太子河流域景观格局对流域径流的影响

张 婷[1,2], 张 楠[1], 张 远[1], 冯启言[2]

(1. 中国环境科学研究院 流域水生态保护技术研究室, 北京 100012; 2. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 以太子河流域 1992 和 2001 年的土地利用数据和 17 个水文站点监测的径流数据为基础,借助 GIS 手段,运用景观格局指数分析方法和统计学方法,从景观水平和类型水平两个方面探讨景观格局变化对流域径流的影响。结果表明,太子河流域景观格局对径流过程有显著影响。在景观水平上面积加权平均分维数(FRAC_MN)、邻接度指数中位数(CONTIG_MD)和散布与并列指数(IJI)是影响径流的主要景观因子,其中面积加权平均分维数(FRAC_MN)对径流变化影响的显著性最大。在类型水平上旱地的斑块密度(PD)、旱地和建筑用地的面积加权平均分维数(FRAC_MN)和斑块连接度(COHESION)、林地和旱地的周长面积比变差系数(PARA_CV)和斑块聚集度指数(AI)、建筑用地的邻接度指数中位数(CONTIG_MD)和散布与并列指数(IJI)是影响径流的主要因子,其中林地的周长面积比变差系数(PARA_CV)和斑块聚集度指数(AI)对径流影响最显著。

关键词: 土地利用; 景观格局; 径流

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2013)05-0165-07 **中图分类号**: X321

Effects of Landscape Patterns on Runoff in Taizi River Basin

ZHANG Ting[1,2], ZHANG Nan[1], ZHANG Yuan[1], FENG Qi-yan[2]

(1. *Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing* 100012, *China*; 2. *School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu* 221116, *China*)

Abstract: 17 hydrological stations located in the Taizi River basin were selected to investigate the relationship between landscape patterns and runoff using Geographic Information System(GIS). Based on landscape patterns(landscape-level and class-level), landscape pattern index analysis and statistical methods were used to analyze the effects of landscape patterns on runoff. Results showed that the influence of landscape patterns on runoff was significant. At landscape level, the mean fractal dimension index(FRAC_MN), the median contiguity index(CONTIG_MD) and the interspersion and juxtaposition index(IJI) were the main pattern indices effectively affecting the runoff change. At class level, the patch diversity of dry land, the mean fractal dimension index(FRAC_MN) and the cohesion(COHESION) of dry land and residential construction land, the perimeter-area ratio variation coefficient(PARA_CV) and aggregation index(AI) of forest land and dry land, the median contiguity index(CONTIG_MD) and interspersion and juxtaposition index(IJI) of residential construction land were the main landscape pattern indices controlling the variation of runoff. Furthermore, the perimeter-area ratio(PARA_CV) and the aggregation index(AI) of forest land were positively related to the change of runoff.

Keywords: land use; landscape pattern; runoff

土地利用变化可改变地表植被的截留量、土壤水分的下渗能力以及地表蒸发,进而影响流域的水文过程[1]。土地利用变化直接导致景观格局的改变,景观格局分析可以有效反映土地利用的空间格局[2]。因此,认识和把握景观格局对流域水文过程的影响,成为流域水资源管理和规划、生态环境的可持续发展以及区域经济建设等领域的核心问题。

早期人们单纯研究区域景观格局特征,未考虑其

收稿日期:2012-10-22 **修回日期**:2012-12-21

资助项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项"全国水生态功能分区方案研究"(2012ZX07501001-01)

作者简介:张婷(1986—),女(汉族),山西省阳泉市人,硕士研究生,主要研究方向为流域水生态保护。E-mail:tingzhang1120@gmail.com。

通信作者:张楠(1980—),男(汉族),北京市人,博士,主要研究方向为流域水生态保护。E-mail:zhangnan@craes.org.cn。

生态水文效应，而景观格局与生态水文过程间存在紧密联系。森林景观的生态水文效应已有大量研究，杨国靖等[3]以祁连山区为研究区域得出森林景观格局对生态水文效应有显著影响，马雪华[4]研究了四川省西部米亚罗高山林区，结果表明以森林为主要景观类型的流域径流量相较于森林覆盖面积少的流域大。但是，单一研究森林植被的生态水文效应是不全面的，应综合考虑研究区内不同景观类型形成的景观格局对水文过程的影响。刘明等[5]就洞庭湖流域中上游地区景观格局变化的水文响应进行了深入研究，表明水田、林地等不同景观类型对水文过程存在较大影响。景观格局与生态水文过程间是相互作用的关系，有学者研究水文过程对景观格局的影响，如李胜男等[6]以黄河三角洲湿地为研究区域分析了水沙变化对区域景观格局演变的影响。随着景观生态学的不断发展，越来越多的研究采用景观格局指数表征景观格局的变化，探索景观格局指数与生态水文效应间的联系，如王计平等[7]应用景观格局指数研究黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响，并从景观水平和斑块类型水平不同景观格局层次进行分析。

近年来，对于景观格局的生态水文效应研究越来越多，但是仍然存在一些问题亟待解决。景观指数的筛选是关键，如何保证所选的景观指数科学全面还需要进一步的研究。针对不同土地利用类型景观格局变化的水文效应研究尚不多见，而不同的土地利用类型对水文过程影响也不尽相同。因此，景观格局生态水文效应研究还需进一步深入和完善。

太子河流域所在的辽中南城市群是我国最重要的经济区和重工业基地之一，工业化和城市化进程快，人口相对集中，人类活动对周围的生态环境造成了严重影响。本文以太子河流域为研究对象，从景观生态学角度出发，运用统计学方法，从景观水平和类型水平两个层次研究景观格局对流域内径流的影响，以求揭示影响流域径流变化的关键影响因素，试图为太子河流域的土地利用和植被结构调整及生态恢复提供理论依据。

1 研究区域

太子河流域地处辽宁省中东部，流经本溪、辽阳、鞍山 3 市，是辽宁省东部较大的河流，干流全长 413 km，流域面积 13 880 km^2。流域地貌呈现东部海拔高多起伏山地，西部海拔低多平原的分布趋势，山地与平原之间以及河谷地区多分布低高地。太子河流域位于我国中高纬度，地处温带大陆性季风气候区，雨热同季，日照多，冬季寒冷期长，春秋季短，东湿西干，平原风大，多年平均气温 2.27～9.99 ℃，降雨量在 655～954 mm。土壤类型主要有棕壤、潮棕壤、棕壤性土、暗棕壤、褐土、钙质粗骨土、草甸土、盐化草甸土、水稻土、淹育水稻土以及盐渍水稻土，植被类型主要包括森林、灌木林、果园以及农作物。流域内土地利用类型主要有林地、草地、旱地、水田、河渠、水库、建筑用地、沼泽，其中，林地、旱地和城镇用地面积比例最大，分别为 57.20%，24.06%和 8.56%。

2 研究方法

2.1 水文数据

水文数据主要来源于水利部水文局存档的辽河流域水文资料中太子河流域 17 个水文站的逐日平均流量资料(1992—2007 年)，其中 1996 年各水文站的逐日平均流量数据缺省。流域径流的变化采用以下 4 个径流指标表征[8-10]：(1) 径流深度：子流域单位面积多年平均产流深度；(2) 径流变差系数：流域断面年径流量的多年离差，反映径流量的年际变化；(3) 最小径流指数：子流域多年平均最小月径流量与年平均月径流量之比；(4) 最大径流指数：多年平均最大月径流量与年平均月径流量之比。最小径流指数和最大径流指数反映径流量的年内变化。

2.2 景观信息提取与指数的选择

以大辽河流域 1992 年和 2001 年的 3 景 Landsat 5 TM 影像为数据源，轨道号 11831，11931 和 11932，在 ENVI 4.4 中对遥感影像进行几何校正、影像拼接和影像截取等预处理后，导入面向对象的遥感解译软件 Definiens Developer 7.0 中。为确保解译结果准确可靠，开展了流域野外实地调查，建立目视解译标志和标准。采用目视解译和邻近分类相组合的人机交互解译方式，进行信息提取，并结合研究区地形图及野外调查情况，对初步解译结果进行修正，得到最终解译结果。

参照全国土地利用分类方法，并结合当地的实际情况，将研究区的土地利用类型分为林地、草地、旱地、水田、河渠、湖泊、水库、滩地、沼泽地、鱼塘、建筑用地和未利用地 12 种类型。

景观指数可定量描述景观格局的空间变化，是研究景观生态学较成熟的指数。为科学全面反映流域景观格局的空间变化特征，本文选取了 15 个景观指数，分别是斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、形状指数标准偏差(SHAPE_SD)、面积加权平均分维数(FRAC_MN)、周长面积比变差系数(PARA_CV)、邻接度指数中位数(CONTIG_MD)、蔓延度指数(CONTAG)、散布与并列指数(IJI)、斑块连接度

(COHESION)、分离度指数(DIVISION)、有效粒度面积(MESH)、丰富度指数(PR)、香农多样性指数(SHDI)、香农均匀性指数(SHEI)、斑块聚集度指数(AI)。所有指数均基于景观分析软件 Fragstats 3.3 进行计算,其生态学意义和计算公式可查阅软件操作说明或书籍[11]。

2.3　子流域的划分

利用太子河流域的水系图,并结合水文站点位置,生成流域边界及不同水文站点对应的 9 个子流域,分别为太子河上游段、太子河中游段、太子河下游段、沙河段、细河段、兰河段、南沙河段、汤河段和海城河段。

2.4　研究方法

针对选取的 15 个景观指数,运用主成分分析方法,筛选出能够替代原有指数的较少景观指数,达到降低景观指数冗余度的目的。借助相关分析揭示景观格局与径流变化间的统计学关系,从景观水平和类型水平两个层次探讨景观格局与径流的关系。由于流域尺度上径流变化对土地利用格局的变化有一定的响应时间段,所以文中对应于 1992 年土地利用格局设置了 1993—2000 年的响应时间段,2001 年的土地利用格局设置 2002—2007 年的响应时间段,以年平均径流变量作为景观格局变化的响应变量。所有数据分析均基于 SPSS 16.0 进行。

3　结果与分析

3.1　主成分分析

对 15 个景观指数进行主成分分析,按照主成分的提取原则,本文提取前 3 个特征值大于 1 的主成分,其累计贡献率为 89.60%。从表 1 可以看出,斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、蔓延度指数(CONTAG)、斑块连接度(COHESION)、丰富度指数(PR)、香农均匀性指数(SHEI)和斑块聚集度指数(AI)在第 1 主成分 PC1 上有较高载荷,面积加权平均分维数(FRAC_MN)、周长面积比变差系数(PARA_CV)、邻接度指数中位数(CONTIG_MD)、和散布与并列指数(IJI)在第 2 主成分上有较高载荷,香农多样性指数(SHDI)在第 3 主成分上载荷较高。形状指数标准偏差(SHAPE_SD)、分离度指数(DIVISION)和有效粒度面积(MESH)在 3 个主成分中载荷较低。说明以上 12 个景观指数(除 SHAPE_SD,DIVISION 和 MESH)基本能够代替原有指标信息。因此,选取以上 12 个景观指数作为景观水平指标,选取 PD,LPI,COHESION,AI,FRAC_MN,PARA_CV,CONTIG_MD 和 IJI 作为类型水平指标分析景观格局变化对流域径流的影响。

表 1　旋转后的因子载荷矩阵

景观指标	PC_1	PC_2	PC_3
PD	0.875	−0.305	0.169
LPI	−0.877	−0.097	−0.077
SHAPE_SD	−0.500	0.759	−0.080
FRAC_MN	−0.127	0.968	0.059
PARA_CV	0.273	0.927	0.059
CONTIG_MD	0.048	0.987	−0.026
CONTAG	−0.900	−0.407	0.000
IJI	0.054	0.986	−0.019
COHESION	0.896	−0.101	0.216
DIVISION	−0.293	0.884	−0.225
MESH	0.814	0.087	0.000
PR	0.878	0.035	0.210
SHDI	0.416	−0.184	0.890
SHEI	0.939	−0.134	−0.151
AI	0.942	−0.151	−0.126

3.2　径流变化

研究了 9 个子流域的径流特征(图 1),其平均径流深度为 104.06～533.68 mm。各子流域的径流年际、年内间有显著变化。各子流域的径流年际变化波动较大,其中汤河段的波动幅度最大,变差系数达 0.969 0。太子河上游段波动相对较小,变差系数为 0.174 5。太子河上游段径流年内变化相对稳定,最小径流指数为 0.607 4,最大径流指数为 1.642 3。海城河段的年内波动最大,最小径流指数为 0.144 5,最大径流指数为 6.118 0。

3.3　流域土地利用类型组成

9 个子流域的土地利用类型组成及比例见表 2。从表 2 中可以看出,不同子流域土地利用类型组成存在较大差异。太子河上游段、太子河中游段、细河段、兰河段、汤河段和海城河段以林地为主要土地利用类型,太子河下游段、沙河段和南沙河以旱地为主要土地利用类型。总体来看,林地、旱地和建筑用地在流域土地利用类型中占主要地位,面积合计 76%～97%。太子河下游段、沙河段和南沙河段的水田面积所占比例相对较大,占 11%～19%,这说明太子河流域的水田主要集中于流域下游北部地区。各子流域中草地面积比例均低于 3%,因此,在后续分析中未考虑草地对径流的影响。其他土地利用类型面积比例均低于 1%,在此未一一列出。

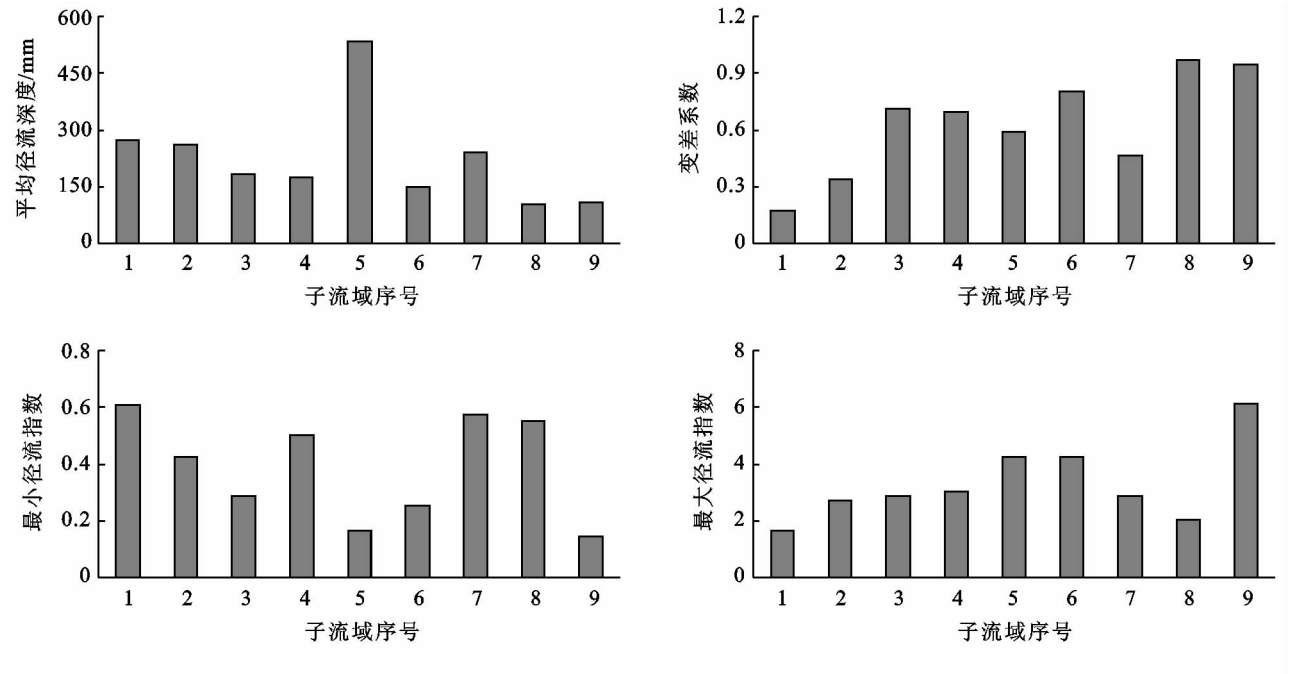


图 1 各子流域径流特征

注:子流域序号中 1,2,3,…,9 分别代表太子河上游段、太子河中游段、太子河下游段、沙河段、细河段、兰河段、南沙河段、汤河段、海城河段。下同。

表 2 子流域主要土地利用类型面积比例 %

子流域	林地	旱地	建筑用地	草地	水田	合计
太子河上游段	80.58	14.10	1.07	1.07	0.75	97.57
太子河中游段	78.14	13.33	4.58	1.13	0.60	97.78
太子河下游段	21.18	42.72	13.22	1.77	11.21	90.10
沙河段	25.95	37.85	12.72	2.09	19.11	97.72
细河段	80.47	13.58	2.96	0.45	0.17	97.63
兰河段	74.36	14.15	2.63	0.70	0.36	92.20
南沙河段	18.90	39.04	22.62	0.04	17.47	98.07
汤河段	75.27	18.21	2.16	0.76	0.23	96.63
海城河段	51.77	30.61	9.55	1.40	4.66	97.99

3.4 景观格局分析

斑块密度(PD)反映景观的破碎化程度,太子河下游段的 PD 较大(表 3),说明该子流域的景观分布较为破碎。最大斑块指数(LPI)度量斑块优势度,LPI 越大,斑块优势度越高,细河段的 LPI 最大,表明斑块优势度突出。各子流域间的分维数(FRAC_MN)和周长面积比(PARA_CV)差异不显著,说明各子流域景观形状的复杂程度相差不大。邻接度指数中位数(CONTIG_MD)表征斑块间的邻近程度,细河段和海城河段的 CONTIG_MD 相对较小,表明景观分散。蔓延度指数(CONTAG)描述斑块的团聚程度,CONTAG 越大,表明斑块分布越集中,散布与并列指数(IJI)描述斑块的分散程度,太子河上游段的 CONTAG 值较大而 IJI 值较小,表明太子河上游段的斑块分布集中,聚集程度高。斑块连接度指数(COHESION)和斑块聚集度指数(AI)的变化趋势与 CONTAG 相一致。细河段的丰富度指数(PR)最小,表明该子流域的斑块数目最少。香农多样性指数(SHDI)和香农均匀性指数(SHEI)均是针对斑块类型而言,SHDI 值越大,表明斑块类型丰富,SHEI 越大,表明各斑块类型分布均匀,不同子流域的 SHDI 和 SHEI 的变化趋势相同。综上所述,细河段斑块类型少,斑块形状简单,分布不集中,景观结构复杂性小,而太子河上游段斑块类型丰富,斑块形状复杂,分布均匀,景观结构相对复杂。

3.5 景观水平格局和径流的关系

将 12 个景观水平指数分别与 4 个径流指标进行相关分析,结果见表 4。从表 4 中可以看出,径流深与

各景观指标间没有显著相关性,变差系数与 FRAC_MN,CONTIG_MD 和 IJI 显著负相关,最小径流指数与 FRAC_MN,CONTIG_MD 和 IJI 呈显著正相关,与 SHDI 呈显著负相关关系,最大径流指数与 FRAC_MN,CONTIG_MD 和 IJI 呈极显著负相关,其中各径流指标与 FRAC_MN 的相关性最大。CONTIG_MD 和 IJI 的大小表明了流域景观的破碎化程度,FRAC_MN和 SHDI 表征景观多样性的大小,由此说明景观的破碎化程度和多样性大小对径流的变化影响较显著。

表 3　各子流域景观格局变化情况

景观指数	太子河上游段	太子河中游段	太子河下游段	沙河段	细河段	兰河段	南沙河段	汤河段	海城河段
PD	0.29	0.36	0.94	0.65	0.36	0.39	0.49	0.34	0.58
LPI	56.23	29.58	6.82	24.31	79.24	31.37	20.99	52.13	38.97
FRAC_MN	1.11	1.11	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.11	1.07
PARA_CV	87.72	84.15	105.56	110.95	65.57	79.26	109.58	85.57	66.57
CONTIG_MD	0.82	0.80	0.85	0.87	0.56	0.65	0.87	0.79	0.50
CONTAG	82.32	79.07	60.70	64.65	77.09	72.79	65.59	79.23	63.92
IJI	35.95	42.28	60.44	48.85	38.87	44.98	46.87	30.62	43.94
COHESION	99.85	99.72	99.15	99.66	99.63	99.36	99.66	99.79	98.94
PR	11.00	10.00	11.00	12.00	8.50	9.00	11.00	11.00	11.00
SHDI	0.69	0.79	1.61	1.49	0.69	0.93	1.43	0.81	1.23
SHEI	0.29	0.34	0.67	0.60	0.32	0.42	0.59	0.34	0.52
AI	96.85	96.42	94.59	94.73	92.07	93.52	95.76	95.94	85.49

表 4　景观水平格局和径流指标的相关分析结果

指 标	PD	LPI	COHESION	PR	SHEI	FRAC_MN	AI
径流深	−0.292	0.201	−0.228	−0.310	−0.432	0.143	−0.442
变差系数	0.240	0.047	−0.039	0.003	0.056	−0.558*	0.062
最小径流指数	−0.268	−0.198	−0.175	−0.036	0.071	0.517*	0.046
最大径流指数	0.191	0.171	0.008	−0.167	0.072	−0.702**	0.090

指 标	PARA_CV	CONTIG_MD	CONTAG	IJI	SHDI
径流深	−0.240	0.275	0.344	0.273	−0.371
变差系数	−0.094	−0.516*	0.270	−0.509*	0.375
最小径流指数	0.243	0.503*	−0.330	0.511*	−0.513*
最大径流指数	−0.271	−0.599**	0.397	−0.606**	0.298

注:* 表示 $p<0.05$;** 表示 $p<0.01$。下同。

3.6　类型水平格局和径流的关系

在太子河流域土地利用类型中,建筑用地、旱地和林地占主导地位,因此,文中选择这 3 种主要的土地利用类型进一步用相关分析方法分析不同类型水平格局与径流指标间的关系(表 5)。

(1) 建筑用地。从表 5 可以看出,径流深度仅与 CONTIG_MD 显著负相关,变差系数与 FRAC_MN 和 COHESION 显著负相关,最小径流指数与 FRAC_MN,CONTIG_MD 和 COHESION 显著正相关,与 IJI 显著负相关,最大径流指数与 FRAC_MN 显著负相关,与 COHESION 极显著负相关。各径流指标与其他景观指数间无显著相关性。表明太子河流域建筑用地的大面积比邻连接分布对径流变化有显著影响,这主要是由于流域植被覆盖面积减少和大量不透水面积的增加影响了流域水文过程,进而影响径流量的变化。

(2) 旱地。径流深度仅与 AI 呈显著负相关,变差系数与 FRAC_MN 和 PARA_CV 呈显著负相关,最小径流指数与 PD 呈极显著负相关,与 FRAC_MN,COHESION 和 AI 呈显著正相关,最大径流指数与 PD 呈显著正相关,与 FRAC_MN 极显著负相关,与 PARA_CV 呈显著负相关。旱地受人类活动的干扰较大[12],近地表层土壤裸露程度高,雨水拦截率低,因此,旱地的大面积出现会对径流变化产生严重影响。

(3) 林地。在林地类型影响下,径流深度与各景观指数间无显著相关性。变差系数与 AI 极显著负相关,最小径流指数与 PARA_CV 和 AI 显著正相关,最大径流指数与 PARA_CV 和 AI 呈现极显著负相

关。林地通过林冠的阻滞截留和土壤的渗透蓄水作用来调节流域径流过程，林地景观的形状复杂程度和聚集度的增加会导致流域径流年内和年际变化幅度降低。

表 5 类型水平格局和径流指标的相关分析结果

类型	指标	PD	LPI	FRAC_MN	PARA_CV	CONTIG_MD	IJI	COHESION	AI
建筑用地	径流深度	−0.383	−0.189	−0.167	−0.383	−0.544*	0.368	0.013	−0.069
	变差系数	0.068	−0.173	−0.488*	−0.251	−0.431	−0.170	−0.493*	−0.387
	最小径流指数	−0.023	0.401	0.473*	0.292	0.504*	−0.471*	0.570*	0.414
	最大径流指数	−0.003	−0.090	−0.512*	−0.299	−0.335	0.116	−0.637**	−0.294
旱地	径流深度	0.076	−0.323	0.088	−0.251	−0.307	−0.243	−0.109	−0.496*
	变差系数	0.457	0.051	−0.530*	−0.502*	−0.587*	0.017	−0.264	−0.360
	最小径流指数	−0.694**	0.253	0.510*	0.439	0.226	−0.057	0.505*	0.546*
	最大径流指数	0.485*	−0.013	−0.637**	−0.522*	−0.245	0.042	−0.434	−0.344
林地	径流深度	−0.382	0.235	−0.079	−0.047	−0.405	0.051	0.314	0.081
	变差系数	0.100	0.038	−0.288	−0.422	−0.191	−0.018	−0.384	−0.596**
	最小径流指数	−0.136	−0.246	0.356	0.562*	0.414	−0.308	0.323	0.568*
	最大径流指数	0.034	0.190	−0.393	−0.695**	−0.259	−0.072	−0.289	−0.781**

4 讨 论

4.1 景观水平格局对径流的影响

径流深度的变化与景观格局指数变化间无显著相关性，这主要是由于流域径流深度受降雨量的影响较大，并与流域面积有关，对景观格局的变化不敏感。FRAC_MN 与径流指标间存在显著相关性，FRAC_MN 反映的是景观类型形状的复杂程度，其值越大，单位面积内景观边界率越大，形状越复杂，植被群落多样性也越高[13]，流域径流年内变化及年际变化相应稳定。

径流指标与 CONTIG_MD 和 IJI 也呈现出显著相关性。CONTIG_MD 表征的是流域中各斑块间的连接和邻近程度，反映了景观的空间破碎化程度，有研究表明，CONTIG_MD 与植被群落多样性之间存在显著正相关性[14]。IJI 表征景观格局的空间分布排列特征，反映各个斑块类型间的总体散步与并列状况，其值越大，各斑块间分布越均匀[15]。因此，CONTIG_MD 和 IJI 越大，流域景观越均匀，植被群落多样性越高，径流的年内和年际变化也越稳定。

SHDI 仅与最小径流指数显著负相关，和其他径流指标间相关性不显著。SHDI 用于度量景观要素的丰富度，较高的 SHDI 反映出景观格局中植被群落的多样性越高，最小径流指数也越小，径流变化越稳定。

因此，从景观水平来看，流域景观中斑块分布均匀，植被群落丰富，植被对径流的调节作用明显，流域径流的年内和年际变化相对稳定。

4.2 类型水平格局对径流的影响

PD 反映的是斑块的分化程度或破碎化程度，PD 高，表明一定面积上斑块数量多，斑块规模小，景观异质性高[16]。旱地的斑块密度与最小径流指数和最大径流指数间存在显著相关性，与最小径流指数极显著负相关，与最大径流指数显著正相关，表明旱地的面积和破碎化程度的增加，土壤的裸露程度高，对雨水的拦截率低，地表径流量大，从而导致了最小径流指数的减小和最大径流指数的增加。

建筑用地和旱地的 FRAC_MN 与变差系数和最大径流指数呈负相关，与最小径流指数正相关。高的 FRAC_MN 表明斑块形状复杂，边界率高，斑块分布多而分散，因此，流域径流年际变化和年内变化稳定。

旱地的 PARA_CV 对变差系数和最大径流指数存在显著负效应，林地的 PARA_CV 对最小径流指数存在显著正效应，对最大径流指数存在极显著负效应。表明 PARA_CV 越大，流域径流年际变化越小，年内变化越小，径流变化越稳定。因为 PARA_CV 描述的是斑块外部形状的复杂性，PARA_CV 越大，则斑块形状越复杂，景观破碎化程度越高[17]，景观多样性高。林地受人类活动的干扰较小，对径流的调节作用明显，径流的年内分配相对均匀，年际变化较小。

建筑用地的 CONTIG_MD 与径流深显著负相关，与最小径流指数显著正相关，建筑用地的 IJI 与最小径流指数显著负相关。建筑用地受人类活动影响严重，分布集中。由于不透水面积的大量出现，地表的下渗行为降低，产生的地表径流量增加，最小径流指数增加。径流深度的减小是由于受流域自然地理条件、水文地质因素、降雨径流变化和人类活动等多

方面的影响，导致降雨转化为径流的部分减少[18]。

COHESION 和 AI 反映的是斑块的聚集度和连通性。景观破碎化和生境的随机变化常常导致许多植物种群的适合度下降或种群灭绝[19]。对于林地而言，较高的 AI，斑块的破碎化程度低，植被覆盖的多样性较高，对径流的调节作用明显，径流的变化相对较小。旱地和建筑用地的连通性增加，流域径流量也会相应增加[20]，但是径流的年际和年内变化相对稳定，主要是由于林地是在太子河流域的主要土地利用类型，对径流的调节发挥了显著作用。

5　结 论

（1）在景观水平层次上，景观格局的变化对径流深度的影响不显著。径流量的年内、年际变化与面积加权分维数、邻接度指数、散布与并列指数和香农多样性指数表现出显著相关性。景观破碎化程度越高，分布越均匀，植被群落丰富，径流的年内和年际变化越稳定。

（2）类型水平的分析结果与景观水平有较大差异。径流的变化与斑块密度、面积加权分维数、周长面积比、邻接度指数、散布与并列指数、斑块连接度和斑块聚集度指数表现出显著相关性。建筑用地和旱地分布集中，受人类活动影响较大，对径流的调节作用微弱，建筑用地和旱地的大量出现会造成径流变化不稳定，而林地是流域优势土地利用类型，对径流的稳定变化起到决定性作用。

[参 考 文 献]

[1] 邓慧平，李秀彬，陈军锋，等. 流域土地覆被变化水文效应的模拟：以长江上游源头区梭磨河为例[J]. 地理学报，2003，25(1)：53-62.

[2] 万荣荣，杨桂山. 太湖流域土地利用与景观格局演变研究[J]. 应用生态学报，2005，16(3)：475-480.

[3] 杨国靖，肖笃宁，周立华. 祁连山区森林景观格局对水文生态效应的影响[J]. 水科学进展，2004，15(4)：489-494.

[4] 马雪华. 四川米亚罗地区高山冷杉林水文作用的研究[J]. 林业科学，1987，23(3)：253-264.

[5] 刘明，王克林. 洞庭湖流域中上游地区景观格局变化的水文响应[J]. 生态学报，2008，28(12)：5970-5979.

[6] 李胜男，王根绪，邓伟，等. 水沙变化对黄河三角洲湿地景观格局演变的影响[J]. 水科学进展，2009，20(3)：325-331.

[7] 王计平，杨磊，卫伟，等. 黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响[J]. 生态学报，2011，31(19)：5531-5541.

[8] 索安宁，于波，王天明，等. 泾河流域植被景观格局对流域径流的调节作用[J]. 水土保持学报，2005，19(4)：40-43.

[9] 李庆云，余新晓，张璐，等. 黄土高原藉河流域 1962—2008 年径流变化特征[J]. 水土保持通报，2011，31(1)：98-102.

[10] 门宝辉，刘昌明，夏军，等. 南水北调西线一期工程调水区径流量与影响因子关系分析：以达曲为例[J]. 地理科学，2006，26(6)：674-681.

[11] 邬建国. 景观生态学：格局、过程、尺度与等级[M]. 北京：高等教育出版社，2000.

[12] 郭宗锋，马友鑫，李红梅，等. 流域土地利用变化对径流的影响[J]. 水土保持研究，2006，13(5)：139-142.

[13] Honnay O, Hermy M, Coppin P. Effects of area, age and diversity of forest patches in Belgium on plant species richness, and implications for conservation and reforestation, and implications for conservation and reforestation[J]. Biological Conservation, 1999, 87(1): 73-84.

[14] Cabacinha C D, De Castro S S. Relationships between floristic diversity and vegetation indices, forest structure and landscape metrics of fragments in Brazilian Cerrado[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(10): 2157-2165.

[15] De Clercq E M, Vandemoortele F, De Wulf R R. A method for the selection of relevant pattern indices for monitoring of spatial forest cover pattern at a regional scale[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2006, 8(2): 113-125.

[16] 张芸香，郭晋平. 森林景观斑块密度及边缘密度动态研究：以关帝山林区为例[J]. 生态学杂志，2001，20(1)：19-21.

[17] 刘常富，李京泽，李小马，等. 基于模拟景观的城市森林景观格局指数选取[J]. 应用生态学报，2009，20(5)：1125-1131.

[18] 邓珺丽，张永芳，王安志，等. 1967—2006 年太子河流域径流系数的变化特征[J]. 应用生态学报，2011，22(6)：1559-1565.

[19] Costin B J, Morgan J M, Young A G. Reproductive success does not decline in fragmented populations of *Leucochrysum albicans* subsp. *albicans* var. *tricolor* (*Asteraceae*) [J]. Biological Conservation, 2001, 98(3): 273-284.

[20] 李恒鹏，杨桂山，刘晓玫，等. 流域土地利用变化的长周期水文效应及管理策略：以太湖上游地区蠡河流域为例[J]. 长江流域资源与环境，2005，14(4)：450-455.