

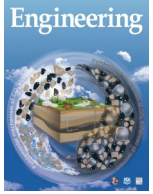


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Hydraulic Engineering—Article

新安江多尺度嵌套水文循环实验流域——科学目标和总体设计

张珂^{a,b,c}, 李运平^{a,b}, 余钟波^{a,b,c,*}, 杨涛^{a,b,c}, 徐俊增^a, 晁丽君^a, 倪晋^d, 王流通^d, 高云^a, 胡余忠^e, 林祚顶^f

^a State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

^b Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China

^c College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China

^d Bureau of Hydrology (Information Center) of Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China

^e Bureau of Hydrology of Anhui Province, Hefei 230022, China

^f Department of Hydrology, Chinese Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 February 2021

Revised 29 July 2021

Accepted 6 August 2021

Available online 22 December 2021

关键词

循环

产流

水文过程

水文尺度

土壤水

地下水

冠层截留

摘要

本文介绍了于2017年在中国东部建立的新安江多尺度嵌套水文循环实验流域(XAJ-NEW)的研究背景、科学目标、实验设计和初步成果。该实验流域地处亚热带湿润季风气候区域,流域总面积为2674 km²。XAJ-NEW旨在典型湿润山丘区构建一个多尺度嵌套水文气象综合观测实验系统,强化对水循环的精细监测,探索水文过程时空尺度效应,揭示径流产生和分配机制。经过两年的观测运行,初步结果表明,包括降水、径流、地下水、土壤水在内的关键水文气象过程和要素的时空变率与尺度密切相关,并对冠层截留和地表地下径流组分的分配过程进行定量观测。对XAJ-NEW的持续监测可以进一步揭示产流和径流分配机制,揭示水文过程的时空尺度效应,理解气候变化对水文过程的影响。以上成果可以为理解多尺度水文过程及该过程对气候要素的响应、完善模型参数化方案、增强气候预测提供新的见解。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

水循环包括大气水汽输送、降水、蒸散发、入渗、产流、汇流等一系列水文过程,是气候系统的重要组成部分[1–2]。水的三态(液态、固态、气态)转化是生态系统中最活跃的部分,涉及地表和大气中水分、能量和碳的生物、化学和物理交换[3–4]。气候变化、人类活动和土地利用/覆盖多时空尺度变化严重影响复杂的水循环过程[3, 5–7],理解和量化变化环境下水文过程是目前一项重要的

科学研究[4,8–9]。

水文循环要素观测实验是了解多种水文过程的基础,然而,缺乏可靠数据是定量了解全球水循环和能量循环的长期挑战[10–11]。近几十年来,为了解局部、区域、全球水循环和能量循环,实施了多项研究计划,如20世纪90年代实施的全球能量和水循环实验[11–12]和2001年实施的协调增强观测周期[13]。此外,美国农业部于1953年建立了著名的Walnut Gulch实验流域,其初衷是研究土壤侵蚀和退化问题,而后该实验流域逐渐演变为多功能的综

* Corresponding author.

E-mail address: zyu@hhu.edu.cn (Z. Yu).

合实验流域,用于了解典型半干旱地区的水文生态系统以及供水与水质之间的相互作用[14–17]。水文实验在探索水文机制、推进水文学科发展、开发验证现有和新的理论及模型方面发挥了关键作用[16,18–21]。全球不同条件下的山坡水文实验研究[22–26]促进了山坡水循环的发展,为基于部分饱和区域产流假设的变动产流面积理论的产流机制等重要水文理论提供了基础[27–30]。该理论促进了水文模型,如HBV模型(Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model)[31–32]、TOPMODEL模型(Topography based hydrological model)[33]、新安江水文模型[27]、VIC模型(variable infiltration capacity model)[34]、HMS(hydrologic model system)[2,8]、GTOPMODEL模型(grid-topography-based distributed hydrological model)[35]等的发展。近年来,随着大数据和新技术的出现,在基于地形和物理的根区蓄水容量估算[36–38]以及基于地形和土地覆盖/土地利用[39]的产流空间异质性识别等方面取得了重要进展。

近年来,中国在西北干旱半干旱地区和青藏高原实施了多个区域观测计划,包括:2012年在中国西北地区为提高水文和生态过程的可观测性实施的黑河综合遥感联合试验研究[40]、2012年建设的青藏高原多尺度土壤水分和冻融监测网络[41],以及青藏高原第三次大气科学实验建立的陆面、边界层、对流层和平流层综合监测系统[42]。这些观测试验研究为模型模拟验证和气候变化评估等提供了宝贵的一手资料。目前,地面和卫星观测表明气候变化加剧了水循环,改变了大区域水资源的时空分布[9,43–45]。然而关于精细尺度和多尺度水文过程的资料有限,需要进一步研究变化环境下一级水文过程和日-季节-年际变化控制机理,为未来预测提供精确的资料[46–47]。

水文数据是准确了解水循环的基础。降雨、蒸发、土壤含水量、地下水位、径流等水文变量可以通过遥感技术或原位观测获得。虽然遥感技术可以提供空间两虚的水文变量的原位观测,但不能提供时间连续的数据,捕捉精细尺度的关键水文过程[10,48]。此外,遥感技术以原位观测数据为基准,进行数据校准和评价[10,48];然而,尺度问题是遥感和原位观测结合的障碍[49–51]。应对这些挑战,需要发展综合、多尺度的观测,实现水文过程的精确量化[52]。

湿润山丘区主要分布在中国的东南部,占中国陆地总面积的32%。中国东部地形起伏大,下垫面异质性高。新安江水文模型[53]是基于中国东部湿润区新安江流域实测资料推测的蓄满产流机制研发的。新安江流域高强度降水频繁,水文响应快,极易引发山洪灾害。极端强降水引发

的山洪灾害是中国东部最严重的自然灾害之一[54]。研究表明,中国东部地区极端降水有增加趋势[55–57]。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)2020年度报告,预测中国东部将遭受巨大的气候变化,经历气候变化引起的剧烈的气象极端事件。了解不同尺度的水文过程及水文过程对气象驱动响应是预防和减少洪水灾害及其影响的关键[2,8]。因此,对新安江流域的精确观测对于了解变化环境下中国东部湿润山丘区及其类似区域的水文过程、洪水机制及其水循环至关重要。

为更好地理解中国典型亚热带湿润季风区的多尺度水文过程,本研究主要介绍了2017年建设的新安江嵌套流域(XAJ-NEW)的背景、科学目标、实验设计和初步成果。

2. 科学目标

XAJ-NEW的科学目标是在典型湿润山丘区构建一个综合的、多尺度、嵌套水文气象监测实验系统,强化水循环的观测,通过多尺度嵌套观测理解揭示水文过程时空尺度效应,探索控制径流产生和分配以及水文过程之间的相互作用和反馈机制。XAJ-NEW主要对降水、土壤湿度、地下水埋深、冠层截留、径流组成等关键水文变量和过程进行观测。XAJ-NEW依据相关标准进行观测实验仪器设备布设安装,并于2017年8月逐步投入使用。

嵌套观测实验可以提供精细时间尺度和多空间尺度的关键水文气象变量和过程观测,能够准确测量水文过程及其空间异质性。受复杂地形和气象条件的影响,应加强时空尺度水文变量的观测。例如,在典型观测流域内通过设置密集雨量站强化雨量观测。此外,XAJ-NEW的变量观测时间为分钟级到小时级。

XAJ-NEW重要水文过程和气象变量的观测,有助于理解重要生态水文过程及其作用机理。例如,冠层截留和径流组分划分比例在模型中通常采用经验参数进行模拟,该观测实验可以通过阵列雨量站和径流组分观测系统对冠层截留和径流组分进行量化。冠层截留设备通过在测定不同冠层条件和降雨强度下的截留比例,可以为冠层截留提供精确的模拟函数。在新安江水文模型中,径流包含地表径流、壤中流和地下径流三部分[53,58–60]。径流观测系统可以直接测量地表和不同深度的壤中流,进一步提高对径流过程和组分的认识。此外,根区是土壤中最活跃的部分,涉及水分和能量的转移和分配,在水循环和植被动态变化中起着关键作用[61]。在XAJ-NEW建设的阵列墒情站,可监测地表至地下60 cm深度的土壤水分,地下水监

测站可以对地下水动态和包气带进行监测，通量塔可以监测不同高度的气象要素以及陆地生态系统和大气之间水汽、CO₂、能量的交换，这些观测有助于精细化生态水文过程的模拟和水文、陆面模型的改进。

3. 研究区域和观测网络设计

3.1. 研究区域

3.1.1. 屯溪流域

XAJ-NEW 布设在整个屯溪流域内[图 1 (a)]。屯溪流域位于中国安徽省黄山市，是新安江流域的上游，流域面积为 2674 km² [62–64]。该区域气候湿润，年降水量约为 1800 mm·a⁻¹，年平均温度为 17 °C。XAJ-NEW 分为五

级嵌套流域(图 1): 五级屯溪流域[图 1 (a)]、四级月潭流域[图 1 (a)]、三级中和村流域[图 1 (a)]、两个二级流域[图 1 (b)]和两个一级流域[图 1 (c)、(d)]。该地区植被覆盖以常绿阔叶林、常绿针叶林和竹子为主。

3.1.2. 二级和一级流域

两个典型二级流域位于安徽省黄山市木坑村，是中和村流域的一部分[图 1 (b)]。该流域也叫新安江监测实验中心(简称典型流域)，由两个相邻的流域组成，流域面积分别为 0.35 km² (左侧的二级流域 I) 和 0.23 km² (右侧的二级流域 II)。二级流域的平均坡度将近 30°，以砂土和粘土土壤为主，土层厚度为 5~8 m。典型流域在地形、地貌、地质、气象条件方面均具有较好的代表性。位于右侧二级流域 II 内的两个一级流域，可以实现冠层截留、地表径流、壤中流、土壤水和蒸散发的强化观测。

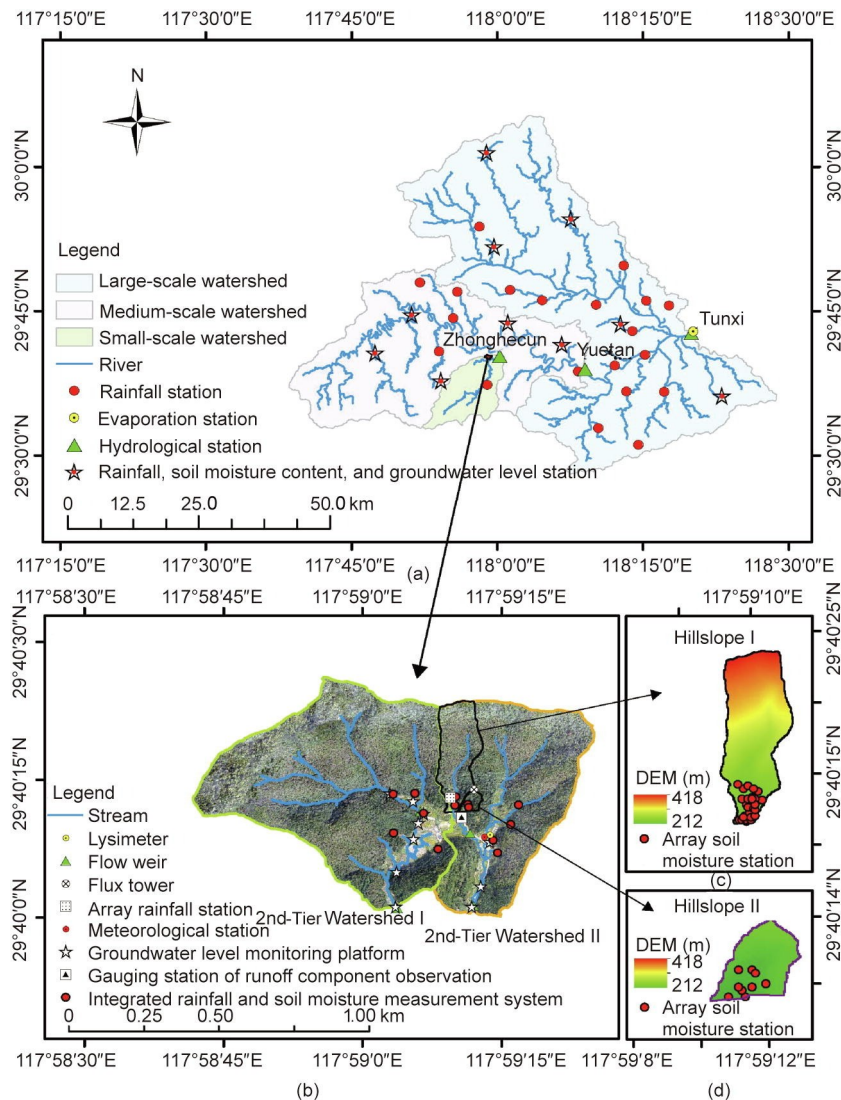


图 1. XAJ-NEW 的位置和配置。(a) 五级嵌套流域的地理位置和站点空间分布；(b) 两个二级流域的地理位置和站点空间分布；(c) 二级流域内一级流域 I 的地形；(d) 二级流域内一级流域 II 的地形。

3.2. 观测网络

XAJ-NEW 旨在构建综合、多尺度嵌套的水文气象监测实验系统。该系统包含五级嵌套流域，流域面积为 0.003~2674 km² (图 1)，屯溪站是 XAJ-NEW 的出口 (图 1)。XAJ-NEW 基于现有安徽省水文局布设的水文站和雨量站进行布设，所有水文仪器的布设、安装位置的选择均遵循中华人民共和国水利部颁布的《水文网络设计技术规程》(SL 34-2013) [65]，所有仪器的密度和空间分布均符合《水文站网规划技术导则》(SL 34-2013) 要求[65]。

地面观测主要在屯溪流域进行，并在两个典型流域内进行了密集观测。屯溪流域的观测站主要包含三种类型：雨量站、雨量墒情地下水观测站和能够进行流量和蒸发观测的水文站 (表 1)。嵌套水文观测网络作为基本的测量系统，可以测量流量，探索流量的多时空尺度效应。二级流域内[图 1 (b)]布设了大量仪器，包括雨量墒情站、地下水观测站、量水堰、阵列墒情站、阵列雨量站、径流组分观测系统、蒸发皿、气象站、蒸渗仪和通量塔 (表 2 和图 2)。雨量和地下水观测站均匀地分布在屯溪流域和典型流域。土壤水监测涉及三个时空尺度，分别为屯溪流域、二级流域、一级流域。三个流量站分别安装在中和村流域、月潭流域和屯溪流域出口，可进行三个尺度流量观测。此外，在典型流域内，阵列雨量站观测冠层截留，径流组分观测系统可以观测径流组分，实现对关键水文过程的观测。

综上所述，XAJ-NEW 布设的仪器可以观测降雨、土

壤水、地下水、冠层截留、地表径流、壤中流等水文过程。典型流域内的气象站和通量塔可以提供气象、动量、能量和 CO₂ 通量的观测。XAJ-NEW 的观测，尤其是典型流域内的观测，几乎涵盖了所有重要水文过程和关键气象要素的观测，为研究该地区的水文气象过程及控制机理、开发模拟水文过程的数值方法提供了坚实的数据基础。监测数据可自动保存并进行无线网络传输，通过严格的质量控制软件、人工后处理和质量控制保证数据的可靠性，并通过定期检查、维护数据和设备保障观测的顺利进行。

3.3. 数据分析方法

3.3.1. 空间插值

根据水文变量的特点，并采用适当的空间插值方法，通过站点观测数据获得水文变量的空间分布。考虑相对较低的站点密度和地形对地下水埋深的影响，采用 CoKriging 估计地下水的空间分布[66-67]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{ij} \gamma_{ij}(x_i, x_j) - \mu_v = \gamma_w(x_j, x) \\ \sum_{i=1}^{n_i} \lambda_{ij} = \begin{cases} 1, & 1 = u \\ 0, & 0 \neq u \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

$$\gamma_w(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_u(x_i) - Z_u(x_i+h)] \cdot [Z_v(x_i) - Z_v(x_i+h)] \quad (2)$$

式中， i 和 j 分别表示向量的起点和终点编号； n 表示主变

表 1 XAJ-NEW 内布设的测站类型和功能

Gauging station type	Main features	Density of instruments (set·km ⁻²)
Rainfall gauging station	Each station has one tipping bucket rain gauge that records rainfall every 5 min.	0.0075
Comprehensive gauging station	Each station has one tipping bucket rain gauge, four soil moisture sensors, and one groundwater (pressure water) level meter to measure rainfall, volumetric soil water content at depths of 10, 30, 40, and 60 cm, and groundwater level, respectively. Data are recorded every 5 min.	0.0037
Hydrological station	Each station has one flow level meter to measure water level and determine the corresponding flow discharge. Tunxi station has one evaporation pan to measure pan evaporation.	0.0011

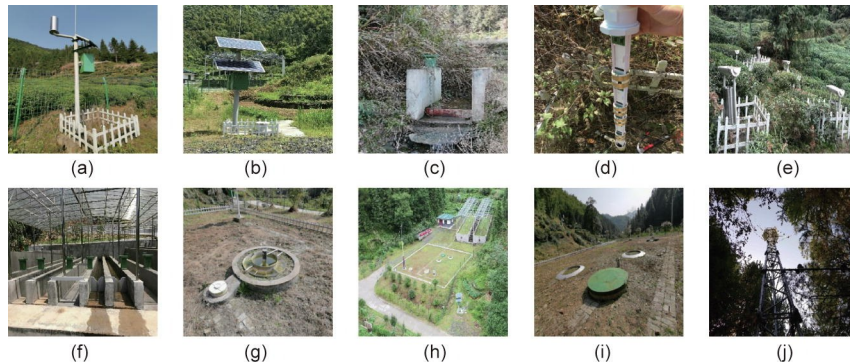


图 2. 二级流域布设的仪器的图片。

表2 XAJ-NEW 二级流域内布设的仪器类型和功能

Instruments	Main features	Density of instruments (set·km ⁻²)
Integrated rainfall and soil station [Fig. 2(a)]	Each station has one tipping bucket rain gauge and four soil moisture sensors to measure rainfall and soil moisture at depths of 10, 30, 40, and 60 cm every 5 min.	20.69
Groundwater level station [Fig. 2(b)]	Each station has one water level meter equipped with a data logger and solar panels to record groundwater depth every 5 min.	25.86
Flow weir [Fig. 2(c)]	It is implemented in the rivulet channel and equipped with a laser level meter to automatically measure water level every 5 min.	6.90
Array soil moisture gauging network [Fig. 2(d)]	There is an array of soil moisture stations in both 1st-tier Watersheds I and II. 1st-tier Watershed I and II have 30 and 10 four-layer moisture-monitoring sites, respectively. Four sensors are inserted into the soil at the depths of 10, 30, 40, and 60 cm at each location. The data are recorded every 5 min.	1052.63
Rainfall gauging array [Fig. 2(e)]	It measures rainfall interception by plant canopies with different densities. It comprises ten tipping bucket rain gauges evenly distributed within an area of 40 m ² . The data are recorded every 5 min.	1.72
Runoff components gauging system [Fig. 2(f)]	A gauging system measures the runoff components in both 1st-tier Watersheds I and II. Each gauging station is equipped with 4 water weirs and 5 laser water level meters and measures surface runoff and interflows within three layers, <i>i.e.</i> , 0–1, 1–2, and 2–3 m, every 5 min.	52.63
Evaporation pan [Fig. 2(g)]	One evaporation pan observes the pan evaporation every 10 min.	1.72
Meteorological station [Fig. 2(h)]	One meteorological station observes multiple meteorological elements every 10 min, including air temperature, relative humidity, wind speed, wind direction, precipitation, total radiation, soil moisture, and soil temperature.	1.72
Lysimeter [Fig. 2(i)]	Two lysimeters measure soil evaporation, soil heat flux, soil moisture, soil temperature, electrical conductivity, and soil water potential at the depths of 10, 20, 40, 80, 120, and 180 cm. Data are recorded every 10 min.	1.72
Flux tower [Fig. 2(j)]	The flux tower measures three-dimensional wind speeds and directions, water vapor, carbon dioxide, air temperature, light quantum at the height of 30 m, and soil heat flux at depths of 5, 10, and 15 cm. Gradient flux observation includes air temperature, relative humidity, and two-dimensional wind speed and direction at 25, 20, 15, 13, and 5 m. Other measured variables include four radiation components at 13 m, soil heat flux at a depth of 10 cm, and soil moisture at depths of 10, 40, and 100 cm.	1.72

量的数量； l 表示协变量的数量； u 和 v 分别表示主变量（地下水埋深）和协变量（高程）； λ 是相关数据的权重； γ 是变异函数； $Z(x)$ 表示样本点的 x 属性值； $N(h)$ 表示距离为 h 的点对数。此外，本文采用距离反比的方法来获取降水的空间分布。

3.3.2. 降雨空间尺度效应分析

乘积矩方法可以用来评价空间尺度效应[68–69]。如果一个尺度的水文变量的分布根据流域面积可以转化为另一个尺度的分布，则该变量具有空间尺度性。单元尺度和多元尺度是评估水文变量尺度效应的常见方式[70–71]。如果流域 i 上水文过程/变量(X_i)的多阶矩和流域面积满足以下公式，则认为该水文过程或变量符合单元尺度效应：

$$\ln(E(X_i^k)) = \ln(E(X_j^k)) + b_k \ln(A_i) \quad (3)$$

$$b_k = \beta k \quad (4)$$

式中， $E(X_i^k)$ 是变量 X_i 的 k 阶矩； A_i 是流域面积； $E(X_j^k)$ 是变量 X_j 的 k 阶矩； b_k 是拟合的斜率； β 是尺度因子，为常数。如果尺度因子是变化的，则认为它具有多元尺度效

应。根据观测的多个空间尺度的降雨数据，评估其空间尺度效应，并判断空间尺度是否满足单元尺度。

3.3.3. 关键水循环要素分析

通过计算站点间4个深度的相关系数(R)，研究土壤水的空间变异性，并采用box-whisker（即箱线图）展示相关系数的分布特征。

对于冠层截留，采用LAI-2000植物冠层分析仪(Li-Cor, Inc., USA)获取阵列雨量站对应的叶面积指数(LAI)，分析冠层降雨截留比例(CRIR)与叶面积指数间的统计关系。最后，分析一级流域I内的径流组分及XAJ-NEW内多个空间尺度的流量过程。

4. 初步成果

4.1. 降雨时空尺度效应

众所周知，降雨在空间上具有很大的变异性[72]。本研究中，30个雨量站均匀地分布在屯溪流域内（流域面

积 2674 km^2), 11 个雨量站位于月潭流域内 (流域面积 854 km^2), 两个雨量站位于中和村流域内 (流域面积 140 km^2)。采用变异系数 (C_v) 评价降雨的空间异质性, 利用乘积矩法研究降雨的空间尺度效应。

首先, $\ln(E(C_v^k))$ 和 $\ln(A)$ 之间存在线性关系, 表明流域面积能够表示降雨空间变异的主要特征 [图 3 (a)]。其次, 拟合的斜率 b_k ($\ln(E(C_v^k)) \sim \ln(A)$ 曲线的斜率) 是 k 的线性函数, 对应的截距接近 0 [图 3 (b)], 尺度因子为常数 (0.4258)。以上结果表明, 屯溪流域降雨的变异系数符合单元尺度, 即随着流域面积的增加, 降雨具有更大的空间异质性。

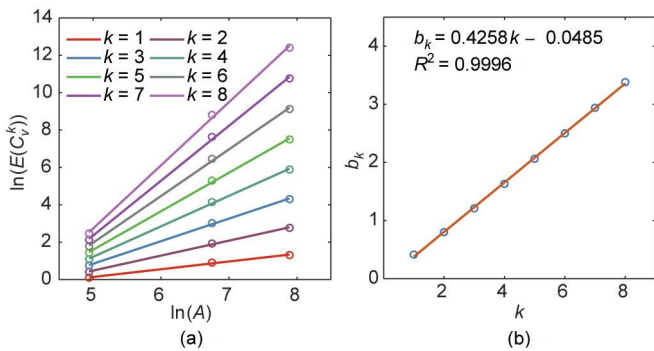


图 3. (a) 降雨变异系数均值的对数 $\ln(E(C_v^k))$ 与流域面积 $\ln(A)$ 之间的关系; (b) 拟合斜率 b_k 与矩的阶数 k 之间的关系。

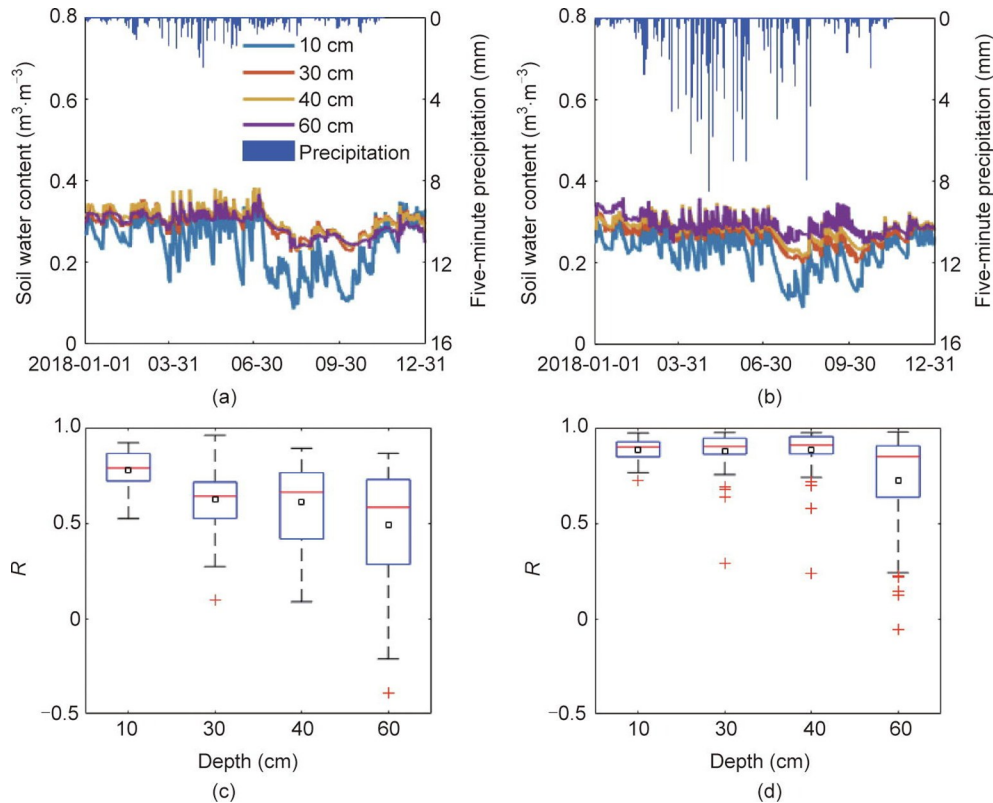


图 4. 2018 年五级屯溪流域 (a) 和二级屯溪流域 (b) I 和 II 五分钟级站点四层土壤含水量和降雨序列图, 以及五级屯溪流域 (c) 和二级流域 (d) I 和 II 的四个深度站点间相关系数 (R) 箱线图。

4.2. 降雨与土壤水

本文在屯溪流域和典型流域进行降水和土壤水的空间尺度分析。2018 年观测的空间平均的土壤水季节变化如图 4 (a)、(b) 所示。土壤水在屯溪流域和典型流域具有相似的季节特征, 3—9 月表层土壤水 (10 cm) 变化较大 (图 4)。区域平均土壤水随着土壤深度的增加呈现明显的垂直梯度变化, 表明土壤对土壤水分变化起到了缓冲作用。此外, 10 cm、30 cm、40 cm 和 60 cm 不同深度站点间的相关系数表示土壤水具有空间异质性。屯溪流域和典型流域表层土壤水 (10 cm) 站点相关系数较高 (分别为 0.7758 和 0.8839), 随着土壤深度的增加, 站点间相关系数减小, 60 cm 的相关系数最低 (分别为 0.4882 和 0.7231) [图 4 (c)、(d)]。表层土壤水比深层土壤水具有较高的空间相关性, 屯溪流域不同深度站点间的相关系数为 0.4882~0.7758 [图 4 (c)], 典型流域不同深度站点间的相关系数均高于 0.7231 [图 4 (d)], 表明土壤水的空间分布与空间距离相关。

4.3. 地下水埋深

XAJ-NEW 在屯溪流域和典型流域进行地下水埋深观测, 2018 年标准化地下水埋深如图 5 所示。4—6 月地下水埋深显著上升, 7 月后下降 [图 5 (a)、(b)]。与 2018 年地

下水埋深均值相比, 屯河流域地下水埋深在 $-1.35\sim-4.97\text{ m}$ 之间波动[图5 (a)], 而典型流域地下水埋深在 $-0.89\sim-2.49\text{ m}$ 之间波动[图5 (b)], 变化范围远远小于屯河流域。屯河流域(1523 m 和 2674 km^2)比二级典型流域(318 m 和 0.58 km^2)高程变化更大, 流域面积更广, 空间变异性更大。此外, 降水的时空分布、土壤性质等地理因素也会影响地下水埋深的变化。基于实测站点地下水埋深和高程, 采用CoKriging插值方法[66]获取地下水埋深的空间分布。对于屯河流域, 年平均地下水埋深变化范围为 $-7.64\sim-0.07\text{ m}$, 水系附近和下游区域地下水埋深较浅[图5 (c)]。典型流域面积较小, 空间异质性较低, 因而地下水埋深空间变化也远远小于屯河流域[图5 (d)], 靠近流域出口和水系的区域地下水埋深较浅[图5 (d)]。屯河流域高程变化范围为 $96\sim1619\text{ m}$, 典型流域为 $188\sim506\text{ m}$ 。综上所述, 地形变异和尺度在控制屯河流域地下水埋深空间变异性方面起着重要作用。

4.4. 冠层降雨截留

采用LAI-2000植物冠层分析仪, 于2019年3月16日测量每个雨量桶上冠层的LAI, 9个雨量桶的LAI值分别为1.560、1.150、1.210、0.388、0.054、0.000、0.620、0.010和0.301。根据LAI值的大小将截留雨量分为三类: $\text{LAI} \geq 0.5$ 、 $\text{LAI} < 0.5$ 和所有的LAI值。选取冠层上的雨量桶作为CRIR的基准值, 利用29次降雨事件分析CRIR与

累积雨量和LAI的关系, CRIR随着LAI值的降低而降低(图6)。此外, CRIR与累积雨量之间存在对数关系(图6), 与Yu等[73]的研究结果一致。随着累积雨量的增加, CRIR迅速下降并逐渐趋于平稳(图6)。另外, CRIR为20%时, $\text{LAI} \geq 0.5$ 对应的累积雨量为 51 mm , 而 $\text{LAI} < 0.5$ 对应的累积雨量为 9 mm , 表明LAI对CRIR具有较大影响。该CRIR与累积雨量和LAI之间的定量关系可以用于水文和生态模型中冠层截留的估算[74–75]。

4.5. 径流组分划分

XAJ-NEW的径流组分观测系统可以观测地下 $0\sim1\text{ m}$ 、 $1\sim2\text{ m}$ 、 $2\sim3\text{ m}$ 的壤中流和地表径流, 并选取一级流域I的2018年一场典型降雨径流事件来分析地表径流和壤中流过程(图7)。在本次降雨事件(#2018042302)开始前, 典型流域连续数天没有降雨, 10 cm 深度平均土壤含水量为 $0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, 土壤相对干燥。2018年4月24日凌晨2:10开始降雨, 在降雨的前12 h内, 降雨入渗补充土壤水分亏缺, 没有径流产生(图7)。随着降雨的持续, 地表径流开始产生并于15:35左右达到峰值, 地表径流深度每5 min达到 0.43 mm , 15:55左右第三层($2\sim3\text{ m}$)壤中流达到最大值(每5 min达到 0.09 mm) (图7)。对于本次降雨事件, 累积降雨量为 126.3 mm , 而地表, 地下 $0\sim1\text{ m}$ 、 $1\sim2\text{ m}$ 、 $2\sim3\text{ m}$ 处产生的径流深度分别为 16.3 mm (12.9%)、 2.24 mm (1.78%)、 1.96 mm (1.55%) 和 8.28 mm

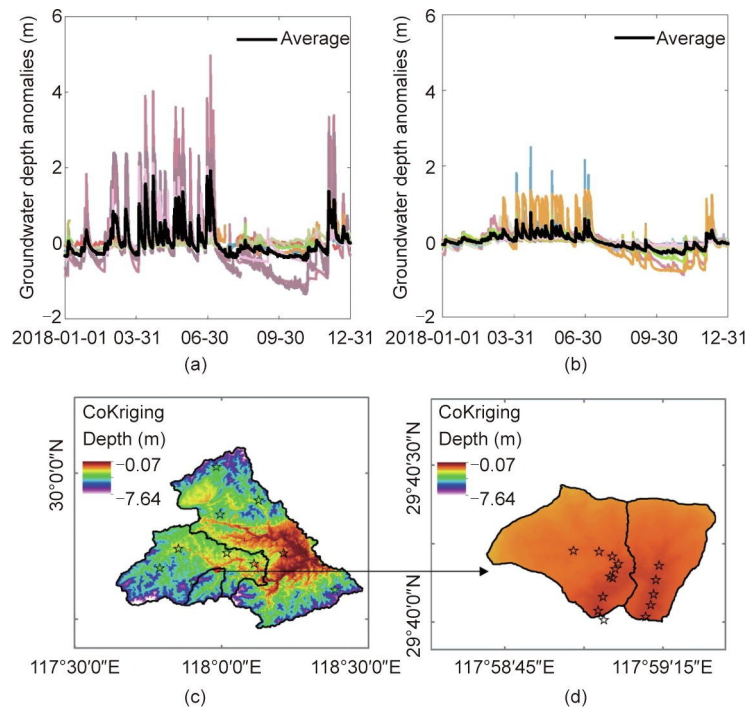


图5. 2018年五级屯河流域 (a) 和二级屯河流域 (b) I和II的五分钟标准化站点 (彩色) 和站点平均 (黑色) 时间序列图, 以及通过CoKriging方法插值得到的五级屯河流域 (c) 和二级流域 (d) I和II的2018年平均地下水埋深空间分布图 (正的标准化数值意味着地下水埋深较浅)。

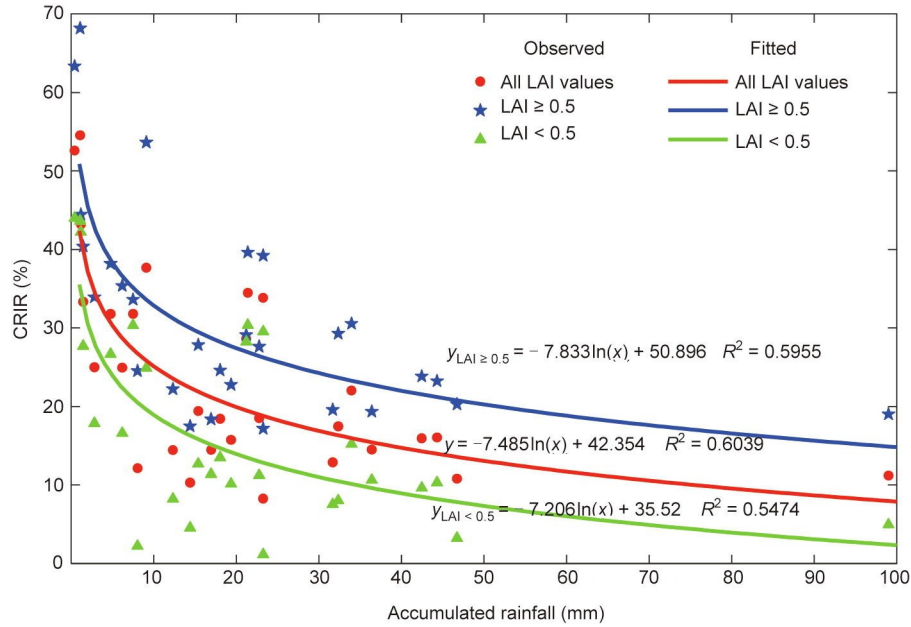


图6. 基于降雨事件CRIR与累积雨量和叶面积之间的关系，截留雨量按照LAI分类（LAI < 0.5、LAI ≥ 0.5和所有的LAI值）进行分组并取其均值作为样本点。

(6.55%)。地下0~1 m和1~2 m几乎没有产生径流，表明降雨强度峰值超过了土壤的入渗能力[76]，重力在壤中流的分配中起到了重要作用。此外，本次降雨事件中，地表径流陡升陡降，而地下2~3 m壤中流变化较慢且较为平坦，表明土柱对水文过程具有调节作用。

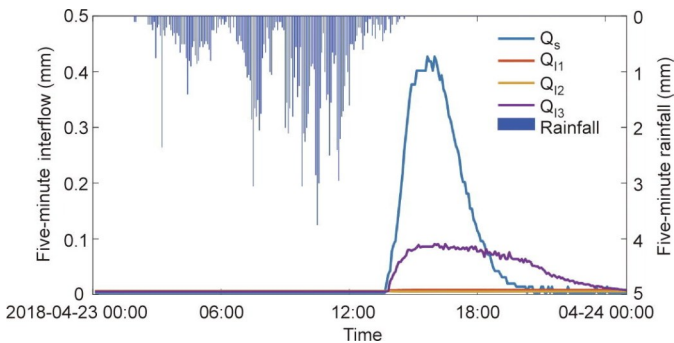


图7. 典型降雨事件#2018042302一级流域I出口的4个径流组分（地表径流，地下0~1 m、1~2 m、2~3 m的壤中流）的5分钟级降雨径流时间序列

4.6. 多尺度径流

利用中和村、月潭、屯溪流域安装的流量计进行流量观测（图8），三个流量过程均陡升陡降，但流量过程持续时间不同，屯溪流域流量持续时间最长[(175.00 ± 73.61) h]，其次是月潭[(160.33 ± 62.63) h]和中和村[(131.00 ± 36.89) h]，说明流域大小和蓄水能力对洪水过程具有影响。对于三个流量站，#2019051220和#2019052508洪水事件均为陡升陡降的单峰流量过程（图8）。对于#2019061615洪水事件，屯溪站为双峰流量

过程，月潭和中和村站为单峰流量过程（图8）。屯溪站位于屯溪流域的出口，流域控制面积较大，地形复杂，降水空间变异性强，流量过程也更复杂。此外，中和村流域作为月潭流域的一部分，中和村峰现时间早于月潭峰现时间，但屯溪峰现时间略短于月潭峰现时间（图8）。为分析流量过程、峰现时间与累积降水空间分布之间的关系，采用距离反比方法绘制每个洪水事件的累积降雨量图（图9）。前两个降雨事件（#2019051220和#2019052508）的累积降雨在整个流域的空间分布相比第三个降雨事件（#2019061615）相对均匀，降雨的时空分布不均[图8和图9(c)]，可以用于解释屯溪双峰流量过程和峰现事件为什么早于月潭。

5. 总结

以XAJ-NEW命名的新安江嵌套实验流域，是中国东部湿润区首个成功建设的流域。独特而全面的观测系统可以观测一系列关键水文气象过程和要素，其宗旨在于了解多尺度水循环。系统将长期运行，未来将提供更多的数据。该观测实验可以量化关键水文过程，并揭示中国典型湿润山丘区水文过程控制机制及潜在机制。XAJ-NEW的持续运行将有助于系统研究变化条件下产汇流机制，促进水文、生态、陆面模型的改进和发展。未来，XAJ-NEW将侧重于加强根区土壤水分观测，并通过加装通量塔来更好地观测碳和能量循环过程。

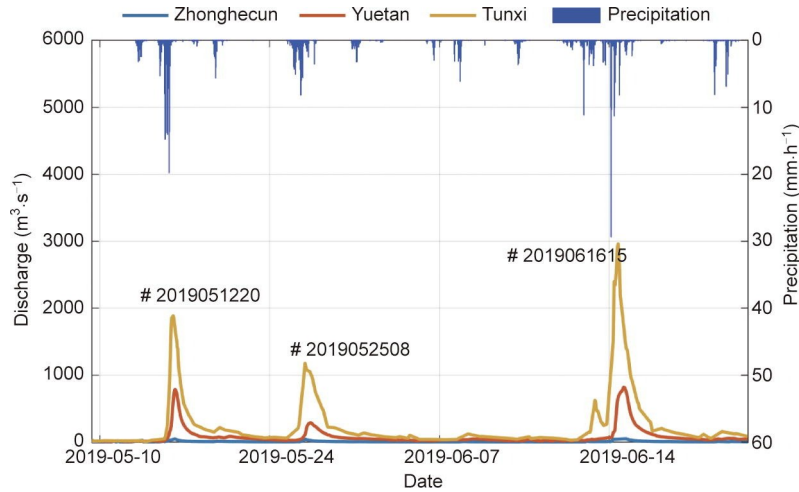


图8. 三级中和村流域、四级月潭流域、五级屯溪流域出口2019年三个洪水事件（#2019051220、#2019052508和#2019061615）汛期实测流量小时序列。

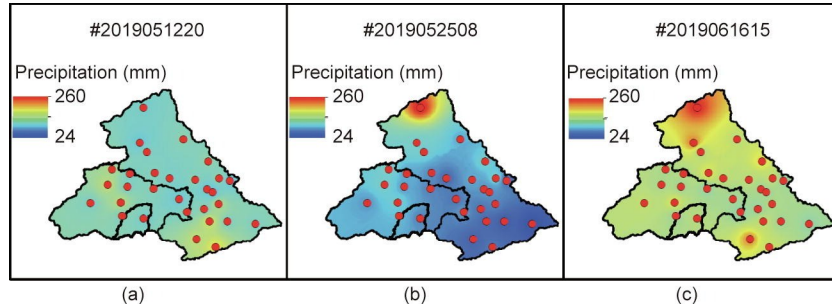


图9. 2019年三个洪水事件（#2019051220、#2019052508和#2019061615）对应的累积降雨量空间分布。

致谢

该研究获得国家自然科学基金(51879067)、国家重点研发计划(2016YFC0402701)、中央高校基本科研业务费专项资金(B200204038)、江苏省自然科学基金(BK20180022)、江苏省六大人才高峰项目(NY-004)的资助。本研究使用的观测数据可以从<http://hydro-lab.hhu.edu.cn>网站获取。

Compliance with ethics guidelines

Ke Zhang, Yunping Li, Zhongbo Yu, Tao Yang, Junzeng Xu, Lijun Chao, Jin Ni, Liutong Wang, Yun Gao, Yuzhong Hu, and Zuoding Lin declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Reference

- [1] Lakshmi V. Use of satellite remote sensing in hydrological predictions in ungauged basins. In: Proceedings of 3rd International Conference on Education and Information Systems: Technologies and Applications; 2005 Jun 27–30; Hsinchu, China. New York: IEEE; 2005. p. 85–9.
- [2] Yu Z, Lakhtakia MN, Yarnal B, White RA, Miller DA, Frakes B, et al. Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system. *J Hydrol* 1999; 218(1–2):72–91.
- [3] Shi J, Zhao T, Du J, Ji D, Xiong C, Dong X, et al. Observing Earth's water cycle from space [internet]. Bellingham: SPIE Newsroom; 2014 Nov 7 [cited 2021 Feb 18]. Available online: <https://spie.org/news/5659-observing-earths-water-cycle-from-space?SSO=1>.
- [4] Murari RRV, Ruiz L, Sandhya C, Braun JJ, Mohan Kumar MS. Study of hydrological processes in a small forested watershed in South Karnataka (India). National Seminar on Forest, Belgaum, 2007:1–10.
- [5] Talib A, Randhir TO. Climate change and land use impacts on hydrologic processes of watershed systems. *J Water Clim Chang* 2017;8(3):363–74.
- [6] Beldring S, Engen-Skaugen T, Førland EJ, Roald LA. Climate change impacts on hydrological processes in Norway based on two methods for transferring regional climate model results to meteorological station sites. *Tellus Ser A Dyn Meteorol Oceanogr* 2008;60(3):439–50.
- [7] Ma X, Xu J, Luo Y, Prasad Aggarwal S, Li J. Response of hydrological processes to land-cover and climate changes in Kejie watershed, South-West China. *Hydrol Processes* 2009;23(8):1179–91.
- [8] Yu Z, Pollard D, Cheng L. On continental-scale hydrologic simulations with a coupled hydrologic model. *J Hydrol* 2006;331(1–2):110–24.
- [9] Zhang K, Kimball JS, Nemani RR, Running SW, Hong Y, Gourley JJ, et al. Vegetation greening and climate change promote multidecadal rises of global land evapotranspiration. *Sci Rep* 2015;5(1):15956.
- [10] Trenberth KE, Asrar GR. Challenges and opportunities in water cycle research: WCRP contributions. *Surv Geophys* 2014;35(3):515–32.
- [11] Coughlan M, Avissar R. The global energy and water cycle experiment (GEWEX) continental-scale international project (GCIP): an overview. *J Geophys Res Atmos* 1996;101(D3):7139–47.
- [12] Chahine MT. GEWEX: the global energy and water cycle experiment. *Eos* 1992;73(2):9–14.
- [13] Sorooshian S, Lawford R, Try P, Rossow W, Roads J, Polcher J, et al. Water

- and energy cycles: Investigating the links. *WMO bull* 2005;54(2):58–64.
- [14] Nichols MH, Graaft JD, Cameron J, Sombatpanit S, Pieri C, Woodhill J. The Walnut Gulch Experimental Watershed—50 years of watershed monitoring and research. Enfiled: Science Publishers; 2007.
- [15] Nichols MH, Renard K. History of the USDA-ARS Walnut Gulch Experimental Watershed. Reston: American Society of Civil Engineers; 2007. p. 107–12.
- [16] Renard KG, Nichols MH, Woolhiser DA, Osborn HB. A brief background on the U. S. Department of Agriculture Agricultural Research Service Walnut Gulch Experimental Watershed. *Water Resour Res* 2008;44(5):W05S02.
- [17] Yu Z, Fu X, Luo L, Lu H, Ju Q, Liu D, et al. One-dimensional soil temperature simulation with Common Land Model by assimilating *in situ* observations and MODIS LST with the ensemble particle filter. *Water Resour Res* 2014;50(8): 6950–65.
- [18] Šraj M, Rusjan S, Petan S, Vidmar A, Brilly M. The experimental watersheds in Slovenia. *HNO* 2008;4(1):012051.
- [19] Blume T, Van Meerveld I, Weiler M. The role of experimental work in hydrological sciences—insights from a community survey. *Hydrol Sci J* 2017; 62(3):334–7.
- [20] Hopmans J, Pasternack G. Experimental hydrology: a bright future. *Adv Water Resour* 2006;29(2):117–20.
- [21] Minea G, Rodrigo-Comino J, Moroşanu G. Playing with water—an introduction to experimental hydrology. *Forum Geografic* 2018;XVII:56–65.
- [22] Kirkby M. Hillslope runoff processes and models. *J Hydrol* 1988;100(1–3): 315–39.
- [23] Bronstert A. Capabilities and limitations of detailed hillslope hydrological modelling. *Hydrol Processes* 1999;13(1):21–48.
- [24] Shahedi K. Hillslope hydrological modeling: the role of bedrock geometry and hillslope–stream interaction. Wageningen: Wageningen University; 2008.
- [25] Clark MP, Rupp DE, Woods RA, Tromp-van Meerveld HJ, Peters NE, Freer JE. Consistency between hydrological models and field observations: linking processes at the hillslope scale to hydrological responses at the watershed scale. *Hydrol Processes* 2009;23(2):311–9.
- [26] Hankin B, Metcalfe P, Beven K, Chappell NA. Integration of hillslope hydrology and 2D hydraulic modelling for natural flood management. *Hydrol Res* 2019;50(6):1535–48.
- [27] Zhao R. Watershed Hydrological Model—Xinanjiang Model and Shanbei Model. Beijing: Water Resource and Electric Press; 1984.
- [28] Hewlett JD, Troendle CA. Non-point and diffused water sources: a variable source area problem. In: Engineers ASoc, editor. *Watershed Management* 1975. 21–46.
- [29] Dunne T, Black RD. Partial area contributions to storm runoff in a small New England Watershed. *Water Resour Res* 1970;6(5):1296–1311.
- [30] Hewlett JD. Soil moisture as a source of baseflow from steep mountain watersheds. USDA Forest Service, Southeastern Forest Experimental Station; 1961. Contract No.: Paper 132.
- [31] Bergström S, Lindström G. Interpretation of runoff processes in hydrological modelling—experience from the HBV approach. *Hydrol Processes* 2015;29(16): 3535–45.
- [32] Bergström S, Forsman A. Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff mode. *Nord Hydrol* 1973;4(3):240–53.
- [33] Kirkby MJ. Hillslope hydrology. New York: Chichester: Wiley, 1978.
- [34] Liang X, Lettenmaier DP, Wood E, Burges SJ. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J Geophys Res Atmos* 1994;99(D7):14415–28.
- [35] Li Z, Zhang K. Comparison of three GIS-based hydrological models. *J Hydrol Eng* 2008;13(5):364–70.
- [36] Savenije HH. HESS opinions “topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo)”. *Hydrol Earth Syst Sci* 2010;14(12):2681–2692.
- [37] Gao H, Hrachowitz M, Fencica F, Gharari S, Savenije H. Testing the realism of a topography-driven model (FLEX-Topo) in the nested catchments of the Upper Heihe, China. *Hydrol Earth Syst Sci* 2014;18(5):1895–915.
- [38] Gao H, Birkel C, Hrachowitz M, Tetzlaff D, Soulsby C, Savenije HH. A simple topography-driven and calibration-free runoff generation module. *Hydrol Earth Syst Sci* 2019;23(2):787–809.
- [39] Liu Y, Zhang K, Li Z, Liu Z, Wang J, Huang P. A hybrid runoff generation modelling framework based on spatial combination of three runoff generation schemes for semi-humid and semi-arid watersheds. *J Hydrol* 2020;590:125440.
- [40] Li X, Cheng GD, Liu SM, Xiao Q, Ma MG, Jin R, et al. Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research (HiWATER): scientific objectives and experimental design. *Bull Am Meteorol Soc* 2013;94(8):1145–60.
- [41] Yang K, Qin J, Zhao L, Chen YY, Tang WJ, Han ML, et al. A multiscale soil moisture and freeze–thaw monitoring network on the third pole. *Bull Am Meteorol Soc* 2013;94(12):1907–16.
- [42] Zhao P, Xu X, Chen F, Guo X, Zheng X, Liu L, et al. The third atmospheric scientific experiment for understanding the Earth–Atmosphere coupled system over the Tibetan Plateau and its effects. *Bull Am Meteorol Soc* 2018; 99(4): 757–76.
- [43] Levang SJ, Schmitt RW. Centennial changes of the global water cycle in CMIP5 models. *J Clim* 2015;28(16):6489–502.
- [44] Huntington TG. Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *J Hydrol* 2006;319(1–4):83–95.
- [45] Forzieri G, Miralles DG, Ciais P, Alkama R, Ryu Y, Duveiller G, et al. Increased control of vegetation on global terrestrial energy fluxes. *Nat Clim Chang* 2020;10(4):356–62.
- [46] Davies EGR, Simonovic SP. Climate change and the hydrological cycle. In: Proceedings of 17th Canadian Hydrotechnical Conference. Hydrotechnical Engineering: Cornerstone of a Sustainable Environment; 2005 Aug 17–19; Edmonton, AB, Canada. Surrey: Canadian Society for Civil Engineering; 2005. p. 47–58.
- [47] Osborn TJ, Gosling SN, Wallace CJ, Dorling S. The water cycle in a changing climate. In: Proceedings of 7th World Water Forum, Words Into Action. Daegu: Republic of Korea; 2015 Apr 13. Marseille: World Water Council; 2015. p.14–9.
- [48] Tang Q, Durand M, Lettenmaier DP, Hong Y. Satellite-based observations of hydrological processes. *Int J Remote Sens* 2010;31(14):3661–7.
- [49] Troch PA, Dijkma R, van Lanen HAJ, van Loon E. Towards improved observations and modeling of catchment-scale hydrological processes: bridging the gap between local knowledge and the global problem of ungauged catchments. In: Proceedings of Workshop of the IAHS Decade on Prediction in Ungauged Basins, Brazil; 2002 Nov 20–22; Brasilia: University of Brasilia; 2002. p. 395–403.
- [50] Liu J, Chen X, Zhang X, Hoagland KD. Grid digital elevation model based algorithms for determination of hillslope width functions through flow distance transforms. *Water Resour Res* 2012;48(4):W04532.
- [51] Sivapalan M. Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale: is there a connection? *Hydrol Processes* 2003;17(5):1037–41.
- [52] Yu Z, Carlson TN, Barron EJ, Schwartz FW. On evaluating the spatial-temporal variation of soil moisture in the Susquehanna River Basin. *Water Resour Res* 2001;37(5):1313–26.
- [53] Zhao R. The Xinanjiang model applied in China. *J Hydrol* 1992; 135(1–4): 371–81.
- [54] Wu C, Huang G, Yu H, Chen Z, Ma J. Impact of climate change on reservoir flood control in the upstream area of the Beijiang River Basin, South China. *J Hydrometeorol* 2014;15(6):2203–18.
- [55] Xu Y, Huang X, Zhang Y, Lin W, Lin E. Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st century. *Adv Clim Chang Res* 2006;2(Supp 1):50–3.
- [56] Fu G, Yu J, Yu X, Ouyang R, Zhang Y, Wang P, et al. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961–2009. *J Hydrol* 2013;487(487):48–59.
- [57] Qin N, Chen X, Fu G, Zhai J, Xue X. Precipitation and temperature trends for the Southwest China: 1960–2007. *Hydrol Processes* 2010;24(25):3733–44.
- [58] Zhou R, Li Y, Lu D, Liu H, Zhou H. An optimization based sampling approach for multiple metrics uncertainty analysis using generalized likelihood uncertainty estimation. *J Hydrol* 2016;540:274–86.
- [59] Lin K, Lian Y, He Y. Effect of baseflow separation on uncertainty of hydrological modeling in the Xinanjiang Model. *Math Probl Eng* 2014;2014: 985054.
- [60] Ju Q, Yu Z, Hao Z, Ou G, Zhao J, Liu D. Division-based rainfall–runoff simulations with BP neural networks and Xinanjiang model. *Neurocomputing* 2009;72(13–15):2873–83.
- [61] Mao G, Liu J. WAYS v1: a hydrological model for root zone water storage simulation on a global scale. *Geosci Model Dev* 2019;12(12):5267–89.
- [62] Li Z, Liu M, Zhao Y, Liang T, Sha J, Wang Y. Application of regional nutrient management model in Tunxi Catchment: in support of the trans-boundary eco-compensation in eastern China. *Clean* 2014;42(12):1729–39.
- [63] Qi Z, Kang G, Chu C, Qiu Y, Xu Z, Wang Y. Comparison of SWAT and GWLF model simulation performance in humid South and semi-arid North of China. *Water* 2017;9(8):567.
- [64] Zhao J, Xu J, Cheng L, Jin J, Li X, Chen N, et al. The evolution mechanism of hydro-meteorological elements under climate change and the interaction impacts in Xin’anjiang Basin, China. *Stochastic Environ Res Risk Assess* 2019; 33(4–6):1159–73.
- [65] SL 34–2013. Technical regulations for hydrologic network design. Beijing: Ministry of Water Resources of the People’s Republic of China.
- [66] Hoeksema RJ, Clapp RB, Thomas AL, Hunley AE, Farrow ND, Dearstone KC.

- Cokriging model for estimation of water table elevation. *Water Resour Res* 1989;25(3):429–38.
- [67] Ahmadi SH, Sedghamiz A. Application and evaluation of kriging and cokriging methods on groundwater depth mapping. *Environ Monit Assess* 2008;138(1–3): 357–68.
- [68] Smith JA. Representation of basin scale in flood peak distributions. *Water Resour Res* 1992;28(11):2993–9.
- [69] Kumar P, Guttarp P, Foufoula-Georgiou E. A probability-weighted moment test to assess simple scaling. *Stoch Hydrol Hydraul* 1994;8(3):173–83.
- [70] Basu B, Srinivas VV. A recursive multi-scaling approach to regional flood frequency analysis. *J Hydrol* 2015;529:373–83.
- [71] Skaugen T, Vaeringstad T. A methodology for regional flood frequency estimation based on scaling properties. *Hydrol Processes* 2005;19(7):1481–95.
- [72] Mandapaka PV, Krajewski WF, Mantilla R, Gupta VK. Dissecting the effect of rainfall variability on the statistical structure of peak flows. *Adv Water Resour* 2009;32(10):1508–25.
- [73] Yu Y, Gao T, Zhu J, Wei X, Guo Q, Su Y, et al. Terrestrial laser scanning-derived canopy interception index for predicting rainfall interception. *Ecohydrology* 2020;12(5):e2212.
- [74] Zheng C, Jia L. Global canopy rainfall interception loss derived from satellite earth observations. *Ecohydrology* 2020;13(2):e2187.
- [75] Miralles DG, Gash JH, Holmes TRH, de Jeu RAM, Dolman AJ. Global canopy interception from satellite observations. *J Geophys Res Atmos* 2010;115(D16): D16122.
- [76] Horton RE. The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos* 1933;14(1): 446–60.