

潮河流域景观格局变化对径流的影响

娄俊鹏¹, 张志强¹, 郭军庭¹, 项洋旭², 姚安坤¹, 何铁章³

(1. 北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 北京林业大学 环境科学与工程学院, 北京 100083; 3. 河北省丰宁县林业局, 丰宁 068350)

摘要: [目的] 分析潮河流域的景观空间格局变化及其与径流的关系, 为流域生态环境建设提供理论依据。[方法] 根据潮河流域 50 a 多的水文气象资料, 利用 1979, 1987, 1991 和 2009 年 4 期遥感影像, 采用 ArcGIS 及 Fragstats 等景观分析软件计算。[结果] 潮河流域的降雨量呈减少趋势, 而温度以 0.215 °C/10 a 的速度升高, 潮河的径流量明显减少, 并呈现以 28 a 为周期的丰枯转换; 潮河流域斑块个数增加, 斑块分布趋于均匀, 斑块面积变小并逐渐趋于稳定, 斑块形状趋向于简单, 复杂化程度降低, 流域内景观异质性变弱。[结论] 径流量随着景观形状指数的增大而减小, 在平均斑块周长为 1 050 m, 流域斑块数量为 110 000 以及 Shannon's 多样性指数为 1.33 左右时, 斑块的截留能力最强, 流域产流能力最弱。

关键词: 潮河流域; 小波分析; 景观格局; 径流

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)04-0034-06

中图分类号: S715.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.04.008

Impact of Landscape Pattern Change on Runoff in Chaohe River Watershed

LOU Junpeng¹, ZHANG Zhiqiang¹, GUO Juntao¹, XIANG Yangxu², YAO Ankun¹, HE Tiezhang³

(1. Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Desertification

Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing

100083, China; 3. Fengning Forestry Bureau of Hebei Province, Fengning, Hebei 068350, China)

Abstract: [Objective] The changes of landscape pattern and relations among landscape index and runoff in Chaohe River watershed were examined in order to provide theoretical basis for the basin ecological environment construction. [Methods] The hydrometeorological data of Chaohe watershed over 50 years, ArcGIS and Fragstats software, landscape index from the remote sensing images(1979, 1987, 1991, 2009) of Chaohe River watershed were used. [Results] Precipitation and runoff decreased over time, and the temperature increased at 0.215 °C/10 a. The runoff of Chaohe River decreased significantly with the 28-year cycle of wet and dry conversion; a steady increasing patches number with decreasing area with more simplicity caused Chaohe River watershed become weak. [Conclusion] Runoff decreased with increase of landscape shape index. When the mean patches perimeter was 1 050 m, the number of patches was 110 000 with Shannon's diversity index of about 1.33. Therefore, the comprehensive intercepting ability of patches was the strongest and the watershed runoff capacity was the weakest.

Keywords: Chaohe River watershed; wavelet analysis; landscape pattern; runoff

水资源是基础性自然资源,是保障一个国家或地区实现经济、社会、生态可持续发展的重要前提条件^[1]。密云水库作为北京市重要饮用水源,近年来其入库水量持续减少,对北京市供水安全造成了巨大的压力,而潮河流域的产流状况直接影响着密云水库的

入库水量^[2]。随着社会经济的发展,人类活动日益加剧,对流域水循环的干预强度也逐渐增大。人类土地利用方式的变化、水利工程的兴建和城市化的发展等活动,在不同程度上改变着水循环的状态和水循环要素,从而引起水文循环要素在时间、空间和数量上发

收稿日期:2014-05-08

修回日期:2014-06-28

资助项目:北京市科学研究与研究生培养共建项目“森林植被恢复对密云水库上游流域水文的影响”; 国家林业公益性行业科研专项(201204102)

第一作者:娄俊鹏(1988—),男(汉族),河南省平顶山市人,硕士研究生,研究方向为森林水文。E-mail:loujp08@qq.com。

通信作者:张志强(1967—),男(汉族),内蒙古自治区呼和浩特市人,博士,教授,主要从事水文水资源研究。E-mail:zhqzhang@bjfu.edu.cn。

生着不可忽视的变化^[3]。多数研究^[4-7]表明,造成密云水库来水量显著减少的原因是土地利用变化和气候变异共同作用的结果造成的。气候变化的影响主要是降雨量的变化,其次为气温;土地利用变化的影响主要是通过改变下垫面的入渗性能,从而对径流产生影响^[8]。土地利用的变化必然引起景观格局的变化,景观作为地球表面空间布局的复合体,其变化反映了景观的结构和功能随时间的变化过程和规律^[9-10]。许多研究结果^[11-12]显示,水分的运动与景观空间格局具有密切关系,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。因此,本研究根据潮河流域 50 a 多气象水文资料,对降水、温度和径流进行统计分析,并利用 1979,1987,1991 和 2009 年 4 期遥感影像,从斑块和景观两个尺度上分析潮河流域的景观空间格局变化与径流的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区是密云水库以上的潮河上游流域,位于 $116^{\circ}10'—117^{\circ}35'$ 和 $40^{\circ}35'—41^{\circ}37'$,发源于河北省承德地区丰宁满族自治县上黄旗北,经滦平县、古北口流入北京密云县,至高岭乡漕城子注入密云水库东北端,干流全长 239.15 km。下会水文站为流域的控制水文站,控制断面以上集水面积 $4\,855.9\text{ km}^2$,约占密云水库上游集水区面积的 40%,入库水量约占密云水库入库水量的 60%,是北京市重要的饮用水源地。流域气候类型属于中温带向暖温带及半干旱向半湿润过渡的大陆性季风气候,多年平均气温为 $8.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量为 511 mm,汛期(6—9月)占年降水量的 75%以上。汛期降水多以暴雨形式出现,土壤侵蚀严重,土壤平均侵蚀模数为 $2\,682\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,多发生于上游河谷阶地黄土覆盖区。流域内土壤类型以棕壤和褐土为主,占总面积的 80%以上^[13]。

潮河流域植被以森林,灌木和草地为主,3者面积和占总面积的 80%以上。森林植被主要以人工和天然次生的暖温带落叶阔叶林为主。人工林主要分布在浅山丘陵和低山地带,天然次生林和原始林主要分布在地带中山以上山脊部位,以及山势陡峭人迹罕至的地方。人工林的主要树种包括侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杨(*Populus davidiana*)和旱柳(*Salix matsudana*)以及板栗(*Castanea mollissima*)、核桃(*Juglans regia*)等经济林。天然次生林主要分布在中山和低山人迹罕至的地方,树种以

山杨(*Populus pekingensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)和栓皮栎(*Quercus riabilis*)为主的阔叶混交杂木林为主^[14]。灌草丛主要分布在低山丘陵,类型有荆条(*Vitex negundo var. heterophylla*)、小红菊(*Dendranthema chanelii*)、酸枣(*Zizyphus jujuba*)、白头翁(*Pulsatilla chinensis*)和绣线菊(*Spiraea salicifolia* L)等。

1.2 研究方法

1.2.1 水文气象分析 采用下会(辛庄)流域控制水文站 1961—2009 年的径流数据以及流域内 8 个雨量站的数据,该数据分别由河北水文水资源局和北京水文总站提供。1961—2009 年的气温数据由密云、丰宁和承德 3 个气象站的数据空间插值所得,该数据由国家气象局提供。采用 Morlet 函数连续复小波变换对潮河下会站年径流量时间序列进行分析,得到潮河流域近 50 a 来径流在不同时间尺度上的变化特征,运用小波方差图确定主要的振荡周期^[15-16]。小波方差图反映了能量随尺度年的分布,可以确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度,进而确定一个时间序列中存在的主要周期^[17-19]。

1.2.2 景观格局分析 利用潮河流域 1979,1987,1991 和 2009 年 4 个时期 8 景的 Landsat 卫星影像,采用 ERDAS 9.2 和 ArcGIS 9.3 对影像进行处理,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,可计算的指数包括了 8 种类型,各类型之下又包括了许多个指数。其中在斑块级别共有 96 个、在类型级别共有 111 个、在景观级别共有 97 个指数,总共 277 个景观指标。运用 Fragstats 软件对斑块个数(NP)、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)和 Shannon's 多样性指数(SHDI)等进行提取计算,然后运用 Origin 8.0 软件,分析景观指标与径流的相关性。

3 结果与讨论

3.1 潮河流域水文气象变化特征分析

气候变化是通过气温、降水等因素的改变来影响陆地水文循环系统,从而影响水文径流过程^[3]。已有研究^[17]表明,在气候变化情况下,降水对流域产水量的影响最大,温度对径流时序影响最大,温度的变化会强化或减弱降水的影响。对潮河流域 1961—2009 年的降雨和气温的多年变化趋势进行分析发现,50 a

多来,年流域内气温呈显著增加趋势(图 1),1961—2009 年年平均气温的升温幅度为 0.215 °C/10 a。在

这期间,年均降雨量呈现明显的波动变化,在 2000 年后呈现较明显的波动下降的趋势(图 1)。

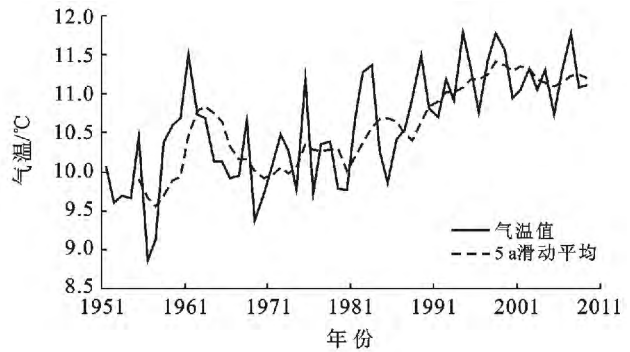
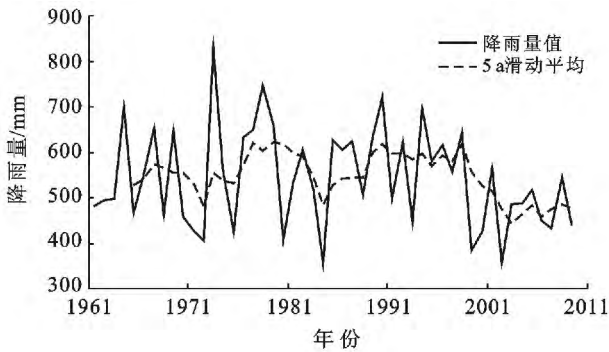


图 1 潮河流域 1961—2009 年年降雨量和温度变化曲线

分析图 2 可得,潮河的年径流在 1961—2009 年总体上呈现出减少趋势,而且减少的趋势显著。尤其是在 20 世纪的初期以来更为显著。根据径流的拟合曲线来看,潮河径流量表现为波动下降,在 20 世纪 70 年代和 90 年代表现为波峰,在 80 年代和 20 世纪初表现为波谷。为进一步探究潮河径流量的波动性,对潮河的径流变化时间序列进行了小波分析,结果如图 2 所示,图中负等值线用虚线表示,代表径流量偏低,正等值线用实线表示,代表径流量偏高,小波系数为零对应着突变点。

大尺度下的较为复杂的丰枯结构。根据方差分析可以发现,潮河径流量变化主要有两个主周期,分别为 7 和 28 a。在以 7 a 的小尺度周期上,可以发现在 20 世纪 80 年代后,该周期逐渐紊乱,出现不规则变化。分析其原因,主要是潮河流域从该时期开始,人类活动加剧,大量植树造林、修建水库等对潮河径流量造成巨大影响。在以 28 a 为周期的大尺度周期上,径流量的周期性基本稳定,按照该大尺度的周期规律,潮河流域目前正处于径流量相对较大的丰水期。

从小波系数的实部可以看出不同尺度下的丰枯位相结构,表明不同的时间尺度所对应的径流丰枯变化是不同的。小尺度的丰枯变化则表现为嵌套在较

根据潮河流域的水文气象资料,可以发现气候变化对潮河径流量的减少贡献较大,首先是降雨量的减少,直接造成径流量的下降;另外年均气温升高,造成流域的蒸散量加大,这也是潮河径流量减少的重要原因。

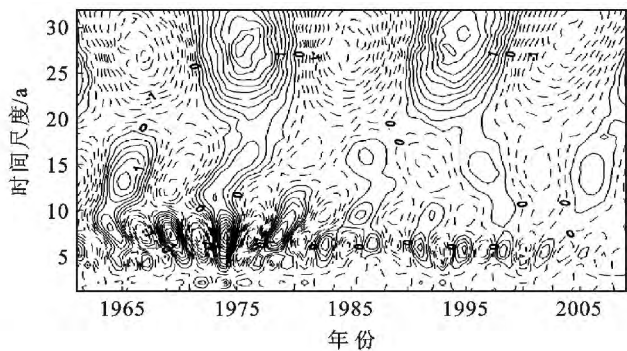
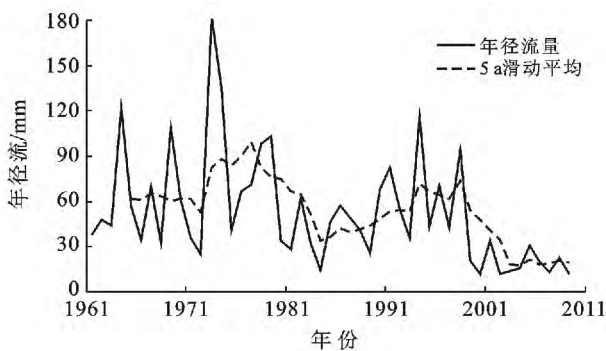


图 2 潮河下会站年径流变化及其小波变换系数图

3.2 潮河流域土地利用及其景观格局变化特征分析

3.2.1 土地利用变化 对潮河流域 4 期遥感数据采用监督分类和人工目视解译相结合的方法,并通过实地调查和文献调查,检查修改并建立土地利用/覆盖空间数据库,总精度在 85%左右。根据解译结果,统计出潮河流域土地利用面积变化(表 1)。由表 1 可知,潮河流域的植被类型以草地、灌木林地和乔木林地为主,这 3 种土地利用面积基本占流域面积的 85%

以上,从 1979 年以来,潮河流域的有林地和灌木林地呈现较明显的增幅,耕地面积则呈下降趋势。这种变化主要是由潮河流域的生态定位造成的,从 20 世纪 80 年代末开始,流域所处地区先后实施了潮白河密云水库上游国家重点水土流失治理工程、京津风沙源区防治沙工程 and 首都水资源区水土保持工程等生态和工程治理项目^[18],耕地在退耕还林还草的政策下采取封山育林措施而转化为草地和灌木林地,草地

因生态恢复和植树造林逐渐转化为灌木林地和乔木林地,其面积呈减少趋势。另外,随着社会经济的发展,1979—2009年流域内建筑用地面积增加了74%,而水域面积则由于气候和人类不合理利用的影响,呈现减少的趋势。

表1 不同土地利用面积变化 %

土地类型	1979年	1987年	1999年	2009年
耕地	12.82	8.73	9.27	6.31
草地	34.55	33.40	24.55	13.28
水域	1.23	1.10	1.23	1.14
未利用地	0.38	0.28	0.32	0.27
灌木林	30.43	32.91	35.45	41.76
建筑用地	0.56	0.64	0.84	0.98
有林地	20.03	22.93	28.34	36.26

3.2.2 景观格局变化 景观格局变化是景观生态学研究的核心内容之一,也是土地利用/土地覆盖变化研究的重要组成部分^[19]。景观格局的变化分析,可以帮助我们深入理解人类活动与景观结构的关系,对潮河流域而言,通过景观变化分析来发现、认识并运用景观变化的一般规律,对于制定旨在改善密云水库水量与水质的适应性流域管理技术措施体系是十分重要的。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。因而需要在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。

通过参阅大量前人的研究成果^[11,20-21],本研究在斑块尺度和景观尺度上选择了7个指标,包括:斑块数量(NP)、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)和Shannon's多样性指数(SHDI)等,对潮河流域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,各指标的计算公式详见参考文献^[22]。将潮河流域1979,1987,1991和2009年4个时期的Grid数据分别导入到Fragstats景观分析软件中,计算得到潮河流域的景观指标(表2)。从表2可以看出,潮河流域的景观形状指数(LSI)在1979—1991年期间呈明显的递增趋势,在1991—2009年又小幅回落;景观聚集度(CONTAG)在1979—1991年期间逐渐降低,从1991—2009年又上升。这反映出了潮河流域在80年代人类活动加剧,造成景观的破碎化程度较高,而后在90年代到新世纪初,景观中的某种优势拼块类型又形成了良好的连接性,景观的破碎化程度降低。潮河流域的斑块数量从1979—2009年增加了7倍多,尤其是在1987—1991年发生突变。流域的斑块周长(PERIM)、斑块形状指数(SHAPE)、斑块分维度(FRAC)和Shannon's多样性指数(SHDI)整体均呈现降低的趋势。由此可以看出,潮河流域斑块个数增加,斑块分布趋于均匀,斑块面积变小并逐渐趋于稳定,斑块形状趋向于简单,复杂化程度降低,流域内景观异质性变弱。

表2 潮河流域景观指标值

年份	NP	SHDI	LSI	CONTAG	PERIM/m	SHAPE	FRAC
1979	22 485	1.419 3	57.37	55.49	1 981.44	1.31	1.05
1987	47 475	1.381 3	91.51	52.45	1 700.45	1.39	1.06
1991	151 048	1.403 0	135.64	48.11	832.57	1.22	1.04
2009	154 773	1.286 7	124.79	52.19	707.67	1.15	1.03

注:NP为斑块数量,SHDI为Shannon's多样性指数,LSI为景观形状指数,CONTAG为景观聚集度,PERIM为斑块周长,SHAPE为斑块形状指数,FRAC为斑块分维度。

3.3 潮河流域景观格局变化与径流变化的相关性分析

从图3可以看出,选取的景观斑块指标与径流呈二次项相关关系,相关性显著。径流在流域斑块数量小于110 000,平均斑块周长小于1 050 m时,径流量随着其增大而减少,而在斑块数量大于110 000,平均斑块周长大于1 050 m时,径流量随其增大而增大,说明流域内的斑块数量以及平均斑块周长对径流量有很大影响,在平均斑块周长为1 050 m、流域斑块数量为110 000时,流域斑块的截留能力最强,流域产流能力最弱。在在平均斑块周长大于1 050 m、流

域斑块数量大于110 000时,流域斑块的截留能力慢慢变弱,流域产流能力变强,径流量变大。在流域斑块分维度小于1.05,平均板块形状指数小于1.3时,径流量随其增大而增大;在流域斑块分维度大于1.05,平均板块形状指数大于1.3时,径流量随这两项指标的增大而减少,说明流域内斑块的形状趋于复杂化以及下垫面粗糙度的增加,对流域产流具有很大影响。在一定限度内,径流量随着斑块形状的复杂化和下垫面粗糙度的增加而增大,超过一定的阈值,径流量则随其增大而减小。

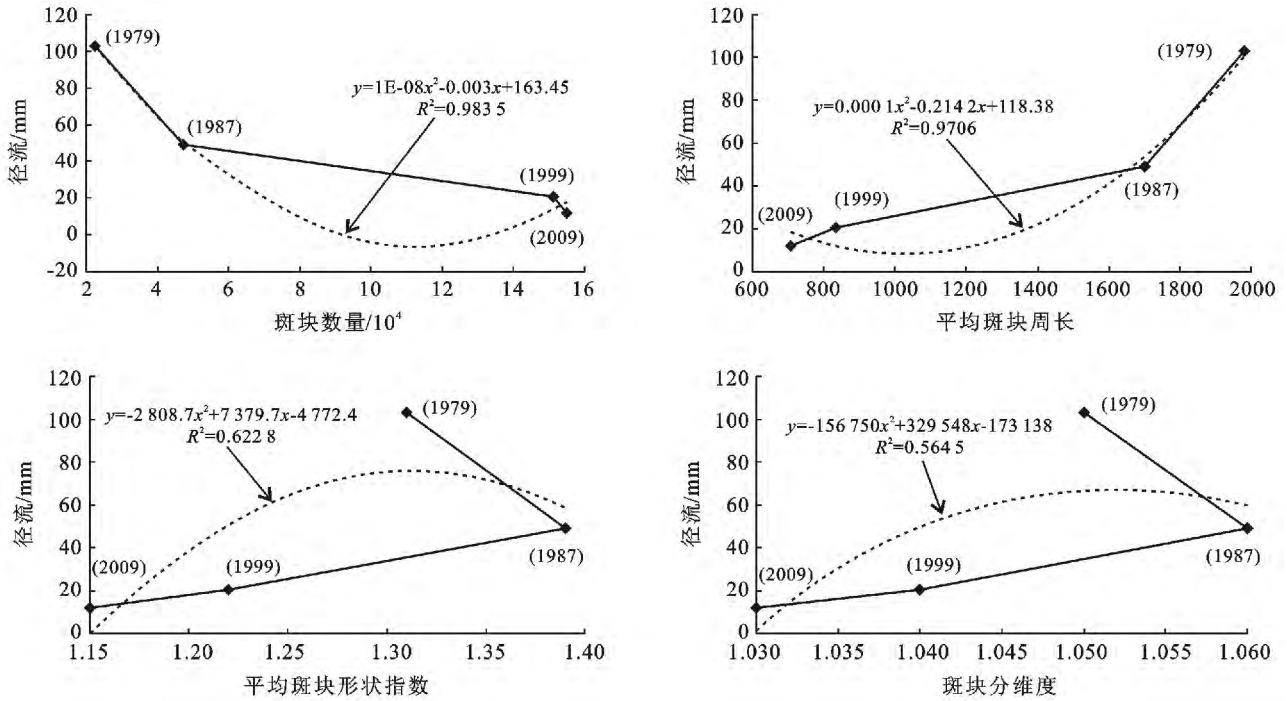


图 3 景观斑块指标与径流的关系曲线

从图 4 可以看出,景观格局指标与径流的关系同样呈二次项相关关系,但是 Shannon's 多样性指数和景观聚集度与径流的相关性不是很强, R^2 分别只有 0.588 和 0.670。景观形状指数与径流相关性显著,

R^2 达到 0.95,从拟合方程可以发现,径流量随着景观形状指数的增大而减小。这体现了流域内景观的异质性对径流的影响,随着流域内景观异质性的减弱,流域的产流能力减弱,径流量减小。

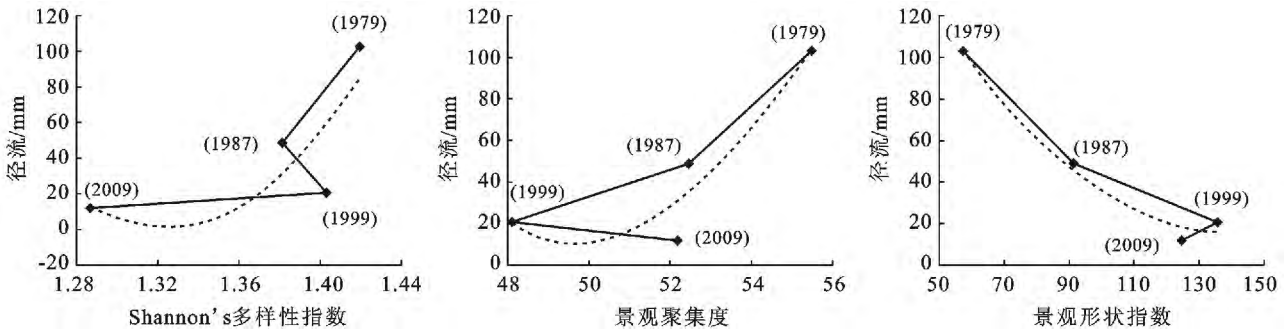


图 4 景观格局指标与径流的关系曲线

4 结论

(1) 潮河流域内气温以 $0.215\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ a}$ 的速度上升,降雨量也呈减少趋势。潮河的径流量显著减少,但是呈现以 28 a 为周期的丰枯转换。据此可知,潮河流域目前正处于丰水期。潮河流域的植被类型以草地、灌木林地和乔木林地为主,这 3 种土地利用面积基本占流域面积的 85% 以上,并呈增加的趋势。潮河流域斑块个数增加,斑块分布趋于均匀,斑块面积变小并逐渐趋于稳定,斑块形状趋向于简单,复杂化程度降低,流域内景观异质性变弱。选取的景观斑块指标与径流呈二次项相关关系,在流域斑块分维度

小于 1.05,平均板块形状指数小于 1.3 时,径流量随其增大而增大;在流域斑块分维度大于 1.05,平均板块形状指数大于 1.3 时,径流量随其增大而减少。在平均斑块周长为 1 050 m、流域斑块数量为 110 000 以及 Shannon's 多样性指数为 1.33 左右时,流域斑块的综合截留能力最强,流域产流能力最弱。

(2) 密云水库作为北京市重要饮用水源,近年来由于气候变化和人类活动的加剧,其入库水量持续减少,对北京市供水安全造成了巨大的压力。潮河流域作为政府大力推行以涵养水源、调节径流、改善生态环境为目的的水源涵养林,它的产流状况直接影响到密云水库的入库水量,在流域内进行退耕还林等生态

建设以及其他水土保持设施建设的同时,需要特别考虑人类活动对流域产水量的影响,以免矫枉过正,加剧密云水库的水量收支矛盾。

[参 考 文 献]

- [1] 董文福,李秀彬. 潮白河密云水库流域水资源问题分析[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(2): 58-60, 118.
- [2] 姚安坤,张志强,郭军庭,等. 北京密云水库上游潮河流域土地利用/覆被变化研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 53-59.
- [3] 董磊华,熊立华,于坤霞,等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 278-285.
- [4] 姚治君,管彦平,高迎春. 潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析[J]. 地理科学进展, 2003, 22(6): 599-606.
- [5] 李子君,李秀彬. 近 45 a 来降水变化和人类活动对潮河流域年径流量的影响[J]. 地理科学, 2008, 28(6): 809-813.
- [6] 李子君,李秀彬. 潮白河上游 1961—2005 年径流变化趋势及原因分析[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 82-87.
- [7] 孙宁,李秀彬,冉圣洪,等. 潮河上游降水—径流关系演变及人类活动的影响分析[J]. 地理科学进展, 2007, 26(5): 41-47.
- [8] 张利平,曾思栋,王任超,等. 气候变化对滦河流域水文循环的影响及模拟[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 966-974.
- [9] Flamenco S A, Ramos M M, Masera O R. Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest [J]. *Biological Conservation*, 2007, 138(1): 131-145.
- [10] 张明阳,王克林,何萍,等. 白洋淀流域景观空间格局变化研究[J]. 资源科学, 2005, 27(2): 134-140.
- [11] 张志强,王盛萍,孙阁,等. 流域径流泥沙对多尺度植被变化响应研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2356-2364.
- [12] 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.
- [13] 郭军庭. 潮河流域土地利用/气候变化的水文响应研究[D]. 北京:北京林业大学, 2012.
- [14] 夏兵,余新晓,鲁绍伟,等. 近 15 a 怀柔水库流域景观动态变化研究[J]. 林业资源管理, 2009, 19(1): 70-75.
- [15] 李远平,杨太保. 柴达木盆地近 50 a 来气温、降水的小波分析[J]. 干旱区地理, 2007, 30(5): 90-95.
- [16] 桑燕芳,王栋. 水文序列小波分析中小波函数选择方法[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 41-46, 52.
- [17] Tonefelt M D, Fontaine T A, Hotchkiss R H. Impacts of Climate Change on Water Yield in the Upper Wind River Basin [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36(2): 321-336.
- [18] 王丽艳,吕昌河,姚治君. 潮白河上游土地利用的时空变化特征与驱动力分析[J]. 地理科学进展, 2005, 24(5): 90-98.
- [19] 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.
- [20] 甄霖,谢高地,杨丽,等. 泾河流域分县景观格局特征及相关性[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3343-3353.
- [21] 赵锐锋,陈亚宁,李卫红,等. 塔里木河干流区土地覆被变化与景观格局分析[J]. 地理学报, 2009, 64(1): 95-106.
- [22] 郑新奇,付梅臣. 景观格局空间分析技术及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2010.