

DOI: 10.5846/stxb202105131259

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.

Lei Z X, Fu J Y, Luo J J, Cao L. Attribution analysis of runoff changes in the Sanchuan River Basin of Shanxi Province from the perspective of landscape patterns. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12):4946-4958.

## 景观格局视角下晋西三川河流域径流变化归因分析

雷泽鑫<sup>1</sup>,傅健宇<sup>2</sup>,罗俊杰<sup>1</sup>,曹磊<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 天津大学建筑学院,天津 300072

<sup>2</sup> 河海大学水文水资源学院,南京 210024

**摘要:**黄土高原大规模人类活动造成下垫面剧烈变化,流域景观格局改变,影响产汇流过程。学科融合视角下,基于 Budyko 水热耦合方程、景观指数计算以及回归分析等多学科方法,以晋西黄土丘陵沟壑区三川河流域为例,分析不同尺度景观格局变化造成流域径流量变化的原因,判别地理景观空间对产汇流过程的影响。结果表明:(1)1980 年至今是研究区径流锐减阶段,其中下垫面变化对径流贡献率为 60.81%;(2)1980 年至今的下垫面变化造成流域景观斑块破碎、形状趋于规整,景观格局分割度、蔓延度提高;(3)利用逐步线性回归模型可将径流减少的景观格局变化定位到具体地理空间,流域东部、北部主要支流上游与两条支流汇流处的林地核心斑块面积减少以及城市建设区域对于水体连通性的破坏。通过跨学科方法探究景观格局与径流变化之间的潜在空间关联,揭示径流对景观格局变化的响应,可为黄土高原水资源管理与生态规划提供决策依据。

**关键词:**径流变化;景观格局变化;Budyko 方程;景观指数;三川河流域;黄土高原

## Attribution analysis of runoff changes in the Sanchuan River Basin of Shanxi Province from the perspective of landscape patterns

LEI Zexin<sup>1</sup>, FU Jianyu<sup>2</sup>, LUO Junjie<sup>1</sup>, CAO Lei<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup> College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China

**Abstract:** Large-scale human activities on the Loess Plateau have caused dramatic changes in the substratum and altered the landscape pattern of the watershed, even affected the runoff production and sink processes. Based on the Budyko hydrothermal coupling equation, landscape index calculation, and regression analysis methods, this paper takes the Sanchuan River Basin in western Shanxi Province, located in the loess hilly gully area, as an example, to analyze the causes of runoff changes in the basin caused by changes in landscape patterns at different scales and to discern the influence of geographic landscape space on the production and sink processes. The results show that: (1) the runoff in the study area has decreased sharply from 1980 to the present, in which the contribution of subsurface changes to runoff was 60.81%. (2) The substrate changes from 1980 to the present caused the fragmentation and regularization of the landscape patches in the watershed, and the fragmentation and spreading of the landscape pattern increased. (3) Using a stepwise linear regression model, the landscape pattern changes in runoff reduction could be localized to specifically geographic spaces. The reduction of the core areas of woodland patches in the upper reaches of the eastern and northern tributaries and their confluence, and the disruption of the connectivity of water patches by the urban built-up areas at the confluence of the tributaries, are the direct spatial causes of the runoff reduction in watershed. An interdisciplinary approach is used to explore the potentially spatial correlation between landscape patterns and runoff changes, and to reveal the response of runoff to landscape pattern

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51838003)

收稿日期:2021-05-13; 网络出版日期:2022-02-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tjdxcl2006@163.com

changes, which can provide a decision basis for water resources management and ecological planning on the Loess Plateau.

**Key Words:** runoff change; landscape pattern change; Budyko equation; landscape index; Sanchuan River Basin; the Loess Plateau

黄土高原地区地质地貌条件特殊,由地表径流冲蚀引发的水土流失与生态失衡等问题突出<sup>[1-2]</sup>。长久以来,黄土高原径流变化受到气候变化和人类活动双重影响<sup>[3]</sup>。随着水土保持与生态建设推进,降水量对于黄土高原地区径流的影响在逐渐下降;退耕还林还草工程、淤地坝建工程等重大规模人类活动<sup>[4-5]</sup>,造成下垫面变化,从而显著改变了该地区的降雨-径流关系<sup>[6]</sup>,影响水文循环过程<sup>[7]</sup>。在大规模人类活动背景下,揭示对下垫面变化对黄土高原地区径流的影响,是进一步开展水土保持与水资源规划利用。然而,生态修复与规划建设的落地实施是以土地空间为基本实施单元。因此,从地理空间角度探究景观空间格局变化对区域径流变化的影响,是维持水土保持成果、纾解区域水矛盾的科学依据,也是新时期国土空间规划的重要导向。

流域是黄土高原自然地貌与水土保持治理的基本空间单元。以流域为范围,探究土地利用或覆被类型(land use/land cover, LULC)的空间变化特征有助于准确理解和评价人工活动干扰下的水文响应过程<sup>[8]</sup>。定量评价流域尺度下气候变化和下垫面变化对流域径流变化的影响通常有水文模型和统计学分析两类方法<sup>[9-10]</sup>。水文模型建模过程往往需要高分辨率的数据集,且模型校准验证过程较为繁琐<sup>[11]</sup>。相比之下,在有长期水文数据记录的情况下,统计学方法具有一定优势。我国多位学者<sup>[12-14]</sup>基于 Budyko 水热平衡方程<sup>[15]</sup>推导出的经验公式,结合弹性框架的应用<sup>[16]</sup>,对于定量区分气候与下垫面变化对流域径流影响计算方便、形式简洁、科学性强<sup>[17-18]</sup>。这一方法在黄土高原地区流域径流变化归因分析方面得到一定的应用:宁怡楠等<sup>[6]</sup>、张丽梅等<sup>[19]</sup>通过应用 Budyko 方程的弹性公式,得出退耕还林还草工程引起下垫面变化是流域径流减少的主要因素。毕早莹等<sup>[20]</sup>进一步将植被指数 NDVI 引入 Budyko 方程,并计算出窟野河流域植被变化对径流的贡献率。在一定时间跨度内,流域下垫面的地形与土壤条件相对稳定。因此,上述研究中都将 LULC 视为下垫面变化的主要影响因素。LULC 对径流变化的影响体现在以下两个方面:一方面,LULC 变化造成曼宁系数等下垫面物理性质变化<sup>[21]</sup>,改变产汇流过程中的流量、峰值及路径等<sup>[22]</sup>;另一方面,由 LULC 形态、比例和镶嵌关系共同构成的景观格局<sup>[23]</sup>改变也会显著改变流域水文特征。然而,已有研究多从前一方面分析具体植被覆盖类型或面积造成的径流变化;对于后者的研究仅局限于从景观格局指数与径流变化的直观分析,证实河川径流与景观格局之间存在的必然关联<sup>[8,24]</sup>。黄土高原地区流域径流量变化与景观格局之间存在的空间关联,仍有待进一步解释。

作为黄土高原水土流失的严重区域与水土治理的典型代表,黄土丘陵沟壑区是开展景观生态格局变化对径流影响研究的适当区域。本研究以晋西三川河流域为例,基于景观生态学“格局-过程”耦合视角,选用 Budyko 假设下的 Choudhury-Yang 经验公式构建弹性框架,通过景观格局指数表征 LULC 的图底空间变化,建立产汇流变化过程与流域景观空间变化之间的数学模型,对径流变化进行地理空间层面的归因分析。通过水文学、景观生态学的多学科融合方法,从景观格局的角度量化分析下垫面变化与径流变化的地理空间关系,探究解释不同空间尺度景观镶嵌关系对径流变化的影响,为流域水资源管理与水生态规划提供决策依据。

## 1 研究区概况

三川河是黄河左岸的一级支流,也是晋西地区汇入黄河的第二大支流,流域面积 4161km<sup>2</sup>。根据流域地貌特征和水文情势分异,三川河流域可划分为北川河流域、东川河流域、南川河流域和三川河流域 4 个水文分区及子流域(图 1)。该流域是黄土丘陵沟壑区中水土流失较为严重的区域,1982 年被列为全国 8 个水土保持重点治理流域之一后,随即开始以“基本农田、水保林、经果林”为主要措施、为期十年(1983—1992 年)的流域水土流失综合治理<sup>[25]</sup>。因此,以三川河流域为研究对象,探索黄土高原丘陵区流域人类活动引起的下垫面

改变及其景观格局变化和径流关系具有一定的典型性,同时对于当地生态规划和建设发展具有一定的现实意义。

## 2 数据与方法

研究包括四个步骤:(1)通过 Mann-Kendall 相关检验法分析年径流量变化序列,确定研究期区间;(2)利用 Budyko 方程分析气候变化和下垫面变化对于研究期间的年径流量变化的贡献;并基于移动窗口函数(moving window),求得 5 年滑动平均期的经验参数  $\omega$  序列;(3)基于 1980、1990、2000、2005、2010、2015、2020 年的土地利用数据,计算三川河流域及其 49 个子流域在类型和景观层次的景观指数;(4)利用下垫面变化对径流变化的经验参数  $\omega$  序列与景观指数序列进行相关性分析,并建立逐步线性回归方程,分析景观格局变化与径流变化的潜在空间关联。

### 2.1 数据来源

分析数据包括三川河流域下游后大成水文站 1960—2020 年逐月径流量数据,流域内国家气象站点离石站的同期逐日气象数据(降雨量、平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、日照时数、平均风速等数据)。以上数据分别来源于国家水文年鉴和中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。为了充分反映铁路建设前后土地利用类型和景观格局的变化,选取三川河流域所在区域 2000、2005、2010、2015、2020 年卫星图像作为研究基础数据。遥感影像以 ASTER 和 LandSat 7 ETM+数据为主,分辨率为 30m。基于我国土地利用分类标准,将研究区土地分为耕地、林地、草地、建设用地和水体 5 种利用类型。通过 ENVI 完成遥感影像的监督分类,结合实地调查对解译数据进行验证和修正。利用 ArcGIS 完成影像数据的几何校正、坐标登记和矢量化。根据随机抽样和实地验证表明,图像解读的总体准确率在 90%以上。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 趋势检验

Mann-Kendall 相关检验法(M-K 法)属于非参数检验方法,可以用来检验一个时间序列的变化趋势和识别序列是否有突变点。该方法的优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受异常值的干扰,更适用于类型变量和顺序变量,且计算简单,在检验降水、气温和径流等时间序列的趋势变化和突变等方面应用广泛<sup>[26]</sup>。本文采用 M-K 法对三川河流域的气象和水文数据的变化趋势进行显著性检验和突变点检验,显著性水平为 0.05。

#### 2.2.2 径流变化贡献率计算

##### (1) Budyko 水量平衡方程建立

Choudhury-Yang 经验方程反映了在一定的 climate 和植被条件下,流域长期的水文气候特征服从水分和能量平衡原理,表达式如下:

$$E = \frac{P \times E_0}{(P^\omega + E_0^\omega)^{1/\omega}} \quad (1)$$

式中,  $E$  是长期平均的年实际蒸散发量(mm),  $P$  是长期平均年降水量(mm),  $E_0$  是长期平均的年潜在蒸散发量(mm),  $\omega$  为无量纲常数,反映人类活动对流域下垫面影响变化的特征参数。式中认为  $P$ 、 $E_0$  和  $\omega$  是相互独立的变量。

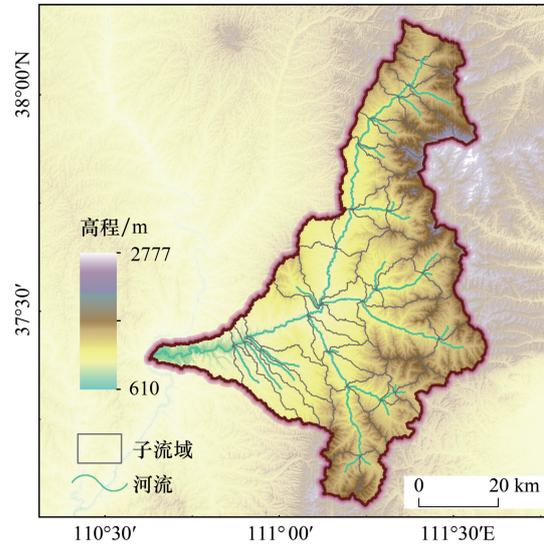


图 1 研究区域概况

Fig.1 Overview of Sanchuanhe River Basin

结合流域长期水量平衡方程  $P = E + R$ , 长时间尺度上流域径流量  $R$  可以用流域内降水  $P$ 、潜在蒸散发  $E_0$  以及与植被有关的经验参数  $\omega$  进行描述:

$$R = f(P, E_0, \omega) \quad (2)$$

(2) 径流变化贡献量计算

将  $R$  与  $P$ 、 $E_0$ 、 $\omega$  的变化关系可以表示为全微分形式:

$$dR = \frac{\partial f}{\partial P} dP + \frac{\partial f}{\partial E_0} dE_0 + \frac{\partial f}{\partial \omega} d\omega \quad (3)$$

根据 Schaake 径流弹性系数的定义, 降雨量、潜在蒸散量与人类活动分别对径流的弹性系数,  $\varepsilon_p = \frac{dR/R}{dP/P}$ ,

$\varepsilon_{E_0} = \frac{dR/R}{dE_0/E_0}$  和  $\varepsilon_\omega = \frac{dR/R}{d\omega/\omega}$ , 上式则可转换为:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_p \frac{dP}{P} + \varepsilon_{E_0} \frac{dE_0}{E_0} + \varepsilon_\omega \frac{d\omega}{\omega} \quad (4)$$

令  $\varphi = \frac{E_0}{P}$ , 则可得到:

$$\varepsilon_p = \frac{(1 + \varphi^n)^{1/n+1} - \varphi^{n-1}}{(1 + \varphi^n) [(1 + \varphi^n)^{1/n} - \varphi]} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{E_0} = \frac{1}{(1 + \varphi^n) [1 - (1 + \varphi^{-n})^{1/n}]} \quad (6)$$

$$\varepsilon_\omega = \frac{\ln(1 + \varphi^n) + \varphi^n \ln(1 + \varphi^{-n})}{n [(1 + \varphi^n) - (1 + \varphi^n)^{1/n+1}]} \quad (7)$$

突变前后的平均径流深分别表示为  $R$  和  $R'$ , 那么突变前后多年平均径流深变化可表示为:

$$\Delta R = R' - R \quad (8)$$

同时,  $\Delta R$  也可以用气象要素变化及流域人类活动变化的影响表示:

$$\Delta R = \Delta R_p + \Delta R_{E_0} + \Delta R_\omega \quad (9)$$

式中,  $\Delta R_p$  为降水变化引起的径流变化,  $\Delta R_{E_0}$  潜在蒸散发变化引起的径流变化,  $\Delta R_\omega$  为人类活动引起的径流变化。

根据上文中得出的径流弹性系数表达式, 则可得到:

$$\Delta R_p = \varepsilon_p \frac{R}{P} \Delta P \quad (10)$$

$$\Delta R_{E_0} = \varepsilon_{E_0} \frac{R}{E_0} \Delta E_0 \quad (11)$$

$$\Delta R_\omega = \Delta R - (\Delta R_p + \Delta R_{E_0}) \quad (12)$$

式中,  $\Delta P$  和  $\Delta E_0$  分别为突变前后多年平均降水量和潜在蒸发量的差值,  $\Delta P = P' - P$ ,  $\Delta E_0 = E_0' - E_0$

降水、潜在蒸散发和人类活动变化对径流变化的贡献率  $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\tau$ , 可通过以下算式得出:

$$\beta = \frac{\Delta R_p}{\Delta R} \times 100\% \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{\Delta R_{E_0}}{\Delta R} \times 100\% \quad (14)$$

$$\tau = \frac{\Delta R_\omega}{\Delta R} \times 100\% \quad (15)$$

贡献率为正值说明该因素变化所带来的径流效应为正效应, 即导致径流增加, 相反为负效应, 即导致径流减少。

### (3) 人类活动对流域下垫面影响变化的特征参数 $\omega$ 计算

移动窗口是平滑水文序列随机变化的一种简单而有效的方法,已被广泛用于表示序列的非平稳性<sup>[27]</sup>。为了消除蓄水变化和自然气候变化影响,采用5年时间窗口的宽度求得年平均径流量、降水量以及潜在蒸散量。以5年为中心的时间窗内,可以求得 Budyko 方程中的参数  $\omega$  以表征不同滑动平均时间内人类活动的变化规律。

### 2.3 景观指数选取

景观指数是通过数理统计或拓扑计算公式描述不同景观要素的形态特征及其组合的结构关系<sup>[28]</sup>。虽然景观指数本身并不具有生态学意义,但是景观指数能够直接反映斑块形状特征或对不同斑块的拓扑关系进行量化描述,从而表征流域下垫面的变化情况。因此,根据生态学原理方法,综合 Fragstats 4.2 帮助文档<sup>[29]</sup>与已有研究成果在径流归因分析中对景观指数的选择<sup>[8,24]</sup>,分别筛选类型水平上的22个指标与景观水平上的26个指标,利用 Fragstats 4.2 完成对整个流域和子流域级别的景观指数统计。

### 2.4 数据分析

采用 Pearson 相关性分析在流域景观水平-流域斑块类型-子流域景观水平3个层级检测景观指数与人类活动对径流变化影响参数之间的显著性关系( $P=0.05$  或  $0.01$ )。利用逐步线性回归的方法确定与人类活动影响参数相关的最敏感景观指标。采用 SPSS 22.0 完成 Pearson 相关系数和逐步回归分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 三川河流域水文气候特征

#### 3.1.1 径流变化趋势分析

根据 M-K 法对研究区的年径流量和年降水量序列的变化趋势与突变点进行分析。由图2可知,20世纪60年代中期以后,三川河流域的年降水量快速减少;从1979年至2010年年降水量变化表现出均匀波动的相对稳定状态。三川河年径流量变化情况较复杂(图3):由UF趋势线分析可知,三川河流域年径流变化在1970年呈相对稳定的波状起伏,70年代到80年代年径流在总体减少的趋势下略有波动,在80年代后径流继续呈现出快速减少的趋势。在0.05的置信区间中,UF和UB趋势线在1979—1980年间出现交点可知1980年至今的径流减少是一突变现象。因此,本文以1980年作为突变点,对1980年至今三川河流域径流突变的归因分析。

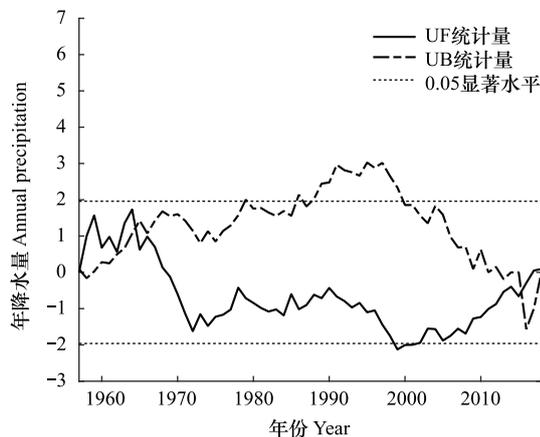


图2 1957—2018 逐年降水 M-K 统计曲线

Fig. 2 Mann-Kendall statistical curve for annual precipitation from 1957 to 2018

UF 表示按时间序列顺序计算出的统计量序列,为标准正态分布;

UB 为逆序重复前一过程得到的统计量序列

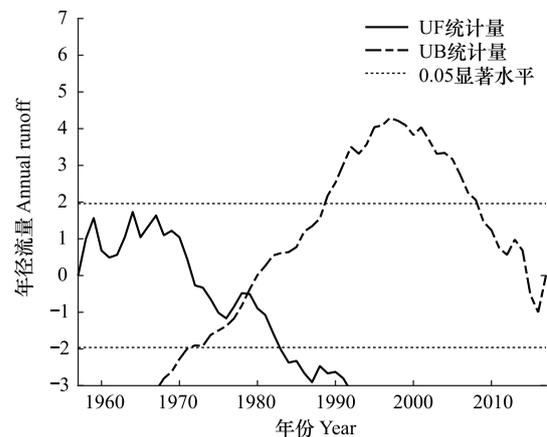


图3 1955—2019 逐年径流 M-K 统计曲线

Fig. 3 Mann-Kendall statistical curve for annual runoff from 1955 to 2018

### 3.1.2 径流变化归因结果

三川河流域的径流补给主要依靠降水,没有外来河流汇入或冰川融雪,因此,在研究区的径流变化归因分析中,主要考虑降水、潜在蒸散量及人类活动的影响。根据 M-K 分析结果分别将 1957—1979 年作为基准期,1980—2020 年作为突变期。基于 Choudhury-Yang 经验公式(公式 1),分别计算得出研究区年径流量  $R$  对年降水量  $P$ 、潜在蒸散量  $E_0$  和人类活动  $\omega$  的弹性系数(公式 5—7),反映了三川河流域对以上因素的敏感程度(表 1):当年降水量增加 1%,相应地年径流量增加幅度为 2.7%;当年潜在蒸散发量增加 1%,相应地年净流量减少 1.7%;流域下垫面参数增加 1%,相应地年径流量减少 2.2%。可见,年径流量变化对降水的敏感性要略大于人类活动带来的敏感性。根据公式 13—15 计算出以上三大因素对径流变化的贡献率可知,在突变期后年平均径流降低 29.3mm,降雨、潜在蒸散量和人类活动对径流减少的贡献率分别为 24.9%、14.29% 和 60.81%。换言之,人类活动对径流减少的影响超过六成,成为 1980 年后径流变化的主要原因。

表 1 不同因素对三川河流域径流变化的敏感系数和贡献率

Table 1 Sensitivity coefficient and the contributions of different factors to annual runoff over the study area

时期 Period	$R/mm$	$P/mm$	$E_0/mm$	$\omega$	弹性系数 Sensitivity coefficient			径流贡献率/% Runoff contribution rate		
					$\varepsilon_P$	$\varepsilon_{E_0}$	$\varepsilon_\omega$	$C_P$	$C_{E_0}$	$C_\omega$
					突变前(1957—1979 年) Before mutation	69.52	512.53	976.96	1.83	—
突变后(1980—2020 年) After mutation	40.27	486.30	1025.52	2.11	2.70	-1.70	-2.15	24.90	14.29	60.81

$R$ : 多年平均径流量 Runoff;  $P$ : 多年平均年降水量 Precipitation;  $E_0$ : 年平均潜在蒸散量 Annual average potential evapotranspiration;  $\omega$ : 下垫面特征参数 Underlying surface feature parameters;  $\varepsilon_P$ : 降雨量的弹性系数 Elasticity coefficient of precipitation;  $\varepsilon_{E_0}$ : 潜在蒸散发的弹性系数 Elasticity coefficients of potential evapotranspiration;  $\varepsilon_\omega$ : 下垫面特征参数的弹性系数 Elasticity coefficients of underlying surface feature parameters;  $C_P$ : 降雨对径流变化的贡献率 The contribution of precipitation to runoff changes;  $C_{E_0}$ : 潜在蒸散量对径流变化的贡献率 The contribution of potential evapotranspiration to changes in runoff;  $C_\omega$ : 下垫面对径流变化的贡献率 The contribution of underlying surface to changes in runoff

### 3.1.3 5 年滑动窗口期内气候水文特征分析

以 5 年滑动窗口期,分别求得 1980—2020 年  $R$ 、 $P$  和  $E_0$  的每隔五年的滑动平均数,基于 Choudhury-Yang 经验公式中四个变量的数学关系(公式 2),求取不同滑动窗口期下垫面变化对径流变化的经验参数  $\omega$  (表 2)。

表 2 五年滑动窗口期下径流变化的影响因子变化

Table 2 Change of influencing factors of runoff variation under five-year moving window period

5 年滑动窗口期 5year moving window period	$R/mm$	$P/mm$	$E_0/mm$	$\omega$
1980—1984	45.39	467.80	1024.74	1.938193
1985—1989	48.26	508.63	978.82	2.170172
1990—1994	40.15	458.65	976.53	2.071608
1995—1999	31.86	385.36	1036.47	1.801624
2000—2004	25.63	453.70	1032.25	2.341631
2005—2009	30.12	494.43	1058.64	2.389938
2010—2014	44.60	551.54	1030.88	2.394153
2015—2020	58.24	561.30	1074.41	2.090525

## 3.2 三川河流域景观格局变化

基于 1980、1990、2000、2005、2010、2015、2020 年的遥感影像判读得到流域内土地覆被类型,结合 GIS 和 Fragstats 对三川河流域 1980—2020 年的景观格局变化进行分析。

### 3.2.1 土地利用类型变化

三川河流域主要土地利用类型为林地、草地、农田、水域和建设用地,1980 年与 2020 年土地利用变化对

比如图 4 所示。土地利用变化与三川河流域“土石山区-黄土丘陵沟壑区”的自然地形关系密切。建设用地沿河流谷地呈线性延伸,林地主要分布上游山区、农田和草地主要分布在中下游坡地。各类土地类型变化(表 3)可知:40 年内,建设用地面积将近翻了十倍,水体面积增加近三成,农田面积减少一成,林地和草地的面积变化相对较小。从 2020 年土地利用数据来看,其中近 10%的草地以及近 3%的林地是由农田转化而来,是“退耕还林还草”工程取得的部分成果;同时近 65.5%的建设用地、近 44%的水体是由农田转化而来,而分别有 10%和近 20%的农田和建设用地来源于对草地的侵占,这体现了城市快速发展等人类活动对土地利用变化的剧烈改变。总体来看,随着城市建设的发展和生态工程的建设,三川河流域各类用地对农田和草地的侵占较为严重。

3.2.2 流域尺度景观格局变化特征

三川河流域的水土保持与生态建设以及城市扩张带来了剧烈的土地利用类型转化,相应地,从地理空间构成上景观格局也发生显著变化(图 5)。

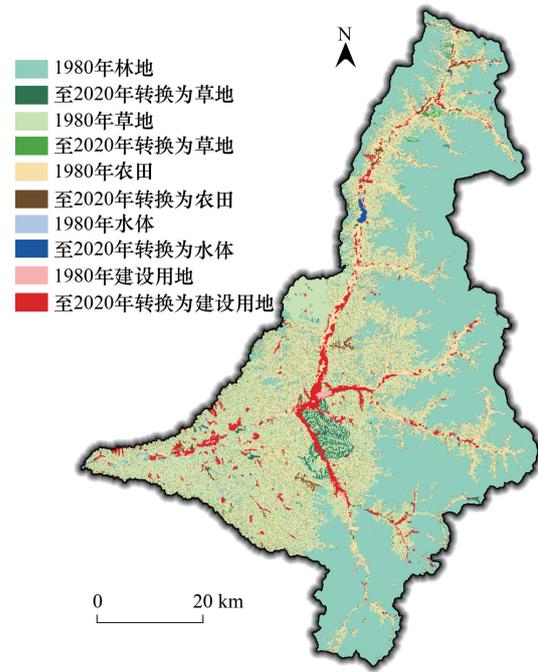


图 4 1980 与 2020 土地利用类型变化对比分析  
Fig.4 Comparison of land use between 1980 and 2020

表 3 1980—2020 土地利用类型变化矩阵  
Table 3 Land use type change matrix 1980—2020

		1980 年土地利用类型 Land use type in 1980					
土地利用类型 Land use type		草地 Grassland	建设用地 Build-up	林地 Woodland	农田 Cropland	水体 Water	总计 Total
2020 年土地利用类型 Land use type in 2020	草地	919.7462	0.2416	13.5281	98.1008	0.7844	1032.4010
	建设用地	28.9241	14.2307	6.1312	94.3610	2.0029	145.6500
	林地	20.8237	0.1046	1861.3940	57.1281	1.1754	1940.6260
	农田	103.5889	0.6882	30.2439	893.7055	1.4305	1029.6570
	水体	2.202678	0.0499	0.71049	5.3892	3.9993	12.3517
	总计	1075.2860	15.3151	1912.0080	1148.6850	9.3927	4160.6860

(1) 景观水平

在过去 40 年时间,三川河流域随着最大斑块面积(LPI)变小、总边缘密度(TE)变小、斑块核心面积(TCA、NDCA)与斑块实际面积趋于一致,证明流域整体景观斑块形状(PAFRAC)趋于规整;此外,斑块之间对比度增强(CWED、TECI),进一步反应出整个流域景观分布趋于破碎离散(DIVISION、CONNECT)、景观蔓延度(CONHESION、IJL、CONTAG)增加、多样性(SHDI、SHEI)增加。上述变化在 2000 年前后表现显著。

(2) 类型水平

不同类型用地的景观格局变化呈现出较大差异。首先,林地在 1990 年之前变化显著,在 1990 年之后变化趋于平稳。林地景观的变化趋势为:斑块边缘趋于不规整,但是斑块面积与核心面积变化相对稳定,林地景观破碎度和蔓延度变化较小。其余四类用地在 2000 年发生显著变化:其中农田斑块面积减少,剩余三类斑块面积显著增大。在此过程中只有建设用地斑块形状趋于杂乱,剩余类型用地斑块形状趋于规整。建设用地的无序扩张(破碎度降低、连通度增高、蔓延度增强)导致农田和水体的破碎度增高、斑块细分程度降低;草地破碎度增高、蔓延度降低。

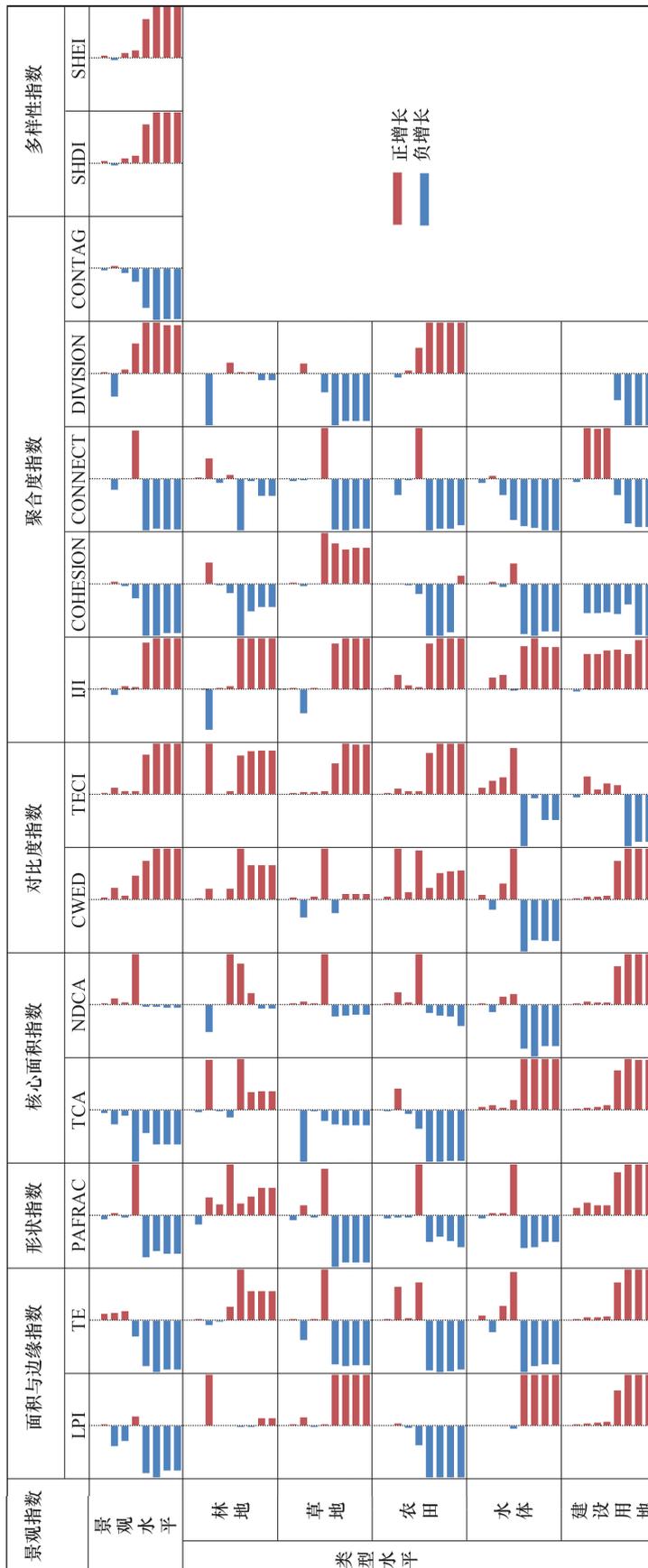


图 5 1980—2020流域景观指数变化分析

每组条形图均以1980年景观指数为参考值,分别反映1980、1985、1990、1995、2000、2005、2010、2015、2020年对应景观指数的相对变化;LPI:最大斑块指数 Largest patch index; TE:总边缘密度 Total edge; PAFRAC:周长-面积分形维度 Perimeter-area fractal dimension; TCA:斑块核心区总面积 Total core area; NDCA:不相邻斑块核心区区域的数量 Number of disjoint core areas; CWED:对比度加权下的边缘密度 Contrast-weighted edge density; TECI:边缘对比度指数 Total edge contrast index; III:穿插和并列指数 Interspersion and juxtaposition index; COHESION:斑块凝聚力指数 Patch cohesion index; CONNECT:连通性指数 Connectance index; DIVISION:景观分割指数 Landscape division index; CONTAG:蔓延度指数 Contagion index; SHDI:Shannon多样性指数 Shannon's diversity index; SHEI:Shannon均匀度指数, Shannon's evenness index

### 3.2.3 子流域尺度景观格局变化特征

对三川河流域的 49 个子流域进行景观水平的景观指数分析(图 6)可知,在 1980 到 2020 年的 40 年变化中,景观格局变化最为显著的子流域分别为三川河上游子流域 5、18、29、32,以及位于城市建设发展的子流域 16、28、47。在这些子流域中,位于河道上游的子流域边缘密度减小、核心面积形状趋于规整、斑块对比度变大、斑块细分程度变大、斑块均匀分布程度降低,证明子流域景观格局趋于破碎、连通度降低、斑块形状趋于规整,体现了人类活动对流域上游景观格局的改造。位于支流交汇口的子流域分别为离石区东城、南城以及北城新区,在这些区域的最大斑块面积呈扩大趋势,斑块连通度变强、分散和细分程度增加、斑块多样性显著增强。这说明城市扩张带来以建设用地为主的主要斑块面积增大,但是出现建设用地被多种用地细分的情况。这反应了城市建设的扩张以及城市内部硬质下垫面的破碎化改变。

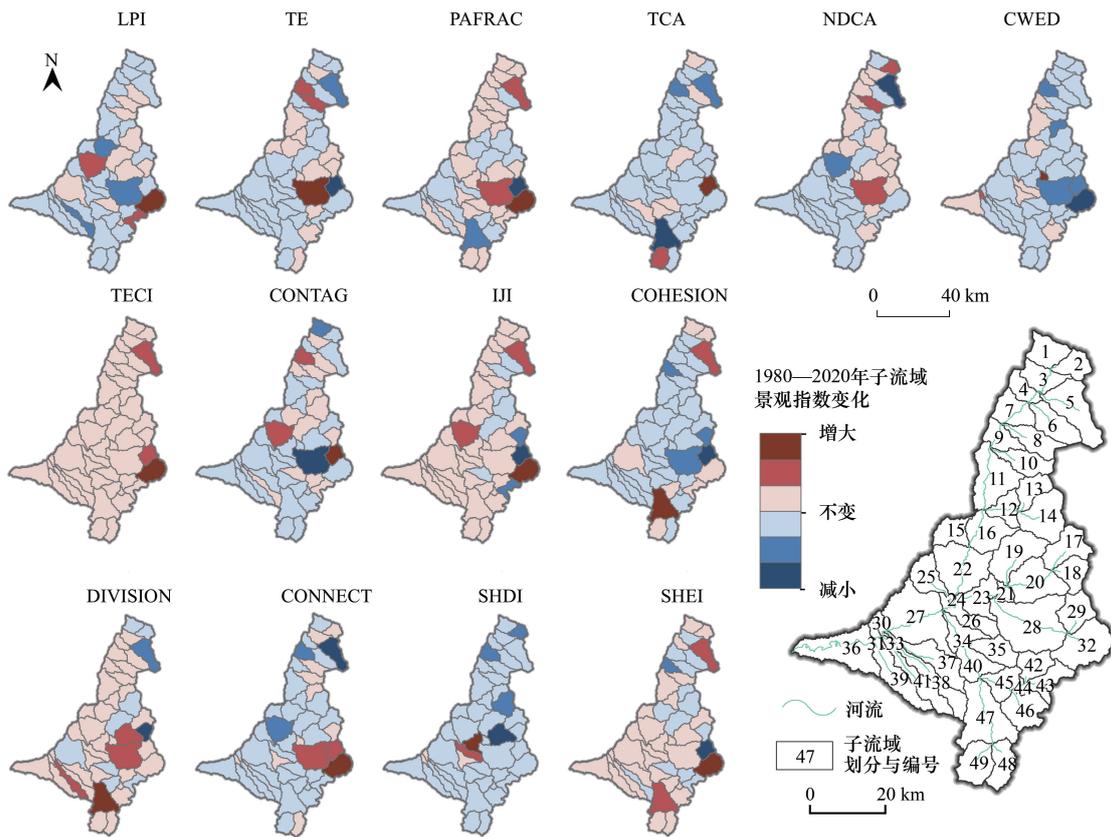


图 6 1980—2020 子流域景观指数变化分析

Fig.6 Analysis of landscape index change in subbasin from 1980 to 2020

## 3.3 三川河流域景观格局对径流变化的影响

### 3.3.1 景观格局变化与径流变化的相关性分析

由于流域径流改变受到下垫面变化的影响,以 1980—2015 的景观指数序列分别与 Budyko 方程下的人类活动经验参数  $\omega$  序列(表 2)做相关性分析可知(图 7):  $\omega$  与流域景观水平上的景观格局变化只与景观分割指数(DIVISION)呈正相关,与景观最大斑块面积(LPI)呈负相关,与其他指数相关性不明显。在流域类型水平上,  $\omega$  与林地、草地、水体斑块的面积、核心面积呈现出一定的负相关性;与林地、草地、农田聚合指数呈现出一定的正相关性。此外,  $\omega$  与建设用地形成的景观格局没有明显的相关性。

在子流域尺度上,  $\omega$  明显与子流域 32、47、28、29、7、5、22 的景观格局变化表现出明显的相关性,同时各子流域的最大斑块面积指数(LPI)、核心斑块面积指数(TCA)、景观聚合指数(COHESION、DIVISION)以及景观多样性(SHDI)指数等类型表现出较多的相关性。

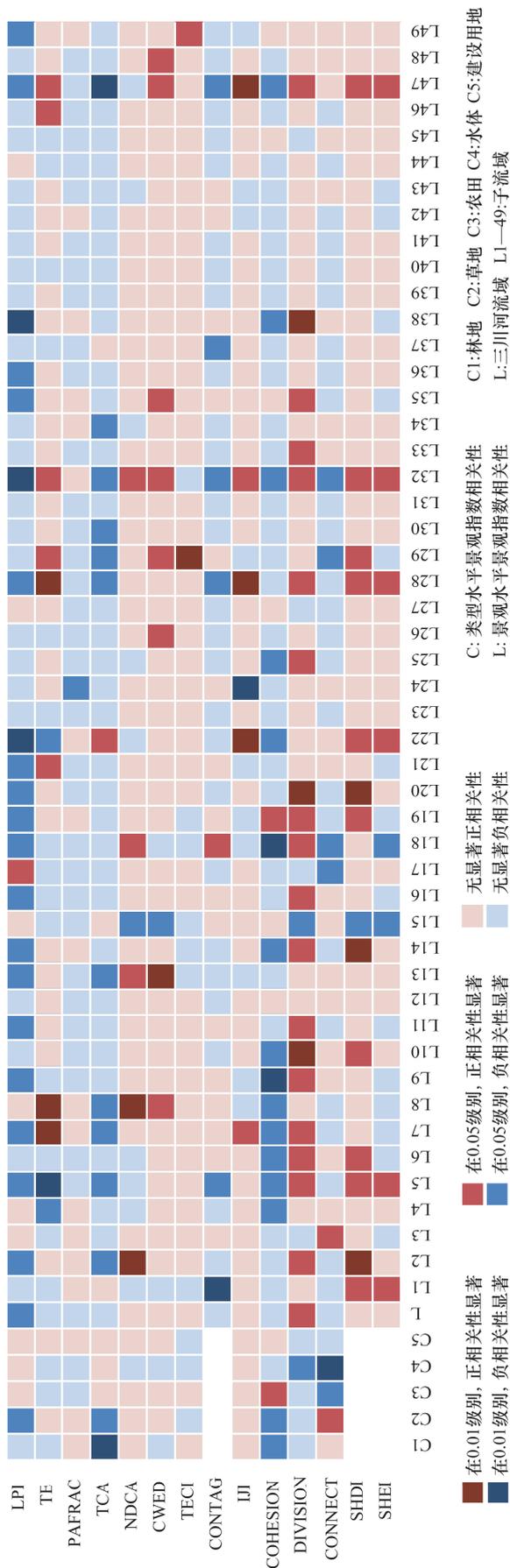


图 7 景观指数与人类活动对径流影响参数 $\omega$ 的相关性矩阵

Fig.7 Correlation matrix between landscape index and the parameters of anthropogenic impact on runoff of Sanchuanhe River basin

LPI:最大斑块指数 Largest patch index; TE:总边缘密度 Total edge; PAFRAC:周长-面积分形维度 Perimeter-area fractal dimension; TCA:斑块核心区总面积 Total core area; NDCA:不相连接核心区区域的数量 Number of disjunct core areas; CWED:对比度加权下的边缘密度 Contrast-weighted edge density; TECI:边缘对比度指数 Total edge contrast index; CONTAG:蔓延度指数 Contagion index contagion III:穿插和并列指数 Interspersion and juxtaposition index; COHESION:斑块凝聚力指数 Patch cohesion index; DIVISION:景观分割指数 Landscape division index; CONNECT:连通性指数 Connectance index; ; SHDI:Shannon多样性指数 Shannon's diversity index; SHEI:Shannon均匀度指数, Shannon's evenness index

### 3.3.2 景观指数与径流变化的回归模型

基于流域景观-流域斑块类型-子流域景观三个层次的景观指数变量,采用逐步线性回归方法,分别从不同景观尺度下的 14、55 和 686 个景观格局指数筛选关键指标,估算人类活动影响系数。结果表明(表 4):流域景观水平上景观分割指数能够从一定程度上表征流域的人类活动影响( $R^2 = 0.623, P < 0.05$ );流域斑块类型水平上,林地的斑块核心面积(TCA)与水体的连通度(CONNECT)可以显著解释流域的人类活动影响( $R^2 = 0.883, P < 0.005$ );子流域景观水平上,子流域 28 的散布指数(IJI)、子流域 5 的边缘指数(TE)以及子流域 22 和 32 的最大斑块占比(LPI)可以较为准确地解释流域人类活动影响( $R^2 = 0.998, P < 0.001$ )。回归中各变量共线性诊断的关键指标 VIF 值小于 10,说明各变量之间几乎不存在共线性问题。

表 4 基于景观指数和人类活动对径流影响参数  $\omega$  的逐步线性回归方程

Table 4 Stepwise linear regression equations for landscape index and the parameters of anthropogenic impact

模型(标准化系数) Model (normalized coefficient)	$R^2$	$F$	$P$
$\omega = 0.822\text{DIVISION} - 9.548$	0.623	12.543	<0.05
$\omega = 8.247 - 0.53\text{TCA}_{\text{forest}} - 1.034\text{CONNECT}_{\text{water}}$	0.883	27.298	<0.005
$\omega = 1.158\text{IJI}_{28} - 1.094\text{LPI}_{22} - 0.446\text{LPI}_{32} - 0.574\text{TE}_5 - 16.249$	0.998	59.270	<0.001

## 4 讨论

### 4.1 景观格局变化对径流变化的贡献率分析

三川河流域气候变化(降水、潜在蒸散量)和下垫面变化(参数  $\omega$ )对径流变化的贡献率分别为 39.19% 和 60.81%。该结果与杨大文等<sup>[18]</sup>与刘艳丽等<sup>[30]</sup>对三川河流域径流分析得出的结论一致。贡献率计算数值上的误差与统计数据的时间区间选择有关。三川河流域的下垫面变化参数  $\omega$  对径流存在负面影响,随着  $\omega$  的增加,径流则会表现出相应的减少趋势。1980 年后至今三川河流域径流量的突变性减少趋势,下垫面变化的贡献超过六成。此外,在黄土丘陵沟壑区(同时也是黄河中游的多沙粗沙区)径流变化归因研究中,流域下垫面对径流的贡献均超过 60% 以上,径流变化的时间均为 20 世纪 80—90 年代之间<sup>[6,18,20]</sup>。

三川河流域至今没有中型以上水库,缺少大规模农业灌溉,人类直接用水活动有限,属于黄土丘陵沟壑区的典型山区流域。在地形和土壤条件相对稳定的情况下,从景观格局变化的角度,流域淤地坝、梯田以及退耕还林还草工程可以呈现为斑块类型的转换、斑块核心面积、斑块形状以及连通程度的变化。流域下垫面变化基本可以用反映土地利用结构的景观格局变化来表征。对三川河流域 1980—2020 年 40 年间,对每间隔 5 年的 LULC 数据进行景观格局变化分析可知:流域尺度上,三川河流域景观斑块形状趋于规整、分布趋于破碎、景观蔓延度增加、多样性增加;子流域层面上,流域上游以及涉及河川谷地、大型沟道的子流域成为景观格局变化最强烈的区域。结合该流域以“沟域”为主导的水土保持建设模式<sup>[31]</sup>以及黄土丘陵沟壑区水土保持工程驱动下的景观格局变化特征<sup>[32—33]</sup>,有理由认为三川河流域的径流减少是大规模水土保持建设引起景观格局变化后的直接效果。

### 4.2 景观格局变化与径流减少的空间关联

为了进一步揭示景观格局变化与径流减少的地理空间对应关系,本文以  $\omega$  序列为因变量,以不同观测尺度和不同研究水平的景观指数为自变量,进行 person 相关性分析和逐步线性回归分析。

流域尺度上,景观分割程度与  $\omega$  正相关,林地斑块核心面积以及水体斑块的连通性  $\omega$  负相关。换言之,流域景观分割度提高、林地斑块的核心面积减少、水体斑块连通度降低,导致  $\omega$  增大,径流减少。其中,景观分割度提高,意味流域中大型斑块面积和形状的割裂,林地斑块与水体斑块的格局变化佐证了这一特征。根据逐步线性回归模型,三川河流域径流减少 88.30% 可以通过林地斑块核心面积的减少和水体斑块连通度的降低予以解释。流域景观尺度上,林地斑块核心面积减小,会导致斑块边界的气候修正现象,加大林地的蒸散

水平,减少径流<sup>[34]</sup>。此外,相同斑块面积下,林地的核心斑块面积减少,意味着林地斑块带来的径流阻力增加,汇水效率降低,从一定程度上减少了径流量<sup>[35]</sup>。上述两个观点都从不同侧面解释了林地斑块核心面积的减小,造成径流量降低。另外水体连通性降低,体现了河川断流或蓄水力度的增加,这一过程必然伴随着径流减少<sup>[36]</sup>。上述研究径流对林地与水体景观格局变化的响应特征与黄土丘陵沟壑区其他流域的径流归因结果一致<sup>[37-38]</sup>。

子流域尺度上的景观格局与径流变化分析能够进一步细化流域景观格局改变的具体空间区位,从而定位影响流域产汇流的主要区域。林地核心面积以及城市建成区斑块的散布程度能够 99.80%解释径流量降低的趋势变化。子流域 5、32 为流域上游的主要林地,子流域 22 为支流交汇处的退耕还林工程用地,整个流域的径流降低与这些子流域林地核心面积减少具有直接相关性。此外,子流域 28 为东川河流域的离石区城市建设扩张的主要区域,该区域的吴城水库与东川河淤地坝建设为城市用水以及郊区农田灌溉蓄积水资源,导致整个子流域的斑块分散程度提高,影响了东川河支流向干流的径流贡献。这一结果与 Tian 等对水体景观格局的研究结论一致<sup>[39]</sup>。综上,基于逐步线性回归方程的建立,三川河流域的径流减少的原因可以空间定位到以下两部分:第一、主要支流的上游林地及两条支流汇流处的林地核心斑块面积减少;第二、城市建设区域对于水体连通性的破坏。

#### 4.3 水资源管理目标下的景观格局优化建议

流域下垫面条件改变驱动下的景观格局变化对黄土高原地区径流变化具有重要影响<sup>[21]</sup>。随着国土空间规划的深入,从整体景观格局构建的视角优化用地结构是黄土高原水土保持的方向<sup>[40-41]</sup>。景观斑块的镶嵌模式与流域降雨-径流-耗散直接相关。水土保持建设过程中对退耕还林用地的划分,不仅保证用地率,同时要着重考量还林、还草用地的形状特征与位置。此外,人类活动对河道径流的拦截和蓄积,提高了当地居民对水资源利用的保障,但是会影响流域自然水循环规律。因此在水资源缺乏的黄土高原地区水利工程的建设和城市用水的管理应该基于更尺度的区域水资源统筹与可持续规划<sup>[42]</sup>。

景观格局变化是区域规划发展研究的依据,也是未来生态、水文、地理、规划等专业跨学科合作的研究重点。因此,在黄土高原地区土地管理与生态修复过程中,强调土地利用模式对流域水土保持的重要作用,在控制土地利用规模的基础上,提出合理的不同用地规模与地理空间关系,优化流域景观格局,稳定流域径流为黄土高原的生态建设与高品质健康发展提供科学依据。

## 5 结论

本文以晋西三川河流域为研究对象,利用景观格局指数表征流域下垫面变化,结合水文学 Budyko 水量平衡方程下径流归因分析方法,通过统计学分析和 GIS 空间分析,探讨黄土高原流域景观格局变化对径流变化的原因与影响。研究表明:1980 年至今是三川河流域径流锐减的时期,其中人类活动对径流贡献率为 60.81%。通过对这段时期土地利用变化与人类活动对径流变化影响参数的统计学分析可知,造成该流域径流减少的景观格局变化主要由北川河和东川河支流上游以及支流交汇处林地核心面积的减少以及城市建成区内水体连通度降低造成。本研究通过跨学科方法探究流域景观格局与径流变化之间的潜在空间关联,探索学科交叉背景下水土保持建设的生态景观化模式,为黄土高原地区未来流域水资源管理与生态规划提供决策依据。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [ 2 ] 赵勇, 何凡, 何国华, 李海红, 王丽珍, 常奂宇, 朱永楠. 全域视角下黄河断流再审视与现状缺水识别. *人民黄河*, 2020, 42(4): 42-46.
- [ 3 ] Xu J X. Variation in annual runoff of the Wudinghe River as influenced by climate change and human activity. *Quaternary International*, 2011, 244(2): 230-237.
- [ 4 ] 刘昌明, 张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析. *地理学报*, 2004, 59(3): 323-330.

- [ 5 ] 杨新, 延军平, 刘宝元. 无定河年径流量变化特征及人为驱动力分析. 地球科学进展, 2005, 20(6): 637-642.
- [ 6 ] 宁怡楠, 杨晓楠, 孙文义, 穆兴民, 高鹏, 赵广举, 宋小燕. 黄河中游河龙区间径流量变化趋势及其归因. 自然资源学报, 2021, 36(1): 256-269.
- [ 7 ] Piao S L, Ciais P, Huang Y, Shen Z H, Peng S S, Li J S, Zhou L P, Liu H Y, Ma Y C, Ding Y H, Friedlingstein P, Liu C Z, Tan K, Yu Y Q, Zhang T Y, Fang J Y. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [ 8 ] 王计平, 陈利顶, 汪亚峰. 黄土高原地区景观格局演变研究综述. 地理科学进展, 2010, 29(5): 535-542.
- [ 9 ] Li C B, Wang L M, Wang W R, Qi J G, Yang L S, Zhang Y, Wu L, Cui X, Wang P. An analytical approach to separate climate and human contributions to basin streamflow variability. *Journal of Hydrology*, 2018, 559: 30-42.
- [ 10 ] Li Z Y, Huang S Z, Liu D F, Leng G Y, Zhou S, Huang Q. Assessing the effects of climate change and human activities on runoff variations from a seasonal perspective. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2020, 34(3/4): 575-592.
- [ 11 ] Long D, Longuevergne L, Scanlon B R. Global analysis of approaches for deriving total water storage changes from GRACE satellites. *Water Resources Research*, 2015, 51(4): 2574-2594.
- [ 12 ] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算. 大气科学, 1981, 5(1): 23-31.
- [ 13 ] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [ 14 ] Yang H B, Yang D W, Lei Z D, Sun F B. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation. *Water Resources Research*, 2008, 44(3): W03410.
- [ 15 ] 布德科. 地表面热量平衡. 李怀瑾, 译. 北京: 科学出版社, 1960.
- [ 16 ] Schaake J C. From climate to flow. In: Waggoner, P. E. (Ed.), *Climate change and US Water Resources*. John Wiley & Sons, New York, 1990: 177-206.
- [ 17 ] Destouni G, Jaramillo F, Prieto C. Hydroclimatic shifts driven by human water use for food and energy production. *Nature Climate Change*, 2013, 3(3): 213-217.
- [ 18 ] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(10): 1024-1034.
- [ 19 ] 张丽梅, 赵广举, 穆兴民, 高鹏, 孙文义. 基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别. 生态学报, 2018, 38(21): 7607-7617.
- [ 20 ] 毕早莹, 李艳忠, 林依雪, 卜添荟, 黄蓉. 基于 Budyko 理论定量分析扁野河流域植被变化对径流的影响. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 61-71.
- [ 21 ] 宁珍, 高光耀, 傅伯杰. 黄土高原流域水沙变化研究进展. 生态学报, 2020, 40(1): 2-9.
- [ 22 ] Assani A A, Landry R, Kinnard C, Azouaoui O, Demers C, Lacasse K. Comparison of the spatiotemporal variability of temperature, precipitation, and maximum daily spring flows in two watersheds in Quebec characterized by different land use. *Advances in Meteorology*, 2015, 2016: 3746460.
- [ 23 ] Turner M G, Ruscher C L. Changes in landscape patterns in Georgia, USA. *Landscape Ecology*, 1988, 1(4): 241-251.
- [ 24 ] 李子君, 刘金玉, 鲁成秀, 苏宁. 基于土地利用变化的沂河流域景观格局与径流关系的分析. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 11-19.
- [ 25 ] 李瑞忠. 山西省国家水土保持重点建设工程实施成效与经验. 中国水土保持, 2019, (12): 38-40.
- [ 26 ] 于延胜, 陈兴伟. 基于 Mann-Kendall 法的径流丰枯变化过程划分. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 60-63.
- [ 27 ] 周亮, 唐建军, 刘兴科, 党雪薇, 慕号伟. 黄土高原人口密集区城镇扩张对生境质量的影响——以兰州、西安-咸阳及太原为例. 应用生态学报, 2021, 32(1): 261-270.
- [ 28 ] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究. 应用生态学报, 2002, 13(1): 121-125.
- [ 29 ] Kevin McGarigal. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps Documentation. <https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats.help.4.2.pdf>. 2015.04.21.
- [ 30 ] 刘艳丽, 王国庆, 金君良, 鲍振鑫, 刘翠善. 基于 Budyko 假设的环境变化对流域径流影响的界定. 水利水运工程学报, 2014, (6): 1-8.
- [ 31 ] 樊秉更. 吕梁市发展“沟域经济”的模式及效应. 山西水土保持科技, 2018, (3): 1-3.
- [ 32 ] 钟莉娜, 赵文武, 吕一河, 刘源鑫. 黄土丘陵沟壑区景观格局演变特征——以陕西省延安市为例. 生态学报, 2014, 34(12): 3368-3377.
- [ 33 ] 李裕瑞, 李怡, 范朋灿, 刘彦随. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治对乡村人地系统的影响. 农业工程学报, 2019, 35(5): 241-250.
- [ 34 ] Mahmood R, Pielke R A, Hubbard K G, Niyogi D, Dirmeyer P A, McAlpine C, Carleton A M, Hale R, Gameda S, Beltrán-Przekurat A, Baker B, McNider R, Legates D R, Shepherd M, Du J Y, Blanken P D, Frauenfeld O W, Nair, Fall S. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(4): 929-953.
- [ 35 ] 伍冰晨, 齐实, 郭郑曦, 刘峥, 陈涛. 西南山区林地空间格局和微地形对坡面地表产流的影响. 农业工程学报, 2021, 37(8): 108-116.
- [ 36 ] 代稳, 吕殿青, 李景保, 王金凤, 赵增友. 水系连通变异下荆南三口河水文干旱识别与特征分析. 地理学报, 2019, 74(3): 557-571.
- [ 37 ] 吉静怡, 赵允格, 杨凯, 张万涛, 王闪闪. 黄土丘陵区生物结皮坡面产流产沙与其分布格局的关联. 生态学报, 2021, 41(4): 1381-1390.
- [ 38 ] 张淑兰, 张海军, 王彦辉, 于澎涛, 徐丽宏, 熊伟. 泾河流域上游景观尺度植被类型对水文过程的影响. 地理科学, 2015, 35(2): 231-237.
- [ 39 ] Tian X J, Zhao G J, Mu X M, Zhang P F, Tian P, Gao P, Sun W Y. Hydrologic alteration and possible underlying causes in the Wuding River, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133556.
- [ 40 ] 周伟, 官炎俊, 刘琪, 范彦波, 白中科, 师学义, 胡业翠, 黄雨哈, 白东升. 黄土高原典型流域生态问题诊断与系统修复实践探讨——以山西汾河中上游试点项目为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8817-8825.
- [ 41 ] 易扬, 信忠保, 覃云斌, 肖玉玲. 生态植被建设对黄土高原农林复合流域景观格局的影响. 生态学报, 2013, 33(19): 6277-6286.
- [ 42 ] 王根绪, 刘桂民, 常娟. 流域尺度生态水文研究评述. 生态学报, 2005, 25(4): 892-903.