

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.02.009

下垫面要素变化对径流影响的多元统计分析

刘俊¹,尹洋洋¹,沙晓军²,马箐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:为提高流域径流预报精度,增加水电站运行效益,选取小湾水电站控制流域为研究对象,根据卫星遥感资料提取的研究区域的 1986、1995、2000 年土地利用资料和小湾水电站多年入库流量资料,以径流系数为因变量,耕地、林地、建筑用地等下垫面要素为自变量,用 SPSS 回归模型、非线性回归模型分析径流系数和下垫面要素的回归关系;同时考虑到前一年降雨对下一年径流有一定的影响,加入降雨径流方法,采用 3 种方法分别对径流系数进行模拟。结果表明:非线性回归模型对径流系数模拟程度较好,可应用于径流预测工作中,提高中小流域的水能利用程度。

关键词:下垫面变化;径流系数;线性回归;非线性回归;降雨径流

中图分类号:P333 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)02-0041-03

Multivariate statistical analysis of influence of underlying surface change on runoff

LIU Jun¹, YIN Yangyang¹, SHA Xiaojun², MA Qing¹, GAO Yinghui¹

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

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

Abstract: In order to improve the accuracy of the basin's runoff prediction and increase the efficiency of operation of hydropower stations, the control catchment of the Xiaowan Hydropower Station was selected as a study area. Based on landuse data from the years 1986, 1995, and 2000 taken from remote sensing satellites and multi-year data of reservoir inflow of the Xiaowan Hydropower Station, with the runoff coefficient used as the dependent variable, and arable land, forest land, building land, and other underlying surface factors as independent variables, the regression relation between the underlying surface factors and the runoff coefficient was analyzed with the SPSS regression model and a non-linear regression model. With consideration of the influence of the rainfall in the previous year on the runoff in the following year, the method of rainfall-runoff simulation was adopted. The three methods were used to simulate the runoff coefficient. The results show that the non-linear regression model fits the runoff coefficient better than the other two models, and it can be applied to the prediction of runoff and enhancement of the utilization of hydropower in medium and small-sized basins.

Key words: underlying surface change; runoff coefficient; linear regression; non-linear regression; rainfall-runoff

人类活动和气候波动,直接导致了径流丰枯无常,较低的径流预报精度不仅影响了水电站的发电效益,甚至发生严重的缺电现象^[1-3]。天然径流的丰枯变化主要取决于气候气象条件和流域下垫面特征(地形、植被等),近年来植树造林、城市化发展以及兴建水库等造成了流域下垫面发生了很大的改

变,在一定程度上影响了流域内的径流规律^[4-6]。目前在径流预报中,下垫面对径流的影响相关研究不足,影响机理不明,难以确定主要下垫面影响因素,导致了径流预报精度较低。如何提高天然径流的预测准确性尤其是中长期预测的准确性,成了水电调度运行上最为迫切需要解决的困难之一。目前

基金项目:国家自然科学基金(41471015)
作者简介:刘俊(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事城市防洪与减灾和水资源方面研究。E-mail:ljhohai@163.com

国内外在流域径流的中长期预测方法上,主要采用的还是水文学的预报理论方法,即基于历史径流数据的数理统计方法,包括时间序列分析、周期分析预报等方法^[7]。数理统计方法存在的一个主要缺陷是无法对历史上不曾出现的径流情况进行预测,这一缺陷在近年来气候变化异常的情况下暴露得尤为明显,往往导致预测偏差很大的结果。目前,国内基于历史水文资料统计分析的中长期预测准确率一般在40%~60%左右^[8]。为此,亟须进一步研究、完善流域中长期径流的预测方法,为提高预测准确性提供更为全面的理论和技术支持。

本文主要通过 SPSS 软件分析影响流域产汇流的各下垫面要素的长期变化情况,从而确定影响径流变化的主要影响因子,最终利用其中某个或多个影响因子建立下垫面要素与径流系数的回归关系。研究结果可为研究区域径流的中长期预测提供科学、有效的预测方法和技术支持,对开展流域优化调度尤其是中长期优化调度提供良好的决策依据,对提高流域水能资源的利用程度,降低电网调度运行的不确定性和电力供需平衡风险具有十分重要的意义,同时兼具良好的经济效益和社会效益。

1 研究区域概况

研究区域为小湾水电站的控制流域,小湾水电站位于云南省大理州南涧县与临沧市凤庆县交界的澜沧江中游河段,距昆明公路里程为455 km,是澜沧江中下游水电规划“两库八级”中的第二级,上游为功果桥水电站,下游为漫湾水电站。小湾水库是梯级电站的“龙头水库”,总库容约150亿 m³,调节库容近100亿 m³,具有多年调节能力,以发电为主,兼有防洪、灌溉、拦沙及航运等综合利用效益,是国家西电东送的标志性水利工程。

2 数据的收集与处理

根据研究区域的22个代表气象站降雨资料,用泰森多边形方法计算研究区域1977—2010年的逐年面降雨量,同时根据小湾水电站1977—2010年的入库流量资料计算得出研究区域内1977—2010年逐年径流深。根据卫星遥感资料提取的小湾电站控制流域1986、1995、2000年的土地利用资料,运用 ArcGIS 将各土地利用类型进行整理分类,其中下垫面影响因子包括耕地、湖库、城市用地、林地、草地和未开发利用土地^[9]。

为了消除量纲不同造成的数理统计结果的误差,将收集到的数据进行无量纲化处理。选取的因变量为径流数据,为消除流域内不同降雨条件的影

响,进一步将径流深资料转化为无量纲的径流系数 α ,径流系数 α 随时间变化曲线见图1。由图1可见,径流系数总体上随着时间的推移先增大后减小。各个下垫面要素为自变量,将各下垫面要素进行无量纲化处理,通过各下垫面要素所占面积与流域面积相除的形式将各下垫面要素转换成耕地比 A 、林地比 M 、草地比 G 、湖库率 W 、城市化率 U 、未利用土地比 B (表1)。由表1可见,小湾水电站控制流域以草地、林地和未利用土地为主,3者占总流域面积97%以上,耕地和湖库面积随着年份的增加有逐渐增大的趋势,但增速减缓,未利用土地1995年之后比较稳定,草地面积逐年减小,林地比先减小后增大。城市用地面积比较小,城市化率低,变化微弱可以忽略不计。

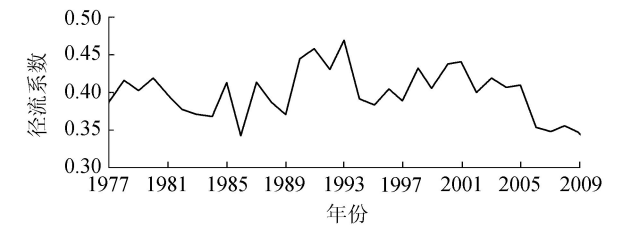


图1 径流系数随时间变化曲线

表1 无量纲化后的土地利用情况 %

年份	耕地比例	林地比例	草地比例	湖库率	城市化率	未利用土地比例
1986	1.7549	25.4048	66.9285	0.3309	0.0223	5.5586
1995	2.4047	23.6144	65.4492	0.4240	0.0263	8.0814
2000	2.4619	24.5642	64.4341	0.4288	0.0299	8.0811

3 研究方法

3.1 下垫面因子的二次插值

由于下垫面资料年限有限,因此本文根据小湾水电站控制流域内1986、1995、2000年的下垫面资料按年进行二次插值,方法和结果如下:用二次函数 $y=ax^2+bx+c$ 拟合1986、1995、2000年3个年份与其土地利用率之间的关系(其中年份为自变量,各个下垫面因子为因变量),得到各个下垫面要素的差值表达式,从而得到研究区域的1977—2010年各个下垫面因素的值。差值表达式系数见表2,其中 R^2 是相似系数,表示拟合程度,越接近于1表示拟合程度越好。

表2 二次函数差值表达式系数

下垫面要素	a	b	c	R^2
M	0.027778	-110.784	-10545.7	1.000
G	-0.00276	10.82698	-10546.36	1.000
W	-0.00067	2.678878	-2676.06	1.000
U	0.0000197	-0.07791	77.12323	1.000
B	-0.02003	80.00584	-79897.6	1.000
A	-0.00434	17.34974	-17337	1.000

3.2 相关性分析

利用 SPSS 软件中的主成分分析方法,分析计算出小湾站控制流域内 1977—2010 年逐年径流系数与下垫面因子的相关关系(表 3)。

表 3 径流系数与下垫面因子的相关关系

	<i>U</i>	<i>M</i>	<i>G</i>	<i>W</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	径流系数
<i>U</i>	1.000	0.231	-0.821	0.563	0.279	0.782	0.310
<i>M</i>		1.000	-0.646	-0.672	-0.779	-0.420	-0.535
<i>G</i>			1.000	-0.054	0.043	-0.363	-0.349
<i>W</i>				1.000	0.843	0.946	0.191
<i>B</i>					1.000	0.762	0.496
<i>A</i>						1.000	0.048
径流系数							1.000

从表 3 可以看出径流系数主要是受林地、草地、城市化率和未利用土地影响,相关系数分别是-0.535、-0.349、0.310、0.496,林地和草地是植被,植被有增加入渗率、减小径流系数、明显降低径流流速等作用,植被面积的减少可导致年径流量增加,所以径流系数和林地草地呈负相关关系;开荒、坡地改梯田、扩大灌溉面积以及旱地改水田等农业开发活动,拦蓄和耗用了地面径流,增加地面水下渗机会,可以使洪水过程平缓,但随着土地利用的开发强度不断增加,极大地破坏了土壤结构,促使土壤压实和结皮,从而使入渗速率和土壤蓄水量有所降低,增加年径流量,也与城市化率和未利用土地影响呈正相关关系相吻合。

3.3 模型的构建

利用 SPSS 中的线性和非线性回归模型,分析计算出 6 个因子与径流系数 α 的回归关系,即 $\alpha = f(A, W, U, M, G, B)$,并可根据此表达式对径流进行预测。

3.3.1 线性回归

对研究区域进行线性回归分析计算。取径流系数 α 为因变量,耕地比 *A*、湖库率 *W*、城市化率 *U*、林地比 *M*、草地比 *G* 和未开发利用土地比 *B* 为自变量,通过逐步回归的方法建立多元线性回归分析的径流系数模型。得到的模型表达式为

$\alpha = -0.144A + 0.047B + 0.013G + 7.176U - 0.667$
其中,耕地比 *A*、未利用土地面积比 *B*、草地比 *G* 以及城市化率 *U* 先后进入模型。湖库率 *W* 和林地比 *M* 未进入模型,此时拟合的 $R^2=0.516$,拟合结果见图 2。

3.3.2 非线性回归

对研究区域进行非线性回归分析计算。建立多元非线性回归分析的径流系数模型。利用非线性回归的曲线分析中的多项式来拟合,表达式为

$\alpha = 26.957U^{0.748} - 0.067M^{1.699} - 0.341G^{1.282} +$

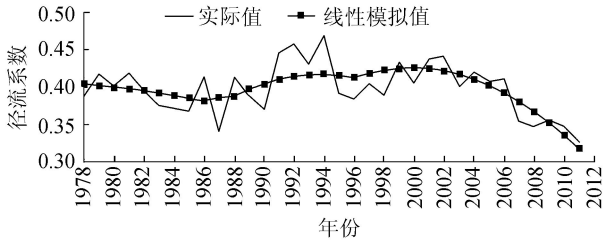


图 2 径流系数的线性拟合

$108.436W^{5.799} - 2.433B^{0.820} + 0.000159A^{9.231} + 104.419$
此时 $R^2=0.747$,拟合曲线见图 3。

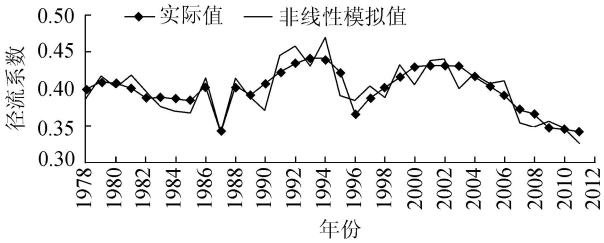


图 3 径流系数的非线性拟合

3.3.3 降雨径流拟合

由于上一年度的径流量对本年度的径流量仍有一定贡献,本文考虑了降雨径流拟合分析,但此种方法并没有考虑下垫面因子对于径流的影响,因此也可以与考虑下垫面因素的方法进行对比。主要方法如下:第 *i* 年,设定 $R_i = xP_{i-1} + (1-x)P_i$, x 为分配系数,取值范围 0~1,建立 R_i-P_i 的关系式, R_0^2 为降雨量与径流量拟合程度的相关系数,系数 x 的取值与 R_0^2 的关系见表 4。

表 4 x 与 R_0^2 的拟合关系

x	R_0^2	x	R_0^2
0.10	0.6187	0.31	0.6610
0.20	0.6536	0.32	0.6589
0.25	0.6628	0.33	0.6562
0.26	0.6636	0.34	0.6530
0.27	0.6639	0.35	0.6443
0.28	0.6640	0.40	0.6200
0.29	0.6635	0.45	0.5739
0.30	0.6625	0.50	0.5125

由表 4 可见,当分配系数 x 取 0.28 时,此时降雨径流拟合程度最高, $R_0^2=0.6640$,结果见图 4。

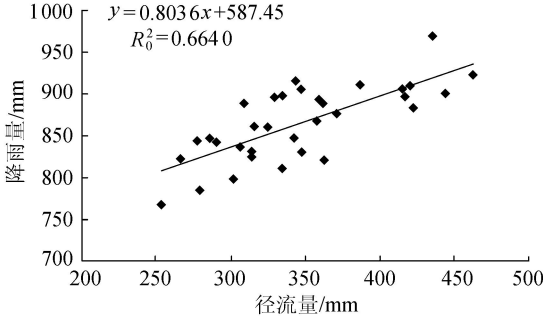


图 4 分配系数为 0.28 时的降雨径流拟合

当 $x=0.28$ 时,降雨量与径流量之间的表达关系式为: $y=0.8036x+587.45$,根据径流量可用此公式算出降雨量,降雨量与径流量之比就是本方法模拟得到的径流系数,将此径流系数与实际径流系数进行拟合,此时相关系数 $R^2=0.718$,拟合程度较好,结果见图 5。从图 5 中可以看到降雨径流模拟的径流系数在 1993 年之前与实际径流系数拟合程度较好, $R^2=0.841$,但 1993 年之后差距明显加大,这与下垫面的改变有着很大的关系。

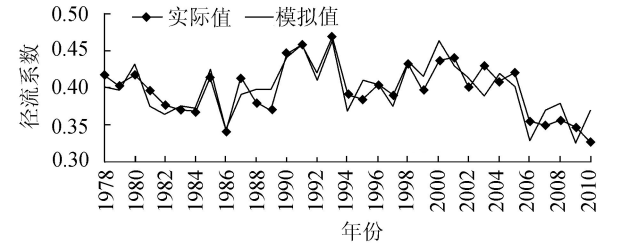


图 5 降雨径流模拟

4 结 论

a. 径流系数主要受林地、草地、城市用地和未利用土地影响,与林地、草地呈负相关,与城市用地和未利用土地呈正相关。相关系数分别是-0.535、-0.349、0.310 和 0.496。

b. 通过数理统计的方法对径流进行模拟分析,结果表明:非线性模型对径流量的拟合程度较高, $R^2=0.747$ 。没考虑下垫面要素的降雨径流模型,1977—1993 年对径流的拟合程度较高 $R^2=0.841$,之后由于土地利用的变化拟合的程度变差,说明研究下垫面的变化对模拟径流有很大的意义。

参考文献:

[1] 陈晓宏,涂新军,谢平,等. 水文要素变异的人类活动影响研究进展[J]. 地球科学进展,2010,25(8): 800-811. (CHEN Xiaohong, TU Xinjun, XIE Ping, et al. Progress in the research of human induced variability of hydrological elements[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(8): 800-811. (in Chinese))

[2] 郝振纯,苏振宽. 土地利用变化对海河流域典型区域的径流影响[J]. 水科学进展,2015,26(4): 491-499. (HAO Zhenchun, SU Zhenkuan. Effects of land use change on runoff in the typical areas in Haihe River basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(4): 491-499. (in Chinese))

[3] 燕爱玲,达良俊,崔易肿. 渭河流域水文过程变异诊断[J]. 人民黄河,2015,37(9): 8-10 (YAN Ailing, DA Liangjun, CUI Yichong. Variation diagnosis during hydrological process in the Weihe River Basin[J]. Yellow River, 2015, 37(9): 8-10. (in Chinese))

[4] 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 (ZHANG Dongdong, FENG Ping. Multivariate statistical analysis of influence of underlying surface change on flood[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(5): 37-44. (in Chinese))

[5] 卜红梅,刘文治,张全发. 多元统计方法在金水河水质时空变化分析中的应用[J]. 资源科学,2009, 31(3): 429-434. (BU Hongmei, LIU Wenzhi, ZHANG Quanfa. Application of multiple statistical analysis to spatial-temporal variations of water quality of the Jinshui river[J]. Resources Science, 2009, 31(3): 429-434. (in Chinese))

[6] 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. (WANG Jianqun, LU Zhihua. Study on the impact of land use changes on the hydrological system[J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(2): 292-298. (in Chinese))

[7] 朱映新. 苏州市降雨径流关系及下垫面变化对径流量影响研究[D]. 南京:河海大学,2007.

[8] 韩丽. 流域土地利用变化及水文效应研究[D]. 南京:河海大学,2007.

[9] 王辉,董元华,李德成,等. 基于遥感与 GIS 技术的苏州市土地利用动态变化研究[J]. 土壤,2004,36(4): 420-423. (WANG Hui, DONG Yuanhua, LI Decheng, et al. Study on dynamic change in land use in Suzhou based on remote sensing & GIS techniques[J]. Soils, 2004, 36(4): 420-423. (in Chinese))

(收稿日期:2015-12-28 编辑:徐 娟)

• 信息播报 •

河海大学“环境/生态学”学科进入 ESI 全球排名前 1%

据美国 ESI(Essential Science Indicators, 基本科学指标)数据库 2016 年 1 月最新数据显示,继“工程学”学科之后,河海大学“环境/生态学”学科首次进入 ESI 世界排名前 1% 行列。至此,河海大学进入 ESI 世界前 1% 的学科增至 2 个。根据最新 1 期的 ESI 数据统计结果,河海大学“环境/生态学”学科共发表 SCI 论文 666 篇,总被引 3 354 篇次,篇均被引 5.04 次,“总被引次数”在全球所有进入该学科 ESI 排名前 1% 的 751 个科研机构中排名第 742 位。

ESI 数据库由美国科技信息所 2001 年推出,是衡量科学研究绩效、跟踪科学发展趋势的基本分析评价工具。学科进入 ESI 数据库是当今普遍评价大学和科研机构国际学术水平及影响力的重要指标,也是全球公认的判断学科发展水平的重要参照之一。ESI 排名前 1% 的学科一般被视为国际高水平学科。

(本刊编辑部 供稿)