概括出全球径流变化及其成因的一般规律. 近年来，已有学者开始关注全球尺度径流变化成因. 例如，Liu *et al.*（2019）通过构建径流变率对降水、潜在蒸散发、陆地储水变化和流域特征变率的全微分分解方程，发现全球模拟径流变率在多个时间尺度上的主导因子均为降水. Zhou *et al.*（2015）采用基于Budyko假设的水热耦合平衡框架，定量评估了湿润指数（降水/潜在蒸散发）和流域特征（Budyko参数 m）对全球模拟径流变化的影响. Berghuijs *et al.*（2017）基于Budyko假设检测了降水、潜在蒸散发及其他因子对径流变化的相对重要程度，结果表明降水变化主导了全球83%的区域模拟径流变化. 然而，由于全球实测数据的缺乏，这些研究均采用模拟的径流数据集对径流变化进行归因分析，目前尚缺乏基于实测数据集的归因分析. 因此，全球尺度下实测径流的变化规律及其主导因素仍有待研究.

此外，已有研究主要评估降水、潜在蒸散发与其他因子的贡献. 一般而言，降水是径流的主要来源，但降水变化不显著时，主导径流变化的可能是其他因子，如变化显著的叶面积指数（*LAI*）. Li *et al.*（2017）基于全球162个大型研究流域评估森林覆盖率对径流变化的影响，发现森林覆盖率变化主导了这些流域48.5%±20.0%的径流变化；Wei *et al.*（2018）强调植被是径流变化的又一主导因子，因植被覆盖度变化而导致的全球年径流变化的占比为30.7%±22.5%. 同时，由于气候变暖，融雪对径流的贡献逐渐增大. 例如，Musselman *et al.*（2021）认为累积季节融雪趋势是水文变化的关键指标，并比较了北美西部积雪监测站的融雪和雪水当量的长期变化，发现34%的监测站呈现出冬季融雪增加的趋势. 前人研究表明，降水、潜在蒸散发、植被和融雪是影响径流变化的重要影响因素. 然而，现有研究缺乏对这些要素的综合考虑. 因此，本研究通过构建径流变化趋势定量归因框架，首次量化上述4因子对径流变化趋势的影响，研究结果有助于深入理解径流变化成因.

1　数据

1.1　径流数据

本研究的径流数据主要来自GSIM数据集（Global Streamflow Indices and Metadata Archive）（Rodell *et al.*, 2004），该数据集包含全球30 959个站点的月尺度径流数据（Zhu *et al.*, 2013）. 由于GSIM数据集严重缺乏中国境内的水文站点，因此，本研究进一步搜集了中国范围内375个水文站点径流数据，数据的时间跨度为1960—2020年. 整合上述两部分数据，可形成全球范围内时间跨度大、流域面积广的气象水文数据集（图1）.

1.2　气象与植被数据

降水与潜在蒸散发数据来自东安格利亚大学气候研究所的CRU TS v3.24.01数据集，其时间分辨率为30 d，空间分辨率为1/2°，时间跨度为1901年至2019年. 植被数据来源于GlobMap植被叶面积指数（*LAI*）数据. 该数据集通过定量化融合Advanced very High Resolution Radiometer（AVHRR）和best-quality Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer（MODIS）两套产品而形成. 该数据集的时间分辨率为15 d，空间分辨率为1/12°，时间覆盖范围为1981年7月至2017年12月. 融雪数据来

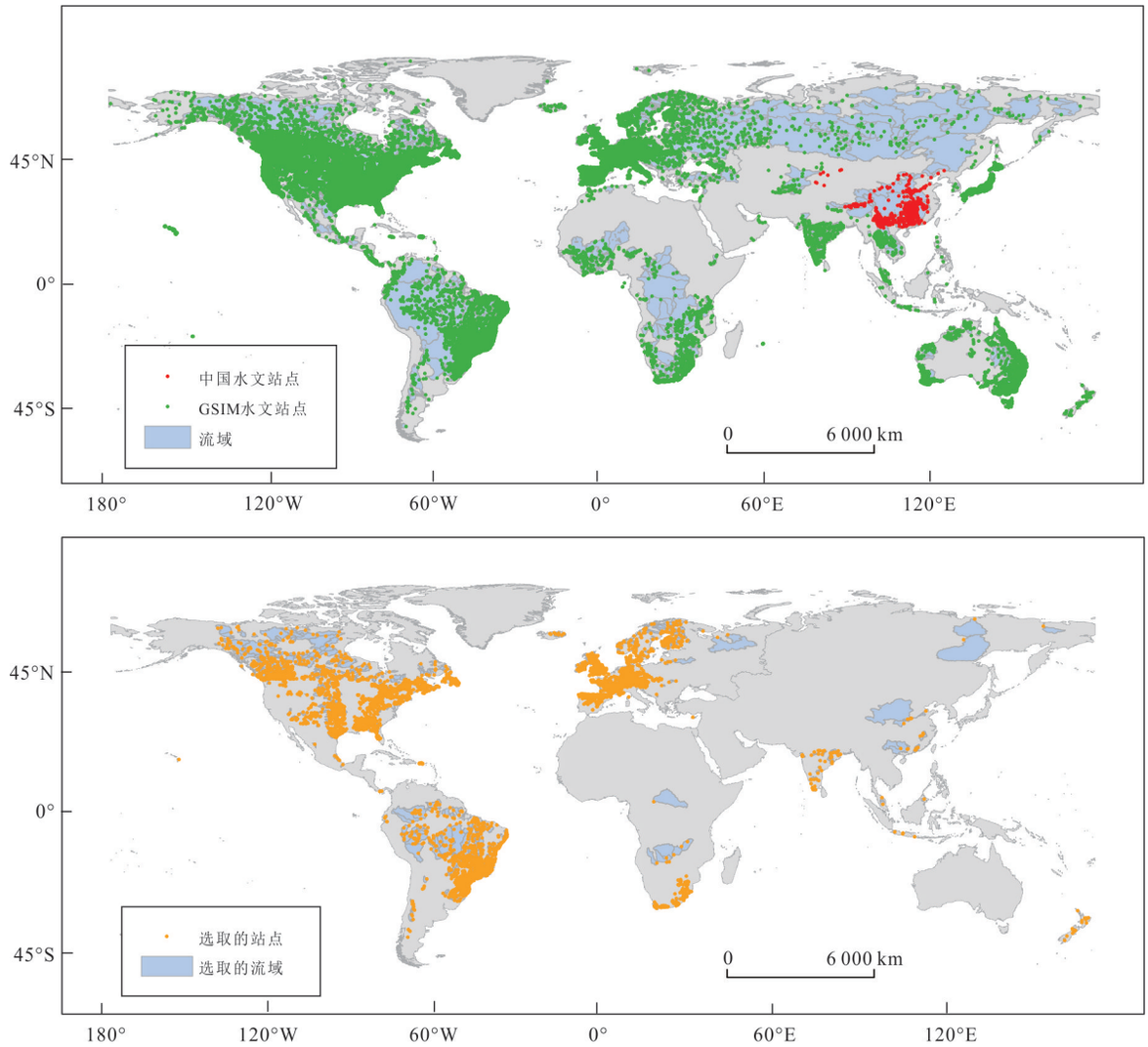

图1 水文站点及其对应流域空间分布

Fig.1 Spatial distribution of global hydrological stations and catchments

源为Global Land Data Assimilation System(GLDAS)数据集,时间分辨率为1 d,空间分辨率为1°,时间跨度为1948—2014年.

本研究利用各站点对应的流域范围shapefile文件,提取各流域逐月平均气象和植被数据.GSIM径流数据集自带shapefile文件;对于中国站点的流域shapefile文件,根据站点经纬度坐标和美国地质调查局发布的1 km空间分辨率高程数据,利用ArcGIS提取获得.

1.3 数据筛选

综合考虑气象和植被数据的覆盖时长,选用1982—2014年作为研究时段.为保证数据质量,本研究采用以下标准筛选水文站点:(1)径流数据观测时长不少于20 a;(2)站点经纬度信息齐全;(3)站点多年平均年降水量与平均年融雪量之和大于年径流深;(4)人类活动干扰较小,具体条件为去除灌溉面积超过流域面积的2%或集水区范围存在大型水库的站点(Yang *et al.*, 2018).经筛选后,共有4 469个水文站点符合筛选标准(图1).所选站点覆盖了全球大部分非冰川和非沙漠地区,具有全球代表性.

2 方法

2.1 随机森林

随机森林模型最早由Breiman(2001)提出,属于机器学习中的集成学习算法.模型由多棵独立决策树组成,每棵决策树通过自助重采样技术进行有放回的样本抽取,并在抽中的样本集中随机抽取特征集,而未被抽取的样本作为袋外数据,用于验证决策树.随机森林允许样本中存在非线性关系及部

分样本缺失，相较于单一决策树，降低了样本过拟合的风险，并提高了样本特征的可解读性与整个回归过程的计算效率（Stein *et al.*, 2021）. 因此，随机森林可以将不同气象植被因子作为样本特征，进而构建全球范围内流域尺度径流模拟回归模型.

本文利用月尺度径流及气象植被因子数据，对筛选得到的每个站点分别建立随机森林回归模型，采用确定系数 R^2 评估各站点建模效果. 在建立模型时，若某站点融雪量非长期（不超过 5 a），则该站点建模时只采用降水、潜在蒸散发、叶面积指数作为驱动因子.

2.2　径流归因

评估年尺度实测径流变化趋势时采用 Sen's slope 趋势分析法，进一步使用 Mann-Kendall 趋势检验方法评估趋势显著性水平，并统计全球及各大洲范围内径流显著增加、显著减少的站点比例.

基于随机森林回归模型和控制变量法模拟降水、潜在蒸散发、叶面积指数、融雪 4 个不同因子影响下径流时间序列，进而计算各因子对径流变化趋势的贡献率与主导因子. 使用控制变量法时，需要进行 $n+1$ 个数值试验（n 为因子种类数目），其中包括一个控制试验和 n 个敏感性试验（柴荣繁等，2018）. 在进行控制试验时，不对各因子进行任何处理，全部采用实测数据对径流进行模拟；在进行敏感性试验时，每次对一个因子进行去趋势处理并替换原有因子，其余因子不进行处理，然后对径流进行模拟. 其中，去趋势处理过程如下：分别计算各个因子实测数据的 12 个月平均数据，每个月平均数据为所有该月份数据的平均值，使用这 12 个月平均数据循环替换该因子原有数据.

将不同因子影响下的逐月模拟径流数据处理成年数据，并计算其变化趋势. 采用下式评估每个因子对径流变化的影响量（Sun *et al.*, 2014）：

$$C_i = \frac{\sum_{j \neq i} T_j - (n-2) \times T_i}{n-1}, \tag{1}$$

式中，C_i 为第 i 因子对径流变化的影响量，T_j 为非第 i 次敏感性试验中模拟径流的变化趋势，T_i 为第 i 次敏感性试验中模拟径流的变化趋势，n 为驱动因子种类数目.

径流模拟过程中不可避免的存在系统偏差，为减少模型偏差对归因结果的影响，参考 Yuan *et al.* (2018) 研究方法，采用尺度因子校正各气象因子对径流变化的影响量. 尺度因子 γ 表示如下：

$$\gamma = \frac{T_{\text{obs}}}{T_{\text{sim}}}, \tag{2}$$

其中 T_{obs} 为该站点实测径流的变化趋势，T_{sim} 为该站点控制试验中模拟径流的变化趋势.

调整后的第 i 因子影响量 C_i' 表示如下：

$$C_i' = C_i \times \gamma. \tag{3}$$

单个因子对径流变化的贡献率可由其影响量计算获得，表示如下：

$$I_i = \frac{C_i'}{M} \times 100\%, \tag{4}$$

其中，I_i 表示第 i 因子对径流变化的贡献率，M 为该站点实测径流的均值.

某一站点的主导因子确定方式为：影响量绝对值最大且其影响方向与径流变化趋势方向一致.

3　结果

3.1　径流年变化趋势

采用 Sen's Slope 趋势分析法计算 1982－2014 年全球实测径流的年变化趋势，并统计其显著增加（SIT）和显著减少（SDT）站点占比（图 2）. 全球范围内，径流变化以减少趋势为主. 径流显著减少趋势（SDT）的站点占比 28.2%，显著增加（SDT）的则为 9.7%. 在区域尺度上，北美洲北部、东部径流变化以增加趋势为主，南部则主要表现为减少趋势. 南美洲东部径流趋势以减少为主，北部少量站点表现为增加趋势；欧洲西部、南部径流减少，东北部有部分增加；非洲南部径流增加趋势明显；印度北部减少，南部沿海增加；大洋洲呈减少趋势；我国所搜集的大部分站点，径流变化均呈减少趋势.

区域统计结果表明（表 1），亚洲、欧洲、南美洲和大洋洲径流变化均以减少为主，径流显著减少站点分别占比 29.2%、46.9%、40.1% 和 68.8%；北美

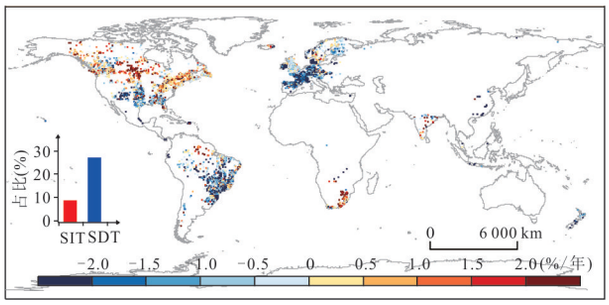

图 2　1982–2014 年全球径流变化趋势空间分布

Fig.2　Maps showing global streamflow change during 1982–2014

洲径流增加站点略多于减少站点；非洲径流以增加趋势为主，径流显著增加和显著减少站点分别占比28.6%和8.3%.

一般认为，在气候变暖的背景下，降水量在全球大部分区域应呈现增加趋势，然而本研究基于实测数据显示，全球径流变化趋势以减少为主，显著减少的站点明显高于显著增加的站点，表明存在其他影响径流的因子，因此，有必要进一步定量评估全球径流减少的成因.

3.2　径流模拟与归因

基于随机森林建立径流变化归因模型，模拟各因子分别去趋势后的径流变化趋势，并根据公式(3)，分析各因子对径流变化趋势的影响.为评估趋势归因效果，将各因子对径流变化影响量之和与实测径流变化趋势对比(图3).结果显示，4因子影响量之和与实测径流变化趋势关系较好，R^2达0.971，表明径流变化归因效果良好.尽管如此，仍有不少离散点存在，表明这些站点的径流归因效果较差.这可能是由于部分站点径流变化趋势不显著及考虑的解释变量不充分造成.

图4为基于公式(4)计算的各因子对径流变化的贡献率，并统计了各因子对径流影响表现为正贡献(PC)与负贡献(NC)的站点在筛选出的4 469个站点中占比.全球尺度上，降水变化增加、减少径流的站点相当，增加径流的站点占比为49.8%；潜在蒸散发与融雪的变化均以减少径流为主，二者对径流变化贡献率为负的站点占比分别为59.1%、46.7%；叶面积指数(*LAI*)变化以增加径流为主，减少径流的站点全球占比39.1%.目前关于植被变化对径流变化影响的研究中，由于研究手段和数据资料的局限、研究区域和尺度的差异，相关研究结果存在显著区别：(1)植被覆盖上升对径流有减少作用(Ning *et al.*, 2017)；(2)植被变化对径流影响有限(Ceballos-Barbancho *et al.*, 2008)；(3)植被覆盖上升有助于增加径流(Zhou *et al.*, 2010；Wang *et al.*, 2011).本文研究结果表明，植被变化以增加径流为主，这与Zhou *et al.*(2010)、Wang *et al.*(2011)等的研究结果一致.

表1　1982-2014年各大洲径流变化趋势汇总

Table 1　Slope of global streamflow change for each continent during 1982-2014

各大洲	增加站点(%)	减少站点(%)	显著增加站点(%)	显著减少站点(%)
亚洲	31.9	68.1	15.3	29.2
欧洲	11.2	88.8	1.1	46.9
非洲	75.9	24.1	28.6	8.3
北美洲	56.1	43.9	16.1	10.1
南美洲	23.1	76.9	5.9	40.1
大洋洲	0	100	0	68.8

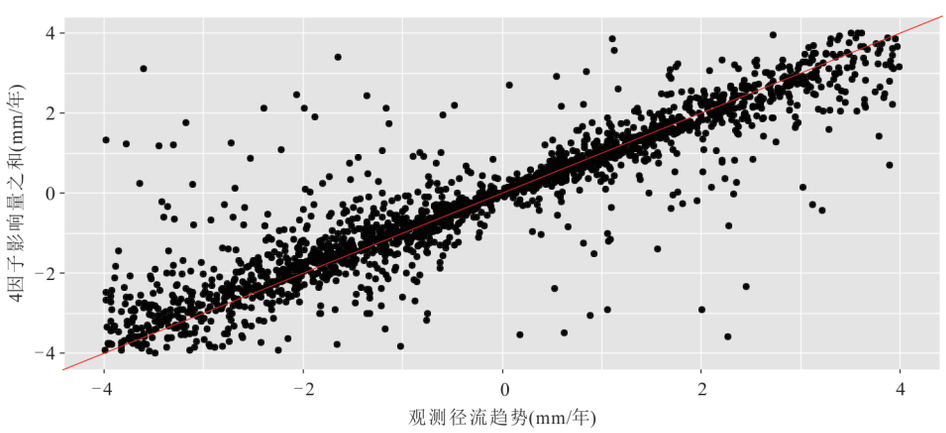

图3　各驱动因子对径流变化影响量之和与实测径流变化趋势对比

Fig.3　Comparison of simulated (the sum of 4 driving factors' influence) and observed streamflow trend

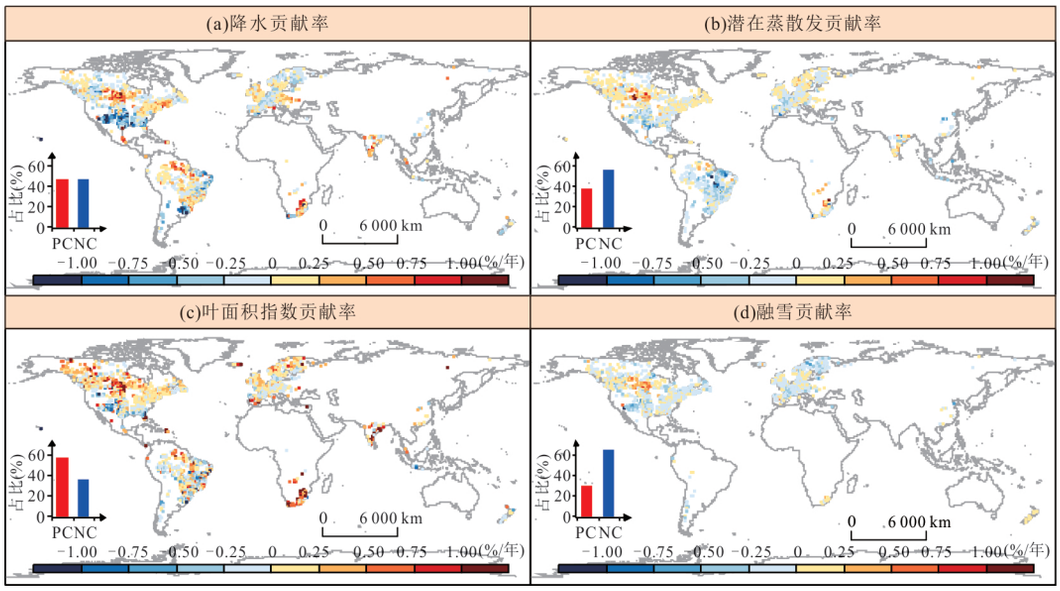

图 4　各因子对径流变化贡献率空间分布

Fig.4　Maps showing the contributions of driving factors to streamflow change

从区域尺度来看,降水变化对北美洲北部径流的影响以增加作用为主,北美洲南部则相反,这与实测径流变化趋势(图 2)结果一致.潜在蒸散发在南美洲东部、北美洲南部与欧洲南部负贡献率尤为明显,印度中部、我国北部也以减少径流为主,但在北美洲北部、欧洲中部与非洲南部地区的相对贡献率为正.叶面积指数在北美洲北部、印度及非洲南部有较为显著的正贡献率,这与降水贡献率的分布类似,在北美洲南部、南美洲东部及欧洲中部则以负贡献率为主.融雪贡献率在欧洲北部、北美洲南部的负效应明显,但在北美洲北部贡献率为正.

3.3　径流变化的主导因子

图 5 是各站点实测径流变化趋势的主导因子空间分布.结果显示,径流变化以降水为主导因子的站点占比仅为 35.3%,主要位于北美洲南部、欧洲中部.潜在蒸散发主导径流变化的站点占比 12.5%,主要位于南美洲中部、欧洲南部.叶面积指数主导径流变化的站点在全球范围内占比最高(42.2%),在北美洲北部、欧洲、南美洲南部表现明显.融雪主导径流变化的站点占比 10.0%,主要分布在高纬度地区.研究结果表明降水并不是全球径流变化趋势的主导因子,这与基于模拟径流数据的径流变化归因结果并不一致.这是由于现有全球研究采用模拟的径流数据集进行径流变化归因,而径流模拟自身存在较大的不确定性.例如,Yang *et al.*(2018)研究指出,径流模拟难以充分考虑影响径流变化的所有

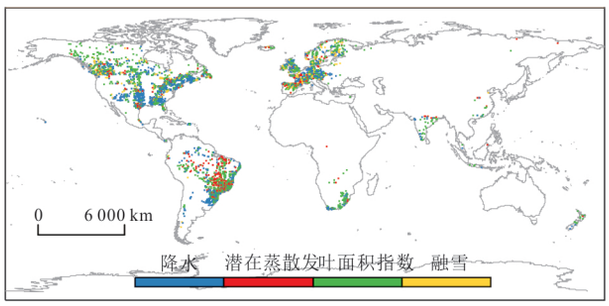

图 5　全球实测径流变化主导因子分布

Fig.5　Maps showing the dominant factor controlling streamflow change

下垫面要素,如植被、融雪及人类活动等.这使得模拟的径流变化趋势与实际的径流变化并不相符,进而导致基于模拟数据的径流归因存在较大偏差,如夸大降水变化对径流的相对贡献率.

4　结论

本研究通过整合全球径流数据和提取对应流域面平均气象、融雪和植被数据,构建了一套要素齐全的全球流域尺度实测气象水文数据集.基于该数据集,分析了全球尺度主要径流变化趋势;并利用随机森林建立了径流模拟与趋势变化定量归因框架,评估了不同驱动因子(降水、潜在蒸散发、叶面积指数、融雪)对全球实测径流变化的影响,揭示了全球主要径流变化趋势及其主导因子.

研究结果显示,全球实测径流变化以减少趋势

为主,全球径流显著减少趋势的站点占比28.2%,明显高于显著增加趋势的站点占比(9.7%).归因结果表明,全球范围内,降水变化增加与减少径流的站点相当,潜在蒸散发和融雪变化以减少径流作用为主.各因子主导径流变化的站点占比分别为:降水35.3%、潜在蒸散发12.5%、叶面积指数42.2%、融雪10.0%.降水变化并非径流变化的主导因子,植被变化主导了全球实测径流变化趋势,这一结论与已有的基于模拟数据的全球径流变化归因结果并不一致.因此,本文结果强调,径流变化趋势分析与归因有必要采用站点实测的径流数据,否则可能导致归因结果存在较大偏差.下垫面因子种类众多,本文仅考虑降水、潜在蒸散发、叶面积指数及融雪,并未考虑更多因素,这是本研究的主要不足.后续研究可从其他下垫面因子切入,分析其对全球径流的影响.

References

Ahn, K. H., Merwade, V., 2014. Quantifying the Relative Impact of Climate and Human Activities on Streamflow. *Journal of Hydrology*, 515: 257−266. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.062

Berghuijs, W. R., Larsen, J. R., van Emmerik, T. H. M., et al., 2017. A Global Assessment of Runoff Sensitivity to Changes in Precipitation, Potential Evaporation, and Other Factors. *Water Resources Research*, 53(10): 8475−8486. https://doi.org/10.1002/2017wr021593

Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45(1): 5−32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Ceballos-Barbancho, A., Morán-Tejeda, E., Luengo-Ugidos, M. Á., et al., 2008. Water Resources and Environmental Change in a Mediterranean Environment: The South-West Sector of the Duero River Basin (Spain). *Journal of Hydrology*, 351(1−2): 126−138. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.004

Chai, R. F., Chen, H. S., Sun, S. L., 2018. Attribution Analysis of Dryness/Wetness Change over China Based on SPEI. *Journal of the Meteorological Sciences*, 38(4): 423−431 (in Chinese with English abstract).

Chang, Q. X., Sun, Z., Y., Pan, Z., et al., 2022. Stream Runoff Formation and Hydrological Regulation Mechanism in Mountainous Alpine Regions: A Review. *Earth Science*, Online (in Chinese with English abstract).

Chen, Z. W., 2017. Spatio-Temporal Evolution of Runoff in China under Climate Change (Dissertation). Tsinghua University, Beijing, 48−59 (in Chinese with English abstract).

Gu, X. H., Zhang, Q., Li, J. F., et al., 2020. Impacts of Anthropogenic Warming and Uneven Regional Socio-Economic Development on Global River Flood Risk. *Journal of Hydrology*, 590: 125262. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125262

Hannaford, J., Buys, G., 2012. Trends in Seasonal River Flow Regimes in the UK. *Journal of Hydrology*, 475: 158−174. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.044

Hao, Z. C., Li, L., Wang, J. H., et al., 2007. Impact of Climate Change on Surface Water Resources. *Earth Science*, 32(3): 425−432 (in Chinese with English abstract).

Li, Q., Wei, X. H., Zhang, M. F., et al., 2017. Forest Cover Change and Water Yield in Large Forested Watersheds: A Global Synthetic Assessment. *Ecohydrology*, 10(4): e1838. https://doi.org/10.1002/eco.1838

Li, T. S., Xia, J., 2018. Analysis of the Influence of Climate and Vegetation Change on Runoff in the Middle and Upper Reaches of the Pearl River Basin Based on Budyko Hypothesis. *Advances in Earth Science*, 33(12): 1248−1258 (in Chinese with English abstract).

Li, Z. X., He, Y. Q., Wen, Y. H., et al., 2010. Response of Runoff in High Altitude Area over the Typical Chinese Monsoonal Temperate Glacial Region to Climate Warming. *Earth Science*, 35(1): 43−50 (in Chinese with English abstract).

Liu, N., Harper, R. J., Smettem, K. R. J., et al., 2019. Responses of Streamflow to Vegetation and Climate Change in Southwestern Australia. *Journal of Hydrology*, 572: 761−770. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.005

Musselman, K. N., Addor, N., Vano, J. A., et al., 2021. Winter Melt Trends Portend Widespread Declines in Snow Water Resources. *Nature Climate Change*, 11(5): 418−424. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01014-9

Ning, T. T., Li, Z., Liu, W. Z., 2017. Vegetation Dynamics and Climate Seasonality Jointly Control the Interannual Catchment Water Balance in the Loess Plateau under the Budyko Framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3): 1515−1526. https://doi.org/10.5194/hess-21-1515-2017

Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., et al., 2004. The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3): 381−394. https://doi.org/10.1175/bams-85-3-381

Stein, L., Clark, M. P., Knoben, W. J. M., et al., 2021. How do Climate and Catchment Attributes Influence Flood Generating Processes? A Large-Sample Study for 671 Catchments across the Contiguous USA. *Water Re-*

sources Research, 57(4): e2020WR028300. https://doi.org/10.1029/2020WR028300

Sun, S. L., Chen, H. S., Ju, W. M., et al., 2014. On the Attribution of the Changing Hydrological Cycle in Poyang Lake Basin, China. *Journal of Hydrology*, 514: 214—225. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.013

Teuling, A. J., de Badts, E. A. G., Jansen, F. A., et al., 2019. Climate Change, Reforestation/Afforestation, and Urbanization Impacts on Evapotranspiration and Streamflow in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(9): 3631—3652. https://doi.org/10.5194/hess-23-3631-2019

Wang, S., Fu, B. J., He, C. S., et al., 2011. A Comparative Analysis of Forest Cover and Catchment Water Yield Relationships in Northern China. *Forest Ecology and Management*, 262(7): 1189—1198. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.06.013

Wei, X. H., Li, Q., Zhang, M. F., et al., 2018. Vegetation Cover—Another Dominant Factor in Determining Global Water Resources in Forested Regions. *Global Change Biology*, 24(2): 786—795. https://doi.org/10.1111/gcb.13983

Xia, J., Shi, W., 2016. Perspective on Water Security Issue of Changing Environment in China. *Jaurnal of Hydraulic Engineering*, 47(3): 292—301 (in Chinese with English abstract).

Yang, D. W., Zhang, S. L., Xu, X. Y., 2015. Attribution Analysis for Runoff Decline in Yellow River Basin during Past Fifty Years Based on Budyko Hypothesis. *Scientia Sinica (Technologica)*, 45(10): 1024—1034 (in Chinese with English abstract).

Yang, Y. T., Zhang, S. L., McVicar, T. R., et al., 2018. Disconnection between Trends of Atmospheric Drying and Continental Runoff. *Water Resources Research*, 54(7): 4700—4713. https://doi.org/10.1029/2018WR022593

Yuan, X., Jiao, Y., Yang, D. W., et al., 2018. Reconciling the Attribution of Changes in Streamflow Extremes from a Hydroclimate Perspective. *Water Resources Research*, 54(6): 3886—3895. https://doi.org/10.1029/2018WR022714

Zhou, G. Y., Wei, X. H., Luo, Y., et al., 2010. Forest Recovery and River Discharge at the Regional Scale of Guangdong Province, China. *Water Resources Research*, 46(9): W09503. https://doi.org/10.1029/2009WR008829

Zhou, S., Yu, B. F., Huang, Y. F., et al., 2015. The Complementary Relationship and Generation of the Budyko Functions. *Geophysical Research Letters*, 42(6): 1781—1790. https://doi.org/10.1002/2015GL063511

Zhu, Z. C., Bi, J., Pan, Y. Z., et al., 2013. Global Data Sets of Vegetation Leaf Area Index $(LAI)_3g$ and Fraction of Photosynthetically Active Radiation $(FPAR)_3g$ Derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index ($NDVI_3g$) for the Period 1981 to 2011. *Remote Sensing*, 5(2): 927—948. https://doi.org/10.3390/rs5020927

附中文参考文献

柴荣繁, 陈海山, 孙善磊, 2018. 基于SPEI的中国干湿变化趋势归因分析. 气象科学, 38(4): 423—431

常启昕, 孙自永, 潘钊, 等, 2022. 高寒山区河道径流的形成与水文调节机制研究进展. 地球科学, 网络首发. https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220407.1648.008.html

陈钟望, 2017. 气候变化下我国径流的时空演变(硕士学位论文). 北京: 清华大学, 48—59.

郝振纯, 李丽, 王加虎, 等, 2007. 气候变化对地表水资源的影响. 地球科学, 32(3): 425—432.

李天生, 夏军, 2018. 基于Budyko理论分析珠江流域中上游地区气候与植被变化对径流的影响. 地球科学进展, 33(12): 1248—1258.

李宗省, 何元庆, 温煜华, 等, 2010. 我国典型海洋型冰川区高海拔区输出水量变化对气候变暖的响应. 地球科学, 35(1): 43—50.

夏军, 石卫, 2016. 变化环境下中国水安全问题研究与展望. 水利学报, 47(3): 292—301.

杨大文, 张树磊, 徐翔宇, 2015. 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, 45(10): 1024—1034.