

DOI: 10.20103/j.stxb.202401300273

尹思危, 王跃峰, 周琨鸿, 刘帆, 雷超桂. 三峡库区小流域景观格局变化洪枯径流效应及归因分析. 生态学报, 2024, 44(18): 7962-7976.

Yin S W, Wang Y F, Zhou K H, Liu F, Lei C G. Runoff extreme responses to watershed landscape pattern changes and their attribution analysis in the Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 7962-7976.

# 三峡库区小流域景观格局变化洪枯径流效应及归因分析

尹思危<sup>1</sup>, 王跃峰<sup>1,2,\*</sup>, 周琨鸿<sup>1</sup>, 刘帆<sup>1</sup>, 雷超桂<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331

<sup>2</sup> 三峡库区地表过程与生态修复重庆市重点实验室, 重庆 401331

**摘要:**厘清景观格局变化与洪枯径流的关系,对流域生态建设和水资源调控的协同推进具有重要支撑作用。以我国生态脆弱的三峡库区东里河流域为例,综合运用 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型、景观格局指数和随机森林等方法,从全流域和子流域角度分析了景观格局变化的洪枯径流效应,从景观组成和景观空间配置等多因素角度揭示了洪枯径流驱动机制。结果表明:(1)2000—2020 年,全流域优势景观为林地和耕地,面积分别增加了 3.76% 和 1.82%,景观聚集度上升,景观多样性和复杂程度下降;子流域优势景观与全流域基本一致,但斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)和蔓延度指数(CONTAG)变化更为剧烈。(2)相比 2000 年,2020 年景观格局下全流域洪枯径流以下降为主,最大 1d 径流(Max1d)下降了 4.44%,枯水径流降幅均超 40%。典型子流域的洪水径流变幅均高于全流域,而枯水径流变幅与全流域相当。(3)2000—2020 年,景观格局对洪枯径流的调节能力减弱,其中景观组成的贡献率下降了 0.84%—7.39%,景观空间配置的贡献率下降了 1.63%—3.89%,这主要是因流域林草景观组合衰退,以及景观呈聚合发展所致。研究结果可加深对流域景观格局演变和生态水文过程的理解,亦可为流域生态建设和生态修复提供科学依据。

**关键词:**景观格局;水文效应;SWAT 模型;归因分析

## Runoff extreme responses to watershed landscape pattern changes and their attribution analysis in the Three Gorges Reservoir Area

YIN Siwei<sup>1</sup>, WANG Yuefeng<sup>1,2,\*</sup>, ZHOU Kunhong<sup>1</sup>, LIU Fan<sup>1</sup>, LEI Chaogui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

<sup>2</sup> Chongqing Key Laboratory of Earth and Surface Processes and Ecological Restoration in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China

**Abstract:** It is important to identify the relationship between runoff extremes and landscape pattern because it benefits for collaborative promotion between ecological construction and water resources regulation within a basin. As one of the most important ecologically fragile area in China, the Three Gorges Reservoir Area experienced ecological construction during the last twenty years. In this study, the Dongli River Basin, within northeastern part of the Three Gorges Reservoir Area, was taken as an example. Several methods, including the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model, landscape pattern index, Pearson correlation analysis and Random Forest, were used to analyze runoff extremes response to landscape pattern changes. And then, runoff extremes of driving mechanism were investigated from the perspective of the whole basin and typical subbasin. The results showed as following: (1) Within the whole basin, forest and cropland were the dominant landscapes, area of which increased by 3.76% and 1.82% from 2000 to 2020, respectively. Its landscape became

**基金项目:**国家自然科学基金(42201045);重庆市社会科学规划项目(2020QNGL26);重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX0692)

**收稿日期:**2024-01-30; **网络出版日期:**2024-07-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuefeng\_wang@cqnu.edu.cn

aggregative while landscape diversity and uniformity declined. The dominant landscapes within the subbasin were similar to that within the whole basin. Changes in patch density (PD), largest patch index (LPI) and contagion index (CONTAG) were more dramatic than those of the whole basin from 2000 to 2020. (2) Four indices, including the maximum 1 day (Max1d) runoff, the maximum 7 day (Max 7d) runoff, the minimum 1 day (Min1d) runoff, and the minimum 7 day (Min7d) runoff, were selected as runoff extremes. Within the whole basin, runoff extremes mainly showed decreasing tendency under the landscape pattern changes from 2000 to 2020. Among them, Max1d decreased by 4.44% while Min1d runoff and Min7d declined more than 40%. Due to landscape changes from 2000 to 2020, the changes of Max1d and Max7d within the typical subbasin were higher than these within the whole basin. The changes of Min1d and Min7d within the typical subbasin were similar to these within the whole basin. Runoff extremes within the typical subbasin are higher than these within the whole basin. (3) The regulation ability of landscape pattern on runoff extremes became weak from 2000 to 2020. Due to degradation in forest-grass landscape combination and aggregation in landscape spatial configuration, contribution rate from landscape composition decreased by 0.84%—7.39% and contribution rate from landscape configuration decreased by 1.63%—3.89%. The results can deepen the understanding of the hydrological process to landscape pattern, which can provide scientific basis for the ecological construction and restoration for the Three Gorges Reservoir Area.

**Key Words:** landscape pattern; hydrological response; SWAT model; attribution analysis

景观格局是大小、形状、属性不一的景观单元在空间上的分布与组合<sup>[1]</sup>,它不仅代表了流域下垫面特性,也反映了流域生态建设水平<sup>[2]</sup>。近些年,受人类活动影响,全球很多流域景观格局变化明显,尤其是生态脆弱地区,不仅表现出景观组成(如林地、耕地等)面积的多寡,还表现出景观空间配置演变,如景观破碎化加剧、景观多样性降低等<sup>[3]</sup>。景观格局的演变会改变流域下垫面特性,影响截留、下渗、产流等环节,进而影响水循环过程。作为流域最重要的水文变量,洪水和枯水径流也对景观格局变化表现出较强的敏感性<sup>[4-6]</sup>,这直接关乎流域“消峰补枯”和水源涵养能力的强弱,甚至引发生态环境恶化等问题<sup>[7-8]</sup>。为此,对广大生态脆弱地区而言,亟需厘清景观格局变化对流域洪枯径流的关系,这对推进生态建设有重要现实意义。

围绕流域景观格局变化的径流效应,国内外学者开展了众多卓有成效的工作。从研究内容来看,主要从景观组成和景观空间配置两个方面开展<sup>[9-11]</sup>。其中,不同景观组成的面积增减对流域径流影响程度存在差异<sup>[12-13]</sup>,如林地、草地等用地类型可促进流域水源涵养,而建设用地等会增加产流量<sup>[14]</sup>。与此同时,流域景观空间配置变化,也可通过斑块的形状、破碎化程度和镶嵌关系等改变产汇流过程<sup>[15-16]</sup>。刘芳等<sup>[17]</sup>研究发现景观斑块形状复杂化有利于流域径流形成;Gao 等<sup>[18]</sup>发现当林地斑块适当分散,其具有的较深根系可增强截留作用。从研究方法来看,学者们多采用相关分析、主成分分析、线性回归等方法,探讨景观格局变化对流域径流的驱动机制<sup>[19-23]</sup>。此外,现有研究多集中对年、月径流分析<sup>[24-26]</sup>,较少涉及径流极值,且多为单因素驱动分析。如林炳青等<sup>[3]</sup>通过单一景观格局指数与洪枯径流的相关分析,探讨了景观格局变化的径流驱动机制。实际上,流域径流不仅受到景观格局变化的影响,还受降水、蒸发、地形方面的作用,驱动因素复杂且综合,从单因素角度难以阐释径流的驱动机制,应基于代表性指标从多因素角度系统揭示景观格局演变对洪枯径流的驱动机制。

三峡库区是长江上游生态屏障最后一道关口,独流入江的小流域众多,既是长江流域重要的淡水资源储备库,又是我国典型的生态脆弱区域,其景观格局变化和生态环境演化直接关乎下游水资源供给和水环境安全<sup>[27]</sup>。2000—2020 年,库区林地面积占比从 46%增加至 58.49%<sup>[28-29]</sup>,林地面积增加的同时,其景观组成和景观空间配置也发生变化<sup>[30]</sup>,但引发的流域洪枯径流效应尚缺乏有效评估。此外,三峡库区可持续发展始终以生态优先为根基,未来库区的生态建设应该遵循何种思路,以及长远规划和设计尚缺乏科学依据。本文将东里河流域作为研究对象,其位于库区东北部,紧邻三峡大坝,地形起伏度大,景观格局变化明显,属于生态高

度敏感区<sup>[31]</sup>,在该流域开展相关研究亦可为库区其他流域的生态建设工作提供参考和借鉴。

## 1 研究区概况

东里河流域位于三峡库区东北部,为澎溪河的一级支流,属川东平行岭谷和大巴山脉交错地带,地形东北高西南低,地形起伏大,相对高差达 2419m。流域属亚热带季风气候,降水丰沛,年均降水量约 1200mm,5—10 月为汛期,11 月至次年 4 月为非汛期,干流全长 96.13km,面积 1512.88km<sup>2</sup>,水文控制站为温泉站(图 1)。东里河流域景观组成以耕地、林地为主,受三峡工程运行、城市化等人类活动影响,其生态结构稳定性弱<sup>[32]</sup>。

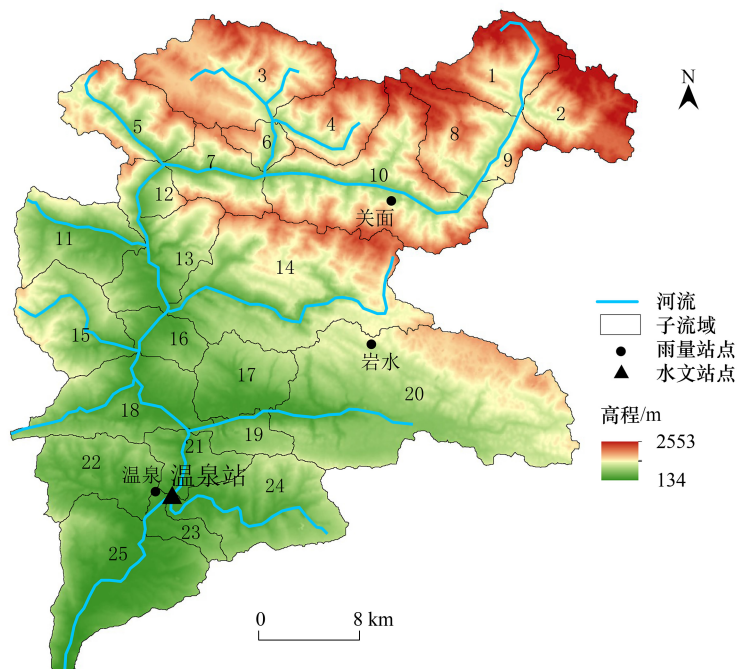


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源

数据主要包括流域数字高程模型(DEM)、土壤类型、土地利用类型和水文气象等,数据来源及其分辨率见表 1。其中,DEM 采用 SRTM 数据,用于提取流域地形和边界;土壤数据源自 1:100 万 HWSO 土壤数据库,通过 SPAW 软件(Soil Plant Atmosphere Water)获得土壤水文属性;流域三期(2000、2010 和 2020 年)土地利用数据源于中国科学院资源环境科学与数据中心,并辅以 Google 影像和野外实地调查,经重分类分为耕地、林地、草地、水域和建设用地 5 种类型,分辨率均为 30m;水文气象数据来源于水文统计年鉴长江流域水文资料(第三册第 6 卷),包括 2003—2020 年温泉站逐日径流,开县站逐日气象资料,以及关面、岩水和温泉雨量站逐日降水

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 水文模拟方法

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是美国农业部研制,广泛用于模拟预测流域土地利用或景观格局变化对水量水质的影响<sup>[33—34]</sup>。利用该模型对研究区域进行降雨径流模拟,根据流域实际情况,设定最小集水面积阈值为 4000ha,共划分 25 个子流域,产流采用 SCS 径流曲线法,汇流采用马斯京根法。模型预热期

设为 1 年,运用 SWAT-CUP 软件中的 SUFI-2 算法对模型进行自动率定,每次迭代 500 次,经多次迭代,确定出主河道曼宁系数(CH\_N2)、SCS 径流曲线数(CN2)和主河道水力传导率(CH\_K2)等 7 个敏感参数(图 2),较大的  $t$  值和较小的  $P$  值代表参数对流域更大的敏感性。分别选取 2006—2010 年和 2016—2020 年的日径流对模型结果进行率定和验证,采用确定系数( $R^2$ )、纳什效率系数(NS)和偏差系数百分比(PBIAS)来衡量模型率定和验证精度。

表 1 东里河流域数据来源及时空分辨率

Table 1 Data source and its spatiotemporal resolution of Dongli River Basin

| 数据类型<br>Data types             | 数据规格<br>Data description | 数据来源<br>Data sources                                            |
|--------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 数字高程模型 Digital elevation model | 30m 分辨率                  | <a href="https://www.gscloud.cn/">https://www.gscloud.cn/</a>   |
| 土壤类型 Soil types                | 1:100 万                  | <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> |
| 土地利用 Land use                  | 30m 分辨率                  | <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a>       |
| 气象数据 Meteorological data       | 逐日                       | <a href="https://data.cma.cn/">https://data.cma.cn/</a>         |
| 降水数据 Precipitation data        | 逐日                       | 水文年鉴长江流域水文资料(第三册 第 6 卷)                                         |
| 径流数据 Runoff data               | 逐日                       | 水文年鉴长江流域水文资料(第三册 第 6 卷)                                         |

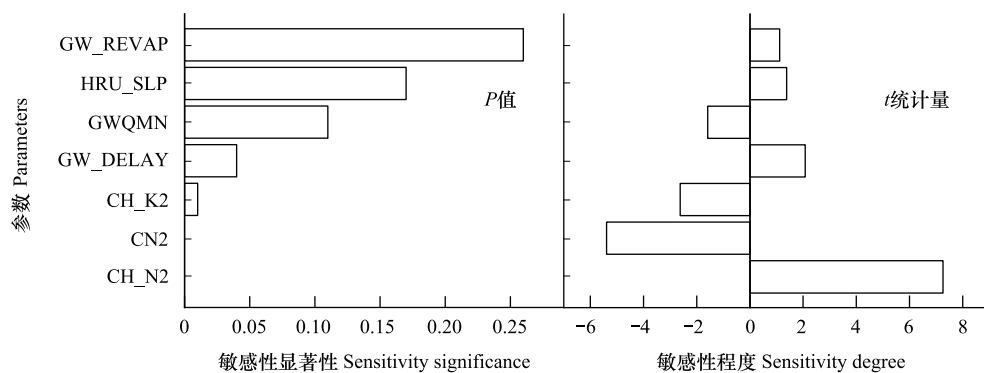


图 2 东里河流域日尺度径流模拟参数敏感性

Fig.2 Parameter sensitivity analysis of daily runoff simulation in the Dongli River Basin

CH\_N2:主河道曼宁系数;CN2:SCS 径流曲线数;CH\_K2:主河道水力传导率;GW\_DELAY:地下水滞后系数;GWQMN:浅层地下水径流系数;HRU\_SLP:平均坡度;GW\_REVAP:地下水再蒸发系数

一般认为, $R^2 > 0.60$ 、 $NS > 0.60$ 、 $|PBIAS| < 25\%$ ,模型模拟结果良好<sup>[35-36]</sup>。图 3 为流域日径流模拟值与实测值对比,二者水文过程线吻合度较高,率定期  $R^2$  和  $NS$  系数分别为 0.85 和 0.83,验证期  $R^2$  和  $NS$  系数分别为 0.83 和 0.81。表明构建的流域水文模型可用于后续模拟分析。利用建好的水文模型,基于 2000、2020 年两种景观格局,得到两情景下的逐日径流过程。从全、子流域进行统计,选取最大 1d 径流(Max1d)和最大 7d 径流(Max7d)作为流域洪水径流指数,选取最小 1d 径流(Min1d)和最小 7d 径流作为流域枯水径流指数。

### 2.2.2 景观格局指数

景观格局指数能够反映景观组成单元的类型、数目以及空间分布特征。本文从景观组成和景观空间配置两方面进行因子选取。其中,景观组成选取林地、耕地和草地的面积占比。景观空间配置因子可分为五类:斑块面积指数、形状指数、构型指数、多样性指数和邻近度指数五类<sup>[37]</sup>。参考已有文献<sup>[3,15]</sup>,并结合流域特点,选取如下 7 个指标:斑块面积指数上选取反映景观异质性的斑块密度(PD)和体现景观优势种的最大斑块指数(LPI),形状指数中选取表示景观形状复杂程度的景观形状指数(LSI),构型指数中选取反映景观聚集性的景观蔓延度指数(CONTAG)和聚合度指数(AI),多样性指数中选取 Shannon 多样性指数(SHDI)和 Shannon 均匀度指数(SHEI)。上述指数可通过 ArcGIS 和 Fragstats 4.2 软件运算得到。

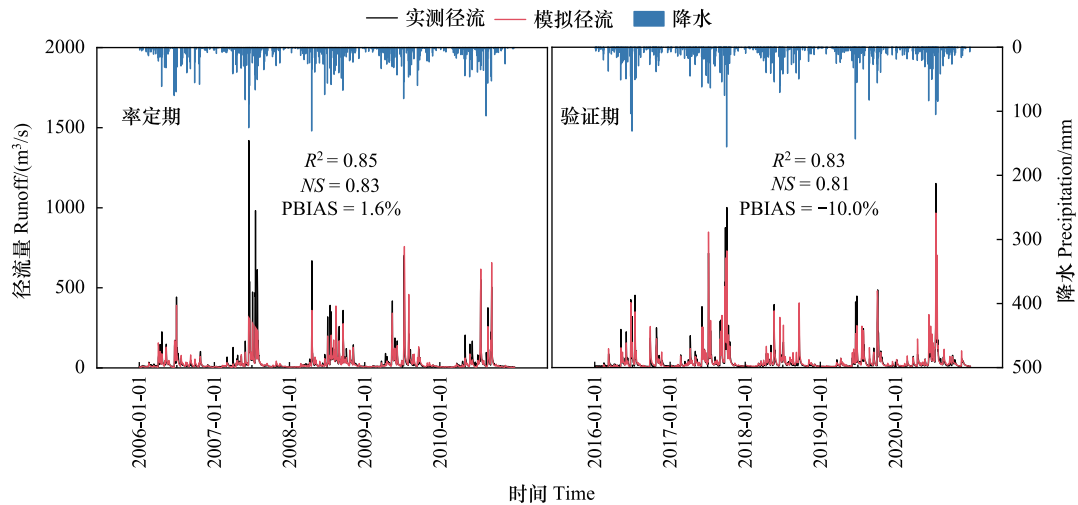


图 3 东里河流域(温泉站)日径流率定与验证对比

Fig.3 Observed and simulated runoff daily at Wenquan hydrological station within Dongli River Basin

2.2.3 驱动因素指标选取

考虑到径流影响因素复杂,除了景观格局相关指数外,还选取了地形、降水数据等参数,共 16 个指标作为洪枯径流的驱动因素(表 2)。为更好反映降水对洪枯径流影响,采用年最大 1d 降水和年最大 7d 降水分别作为 Max1d、Max7d 径流的影响因素,年均降水作为枯水径流的影响因素。驱动因素分析前,需进行因子多重共线性判别,否则会导致结果分析缺乏合理性<sup>[38]</sup>。步骤如下:(1)利用 Pearson 法计算因子间相关系数,提取出高相关性( $R>0.8$ )的因子组;(2)将提取出的因子组进行主成分分析,计算因子间的矢量角,当矢量角小于  $30^{\circ}$  时,判定因子间存在多重共线性。

表 2 影响因子类型及描述

Table 2 Detailed descriptions of impact factors

| 类别<br>Category                    | 影响因子<br>Influence factor | 相关描述<br>Description  | 单位<br>Units                         |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| 景观组成<br>Landscape composition     | 耕地 (Cropland)            | 耕地面积比例               | %                                   |
|                                   | 林地 (Forest)              | 林地面积比例               | %                                   |
|                                   | 草地 (Grassland)           | 草地面积比例               | %                                   |
| 景观空间配置<br>Landscape configuration | 斑块面积指数                   | 斑块密度 (PD)            | 某种斑块在景观中的密度<br>#/100hm <sup>2</sup> |
|                                   |                          | 最大斑块指数 (LPI)         | 最大斑块所占景观面积的比例<br>%                  |
|                                   | 形状指数                     | 景观形状指数 (LSI)         | 描述流域景观形状的复杂性<br>/                   |
|                                   | 构型指数                     | 蔓延度指数 (CONTAG)       | 不同斑块类型的团聚程度<br>%                    |
|                                   |                          | 聚合度指数 (AI)           | 同类斑块的聚集程度<br>/                      |
|                                   | 多样性指数                    | Shannon 多样性指数 (SHDI) | 景观要素多少及所占比例变化<br>/                  |
|                                   |                          | Shannon 均匀度指数 (SHEI) | 不同景观要素分配均匀程度<br>/                   |
| 地形因素<br>Topographic factor        | 数字高程模型 (DEM)             | 地表高程数据               | m                                   |
|                                   | 坡度 (Slope)               | 流域平均坡度               | ( $^{\circ}$ )                      |
|                                   | 地面粗糙程度 (TRI)             | 表示流域地形异质性            | /                                   |
| 降水<br>Precipitation               | 年最大 1d 降水                | 流域年最大降水量             | mm                                  |
|                                   | 年最大 7d 降水                | 流域连续 7d 最大降水量        |                                     |
|                                   | 年均降水                     | 流域年平均降水量             |                                     |

PD: 斑块密度 Patch density; LPI: 最大斑块指数 Largest patch index; LSI: 景观形状指数 Landscape shape index; CONTAG: 蔓延度指数 Contagion index; AI: 聚合度指数 Aggregation index; SHDI: Shannon 多样性指数 Shannon's diversity index; SHEI: Shannon 均匀度指数 Shannon's evenness index; DEM: 数字高程模型 Digital elevation model; TRI: 地面粗糙程度 Terrain ruggedness index

如图 4 所示,将各因素分为景观组成、景观空间配置、地形因素和气象因素四类,分别进行多重共线性分析。分析发现,相关性系数大于 0.8,且主成分分析因素间夹角小于  $30^\circ$  的有两组:平均坡度(Slope)和地面粗糙程度(TRI)、SHDI 和 SHEI。综合对比各因子重要性后,将 TRI 和 SHDI 剔除。

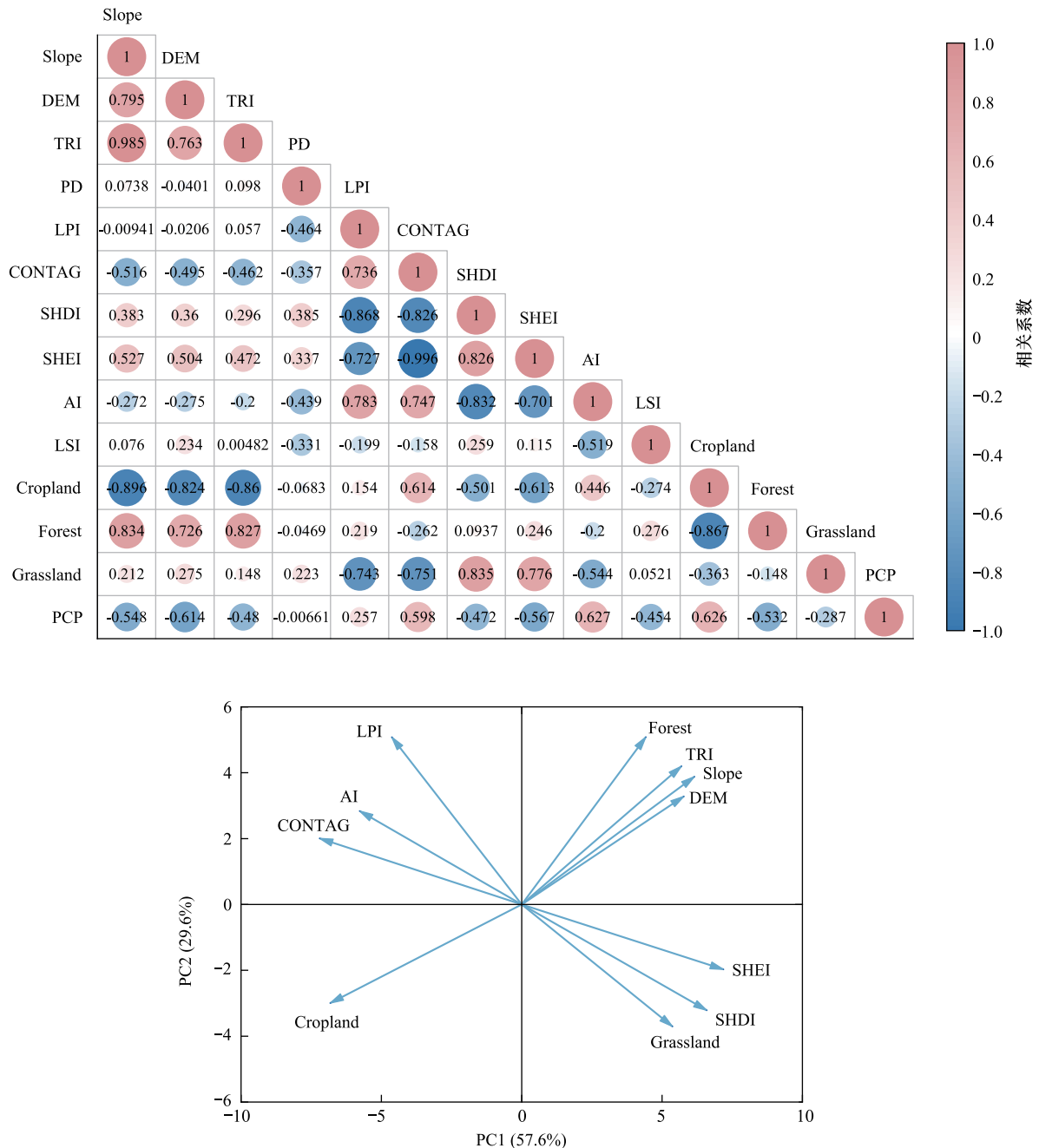


图 4 因素多重共线性分析

Fig.4 Analysis for multicollinearity between factors

Slope: 平均坡度; DEM: 数字高程模型; TRI: 地面粗糙程度; PD: 斑块密度; LPI: 最大斑块指数; CONTAG: 蔓延度指数; SHDI: Shannon 多样性指数; SHEI: Shannon 均匀度指数; AI: 聚合度指数; LSI: 景观形状指数; Cropland: 耕地; Forest: 林地; Grassland: 草地; PCP: 平均降水

## 2.2.4 随机森林模型

随机森林(Random Forest)模型是 2001 年由 Breiman 提出的一种机器学习算法,该模型利用 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,综合相关结果得出最终预

测<sup>[39-40]</sup>。本文采用 R 语言平台进行随机森林分析,图 5 为计算示意图:(1)基于选取的洪枯径流变化的驱动要素(表 2),利用 Bootstrap 方法分别选取  $k$  个子训练集,预产生  $k$  个分支;(2)在分类树的每个节点上选择最优的分割指标进行分割;(3)重复步骤(2),直到生成随机森林;(4)得到各因素重要性;(5)统计各驱动要素的贡献率。并利用随机森林本身优势,处理复杂现象的响应变量。

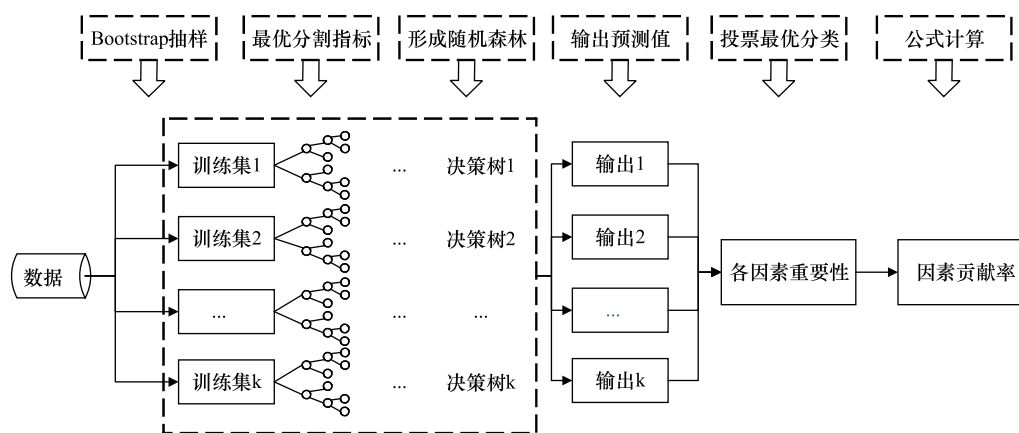


图 5 随机森林计算流程图

Fig.5 The route of Random Forest

在计算过程中,采用增量平均平方误差 (IncMSE) 作为判断因素重要性的指标,并通过归一化处理,将所有因子重要性的总和转换为 100%,获得各因素的相对重要性,以此反应其影响程度。计算公式如下:

$$\text{VIM}_k = \text{VIM}_k^{(\text{Gini})} / \sum_{k=1}^m \text{VIM}_k^{(\text{Gini})}$$

式中,  $\text{VIM}_k$  为因素对流域洪枯径流的贡献率;  $\text{VIM}_k^{(\text{Gini})}$  为因子重要性; 所有因素的  $\text{VIM}_k$  之和为 1。

### 3 结果与分析

#### 3.1 流域景观格局变化分析

##### 3.1.1 全流域景观格局变化

在景观组成上,图 6 为东里河流域 2000—2020 年景观组成面积变化的桑基图,可知近 20 年流域的优势景观为耕地、林地和草地,总占比均超 99.34%。2000—2020 年,流域林地和耕地均表现为增加,分别增加了 3.76% 和 1.82%,草地为连续减少,降幅为 5.89%;城镇和水域景观组成占比虽少,但也表现为持续增加趋势,分别增加了 0.17% 和 0.13%。根据其转移矩阵来说,草地变化最为显著,分别有 36.60% 和 13.32% 的草地转化为耕地和林地;此外,有 6.13% 和 5.05% 的耕地分别转为林地和草地,2.91% 和 0.60% 的林地分别转为耕地和草地。

在景观空间配置上,利用 Fragstats 4.2 软件统计了东里河流域 2000—2020 年景观空间配置指数(表 3)。PD 在研究期间为减少趋势,表明流域景观破碎化程度降低,景观空间异质性降低,景观趋于聚集;而 LPI 增加了 16.60%,说明近 20 年来流域受到人类活动的干扰明显,从体现景观形状复杂程度的 LSI 来看,指数先下降后小幅度增加,说明流域景观不断趋于规整,形状复杂化降低;此外,CONTAG 和 AI 能够表征流域斑块间的聚集程度。不同斑块来看,CONTAG 在 2000—2020 年间持续增加,反映出研究区内景观斑块趋向聚集发展;而表示相同斑块聚集程度的 AI 呈上升趋势,表明同类斑块呈聚合趋势,大面积斑块增多;SHEI 为下降趋势,表明流域内景观斑块非均衡化发展,破碎化程度降低,但研究区内各景观面积差异逐渐增大,优势景观组成更为突出。综合来看,东里河流域近二十年倡导的“退耕还林”生态恢复效果不佳,这主要是因为紧张人地矛盾牵制下,通过损失草地面积来增加林地,也使得林草景观组合生态效益下降。同时,受土地经营集约化和规模化的影响<sup>[41]</sup>,流域景观空间配置由碎片化模式转为集中连片分布。

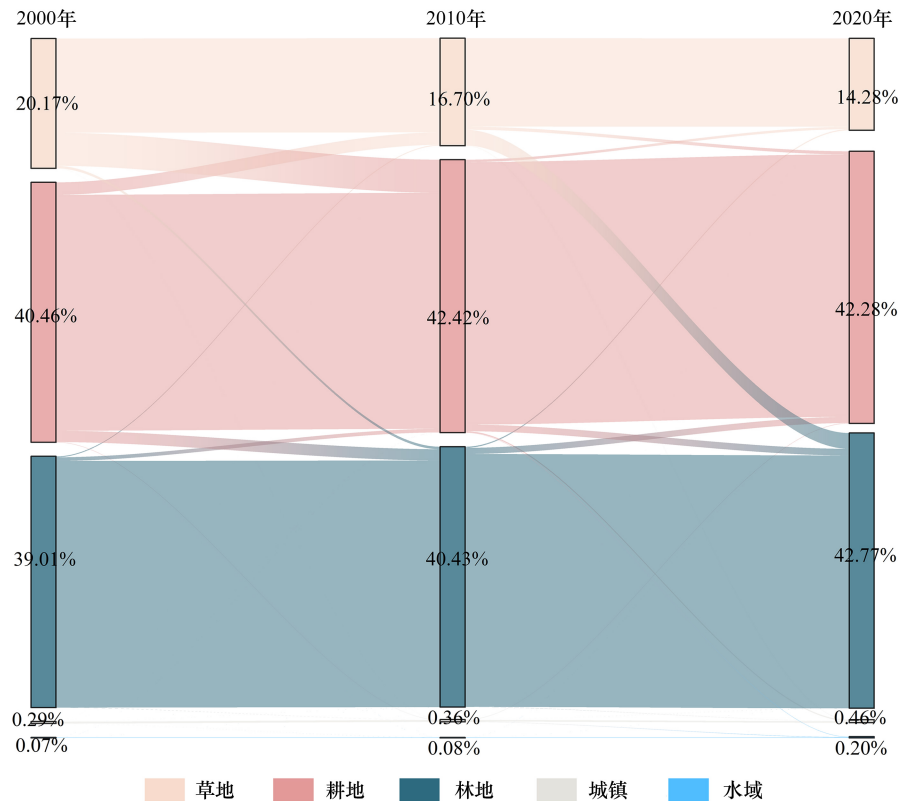


图6 东里河流域2000—2020年景观组成转移桑基图

Fig.6 Transferred area of landscape composition within Dongli River Basin from 2000 to 2020

表3 东里河流域2000—2020年景观空间配置指数变化

Table 3 Changes of landscape configuration index in Dongli River Basin from 2000 to 2020

| 景观指数<br>landscape index                           | 斑块密度<br>PD | 最大斑块指数<br>LPI | 景观形状指数<br>LSI | 蔓延度指数<br>CONTAG | 聚合度指数<br>AI | Shannon 均匀度指数<br>SHEI |
|---------------------------------------------------|------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|-----------------------|
| 2000                                              | 0.68       | 31.30         | 58.14         | 55.96           | 91.33       | 0.67                  |
| 2010                                              | 0.60       | 33.08         | 50.76         | 57.59           | 92.47       | 0.66                  |
| 2020                                              | 0.61       | 36.50         | 51.86         | 57.85           | 92.31       | 0.65                  |
| 2000—2020 年变化率/%<br>Change rate from 2000 to 2020 | -10.20     | 16.60         | -10.79        | 3.37            | 1.06        | -3.36                 |

### 3.1.2 子流域尺度景观格局变化

利用 SWAT 模型将东里河流域划分为 25 个子流域(图 1)。景观组成上与全流域变化大致相似,表现为耕地和林地的增加以及草地的减少。耕地面积增加的子流域多位于流域下游,增幅最高达 77.29%;林地面积整体表现为增加,增幅在 0.22%—51.05%之间;位于下游子流域的草地面积减少更明显,减幅最高达 98.95%。

从景观空间配置上看,图 7 显示了东里河流域子流域的景观指数,变化较剧烈的指数分别为 PD、LPI 和 CONTAG,且各子流域景观指数变化范围较大。PD 变化范围为-50.77%—10.87%;LPI 变化范围为-0.86%—240.58%;CONTAG 变化范围为-9.78%—77.94%。其中,景观空间配置变化最显著的分别为流域的子流域 22、23、24、25,变化幅度均超过 26.80%,最大可达 240.58%。这些子流域中,空间异质性降低,斑块间连通性增加,景观呈现聚集发展趋势;总体来看,子流域的景观指数变化较全流域存在显著差异。其中,流域变化较剧烈的景观指数 PD、LPI 和 CONTAG,分别有 44%、32%和 60%的子流域大于全流域变化幅度;其余景观指数也分别有 24%(LPI、AI)和 56%(SHEI)的子流域相比于全流域变化幅度更大。综合来看,子流域景观格局变

化更为剧烈,特别是流域下游和地势低平的河谷区,这些子流域多呈现林地变化不大,但大量草地转为耕地,景观聚集度更凸显,主要是因为这些子流域的人口密度大且农业活动频繁所致。

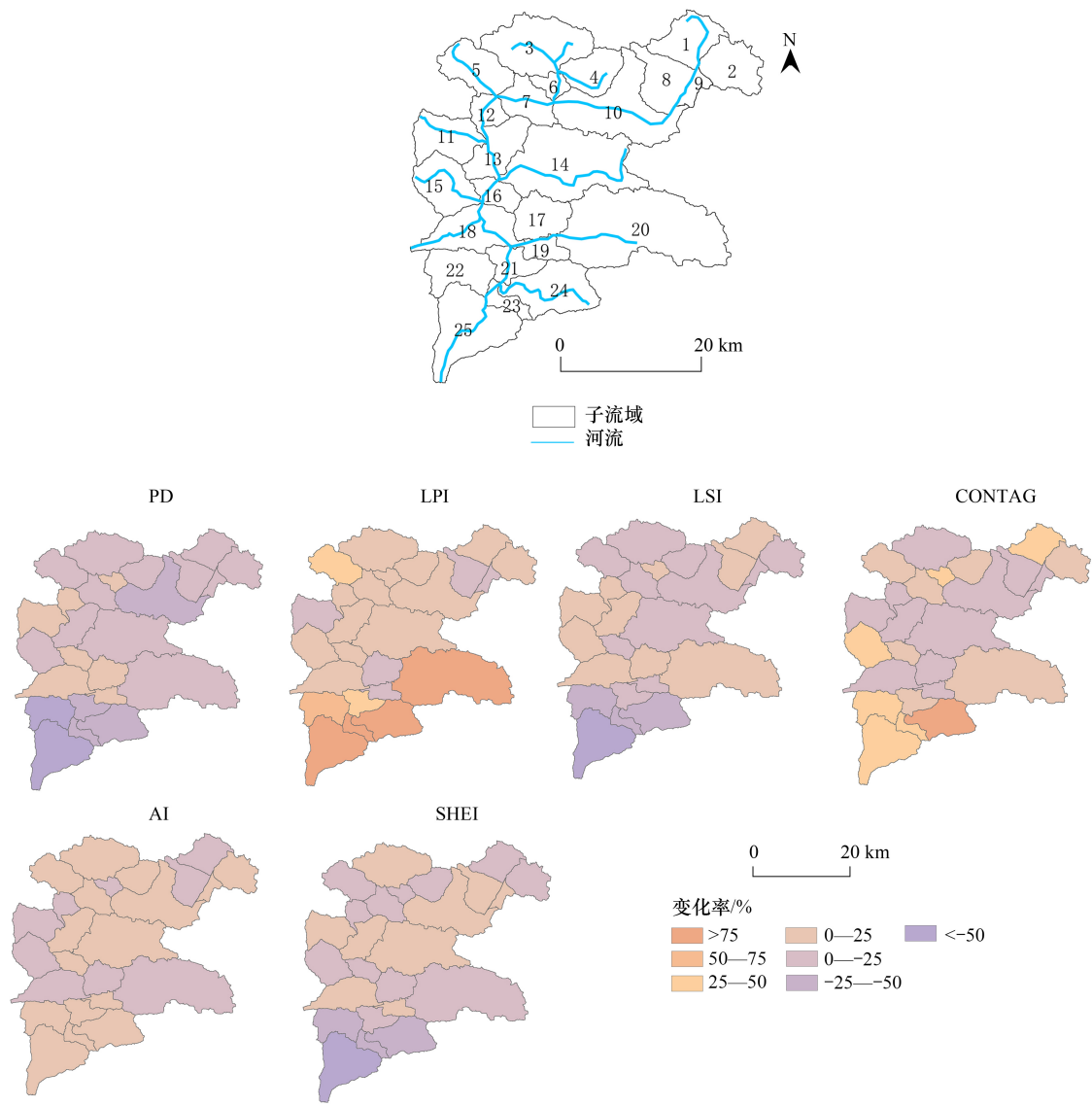


图7 东里河流域 2000—2020 年子流域景观空间配置变化

Fig.7 Changes of landscape configuration in subbasins within Dongli River Basin from 2000 to 2020

### 3.2 流域不同空间尺度景观格局变化的洪枯径流效应

#### 3.2.1 全流域

基于 2003—2020 年的气象数据建立了 SWAT 水文模型,分别模拟了 2000 和 2020 年景观格局下日径流过程,从中提取出 Max1d、Max7d、Min1d 和 Min7d 四个洪枯径流指数。图 8 为全流域的洪枯径流指数变化率。对比来看,2000—2020 年的景观格局变化引起全流域 Max1d 主要呈现下降趋势,年均变化达 -4.44%,而 Max7d 在多数年份呈上升趋势,年均增幅为 2.82%。这表明相较于 2000 年,2020 年的流域景观格局对短历时暴雨和洪峰的拦蓄作用有所加强,但对长历时洪水的拦蓄能力有所下降。

就枯水径流而言,2020 年的景观格局下流域枯水期径流下降幅度较大,最大下降幅度达到 73.85%。Min1d 的下降速度普遍高于 Min7d,平均下降幅度分别为 45.87%和 41.74%。流域景观指数的变化,带来水源涵养能力降低,这可能与流域耕地增加和草地减少,以及林地破碎化有关。枯水的减少不利于流域生态环境的发展。

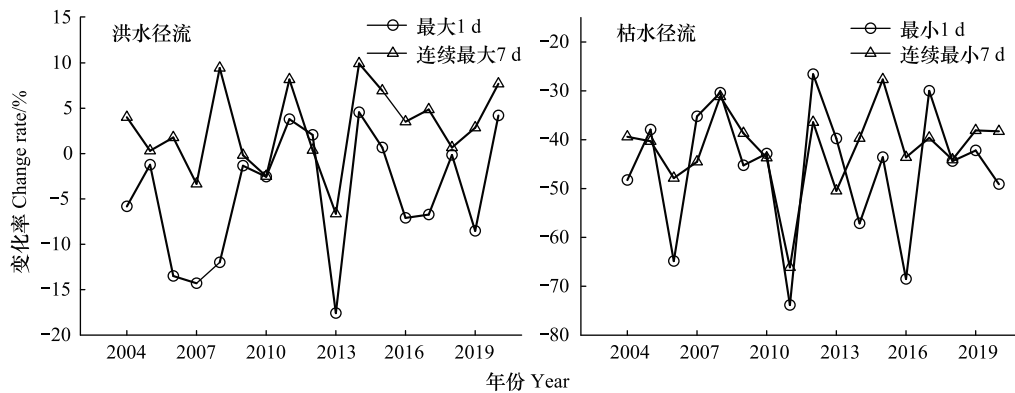


图 8 全流域 2000 和 2020 年景观格局下的洪枯径流变化率

Fig.8 Change rate in runoff extremes under landscape pattern of the whole basin from 2000 to 2020

### 3.2.2 典型子流域

全流域景观格局演变下的径流变化是多个子流域水文效应的集合,2000—2020 年东里河流域 25 个子流域的景观格局变化差异较大(图 7)。其中,子流域 24 的景观格局变化较显著,其景观组成中耕地和草地变化最大,耕地增加了 34.13%,草地减少了 86.59%。景观空间配置变化也十分突出,LPI 变化率达 240.58%,CONTAG 上升 77.94%,PD 变化率为-35.31%,因此,24 号子流域景观格局变化程度明显高于全流域,遂选用其作为典型子流域。

由图 9 可知,2000—2020 年子流域 24 径流变化与全流域大致相当,在 2020 年景观格局影响下,Max1d 呈减小趋势,Max7d 呈上升趋势,枯水径流均为下降趋势。但从其变化平均值来看,对比全流域,该子流域 Max1d 下降均值(-3.58%)小于全流域,而 Max7d 上升率较高(5.16%);Min1d 和 Min7d 平均变化率分别为-46.37%、-41.67%,枯水径流与全流域变化大致相当,但 Min1d 下降更明显。可以看出,景观格局变化加大,受人类活动干扰明显,对洪枯径流的影响更明显。各子流域景观格局的异质性对流域径流变化产生不同程度的影响。

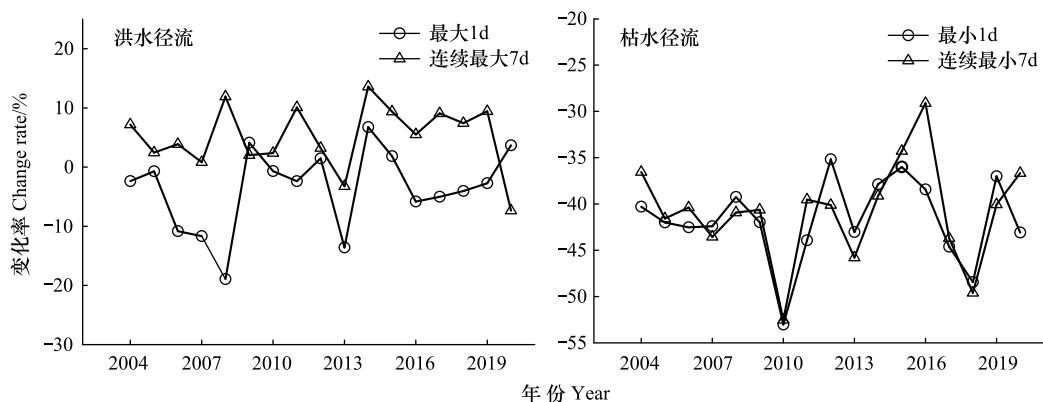


图 9 24 子流域 2000 和 2020 年景观格局下的洪枯径流变化率

Fig.9 Change rate in runoff extremes under landscape pattern of the No.24 subbasin from 2000 to 2020

## 3.3 流域洪枯径流的驱动因素分析

### 3.3.1 单因素相关分析

采用 Pearson 相关分析法统计了东里河流域景观格局变化与洪枯径流变化的相关系数(表 4)。景观组成方面,枯水径流与林地、草地均呈正相关,而与耕地呈负相关,其中与耕地、草地为显著相关( $P < 0.01$ );洪水径流中仅 Max7d 与草地、耕地为显著相关( $P < 0.01$ ),但与林地相关性不高。景观空间配置方面,枯水径流与

PD、LSI 为显著正相关 ( $P<0.05$ ), 而与 LPI 和 AI 呈显著负相关 ( $P<0.05$ ); 洪水径流中, Max7d 与 PD、LPI、LSI 和 AI 均呈显著相关 ( $P<0.05$ ), 但 Max1d 与各景观指数相关性均不显著。总体来看, Max7d 和枯水径流对流域景观格局变化更为敏感。

表 4 东里河流域景观格局变化与洪枯径流变化的相关性

Table 4 Correlation coefficients between landscape changes and runoff extremes changes in Dongli River Basin

| 驱动因素<br>Driving factor | 洪水径流 High flow |           | 枯水径流 Low flow |           |
|------------------------|----------------|-----------|---------------|-----------|
|                        | Max1d          | Max7d     | Min1d         | Min7d     |
| 耕地 Cropland            | -0.281         | 0.587 **  | -0.581 **     | -0.575 ** |
| 林地 Forest              | -0.085         | -0.195    | 0.121         | 0.122     |
| 草地 Grassland           | 0.339          | -0.560 ** | 0.580 **      | 0.573 **  |
| 斑块密度 PD                | 0.273          | -0.473 *  | 0.472 *       | 0.471 *   |
| 最大斑块指数 LPI             | -0.232         | 0.453 *   | -0.456 *      | -0.450 *  |
| 景观形状指数 LSI             | 0.136          | -0.540 ** | 0.473 *       | 0.465 *   |
| 蔓延度指数 CONTAG           | -0.042         | 0.267     | -0.256        | -0.253    |
| 聚合度指数 AI               | -0.234         | 0.587 **  | -0.546 **     | -0.540 ** |
| Shannon 均匀度指数 SHEI     | 0.021          | -0.219    | 0.213         | 0.210     |

\* 表示 0.01 显著水平, \* 表示 0.05 显著水平

3.3.2 多因素影响分析

为了进一步揭示流域洪枯径流形成的驱动因素及其贡献程度,在单因素基础上,将流域降水和地形因素也考虑进来(表 2),计算各因素之间的多重共线性后,利用随机森林模型,得到了 2000 年和 2020 年流域洪枯径流的影响因素贡献率(图 10)。从两期结果来看,降水和地形因素是流域洪枯径流形成的主控因子,降水直接关乎径流大小,流域地形起伏加速了汇水速率,2000—2020 年降水和地形对径流贡献率分别变化了 0.08%—4.79%、-3.58%—0.40%。与此同时,2000—2020 年景观格局变化,造成其对洪枯径流的贡献率从 42.83%—51.27% 变为 44.92%—47.72%。景观组成方面,各指数对洪枯径流的贡献率变化了 -7.39%—2.00%。具体来看,2000—2020 年,流域林地面积增加,其对洪枯径流指数(Max1d、Max7d、Min1d、Min7d)的贡献率分别增加了 5.43%、0.21%、2.01% 和 3.89%;除 Max1d 径流以外,耕地面积下降导致其对洪枯径流的贡献率有所减少,而草地面积变化使得其仅对枯水径流有轻微影响。景观空间配置方面,2000—2020 年各指数对洪枯径流的贡献率变化了 -3.89%—2.18%,其中,CONTAG、LSI、SHEI 和 PD 的贡献占比较高,LSI 的贡献率分别增加了 2.49%、3.77%、6.29% 和 3.88%,CONTAG 和 SHEI 的贡献率以下降为主,最大降幅分别为 4.23% 和 3.13%,PD 在 2020 年对径流贡献率下降为 0。其余景观空间配置指数的贡献率较小,且前后变化不明显。

4 讨论

4.1 景观格局变化对流域洪枯径流的驱动机制

流域景观格局变化影响洪枯径流表现在景观组成和景观空间配置两方面<sup>[3]</sup>。景观组成多通过土地利用的时空变化来影响流域径流形成,如林草地的增加会提升流域水源涵养能力,耕地增加则会加剧农业灌溉用水<sup>[15,42]</sup>。2000—2020 年东里河流域景观组成以林地、耕地增加和草地减少为主,一定程度减缓了洪水径流,但两个枯水径流降幅均超过 40%,这主要是因为耕地增加和草地减少导致,前者加剧了农业用水,后者降低了林下水源涵养能力。由此可见,保持适当的林草景观组合是维持流域生态水源涵养的重要前提<sup>[43—44]</sup>。与此同时,斑块面积、景观破碎化程度等景观空间配置特征也会引起流域洪枯径流变化<sup>[9,26]</sup>,东里河流域斑块密度(PD)下降且最大斑块指数(LPI)增大,流域斑块破碎化降低,景观呈聚合发展,对地表径流过程起到抑制作用,这与刘芳等<sup>[17]</sup>的研究结论也相一致。

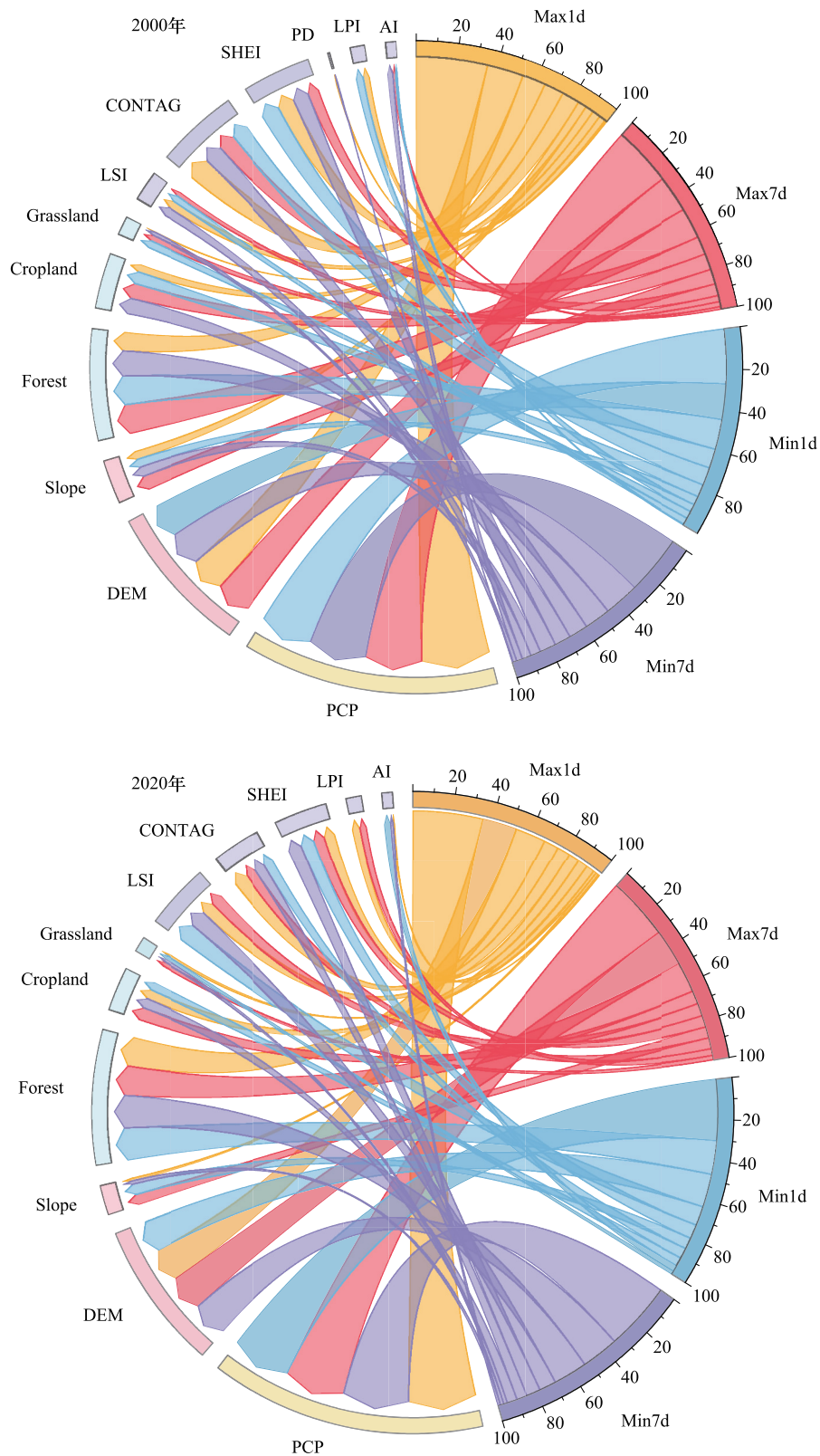


图 10 各因素对洪枯径流的贡献率

Fig.10 Contribution rate from driving factor to runoff extremes

PCP:平均降水;Slope:平均坡度;DEM:数字高程模型;Forest:林地;Cropland:耕地;Grassland:草地;LSI:景观形状指数;CONTAG:蔓延度指数;SHEI:Shannon 均匀度指数;PD:斑块密度;LPI:最大斑块指数;AI:聚合度指数;Max1d:最大 1d 径流;Max7d:连续最大 7d 径流;Min1d:最小 1d 径流;Min7d:连续最小 7d 径流

此外,本文从景观组成和景观空间配置等多要素角度,探讨了流域洪枯径流的主控因素及其贡献率。2000—2020 年流域景观组成和景观空间配置对洪枯径流的贡献率均以下降为主,表明景观格局变化削弱了其自身调节洪枯径流的能力。这可能与长期不尽合理的生态建设有关,导致流域内林地景观连片发展,缺乏景观多样性,而适当分散的林地斑块,更有利于深根系发育和水分截留<sup>[18]</sup>。本文主要考虑了景观格局、降水、地形等驱动因素,但流域内的水土流失治理、农业管理措施等因素,也会对水文过程有一定影响<sup>[45]</sup>。而本研究主要从流域景观组成和景观空间配置宏观角度展开分析,尚未能考虑水土流失治理和农业管理等微观尺度的影响,今后将继续收集相关数据进一步进行研究。

#### 4.2 三峡库区流域生态建设的启示

三峡库区是长江上游生态屏障的特殊地理单元,1990 年以来,按照《长江中上游防护林体系建设工程总体规划》,分步骤多举措地开展生态保护与恢复工作。截至 2020 年,库区森林覆盖率达 58.49%,虽然整体生态环境效益得到较大改善,但仍存在空间差异<sup>[28,46]</sup>。2000—2020 年流域林地面积增加 3.76%,但洪枯径流效益并未明显提升,且枯水径流出现较大程度减少,流域生态水源涵养功能衰退;除了受耕地小幅增加影响外,更主要是因为流域景观斑块密度和形状指数等景观空间配置特征发生较大变化,景观多样性下降且同类景观趋于连片,使流域垂向水文连通性和水源涵养能力下降<sup>[20,24]</sup>,也导致景观格局对枯水径流的贡献率下降了 2.44%—3.56%。

目前,为保障生态效益和缓解人地矛盾,三峡库区东北部区县(奉节、开州、云阳、巫山等)通过大量种植经果林提高林地覆盖率,且多由山区细碎化土地经营转变为规模化发展<sup>[41]</sup>。库区地形特殊,景观格局呈现一定的地形梯度效应,一般在梯度较小的河谷区集中种植经果林,而景观连片分布会加剧耗水量,致使地表径流和地下水储量减少<sup>[16]</sup>。因此,在推进流域生态建设中,不仅要关注流域景观组成带来的水文效应,还要兼顾其景观空间配置的演化。未来一段时间,修复与保护依然是三峡库区生态发展的主要方向,地方政府在实施生态建设举措时,不能盲目追求数量上的林地覆盖率,要从景观格局优化的角度找到社会效益和生态效益之间的平衡点,保证经济发展的同时,实现三峡库区的生态可持续发展。

#### 5 结论

本文以三峡库区东里河流域为例,分析了 2000—2020 年景观格局变化及其洪枯径流效应,探讨流域洪枯径流变化的驱动机制,提出了有利于流域生态建设的对策建议。具体研究结论如下:

1) 2000—2020 年,全流域景观组成以林地、耕地和草地为主,林地景观和耕地景观面积分别增加了 3.76% 和 1.82%,草地景观减少了 5.89%;景观空间配置上,流域优势景观突出,景观聚集度上升,形状复杂化和破碎化程度降低。子流域优势景观与全流域基本一致,但景观空间配置变化更为剧烈,其中,PD、LPI 和 CONTAG 最为显著,分别有 44%、32% 和 60% 的子流域大于全流域变化幅度。

2) 在相同的气象条件下,与 2000 年景观格局相比,2020 年流域 Max1d 下降了 4.44%,Max7d 上升了 2.58%,Min1d 和 Min7d 分别减少了 45.87% 和 41.74%。典型子流域的洪枯径流变化更明显,在洪水径流上表现为 Max1d 的削弱作用(-3.58%)低于全流域,Max7d 上升幅度(5.16%)高于全流域,枯水径流中 Min1d 下降幅度(46.37%)更高。

3) 通过洪枯径流变化的驱动因素分析可知,2000—2020 年林草景观组合衰退、景观趋于规整且聚集化,是造成景观格局调节洪枯径流能力减弱的主要原因,其贡献率下降了 2.44%—3.56%。未来三峡库区实施生态建设,不仅要关注林地和草地景观的数量,还要其兼顾景观空间配置优化,从而实现三峡库区生态可持续发展。

#### 参考文献(References):

- [1] 邬建国. 景观生态学——概念与理论. 生态杂志, 2000, 19(1): 42-52.

- [ 2 ] 徐炫清, 陈裕婵, 李青圃, 张正栋. 五华河流域景观格局演变对径流泥沙的影响. 水土保持研究, 2018, 25(1): 231-236, 242.
- [ 3 ] 林炳青, 陈兴伟, 陈莹, 刘梅冰. 流域景观格局变化对洪枯径流影响的 SWAT 模型模拟分析. 生态学报, 2014, 34(7): 1772-1780.
- [ 4 ] Anache J A A, Flanagan D C, Srivastava A, Wendland E C. Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. *Science of the Total Environment*, 2018, 622/623: 140-151.
- [ 5 ] Kim H W, Park Y. Urban green infrastructure and local flooding: the impact of landscape patterns on peak runoff in four Texas MSAs. *Applied Geography*, 2016, 77: 72-81.
- [ 6 ] Chen C L, Zhao G J, Zhang Y T, Bai Y P, Tian P, Mu X M, Tian X J. Linkages between soil erosion and long-term changes of landscape pattern in a small watershed on the Chinese Loess Plateau. *Catena*, 2023, 220: 106659.
- [ 7 ] Li Y Y, Sun J, Lin B L, Liu Z W. Thermal-hydrodynamic circulations and water fluxes in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124319.
- [ 8 ] 黄斌斌, 郝成元, 李若男, 郑华. 气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展. 自然资源学报, 2018, 33(5): 899-910.
- [ 9 ] Ling L B, Kui X, Xin Y X, Ji J L, Chao M. Development of a landscape indicator to evaluate the effect of landscape pattern on surface runoff in the Haihe River Basin. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 546-557.
- [ 10 ] Jin H W, Rong G Z, Li J J, Wen Y Y, Zhan B L. Relationship Between Watershed Landscape Pattern Change and Runoff-Sediment in Wind-Water Erosion Crisscross Region. *Journal of Landscape Research*, 2017, 9(05): 53-58.
- [ 11 ] 盛菲, 刘士余, 张婷, 余敏琪. 濂水流域降雨变化和景观格局演变的径流效应. 应用生态学报, 2023, 34(1): 196-202.
- [ 12 ] 廖凯涛, 胡建民, 宋月君, 冯明军, 郑海金. 南方红壤丘陵区流域植被景观格局变化及水沙响应关系. 水土保持学报, 2019, 33(3): 36-42, 50.
- [ 13 ] Richards P L, Brenner A J. Delineating source areas for runoff in depressional landscapes: implications for hydrologic modeling. *Journal of Great Lakes Research*, 2004, 30(1): 9-21.
- [ 14 ] 江颂, 蒙古军, 陈奕云. 黑河中游土地利用与景观格局的水文效应分析. 中国水土保持科学, 2019, 17(1): 64-73.
- [ 15 ] 雷泽鑫, 傅健宇, 罗俊杰, 曹磊. 景观格局视角下晋西三川河流域径流变化归因分析. 生态学报, 2022, 42(12): 4946-4958.
- [ 16 ] Cao Y C, Zhou Z, Liao Q L, Shen S Y, Wang W W, Xiao P, Liao J P. Effects of landscape conservation on the ecohydrological and water quality functions and services and their driving factors. *Science of the Total Environment*, 2023, 861: 160695.
- [ 17 ] 刘芳, 熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 徐丽宏. 基于 LUCC 的泾河流域景观格局与径流的响应关系. 干旱区资源与环境, 2019, 33(1): 137-142.
- [ 18 ] Gao Q, Yu M. Reforestation-induced changes of landscape composition and configuration modulate freshwater supply and flooding risk of tropical watersheds. *PLoS One*, 2017, 12(7): e0181315.
- [ 19 ] Bewket W, Sterk G. Dynamics in land cover and its effect on stream flow in the Chemoga watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Hydrological Processes*, 2005, 19(2): 445-458.
- [ 20 ] 林峰, 陈兴伟, 姚文艺, 方艺辉, 邓海军, 吴杰峰, 林炳青. 基于 SWAT 模型的森林分布不连续流域水源涵养量多时间尺度分析. 地理学报, 2020, 75(5): 1065-1078.
- [ 21 ] Zhang S H, Fan W W, Li Y Q, Yi Y J. The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 34-45.
- [ 22 ] 周添惠, 杨磊, 赵方凯, 李旭春, 邓居礼, 李敏, 黄勇, 段兴武. 渭河源流域源汇景观演变对径流泥沙的影响. 生态学报, 2022, 42(1): 58-66.
- [ 23 ] Lyu Y S, Chen H, Cheng Z, He Y T, Zheng X. Identifying the impacts of land use landscape pattern and climate changes on streamflow from past to future. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118910.
- [ 24 ] Idrees M, Ahmad S, Khan M W, Dahri Z H, Ahmad K, Azmat M, Ahmad Rana I. Estimation of water balance for anticipated land use in the potohar plateau of the Indus Basin using SWAT. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5421.
- [ 25 ] 王怀军, 张建云, 王国庆, 曹蕾, 潘莹萍, 冯如. 中国中小河流气候和下垫面与产汇流过程关系研究. 地理科学, 2021, 41(1): 109-120.
- [ 26 ] 李莹, 黄岁樑. 滦河流域景观格局变化对水沙过程的影响. 生态学报, 2017, 37(7): 2463-2475.
- [ 27 ] 曾黎, 杨庆媛, 杨人豪, 陈伊多. 三峡库区生态屏障区景观格局优化——以重庆市江津区为例. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1364-1373.
- [ 28 ] 李辉, 周启刚, 李斌, 国洪磊, 王福海, 何昌华. 近 30 年三峡库区生态系统服务价值与生态风险时空变化及相关性研究. 长江流域资源与环境, 2021, 30(3): 654-666.
- [ 29 ] 王舒, 张骞, 王子芳, 余沛, 向书江, 高明. 基于 GIS 的三峡库区生态风险评估及生态分区构建. 生态学报, 2022, 42(11): 4654-4664.

- [30] 黄孟勤, 李阳兵, 李明珍, 陈爽, 曾晨岑, 张冰, 夏春华. 三峡库区人类活动强度与景观格局的耦合响应. 生态学报, 2022, 42(10): 3959-3973.
- [31] 刘春霞, 李月臣, 杨华, 闵婕, 王才军, 张虹. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价. 地理学报, 2011, 66(5): 631-642.
- [32] 黄春波, 滕明君, 曾立雄, 周志翔, 肖文发, 朱建华, 王鹏程. 长江三峡库区土地利用/覆盖的长期变化. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1585-1596.
- [33] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, Williams J R. Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [34] 刘伟, 安伟, 马金锋. SWAT 模型径流模拟的校正与不确定性分析. 人民长江, 2016, 47(15): 30-35, 62.
- [35] 杨军军, 高小红, 李其江, 陈强, 冯仕超. 湟水流域 SWAT 模型构建及参数不确定性分析. 水土保持研究, 2013, 20(1): 82-88, 93.
- [36] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- [37] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. 生态学报, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [38] 毛劲乔, 彭吉荣, 蔡海滨, 张培培. 鄱阳湖出湖流量时序变化特征与驱动因子分析. 水力发电学报, 2023, 42(1): 104-113.
- [39] Breiman L. Random forest. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [40] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 谢邦昌. 随机森林方法研究综述. 统计与信息论坛, 2011, 26(3): 32-38.
- [41] 黄孟勤, 李阳兵, 冉彩虹, 李明珍. 三峡库区腹地山区农业景观格局动态变化与转型. 地理学报, 2021, 76(11): 2749-2764.
- [42] Li Z H, Wang Y M, Zhang H B, Chang J X, Yu Y H. Runoff response to changing environment in Loess Plateau, China: implications of the influence of climate, land use/land cover, and water withdrawal changes. Journal of Hydrology, 2022, 613: 128458.
- [43] Jin X T, Zhi X T, Jun B L, Qin Z H. Contribution of changes in vegetation composition and climate variability on streamflow across the global watersheds. Catena, 2023, 232: 107394.
- [44] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 戴东. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析. 水土保持学报, 2004, 18(3): 5-8.
- [45] 姚祖军, 王娜娜, 黄雪滢, 丁树文. 降雨和水保措施对三峡库区坡地水土流失的协同影响. 长江流域资源与环境, 2022, 31(10): 2272-2281.
- [46] 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 马德举. 三峡库区典型农林流域景观格局对径流和泥沙输出的影响. 生态学报, 2013, 33(23): 7487-7495.