DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20120614. 2158. 007

东江径流年内分配特征及影响因素贡献分解

涂新军^{1,2},陈晓宏^{1,2},张 强^{1,2},李 宁^{1,2,3}

(1.中山大学水资源与环境研究中心,广东 广州 510275;
2.中山大学华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室,广东 广州 510275;
3.广东省东江流域管理局,广东 惠州 516003)

摘要:基于 1956~2009 年实测径流、天然径流和面降水的月系列,选用集中度和不均匀系数,分析东江径流年内 分配特征的时空变异规律。通过对比降水和径流年内分配特征指标的阶段变化差异,量化分解气候变化、土地利 用/覆被变化、水利工程水量调节和用水消耗等主要因素对东江径流年内分配特征变化的影响贡献。结果表明:东 江实测径流的集中度和不均匀系数年变化过程均有显著下降趋势,且 1973 年为时序变点。降水及天然径流的年内 集中程度阶段变化较小,但 2000~2009 年降水及天然径流的年内不均匀性要明显大于 20 世纪 80 年代和 90 年代。 降水及天然径流的年内集中度和不均匀系数由上游向下游逐渐增大,显示集水面积越大降水及径流的年内集中程 度和不均匀性越大。水利工程水量调节和土地利用/覆被变化降低了径流的年内集中程度和不均匀性,而用水消耗 和气候变化增加了径流的年内集中程度和不均匀性。水利工程水量调节、土地利用/覆被变化、用水消耗和气候变 化,对东江径流分配特征的影响贡献率分别约为-33.5%、-9.0%、4.5%和1.0%,新丰江水库、枫树坝水库和 白盆珠水库的影响贡献率分别约为-21%、-10%和-2%,且近 30 年来土地利用/覆被变化和用水消耗的影响贡 献有逐渐增加趋势。

关键词:径流年内分配;集中度;不均匀系数;影响因素;贡献率;东江
 中图分类号: P333
 文献标志码:A
 文章编号: 1001-6791(2012)04-0493-09

河川径流变化分为径流量的量值变化与径流过程的结构变化^[1-3],径流年内分配特征指标分析属后者,反映了年内不同时间上径流组分的分布状况,不仅影响河床及水生生态系统演替,同时也影响流域水资源开发利用^[4]。常用的径流年内分配特征量化指标有集中度和不均匀系数^[5-6],前者反映径流在年内分配的集中程度,后者体现对径流调控的难易程度。河川径流过程是气候条件与流域下垫面综合作用的产物^[7],水文站点观测到径流过程实际上同时包含了气候变化、土地利用/覆被变化、水利工程水量调节及用水消耗等多方面影响,而如何量化分解这些影响则是当前水文水资源研究的重点和难点^[8]。目前这方面研究成果甚少,仅有王国庆等^[9-10]基于降水径流模型,量化分解了气候变化和人类活动对黄河中游支流的河川径流量影响。东江属于珠江水系,是中国南方重要城市广州、深圳及香港地区的水源地,香港近 80%的供水均来自东江流域^[11]。由于珠江三角洲地区经济社会的迅猛发展,河道外需水量急剧增加,东江水资源供需矛盾日渐突出,近些年来的几次连续枯水已经威胁到东江流域下游及珠江三角洲地区的用水安全,因此,东江流域变化与地表水文过程的研究受到普遍关注,在水文要素量值变化方面已有了一些研究成果^[12-14],而对地表水文过程结构特征的研究甚少。本文选取集中度和不均匀系数两项指标,分析东江径流年内分配特征的时空变化规律,通过对比实测径流、天然径流和面降水的集中度和不均匀系数的阶段差异,量化分解气候变化、土地利用/覆被变化、水利工程水量调节和用水消耗等主要因素对径流年内分配特征变化的影响贡献。

收稿日期: 2011-06-22; 网络出版时间:

- 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20120614.2158.007.html 基金项目:教育部人文社科青年项目(09YJC910010);国家自然科学基金重点资助项目(50839005)
- 作者简介:涂新军(1972-),男,江西余干人,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。

E-mail: eestxj@ mail. sysu. edu. cn

1 流域概况与研究方法

1.1 东江流域概况与数据处理

东江发源于江西省寻邬县的桠髻体,干流由东北向西南流经广东省东部人南海。河川径流来源于降水补

给,干湿季节明显。新丰江水库、枫树坝水库、白盆珠水库为流 域防洪的骨干水库,投入运行分别始于1961年、1974年、1986 年,总集水面积和总库容分别占东江流域的46%和90%。干流水 文站设有龙川、河源、岭下和博罗(图1)。

有东江干流 4 个水文站 1956~2009 年的月径流量数据,流域 内 32 个雨量站 1956~2009 年的月降水量数据,三大水库运行以 来至 2009 年的入库与出库的月径流量数据,以及博罗站控制集水 区内的 1980~2009 年的月用水消耗量数据。采用简易算术平均 法,将 32 个站点雨量换算成各水文站控制面积上的面降水。实测 径流加上三大水库的调节水量和用水消耗量,可得到还原后的天 然径流序列。

1.2 集中度和不均匀系数

有水文气象序列 $Q(t, \tau), t=1, 2, \dots, n; \tau=1, 2, \dots,$ 12; n为年数; τ 为年内某个月。则

$$C_{\rm d}(t) = Q_{\rm xy}(t) / \sum_{\tau=1}^{12} Q(t,\tau)$$
(1)



115°E

$$C_{u}(t) = \sigma(t)/\overline{Q}(t)$$
⁽²⁾

114°E

其中

$$Q_{xy}(t) = \sqrt{Q_x^2(t) + Q_y^2(t)}$$
(3)

 $25^{\circ}N$

24°N

23°N

$$Q_{x}(t) = \sum_{\tau=1}^{12} Q(t,\tau) \cos\theta(t) , \quad Q_{y}(t) = \sum_{\tau=1}^{12} Q(t,\tau) \sin\theta(t)$$
(4)

$$\sigma(t) = \sqrt{\sum_{\tau=1}^{12} \left[Q(t,\tau) - \overline{Q}(t) \right]^2 / 12}$$
(5)

$$\overline{Q}(t) = \sum_{\tau=1}^{12} Q(t,\tau)/12$$
(6)

式中 $C_{a}(t)$ 和 $C_{u}(t)$ 分别为第 t 年的集中度和不均匀系数; $Q(t,\tau)$ 为第 t 年 τ 月的降水量或径流深, mm; $Q_{x}(t)$ 和 $Q_{y}(t)$ 分别为 $Q(t,\tau)$ 分解在 x 和 y 两个方向上的分矢量, mm; $Q_{xy}(t)$ 为合矢量模, mm; $\theta(t) = 2\pi\tau/12$ 为第 τ 时段的矢量角度; $\sigma(t)$ 为第 t 年月降水过程或月径流过程的均方差; $\overline{Q}(t)$ 为第 t 年月降水过程或月径流过程的均值, mm。

1.3 影响因素贡献分解

面降水年内分配特征指标的阶段变化体现了气候变化的影响,天然径流年内分配特征指标的阶段变化是 气候变化和土地利用/覆被变化两因素共同影响,若天然径流年内分配特征和面降水年内分配特征是线性相 关的,则可认为两者的阶段变化差异体现了土地利用/覆被变化的影响。由于天然径流是通过对水库调节水 量和耗水量还原得来的,因而实测径流和天然径流的阶段变化差异则体现水利工程水量调节及用水消耗的 影响。

选定人类活动干扰较小的时期为基准期,通过计算降水和径流分配特征指标时序阶段均值的变化幅度,

佂

雨量站 水文站

水库

116°E

可以量化分解出气候变化、土地利用/覆被变化、水利工程水量调节和用水消耗对实测径流分配特征变化的 影响贡献率。有

$$\Delta C_{\rm RP,T} = C_{\rm RP,T} / C_{\rm RP,0} - 1 \tag{7}$$

$$\Delta C_{\text{NR2},T} = C_{\text{NR2},T} / C_{\text{NR2},0} - 1 \tag{8}$$

$$\Delta C_{\text{NR1},T} = C_{\text{NR1},T} / C_{\text{NR1},0} - 1$$
(9)

$$\Delta C_{\text{R1},T} = C_{\text{R1},T} / C_{\text{R1},0} - 1$$
(10)

$$\Delta C_{\text{OR},T} = C_{\text{OR},T} / C_{\text{OR},0} - 1 \tag{10}$$

$$r_{\rm CC,T} = \Delta C_{\rm NR,T} \tag{11}$$

$$r_{\rm RWR,T} = \Delta C_{\rm OR,T} - \Delta C_{\rm NR1,T}$$
(12)

$$r_{\text{LUCC},T} = \Delta C_{\text{NRI},T} - \Delta C_{\text{NR},T}$$
(13)

考虑用水消耗影响时
$$r_{LUCC,T} = \Delta C_{NR2,T} - \Delta C_{NR,T}$$

$$C_{\text{WH},T} = \Delta C_{\text{NR1},T} - \Delta C_{\text{NR2},T} \tag{15}$$

式中 $C_{\text{RP},0}$ 、 $C_{\text{NR2},0}$ 、 $C_{\text{OR},0}$ 分别为基准期面降水、考虑用水消耗的天然径流、不考虑用水消耗的天然 径流、实测径流年内分配特征指标多年均值; $C_{\text{RP},T}$ 、 $C_{\text{NR2},T}$ 、 $C_{\text{OR},T}$ 分别为T时期面降水、考虑用水消 耗的天然径流、不考虑用水消耗的天然径流、实测径流年内分配特征指标多年均值; $\Delta C_{\text{RP},T}$ 、 $\Delta C_{\text{NR2},T}$ 、 $\Delta C_{\text{NR1},T}$ 、 $\Delta C_{\text{OR},T}$ 分别为T时期面降水、考虑用水消耗的天然径流、不考虑用水消耗的天然径流、实测径流年 内分配特征指标的相对变化幅度; $r_{\text{CC},T}$ 、 $r_{\text{LUCC},T}$ 、 $r_{\text{RWR},T}$ 分别为T时期气候变化、土地利用/覆被变化、 用水消耗、水利工程水量调节对径流分配特征变化的影响贡献率。

以流域 3 大水库投入运行时间作为阶段划分依据,水库修建前的 1956~1960 年为基准期。不考虑用水 消耗时,阶段分期为 T₁(1961~1973年)、T₂(1974~1985年)和 T₃(1986~2009年)。则有

 $r_{XR} = r_{RWR,T_1}$, $r_{FR} = r_{RWR,T_2} - r_{RWR,T_1}$, $r_{BR} = r_{RWR,T_3} - r_{RWR,T_2}$ (16) 式中 r_{XR} 、 r_{FR} 、 r_{BR} 分别为新丰江水库、枫树坝水库和白盆珠水库的水量调节对径流年内分配特征变化的影响贡献率。

受到资料限制,考虑用水消耗影响的 1980~2009 年的分期以 10 年为 1 个阶段,分别为 1980~1989 年、 1990~1999 年和 2000~2009 年。

2 结果与分析

不考虑用水消耗影响时

2.1 实测径流年内分配特征时空变化规律

表1显示,东江径流年内分配的集中度和不均匀系数多年均值分别为0.29~0.34和0.45~0.62,变差 系数分别为0.30~0.46和0.34~0.47。分配特征指标的多年均值呈现出上游和下游大、中游小的特点,变 差系数则相反。中游河源站的多年均值最小、变差系数最大,集中度和不均匀系数多年均值与最大的站点相 比分别减少了约29%和25%,变差系数与最小的站点相比分别增加了约53%和38%。Mann-Kendall 趋势检 验^[15]和 Pettitt-Mann-Whitney 变点检验^[16]结果显示(表1),4个站点的集中度和不均匀性系数年变化过程的 下降趋势均非常显著,并存在显著变点,时间位置为1973年。与变点前(1956~1973年)相比,变点后 (1974~2009年)集中度和不均匀系数的多年均值分别下降了15%~34%和29%~40%,其中河源站下降幅 度最大;变差系数分别下降了3%~10%和25%~30%,但河源站的变差系数却略有增加。东江径流年内分 配特征指标的年变化趋势及时空变异特征,主要与东江流域20世纪六七十年代的水利工程建设运行有关, 变点时间位置正好与上游枫树坝水库运行时间一致,而由于东江中游建有流域内最大库容的新丰江水库,其 距离河源站最近,导致河源站径流分配特征指标的年际变异程度更大。

(14)

东江径流年内分配特征指标年变化特征

	Tabl	e 1 Ann	ual changin	g properti	es of strea	mflow and	ual distrib	ution indic	cators of t	he Dongjiar	ig River		
特征指标	站名	统计特征 3. (1956~2009年)		趋势检验			变点检验		变 ~ 1956 (点前 - 1973 年)	变点后 (1974~2009年)		
		均值	变差系数	统计量	α	统计量	α	年份	均值	变差系数	均值	变差系数	
集中度	龙川	0.33	0.34	- 3. 251	< 0.01	436	< 0.01	1973	0.34	0.30	0.29	0.27	
	河源	0.24	0.46	- 2. 912	< 0.01	369	< 0.05	1973	0.32	0.39	0.21	0.41	
	岭下	0.29	0.36	- 3. 096	< 0.01	356	< 0.05	1973	0.36	0.33	0.26	0.32	
	博罗	0.34	0.30	- 3. 180	< 0. 01	367	< 0.05	1973	0.40	0.29	0.30	0.26	
	龙川	0.62	0.37	- 4. 297	< 0.001	514	< 0.001	1973	0.83	0.32	0.52	0.24	
不均匀 系数	河源	0.45	0.47	- 3. 265	< 0.01	384	< 0.05	1973	0.62	0.43	0.37	0.32	
	岭下	0.54	0.40	-3.258	< 0.01	401	< 0.05	1973	0.70	0.38	0.46	0.28	
	博罗	0.60	0.34	- 3. 555	< 0.001	417	< 0.01	1973	0.75	0.33	0.53	0.23	

表 1

2.2 影响因素贡献分解

(1) "降水分配~径流分配"相关性分析 图2和图3显示,东江4个站点天然径流集中度与面降水集 中度的线性相关系数为 0.70~0.76, 不均匀系数的线性相关系数为 0.75~0.80, 均大于 α = 0.01 所对应的 相关系数检验临界值,表明东江天然径流年内分配特征与面降水年内分配特征具有高度线性相关性,因此可 以认为降水年内分配特征与天然径流年内分配特征的阶段变化差异,体现的是土地利用/覆被变化影响。



Fig. 2 Correlations of concentration degree between the regional precipitation and the natural streamflow



Fig. 3 Correlations of nonuniform coefficient between the regional precipitation and the natural streamflow

(2) 时空尺度影响 本次研究的降水及径流序列的全时段长为54年,以三大水库运行时间作为分割点 的 4 个时段长分别为 5 年、13 年、12 年、24 年。从表 2 可以看出,同一站点面降水和天然径流的集中度, 在全时段及4个阶段上的多年均值相差甚小。而同一站点的不均匀系数,其阶段均值面降水呈现为"增大一 减小一增大"、天然径流为"减小一减小一增大"的变化过程。因此,对于5年以上的时间段,时间尺度大 小变化对面降水及天然径流的年内集中程度的影响不大,但是1974~1985年期间的面降水及天然径流的年 内分配不均匀性却明显小于其它时间段。东江面降水的集中度和不均匀系数的多年均值分别为 0.43~0.48 和 0.80 ~ 0.85, 天然径流的集中度和不均匀系数的多年均值分别为 0.40 ~ 0.47 和 0.75 ~ 0.84。在空间分布 上,面降水和天然径流的年内分配特征值,由上游向下游略有增加,显示集水面积越大,降水及径流的年内 集中程度和不均匀性越大。

表 2 面降水、天然径流和实测径流年内分配特征指标阶段变化

Table 2 Changes of streamflow annual distribution indicators of the regional precipitation,

the natural	streamflow	and	the	objected	streamflow
-------------	------------	-----	-----	----------	------------

站名	时期	集中度均值		不均匀系数均值			計友	n-1-#8	集中度均值			不均匀系数均值			
		面降水	天然径流	实测径流	面降水	天然径流	实测径流	如石	时旁	面降水	天然径流	实测径流	面降水	天然径流	实测径流
	1956 ~ 2009	0.43	0.40	0.33	0.80	0.75	0.62		1956 ~ 2009	0.47	0.44	0.29	0.85	0.81	0.54
龙川	1956 ~1960	0.43	0.42	0.42	0.82	0.82	0.82		1956 ~ 1960	0.45	0.46	0.46	0.82	0.89	0.89
	$1961 \sim 1973$	0.42	0.41	0.41	0.82	0.83	0.83	岭下	1961 ~1973	0.46	0.45	0.33	0.86	0.87	0.62
	1974 ~1985	0.43	0.40	0.29	0.77	0.71	0.52		1974 ~1985	0.47	0.44	0.25	0.82	0.76	0.43
	$1986\sim 2009$	0.43	0.38	0.29	0.81	0.71	0.53		1986 ~2009	0.47	0.44	0.26	0.85	0.79	0.47
	1956 ~ 2009	0.45	0.43	0.24	0.82	0.79	0.45		1956 ~ 2009	0.48	0.47	0.34	0.85	0.84	0.60
河源	1956 ~1960	0.44	0.43	0.43	0.82	0.83	0.83		1956 ~ 1960	0.47	0.48	0.48	0.84	0.92	0.92
	1961 ~1973	0.44	0.45	0.28	0.83	0.86	0.53	博罗	1961 ~ 1973	0.48	0.47	0.37	0.87	0.89	0.69
	$1974\sim1985$	0.45	0.42	0.19	0.80	0.73	0.34		1974 ~1985	0.47	0.46	0.30	0.81	0.80	0.52
	1986 ~2009	0.45	0.42	0.21	0.83	0.77	0.39		1986 ~ 2009	0.49	0.47	0.30	0.87	0.82	0.53

(3)不考虑用水消耗影响的因素贡献分解 影响因素的贡献率及贡献比例计算结果如表 3 和图 4 所示, 正值表明该阶段年内分配特征指标的多年均值相对于基准期是增加的,负值则为下降。气候变化的影响为正 值,增加了径流年内分配的集中程度和不均匀性。土地利用/覆被变化和水利工程水量调节的影响为负值, 降低了径流年内分配的集中程度和不均匀性。但气候变化的影响贡献率非常小,对集中度和不均匀系数影响 贡献率基本上在 5% 以内,占三方面合计影响的贡献比例不超过 15%;土地利用/覆被变化影响其次,最大 分别达到 10% 和 15%,所占比例最大分别达到 31% 和 36%;水利工程影响最大分别达到 54% 和 47%,所占 贡献比例最大分别达到 89% 和 92%。

n-1-##	影而回志	对	集中度的影	响贡献率/	%	对不均匀系数的影响贡献率/%				
的别	影响凶系	龙川	河源	岭下	博罗	龙川	河源	岭下	博罗	
	水利工程水量调节		- 39. 3	- 26. 9	- 20. 3		- 39. 4	- 28. 1	-21.5	
1061 1073 年	土地利用/覆被变化		3.8	- 3.8	-4.7		2.1	-6.2	-7.5	
1901~1975 +	气候变化		1.0	2.5	2.9		1.4	4.8	4.3	
	合计		- 34. 5	-28.2	- 22. 1		- 36. 0	- 29.6	- 24. 7	
	水利工程水量调节	- 27. 3	- 54. 3	- 40. 7	- 31. 9	-23.6	-47.0	- 37.0	- 30. 1	
1074 1085 年	土地利用/覆被变化	-4.8	- 3.8	-7.8	- 5.6	- 7.6	- 9.6	- 13. 9	- 10. 2	
1974~1985 年	气候变化	-0.7	3.1	3.9	0.7	- 5.6	- 2.5	-0.4	-2.8	
	合计	- 32. 7	- 55.0	- 44. 6	- 36. 8	- 36. 8	- 59. 2	- 51.2	-43.2	
1986~2009年	水利工程水量调节	- 22. 3	- 49. 8	- 38. 9	- 33. 8	- 22. 3	- 45.5	- 35. 5	-31.2	
	土地利用/覆被变化	- 10. 2	-4.0	-7.5	-7.3	-12.8	- 9. 9	- 15.2	- 14. 8	
	气候变化	0.7	3.9	4.4	4.5	- 0. 7	2.0	3.9	3.8	
	合计	- 31.8	- 49. 8	-42.0	- 36. 5	- 35.9	- 53. 5	- 46. 9	- 42. 2	
$ \begin{array}{c} 0 & 2 & 7 & 10 \\ \hline 22 & 89 & 81 & 73 \\ \hline 73 & 83 & 89 & 77 \\ \hline 78 & 84 & 67 & 84 \\ \hline 77 & 10 & 5 & 7 & 2 & 2 & 7 & 9 & 10 \\ \hline 22 & 9 & 81 & 73 & 83 & 89 & 77 & 84 & 67 & 86 & 77 & 74 \\ \hline 78 & 81 & 83 & 89 & 77 & 84 & 67 & 86 & 77 & 74 \\ \hline 78 & 81 & 83 & 89 & 77 & 84 & 67 & 86 & 77 & 74 \\ \hline 79 & 10 & 10 & 74 & 1085 \\ \hline 79 & 10 & 10 & 74 & 1085 \\ \hline 1961 - 1973 & 1074 - 1985 & 1986 & 2009 \\ \hline 1961 - 1973 & 1074 - 1985 & 1986 & 2009 \\ \hline 1961 - 1973 & 1074 - 1985 & 1986 & 2009 \\ \hline 1961 - 1973 & 1074 - 1985 & 1986 & 2009 \\ \hline 1961 - 1973 & 1074 - 1985 & 1986 & 2009 \\ \hline 1961 - 1973 & 1074 - 1985 & 1986 & 2009 \\ \hline 1961 - 1973 & 1074 - 1985 & 1986 & 2009 \\ \hline 1961 - 1973 & 1074 - 1985 & 1986 & 2009 \\ \hline 1961 - 1973 & 1074 - 1985 & 1986 & 2009 \\ \hline 1961 - 1973 & 1074 - 1985 & 1986 & 2009 \\ \hline 1961 - 1973 & 1074 - 1985 & 1986 & 2009 \\ \hline 1961 - 1973 & 1074 - 1985 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 - 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 - 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2009 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2000 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2000 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2000 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2000 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2000 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2000 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2000 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2000 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2000 \\ \hline 1986 - 2009 & 1986 & 2000 \\ \hline 1986 - 2000 & 100 \\ \hline$										
	coverage	change and	the climate	e change t	o streamflox	v annual di	stribution			

表 3 径流年内分配特征影响因素贡献分解

Table 3 Contributions of influencing factors to streamflow annual distributions

三大水库影响贡献分解计算结果如表 4 和图 5 所示。白盆珠水库对集中度和不均匀系数的影响贡献率非常小,不足 2%,占三大水库合计影响的贡献比例仅为 4% ~6%;枫树坝水库影响其次,分别为12% ~15% 和 8% ~9%,所占贡献比例为 28% ~34% 和 16% ~28%;新丰江水库影响最大,分别为 20% ~39% 和 22% ~40%,所占贡献比例为 60% ~72% 和 69% ~ 84%。

衣 4	流或二天水库 家响贞陬卒

%

 Table 4
 Contributions of three reservoirs to streamflow annual distribution

影响田孝	对	集中度的影响贡献	率	对	不均匀系数的影响贡	贡献率
影响凶杀	河源	岭下	博罗	河源	岭下	博罗
新丰江水库	- 39. 3	- 26. 9	- 20. 3	- 39. 4	- 28. 1	- 21. 5
枫树坝水库	- 15.0	- 13.8	- 11.6	-7.6	- 8.8	- 8.6
白盆珠水库			- 1.9			- 1. 1
合计	- 54. 3	- 40. 7	- 33. 8	- 47. 0	- 37.0	- 31. 2



图 5 三大水库影响贡献比例

Fig. 5 Contribution percentages of these three water reservoirs to streamflow annual distribution

在空间分布上,受三方面合计影响,径流分配特征值下降比例最大的为河源,其次为岭下、博罗和龙 川,与水利工程影响贡献的空间分布基本一致,距离新丰江水库愈近,下降比例愈大。

2.3 考虑用水消耗影响的影响贡献分解

从图 6 可以看出,与不考虑用水消耗的天然径流相比,考虑用水消耗的天然径流年内分配特征指标值均 有所下降,表明东江流域的用水消耗反而增加了径流年内分配的集中程度和不均匀性。从表 5 和图 7 可以看 出,降水及天然径流的集中度阶段均值变化不大,但不均匀系数 2000 ~ 2009 年的阶段均值明显大于 1980 ~ 1989 年和 1990 ~ 1999 年。1980 ~ 2009 年径流分配特征指标的阶段变化相对于基准期来说,气候变化的影响 贡献率非常小,还不到 2%;用水消耗其次,影响贡献率约为 4.5%;而土地利用/覆被变化、水利工程水量 调节的影响贡献率,分别为 8% ~ 10%、33% ~ 34%。气候变化、土地利用/覆被变化、用水消耗和水利工 程水量调节,对径流集中度和不均匀系数的贡献比例分别为 3.8:9.2:17.0:70.0 和 0.3:9.4:21.0:69.4。其 中,土地利用/覆被变化和用水消耗的影响贡献率(绝对值)及贡献比例的阶段变化有逐渐增加的趋势。





Fig. 6 Annual changes of hydrologic distribution at the Boluo station during 1980 - 2009

表 5 博罗站降水径流年内分配特征阶段变化及影响因素的贡献率

Table 5 Hydrologic distribution indicators changes and contributions of influencing

指标 时段 不考虑用 实测径流 不考虑用 水消耗的 天然径流 考虑用水 消耗的天 然径流 面降水 面降水 実测径流 不考虑用 水消耗的 天然径流 考虑用水 消耗的天 然径流 集中度 1980~2009 0.31 0.47 0.45 0.48 -33.8 4.5 -8.2 1980~1989 0.32 0.47 0.45 0.47 -30.8 3.3 -5.1 1990~1999 0.29 0.46 0.44 0.47 -36.1 4.2 -6.7 2000~2009 0.31 0.48 0.45 0.51 -34.4 6.0 -12.7 1980~1989 0.51 0.78 0.76 0.82 -31.5 3.1 -8.0 不均匀系数 1990~1999 0.50 0.78 0.75 0.82 -32.8 4.3 -8.8 2000~2009 0.55 0.85 0.80 0.91 -34.9 6.1 -13.1	贡献率/%					
集中度 1980~2009 0.31 0.47 0.45 0.48 -33.8 4.5 -8.2 1980~1989 0.32 0.47 0.45 0.47 -30.8 3.3 -5.1 1990~1999 0.29 0.46 0.44 0.47 -36.1 4.2 -6.7 2000~2009 0.31 0.48 0.45 0.51 -34.4 6.0 -12.7 1980~1989 0.52 0.81 0.77 0.85 -33.1 4.5 -8.0 7 1980~2009 0.52 0.81 0.77 0.85 -33.1 4.5 -10.0 1980~1989 0.51 0.78 0.76 0.82 -31.5 3.1 -8.0 1990~1999 0.50 0.78 0.75 0.82 -32.8 4.3 -8.8 2000~2009 0.55 0.85 0.80 0.91 -34.9 6.1 -13.1	面降水 行	合计				
集中度 1980~1989 0.32 0.47 0.45 0.47 -30.8 3.3 -5.1 1990~1999 0.29 0.46 0.44 0.47 -36.1 4.2 -6.7 2000~2009 0.31 0.48 0.45 0.51 -34.4 6.0 -12.7 1980~2009 0.52 0.81 0.77 0.85 -33.1 4.5 -10.0 1980~1989 0.51 0.78 0.76 0.82 -31.5 3.1 -8.0 1990~1999 0.50 0.78 0.75 0.82 -32.8 4.3 -8.8 2000~2009 0.55 0.85 0.80 0.91 -34.9 6.1 -13.1	1.9 –	- 35. 6				
第十元 1990~1999 0.29 0.46 0.44 0.47 -36.1 4.2 -6.7 2000~2009 0.31 0.48 0.45 0.51 -34.4 6.0 -12.7 1980~2009 0.52 0.81 0.77 0.85 -33.1 4.5 -10.0 1980~1989 0.51 0.78 0.76 0.82 -31.5 3.1 -8.0 1990~1999 0.50 0.78 0.75 0.82 -32.8 4.3 -8.8 2000~2009 0.55 0.85 0.80 0.91 -34.9 6.1 -13.1	- 0. 2 -	- 32. 9				
2000~2009 0.31 0.48 0.45 0.51 -34.4 6.0 -12.7 1980~2009 0.52 0.81 0.77 0.85 -33.1 4.5 -10.0 1980~1989 0.51 0.78 0.76 0.82 -31.5 3.1 -8.0 1990~1999 0.50 0.78 0.75 0.82 -32.8 4.3 -8.8 2000~2009 0.55 0.85 0.80 0.91 -34.9 6.1 -13.1	- 1.5 -	- 40. 1				
不均匀系数 1980~2009 0.52 0.81 0.77 0.85 -33.1 4.5 -10.0 7 1980~1989 0.51 0.78 0.76 0.82 -31.5 3.1 -8.0 1990~1999 0.50 0.78 0.75 0.82 -32.8 4.3 -8.8 2000~2009 0.55 0.85 0.80 0.91 -34.9 6.1 -13.1	7.2 –	- 33. 9				
不均匀系数 1980~1989 0.51 0.78 0.76 0.82 -31.5 3.1 -8.0 1990~1999 0.50 0.78 0.75 0.82 -32.8 4.3 -8.8 2000~2009 0.55 0.85 0.80 0.91 -34.9 6.1 -13.1	- 0. 2 -	- 38. 7				
$\wedge \square \square \square \land \Im$ 1990 ~ 1999 0. 50 0. 78 0. 75 0. 82 $- 32.8$ 4. 3 $- 8.8$ 2000 ~ 2009 0. 55 0. 85 0. 80 0. 91 $- 34.9$ 6. 1 $- 13.1$	-3.4 -	- 39. 8				
2000 ~ 2009 0. 55 0. 85 0. 80 0. 91 - 34. 9 6. 1 - 13. 1	- 3.8 -	- 41. 2				
12 11	6.7 –	- 35. 1				
4 8 9 12 9 7 9 9 -78 -75 -75 -57 -69 -68 -66 -57 -17 0 -3 -21 0 -7 -8 -21 1980~ 1980~ 1990~ 2000~ 1980~ 1980~ 1990~ 2000~ 1980~ 1989年 1999年 2009年 1980~ 1980~ 1990~ 2000~ (a) 集中度 (b) 不均匀系数 日本水剤工程水量调节 0 -1 -8 -21						

factors to streamflow annual distribution at the Boluo station

Fig. 7 Contribution percentages of main influencing factors to streamflow annual distribution at the Boluo station

3 结 论

东江实测径流年内分配集中程度和不均匀性的年变化过程均呈现显著下降趋势,并存在时序变点,时间 位置为1973年。降水及天然径流年内集中程度的阶段变化较小,但2000~2009年降水及径流的年内不均匀 性要明显大于20世纪80年代和90年代。在空间尺度上,集水面积越大,降水及径流年内分配的集中程度 和不均匀性越大。

水利工程水量调节和土地利用/覆被变化降低了东江径流年内分配的集中程度和不均匀性,但用水消耗 和气候变化则增加了东江径流年内分配的集中程度和不均匀性,而不考虑用水消耗分解出的土地利用/覆被 变化的影响贡献率(绝对值)结果偏小。水利工程水量调节、土地利用/覆被变化、用水消耗和气候变化,对 东江(博罗站)径流年内分配特征的影响贡献率分别约为 – 33.5%、 – 9.0%、4.5%、1.0%,新丰江水库、 枫树坝水库和白盆珠水库的影响贡献率分别约为 – 21%、 – 10%、 – 2%,且近 30 年来土地利用/覆被变化 和用水消耗的影响贡献率(绝对值)及贡献比例有逐渐增加的趋势。

本文分解出气候变化的影响贡献率实际上是指降水变化的影响,而土地利用/覆被变化的影响贡献率则 隐含着气温变化的影响。气温变化主要通过流域蒸散发来影响径流变化,而流域蒸散发又受到土地利用/覆 被变化的影响,相互之间的影响非常复杂。因此,如何量化分解气温及流域蒸散发对径流年内分配特征的影 响,需要进一步深入研究。

图 7 博罗站径流年内分配主要影响因素贡献比例

参考文献:

- HANNAH D M, SMITH B P G, GURNELL A M, et al. An approach to hydrograph classification [J]. Hydrological Processes, 2000, 14: 317-338.
- [2] HARRIS N M, GURNELL A M, HANNAH D M, et al. Classification of river regimes: A context for hydroecology [J]. Hydrological Processes, 2000, 14: 2831-2848.
- [3] 郑红星,刘昌明. 黄河源区径流年内分配变化规律分析[J]. 地理科学进展, 2003, 22(6): 585-590. (ZHENG Hong-xing, LIU Chang-ming. Changes of annual runoff distribution in the headwater of the Yellow River basin[J]. Progress in Geography, 2003, 22(6): 585-590. (in Chinese))
- [4] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. Conservation Biology, 1996, 10: 1163-1174.
- [5] 冯国章,李瑛,李佩成. 河川径流年内分配不均匀性的量化研究[J]. 西北农业大学学报,2000,28(2):50-53. (FENG Guo-zhang, LI Ying, LI Pei-cheng. Quantification of nonuniformity in annual distribution of stream flows[J]. Acta Univ Agric Boreali-Occidentalis, 2000, 28(2):50-53. (in Chinese))
- [6] 王金星,张建云,李岩,等. 近 50 年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 656-661.
 (WANG Jin-xing, ZHANG Jian-yun, LI Yan, et al. Variation trends of runoffs seasonal distribution of the six larger basins in China over the past 50 years[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5):656-661. (in Chinese))
- [7] 王云琦,齐实,孙阁,等. 气候与土地利用变化对流域水资源的影响: 以美国北卡罗莱纳州 Trent 流域为例[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 51-58. (WANG Yun-qi, QI Shi, SUN Ge, et al. Impacts of climate and land-use change on water resources in a watershed: A case study on the Trent River basin in North Carolina, USA [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1):51-58. (in Chinese))
- [8] 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 Xiao-hong, TU Xin-jun, XIE ping, et al. Progresses in the research of human induced variability of hydrological elements[J]. Advances in Earth Sicence, 2010, 25(8): 800-811. (in Chinese))
- [9] 王国庆,张建云,贺瑞敏.环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J].水科学进展,2006,17(6):853-858. (WANG Guo-qing, ZHANG Jian-yun, HE Rui-min. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River basin of the middle Yellow River [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(6):853-858. (in Chinese))
- [10] 王国庆,张建云,刘九夫,等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. 中国水利,2008(2):55-58.
 (WANG Guo-qing, ZHANG Jian-yun, LIU Jiu-fu, et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff [J]. China Water Resources, 2008(2):55-58. (in Chinese))
- [11] WONG J S, ZHANG Qiang, CHEN Yong-qin. Statistical modeling of daily urban water consumption in Hong Kong: Trend, Changing patterns, and forecast[J]. Water Resources Research, 2010. [DOI: 10.1029/2009WR008147].
- [12] CHEN Yong-qin, ZHANG Qiang, LU Xi-xi, et al. Precipitation variability(1956 2002) in the Dongjiang River (Zhujiang River basin, China) and associated large-scale circulation[J]. Quaternary International, 2010, 244: 130-137.
- [13] 涂新军,陈晓宏.基于变点识别的区域河川径流量特征值变异研究[J].自然资源学报,2010,25(11):1930-1937.(TU Xin-jun, CHEN Xiao-hong. Characteristics variability study of regional river runoff time series based on change point recognition
 [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(11): 1930-1937. (in Chinese))
- [14] TU Xin-jun, Z Qiang, SINGH V P, et al. Space-time changes in hydrological processes in response to human activities and climatic change in the south China[J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2011. [DOI: 10.1007/s00477-011-0516-2].
- [15] 张建云,章四龙,王金星,等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230-234.
 (ZHANG Jian-yun, ZHANG Si-long, WANG Jin-xing, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 230-234. (in Chinese))
- [16] LIU De-di, CHEN Xiao-hong, LIAN Yan-qing, et al. Impacts of climate change and human activities on surface runoff in the Dongjiang River basin of China[J]. Hydrological Process, 2010, 24:1487-1495.

Streamflow annual distribution and its influencing factors in Dongjiang River, South China*

TU Xin-jun^{1,2}, CHEN Xiao-hong^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, LI Ning^{1,2,3}

(1. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute,

Guangzhou 510275, China; 3. Dongjiang Basin Authority of Guangdong Province, Huizhou 516003, China)

Abstract: The spatial-temporal variability of streamflow annual distribution during 1956 to 2009 in the Dongjiang River is analyzed. Both monthly observed and naturalized streamflow data and the monthly regional precipitation data are used in the study. The trend and change-point analysis are performed on the data to reveal the characteristics of streamflow. Likely contributions from various factors to the streamflow annual distribution are quantitatively analyzed. These factors include the climate change, the land use and coverage changes, the regulation of water reservoirs and the water consumption. The results show that the significant decreasing trend and change points in 1973 can be identified on the concentration and the nonuniformity in the observed streamflow data. The average change of the concentration degree in the naturalized streamflow data and the regional precipitation change are marginal. However, the nonuniform coefficient during 2000 to 2009 is significantly larger than that during the periods 1980 - 1989 and 1990 - 1999. The bigger catchment area is, the greater the concentration and the nonuniformity will be. The decrease of the concentration and nonuniformity is due to the effect of the regulations of water reservoirs and the land use and coverage changes; while, the increase is the result the water consumption and the climate change. The contributions to the spatial-temporal variability of streamflow annual distribution from the regulation of water reservoirs, the land use and coverage changes, the water consumption, and the climate change are respectively -33.5%, -9.0%, 4.5% and 1.0%. Among the contribution from the regulation of water reservoirs, the Xinfengjiang, Fengshuba, and Baipenzhu reservoirs contribute -21%, -10%, -2%, respectively. There is an upward tendency in the contribution from the land use and coverage changes and the water consumption in the past 30 years.

Key words: streamflow annual distribution; concentration degree; nonuniform coefficient; influencing factor; contribution rate; Dongjiang River

^{*} The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50839005).