

# 干旱区流域土地利用变化对基流的影响

杨倩楠<sup>1</sup>, 高海东<sup>1</sup>, 李占斌<sup>1,2</sup>, 王杰<sup>1</sup>

(1. 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地 西安理工大学, 西安 710048;

2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**基流是干旱区最重要的枯季水文特征之一,在维持河川径流和维护流域生态安全等方面具有重要意义。基于宁夏清水河流域上游1980年、1995年、2000年、2013年四期土地利用数据及原州水文站1984—2014年日径流资料,采用枯季径流分割法进行了基流分割,分析了流域基流、基流指数与景观格局指数之间的相关关系,研究了流域景观格局变化对基流的作用。结果表明:(1)30年中,草地是清水河上游的主导性景观类型。流域景观多样性随时间的推移逐渐增加,整体向好;(2)1984—2014年,清水河上游径流量呈显著减少趋势( $p < 0.01$ ),基流量呈极显著减少趋势( $p < 0.001$ );(3)景观格局指数与基流量的关系较径流量密切,基流量与面积加权平均形状指数(SHAPE-AM)、斑块结合度(COHESION)、最大斑块指数(LPI)、斑块丰富度密度(PRD)、周长—面积分维数(PAFRAC)这5个指标的相关性较高,其中与SHAPE-AM、COHESION、LPI呈显著正相关,与PRD、PAFRAC呈显著负相关。研究结果可为清水河上游流域生态建设提供科学依据。

**关键词:**基流;景观格局;土地利用;清水河上游;干旱区

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)03-0317-06

## Effects of Land Use Change in Watershed on Base flow in Arid Area

YANG Qiannan<sup>1</sup>, GAO Haidong<sup>1</sup>, LI Zhanbin<sup>1,2</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Base flow is one of the most important hydrological characteristics of river in arid area during dry season, and has vital functions in keeping runoff and conserving ecology safety. Based on the four stages land use data (1980, 1995, 2000, 2013) in the upstream of Qingshuihe River watershed, and daily runoff data from Yuanzhou Hydrological Station during 1984—2014, this study segmented the base flow by using dry season runoff segment method. Furthermore, we analyzed the relationship among base flow, base flow index, and landscape indices. We also clarified the landscape change effects on base flow. The results showed that: (1) grassland was the main landscape of the upstream from 1984 to 2014, and the biodiversity of the watershed increased with time; (2) runoff magnitude of upstream significantly decreased during 30 years, but the decreased scope of runoff was more significant than base flow; (3) the relationship between landscape indices and base flow was better than runoff. Among five landscape indices, significant positive correlations were obtained between base flow and SHAPE-AM, COHESION, LPI, but significant negative correlations were found between base flow and PRD, PAFRAC.

**Keywords:** base flow; landscape index; land use; upstream of Qingshuihe watershed; arid area

景观格局是自然因素和人类活动共同作用的结果,而人类活动的影响主要表现在土地利用变化对景

观格局演变的驱动<sup>[1]</sup>。景观的空间配置与类型组成影响水循环,从而影响流域的水文过程<sup>[2-3]</sup>。从景观

生态学角度探讨流域水文过程对景观变化的响应,能够揭示人类活动对流域水沙的影响<sup>[4]</sup>。近年来,大量关于景观格局变化对水文过程影响的研究表明,人类活动通过改变土地利用空间结构,引起流域水文循环发生变化,进而改变径流过程,并引发诸多生态环境问题<sup>[5-9]</sup>。

基流作为河川径流重要组成部分,是河川径流中较为稳定的径流组分,是枯水期河川径流的主要补给源<sup>[10]</sup>。基流不仅对维持河川径流稳定具有重要作用,而且在流域水资源开发利用、优化配置及生态环境良性发展等方面具有重要的意义<sup>[11-12]</sup>。对于以降水补给为主的西北干旱区河流,基流在枯水期维持径流稳定方面发挥的作用更为显著<sup>[13]</sup>。因此,干旱区基流研究一直以来是水文学研究的热点。陈利群等<sup>[14]</sup>应用滤波法和改进的加里宁法对比分析了黄河源区的基流量,结果表明源区枯季的河川径流基本上是由基流组成。Ahiablame等<sup>[15]</sup>应用递归数字滤波技术分割基流,并用基流、土地利用和流域地理特征资料建立回归模型,预测了美国印第安纳无资料地区的基流和基流指数(年基流量占年总径流量的比重,简称BFI)。Santhi等<sup>[16]</sup>研究显示,基流的时空变化与气候、地形、景观和地理特征有关,用递归数字滤波法从日径流资料中分割出的基流和基流指数可以用来分析径流对水文景观带的响应,建立多元回归分析模型。然而,基流与景观格局之间相互作用关系的研究报道仍相对较少。

清水河作为黄河的一级支流,是宁夏南部的重要产水区域<sup>[17]</sup>,探讨区域基流变化,对该流域水资源的开发利用具有重要意义。基于此,本文以宁夏清水河流域上游1980年、1995年、2000年、2013年四期土地利用数据及原州水文站1984—2014年日径流资料为基础,分析了基流总体变化趋势、景观格局的变化特征以及基流与景观格局之间的关系。在水资源短缺和水土流失严重的黄土干旱区开展此类研究,有助于认识干旱区水文循环特征及其转化关系,可为更加客观全面地评价区域生态环境质量,合理配置区域土地资源及综合治理生态环境提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

原州水文站位于东经106°16′23.5″,北纬35°57′20.9″,地处清水河上游,属干旱黄土丘陵区域代表站,集水面积105 km<sup>2</sup>。研究区年平均水面蒸发量870 mm,多年平均输沙模数2 500 t/km<sup>2</sup>,泥沙同暴雨主要集中在7

月、8月。径流的特点是年内分配不均,不仅有丰枯交替的特点,而且存在连续干旱的情况。径流与降水的年内变化关系十分密切,70%的降水集中在6—9月,7月份径流量最大,占20%,非汛期(1—4月,10—12月)径流量之和占年径流量的35.4%。

### 1.2 数据来源

径流数据来源于黄土高原生态环境数据库(<http://www.loess.csdb.cn>)以及黄河流域水文资料。土地利用数据来源于中国1:10万土地利用数据库共4期,在Landsat TM和中国环境1号卫星(HJ-1)影像的基础上,采用人机交互解译获得。土地利用一级类型综合评价精度达94.3%以上,二级类型分类综合精度达91.2%以上<sup>[18]</sup>。

为增强景观变化指标讨论的科学性和可操作性,本研究对土地利用分类中的二级地类进行合并,形成六大类土地类型,即耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地。建立了景观类型GIS数据库。随后运用ArcGIS 9.3,在Spatial Analyst空间分析模块支持下,将土地利用矢量数据转换为30 m分辨率的栅格数据,以备分析使用。

### 1.3 分析方法

1.3.1 基流分割 由于不同河流之间径流特征相差较大,导致采用的基流计算方法也有所区别。本研究采用枯季径流分割法<sup>[19]</sup>对基流进行分割。具体方法:月径流量最小的3个月(即最枯3个月)乘以4,得到年基流量。

1.3.2 景观格局指数计算 应用景观格局分析软件FRAGSTATS 4.2,对流域的土地利用景观空间格局特征参数进行分析,并计算相关的景观指标。由于FRAGSTATS计算的50多种景观指标可被分为3组级别,分别代表3种不同的应用尺度:(1)斑块级别:反映景观中单个斑块的结构特征,是计算其他级别景观格局指数的基础;(2)类型级别:反映景观中不同斑块类型的结构特征;(3)景观级别:反映景观的整体结构特征。因此,本研究选取斑块个数(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、周长—面积分维数(PAFRAC)、蔓延度指数(CONTAG)、斑块结合度(COHESION)、景观分割度(DIVISION)、Shannon多样性指数(SHDI)等12个指标,分析清水河流域上游景观格局变化特征。上述指标分别可反映斑块的面积、密度、邻近度、多样性和聚散性,各指数的具体计算方法与地学意义见表1<sup>[20]</sup>。

1.3.3 统计分析 相关分析和回归分析均在SPSS 16.0软件下实现,趋势分析由Mann-Kendall突变检验实现。

表 1 景观格局指数计算公式及其生态学意义

景观格局指数		计算公式	物理意义	地学意义
斑块个数	NP=N		$N$ 为整个景观的斑块总数(个)	斑块总数越多,说明破碎化程度越高。影响产流和坡面汇流
斑块密度	$PD=\frac{1}{A}\sum_{j=1}^M N_j$		$M$ 为研究范围内某空间分辨率上景观要素类型总数; $A$ 为研究范围内景观总面积	斑块密度增大,景观趋于破碎化。裸露斑块增加导致植被斑块破碎化,覆盖率降低。植被覆盖率与产流产沙呈负相关关系
斑块丰富度密度	$PRD=\frac{m}{A}$		$m$ 为景观类型的数目; $A$ 为研究范围内景观总面积	反映斑块类型的多样性。斑块越丰富,景观越稳定,抵抗外界干扰的能力越强
最大斑块指数	$LPI=\frac{\text{Max}(a_1,a_2,\dots,a_n)}{A}\times 100$		$a_i$ 为斑块 $i$ 的面积, $A$ 为景观总面积	其值变化可以改变干扰的强度和频率,反映人类活动的方向和强弱
景观形状指数	$LSI=\frac{0.25E}{\sqrt{A}}$		$E$ 为斑块周长, $A$ 是斑块面积	不仅包含单个斑块的形状信息,也包含不同斑块之间的分散和聚集信息
周长—面积分维数	$PAFRAC=\frac{\frac{2}{(n_i\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^n(\ln P_{ij}\times\ln A_{ij}))-(\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^n\ln P_{ij})(\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^n\ln A_{ij}))}}{(n_i\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^n\ln P_{ij}^2)-(\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^n\ln P_{ij})}}{}$		$P_i$ 为 $i$ 类型在整个景观中所占的比例, $g_{ik}$ 为 $i$ 和 $k$ 类型中相邻的斑块数, $m$ 为总景观类型的数目	其值越大表示斑块类型的形状越复杂,斑块破碎程度越高。产流、产沙斑块和径流、泥沙阻滞斑块形状的复杂化对斑块的有效集水、产沙面积和水文连续性产生影响,从而对侵蚀产沙有影响
蔓延度指数	$CONTAG=\left[1+\frac{\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^n(p_i)^{\frac{g_{ik}}{m}}\times\ln(p_i)^{\frac{g_{ik}}{m}}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}\sum_{k=1}^m g_{ik}}\right]\times 100$		$M$ 为斑块类型总数, $P_{ij}$ 为随机选择的两个相邻栅格细胞属于类型 $i$ 和 $j$ 的概率	景观里不同斑块类型的团聚程度或延展趋势
斑块结合度	$COHESION=\left[1-\frac{\sum_{j=1}^m P_{ij}}{\sum_{j=1}^m P_{ij}\sqrt{a_{ij}}}\right]\left(1-\frac{1}{\sqrt{A}}\right)^{-1}\times 100$		$P_{ij}$ 为 $ij$ 斑块周长, $a_{ij}$ 为 $ij$ 块面积, $A$ 为景观总面积	某一种斑块类型和周围相邻斑块类型的空间连接程度
景观分割度	$DIVISION=\left[1-\frac{\sum_{j=1}^n(a_{ij})}{A}\right]$		$a_{ij}$ 为第 $i$ 类景观, $j$ 斑块的面积, $A$ 为总面积	景观的破碎化程度影响产流和坡面汇流
香农多样性指数	$SHDI=\frac{-\sum_{i=1}^m(P_i\ln P_i)}{\ln m}$		$P$ 为斑块类型所占景观总面积的比例, $i$ 为斑块个数	景观中各类斑块的复杂性和变异性(即景观异质性),强调稀有斑块类型对信息的贡献
辛普森多样性指数	$SIDI=1-\sum_{i=1}^m P_i^2$		$P_i$ 为斑块类型所占景观总面积的比例	用于判断群落物种多样性,随机取样的两个个体属不同种的概率,群落中种数越多,各种个体分配越均匀,指数越高,表示群落多样性越好。中稀有物种所起的作用较小,而普遍物种所起的作用较大
面积加权平均 斑块形状指数	$SHAPE\_AM=\sum_{j=1}^n\left[x_{ij}\left(\frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}}\right)\right]$		$X$ 为景观中所用斑块对应斑块指数值, $a_{ij}$ 为第 $i$ 类景观, $j$ 斑块的面积	SHAPE_AM最小值为1,并随着景观形状的不规则性增加而增加,没有上限。当其值为1时,表示所有斑块均为正方形。当其值增大时说明斑块形状变得更复杂,更不规则。是度量景观空间格局复杂性的重要指标之一,并对许多生态过程都有影响

2 结果与分析

2.1 土地利用与景观格局分析

2.1.1 土地利用年际变化与转换特征 研究区草地面积所占比例最大(52.87%~57.25%),其次为耕地(30.2%~32.05%),未利用土地面积占地最小,仅为0.34%。此外,1980—1995年,草地中有50.12 km<sup>2</sup>的低覆盖度草地转化为中覆盖度草地;1995—2013年,各地类转化均不明显。

1980—2000年,清水河上游占最大比例的景观为草地,为55.76 km<sup>2</sup>,其次为耕地,为31.85 km<sup>2</sup>。在这20 a中,流域内草地面积变化最剧烈,减少了4.63 km<sup>2</sup>,其中草地转化为耕地1.96 km<sup>2</sup>,草地转化为林地2.67 km<sup>2</sup>。其余耕地、林地、水体、建筑用地、未利用土地均未发生变化(表2)。

2000—2013年,清水河上游占最大比例的景观仍是草地,为54.32 km<sup>2</sup>,比1980—2000年略有减少;其次是耕地,为32.10 km<sup>2</sup>,比上一时期略有增加。耕地面积增加的结果就是灌溉用水量增加,由此引起地表径流直接减少,以及因蒸散发引起地下水量减少。这样间接表明,流域景观格局变化会在一定程度上改变径流量和基流量以及二者的变化特征(表3)。

在这13 a中,流域内耕地面积变化最剧烈,共转出1.71 km<sup>2</sup>,其中耕地转化为草地0.57 km<sup>2</sup>,耕地转化为水体0.19 km<sup>2</sup>,耕地转化为建筑用地0.95 km<sup>2</sup>。其次为草地,从2000—2013年,草地转出面积为1.45 km<sup>2</sup>,草地转化为耕地的面积达1.35 km<sup>2</sup>,转化为水体的面积仅为0.01 km<sup>2</sup>。最小的是水体,共转出0.09 km<sup>2</sup>,其中,水体转化为耕地0.03 km<sup>2</sup>,转化为草地0.06 km<sup>2</sup>。地类之间存在相互转换,互为补给源,转出面积大于补给面积,地

类面积减少,反之,地类面积增加。

表 2 1980—2000 清水河上游控制流域土地利用  
类型转移矩阵 km<sup>2</sup>

土地利用 类型	2000 年					
	耕地	林地	草地	水体	建筑 用地	未利 用地
1980 年	耕地	31.85	0.00	0.00	0.00	0.00
	林地	0.00	10.89	0.00	0.00	0.00
	草地	1.96	2.67	55.77	0.00	0.00
	水体	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00
	建筑用地	0.00	0.00	0.00	0.00	1.45
	未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36

2.1.2 土地利用景观格局 1980 年、1995 年、2000 年、2013 年 4 个时期清水河上游控制流域景观格局指数,计算结果见表 4。随着年份的增加,清水河上游控制流域斑块数(NP)先减少后增加,总体斑块个数呈增加趋势,表明景观趋于破碎化。相应的斑块结合度(COHESION)开始基本保持不变随后减小,说明其空间分布由稳定到离散,破碎化程度加大。而蔓延度指数(CONTAG)则呈现为先增加后减少的趋势,

表 4 清水河上游控制流域景观格局指数年际变化特征

时期	NP/个	PD/ (个·hm <sup>-2</sup> )	LPI/%	LSI	PAFRAC	CONTAG/%	COHESION/%	DIVISION	SHDI
1980	181	1.72	46.75	15.51	1.34	63.09	99.44	0.77	1.35
1995	182	1.73	45.87	15.57	1.35	64.93	99.42	0.77	1.27
2000	179	1.70	46.75	15.52	1.35	65.00	99.44	0.77	1.27
2013	190	1.80	29.15	15.69	1.36	60.95	99.05	0.89	1.51

在众多景观格局指数中,4 个时期 DIVISION 值均大于等于 0.75,属于中等偏上水平,即分割度均处于中等偏上水平;SHDI 值均大于 1.27,说明研究区内土地利用丰富,且各斑块类型分布状况相对均衡。1980—2013 年间各景观格局指数相对稳定,但 SHDI 在 2013 年有略微增大趋势,说明近年来控制流域内景观多样性逐渐增加,整体向好。总之,由于人为活动对流域影响越来越大,景观类型趋于规则、高连通和高度聚集的方向发展。

2.2 年径流量、基流量及基流指数变化特征

在 1984—2014 年中(图 1),年径流量的变化范围为 0.95~81.33 亿 m<sup>3</sup>,多年平均径流量为 19.80 亿 m<sup>3</sup>;其中 1992 年达到最大值,为 81.33 亿 m<sup>3</sup>;2009 年最小,仅为 0.95 亿 m<sup>3</sup>。基流量占径流量的比例较小,多年平均基流量为 1.74 亿 m<sup>3</sup>。上述结果表明,清水河上游年径流量变化较大,其 C<sub>v</sub> 值为 0.73,波动性比较大。相对于径流,基流的 C<sub>v</sub> 值仅为 0.57,则相对稳定。

对于 BFI 而言,其变化范围为 0.01~0.16,多年平均 BFI 值为 0.10。较低的 BFI 值表明基流量占总径流量的

说明在 2000 年景观连通性较高,空间分布较均匀。最大斑块指数(LPI)先减少后增加再减少。另外,景观形状指数(LSI)的先增后减再增,但总体变化不大,表明斑块受到人为活动干扰程度有大有小,但斑块形状未发生较大变化,而这一行为也导致了周长—面积分维数(PAFRAC)基本保持不变。香农多样性指数(SHDI)先减小后增大,总体呈增加趋势,说明斑块类型趋于多样化,景观丰富度增加。

表 3 2000—2013 年清水河上游控制流域土地利用  
类型转移矩阵 km<sup>2</sup>

土地利用 类型	2013 年					
	耕地	林地	草地	水体	建筑 用地	未利 用地
2000 年	耕地	32.10	0.00	0.57	0.19	0.95
	林地	0.00	13.57	0.00	0.00	0.00
	草地	1.35	0.00	54.32	0.10	0.00
	水体	0.03	0.00	0.06	0.44	0.00
	建筑用地	0.00	0.00	0.00	0.00	1.45
	未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36

比值较小,从侧面反映出清水河上游流域径流量主要来自于大气降水,地下水对径流的补给有限。尤其在 2009 年,径流量仅为 0.95 亿 m<sup>3</sup>,基流量仅为 0.10 亿 m<sup>3</sup>。

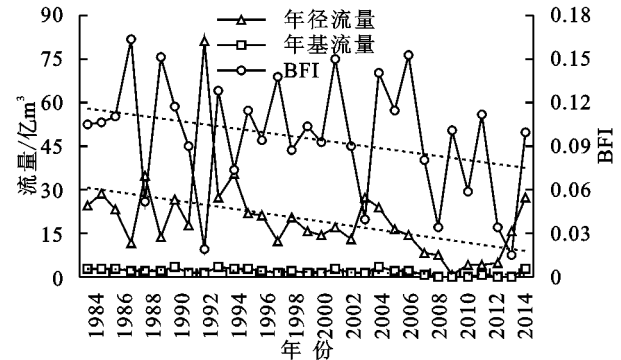


图 1 1984—2014 年清水河上游年径流量、  
年基流量和 BFI 年际变化特征

清水河流域近 30 a 的径流及基流均呈下降趋势。Mann-Kendall 趋势检验表明径流量呈显著减少趋势( $p < 0.01$ ),基流量呈极显著减少趋势( $p < 0.001$ ),径流量在 2009 年发生突变。径流量的变化过程大致经历了 3 个阶段,1980—2006 年为径流波动期,2007—2012 年为枯水期,2013 年及以后为径流增加期。

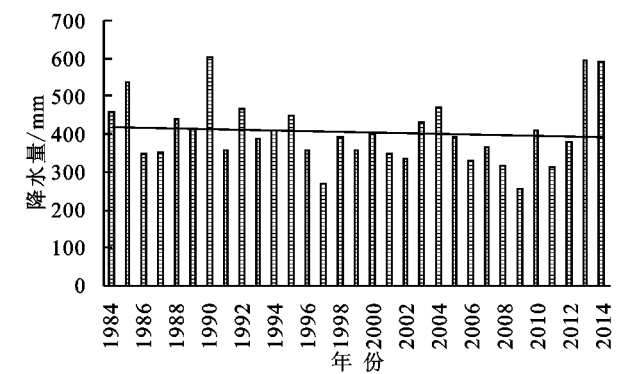


图 2 1984—2014 年清水河上游年降水量变化特征

从图 2 的趋势线可以看出,2007—2012 年,清水河上游年降水量并无明显减少。因此,本研究认为,造成清水河上游年径流量出现 3 个阶段变化的主要原因不是降水,而与流域内土地利用阶段性变化引起的水资源利用有关<sup>[21]</sup>。其原因包括两方面:首先,

指标	景观格局指数							
	SHAPE_AM	COHESION	SIDI	LPI	CONTAG	PRD	PAFRAC	NP
径流量	0.661	0.667	−0.620	0.667	0.468	−0.673	−0.808	−0.573
基流量	0.853 *	0.858 *	−0.816 *	0.858 *	0.663	−0.864 *	−0.879 *	−0.766
基流指数	0.911 *	0.912 *	−0.890 *	0.913 *	0.812 *	−0.916 *	−0.831 *	−0.864 *

注: \* 代表在 0.05 水平下显著。

对比表 6 和表 7 的回归方程,SHAPE\_AM,COHESION,CONTAG,LPI 这 4 个指数与基流量、基流指数回归得到的线性回归方程斜率均大于 0,说明这 4 个指数与基流量、基流指数呈显著正相关( $p<0.05$ ),景观格局指数值越大,则基流量和基流指数值越大。而 SIDI,PRD,NP 和 PAFRAC 这 4 个指数与基流量、基流指数回归得到的线性方程斜率小于 0,说明其与基流指数呈显著负相关( $p<0.05$ ),景观格局指数值越大,则基流量和基流指数值越小。

表 6 基流量与景观格局指数回归分析			
景观格局指数 LIs	回归方程	$R^2$	Sig.
SHAPE_AM	$y=0.624x-4.087$	0.728	0.030 *
COHESION	$y=4.940x-489.016$	0.734	0.029 *
SIDI	$y=-25.427x+18.677$	0.640	0.056
LPI	$y=0.111x-3.003$	0.736	0.029 *
CONTAG	$y=0.401x-23.816$	0.440	0.150
PRD	$y=-205.829x+21.708$	0.747	0.026 *
PAFRAC	$y=-216.395x+293.893$	0.772	0.021 *
NP	$y=-0.179x+34.357$	0.586	0.076

注: \* 代表在 0.05 水平下显著。

基流指数与景观格局指数回归方程的决定系数均在 0.66 以上,且均达到显著水平(表 7)。但与表 6 具有相似变化规律的是,表 7 中仍以 SHAPE\_AM,COHESION,LPI,CONTAG 这 4 个指数与基流的回归方程斜

2000 年以后,耗水型地类面积增大,如低覆盖度草地转化成中覆盖度草地,约转化 8.6 km<sup>2</sup>,导致流域用水量增加。其次,2000 年以前,流域内水域面积有所减少,为保持水域面积稳定,2000 年以后,流域通过增加径流拦蓄,使得流域的水域面积反较 2000 年前有所增大。正因为上述两方面原因,导致流域径流量在 2006—2013 年期间较多年平均值明显减少。

2.3 景观与基流关系分析

景观格局指数综合了景观的阻滞能力及地理位置,反映了水土流失的潜在危险<sup>[21]</sup>。因此,径流向下游运移时,会受到景观空间格局的阻滞。为进一步研究景观格局对水的影响,我们对径流量、基流量和景观格局指数分别进行 Pearson 相关分析。相比于径流量,基流量、基流指数与景观格局指数的相关性更好(表 5)。

率大于 0,而其余 4 个指数与基流的回归方程斜率小于 0。这说明 SHAPE\_AM,COHESION,LPI,CONTAG 对促进基流产生具有积极作用,而 SIDI,PRD,PAFRAC 和 NP 则对基流产生具有抑制作用。

表 7 基流指数与景观格局指数回归分析			
景观格局指数 LIs	回归方程	$R^2$	Sig.
SHAPE_AM	$y=0.023x-0.136$	0.830	0.012 *
COHESION	$y=0.185x-18.283$	0.832	0.011 *
SIDI	$y=-0.995x+0.756$	0.792	0.018 *
LPI	$y=0.004x-0.085$	0.834	0.011 *
CONTAG	$y=0.017x-1.007$	0.660	0.049 *
PRD	$y=-7.673x+0.837$	0.839	0.010 *
PAFRAC	$y=-7.2x+9.812$	0.691	0.040 *
NP	$y=-0.007x+1.388$	0.746	0.027 *

注: \* 代表在 0.05 水平下显著

线性方程的斜率代表了自变量与因变量之间的变化速率。对比表 6 和表 7 发现,回归方程斜率最大的景观格局指数均为 COHESION,SIDI,PRD 和 PAFRAC 共 4 个指数,其中,PRD 和 PAFRAC 的斜率最大,说明这两个指数对基流的影响最为显著。PRD 和 PAFRAC 值越大,表示流域内斑块密度越大,斑块类型的形状越复杂,说明流域的破碎化程度越高,空间异质性越强。在此条件下,流域内景观格局对径流的利用及分配作用增强。

### 3 讨论

(1) 在以草地为主导的清水河流域上游,虽然流域土地利用景观格局与径流量相关性不强,但与基流量及基流指数相关性显著,证明地表径流和地下径流两个水文过程不仅存在关系密切的一面,也存在相对独立的一面<sup>[22]</sup>。在众多景观格局指标中,SHAPE\_AM,COHESION,LPI,CONTAG 与基流及其基流指数呈显著正相关,SIDI,PRD,PAFRAC 和 NP 则与流域基流及基流指数呈显著负相关。景观格局对流域基流具有较强的调控作用。

(2) 清水河流域上游草地和耕地的破碎度较高,斑块形状也较复杂,林地、建设用地分布趋于集中化,破碎度减小,形状趋于简单化。在景观水平上,虽然草地仍为主导性的土地利用景观格局,但耕地和林地的面积略有增加。虽然清水河流域内草地景观斑块类型面积较大,但该斑块类型以低覆盖度草地为主,由降雨产生的径流大部分被拦蓄利用<sup>[23]</sup>,而非下渗进入土体形成基流。由于植被恢复引起的水分消耗<sup>[24]</sup>,导致研究区河道径流与基流均相应减少。

(3) 随斑块密度和周长—面积分维数增大,流域内景观格局被分割的破碎化程度越高,斑块类型的形状越复杂,空间异质性程度越强。这说明在流域生态环境治理中,不仅要重视流域景观承载能力,还要关注斑块类型之间的延展性和连接度,避免斑块过度破碎所引起的负面生态效果<sup>[25-26]</sup>。在流域生态建设中,不仅要注重景观类型的均一化程度,还要重视景观格局对水文过程的响应,应寻求合理的景观格局配置,进而提高流域的生态系统稳定性<sup>[27]</sup>。

### 4 结论

(1) 1980—2000 年、2000—2013 年两个时期内,整个流域面积最大的景观均为草地,但在这两个时期转移面积最大的分别是草地、耕地,相应的转移总面积分别为 4.63 km<sup>2</sup>,1.71 km<sup>2</sup>,分别主要是由草地转移成林地、耕地转移成草地,转移量分别为 2.67 km<sup>2</sup>,0.57 km<sup>2</sup>。

(2) 近三十年原州流域径流量呈减小趋势,基流量变化幅度很小。BFI 值较小表明,基流量占总径流量的比值很小,说明清水河河道径流主要来自地表径流,基流的贡献很小。

(3) 基流量与景观格局指数相关性明显高于径流量,说明原州流域景观格局变化主要与基流有关。SHAPE\_AM,COHESION,LPI,PRD,PAFRAC 这 5 个指标与基流量回归分析结果表明,在基流量比较稳定的条件下,流域景观格局也逐渐达到稳定状态。

虽然流域内不同土地利用之间发生转移,但转移面积均较小,在 0.01~2.67 km<sup>2</sup> 之间,发生转移的土地利用类型比较固定,为草地、耕地、水体。

#### 参考文献:

- [1] 傅伯杰,陈利顶,马克明,等.景观生态学原理及应用[M].北京:科学出版社,2001.
- [2] 林炳青,陈兴伟,陈莹,等.流域景观格局变化对洪枯径流影响的 SWAT 模型模拟分析[J].生态学报,2014,34(7):1772-1780.
- [3] Cai T, Li Q, Yu M, et al. Investigation into the impacts of land-use change on sediment yield characteristics in the upper Huaihe River basin, China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2012, 53: 1-9.
- [4] 李莹,黄岁樑.滦河流域景观格局变化对水沙过程的影响[J].生态学报,2017,37(7):1-13.
- [5] 王郎,徐延达,傅伯杰,等.半干旱区景观格局与生态水文过程研究进展[J].地球科学进展,2009,4(11):1238-1246.
- [6] 杨国靖,肖笃宁,周立华.祁连山区森林景观格局对水文生态响应的影响[J].水科学进展,2004,5(4):691-698.
- [7] Chen Y, Xu Y, Yin Y. Impacts of land use change scenarios on storm-runoff generation in Xitiaoxi basin, China[J]. Quaternary International, 2009, 208(1): 121-128.
- [8] Giannini A, Biasutti M, Verstraete M M. A climate model-based review of drought in the Sahel: Desertification, the re-greening and climate change[J]. Global & Planetary Change, 2008, 64(3/4): 119-128.
- [9] Gebremicael T G, Mohamed Y A, Betrie G D, et al. Trend analysis of runoff and sediment fluxes in the Upper Blue Nile basin: A combined analysis of statistical tests, physically-based models and landuse maps [J]. Journal of Hydrology, 2013, 482(9): 57-68.
- [10] 陈利群,刘昌明,郝芳华,等.黄河源区基流变化及影响因素分析[J].冰川冻土,2006,8(2):141-148.
- [11] Eckhardt K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352: 168-173.
- [12] 王雁林,王文科,钱云平,等.黄河河川基流量演化规律及其驱动因子探讨[J].自然资源学报,2008,23(3): 479-486.
- [13] 蓝永超,康尔泗.河西内陆干旱区主要河流出山径流特征及变化趋势分析[J].冰川冻土,2000,22(2):147-152.
- [14] 陈利群,刘昌明,李发东.基流研究综述[J].地理科学进展,2006,25(1):1-15.
- [15] Ahiablame L, Chaubey I, Engel B, et al. Estimation of annual baseflow at ungauged sites in Indiana USA [J]. Journal of Hydrology, 2013, 476: 13-27.

- [4] 徐新良,曹明奎,李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J]. 地理科学进展,2007,26(6):1-10.
- [5] 张文华,贾志斌,卓义,等. InVEST 模型对锡林郭勒草原碳储量研究的适用性分析[J]. 地球环境学报,2016,7(1):87-96.
- [6] 修珍珍,王斌,杨校生,等. 基于 InVEST 模型估算富阳市森林生态系统碳储量[J]. 广西植物,2016,36(7):868-874.
- [7] 荣月静,张慧,赵显富. 基于 InVEST 模型近 10 年太湖流域土地利用变化下碳储量功能[J]. 江苏农业科学,2016,44(6):447-451.
- [8] 吴佩君,刘小平,黎夏,等. 基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估:以广东省为例[J]. 地理与地理信息科学,2016,32(5):22-28.
- [9] 汪小平,周宝同,王小玉,等. 重庆市土地利用变化及其生态系统服务价值响应[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2009,34(5):225-229.
- [10] 张云倩,张晓祥,陈振杰,等. 基于 InVEST 模型的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化研究[J]. 水土保持研究,2016,23(3):100-105.
- [11] 揣小伟,黄贤金,郑泽庆,等. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J]. 资源科学,2011,33(10):1932-1939.
- [12] 王绍强,罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨[J]. 地理科学进展,1999,18(3):238-244.
- [13] 田多松,傅碧天,吕永鹏,等. 基于 SD 和 CLUE-S 模型的区域土地利用变化对土壤有机碳储量影响研究[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(4):613-620.
- [14] 奚小环,张建新,廖启林,等. 多目标区域地球化学调查与土壤碳储量问题:以江苏、湖南、四川、吉林、内蒙古为例[J]. 第四纪研究,2008,28(1):58-67.
- [15] 解宪丽. 基于 GIS 的国家尺度和区域尺度土壤有机碳库研究[D]. 南京:南京师范大学,2004.
- [16] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报,2000,24(5):518-522.
- [17] 王绍强,周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. 地理研究,1999,18(4):349-356.
- [18] 王绍强,周成虎,李克让,等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报,2000,55(5):533-544.
- [19] 李克让,王绍强,曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学,2003,33(1):72-80.
- [20] 遇蕾,任国玉. 全新世中国陆地生态系统碳储量变化的估算[J]. 气候变化研究进展,2008,4(1):12-16.
- [21] 黄小辉,唐小荃,邵呈龙,等. 重庆市森林植被碳储量及其地理分布格局[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2012,37(1):82-87.
- [22] 孟祥江,周恺. 基于森林资源 2 类调查数据的重庆市森林碳储量估算研究[J]. 安徽农业科学,2013,41(27):11038-11040.
- [23] 王鹏程,邢乐杰,肖文发,等. 三峡库区森林生态系统有机碳密度及碳储量[J]. 生态学报,2009,29(1):97-107.
- [24] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等. InVEST 模型及其应用的研究进展[J]. 热带农业科学,2013,33(4):58-62.
- [25] 韩晋榕. 基于 InVEST 模型的城市扩张对碳储量的影响分析[D]. 长春:东北师范大学,2013.

~~~~~

(上接第 322 页)

- [16] Santhi C, Allen P M, Muttiah R S, et al. Regional estimation of base flow for the conterminous United States by hydrologic landscape regions[J]. Journal of Hydrology, 2008,351(1/2):139-153.
- [17] 周飞. 固原市原州区清水河流域水资源综合评价[J]. 安徽农业科学,2011,39(35):21950-21951.
- [18] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报,2014,69(1):3-14.
- [19] 梁四海,万力,张建锋,等. 黄河源区枯季基流的周期变化规律与成因[J]. 自然科学进展,2007,17(9):1222-1228.
- [20] 邬建国. 生态学一格局、过程、尺度与等级[M]. 北京:高等教育出版社,2000:100-108.
- [21] 刘宇,吴炳方,曾源,等. 耦合过程和景观格局的土壤侵蚀水环境影响评价[J]. 应用生态学报,2013,24(9):2581-2589.
- [22] 党素珍,王中根,刘昌明. 黑河上游地区基流分割及其变化特征分析[J]. 资源科学,2011,33(12):2232-2237.
- [23] 高春河. 固原市原州区水土保持生态环境建设现状及治理方向[J]. 科技资讯,2009(16):139-139.
- [24] 张清云,王宁庚,杨朝霞,等. 宁夏中部干旱带沙地人工甘草不同种植密度土壤水分时空变化及产量性状分析[J]. 水土保持研究,2017,24(1):32-35.
- [25] 黄硕,郭青海. 城市景观格局演变的水环境效应研究综述[J]. 生态学报,2014,34(12):3142-3150.
- [26] 李承桢,信桂新,杨朝现,等. 传统农区土地利用与覆被变化(LUCC)及其生态环境效应[J]. 西南大学学报:自然科学版,2016,38(5):139-145.
- [27] 赵成,顾小华,姜宏雷,等. “三江”流域(云南部分)土地利用变化的生态环境效应研究[J]. 水土保持研究,2016,23(1):240-243.