

基于洛伦兹曲线的泾河张家山站径流及 降雨分布不均匀性分析

王青^a, 刘招^b, 陶望雄^a

(长安大学 a. 环境科学与工程学院; b. 水与发展研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 基于泾河张家山站 1970-2014 年月径流量和月降雨量数据, 引入洛伦兹曲线, 计算泾河张家山站年径流量和年降雨量的基尼系数和洛伦兹不对称系数, 利用 Mann-Kendall 方法进行趋势分析和检验。研究结果表明: 1970-2014 年泾河张家山站的年径流量和降雨量均呈下降趋势, 且径流量下降趋势显著, 降雨量趋势不明显。年径流量和年降雨量平均基尼系数分别为 0.442 和 0.513; 大于 1 的洛伦兹不对称系数的年份占总年份的比例分别约 75% 和 20%。年径流量的基尼系数呈下降趋势, 洛伦兹不对称系数呈上升趋势; 年降雨量的基尼系数和洛伦兹不对称系数均呈上升趋势。径流分布趋于平均, 径流量大的月份所占的比例增加; 降雨分布不均性增强, 主要由降雨量小的月份引起。

关键词: 径流; 降雨; 不均匀性分析; 洛伦兹曲线; 基尼系数; 洛伦兹不对称系数

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0119-04

Analysis of heterogeneity of runoff and precipitation distribution at Zhangjiashan station of Jinghe river based on Lorenz curve

WANG Qing^a, LIU Zhao^b, TAO Wangxiong^a

(a. School of Environmental Science and Engineering; b. Institute of Water and
Development Research, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on monthly rainfall and runoff data from 1970 to 2014 at Zhangjiashan hydrological station of Jinghe River, the paper introduced Lorenz curve to calculate Gini coefficient and Lorenz asymmetry coefficient of runoff and precipitation by using Mann-Kendall method to carry out trend analysis and test. The results showed that annual runoff and rainfall displayed a falling trend from 1970 to 2014, but the downward trend of annual rainfall was not obvious. The average Gini coefficient of runoff and precipitation are 0.442 and 0.513 respectively; the annual proportion of Lorenz asymmetry coefficient of greater than 1 is about 75% and 20% respectively. The Gini coefficient of annual runoff showed decreasing trend and Lorenz asymmetry coefficient showed increasing trend, while both Gini coefficient and Lorenz asymmetry coefficient of annual precipitation appeared increasing trend. Therefore, the runoff distribution appears uniform and the percentage of month with large runoff volume increase; the uneven of precipitation distribution is strengthen because of the month of less precipitation.

Key words: runoff; precipitation; analysis of heterogeneity; Lorenz curve; Gini coefficient; Lorenz asymmetry coefficient

河川径流的年内分配是水文学研究的重要内容。径流年内分配的不均匀程度直接影响着水利工程的规模与水资源的合理配置^[1]。泾河为黄河的二级支流, 流经干旱、半干旱地区, 是西北地区重要

的水源, 同时存在着严重的水土流失问题, 因此, 研究泾河流域径流和降水的年内分布和变化, 为了解气候变化, 合理利用流域水资源提供理论依据。近年来, 广大学者密切关注泾河流域的水沙特性及径

收稿日期: 2015-08-19; 修回日期: 2015-09-30

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2015JM5256); 中央高校基本科研业务费专项项目(310850151100)

作者简介: 王青(1990-), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。

流气候变化。陈晨等^[2]指出泾河流域年径流量总体呈现明显减小趋势,但在不同时段内趋势不尽相同。郭爱军等^[3]、刘革非等^[4]从年输沙量及水沙特性分析泾河流域的水土流失问题。本文基于张家山站 1970-2014 年的实测数据,利用洛伦兹曲线,引入基尼系数和洛伦兹不均匀系数对序列进行分析,并采用 Mann-Kendall 趋势分析方法,对径流量和降雨量的年内分配均匀度进行定量分析,为泾河两岸各县及泾惠渠灌区的经济发展,泾河水资源的合理规划提供参考。

1 研究区概况

泾河是渭河一级支流,即黄河二级支流。它发源于宁夏六盘山东麓,自西向东流经宁夏、甘肃、陕西 3 省(区),于高陵县陈家滩注入渭河。泾河全长 455.1 km,流域面积 45 421 km²。泾河流域为典型的大陆性季风气候,处于温带半湿润区向半干旱区的过渡带,冬季干旱少雨雪,夏季降水多且集中。

张家山水文站为泾河下游干流控制站,作为一类精度水文站,设立于 1932 年 1 月,其基本断面位于关中大型灌区——泾惠渠灌区渠首下游约 500 m 处;1952 年 6 月原站址下移 3 500 m,即张家山(二)站;1955 年设立泾惠渠断面,集水面积 43 216 km²,距河口里程 58 km^[5]。

2 研究方法

2.1 基本原理

洛伦兹曲线由美国统计学家 M. Lorenz 在 20 世纪初提出,最初用于研究社会财富、土地和工资收入等的分配公平性。洛伦兹曲线可用图 1 表示:横轴 x 代表收入不高于某一水平的人数占总人数的百分比,纵轴 y 代表相应的收入额占总收入的百分比。当曲线与横坐标轴成 45° 夹角时,该直线为绝对均匀线(OA),折线 OBA 为绝对不平等线。

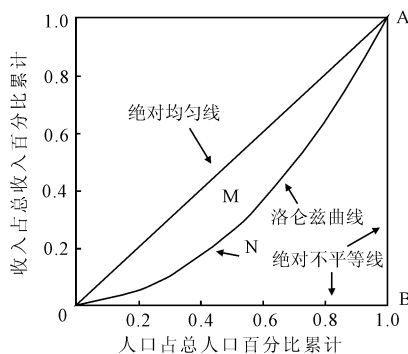


图 1 洛伦兹曲线

基尼系数是意大利经济学家 Corrado Gini 于 1922 年在洛伦兹曲线的基础上提出的,利用累积数学绘制成的曲线来刻画不平等(集中或分散)程度,用 G 表示。基尼系数为图 1 中绝对均匀线与曲线之间的面积(M)和绝对均匀线与绝对不平等线之间的面积($M+N$)的比值^[6-8]。基尼系数的变化范围是 $0 \leq G \leq 1$,基尼系数越大,均匀度越低,即越不均匀;反之越均匀。

仅用基尼系数无法描述洛伦兹曲线全部信息,不同的洛伦兹曲线可具有相同的基尼系数。2000 年,丹麦植物学家 Christian Damgaard 和 Jacob Weiner 又提出了洛伦兹不对称系数,用 S 表示,用来定量界定不同等级群体对总不均匀性的贡献大小,即不均匀性的原因^[9]。不对称系数的变动范围有 $S < 1$, $S = 1$, $S > 1$ 三种情况。只有 $S = 1$ 时,洛伦兹曲线对称;当 $S > 1$ 时,与均匀线平行的部分曲线数据点处于对称轴上方;当 $S < 1$ 时,与均匀线平行的部分曲线数据点处于对称轴下方。

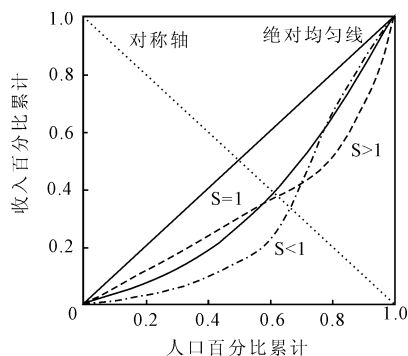


图 2 不对称系数的 3 种情形($S < 1$, $S = 1$, $S > 1$)

近年来,除了用于经济学收入分配均等研究外,洛伦兹曲线在水资源匹配分析^[10]、水污染物总量分配^[11]、径流降雨年内分配、用水公平性评价等方面得到成功应用,比如李建芳等^[12]利用基尼系数作为公平性评价指标,对石羊河流域的用水公平性进行了评价;牛富霞等^[13]运用基尼系数理论研究祖厉河径流的时间分布均匀度问题;史婉丽等^[14]利用建立的基尼系数降水分布不均匀性模型研究延安市和榆林市的降雨年内分布的不均匀性。这些研究均表明,基尼系数在分布均匀度评价方面更具优点。

2.2 基尼系数及洛伦兹不对称系数的计算方法

基尼系数主要有 4 种计算方法^[15],为直接计算法、拟合曲线法、分组计算法和面积法。本文采取拟合曲线法,基本思路是运用 Excel 软件中自带的多项式拟合工具,拟合出洛伦兹曲线,得出其函数表达

式,然后用积分法求出 N 的面积,计算基尼系数,公式为:

$$G = 1 - 2 \int_0^1 f(x) dx \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 为多项式拟合得出的函数; x 为时间累积百分比。

洛伦兹不对称系数的数学表达式是^[7]:

$$S = F(\mu) + L(\mu) \quad (2)$$

对于有序数列 $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_n$, S 可按照以下公式计算:

$$\delta = \frac{\mu - x_m}{x_{m+1} - x_m} \quad (3)$$

$$F(\mu) = \frac{m + \delta}{n} \quad (4)$$

$$L(\mu) = \frac{L_m + \delta x_m}{L_n} = \frac{\sum_1^m x_i + \delta x_m}{\sum_1^n x_i} \quad (5)$$

式中: μ 为均值; n 为数据总个数; m 为小于均值的数据个数。

2.3 年内分配均匀度基尼系数模型构建过程

根据洛伦兹曲线的基本原理,按以下步骤构建:

(1) 将年内月径流量(月降雨量)按升序排列,并计算累积百分比。

(2) 以月为单位,对时间进行累积百分比累积。

(3) 以时间累积百分比为自变量 x ,以月径流量(月降雨量)累积百分比为因变量 y ,经拟合得到洛伦兹曲线,如图 1。

(4) 根据拟合曲线,应用公式(1)~(5),计算年基尼系数和年不均匀系数。基尼系数越大表示要素分布均匀度越低,即越不均匀;反之均匀度越高,越均匀。洛伦兹不对称性系数大于 1,说明造成年内分布不均匀的原因是径流量(降雨量)较大的月份的径流占总量的比例较大;反之,不均匀性的原因是径流量(降雨量)较小的月份占全年的比例较大。

2.4 趋势分析方法

采用 Mann - Kendall 非参数检验方法对参数的趋势性进行定性与定量分析,其优点是参数序列不需要遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,且算法简单易行^[16]。若 Mann - Kendall 检验的统计变量 Z 大于 0,序列有上升趋势;小于 0 时,序列有下降趋势。在给定的置信水平 α 下,如果 $|Z| < Z_{1-\alpha/2}$,序列无显著变化趋势; $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则序列变化趋势显著, Z 的绝对值越大,表示变化趋势越显著,通常取 $\alpha = 0.05$, $Z_{1-\alpha/2} = 1.64$ 。

3 结果与分析

3.1 径流降雨、基尼系数和洛伦兹不对称系数的变化特征

采用上述方法,计算基尼系数及洛伦兹不对称系数,根据计算结果,绘制出时间变化趋势图,径流分析如图 3 所示,降雨分析如图 4 所示。计算 Z 值见表 1。

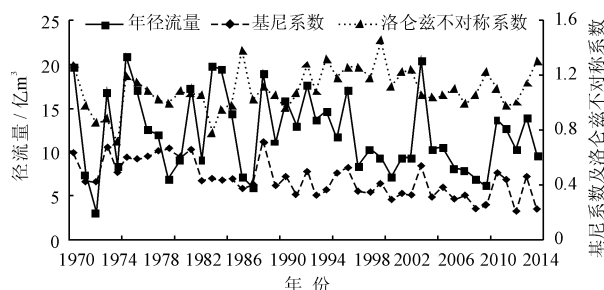


图 3 张家山站年径流量、径流量基尼系数和洛伦兹不均匀系数趋势图

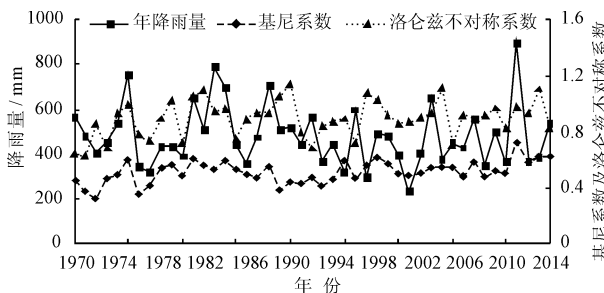


图 4 张家山站年降雨量、径流量基尼系数和洛伦兹不均匀系数趋势图

表 1 张家山站年径流量(降雨量)、基尼系数和洛伦兹不对称系数的趋势检验结果

变量	项目	Z	显著性	变化趋势
年径流量	R	-3.84**	显著	下降
	G	-4.53**	显著	下降
	S	1.69**	显著	上升
年降雨量	J	-0.96	不显著	下降
	S	1.59	不显著	上升

注: Z : M - K 检验值; R : 年径流量; J : 年降雨量; G : 基尼系数; S : 洛伦兹不对称系数; ** 表示通过 95% 的置信度检验水平。

3.2 结果分析

泾河张家山站 1970 - 2014 年的平均径流量是 $1.21 \times 10^9 \text{ m}^3$, 年径流量呈现下降趋势, 波动性较大(见图 3), 45a 平均基尼系数是 0.442, 基尼系数呈现下降趋势, 表明年内径流分布均匀度提高, 洛伦兹

不对称系数大于1的年份占全部年份的75%左右,多数年份径流量分布不均匀由径流量较大的月份引起。年径流量与基尼系数和洛伦兹不对称系数的相关系数分别为0.538和0.004,说明径流量与基尼系数具有一定相关性,与洛伦兹不对称系数不相关。

由表1可知,年径流量和基尼系数的 $|Z| > Z_{1-\alpha/2} = 1.64$,呈现下降趋势,且趋势极显著;洛伦兹不对称系数呈上升趋势,趋势较显著。可见泾河流域年径流量减少,且年内分布越来越均匀,径流量较大的月份所占比例较大,易发生洪涝灾害引发的水土流失。

如图4所示,泾河张家山站45 a平均降雨量是483.45 mm,变化趋势与径流量变化趋势一致,平均年基尼系数是0.513,呈现上升趋势,表明年内降雨量分布均匀度降低,洛伦兹不对称系数大于1的年份占全部年份的20%,多数年份降雨量分布不均匀由降雨量较小的月份引起。年降雨量与年径流量的相关系数是0.542,说明两者具有相关性。

另外,由表1可知,年降雨量呈降低趋势,基尼系数呈显著上升趋势,洛伦兹不对称系数也呈上升趋势,但年降雨量和不对称系数的趋势均不显著。张家山站降雨量减少,降雨量的年内分布越来越不均匀,集中程度增大,且集中在7-9月份。雨季月份降雨量较集中,发生暴雨引发水土流失和洪涝灾害的可能性增加;非雨季月份降雨量较少,容易造成土地干旱,植物无法生长,对农业生产和生态环境带来不利影响。

年径流量洛伦兹不对称系数的变化主要来源于7-9月的径流,同时段亦为泾河的汛期^[17-18],因此降雨量是影响径流变化的主导因素,降雨量年内分布中降雨量较大的月份比例增加,不均匀度降低,使得径流量集中在汛期,会增大水土流失的可能性;非汛期径流量减少,将会导致土壤干旱,影响作物生长和生态环境恢复。

为了分段了解基尼系数和洛伦兹不对称系数的变化趋势,分析人类活动对径流降雨的影响,分别绘制了年径流量和年降雨量的基尼系数、洛伦兹不对称系数的年代际变化图(图5、6)。从两图中可以看出,年径流量基尼系数不断下降,径流年内分布趋于平均。不同年代的不对称系数有小幅变动,且均大于1,其中20世纪90年代洛伦兹不对称系数最大,10年间径流量较大的月份集中在7-9月份,占全年径流量的60%左右。年降雨量基尼系数和洛伦兹不对称系数的变幅不大,变化趋势基本一致。

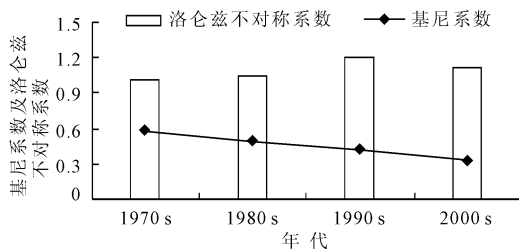


图5 年径流量基尼系数和洛伦兹不对称系数年代际变化图

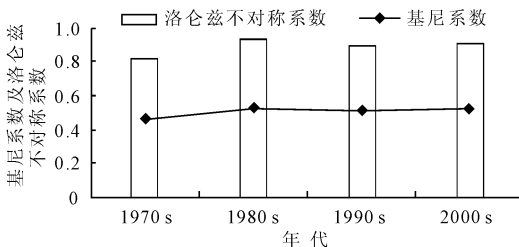


图6 年降雨量基尼系数和洛伦兹不对称系数年代际变化图

4 结论

为了了解径流降雨的年内变化趋势,合理规划利用水资源,本文引入洛伦兹曲线和基尼系数,研究了泾河中下游河川径流和降雨的长系列演变规律及年内分配问题,取得了以下结论:

(1) 张家山站年径流呈显著下降趋势,基尼系数表明,年内径流分布均匀度提高,洛伦兹不均匀系数不断增大,不均匀的原因由径流量较大的月份引起。径流量集中在汛期的7-9月,集中程度较高。降雨也呈下降趋势,基尼系数增大,年内降雨分布越来越不均匀,降雨量较大的月份所占比例增大。

(2) 由基尼系数和洛伦兹不均匀系数年代际变化可知,径流量的基尼系数不断减少,径流不对称系数浮动不大,均大于1;年降雨量基尼系数和洛伦兹不对称系数的变幅不大,变化趋势基本一致。

(3) 洛伦兹曲线作为近年来用于评价年内分配均匀性的指标,直观反映了年内分配的不均匀性,且揭示了其原因,与流域实际情况相符合。在一定程度上揭示了流域极端天气现象的发生原因,为流域的径流量调配、管理和利用提供科学技术依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈晨,罗军刚,解建仓,等. 泾河流域近80a径流变化趋势及特征分析[J]. 人民黄河,2013,35(1):26-28+38.
- [3] 郭爱军,黄强,畅建霞,等. 基于Copula函数的泾河流域水沙关系演变特征分析[J]. 自然资源学报,2015,30(4):673-683.

(下转第127页)

- [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 282 - 291.
- [2] 周怀东, 郝红, 王雨春, 等. 全国河流湖泊水库底泥污染状况调查评价. 全国水资源综合规划专项报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2011.
- [3] 周立旻, 郑祥民, 殷效玲. 苏州河上海段底泥重金属的污染特征[J]. *城市环境与城市生态*, 2008, 21(2): 1 - 5.
- [4] Clément B, Vaille G, Moretto R, et al. Abdelghafour M. Effects of a physico-chemical treatment of a dredged sediment on its ecotoxicity after discharge in laboratory gravel pit microcosms [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 175(1-3): 205 - 215.
- [5] Roeters P B. Large scale treatment of contaminated sediments in the Netherlands, the feasibility study [J]. *Water Science and Technology*, 1998, 37(6-7): 291 - 298.
- [6] 王美清, 郁鸿凌, 陈梦洁, 等. 城市污水污泥热解和燃烧的实验研究[J]. *上海理工大学学报*, 2014, 36(2): 185 - 188 + 193.
- [7] Abumaizar R J, Smith E H. Heavy metal contaminants removal by soil washing[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1999, 70(1-2): 71 - 86.
- [8] Dermont G, Bergeron M, Mercier G, et al. Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152(1): 1 - 31.
- [9] 蒋煜峰, 展惠英, 张德懿, 等. 皂角苷络合洗脱污灌土壤中重金属的研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(8): 1315 - 1319.
- [10] Nukoon T, Preeda P, Delaune R D, et al. Jugsujinda A. Evaluation of extraction procedures for removing lead from contaminated soil [J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2005, 40(2): 385 - 407.
- [11] Bassi R, Prasher S O, Simpson B K. Extraction of metals from a contaminated sandy soil using citric acid [J]. *Environmental Progress*, 2000, 19(4): 275 - 282.
- [12] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844 - 851.
- [13] 冯素萍, 梁亮, 朱英, 等. 河流底泥沉积物的形态分析(II) - Tessier 形态分类法[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2004, 39(6): 101 - 104 + 107.
- [14] Tsang D C W, Lo I M C. Competitive Cu and Cd sorption and transport in soils: a combined batch kinetics, column, and sequential extraction study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(21): 6655 - 6661.
- [15] Mulligan C N, Yong R N, Gibbs B F. Heavy metal removal from sediments by biosurfactants [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 85(1-2): 111 - 125.

(上接第 122 页)

- [4] 刘革非, 于澎涛, 王彦辉, 等. 黄土高原泾河流域 1960 - 2000 年的年输沙量时空变化[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(6): 1 - 7.
- [5] 朱红艳, 韩彩波, 贾志锋, 等. 泾河张家山水文站水沙特性分析及工程实例[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 48 - 55.
- [6] 徐万玲, 朱卫红, 张健, 等. 基于洛伦兹曲线的图们江干流区间径流分布不均匀性分析[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 128 - 132.
- [7] 刘新有, 史正涛, 彭海英, 等. 基于“基尼系数”的降水时间分布均匀度变化研究[J]. *气象研究与应用*, 2007, 28(2): 46 - 48 + 65.
- [8] 王波雷, 马孝义, 范严伟. 基于洛伦兹曲线的乌兰木伦河径流变化分析[J]. *水文*, 2008, 28(5): 40 - 42.
- [9] Damgaard C, Weiner J. Describing inequality in plant size or fecundity [J]. *Ecology*, 2000, 81(4): 1139 - 1142.
- [10] 姜宁, 付强. 基于基尼系数的黑龙江省水资源空间匹配分析[J]. *东北农业大学学报*, 2010, 41(5): 56 - 60.
- [11] 叶春燕, 谷晋川. 基尼系数法在水污染物总量分配中的应用[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(6): 87 - 91.
- [12] 李建芳, 粟晓玲, 王素芬. 基于基尼系数的内陆河流域用水公平性评价——以石羊河流域为例[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(8): 217 - 222.
- [13] 牛富霞, 任东. 祖厉河流域径流的年内分布变化研究[J]. *甘肃科技*, 2009, 25(21): 43 - 44.
- [14] 史婉丽, 杨勤科, 李小芳, 等. 基于洛伦兹曲线的陕北黄土高原降雨分布不均匀性分析[J]. *干旱区农业研究*, 2012, 30(4): 172 - 177.
- [15] 徐万坪. 基尼系数的算法[J]. *统计与决策*, 2004, (9): 121 - 122.
- [16] 罗颖, 张钰, 路阳, 等. 近 50 年洮河干流径流量分布特征及变化趋势分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(2): 153 - 158.
- [17] 王毅荣. 黄土高原土壤干旱异常阶段特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 209 - 214 + 229.
- [18] 张淑兰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 人类活动对泾河流域径流时空变化的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(6): 66 - 72.