

祁连山大野口流域降水—土壤水—河川来水相关性分析

金铭^{1,3}, 牛贇^{1,2,3}, 敬文茂^{1,3}, 苗毓鑫^{1,3}, 赵维俊^{1,3}, 车宗玺^{1,3}

(1. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院 甘肃省森林生态与冻土水文水资源重点实验室, 甘肃 张掖 734000; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃张掖生态科学研究院 甘肃省祁连山生态科技创新服务平台, 甘肃 张掖 734000)

摘要: [目的] 对祁连山大野口流域降水、土壤水和河川来水的相互关系进行分析, 旨在为掌握流域水文过程及河川径流形成机理提供理论支持。[方法] 运用祁连山大野口流域 18 a 人工和 2 a 自动监测的 38 万多个数据, 采用特征参数算法、相关和多元回归等方法进行分析。[结果] (1) 降水量、空气湿度和河川径流 18 a 平均为 374.06 mm, 60.91%, 166.73 mm。降水的 44.57% 最后形成了河川径流。降水和河川径流上升率均为 18 mm/10 a, 空气湿度上升率约为 1.2%/10 a。(2) 降水、空气湿度、土壤水、河川来水在一年中的变化步调基本一致。(3) 在森林高度范围内, 距地面越高, 空气湿度越大, 受降水的影响越小; 在 0—80 cm 深度范围内, 土壤越深, 降水对土壤水分的影响越小。(4) 降水、空气湿度、土壤水、河川来水的相互关系较紧密, 建立的回归模型可预测降水、土壤水、河川来水量变差的 95.2%, 88.8%, 97.6%, 准确率可达 93.4%, 84.6%, 96.7%。[结论] 降水、土壤水、河川来水的分配比例可量化和可调控流域水资源需水量方面的分配比例; 将人工观测和自动监测数据同化分析, 解决了流域生态水文过程研究中的数据短缺问题。

关键词: 降水; 空气湿度; 土壤水分; 河川径流; 祁连山大野口流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)04-0056-06

中图分类号: Q948, X171.1

文献参数: 金铭, 牛贇, 敬文茂, 等. 祁连山大野口流域降水—土壤水—河川来水相关性分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 56-61. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.011

Correlation Analysis of Precipitation, Soil Water and River Water in Dayekou Basin of Qilian Mountains

JIN Ming^{1,3}, NIU Yun^{1,2,3}, JING Wenmao^{1,3},
MIAO Yuxin^{1,3}, ZHAO Weijun^{1,3}, CHE Zongxi^{1,3}

(1. Academy of Water Resource Conservation Forests of Qilian Mountains in Gansu Province, Gansu Provincial Key Laboratory of Forest Ecology and Frozen-soil Hydrology and Water Resources, Zhangye, Gansu 734000, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. Academy of Ecology Science of Zhangye, Gansu Science and Technology Innovation Service Platform of Ecology in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: [Objective] Correlations among precipitation, soil water and river water were analyzed in Dayekou Basin of Qilian Mountains in order to explore the ecological and hydrological processes of basin and river runoff formation. [Methods] More than 380 thousand data observed artificially for 18 years and obtained automatically for 2 years were processed using methods of characteristic-parameters algorithm, correlation analysis and multiple regression. [Results] (1) The annual precipitation, air humidity and river runoff depth averaged over the 18 years' artificial observations were 374.06 mm, 60.91% and 166.73 mm, respectively. The river runoff accounted annually for 44.57% of the precipitation. The precipitation, air humidity and river runoff all showed rising trends with average rates of 18 mm/10 a, 1.12%/10 a and 18 mm/10 a, respectively. (2) The precipitation, air humidity, soil moisture and river runoff varied intra-annually in step. (3) With the height increase from forest ground, the influence of precipitation on air humidity decreased; In 0—80 cm

收稿日期: 2015-11-19

修回日期: 2016-02-26

资助项目: 甘肃省基础研究创新群体项目“祁连山土壤水源涵养功能与森林分布变化响应关系”(145RJG337); 国家自然科学基金项目(41461004); 甘肃省科技创新服务平台项目(144JTCG254)

第一作者: 金铭(1972—), 男(汉族), 甘肃省张掖市人, 博士, 副研究员, 主要从事生态水文学方面的研究。E-mail: shyjinming@163.com。

通讯作者: 牛贇(1974—), 男(汉族), 甘肃省通渭县人, 博士, 高级工程师, 主要从事生态水文学方面的研究。E-mail: niuyun2028@163.com。

soil profile, with the increase of soil depth, the influence of precipitation on soil moisture also decreased. (4) The relationship between rainfall, air humidity, soil water, river water more closely, the regression model among precipitation, air humidity, soil moisture and river runoff can interpreted the 95.2% and 88.8% and 97.6% variances of precipitation, soil moisture and river runoff, respectively, and with averaged prediction accuracies of 93.4%, 84.6% and 96.7%. [Conclusion] The proportional allocation among precipitation, soil water, river water could be quantified and regulated. The data acquiring methods of manual observation and automatic monitoring could well solve the ecological and hydrological processes research in river basin.

Keywords: precipitation; air humidity; soil moisture; river runoff; Dayekou basin of Qilian Mountains

降水通过山地生态系统的涵养和传输,最后形成河川径流以满足生态经济社会发展^[1-3]。近年来水力发电站对流域产流进行人工梯级截留,改变了河川来水的排放时间和排放量,在分配流域上、中、下游地区和各部门水资源比例,安排农业和生态用水比重,评估退耕还林、天然林保护、流域综合治理等工程对水资源的影响等诸多现实问题上,需要我们掌握整个流域的降水、土壤水、河川来水的“三水”的周期变化特征和相互转化关系等生态水文过程及水资源构成比例。祁连山林区是水源涵养区,山前的走廊绿洲是水源消耗区。在水源涵养区人们主要关注降水和土壤水对水源涵养林的生长满足,而水源消耗区主要关注流域来水量对生态经济社会的可持续支撑,因此,综合探讨降水、土壤水和河川来水的关系,可为政府制订减缓城市生态环境压力、保护和利用水资源等决策提供科技支撑。相关研究属于水文学领域的热点^[4]。20世纪50年代末期,概念性水文模型得以广泛应用^[5]。20世纪80年代初^[6],水资源量的计算以及不同水源之间转化研究得以发展,但定性研究居多、定量研究较少^[7-8]。为此,许多学者在特定的区域内利用试验实测数据开展了大量的相关研究。田凤霞等^[9]揭示了祁连山青海云杉林植被系统的水文循环机理及其对山区水文路径的调节机制。马明国等^[10]围绕森林水文循环问题开展了航空遥感、地面同步观测试验和水文与生态参数加密观测试验。赵传燕等^[11]在黑河下游地区研究了地下水位的波动变化。刘冰等^[12]对黑河流域荒漠区降水特征及其土壤水分对降水脉动响应进行了研究。从国内外相关研究可以看出,大多数学者的研究集中在降水与土壤水的关系上,但将降水、土壤水和河川来水综合起来研究的文献还较少。本研究充分利用甘肃省祁连山水源涵养林研究院的长期实测数据,分析降水、土壤水和河川来水的相互关系,将特别受到关注的内陆河流域可持续产流问题和流域上游的生态问题结合起来探讨,以为流域综合治理提供科学依据。

1 资料选取与方法介绍

1.1 研究区概况

祁连山地处青藏、蒙新、黄土3大高原的交汇地带(36°30′—39°30′N, 93°30′—103°E),《全国生态功能区划》和《全国主体功能区规划》都将该区域划分为50个国家重要生态功能区和25个重点生态功能区之列,生态区位十分重要。大野口流域(38°16′—38°33′N, 100°13′—100°16′E)属于祁连山中山气候带,东至马鬃梁、西至西沟梁、北邻正南沟、南含排露沟,发源于肃南县境内的野牛山,主要有东岔、西岔、头滩沟、西沟梁、观台沟和深沟6条较大支流汇集于大野口水库,面积约80 km²,水库控制了流域98%的集水区,是典型的闭合流域。由于区内海拔变化区间较大,水热条件有较大差异,形成了垂直梯度和水平差异的植被和土壤类型。海拔由低到高,植被类型依次为山地荒漠植被、山地草原植被、山地森林草原植被、亚高山草甸植被、高山冰雪植被;土壤类型依次为山地灰钙土、山地栗钙土、山地灰褐土、亚高山灌丛草甸土、高山寒漠土。在各类土壤中山地灰褐土和亚高山灌丛草甸土是较适宜生长森林的土壤,分布在海拔2 400~3 300 m和3 300~4 000 m区域内。建群种青海云杉(*Picea crassifolia*)呈斑块状或条状分布在试验区海拔2 400~3 300 m阴坡和半阴坡地带,与阳坡草地交错分布;祁连圆柏(*Sibina przewal*)呈小块状分布于阳坡、半阳坡;灌木优势种有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、箭叶锦鸡儿(*Caragana jubata*)、吉拉柳(*Salix gilashanica*)等;草本主要有珠芽蓼(*Polygonum viviparumlinn*)、黑穗苔(*Carex heterostachya*)和针茅(*Stipa capillata*)等。

1.2 数据来源与方法

1.2.1 数据来源及监测方法 数据来源如表1所示,人工地面气象站监测严格根据中央气象局编订的《地面气象观测规范》的要求执行。水库每天8:00、20:00目测水尺法测定水位,将监测到的水位数据和水库库容曲线表对照查算,可得出水库蓄水量,一段

时间的前后蓄水量之差,可求得这一段时间的流域来水量(m^3),为了使河川径流量与降水量的单位一致而便于比较,用单位时间的来水量除以流域总面积,可求

得这一段时间内流域河川径流(mm),通常也称流域河川径流(mm)。自动气象站每 30 min 获取一次数据,获取降水量、空气湿度、土壤体积含水率等数据。

表 1 祁连山大野口流域降水—空气湿度—土壤水—河川来水数据来源

数据名称	数据来源	设施仪器类型	地理坐标		
			纬度	经度	海拔高度/m
1994—2011 年降水	人工气象站	虹吸式雨量计	38°34'01.4"N	100°17'18.1"E	2 579
1994—2011 年空气湿度	人工气象站	毛发自记湿度计	38°34'01.4"N	100°17'18.1"E	2 579
1994—2011 年河川来水量	大野口水库	迎水面坝坡水尺	38°33'48.8"N	100°17'18.4"E	2 692
2006—2007 年降水	自动气象站	52202	38°31'48"N	100°15'00"E	2 835
2006—2007 年空气湿度	自动气象站	HMP45 C	38°31'48"N	100°15'00"E	2 835
2006—2007 年土壤水	自动气象站	CS616	38°31'48"N	100°15'00"E	2 835

1.2.2 分析方法

(1) 特征值参数算法。利用人工地面气象站和水库 18 a 数据,计算降水、空气湿度、河川径流的年际变化平均值 μ 、标准差 σ 、变异系数 C_v 以及年际变化趋势。利用自动气象站 2 a 数据,计算降水、空气湿度、土壤体积含水率、河川径流年内变化平均值 μ 、标准差 σ 、变异系数 C_v 及年内变化特征。

(2) 相关和多元回归分析。建立降水、空气湿度、土壤体积含水率、河川径流数据表进行相关系数分析、拟合计算、方差分析等,最后建立降水—土壤水—河川来水回归模型。

2 结果与分析

2.1 降水—空气湿度—河川来水年际变化特征分析

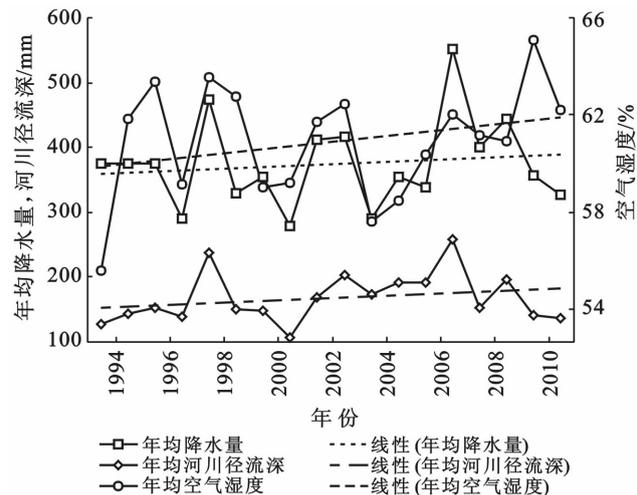
从表 2 可以看出,近 18 a 以来,降水量、空气湿度

和河川径流平均分别为 374.06 mm,60.91% 和 166.73 mm,降水的 44.57% 形成了河川径流。年降水、年均空气湿度和年河川径流分别在 307.43~440.69 mm,58.60%~63.22% 和 129.04~204.42 mm 区间内变动。变化幅度由大到小依次为:河川来水>降水>空气湿度。

从图 1 可知,近 18 a 以来,年降水和河川径流出现过 2 次高峰,两次低谷。降水和径流高峰同时发生在 1998 和 2007 年;降水和径流的低谷一次发生同一年,一次发生在不同年份,分别是 2004 和 2008 年。降水和流域河川径流均呈波动性上升趋势,且二者上升率均为 18 mm/10 a 左右。空气湿度也呈波动性上升趋势,上升率为 1.2%/10 a 左右。总体来看,降水、空气湿度和河川径流在波动趋势上基本保持一致。

表 2 祁连山大野口流域降水—空气湿度—河川来水年际变化特征

年际变化特征参数值	平均值 μ	标准差 σ	变异系数 C_v	波动下限	波动上限
年均降水量/mm	374.06	66.63	17.81	307.43	440.69
空气湿度/%	60.91	2.31	0.038	58.60	63.22
年均河川径流量/mm	166.73	37.69	22.61	129.04	204.42



2.2 降水—空气湿度—土壤水—河川来水年内变化特征分析

如图 2 所示,降水、空气湿度、土壤水、河川来水年内变化步调基本一致。1 月份降水、空气湿度、土壤体积含水率、河川径流平均分别为 0.0 mm,44.7%,6.0% 和 0.0 mm,随后均逐渐增加,直到 7 月份都达到最大,降水、空气湿度、土壤体积含水率、河川径流分别达到 116.9 mm,66.61%,26.16% 和 52.73 mm,然后又递减,直到 12 月底,降水、空气湿度、土壤体积含水率、河川径流平均分别低至 0.1 mm,40.34%,12.47% 和 1.41 mm。各月降水和河川来水的标准差增均最大,变异系数也最大(表 3)。空气湿度和土壤体积含水率的标准差很接近,且较小,平均 8.39% 左右。空气湿度和土壤体积含水率的变异系

图 1 祁连山大野口流域降水—空气湿度—河川来水年际变化特征

数也较小,分别为 0.16 和 0.48。在森林高度范围内,距地面越高,空气湿度越大。这是由于不同层次的林冠对空气水汽向上蒸发有聚集功能。

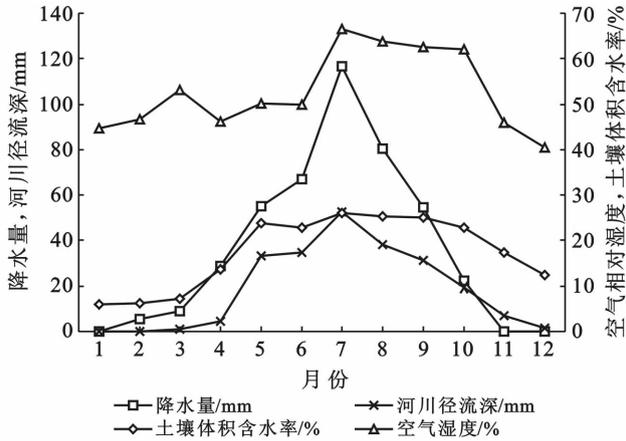


图 2 祁连山大野口流域降水—空气湿度—土壤水—河川来水年内变化

2.3 降水—空气湿度—土壤水—河川来水相关性分析

相关系数 $|r| > 0.95$, 存在显著性相关; $0.95 \leq |r| < 0.99$ 高度相关; $0.5 \leq |r| < 0.8$ 中度相关; $0.3 \leq |r|$

< 0.5 低度相关; $|r| < 0.3$ 关系极弱, 认为不相关。降水与空气湿度、土壤水分, 空气湿度与土壤水分相关系数分别为 0.74, 0.72, 0.64, 均属于中度正相关(表 4); 河川径流与空气湿度、土壤体积含水率相关系数分别为 0.76, 0.82, 属于高度正相关或中度正相关。降水、空气湿度、土壤水、河川来水的相互关系较紧密, 均在中度正相关以上, 因此, 降水、空气湿度、土壤水、河川来水均可参与回归模型分析。

2.4 降水—土壤水—河川来水回归模型分析

2.4.1 回归模型拟合分析 如表 5 所示, 根据回归拟合因子的物理意义, 降水、土壤水、河川来水模型复相关系数均在 0.95 左右, 属显性相关, 说明回归模型的拟合效果较理想; 复测定系数表明模型可预测降水、土壤水、河川来水变差的 95.2%, 88.8%, 97.6%。调整后复测定系数说明模型可预测降水、土壤水、河川来水量的 93.4%, 84.6%, 96.7%。也就是说, 通过模型预测的降水、土壤水、河川来水准确率可达 93.4%, 84.6%, 96.7%。标准误差说明计算出的降水、土壤水、河川来水与实际监测值之间误差分别为 9.812, 3.118 和 3.388, 此值越小, 说明模型精度越高。

表 3 祁连山大野口流域降水—空气湿度—土壤水—河川来水年内变化特征

年内变化特征参数值	平均值 μ	标准差 σ	变异系数 C_v	波动下限	波动上限
降水量/mm	36.58	36.48	1.00	0.10	73.05
2 m 空气湿度/%	51.13	8.34	0.16	42.79	59.47
10 m 空气湿度/%	52.49	8.46	0.16	44.02	60.95
24 m 空气湿度/%	54.39	8.54	0.16	45.84	62.93
5 cm 土壤体积含水率/%	17.38	9.20	0.53	8.18	26.57
10 cm 土壤体积含水率/%	18.36	8.67	0.47	9.69	27.03
20 cm 土壤体积含水率/%	17.59	8.01	0.46	9.57	25.60
40 cm 土壤体积含水率/%	17.55	8.52	0.49	9.02	26.07
80 cm 土壤体积含水率/%	16.93	7.76	0.46	9.17	24.69
120 cm 土壤体积含水率/%	16.78	7.89	0.47	8.89	24.67
河川径流/mm	18.60	17.85	0.96	0.74	36.45

表 4 祁连山大野口流域降水—空气湿度—土壤水—河川来水相关系数

项目	降水量/mm	空气湿度/%			土壤体积含水率/%						河川径流/mm	
		24 m	2 m	10 m	5 cm	10 cm	20 cm	40 cm	80 cm	120 cm		
降水量/mm	1.00											
空气湿度/%	2 m	0.75	1.00									
	10 m	0.74	1.00	1.00								
	24 m	0.72	0.99	1.00	1.00							
土壤体积含水率/%	5 cm	0.86	0.72	0.71	0.69	1.00						
	10 cm	0.83	0.74	0.74	0.73	0.98	1.00					
	20 cm	0.78	0.67	0.69	0.69	0.90	0.96	1.00				
	40 cm	0.61	0.56	0.60	0.62	0.68	0.79	0.92	1.00			
	80 cm	0.53	0.49	0.54	0.57	0.50	0.63	0.78	0.94	1.00		
	120 cm	0.71	0.58	0.62	0.63	0.61	0.68	0.79	0.88	0.95	1.00	
河川径流/mm	0.96	0.76	0.77	0.76	0.87	0.88	0.89	0.79	0.69	0.82	1.00	

表 5 祁连山大野口流域降水—空气湿度—土壤水—河川来水拟合系数

回归拟合因子	复相关系数 R^2	复测定系数 R^2	调整后复测定 系数 R^2	标准误差	F 检验值	F 显著水平
降水量/mm	0.976	0.952	0.934	9.812	52.608	0.000 01
土壤体积含水率/%	0.942	0.888	0.846	3.118	21.164	0.000 4
河川径流/mm	0.988	0.976	0.967	3.388	108.422	0.000 001

2.4.2 回归模型方差分析 经方差分析, F 值的物理意义是回归均方差 MSr 和剩余均方差 MSe 的比值, 由于我们期望 MSe 越小, MSr 越大越理想, 所以, F 值越大, 说明模型对降水、土壤水、河川来水量的预测结果越理想。求得 F 检验值和 F 显著水平(表 5), F 显著水平 $p < 0.001$, 查得 $F_{0.001}(3, 8)$ 的临界值 F_a 为 15.829, F 检验值远远大于临界值 F_a , 说明模型预测的降水、土壤水、河川来水量在 $\alpha = 0.001$ ($p < 0.001$) 水平上极显著。

2.4.3 偏回归系数分析 偏回归系数分析主要是检验偏相关系数的显著程度。

由表 6 可以看出, 常数、降水、空气湿度、土壤水、

河川来水相关系数对应的显著度(p)物理意义表示回归模型的常数或自变量系数变化的显著程度, 其值越小, 说明其显著水平越高。在降水回归模型中, 对降水量变化指示性显著程度从大到小依次为: 河川来水 > 土壤水 > 空气湿度; 在土壤水模型中, 对土壤水分变化指示性或影响显著程度从大小依次为河川来水 > 土壤水 > 空气湿度; 在河川来水模型中, 对河川来水影响显著度从大到小依次为: 降水 > 土壤水 > 空气湿度。

从表 6 可见, 查得 $t_{0.9}(11)$ 的临界值为 0.129, 其相对应的 t 检验值的绝对值均大于临界值, 说明回归模型在 $\alpha = 0.9$ 水平上偏相关系数显著。

表 6 祁连山大野口流域降水—空气湿度—土壤水—河川来水拟合系数

因变量	常数或自变量	回归系数	标准误差	模型检验值 t	显著度 p	下限 95%	上限 95%
P_{2835}	截距	13.296	25.301	0.526	0.613	-45.048	71.639
	W_a	0.147	0.521	0.282	0.785	-1.054	1.348
	S_w	-1.944	0.875	-2.223	0.057	-3.962	0.073
	R_d	2.658	0.407	6.539	0.000 2	1.721	3.596
S_w	截距	7.757	7.704	1.007	0.343	-10.008	25.522
	P_{2835}	-0.196	0.088	-2.223	0.057	-0.400	0.007
	W_a	0.055	0.165	0.332	0.748	-0.326	0.436
	R_d	0.751	0.188	3.991	0.004	0.317	1.185
R_d	截距	-10.286	8.106	-1.269	0.240	-28.979	8.407
	P_{2835}	0.317	0.048	6.539	0.000 2	0.205	0.429
	W_a	0.035	0.180	0.194	0.851	-0.381	0.451
	S_w	0.886	0.222	3.991	0.004	0.374	1.399

注: 表中 P_{2835} , W_a , S_w , R_d 分别代表海拔 2 835 m 处的降水(mm)、空气湿度(%), 土壤平均体积含水率(%), 河川径流(mm)。

综合上述, 由 R^2 拟合检验、 F 方差检验、 t 偏回归检验, 可得出祁连山大野口流域降水—土壤水—河川来水的回归模型分别为:

$$P_{2835} = 0.147W_a - 1.944S_w + 2.658R_d + 13.296 \quad (R^2 = 0.976, p < 0.001) \quad (1)$$

$$S_w = -0.196P_{2835} + 0.055W_a + 0.751R_d + 7.757 \quad (R^2 = 0.942, p < 0.001) \quad (2)$$

$$R_d = 0.371P_{2835} + 0.035W_a + 0.886S_w - 10.286 \quad (R^2 = 0.988, p < 0.001) \quad (3)$$

式中: P_{2835} (mm), W_a (%), S_w (%), R_d (mm) 分别代表着海拔 2 835 m 处的降水量、空气湿度、土壤体积含水率、河川径流。

3 结论

(1) 年际变化上, 研究区 1994—2011 年降水量、空气湿度和河川径流分别在 374.06 mm, 60.91% 和 166.73 mm 上下波动, 大气降水的 44.57% 形成了河川径流。河川来水量变化幅度最大, 年降水量次之, 年均空气湿度最小。降水、空气湿度和河川径流均呈波动性上升趋势, 降水和河川径流上升率均为 18 mm/10 a 左右, 空气湿度上升率为 1.2%/10 a 左右。

(2) 年内变化上, 研究区 2006—2007 年降水、空气湿度、土壤水、河川来水年内变化步调基本一致, 1 月份都较小, 随后都逐渐增大, 直到 7 月份都达到最

大值,然后又逐渐降低,直降到12份。各月降水和河川来水的标准差都最大,变异系数也最大;空气湿度、土壤体积分含水率标准差较小,变异系数也较小。低于森林高度内,距地面越高,空气湿度越大。

(3) 降水、空气湿度、土壤水、河川来水的相互关系较紧密,均在中度正相关以上。建立的模型可预测降水、土壤水、河川来水量变差的95.2%,88.8%和97.6%,预测降水、土壤水、河川来水量准确率可达93.4%,84.6%和96.7%,预测值与实际监测值之间误差分别为9.812,3.118和3.388。模型均通过了 R^2 拟合检验、 F 方差检验和 t 偏回归检验。

(4) 大野口流域是祁连山较典型的一个小支流,祁连山孕育的3大内陆河流域正是由这样的小支流汇集而成。通过探讨一个小支流从降水到河川来水在数量上的变化过程,从而为进一步研究内陆流域生态水文过程机理提供参考依据。在相关研究中^[13-15],数据的获取始终难度较大。过去偏重于人工观测获取数据,从理论上讲,人工观测数据较准确,但是由于野外工作条件的限制,经多人观测后,数据误差随之增大。近年来由于自动仪器和设备的大量投入,数据量增大且连续性增强,但是定点观测,代表性较差。本研究将人工观测和自动观测数据结合起来分析,是研究流域生态水文过程中解决数据短缺和准确性的一次尝试。

[参 考 文 献]

- [1] 程国栋,肖洪浪,傅伯杰,等.黑河流域生态—水文过程集成研究进展[J].地球科学进展,2014,29(4):431-437.
- [2] 杨永刚,肖洪浪,赵良菊,等.流域生态水文过程与功能研究进展[J].中国沙漠,2011,31(5):1242-1246.
- [3] 李新,刘绍民,马明国,等.黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验总体设计[J].地球科学进展,2012,27(5):481-498.
- [4] 胥铭兴,张锐,常磊,等.基于四水转化模型法的水资源量计算研究[J].人民长江,2013,44(S):34-37.
- [5] Philip J R. The theory of infiltration: The infiltration equation and its solution[J]. Soil Science, 1957,83(5):345-357.
- [6] Smith R E, Parlange J Y. A parameter-efficient hydrologic infiltration model [J]. Water Reserch, 1978, 14(3):533-538.
- [7] 王加虎,李丽,李新红.“四水”转化研究综述[J].水文,2008,28(4):5-8.
- [8] 徐学选,张北赢,田均良,黄土丘陵区降水、土壤水、地下水转化试验研究[J].水科学进展,2010,21(1):16-22.
- [9] 田风霞.祁连山区青海云杉林生态水文过程研究[D].甘肃兰州:兰州大学,2011.
- [10] 马明国,刘强,阎广建,等.黑河流域遥感—地面观测同步试验:森林水文和中下游干旱区水文试验[J].地球科学进展,2009,24(7):681-695.
- [11] 赵传燕,李守波,冯兆东,等.黑河下游地下水波动带地下水位动态变化研究[J].中国沙漠,2009,29(2):365-369.
- [12] 刘冰,赵文智,常学向,等.黑河流域荒漠区土壤水分对降水脉动响应[J].中国沙漠,2011,31(3):3716-722.
- [13] 牛赟,刘贤德,敬文茂,等.祁连山大野口流域气温、降水、河川径流特征分析[J].干旱区地理,2014,37(5):931-938.
- [14] 牛赟,刘贤德,敬文茂,等.祁连山排露沟流域气温、冻土冻融与河川径流特征[J].林业科学,2014,50(1):27-31.
- [15] 刘思敏,余新晓,牛赟.祁连山排露沟流域降雪消融与融水径流分析[J].中南林业科技大学学报,2013,33(12):96-100.