

基于洛伦茨曲线的陕北黄土高原 降雨分布不均匀性分析

史婉丽¹, 杨勤科², 李小芳³, 陈 昂¹, 何先进⁴

(1. 中国水利水电科学研究院水电可持续发展研究中心, 北京 100038; 2. 西北大学城市与资源环境学院, 陕西 西安 710127;
3. 陕西省安康市气象局, 陕西 安康 725000; 4. 邯郸市水利水电勘测设计研究院, 河北 邯郸 056002)

摘 要: 利用建立的基尼系数降水分布不均匀性模型, 对延安市和榆林市 1961—2010 年的降水量、基尼系数和洛伦茨不对称系数的系列进行研究, 并用 Mann—Kendall 方法趋势分析和检验。研究结果表明, 近 50 年来榆林市和延安市的年降水量呈下降趋势, 年平均基尼系数分别为 0.61 和 0.56; 大于 1 的洛伦茨不对称系数的年份占总年份的比例分别约为 33% 和 16.7%。榆林市的基尼系数呈上升趋势, 洛伦茨不对称系数呈下降趋势; 延安市的基尼系数呈下降趋势, 洛伦茨不对称系数呈上升趋势。榆林市的降水分布不均性增强, 主要是由于降水量小的月份所占的比例较大; 延安市降水分布趋于均匀, 降水量大的月份所占比例增加。榆林市在 1972、1986 年和 1997 年的洛伦茨不对称系数有较大波动, 这些年中降水不均匀性主要是由于降水量大的月份引起的, 同期也是土壤干旱异常的年份。因此, 洛伦茨曲线从一种新的角度来量化评价降水分布时间不均匀性及其成因, 为研究土壤干旱和水土流失等自然灾害成因机理提供科学依据。

关键词: 洛伦茨曲线; 基尼系数; 洛伦茨不对称系数; Mann—Kendall 趋势检验

中图分类号: S161.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)04-0172-06

全球气候变暖加快了区域的水循环, 使降水的频率和强度在区域内发生变化, 极端天气发生的频率也增大^[1-2]。降水变化的重要特征就是一年中发生强降雨量的频率、时间和方式发生变化, 即所谓的强降雨事件的发生。强降雨期有两层含义, 一方面指一年中发生强降水的比例增大; 另一方面, 包括降水发生的时间和强度比较集中。降水的年内时间分布是气候变化的重要方面, 同时对于研究径流和水土流失具有重要的意义^[3]。陕北黄土高原位于典型的半干旱区, 雨养农业生产方式决定了降雨是制约当地农业生产的主要限制因子, 同时, 降水影响着区域环境和经济的可持续发展。陕北黄土高原在行政区上包括延安和榆林两个地区, 属于内陆干旱半干旱、暖温带和温带半干旱大陆性季风气候, 植被稀疏, 是我国水土流失和土壤荒漠化较为严重的区域之一。延安地区为典型的旱作农业区, 榆林地区属于我国北方农牧交错带。为此, 该地区的降水量的变化趋势对生态环境产生严重的影响。强降水量的发生, 容易引起水土流失, 而非降水期的气候干旱将加剧土壤水分蒸发, 造成黄土土壤干层。因此, 在全球气候变化背景下, 研究陕北黄土高原降水的分布和变化特征, 对于了解当地的气候变化特点和未来

发展趋势, 水土流失的治理、生态环境的恢复, 以及再造“山川秀美工程”有着重要的现实意义。

近年来, 陕北黄土高原降水量的时空分布趋势备受关注。在分析年降水分布变化趋势的同时, 却较少关注降水量的年内变化分布趋势^[4-7]。本文以陕北黄土高原的典型地区延安市和榆林市为研究对象, 借鉴“基尼系数”的构建思路, 利用洛伦茨曲线的特征分析, 对降水的年内分布的均匀度进行定量分析, 以期全面、客观评估降水的时间分布趋势, 为合理利用气候资源, 优化产业布局, 促进农业生产提供参考。

1 研究方法

1.1 基本原理

洛伦茨曲线 (Lorenz curve) 是美国经济统计学家洛伦茨 (M. Lorenz) 提出用来描述社会财富分配不均等性的一种方法。洛伦茨曲线可以用数学式表示为^[8]:

$$L(y) = \frac{\int_0^y x dF(x)}{\mu} \quad (1)$$

这里, $F(x)$ 是有序个体的累积分布函数, 为均值。

收稿日期: 2012-02-01

基金项目: 水利部公益性行业专项 (基于 GIS 的黄土丘陵区年侵蚀产沙经验模型研究 201201081-02)

作者简介: 史婉丽 (1979—), 女, 陕西大荔人, 博士, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: shiwanli_sweet@126.com。

洛伦茨曲线可用图(1)来表示。洛伦茨曲线表示统计群体中人数的累积百分比与个人收入累积百分数的相互关系。洛伦茨曲线图是一个平面坐标图,如图(1)所示,横坐标 x 表示收入不高于某一水平的人数占总人数的比重,纵坐标 y 表示相应的收入额占总收入的比重。图1中对角线 OA 为绝对平等线。折线 OBA 表示为绝对不平等线。洛伦茨曲线 $y = f(x)$ 位于 OA 和 OBA 之间,它能直观表示社会收入分配的不平等程度。

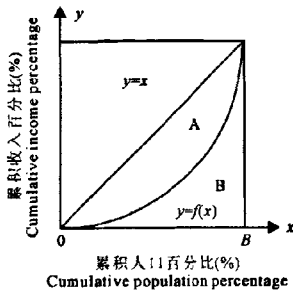


图1 洛伦茨曲线

Fig.1 Lorenz curve

基尼系数(Gini coefficient)是意大利经济学家基尼(Corrado Gini)于1922年在洛伦茨曲线的基础上提出的,利用累积数绘制成的曲线来刻画不平等(集中或分散)程度。基尼系数是洛伦茨曲线图中 $y = x$ 和 Lorenz 曲线之间的面积(A)和绝对均匀线与绝对不均线之间的面积($A + B$)之比。基尼系数用 G 表示,由积分法得到:

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

基尼系数变动范围为 $0 \leq G \leq 1$ 。当 $G = 0$ 时,表示所有的个体都是均等的;当 $G = 1$ 时,表示除1个个体外,其余的个体大小全为0。

基尼系数不可能包含洛伦茨曲线的所有信息,而且不同的洛伦茨曲线可以有相同的基尼系数。这种具有相同的基尼系数不同洛伦茨曲线的差异可以用洛伦茨不对称性来表示。2000年,丹麦植物学家 Christian Damgaard 和 Jacob Weiner 根据洛伦茨曲线又提出洛伦茨不对称系数(Lorenz asymmetry coefficient),可表明不同等级对群体总的不均性贡献的多少,用于解释不均匀性产生的来源。洛伦茨不对称系数(S)的数学表达式^[9]:

$$S = F(\mu) + L(\mu) \quad (3)$$

这里的 F 和 L 函数的定义同公式(1)。洛伦茨不对称

系数的变动范围为: $S < 1$ 或者 $S > 1$ 。当且仅当 $S = 1$ 时,洛伦茨曲线对称。当 $S > 1$ 时,与均匀线平行的部分洛伦茨曲线数据点位于对称轴的上方;当 $S < 1$ 时,与均匀线平行的部分洛伦茨曲线数据点位于对称轴的下方。

1.2 基尼系数和洛伦茨不对称系数的计算方法

基尼系数有很多种计算方法,包括直接计算法、面积法、拟合曲线法等。直接计算法不依赖于洛伦茨曲线,面积法分为上梯形面积法、下梯形面积 A 和矩形面积^[10]。本文采用下梯形面积法,先计算出 B 的面积,等于 n 个梯形之和,然后通过 B 求出 A 的值,最后计算出基尼系数。

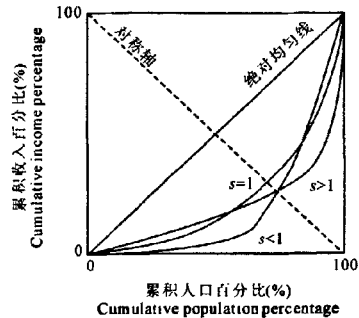
图2 洛伦茨曲线的3种情形($s = 1, s > 1$ 和 $s < 1$)

Fig.2 Three cases of Lorenz curve

$$G = 1 - 2B = 1 - y_i x_i - \sum_{i=1}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(x_{i+1} - x_i) \quad (4)$$

式中, x_i 为时间累积百分比(%); y_i 为降水量的累积百分比(%); i 为分配对象,且当 $x = 0$ 时, $y = 0$ 。从本质上来说,基尼系数用来评价和量化分布均匀度。除了用于经济学社会收入分配均等状况外,还可以应用到其他学科评价有关分布均匀度。比如,在区域水土资源匹配分析^[11]、用水公平性研究^[12]、水污染物总量分配^[13-14]、径流年内分配^[15-16]等方面得到成功应用。基尼系数在这些学科中的应用,在一定程度上促进其定量评价的发展,或者从一个新的角度丰富其定量评价的发展。

对于 $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_n$,洛伦茨不对称系数 S ^[9] 可以按照下列公式进行计算:

$$\delta = \frac{\mu - x_m}{x_{m+1} - x_m} \quad (5)$$

$$F(\mu) = \frac{m + \delta}{n} \quad (6)$$

$$L(\mu) = \frac{L_m + \delta x_{m+1}}{L_n} \quad (7)$$

其中, μ 为均值; n 为样本数; m 为小于均值的样本数。

1.3 降水年内分配均匀度基尼系数模型的构建

降水量在时间和空间上具有非均匀分布的特征。许多学者从年降水量、不同季节降水量等不同角度,研究陕北黄土高原降水趋势、周期性和突变特征,以此来揭示降水时空变化特征。降水的年内分布均匀度的评价指标单一,一般采用离差系数(CV)来量化降水的时间不均性^[17]。与离差系数相比,基尼系数介于0与1之间,具有直观的标示意义。不受降水要素平均状态的影响,定量评价连续性强。当降水时间分布相同时,一般离差系数相同,但是基尼系数并不一定相同。从某种程度上说,基尼系数更能反映出降水年内分布的不均匀性^[18]。根据基尼系数的计算方法,结合陕北黄土高原降水量情况,其基尼系数可按以下步骤构建:

- (1) 将月降雨量按升序排列,并计算累积百分比;
- (2) 对时间进行累积百分比累积;
- (3) 以时间累积与其总时间(以月/年为单位的比值为自变量 x ,以降雨量月均值累积与其总和的比值为因变量 y ,经拟合后得出降雨量时间分布的洛伦茨曲线 $y = f(x)$;
- (4) 根据洛伦茨曲线求出降水时间分布均匀度基尼系数和洛伦茨不对称性系数。基尼系数越大,表示降水分布均匀度越低,即越不均匀,反之则表示均匀度越大,越均匀。洛伦茨不对称性系数大于1,说明造成年内降水分布不均匀性的原因是由于降水量较大的月份占年降水量的比例相对大;反之,洛伦

茨不对称性系数小于1,说明降水量较小的月份引起年内降水分布的不均匀性。

1.4 趋势分析方法

本文拟用 Mann—Kendall 趋势检验方法,是一种非参数统计检验的方法,其优点是样本不需要遵循某种特定的分布,也不受少数异常值的干扰,对分析水文气象时间序列的趋势具有很好的适用性,且计算简便^[19]。利用 Mann—Kendall 统计值 Z_{MK} 进行趋势统计显著性检验,先假设该序列无趋势;通过正态分布表中查出一定显著性水平下的临界检验值 $Z_{1-\alpha/2}$,当 $|Z_{MK}| < Z_{1-\alpha/2}$ 时,原假设被接受;当 $|Z_{MK}| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,拒绝原假设,认为序列变化趋势显著。同时, Z_{MK} 为正时,表示序列呈上升趋势;反之,呈下降趋势, Z_{MK} 绝对值越大,说明序列趋势变化越显著。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时, $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ 。

2 结果与分析

2.1 降水量不均匀性评价

基于榆林市和延安市的 1961—2010 年的年降水量和逐月降水资料,采用上述模型,评价研究区域连续 50 年的降水时间分布均匀度,其结果见图 3 和 4。图 3 和图 4 分别表明榆林市和延安市的年降水量、基尼系数和洛伦茨不对称系数随时间的变化趋势。表 1 表示 1961—2010 年榆林市和延安市的降水量、基尼系数和洛伦茨不对称系数的趋势检验结果。

2.2 评价结果分析

2.2.1 年降水量、基尼系数和洛伦茨不对称系数的变化特征 榆林市 1961—2010 年 50 a 平均降水量为 393.2 mm,年降水量有下降的趋势(如图 3 所示)。

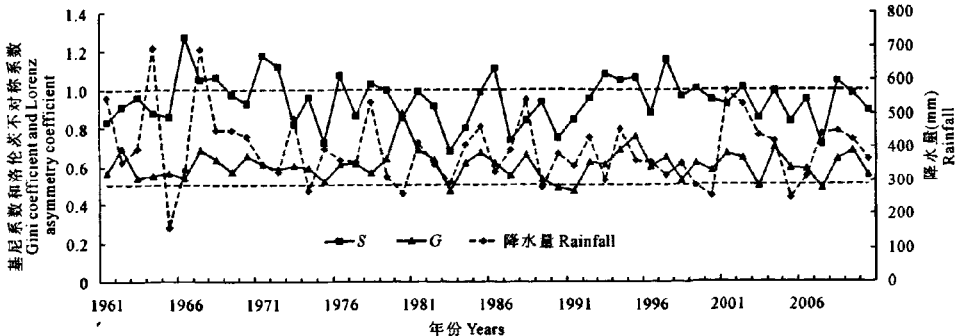


图 3 榆林市年降水量、降水量基尼系数(G)和洛伦茨不对称系数(S)及其趋势

Fig.3 The trends of annual precipitation, Gini coefficient and Lorenz asymmetry coefficient in Yulin

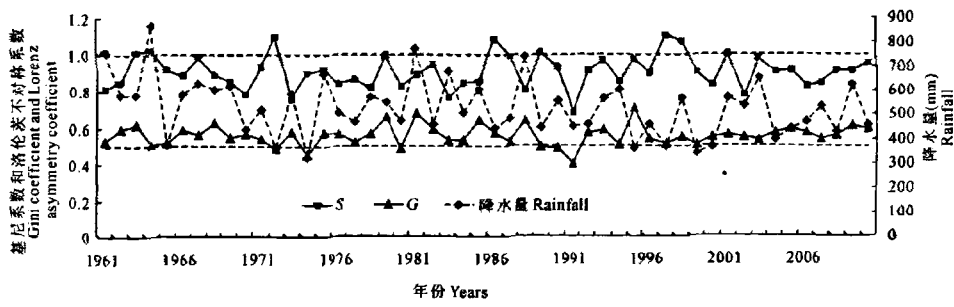


图 4 延安市年降水量、降水量基尼系数 (G) 和洛伦茨不对称系数 (S) 及其趋势
Fig.4 The trends of annual precipitation, Gini coefficient and Lorenz asymmetry coefficient in Yan'an

表 1 榆林市和延安市的降水量、基尼系数和洛伦茨不对称系数的趋势检验结果

Table 1 The Mann - Kendall trends of precipitation, Gini coefficient and Lorenz asymmetry coefficient in Yan'an and Yulin in 1961—2010

	项目 Items	Z_{MK} Z statistic	显著性 Significance level	变化趋势 Trend
榆林市 Yulin	降水量 Rainfall	- 1.19	不显著 No significance	降低 Decreasing
	基尼系数 Gini coefficient	0.80	不显著 No significance	上升 Increasing
	洛伦茨不对称 Lorenz asymmetry coefficient	- 0.13	不显著 No significance	降低 Decreasing
延安市 Yan'an	降水量 Rainfall	- 2.29	显著 * * Significance at the 95% confidence level	降低 Decreasing
	基尼系数 Gini coefficient	- 0.14	不显著 No significance	降低 Decreasing
	洛伦茨不对称 Lorenz asymmetry coefficient	0.74	不显著 No significance	上升 Increasing

注: * * 表示通过 95% 的置信度检验水平。
Note: * * means significance at 95% confidence level.

50 a 年平均基尼系数为 0.61, 年基尼系数有上升趋势, 年降水趋势线的波动性越来越强。对于洛伦茨不对称性系数来说, 大于 1 的年份约占这 50 年总年份的 33.3%, 说明在这些年份中, 降水年内分布不均匀性主要由于降水量较多的月份引起的。以 1994 年为例, 年降水量为 456.1 mm, 基尼系数为 0.69, 洛伦茨不对称性系数为 1.05, 6~9 月份降水量占全年降水量的 90% 以上。年降水量与基尼系数和洛伦茨不对称性系数的相关系数分别为 0.08 和 -0.03, 说明年降水量与基尼系数和洛伦茨不对称性系数不相关。从表 1 可以看出, 榆林市的年降水量和洛伦茨不对称系数呈降低趋势, 而基尼系数呈上升趋势, 但趋势均不显著。这说明榆林市降水量降低, 年内降水分布不均匀性增强, 而且降水量较小的月份所占的比例较大。总的来说, 榆林市发生旱涝灾害的趋势增大, 而且干旱化的趋势增强。

如图 4 所示, 延安市 1961—2010 年 50a 年平均降水量为 531.3 mm, 年降水量呈显著下降趋势。与

榆林市相比, 降水量较充沛, 年降水量下降幅度也较大。50 a 平均基尼系数为 0.56, 年基尼系数呈降低趋势, 且波动性减小, 尤其是从 1996 年以来, 基尼系数在 0.5~0.6 之间波动。延安市年基尼系数比榆林市小, 年内降水量分布比榆林市均匀。大于 1 的洛伦茨不对称系数的年份所占比例为 16.7%。年降水量与基尼系数和洛伦茨不对称系数的相关系数为 -0.13 和 0.26, 同样地, 说明在延安市这三个变量之间不存在相关性。从表 1 可以看出, 延安市的降水量呈显著降低的趋势, 基尼系数也呈降低趋势, 洛伦茨不对称系数呈上升趋势, 但两者趋势均不显著。延安市降水量降低, 降水量的年内分布越来越均匀, 而且降水量较大月份所占的比例在增加。可以说延安市发生暴雨引发水土流失的趋势有可能增加。

从图 3 和 4 可以看出, 榆林市在 1972、1986 年和 1997 年洛伦茨不对称系数波动较大且都大于 1, 这三年降水量的洛伦茨曲线, 主要由于降水量大的月

份引起的年降水的分布不均匀,而且,同期也是历史上土壤干旱异常的年份^[20]。延安市的降雨量年基尼系数均小于榆林市,延安市的洛伦茨曲线接近绝对均匀线。在延安市和榆林市,洛伦茨不对称系数大于1的年份占整个研究的时间序列的比例小,在这些洛伦茨不对称系数小于1的年份中,造成年内降水分布不均匀的主要原因是降水量少的月份所占年降水量的比例增大。从一定程度上,基尼系数和洛伦茨不对称系数可以表征该地区的旱涝变化特征。

总之,延安市和榆林市年降水量减少,年降水基尼系数的波动反映出年内降水分配的不均匀性和降水时间分布的稳定性。洛伦茨不对称系数的波动表明旱涝的频繁发生。雨季月份降雨量较集中,主要在7~9月份,大暴雨发生的频次会增大,增大水土流失发生的可能性;非雨季月份降水量较少,在一年中降水所占的比例较少,容易造成土壤干旱,对于植被生长和生态恢复极为不利。

2.2.2 基尼系数和洛伦茨不对称系数的年际间变化特征 图5显示了榆林市50 a来基尼系数和洛伦茨不对称系数的年代际间变化趋势。从20世纪50年代至今,基尼系数的变化不是很大,基本在0.60左右变动。90年代洛伦茨不对称系数最大,接近于1。在这10年中,降水量大的月份所占比例较大,主要集中在7、8月份,且7~8月降水量占全年降水量的比例高达50%。从图6可以看出,延安市50 a来年代际间基尼系数和洛伦茨不对称系数的变幅不是很大,变化趋势基本一致。

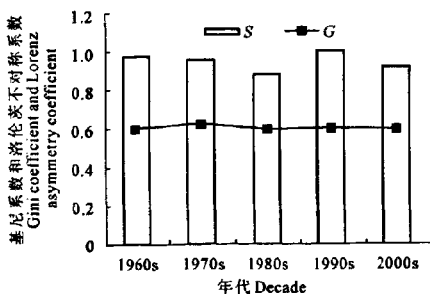


图5 榆林市基尼系数(G)和洛伦茨不对称系数(S)的年代际间变化特征

Fig.5 The interdecadal trends of Gini coefficient and Lorenz asymmetry coefficient in Yulin

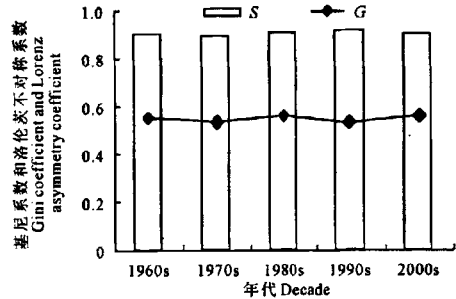


图6 延安市基尼系数(G)和洛伦茨不对称系数(S)的年代际间变化特征

Fig.6 The interdecadal trends of Gini coefficient and Lorenz asymmetry coefficient in Yan'an

3 结论

降水时间分布均匀度在一定程度上能够反映出半干旱季风气候区的旱涝灾害的严重程度。同时,基于“洛伦茨曲线”的降水时间分布均匀度能定量评价降水的稳定性,为研究区域的降水强度和干旱发生频率等指标提供技术支持和科学依据。本文以位于陕北黄土高原的典型地区延安市和榆林市为研究对象,就降水在年内分布的不均匀性进行深入研究,取得了以下结论:

1) 利用基尼系数和洛伦茨不对称系数作为一种新的指标,既反映了降水在年内分布的不均匀性,同时还分析了产生这种不均匀性的原因。从一定程度上洛伦茨曲线可以揭示区域旱涝发生的原因。

2) 延安市和榆林市的评价实例表明:在年降水量减少的同时,降水年内时间分布越均匀,强降雨期的降水量所占的比例增大,表明该地区容易发生水土流失和干旱。而且水土流失和干旱发生的频率在逐渐缩短。

参考文献:

- [1] 符淙斌,董文杰,温刚,等.全球变化的区域响应和适应[J].气象学报,2003,61(2):245-249.
- [2] 刘昌明,刘小萍,郑红星.气候变化对水文水资源影响问题的探讨[J].科学对社会的影响,2008,(2):21-27.
- [3] M. D. Luis, J. C. Gonzalez, L. A. Longarea. Is Rainfall Erosivity Increasing in the Mediterranean Iberian Peninsula? [J]. Land Degradation & Development, 2010,21(2):139-144.
- [4] 蔡新玲,王繁强,吴素良.陕北黄土高原近42年气候变化分析[J].气象科技,2007,35(1):45-48.

- [5] 刘引鸽. 陕北黄土高原降水的变化趋势分析[J]. 干旱区研究, 2007, 24(1): 49-55.
- [6] 孙智辉, 曹雪梅, 刘志超, 等. 陕西黄土高原地区降水日数和强度年代际变化[J]. 应用气象学报, 2009, 20(4): 510-512.
- [7] 王毅荣, 吕世华. 黄土高原降水对气候变暖响应的敏感性研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1): 43-51.
- [8] Lorenz M O. Methods for measuring the concentration of wealth[J]. American Statistics Association, 1905, 70(9): 209-219.
- [9] Damgaard. C, Weiner. J. Describing inequality in plant size or fecundity[J]. Ecology, 2000, 81(4): 1139-1142.
- [10] 徐万坪. 基尼系数的算法[J]. 统计与决策, 2004, (9): 121-122.
- [11] 吴宇智, 鲍海君. 区域基尼系数及其在区域水土资源匹配分析中的应用[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 123-125.
- [12] 李建芳, 栗晓玲, 王素芬. 基于基尼系数的内陆河流域用水公平性评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 217-222.
- [13] 孟祥明, 张宏伟, 孙 韬, 等. 基尼系数法在水污染物总量分配中的应用[J]. 中国给水排水, 2008, 24(23): 105-108.
- [14] 王丽琼. 基于公平性的水污染物总量分配基尼系数分析[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 1796-1801.
- [15] 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.
- [16] 王波雷, 马孝义, 范严伟. 基于洛伦兹曲线的乌兰伦河径流变化分析[J]. 水文, 2008, 28(5): 40-42.
- [17] 江善虎, 任立良, 雍 斌, 等. 老哈河流域降水变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2009, 29(1): 1-4.
- [18] Michiels P, D. Gabriels, Ghent R H. Using the seasonal and temporal precipitation concentration index for characterizing the monthly rainfall distribution in Spain[J]. Catena, 1992, (19): 43-58.
- [19] Mann H B. Nonparametric Tests Against Trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [20] 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.

Study on temporal inequality of precipitation in the loess plateau based on Lorenz curve

SHI Wan-li¹, YANG Qin-ke², LI Xiao-fang³, CHEN Ang¹, HE Xian-jin⁴

(1. Research Center for Sustainable Hydropower Development, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

3. Ankang Meteorological Bureau, Ankang, Shaanxi 725000, China; 4. Handan Design and Research Institute of Water Conservancy and Hydropower, Handan, Hebei 056002, China)

Abstract: Based on the model of precipitation distribution describing with Gini coefficient in Yan'an and Yulin, the annual precipitation, Gini coefficient and Lorenz asymmetry coefficient were analysed for the period of 1961—2010 and the Mann-Kendall test was employed to detect the upward or downward trend in precipitation, Gini coefficient and Lorenz asymmetry coefficient during the study period. The results showed that the annual precipitation in Yan'an and Yulin located in the loess plateau was in a decreasing trend during the past 50 years and mean Gini coefficient was respectively 0.56 and 0.61. The yearly Lorenz asymmetry coefficient ($S > 1$) accounted for a high percentage, 33.3% in Yulin and 16.7% in Yan'an. Yulin showed increasing Gini coefficient and decreasing Lorenz asymmetry coefficient while Yan'an indicated decreasing Gini coefficient and increasing Lorenz asymmetry coefficient, but these trends had no significance at a $> 95\%$ confidence level. Therefore, precipitation distribution was becoming more and more uneven in Yulin since greater percentages of the yearly total precipitations in a few very unrainy months. However, the monthly precipitation within one year in Yan'an had a uniform distribution and a greater percentage of the precipitation in a few rainy months. In the three years of 1972, 1986 and 1997 in Yulin, the Lorenz asymmetry coefficient was greater than 1. It indicated that the precipitation inequality was caused by the heavy rainfall in some months of the year which was also the most abnormal year of drought. In conclusion, Lorenz curve from a novel perspective is an available way for evaluating quantitatively the temporal distribution of precipitation and analyzing its causes, which provided scientific basis for the analysis of mechanism of natural disasters like drought and soil loss.

Keywords: Lorenz curve; Gini coefficient; Lorenz asymmetry coefficient; Mann-Kendall test