

北京山区典型小流域景观格局变化对径流的影响

刘旭辉, 余新晓, 赵 阳

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘 要:根据北京市密云县红门川小流域 1990—2006 年的水文资料,在统计分析降水、径流、蒸发年际变化特征的基础上,利用 1990 年、1995 年、2000 年和 2005 年 4 期遥感影像,采用 ArcMAP 及 Fragstats 等景观分析软件,从斑块和景观两个尺度上,分析红门川流域的景观空间格局变化及其与径流的关系。结果表明:(1) 红门川小流域的降水、径流多集中在汛期(6—9 月),且年降水量、径流量逐年减少,气候变化是径流减少的主要原因;(2) 红门川流域土地利用类型以林地为主,林地约占流域总面积的 75%,其中以针叶林最多,阔叶林、混交林次之,灌木林最少,另外水域面积逐年减少,从另一个方面反映了径流量逐年减少;(3) 红门川流域景观斑块个数增加,整体景观格局破碎化程度减小,斑块分布趋于均匀,其中斑块平均面积(AREA)、斑块周长(PERIM)、景观形状指数(LSI)、景观聚集度(CONTAG)均呈波动减小的趋势,斑块形状指数(SHAPE)、斑块分维度(FRAC)、Shannon-Wiener 多样性指数(SHDI)则是逐年减小;(4) 平均斑块周长、景观聚集度与径流变化相关性较强,平均斑块面积、平均分维度与径流变化相关性一般,平均斑块形状指数、景观形状指数、Shannon-Wiener 多样性指数与径流变化基本不相关。

关键词:气候变化; 景观格局; 斑块; 径流

中图分类号:S715.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)05-0039-06

Impact of Landscape Pattern on Runoff in Small Watershed of Beijing Mountainous Region

LIU Xu-hui, YU Xin-xiao, ZHAO Yang

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:Based on the hydrological data of Hongmenchuan watershed in the years of 1990—2006, and analysis on the characteristic of precipitation, runoff and evaporation, by using the spatial and attribute data, landscape index from the remote sensing images (1990, 1995, 2000, 2005) of Hongmenchuan watershed of Beijing. We analyzed the change on the landscape pattern and the relevance between landscape index and runoff. The results showed: (1) precipitation and runoff of Hongmenchuan watershed mainly concentrated in the flood season (June to September), and annual precipitation and runoff decreased year by year, climate change is the main reason for runoff decrease; (2) forestland was mainly land use in Hongmenchuan watershed, the decrease of water area reflected the decrease of runoff; (3) the landscape plaque number increased, the overall landscape fragmentation decreased, plaque distribution tends to be uniform, the average patch area (AREA), patch perimeter (PERIM), landscape shape index (LSI), the landscape aggregation (CONTAG) were decreasing year by year; (4) there is a strong correlation between mean patch perimeter, landscape aggregation and runoff, the correlation between average plate area, average fractal dimension and runoff is not significant, and mean patch shape index, landscape shape index, Shannon-Wiener diversity index and runoff are uncorrelated.

Key words:climate change; landscape pattern; plaque; runoff

在森林植被与生态环境相互作用和相互影响中,水文过程是最为重要的方面,森林与水的关系问题是

水文研究的中心议题之一^[1]。森林与水的关系受气象、地形、地质、土壤、植被等诸多因素的影响,植被是

收稿日期:2012-12-03

修回日期:2013-03-08

资助项目:国家“十二五”科技支撑(2011BAD38B05);国家林业公益性行业科研专项(201104005)

作者简介:刘旭辉(1988—),男,河北石家庄人,硕士,主要从事生态水文方面的研究。E-mail:liuxuhuibjfu@126.com

通信作者:余新晓(1961—),男,甘肃平凉人,教授,博士生导师,主要从事生态水文、水土保持方面的研究。E-mail:yuxinxiao111@126.com

影响生态系统中水分循环的重要因素,不同植被类型、覆盖率及空间格局具有不同的水文效益^[2]。气候变化对径流的影响是显著的,气候变化时,对径流的主要影响因素为降水,其次为气温^[3]。径流是降水和下垫面相互作用的产物,在下垫面相对稳定的前提下,降水与径流演变规律保持相对一致,而演变规律的差异性可表征人类活动的影响^[4]。下垫面的变化主要是土地利用的变化,土地利用的变化必然引起景观格局的变化。许多研究显示,在中、小型流域尺度上,水分的运动与景观空间格局具有密切关系,格局的改变可以对水分在空间上的重新分布起到调节作用^[5],流域内植被景观格局,特别是森林景观格局的改变,对整个流域的水文状况有直接的影响^[6],合理的景观格局将有利于水分的循环,从而改善区域生态环境,不合理的景观格局会导致水循环失调,造成生态环境的恶化^[7]。目前大多数研究多集中在土地利用变化对径流的影响,而对气候变化的关注较少,且很少关注景观空间格局特征与径流的关系。

本文以红门川流域为研究区,利用过去 17 a 的水文资料,分析红门川流域的降水、径流、蒸发的年际变化及年内分布状况,使用红门川流域 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年 4 期土地利用图,利用 ArcMAP 及 Fragstats 软件从斑块和景观两个尺度上研究红门川流域的景观空间格局变化,并分析景观指标与径流的耦合关系。

1 研究区概况

红门川流域位于北京密云县东南部,距密云县城 20 km。地理位置为北纬 40°23′23″—40°22′15″,东经 117°06′07″—117°06′39″。流域气候类型属暖温带半湿润季风型气候,多年平均温度为 9℃,1 月平均最低气温为 -7~-9℃,7 月平均气温 24~25℃。极端最低气温 -18℃,最高气温 38℃,无霜期 175 d,多年平均降水量为 650~700 mm,降水主要集中在 6—8 月份,雨热同期。流域地处山区,地貌类型复杂,处在华北平原与蒙古高原的过渡地带,属燕山山脉,境内山峦起伏,东、西、北三面群山连绵,中部低缓,西南开阔,地势自北向西南倾斜,呈簸箕形,海拔 100~1 200 m。该流域西北高,东南低,地貌类型有山地和丘陵,中、低山占 75% 左右。西北部以中山为主,东南部多分布低山和丘陵。流域土壤类型较少,以山地棕壤及褐土分布为主。

流域内植被以人工造林为主,占林地总面积的 69%。地带性植被为暖温带落叶阔叶林区,现状植被以针叶林、阔叶林、灌木林和针阔混交林为主。主要

人工林植被以油松 (*Pinus tabulaeformis*) 林、侧柏 (*Platycladus orientali*) 林和落叶松 (*Larix gmelinii*) 为主的针叶林,以山杨 (*Populus davidiana*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、蒙古栎 (*Quercus mongolica*) 和椴树 (*Tilia amurensis*) 为主的阔叶林,以荆条 (*Vitex negundo* var. *heterophylla*) 和酸枣 (*Ziziphus jujuba* var. *spinosa* Bunge Hu) 为主的灌木林,以及针阔混交林^[8]。

2 研究方法

采用北京市密云县红门川流域沙厂水库上游的定位观测站自 1996—2006 年的逐日降水数据。该数据来自红门川流域定位观测站自记雨量计,记录每次降水过程,并设立 1 个口径为 20 cm 的标准雨量筒收集和测定每次降水以作校正。每次降雨后 10~30 min 观测并记录。径流量分析是采用北京市密云县红门川流域沙厂水库上游定位观测站数据。径流观测站为天然断面,因沟道两岸地形较陡,形成梯形断面。径流测定在小水时用接流筒按体积法施测,洪水时用率定水位流量关系曲线和浮标法测速计算流量两种方法同步进行,得到径流数据。同时,陆面蒸发量可由如下高桥浩一郎公式^[9]计算:

$$E = \frac{3100P}{3100 + 1.8P^2 \exp(-\frac{34.4T}{235 + T})} \quad (1)$$

式中: E ——地面蒸发量 (mm); P ——月降水量 (mm); T ——月平均气温 (℃)。许多研究指出,这个方法得到的结果无论在定性还是定量方面都有参考价值^[8]。利用红门川流域 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年 4 期卫星影像资料,以 Erdas Magine 软件包进行影像处理,运用高斯最大似然法进行影像分类。对这些遥感资料使用 ArcView 软件进行图像解析和数据处理,并进行实地对比、核查、修正,获得各年的土地利用状况。再利用 GIS 软件进行更精确的分类得到 4 期土地利用图并转换为 grid 属性数据。Fragstats 软件是美国俄勒冈州立大学森林科学系开发的一个景观指标计算软件,计算斑块、类型、景观 3 个级别上的 277 个景观指标,其中斑块指数有 22 个,斑块类型指数有 123 个,景观水平指数有 132 个。本文运用 Fragstats 3.3 软件对斑块面积 (AREA)、斑块周长 (PERIM)、斑块形状指数 (SHAPE)、斑块分维度 (FRAC)、景观形状指数 (LSI)、景观聚集度 (CONTAG)、Shannon-Wiener 多样性指数 (SHDI) 等进行提取计算。然后通过景观指标与径流模数的关系曲线,分析景观指标与径流的相关性。

3 结果与分析

3.1 红门川流域降水、蒸发与径流变化特征分析

气候变化是通过改变降水和蒸发来影响径流的,对于小流域,气候变化的直接结果就是改变了径流的大小。红门川流域多年平均降水量为 472.79 mm,平均径流量为 125.70 m³。从图 1—3 的 3 a 滑动平均曲线来看,1990—2006 年红门川流域的年平均降水量呈现明显的波动变化,蒸发量呈现与降水量相似的波动变化,但蒸发量的变化幅度较小;径流模数则是类似单峰型的波动变化,且年际变化差异显著,呈现逐年减少的趋势。1990—1991 年、1994—1996 年、2001 年、2004—2005 年的年平均降水量均在 500 mm 左右,降水资源丰富,蒸发量在这些时期也比较多,其中在 1994 年降水量达到最高值 751.3 mm 时,蒸发量较少为 220 mm 左右,径流模数达到最大值,约 425 mm 左右;分析其原因可能是降水多,则晴天少,蒸发量就小,土壤和植被截流的降水就多。而在 1999 年降水量低至 160.5 mm 时,蒸发量达到了最低,为 146.2 mm,径流模数也比较低,为 17.44 mm;分析原因可能是,降水少,晴天多,蒸发量就大,整个流域入不敷出,因此气候变化是径流减少的主要因素。从线性趋势来看,降水量总体上呈现以每年 5.5 mm 左右的线性减少趋势,蒸发量总体上呈现以每年 5.3 mm 左右的线性增加趋势,径流模数呈现明显的减少趋势,减少速度约为每年 18 mm,因此气候变化对径流变化的贡献约为 60%。

由图 4 可以看出,红门川流域多年平均各月降水量呈明显的正态分布,起伏较大。7 月降水量最多,为 165.91 mm,占全年降水总量的 35.09%;12 月降水量最少,为 0.94 mm,占全年降水总量的 0.20%,二者相差非常大。研究区降水非常集中,汛期(6—9 月)的降水总量为 421.38 mm,高达全年降水总量的 88.51%。红门川流域多年平均各月径流量变化也很

大,起伏明显,10 月至翌年的 5 月,整个流域处于断流状态;径流全部集中在 6—9 月,最大值在 8 月,径流量为 70.14 m³,占全年径流总量的 48.16%;最小值在 6 月,径流量为 5.78 m³,占全年径流总量的 3.96%,二者差距很大。径流模数即代表了径流量,径流模数的峰值滞后于降水量的峰值,这正是森林植被涵养水源的重要体现;降水是径流的主要来源,降水少则径流少,降水多则径流多。

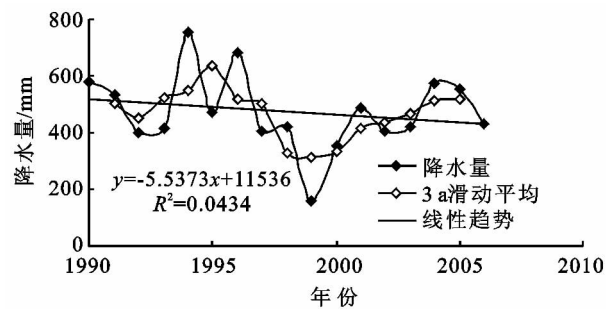


图 1 红门川流域降水量年际变化

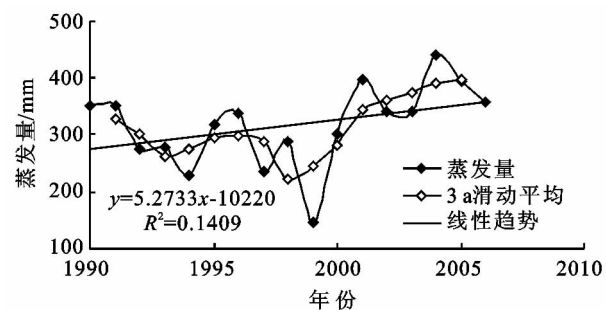


图 2 红门川流域蒸发量年际变化

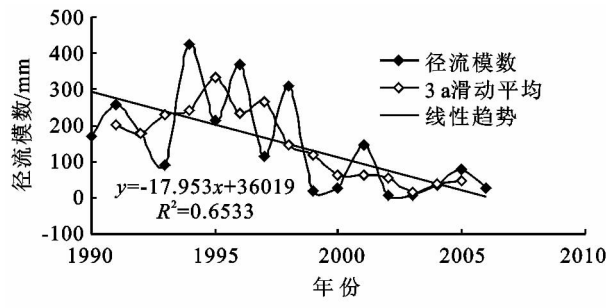


图 3 红门川流域径流模数年际变化

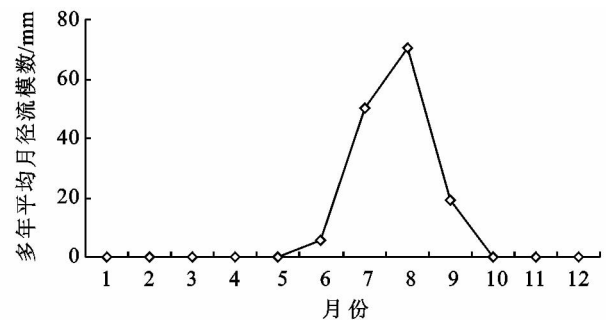
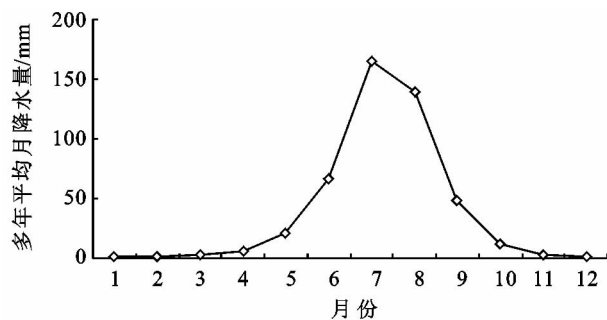


图 4 红门川流域多年平均月降水量及多年平均月径流模数

3.2 土地利用及其景观格局的变化特征

(1) 土地利用变化。在对红门川流域 4 期遥感数

据进行解译、分类、统计的基础上得到红门川流域土地利用面积变化(图 5)。

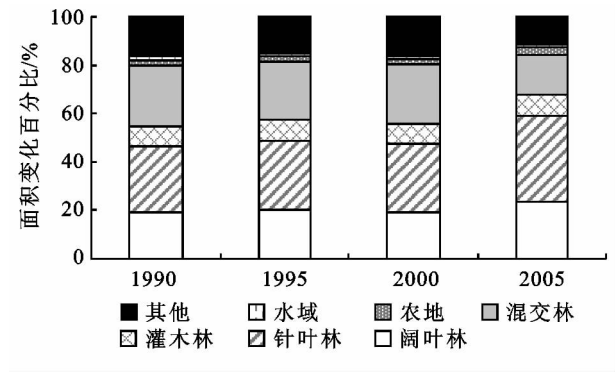


图 5 不同土地利用面积变化

从红门川流域土地利用的总体情况来看,整个流域林地所占面积最大,是最主要的土地利用类型,约占整个流域面积的 90%,其次是其他用地,再次为农地、水域。林地中,针叶林、阔叶林、混交林占的比例较大,而灌木林地占的比例较小。1994—2005 年间,红门川流域各土地利用类型都发生了不同程度的变化。水域面积减幅最大,减少了 54.28%。主要由于干旱气候和人类的不合理利用双重因素造成的;农地增幅最大,增加了 42.68%,这是由于该流域开始实施生态农业,整合资源,进行规模化农业生产与经营。林地总面积有所增加,但增幅较小,由于该区属于水源涵养林,同时又位于密云水库的上游,生态地位非常重要,故近年来国家对生态公益林的管护比较严格。其他用地包括建筑用地和未利用地,其他用地在 4 a 间变化较大,这主要是由于与另外几种土地利用类型转化频繁的结果。

表 1 红门川流域景观指标值

年份	AREA/m ²	PERIM/km	SHAPE	FRAC	LSI	CONTAG	SHDI
1990	45.678	5019.266	1.956	1.104	15.734	42.372	1.677
1995	46.836	5144.133	1.927	1.102	15.195	43.402	1.658
2000	45.305	5046.358	1.925	1.101	15.46	43.188	1.656
2005	46.464	5081.531	1.675	1.08	16.514	43.25	1.627

3.3 景观格局变化引起的径流变化规律

从图 6 可以看出,选取的景观斑块指标基本与 3 a 平均径流模数呈二次项相关关系,整体趋势为径流模数随景观斑块指标的增加而增加,其中,平均斑块周长与径流模数的相关性比较显著, R^2 达到了 0.907 1,径流模数与平均斑块周长呈二次项关系,当平均周长小于 5 075 m 时,径流模数随平均斑块周长增加而增加,大于 5 075 m 时,两者呈负相关关系,分析其可能性有两种,其一是样本数量较少,出现这种情况完全出于偶然;其二是平均斑块周长与径流模数关系密切,当平均斑块周长处于某一范围内,流域斑块的综合截留能力最差。平均斑块面积、平均分维度与径流模数呈正相关关系,但相关性较差, R^2 仅在

(2) 景观格局变化。景观格局表征景观的空间结构特征,可用不同指标表达其多样性、变化性和动态性^[10]。景观指数是指能够高度浓缩景观格局信息,反映其结构组成和空间配置某些方面特征的简单定量指标,许多指标之间具有高度的相关性,只是侧重面不同^[11]。因此必须依据所研究的目的和数据来源与精度来选择合适的指标和尺度。

在参阅大量前人关于景观格局研究的基础上^[12-16],在斑块水平和景观水平上选择 7 个指标,包括:斑块平均面积(AREA)、斑块周长(PERIM)、斑块形状指数(SHAPE)、斑块分维度(FRAC)、景观形状指数(LSI)、景观聚集度(CONTAG)、Shannon-Wiener 多样性指数(SHDI),对红门川流域的土地利用图进行斑块个体特征以及景观整体结构的动态变化分析。将红门川流域 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年的栅格数据分别导入 Fragstats 景观分析软件中,计算得到红门川流域的景观指标(表 1)。

从表 1 可以看出,所选择的景观指标均处于减小趋势,其中斑块平均面积(AREA)、斑块周长(PERIM)、景观形状指数(LSI)、景观聚集度(CONTAG)均是波动减小,斑块形状指数(SHAPE)、斑块分维度(FRAC)、Shannon-Wiener 多样性指数(SHDI)则是逐年减小。由此可以看出,红门川流域斑块个数增加,斑块边界凸起情况减少,几何形状趋于规则^[17-18],斑块形状趋向简化;景观斑块的镶嵌度增大,斑块分布趋于均匀,景观破碎化程度减小。

0.4 左右;平均斑块形状指数与径流模数基本不相关, R^2 为 0.221 7,说明两者之间没有密切的联系。

从图 7 可以看出,选取的景观整体指标基本与径流模数呈二次项相关关系,整体趋势为径流模数随景观整体指标的增加而增加,其中,聚集度与径流模数的相关性比较显著, R^2 达到了 0.998 6,径流模数与聚集度呈二次项关系,当聚集度小于 42.8 时,径流模数随聚集度增加而减少,大于 42.8 时,两者则呈正相关关系;景观聚集度是反映景观中斑块的非随机性或聚集程度,说明小流域内不同土地利用斑块的聚集程度并不是越大越好,也不是越小越好,而是有最佳聚集度的。景观形状指数、Shannon-Wiener 多样性指数与径流模数基本不相关, R^2 为 0.198 和 0.230 9。

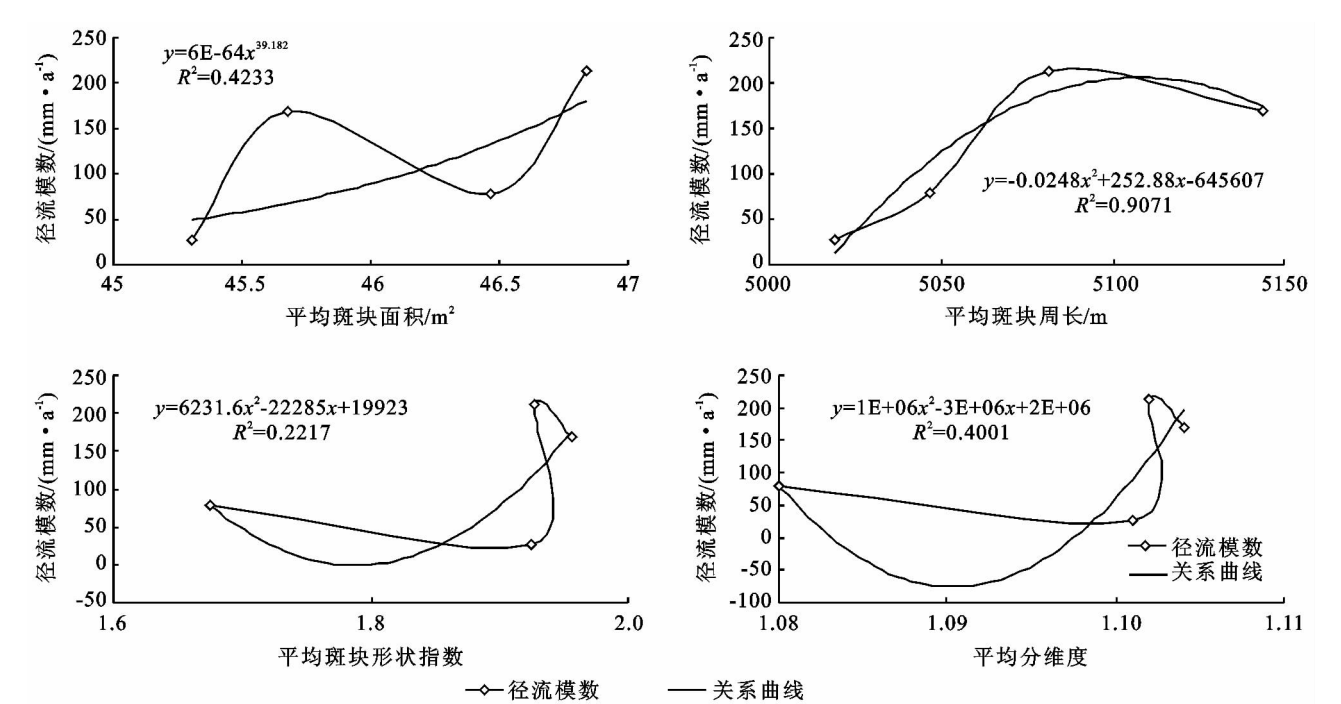


图6 景观斑块指标与径流模数的关系

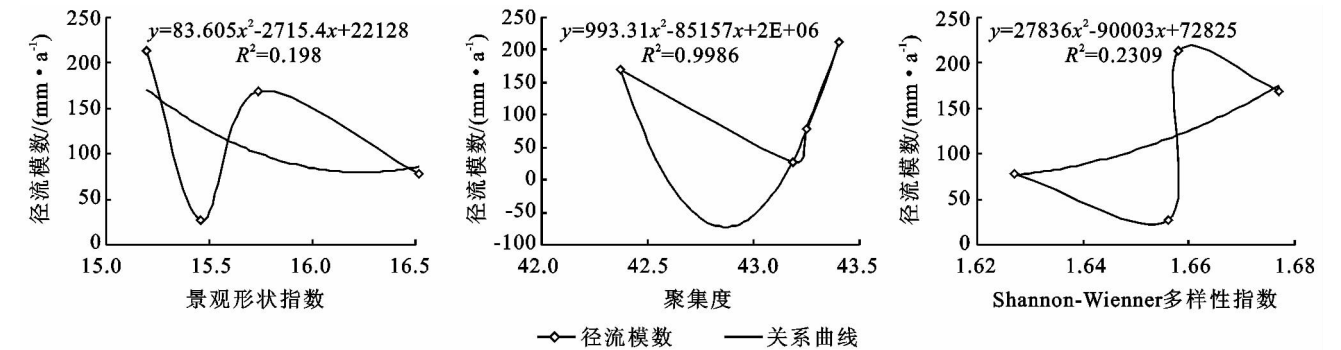


图7 景观格局特征指标与径流模数的关系

4 结论

在北京周边的小流域,一般植被覆盖率较高,土地利用较大,植被景观格局比较复杂,植被对流域径流影响较大,这些是北京山区众多小流域的共同特点。对红门川流域的水文年际变化、土地利用变化、景观格局的变化及其与流域径流特征关系的研究表明:

(1) 红门川小流域径流年内分配不均匀,多集中在汛期(6—9月份),且年降水量逐年减少,年径流量明显减少,其原因是气温逐年增加,陆面蒸发量和植物蒸散量增大从而导致径流减少,气候变化是径流减少的主要原因。

(2) 红门川流域土地利用类型以林地为主:针叶林>阔叶林>混交林>灌木林>其他用地农地>水域,林地约占流域总面积的75%,其中以针叶林最多,阔叶林、混交林次之,灌木林最少,另外水域面积逐年减少,从另一个方面反映了径流量逐年减少。

(3) 红门川流域景观斑块个数增加,整体景观格局破碎化程度减小,斑块分布趋于均匀,其中斑块平均面积(AREA)、斑块周长(PERIM)、景观形状指数(LSI)、景观聚集度(CONTAG)均波动减小,斑块形状指数(SHAPE)、斑块分维度(FRAC)、Shannon-Wiener多样性指数(SHDI)则是逐年减小。

(4) 平均斑块周长、景观聚集度与径流变化相关性较强,平均斑块面积、平均分维度与径流变化相关性一般,平均斑块形状指数、景观形状指数、Shannon-Wiener多样性指数与径流变化基本不相关,景观空间格局直接影响到小流域植被的水土保持作用,因此在进行小流域治理时,不同的森林配置,景观布局所起的水土保持作用也是不同的,合理的景观布局对水土流失的治理具有重要作用。

参考文献:

[1] 张志强,王礼先,余新晓,等. 森林植被影响径流形成机制研究进展[J]. 自然资源学报,2001,16(1):79-84.

- [2] Eulogio Chacon-Moreno, Smith J K, Skidmore A K. Modeling spatial patterns of plant distribution as a consequence of hydrological dynamic processes in a Venezuelan Flooding Savanna[J]. *Ecotropicos*, 2007, 20(2): 55-73.
- [3] 许海丽, 潘云, 宫辉力, 等. 1959—2000 年奶水河流域气候变化与水文响应分析[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(2): 43-47.
- [4] 白桦, 穆兴民, 高鹏, 等. 嘉陵江流域降水及径流演变规律分析[J]. *土保持研究*, 2012, 19(1): 102-106.
- [5] 傅伯杰, 陈利顶, 邱扬, 等. 黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程[M]. 北京: 商务印书馆, 2002.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 朱丽, 秦富仓, 姚云峰, 等. SWAT 模型灵敏性分析模块在中尺度流域的应用: 以密云县红门川流域为例[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(1): 161-165.
- [9] 高桥浩一郎. 从月平均气温、月降水量来推算蒸散发量的公式[J]. *天气*, 1979, 26(12): 29-32.
- [10] Srinivas A, Rao B V, Rao V V S G. Recharge process and aquifer models of a small watershed[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1999, 44(5): 681-692.
- [11] 肖笃宁, 胡远满, 李秀珍. 环渤海三角洲湿地的景观生态学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [12] 李谢辉, 王磊. 河南省土地利用/覆盖景观格局变化分析[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 83-89.
- [13] 董李勤, 章光新. 嫩江流域沼泽湿地景观变化及其水文驱动因素分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(2): 25-31.
- [14] 徐摇丽. 空间粒度变化对合肥市景观格局指数的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1167-1173.
- [15] 白林波, 白明生, 贾科利. 银川市景观格局动态变化研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(2): 265-267.
- [16] 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.
- [17] 张庆云. 1880 年以来华北降水及水资源的变化[J]. *高原气象*, 1999, 18(4): 486-495.
- [18] 余新晓, 牛健植, 关文彬. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(上接第 38 页)

- [11] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 533-1543.
- [12] Sellers P J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, 6(8): 1335-1372.
- [13] Myneni R B, Hall F B, Sellers P J, et al. The interpretation of spectral vegetation indices [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 481-486.
- [14] 陈效逯, 王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. *地理学报*, 2009, 64(1): 84-94.
- [15] 牛建明. 内蒙古主要植被类型与气候因子关系的研究[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 47-52.
- [16] 渠翠平, 关德新, 王安志, 等. 科尔沁草甸草地归一化植被指数与气象因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 58-64.
- [17] 马玉玲, 余卫红. 呼伦贝尔草原对全球变暖的响应[J]. *干旱区地理*, 2004, 27(1): 29-34.
- [18] 李云鹏, 娜日苏, 刘朋涛, 等. 呼伦贝尔草原退化遥感监测与气候成因[J]. *华北农学报*, 2006, 21(增刊 1): 56-61.
- [19] 施能, 马丽, 袁晓玉, 等. 近 50 a 浙江省气候变化特征分析[J]. *南京气象学院学报*, 2001, 24(2): 207-2131.
- [20] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2011, 66(1): 47-58.