

考虑降雨的下垫面变化对径流的影响分析

游志康¹, 刁秀媚², 刘俊¹, 马箐¹, 尹洋洋¹, 高颖会¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江阴市水资源管理办公室, 江苏 江阴 214400)

摘要: 以下垫面覆被条件变化来表征的人类活动是水文循环研究中的核心问题, 对流域发电、水资源管理以及社会经济可持续发展起到至关重要的影响。本文采用趋势分析法分析右江水电站控制流域内的年降雨量以及年径流量的变化特征及趋势, 在利用 ArcGIS 分析流域下垫面变化的基础上, 分别采用多元统计模型和考虑降雨的多元统计模型对径流系数进行模拟。结果表明年降雨量与年径流量的总体变化趋势是一致的, 对年径流影响最大的要素是年降雨量, 将降雨作为自变量放入回归模型后, 模型拟合效果明显提高。

关键词: 下垫面变化; 径流系数; 统计模型; 降雨模型

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)06-0079-04

Impacts of underlying surface change on rainfall runoff

YOU Zhikang¹, DIAO Xiumei², LIU Jun¹, MA Qing¹, YIN Yangyang¹, GAO Yinghui¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Water Management Office of Jiangyin, Jiangyin 214400, China)

Abstract: The human activity which is characterized by underlying surface change is the core issues of the hydrological cycle study and has important effects on hydroelectricity, water resource management and economy sustainable development. This paper analyzed the variation trends of annual rainfall and runoff in Youjiang Hydropower Station catchment by trend analysis method. Based on the analysis of underlying surface changes, the runoff coefficients were also simulated by using multivariate statistical analysis and multivariate statistical analysis considering rainfall. The results showed that the trends of annual rainfall and runoff were consistent, the main influencing factor of annual runoff was annual rainfall, which made the model better when the rainfall was regarded as one argument in the rainfall - runoff regression model.

Key words: underlying surface change; runoff coefficient; statistical model; rainfall - runoff model

1 研究背景

水文循环要素分布的不均匀性和改变程度的一致性导致流域径流在时空分布上产生较大的差异性^[1]。一般将流域径流的影响因素归结为气候变化和人类活动两个方面, 而人类活动对流域径流的影响可能已经远远超过了气候变化所造成的影响, 人类活动正在使自然界原有的规律变得更加复杂^[2-4]。流域内的人类活动主要以流域下垫面的改变作为表现形式, 对流域水文特征产生影响的人类活动主要包括: 人工植树造林及毁林、农业活动强度的加大、对湿地进行排水并进行农业种植活动、围湖

造田、城市化建设等, 而这些方面的直接作用结果也正是流域下垫面覆被条件的改变^[5-7]。流域下垫面变化使土地表面植被的截留、滞留能力, 土地表面的蒸发能力以及土壤雨水的下渗量等要素发生了改变, 从而使流域的产流机制和水文条件发生了改变, 进而改变了流域内的旱灾和涝灾发生的强度和频率^[8-9]。因此, 以下垫面覆被条件变化来表征的人类活动是水文循环研究中的核心问题, 对流域发电、水资源管理及社会经济可持续发展起到至关重要的影响^[10]。因此, 深入研究流域的下垫面变化及其对流域径流变化的影响具有重要意义。王建群等^[11]和郝芳华等^[12]分别采用了数学水文模型和 SWAT

收稿日期: 2016-06-29; 修回日期: 2016-08-18

基金项目: 中国工程院重大咨询研究项目(2015-ZD-07)

作者简介: 游志康(1994-), 男, 湖北咸宁人, 硕士研究生, 研究方向为城市防洪与减灾。

通讯作者: 刘俊(1968-), 男, 安徽马鞍山人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城市防洪与减灾。

模型分析土地利用变化对径流的影响。由于水文循环及下垫面变化过程均比较复杂,而水文模拟方法的结果可靠性依赖于模型参数的率定情况,得出的结论存在着一定的主观性^[13]。

因此,本文选取红水河流域内的右江水电站控制流域为研究区域,在分析了研究区域下垫面变化的基础上,从水文统计角度建立了下垫面变化对径流影响的多元统计模型研究流域下垫面变化对径流的影响,同时在已有研究方法上考虑了前期降雨的因素,为红水河流域的径流预报提供切实可行的依据。

2 研究方法

本文采用趋势分析法分析右江站控制流域内的年降雨量以及年径流量的变化特征及趋势。在 ArcGIS 中对研究区内 1986 年、1995 年、2000 年、2008 年的土地利用数据进行处理,并采用 ArcGIS 中的叠置分析做研究区域内的土地利用转移矩阵,通过流域的各时间段的土地利用转移矩阵分析研究区域内的下垫面变化,作为下垫面变化对径流影响的统计模型构建的基础和依据。运用 SPSS 软件建立多元统计模型,从而定量分析下垫面变化对降雨径流的影响。

3 案例分析

3.1 研究区概况与数据来源

红水河在贵州省境内流域位于东经 $106^{\circ}10' - 107^{\circ}40'$,北纬 $24^{\circ}55' - 26^{\circ}25'$,流域面积 $15\,948\text{ km}^2$ 。西部与北盘江相邻,北部与乌江的分水岭为苗岭山脉,东部与柳江相邻,南部以红水河干流为界与广西隔河相望。红水河流域的主要水电站包括天一站、光照站、龙滩站和右江站。本文选取右江水电站控制流域作为主要研究对象。右江水电站位于右江干流上,坝址以上流域面积 $19\,600\text{ km}^2$,多年平均流量 $263\text{ m}^3/\text{s}$,多年平均径流总量 $8.29 \times 10^8\text{ m}^3$ 。

右江站控制流域附近有三个雨量站,使用泰森多边形法算得右江站 1967 - 2010 年的逐年降雨量;同时根据右江站 1967 - 2010 年入库流量资料计算出右江站控制流域内的逐年径流深。

3.2 降雨径流年际变化分析

3.2.1 年降雨量分析 利用泰森多边形法对右江水电站控制流域内的雨量站赋以面积权重后求得研究区域 1967 - 2010 年间多年平均降雨量为 $1\,294.45\text{ mm}$ 。

对右江水电站控制流域 1967 - 2010 年的年降雨量运用 SPSS 进行趋势回归分析,结果见图 1。由图 1 可以看出,该子流域的年降雨量序列具有下降趋势。

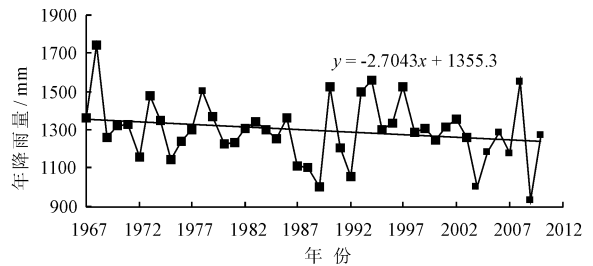


图1 降雨量年际变化曲线

右江站控制流域的年降雨序列回归方程是: $y = -2.7043x + 1355.3$, SPSS 计算模型中检验统计值为 -1.49 小于 0 ,说明该子流域的年降雨量序列具有下降趋势,但是由于检验统计值的绝对值小于临界检验值 1.96 ,所以下降趋势不明显。

3.2.2 年径流量分析 将右江水电站流域 1958 - 2015 年的入库流量资料转换为年径流深后,对流域的年径流深序列进行了趋势回归分析,趋势分析结果见图 2。

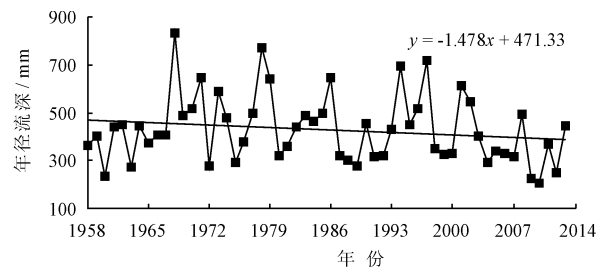


图2 径流深的年际变化

由图 2 可知研究区域的年平均径流深整体变化较大,2000 年以后径流深达到了历史最小值。年径流序列回归方程为: $y = -1.478x + 471.33$,统计检验值为 -1.51 小于 0 ,说明年平均径流深存在线性减小趋势,但是由于检验统计值的绝对值小于临界检验值 1.96 ,说明减少的趋势不明显。

3.3 模型构建

3.3.1 下垫面变化分析 结合全国土地利用分类标准以及红水河流域土地利用标准,将流域下垫面划分为 6 个类型:耕地(A)、林地(M)、草地(G)、水域(W)、城镇(乡)居民用地(U)和未利用土地类型(B)。本文主要以右江站控制流域 1986、1995、2000 和 2008 年的土地利用矢量数据为基础,采用 ArcGIS 的土地利用变化转移矩阵来定量描述右江水电站控

制流域的下垫面变化过程,结果见表 1~3 土地利用转移矩阵。

表 1 1986-1995 年土地利用转移矩阵

年份	下垫面类型	1986					总计	新增
		A	M	G	W	U		
1995	A	4.22	3.37	0.85	0.01	0.02	8.46	4.24
	M	4.29	71.79	4.24	0.04	0.01	80.37	8.58
	G	0.85	4.07	6.15	0.01	0.00	11.09	4.94
	W	0.00	0.05	0.00	0.01	0.00	0.06	0.06
	U	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01
总计		9.37	79.28	11.25	0.06	0.03	100.00	
减少		5.15	7.49	5.10	0.06	0.03		

表 2 1995-2000 年土地利用转移矩阵

年份	下垫面类型	1995					总计	新增
		A	M	G	W	U		
2000	A	4.26	4.35	0.85	0.00	0.01	9.47	5.21
	M	3.33	71.71	3.95	0.05	0.00	79.04	7.33
	G	0.85	4.26	6.28	0.00	0.00	11.40	5.12
	W	0.01	0.04	0.01	0.01	0.00	0.06	0.06
	U	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.04
总计		8.46	80.37	11.09	0.06	0.02	100.00	
减少		4.21	8.66	4.81	0.06	0.01		

表 3 2000-2008 年土地利用转移矩阵

年份	下垫面类型	2000					总计	新增
		A	M	G	W	U		
2008	A	4.36	3.73	0.95	0.00	0.01	9.06	4.70
	M	4.10	71.54	4.26	0.03	0.01	79.95	8.41
	G	0.93	3.65	6.16	0.01	0.01	10.76	4.60
	W	0.03	0.09	0.02	0.02	0.00	0.16	0.14
	U	0.03	0.03	0.00	0.00	0.01	0.07	0.06
总计		9.46	79.04	11.39	0.06	0.04	100.00	
减少		5.10	7.50	5.23	0.04	0.03		

从表 1 中 1986-1995 年土地利用转移矩阵可看出,1986 年到 1995 年这个时间段内,变化最大的下垫面类型是林地(M),其总变化量为 16.07%;由表 2 可以看出 1995-2000 年内下垫面变化最大的也是林地(M),总变化量为 15.99%;由表 3 可以看出 2000-2008 年这个时间段内下垫面变化和前两个时间段的变化类似。总体而言,右江站控制流域内下垫面的变化主要以林地(M)、耕地(A)和草地(G)为主,其他两种土地利用类型变化幅度不大。

3.3.2 多元回归模型

(1)数据处理。为了消除量纲不同造成的数理统计结果的误差,本文将收集到的数据进行无量纲化处理。年径流作为统计模型的因变量,将径流系数 α 作为因变量年径流的无量纲化后的结果。流域

的下垫面类型通过与流域的总面积相除,将面积转化为面积比的形式作为统计模型的自变量,下垫面要素无量纲化结果见表 4。

表 4 右江站下垫面要素无量纲化结果 %

年份	下垫面类型					B
	A	M	G	W	U	
1986	9.0487	79.9560	10.7581	0.1638	0.0735	
1995	9.4707	79.0294	11.3953	0.0619	0.0426	
2000	9.3766	79.2780	11.2501	0.0637	0.0317	
2008	8.4595	80.3740	11.0869	0.0608	0.0189	

其余年份的下垫面要素根据这 4 个年份的下垫面类型分配情况,并结合 3.3.1 中土地利用转移矩阵得出的各下垫面要素变化趋势对各下垫面要素进行插值。

(2)多元回归分析。利用 SPSS 中的多元回归分析来分析右江站控制流域的年径流系数 α 与各下垫面要素的相关关系,即

$$\alpha = f(A, W, U, M, G) \quad (1)$$

分析计算得到的线性回归模型如下:

$$\alpha = 0.182A - 0.256G - 1.769U + 1.575, \text{其中 } R^2 = 0.561, \text{拟合结果见图 3。}$$

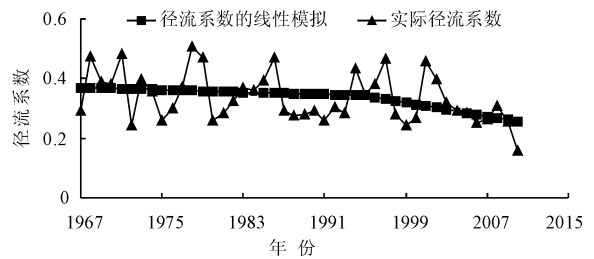


图 3 径流系数的线性拟合

非线性回归模型如下:

$$\alpha = 127.731U^{0.007} - 4.796M^{-1.506} - 78.179G^{1.174} - 187.839W^{0.049} - 80.243A^{5.015} + 11.351, \text{其中 } R^2 = 0.460, \text{拟合结果见图 4。}$$

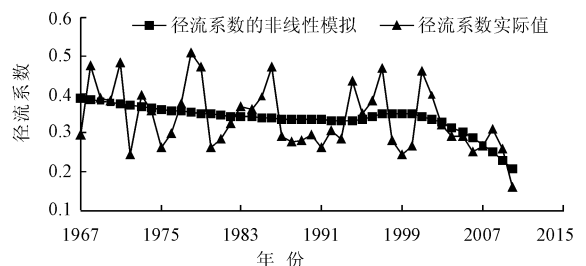


图 4 径流系数的非线性拟合

根据流域的线性回归模型,右江站控制流域的 $R^2 = 0.561$,拟合效果较好,模型标准残差 $Dw =$

1.935接近于2,说明模型残差满足正态分布,模型拟合结果可靠。模型不存在自相关,进入线性回归模型的因子有:耕地(A)、草地(G)以及城镇(乡)居民用地(U)。根据非线性回归模型,右江站控制子流域的 $R^2 = 0.460$,拟合效果较好,这5个下垫面因子至少有两次进入了线性模型。

3.3.3 考虑降雨量的模型 从前面结果来看,年降雨量与年径流量有着一定的关系,将年降雨量也作为一个因子,纳入统计模型中,研究年径流量与年降雨量以及各下垫面因子之间的关系。因此可将此模型与未考虑降雨量的模型进行对比。选取1977年的年径流量与年降雨量作为基准年,其他年份的各项指标作为基准年的相对变化值。将无量纲化后的年径流(R)作为因变量,年降雨(P)和各下垫面要素作为自变量,利用SPSS中的多元线性回归分析建立多元线性回归模型如下:

$\alpha = 2.359P + 8.799M - 11.718G - 7.151, R^2 = 0.968$,拟合结果见图5。

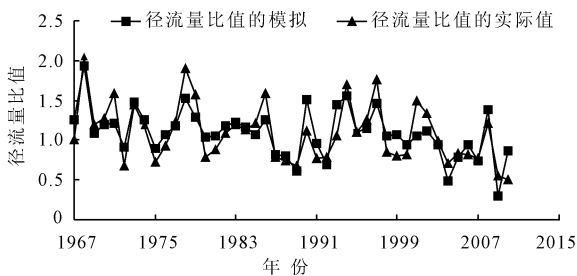


图5 考虑降雨的径流量比值线性拟合

非线性模型如下:

$\alpha = 8.771A^{0.749} + 10.138M^{4.361} - 19.269G^{3.178} + 3.408W^{0.711} + 0.866U^{1.841} + 1.040P^{2.376} - 5.384$,相关系数 $R^2 = 0.677$,拟合结果见图6。

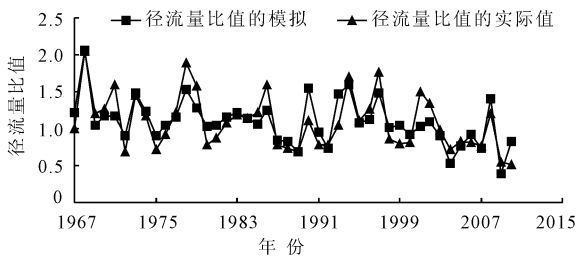


图6 考虑降雨的径流量比值非线性拟合

对比之前自变量未考虑降雨的回归模型可以看出,将降雨作为自变量放入回归模型后,模型拟合效果明显提高了。从模型自身来看,流域的年径流(R)主要受到年降雨(P)的影响。

4 结论

本文在分析流域年降雨量、年径流量以及下垫面的变化的基础上,分别采用多元统计模型和考虑降雨的多元统计模型对径流系数进行模拟并对比,得出的主要结论如下:

(1)流域的年降雨量和年径流量都有着下降的趋势,但趋势不明显;流域内下垫面的变化不大,主要以林地(M)、耕地(A)和草地(G)为主。

(2)对年径流影响最大的要素是年降雨量。未考虑降雨的线性回归模型与非线性回归模型 R^2 分别为0.561和0.460,与其他相关研究不同的是本文将降雨也作为自变量,放入回归模型后 R^2 分别达到了0.968和0.677,模型拟合效果明显提高。

参考文献:

- [1] 周祖昊,贾仰文,王浩,等. 大尺度流域基于站点的降雨时空展布[J]. 水文, 2006, 26(1):6-11.
- [2] 林凯荣,何艳虎,陈晓宏. 气候变化及人类活动对东江流域径流影响的贡献分解研究[J]. 水利学报, 2012, 43(11):1312-1321.
- [3] 左德鹏,徐宗学,隋彩虹,等. 气候变化和人类活动对渭河流域径流的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(Z1):115-123.
- [4] 叶许春,张奇,刘健,等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流变化的影响研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5):835-842.
- [5] 董国强,杨志勇,于赢东. 下垫面变化对流域产汇流影响研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2013(3):111-117.
- [6] 马欢. 人类活动影响下海河流域典型区水循环变化分析[D]. 北京:清华大学, 2011.
- [7] 田彦杰. 基于SWAT的流域下垫面变化的水文响应研究[D]. 天津:天津理工大学, 2012.
- [8] 李博. 上海高度城市化地区土地利用变化对雨水径流影响的研究[D]. 上海:华东师范大学, 2008.
- [9] 田彦杰. 基于SWAT的流域下垫面变化的水文响应研究[D]. 天津:天津理工大学, 2012.
- [10] 王晓云. 流域土地利用变化对径流影响问题的研究[D]. 天津:天津大学, 2008.
- [11] 王建群,卢志华. 土地利用变化对水文系统的影响研究[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2):292-298.
- [12] 郝芳华,陈利群,刘昌明,等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3):5-8.
- [13] 张冬冬,冯平. 下垫面要素变化对洪水影响的多元统计分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5):37-44.