Journal of Water Resources Research 水资源研究, 2026, 15(4), 357-367
Published Online August 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/jwrr
https://doi.org/10.12677/jwrr.2026.154039

湖北省径流系数时空演变特征与参数区域化研究

吕鉴权，余　超，张　勇，黄　倩

湖北省黄石市水文水资源勘测局，湖北　黄石

收稿日期：2026年7月20日；录用日期：2026年8月16日；发布日期：2026年8月27日

摘　要

径流系数的取值可直接关系到无资料区域水文计算的可靠性和科学性，如何确定这一参数仍是当前水文工作者面临的棘手问题。本文以湖北省县级行政区与水资源四级区套合形成的210个基本单元为研究对象，收集了2001~2023年的水文气象和下垫面等数据，采用Mann-Kendall趋势检验法分析湖北省径流系数时空变化特点，结合随机森林识别径流系数的主控影响因子，通过多元线性逐步回归方法构建径流系数区域化预测模型，实现了全省各研究单元径流系数的定量估算。最终结果表明：其一，时间变化上，湖北省多数区域2001~2023年径流系数呈现不显著变化趋势，只有荆门东宝区、随州广水等局部区域呈显著减小趋势，黄石大冶、黄冈罗田等东南部区域呈显著增大趋势，2010年之后波动明显加剧。其二，在空间分布上，全省径流系数总体上呈南高北低的分布格局，鄂西南和鄂东南多年平均径流系数超过0.54，而鄂北岗地仅有0.24~0.31，这个分布基本上符合湿润区的产流规律。其三，降水量、潜在蒸散发、归一化植被指数是湖北省径流系数的主控因子，其中降水量为所有区域的核心影响因子，鄂西山区还同时受蒸散发制约，城镇化水平较高的武汉城市圈受归一化植被指数影响明显，而坡度、土壤质地等因子对年尺度径流系数的解释力较低。其四，通过构建的区域化多元线性回归模型对全省各研究单元径流系数的模拟平均相对误差为12.7%，其中鄂西生态区精度最好(平均误差8.3%)，鄂北农业区精度相对差一点(平均误差19.7%)，不过整体来说能满足水文工程的应用需求。这项研究工作可以为湖北省无资料流域水文设计、水资源管理提供科学支撑。

关键词

径流系数，参数区域化，随机森林，多元线性回归，湖北省，长江中游

Study on the Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Parameter Regionalization of Runoff Coefficient in Hubei Province

Jianquan Lyu, Chao Yu, Yong Zhang, Qian Huang

Huangshi Hydrological and Water Resources Survey Bureau of Hubei Province, Huangshi Hubei

作者简介：吕鉴权，出生于 1988 年 11 月，湖北大冶人，本科，中级工程师，研究方向为水文水资源，Email: 908553519@qq.com

文章引用：吕鉴权, 余超, 张勇, 黄倩. 湖北省径流系数时空演变特征与参数区域化研究[J]. 水资源研究, 2026, 15(4): 357-367.
DOI: 10.12677/jwrr.2026.154039

Received: July 20, 2026; accepted: August 16, 2026; published: August 27, 2026

Abstract

The value of the runoff coefficient is directly related to the reliability and scientific validity of hydrological calculations in ungauged regions, and determining this parameter remains a challenging issue for hydrologists. This study took 210 basic units formed by the spatial overlay of county-level administrative divisions and water resources level-4 sub-zones in Hubei Province as the research objects, and collected hydrological, meteorological, and underlying surface data of Hubei Province from 2001 to 2023. The Mann-Kendall trend test was employed to analyze the spatio-temporal variation characteristics of the runoff coefficient in Hubei Province, and the random forest algorithm was used to identify its dominant influencing factors, and a regionalized prediction model of the runoff coefficient was constructed via multiple linear stepwise regression, enabling quantitative estimation of the runoff coefficient for all research units across the province. The results indicate that: 1) In terms of temporal variation, the runoff coefficient in most areas exhibited no significant trend during 2001 to 2023, with only part areas such as Dongbao District in Jingmen and Guangshui in Suizhou showing a significant decreasing trend, while southeastern regions such as Daye in Huangshi and Luotian in Huanggang showed a significant increasing trend, with fluctuations becoming more pronounced after 2010. 2) In terms of spatial distribution, the runoff coefficient generally presented a pattern of being higher in the south and lower in the north, with the multi-year average runoff coefficient exceeding 0.54 in southwestern and southeastern Hubei, but only ranging from 0.24 to 0.31 in the northern Hubei upland, which is basically consistent with the runoff generation pattern of humid regions. 3) Precipitation, potential evapotranspiration, and the normalized difference vegetation index (NDVI) were the dominant controlling factors of the runoff coefficient in Hubei Province, with precipitation serving as the core influencing factor in all regions. The mountainous areas of western Hubei were additionally constrained by evapotranspiration, while the Wuhan metropolitan area with a higher level of urbanization was significantly affected by NDVI. Factors such as slope and soil texture exhibited relatively low explanatory power for the annual-scale runoff coefficient. 4) The regionalized multiple linear regression model yielded an average relative error of 12.7% in simulating the runoff coefficient across all research units in the province, with the best accuracy in the western Hubei ecological area (average error of 8.3%) and relatively lower accuracy in the northern Hubei agricultural area (average error of 19.7%). Overall, the model can meet the application requirements of hydrological engineering. This study can provide scientific support for hydrological design and water resources management in ungauged basins in Hubei Province.

Keywords

Runoff Coefficient, Parameter Regionalization, Random Forest, Multiple Linear Regression, Hubei Province, Middle Reach of the Changjiang River

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

在全球气候变化与城镇化快速发展的双重驱动下，各流域的水文循环过程正发生着深刻变化。与此同时，极端降水事件频发与流域下垫面状况的剧烈改变，使得不同流域径流系数的时空异质性明显增强。径流系数作为连接降水与径流的关键参数，其取值精度直接关系到流域水文模拟的可靠性、海绵城市建设的成效性以及洪涝风险评估的科学性。2003 年国际水文科学协会(IAHS)开启了“无资料流域水文预测(PUB)”的十年科学计划

[1]，明确提出将水文参数区域化作为解决无资料区水文计算难题的核心技术途径。径流系数作为最常用的水文特征参数之一，其区域化规律解析与建模方法研究始终是水文科学领域亟待突破的热点与难点。

当前国内外针对径流系数的研究主要集中在演变规律解析、主控因子识别和区域化建模三个方向[2]。在演变规律解析方面，大多数研究表明近 50 年来湿润区的径流系数整体呈上升趋势，北方半湿润区则呈下降趋势，主要归因于城镇化进程加快和降水格局的改变；在主控因子识别方面，现有研究证实不同气候区、不同时间尺度的径流系数主控因子存在明显差异，年尺度径流系数主要受降水量、蒸散发和植被覆盖的调控，而场次暴雨尺度则更多地受到降水强度、土壤前期含水量、坡度和土地利用等因素影响；在区域化建模方面，常用的方法有经验公式法、机器学习法和回归分析法三类，其中多元线性回归法因参数物理意义清晰、率定简便、适用面广而在工程领域上应用最为广泛，但其精度极大地依赖于主控因子识别的准确性。径流系数区域化研究源于无资料地区径流计算的实际需求。受水文站网密度不足的限制，大量中小流域缺乏实测径流资料，工程实践中通常借助等值线图法、水文比拟法、径流系数法及降雨径流关系法等推求设计径流[3]-[6]，其中径流系数法因所需资料少、计算简便，在资料短缺地区应用较为普遍[7]。

湖北省位于长江中游，既是南水北调中线工程的水源涵养地，也是长江大保护的关键战略区域，还是粮食主产区和城镇化发展核心区域。省内的地形地貌复杂多样，涵盖有山地、丘陵、平原湖网等多种地貌形态，整体的降水时空分布非常不均匀，年降水量可以从鄂西北的 800 mm 到鄂东南的 1600 mm。不同区域的产流机制差异也很明显：鄂西山区以蓄满产流为主，鄂北岗地则为超渗和蓄满混合产流，江汉平原水网区产流受河湖水位顶托影响较大，这些不同因素叠加在一起导致径流系数的时空异质性非常突出[8]。然而目前关于湖北省径流系数的研究多集中于小流域或地市级尺度，尚无全省方面的系统参数化方案，导致基层水文工作者在无资料区开展水文计算时大部分还是采用全国通用的经验值，有时误差能达到 30%以上，远远达不到流域综合治理、海绵城市设计、水资源评价的技术要求。

基于此，本研究以湖北省县级行政区与水资源四级区套合形成的 210 个基本单元为研究对象，系统分析了 2001 年至 2023 年年径流系数的时空演变过程，采用随机森林法定量识别不同研究单元的主控影响因子，然后利用各自的主控影响因子构建各单元的径流系数预测模型，通过和《湖北省水资源公报》的数据做对比，评估模型的精度，希望以此为湖北省各流域的水文参数率定提供一些参考。

2. 研究区概况

湖北省位于中部地区(北纬 29˚01'53"~33˚6'47"、东经 108˚21'42"~116˚07'50")，总面积 18.59 万 km^2，约占全国陆地面积的 1.94%。东邻安徽，南接江西和湖南，西连重庆，西北与陕西接壤，北与河南毗邻。地形上，东、西、北三面都是山，中间低平，略呈向南敞开的不完整盆地。其山地占全省总面积的一半以上(56%)，主要分布在鄂西北、鄂西南、鄂东北、鄂东南；丘陵占 24%，集中在鄂中和鄂东北；平原湖区占 20%，以江汉平原和鄂东沿江平原为主，全省的人口和产业大多集中在这一带。

气候属于典型的亚热带季风气候，四季分明，雨热同期。多年平均气温 16.19℃，最冷的 1 月平均 3℃~5℃，最热的 7 月平均 26℃~29.5℃。降水方面，多年平均为 1186.4 mm，但年际变化很大，最多年降水量(2020 年 1708 mm)是最少年(1966 年 815 mm)的 2 倍以上。降水在年内分配也不均匀，5~9 月降水量占全年总量的 63%，特别是梅雨期(6 月中旬至 7 月中旬)降水强度大、极端事件频发。空间上，降水呈现南多北少、东西高、中间低的分布特征，鄂西南、鄂东南年降水量可达 1300~1690 mm，鄂西北只有 770~935 mm。潜在蒸散发多年平均为 1127.4 mm，空间分布与降水相反，呈北高南低格局。

水系方面，湖北的河网比较密。除长江和汉江两条主干外，河长 5 km 以上的河流有 4229 条，总长度 5.9 万 km，流域面积 50 km^2 以上的有 1232 条。长江在湖北境内长度 1061 km，汉江 858 km，各级支流呈树枝状展布。湖北省素有“千湖之省”之称，纳入保护名录的湖泊共 755 个，常年水面总面积为 2706.85 km^2，主要分布在江

汉平原。全省多年平均水资源总量 1234 亿 m^3，径流深的分布跟降水基本一致——鄂西南可达 800 mm 以上，鄂北岗地不足 300 mm。

土地利用方面，全省林地占比最高(约占 50%)，主要分布在各大山区；其次为耕地(约 36%)，集中分布在江汉平原和鄂北岗地；草地约 4%，水域约 6%，其他为建设用地和未利用地。全省 2000 年至 2020 年土地利用改变显著，耕地总面积减少 1.11%，建设用地总面积增加 15.13%，主要增加区域集中在武汉城市圈、襄阳都市圈等城镇化快速发展地区。

3. 数据与方法

3.1. 数据来源与预处理

本研究采用的数据来自不同渠道，为了方便统一计算，将所有数据统一转换至 2000 国家大地坐标系(CGCS2000)，空间分辨率统一重采样到 1 km，然后用分区统计的方法，算出 210 个研究单元 2001 到 2023 年的逐年参数序列。具体数据来源如下：

1) 气象数据。从国家青藏高原科学数据中心下载的，是 1901 到 2023 年、1 km 分辨率的逐月降水和气温数据(包括平均温、最高温、最低温) [9]。这套数据是在 CRU 全球 0.5˚气候数据和 WorldClim 高分辨率气候数据的基础上，用 Delta 空间降尺度的方法得来。

本研究的潜在蒸散发(PET)用 Hargreaves 公式计算[10]，

$$\mathrm{PET} = 0.0023 \times S_0 \times \sqrt{\mathrm{MaxT} - \mathrm{MinT}} \times \left(\mathrm{MeanT} + 17.8\right) \tag{1}$$

式中，PET 为月潜在蒸散发量，mm/月；S_0 为到达地球大气层顶的理论太阳辐射，取决于纬度和月份；MaxT、MinT、MeanT 分别为月最高、最低气温和月平均气温，℃。考虑到本研究采用的气象数据为月尺度(逐月平均气温、逐月最高气温与最低气温)，本文按公式(1)直接以各月平均气温、月最高气温和月最低气温计算逐月潜在蒸散发量，即采用月平均气温的近似处理方式估算月潜在蒸散发量。该方法仅需气温资料即可计算，所需参数少且易于获取，在资料匮乏地区具有较强的适用性[10]。

2) 水文数据。用的是湖北省水利厅发布的《湖北省水资源公报》，时间范围为 2001 到 2023 年[11]。这些数据是根据全省的雨量站和水文站的实测数据，结合基本单元的产汇流模型计算得出。经过一致性和合理性检验，可靠性有保证，覆盖了 210 个研究单元，是整个研究的核心数据之一。

3) 下垫面数据，一共四个来源：

① 土壤数据。采用的是联合国粮食及农业组织(FAO)的全球土壤数据库，30 弧秒的分辨率，约是 1 km [12]。采用 SPAW 软件计算各单元的土壤饱和导水率、砂土含量、粉土含量和黏土含量等参数。

② 土地利用数据。从中国科学院资源环境科学与数据中心下载[13]，有 2000、2005、2010、2015、2020 年五期，1 km 分辨率，分类精度在 90%以上。包括耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 个一级类和 25 个二级类。

③ NDVI 数据。采用的是 MODIS 16 天、250 m 分辨率的 NDVI 产品，通过最大值合成法处理后重采样，生成了 2001 到 2023 年每年 1 km × 1 km 的年度 NDVI 数据，能反映各单元的年均植被覆盖情况[14]。

④ 地形数据。采用的是 SRTM 30 m 分辨率的数字高程模型，从中国科学院资源环境科学与数据中心下载的，用来计算各单元的平均坡度。

3.2. 研究方法

3.2.1. Mann-Kendall 趋势检验

径流系数的时间变化趋势用非参数 Mann-Kendall 法来做。这个方法的优点是不要求数据服从正态分布，对

异常值也不太敏感，是水文气象序列的趋势分析里用得比较多的方法。Z 统计量的计算方式如下：

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & S>0\\ 0 & S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & S<0\end{cases} \tag{2}$$

式中：S 为 Mann-Kendall 统计量。当 $Z>0$ 表示上升趋势，$Z<0$ 表示下降趋势。显著性水平取两个等级：90% ($|Z|>1.645$)和 95% ($|Z|>1.96$)。同时计算了各单元径流系数的变化速率，用来定量描述趋势的强弱。

3.2.2. 随机森林主控因子识别

随机森林是由 Leo Breiman 于 2001 年提出的，本质上是基于分类树的非参数回归方法，通过 bootstrap 重抽样方法从原始样本中抽取多个样本，对每个 bootstrap 样本进行决策树建模，然后组合多棵决策树的预测，通过投票得出最终预测结果。这样做的好处是可有效避免过拟合问题，同时还能定量评估每个自变量对因变量的重要性。

根据径流系数的形成机理，结合现有研究成果[2] [7]，本研究选取年降水量(P)、潜在蒸散发(PET)、平均坡度(Slope)、归一化植被指数(NDVI)、土壤饱和导水率、砂土含量、粉土含量、黏土含量共 8 个潜在影响因子。其中，年降水量和潜在蒸散发表征气候与水量平衡条件，是径流系数的一级控制因素；NDVI 与土地利用状况相关，反映下垫面植被对产流的调节作用；坡度与土壤质地参数(饱和导水率、砂/粉/黏土含量)表征下垫面地形与土壤渗透特性，直接影响降水再分配与产流过程。以年径流系数为因变量构建随机森林回归模型，决策树数量 ntree 设为 1000，其余参数取默认值。因子重要性通过变量置换后的预测误差增幅(IncMSE)评估：IncMSE 越大，表明该变量对径流系数预测的贡献越大；若 IncMSE 为负或接近零，则表明该变量对径流系数无明显贡献。

与传统的 Pearson 相关分析和偏相关分析相比，随机森林可有效识别自变量与因变量之间的非线性关系，且不受多重共线性问题的干扰，更适合水文要素的主控因子识别。

3.2.3. 多元线性逐步回归模型

以年径流系数为因变量，随机森林识别出来的主控因子为自变量，构建多元线性逐步回归模型，公式如下：

$$y=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\cdots+\beta_px_p+\varepsilon \tag{3}$$

式中，β_0 是截距；$\beta_1,\cdots,\beta_p$ 是回归系数，表示在其他因素不变的情况下，自变量 x_p 对因变量 y 的影响大小；ε 是随机误差，表示自变量没能解释的那部分的综合影响。

当对总体进行随机抽样时，假设有 n 个样本，多元线性回归模型可表示为矩阵形式：

$$Y_{n\times1}=X_{n\times(p+1)}\beta+\varepsilon \tag{4}$$

对于多元线性回归模型来说，先把截距和回归系数估计出来，然后再来评估误差大小，如果精度能满足研究或工作需要，则表示该模型符合预期。

3.2.4. 最小二乘法估计参数

最小二乘法通过最小化真实值和预测值之间的误差来求解参数，可用于参数 β 的估计，最终得到参数 β 的最优解。参数的估计值需满足残差平方和最小：

$$\tilde{\beta}=\arg\min\left\|Y-X\beta\right\|^2=\arg\min\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\sum_{k=0}^{p}\beta_kx_{ik}\right)^2 \tag{5}$$

其中，当 $x_{i0}=1$。

$$\tilde{\beta}=\left(X'X\right)^{-1}X'Y \tag{6}$$

此时称 $\tilde{\beta}$ 为 β 的最小二乘估计。

3.2.5. 径流系数预测模型构建与参数率定

把径流系数作为因变量，把随机森林识别出来的主控因子作为自变量，构建多元线性回归模型。用最小二乘法分别估计各区域的回归参数，然后代入模型算径流系数，再跟湖北省历年水资源公报里的成果做对比，计算相对误差。

4. 结果与分析

4.1. 径流系数时空演变特征

基于湖北省水资源公报的数据，利用 210 个研究单元 2001~2023 年的年降水量和年径流深，计算出了各单元的径流系数，然后分析其时空变化情况。

4.1.1. 时间变化特征

本文采用 Mann-Kendall 趋势检验来研究径流系数的时间变化。研究结果显示全省大部分区域年径流系数有不显著的减小趋势(如图 1)，少数区域达到显著水平(其中荆门东宝区在 90%水平上呈现显著减小，随州广水区在 95%水平上呈现显著减小，说明这些地方的产流效率在研究期内存在下降趋势)。

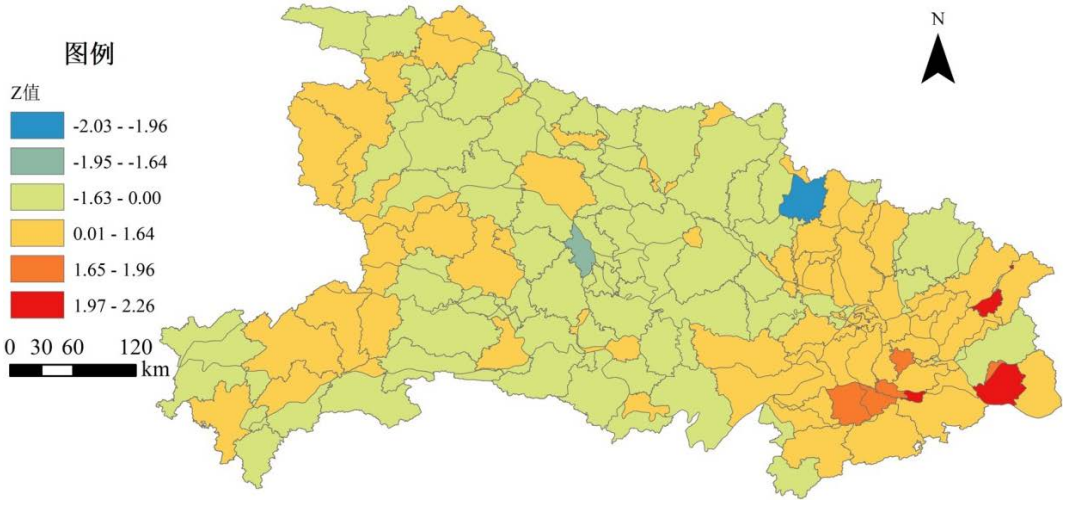


图 1. 湖北省各研究单元 2001~2023 年径流系数的变化趋势

与此同时，西部和东南部有些区域径流系数呈增加趋势(多数不显著)，其中黄石大冶市和咸宁咸安区在 90%水平上显著增加，黄冈罗田和武穴在 95%水平上显著增加，这些区域的产流效率在增强。从全省整体看，年平均径流系数呈不显著增加趋势，增加速率约为 1.6%/10a (如图 2)。2001 年全省年平均径流系数最小(0.316)，2017 年最大(0.548)，波动幅度比较大，说明年际气候变异对径流系数的影响较大。

4.1.2. 空间分布特征

从多年平均值的空间分布(如图 3)来看，径流系数总体上南高北低。鄂西南恩施土家族苗族自治州、咸宁市和黄冈市部分区域径流系数多年平均值相对较高，超过了 0.54，而北部十堰市、襄阳市、随州市、荆门市部分区域径流系数多年平均值相对较低，在 0.24~0.31 之间。

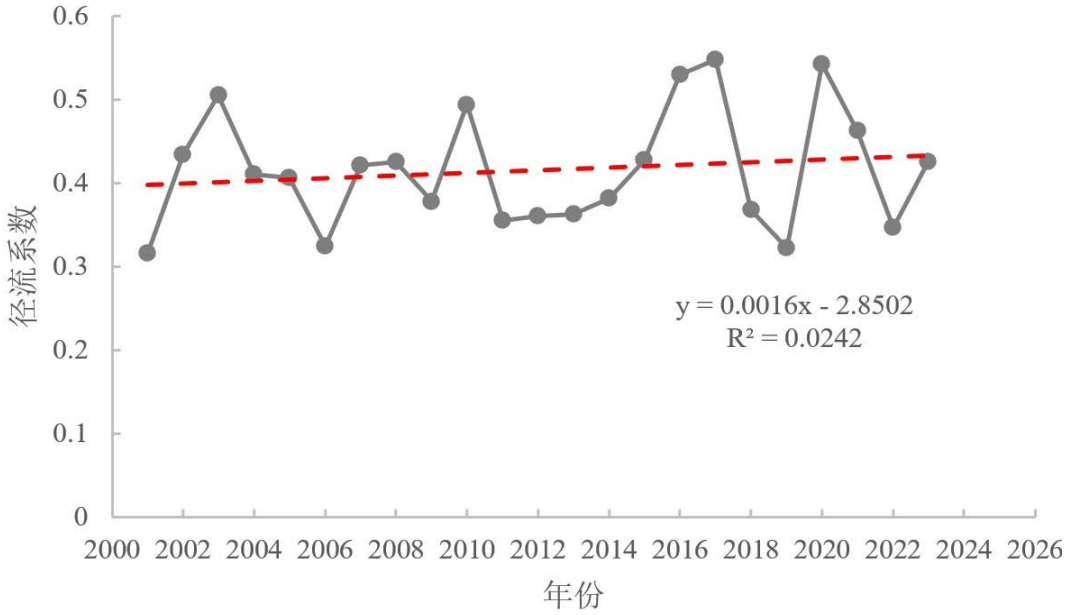


图 2. 湖北省 2001~2023 年径流系数的变化趋势

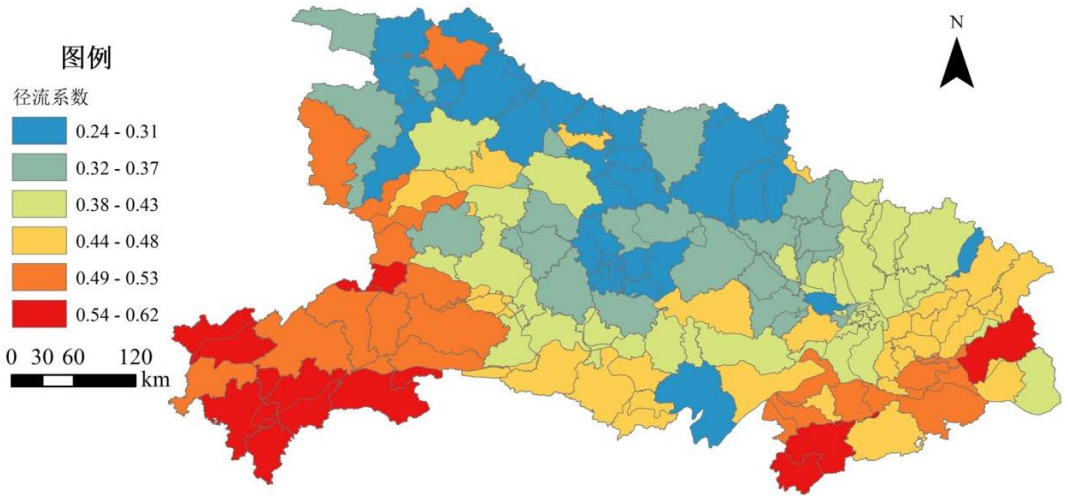


图 3. 径流系数多年平均值空间分布

在最大值方面：鄂西南恩施土家族苗族自治州、咸宁市和黄冈市部分区域径流系数最大值相对较高，超过了 0.77；而北部十堰市、襄阳市、随州市、荆门市部分区域径流系数最大值相对较低，在 0.40~0.50 之间。

在最小值方面：与湖北省径流系数多年平均值的空间分布相似，鄂西南恩施土家族苗族自治州部分区域、咸宁市部分区域径流系数最小值相对较高，超过了 0.40，而北部十堰市、襄阳市、随州市、荆门市部分区域径流系数最小值相对较低，在 0.08~0.15 之间。

4.2. 径流系数主控因子识别结果

随机森林因子重要性评估结果(如表 1)显示，在选取的 8 个潜在影响因子中，年降水量的平均 IncMSE 为 18.23%，210 个研究单元的 IncMSE 均为正值，且在 201 个研究单元(占 95.7%)中为核心影响因子，是全省径流系数的绝对主控因子；年潜在蒸散发平均 IncMSE 为 4.16%，在 163 个研究单元(占 77.6%)中 IncMSE 大于 0，对大部分研究单元具有显著影响；NDVI 平均 IncMSE 为 0.60%，在 103 个研究单元(占 49.0%)中 IncMSE 大于 0，对部分研究单元具

有一定影响。其余因子(平均坡度、土壤饱和导水率、砂土含量、粉土含量、黏土含量)平均 IncMSE 接近零或小于零，对年尺度径流系数的解释力有限。这一结果与年尺度产流主要受水量平衡因素调控的规律相符。

表 1. 主要影响因素 IncMSE 值统计

影响因子	平均 IncMSE/%	IncMSE > 0 的研究单元数	占比/%
年降水量(P)	18.23	210	100.0
潜在蒸散发(PET)	4.16	163	77.6
归一化植被指数(NDVI)	0.60	103	49.0

注：核心影响因子指该因子 IncMSE 值在该研究单元中为最大值；平均坡度、土壤饱和导水率、砂土含量、粉土含量、黏土含量等其余因子的平均 IncMSE 接近零或小于零，对年尺度径流系数解释力有限，未列入表中。

4.3. 区域化模型构建与精度评估

基于随机森林识别的主控因子结果，本文将年降水量、潜在蒸散发和 NDVI 作为各单元径流系数的主要影响因子构建模型，若依次去掉 NDVI、潜在蒸散发、年降水量再次建模，如果对模型模拟预测精度影响不大，则进一步简化模型，如果对模型精度影响较大，则仍然保留三个或两个主要影响因素的径流系数预测模型，最终得到三类模型形式：

仅含降水的单因子模型：110 个单元(占 52.4%)，主要分布在降水空间异质性强、下垫面变化不大的山区。

含降水 + 蒸散发或降水 + NDVI 的双因子模型：91 个单元(占 43.3%)，鄂西山区以降水 + 蒸散发为主，武汉城市圈以降水 + NDVI 为主。

含降水 + 蒸散发 + NDVI 的三因子模型：9 个单元(占 4.3%)，主要分布在鄂北农业区和人类活动较强的平原区域。

模型精度评估结果显示：全省 210 个单元的模拟平均相对误差为 12.7%，误差范围 4.15%~27.02%，≤20%的单元约占 85%。其中有实测水文站点的单元平均误差约 6.8%，无实测站点的单元约 14.2%。以下用两个具体案例来说明。

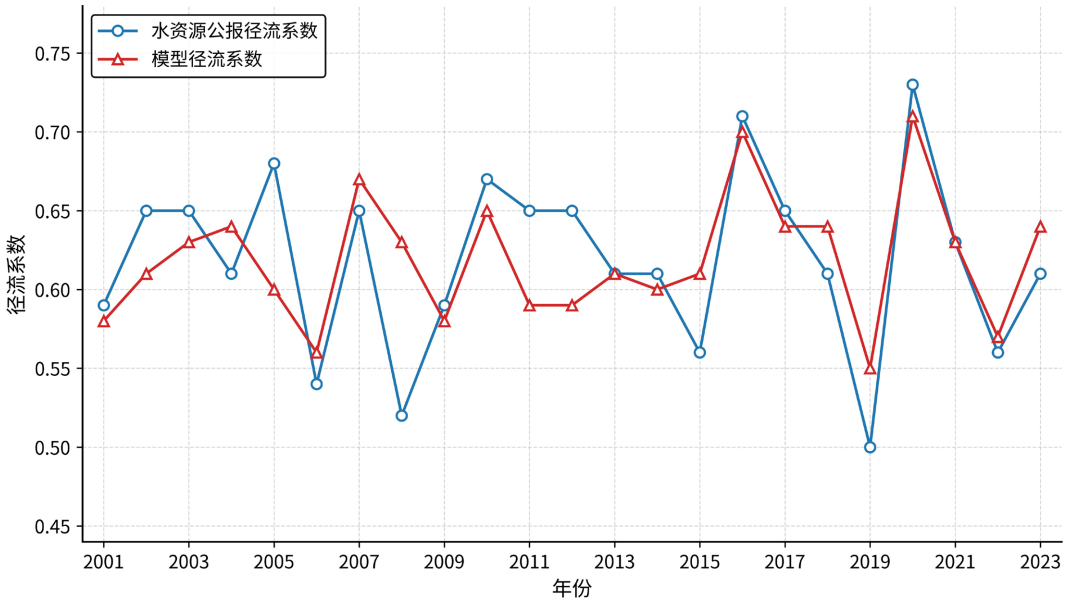


图 4. 酉水来凤区宣恩县年径流系数对比图

1) 有实测站点的区域(以下简称有站区)——酉水来凤区宣恩县

该区域径流系数的多元线性回归模型如下所示：

$$\alpha = 0.3669 + 1.617 \times 10^{-4} P \tag{7}$$

模拟相对误差在 0.04%~19.90%范围内，平均相对误差为 4.76%，误差最大的年份为 2008 年(如图 4)。

2) 无实测站点的区域(以下简称无站区)——沮漳河水系南漳县

该区域径流系数的多元线性回归模型如下所示：

$$\alpha = 1.11 + 3.365 \times 10^{-4} P - 7.299 \times 10^{-4} E - 3.028 \times 10^{-5} \mathrm{NDVI} \tag{8}$$

模拟相对误差在 1.69%~24.01%范围内，平均相对误差为 9.47%，误差最大的年份为 2011 年(如图 5)。

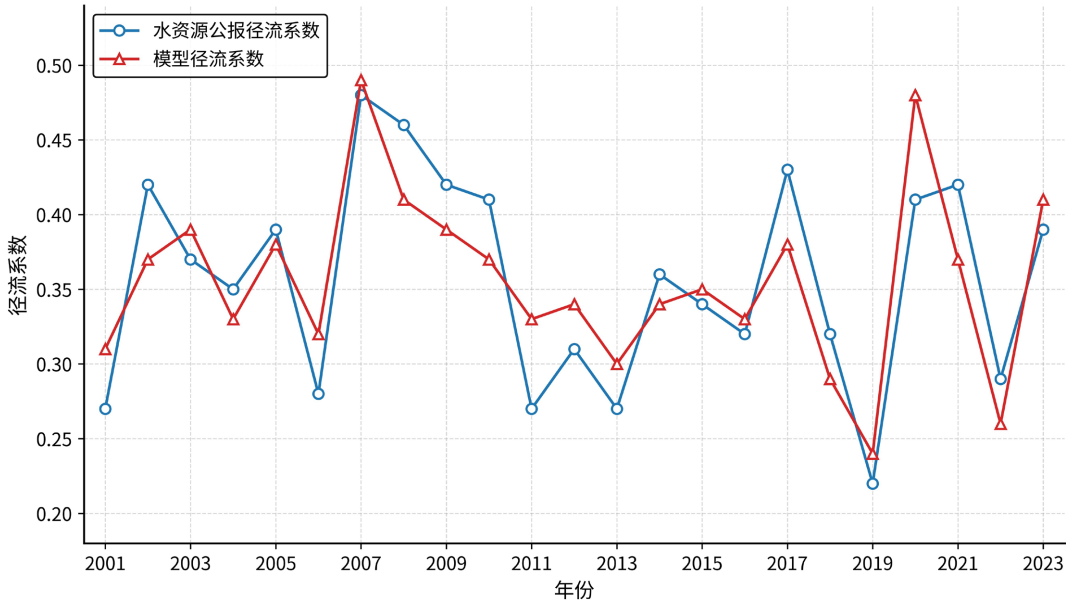


图 5. 沮漳河水系南漳县年径流系数对比图

5. 讨论

5.1. 方法与传统等值线图法的比较

传统的径流等值线绘制方法，直接利用水文站实测径流深进行空间插值。存在两方面不足：一是站网稀的地方插值精度较差，插值精度难以满足±5%的控制要求；二是水文站测出来的是“面径流”(代表一大片区域的平均值)，而降水等值线是“点降水”，二者在物理含义上存在偏差。本文用径流系数参数区域化的思路，把径流深的估算拆成了两步“先算径流系数，再乘以降水量”，有效规避了上述问题。

5.2. 模型精度分析

全省 210 个单元的平均模拟误差为 12.7%，对于少资料地区的径流估算而言，这个精度已经具备实用价值。从误差分析来看，主要呈现以下规律：

有站区精度高于无站区。有站区平均误差大多在 10%以内，无站区主要在 10%~20%之间，个别超过 20%。其原因在于：无站区在水资源公报编制过程中是借用附近有站区的径流系数，而两边的下垫面条件无法完全一致，从而引入偏差。

因子精简时精度更高。只用降水的单因子模型，精度比加入蒸散发、NDVI 的多因子模型好。多因子模型里

各因子年际都在波动，叠加后导致预测误差放大。

平原区精度高于山区。平原区径流系数空间变化小，线性模型即可较好描述；山区地形变化大，径流系数对局部微地形响应敏感，线性偏差相对较大。

5.3. 方法适用性与推广潜力

该方法的推广应用需满足两个条件：一是有降水量和气温数据(用来算 PET，这是 Hargreaves 公式和模型的输入)；二是有 DEM、土地利用、NDVI 等下垫面数据(随机森林因子识别要用)。当前遥感数据日益丰富，这两个条件在全国大部分区域基本能满足，所以该方法的推广潜力还是比较大的。

5.4. 局限性

本研究仍存在一定局限性。第一，线性模型描述了径流系数和影响因子之间的线性关系，但在径流系数年际变幅大的区域，这种线性关系难免有系统偏差。第二，目前只在年尺度上做了工作，月尺度、日尺度甚至是场次暴雨尺度的径流系数区域化还没涉及——那些短时间尺度上，降水强度、前期土壤含水量等这些过程因子的影响更大，模型结构可能需要重新设计。

6. 结论与展望

6.1. 结论

本研究是以湖北省县级行政区与水资源四级区套合形成的 210 个基本单元为研究对象，做了径流系数的时空演变分析、主控因子识别和区域化建模，主要结论如下：

1) 时间演变：2001~2023 年全省整体径流系数呈不显著上升趋势，增速约为 1.6%/10 年。局部变化最明显的区域有两处——荆门市东宝区、随州市广水市呈显著减小，黄石市大冶市、咸宁市咸安区和黄冈市部分地区等东南部区域因降水量大和城镇化快速发展而呈显著增大。

2) 空间分布：径流系数南高北低，鄂西南和鄂东南山区多年平均超过 0.54，而鄂北岗地小于 0.31。

3) 主控因子：年降水量是所有区域的核心因子；鄂西山区同时受蒸散发调控；城镇化快速发展区域(比如武汉城市圈)受 NDVI 影响明显；而坡度、土壤质地等因子对年尺度径流系数的解释力可忽略不计。

4) 区域化模型：基于分析主控因子建立的多元线性逐步回归模型，湖北省各子区域的径流系数模拟计算平均误差在 4.15%~27.02%范围内，平均相对误差为 12.7%，整体精度基本可以满足水文工程应用需求。

6.2. 展望

本文所研究的径流系数参数集还有很大的优化空间。后续可以从以下几个方面考虑：一是收集全省地面蒸发站实测的蒸发数据替代潜在蒸散发，进一步提高精度；二是开展月尺度，甚至是场次暴雨尺度的径流系数区域化研究，拓展应用场景，为海绵城市设计和洪涝应急管理提供技术支撑；三是引入更加灵活的非线性建模方法，比如广义加性模型(GAM)或神经网络，以更好地捕捉径流系数与影响因子之间的非线性响应关系。

基金项目

湖北省水文水资源中心重点科技项目资助(项目编号：HBSWKY202502)。

参考文献

[1] 陈喜, 程勤波, 石朋, 等. 无资料流域水文预测(PUB)研究进展及展望[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 571-580.

[2] 刘昌明, 曾燕, 邱新法. 中国径流系数的区域分异规律及影响因素[J]. 地理学报, 2008, 63(11): 1121-1130.

[3] 杨文凯. 浅谈无正常年径流量资料的几种实用计算方法及实例[J]. 中国水运, 2008, 8(5): 154-155.

[4] 柴晓玲, 郭生练, 周芬, 等. 无资料地区径流分析计算方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2005(5): 20-22, 26.

[5] 杜明格, 刘国东. 无资料地区径流量计算方法的探讨[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2007, 26(4): 138-141.

[6] 陆智. 资料稀缺地区地表年径流量计算方法研究——以若羌河流域为例[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2008.

[7] 曾妍妍, 贾瑞亮, 周金龙. 我国无资料地区地表径流计算技术发展与展望[J]. 地下水, 2014, 36(6): 181-183.

[8] 黄介生, 彭紫婷, 伍靖伟, 等. 变化环境下长江中游径流系数演变及驱动因素[J]. 水科学进展, 2022, 33(6): 875-886.

[9] 1-km Monthly Mean Temperature Dataset for China (1901-2025). https://cstr.cn/18406.11.Meteoro.tpdc.270961

[10] HARGREAVES, G. H., SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2): 96-99. https://doi.org/10.13031/2013.26773

[11] 湖北省水利厅. 湖北省水资源公报(2001-2023) [R]. 武汉: 湖北省水利厅, 2002-2024.

[12] FISCHER, G., NACHTERGAELE, F., PRIELER, S., VAN VELTHUIZEN, H. T., VERELST, L. and WIBERG, D. (2008) Global Agroecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008). IIASA and FAO.

[13] 徐新良. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC) [EB/OL]. https://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=201, 2026-09-09.

[14] 徐新良. 中国每 16 天 NDVI、EVI250m 数据集[EB/OL]. https://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=161, 2026-09-09.