

# 基于信息熵的石羊河流域降雨时空变异性研究

董 闯<sup>1,2</sup>, 粟晓玲<sup>1</sup>

(1 西北农林科技大学 教育部旱区农业水土工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**[摘要]** **【目的】**应用信息熵研究石羊河流域的降雨时空变化,为合理开发该流域的水资源提供依据。**【方法】**用边际熵研究月、季和年时间序列的变化,用分配熵和强度熵分别研究降雨量和降雨日数的年内和年代(10年)分布,依据石羊河流域 8 个气象站 1959—2008 年的逐日降雨观测资料,对不同降雨时间序列的时空变异性进行分析。**【结果】**石羊河流域降雨在时间和空间上均存在变异性,降雨在时间上的变异性表现为年低于各季,季又低于相应各月;各季对年变异性的贡献以冬季最大,夏季最小;各月对季变异性贡献大的分别是春季 3 月、夏季 6 月、秋季 11 月、冬季 12 月;年际间降雨量变异性大的年份为 1966,1979,1984,1987 与 1993 年,降雨日数变异性大的年份为 1973,1976,1984,1987,2001 与 2007 年。在空间上,石羊河流域降雨量与降雨日数的变异性基本一致,均表现为流域东南部的变异性小于西北部。**【结论】**信息熵全面考虑了时空变化,可有效地解决降雨的时空变异问题。

**[关键词]** 石羊河流域;降雨量;时空变异;边际熵;强度熵;分配熵

**[中图分类号]** P333.1

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2011)01-0222-07

## An entropy-based investigation into the variability of precipitation in Shiyang River Basin

DONG Chuang<sup>1,2</sup>, SU Xiao-ling<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, MOE, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

**Abstract:** **【Objective】** Entropy was used to investigate the spatial and temporal variability of precipitation in Shiyang River Basin to provide a basis for rational development of water resources in the basin. **【Method】** Marginal entropy was used to investigate the variability of precipitation associated with monthly, seasonal and annual time series. Also, apportionment and intensity entropy were used to investigate the intra-annual and decadal distributions of monthly and annual precipitation amounts and numbers of rainy days within a year and decade respectively. Based on the data of daily precipitation from eight weather stations in the Shiyang River Basin from 1959 to 2008, an entropy-based theory spatial and temporal variability of precipitation time series were employed to investigate the basin. **【Result】** The results show that there is both spatial and temporal variability of precipitation in the Shiyang River Basin. The temporal variability of annual series seems to be less than that of individual seasonal series, and seasonal time series seems to be less than the corresponding month. The winter variability contributes more to the variability of annual time series, whereas summer contributes less to the annual variability. The months having high variability for different seasons are March in Spring, June in Summer, November in Autumn and December in Winter. The variability of precipitation amounts within a year is found to be high during the year of 1966, 1979, 1984,

\* [收稿日期] 2010-06-02

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50879071);水利部公益性行业科研专项(200801104);西北农林科技大学青年学术骨干支持计划项目

[作者简介] 董 闯(1985—),男,安徽萧县人,在读硕士,主要从事水文水资源研究。E-mail: dongchuang 507@163.com

[通信作者] 粟晓玲(1968—),女,四川开江人,教授,博士,主要从事水文干旱及水资源配置研究。E-mail: suxiaoling17@126.com

1987 and 1993, and the variability of rainy days within a year is found to be high during the year of 1973, 1976, 1984, 1987, 2001 and 2007. The spatial variability of precipitation amounts seems to be basically the same as the number of rainfall days. It increases from southeast to northwest of Shiyang River Basin. 【Conclusion】 Entropy considers the spatial and temporal variability of precipitation comprehensively, which can effectively solve the problem of spatial and temporal variability of precipitation.

**Key words:** Shiyang River Basin; precipitation; spatial and temporal variability; marginal entropy; intensity entropy; apportionment entropy

随着全球气候的变暖,水文循环也在发生变化<sup>[1]</sup>,这将对降雨、蒸发、温度、降雪及径流的数量和时空分布产生重要影响,使水灾的发生时间和强度发生变化<sup>[2]</sup>,如部分地区洪水频繁,部分地区可能大旱;也可能是某地区一段时间出现干旱而另一段时间又出现洪涝,这主要是降雨在时空分布上的不均所致。随着降雨的这种时空不均匀性的日益加剧,其对人们的生存和生活的不良影响越来越大,因此研究降雨的时空变化迫在眉睫<sup>[3]</sup>。

目前对降雨时空分布特性研究的主要手段是以随机统计学理论为基础的相关方法。关于降雨时间变化规律的研究,以时域和频率分析的时间序列分析方法与随机水文学为主,如降水集度法等<sup>[4]</sup>;而对降雨空间分布的主要研究手段有地统计学方法、经验正交函数分解法和分形理论、混沌理论等,其次还有对定性定量不确定性的转换如云模型的应用<sup>[5]</sup>。有关信息熵的理论方法及其应用,国内外均有较丰硕的成果,如极大熵原理、最小互熵原理、信息传递方法、模糊熵、熵权及复熵理论等<sup>[6]</sup>,信息熵的应用范围之广、研究前景之广阔,几乎涉及所有研究不确定性问题的科学领域<sup>[7]</sup>,这为信息熵用于降雨时空变化的不确定性研究提供了可能。

从水量平衡角度讲,降水是河西地区水源的惟一补给形式<sup>[8]</sup>,是流域水资源形成、演变规律研究的基础,分析其时空变化特征,有助于认识流域水循环规律,了解水资源特性<sup>[9]</sup>。本研究以河西内陆河流域的石羊河为例,应用信息熵理论研究其降雨的时空变异性,以期降雨时空变化的研究提供一种新途径,进而为该区水资源的合理开发提供依据。

## 1 研究方法

Shannon 在 1948 年提出了“信息熵”的概念,解决了对信息量的度量问题,随后 Singh 于 1997 年将熵运用于水文和水资源的研究<sup>[3]</sup>。Shannon 给出的熵的抽象计算公式为:

$$H(X) = - \sum_{k=1}^m p(x_k) \log_2 [p(x_k)]。 \quad (1)$$

式中: $H(X)$ 为熵值, $m$ 为间隔数, $x_k$ 为与 $k$ 对应的参数, $p(x_k)$ 为 $x_k$ 出现的概率。熵值 $H(X)$ 也称为单变量 $X$ 的边际熵。

熵是度量不确定性和无序性的一种方法,变量的不确定性越大,熵就越大,信息量也就越大。信息熵是信息论中用于度量信息量的一个概念。一个系统越是有序,信息熵就越低;反之,一个系统越是混乱,信息熵就越高。熵是概率分布不确定性估计的一种有效方法<sup>[10]</sup>。

### 1.1 降雨熵值估计

降雨时间序列的变异性可以用熵来度量,这种变异性可以从时间和空间两个尺度来描述。

1.1.1 边际熵(Marginal entropy, ME) 边际熵(ME)为一个具有概率分布 $P(X)$ 的随机变量 $X$ 的平均信息量,用于度量不确定性,一般用于描述单个时间序列的无序度,如年时间序列、季时间序列、月时间序列,可用公式(1)进行计算。

1.1.2 强度熵(Intensity entropy, IE) 强度熵(IE)用于估计各月的降雨强度。首先统计某年第 $i$ 月的降雨日数 $n_i$ ( $i=1, 2, 3, \dots, 12$ )和全年的降雨日数 $N = \sum_{i=1}^{12} n_i$ ,然后求概率 $p_i = n_i/N$ ,利用式(1)计算强度熵,其中 $m=12$ 。

1.1.3 分配熵(Apportionment entropy, AE) 分配熵(AE)用于度量年降雨量在各月分配的不均匀性。首先统计出某年第 $i$ 月的降雨量 $r_i$ ( $i=1, 2, 3, \dots, 12$ )和全年的降雨量 $R = \sum_{i=1}^{12} r_i$ ,然后求概率 $p_i = r_i/R$ ,用式(1)求分配熵(AE),其中 $m=12$ 。

1.1.4 年代分配熵(Dacadal apportionment entropy, DAE) 年代分配熵(DAE)用于度量 10 年间某降雨时间序列的无序度,该时间序列可以为年、季或月序列。DAE 既可以用来描述降雨量分布的无序度,也可用来描述降雨日数分布的无序度。若要描述年代降雨量分布的无序度,则需先统计第 $i$ 年的降雨量 $a_i$ ( $i=1, 2, 3, \dots, 10$ ),然后求出 10 年的总降雨量 $A = \sum_{i=1}^{10} a_i$ ,并求出概率 $p_i = a_i/A$ ,再用式(1)求



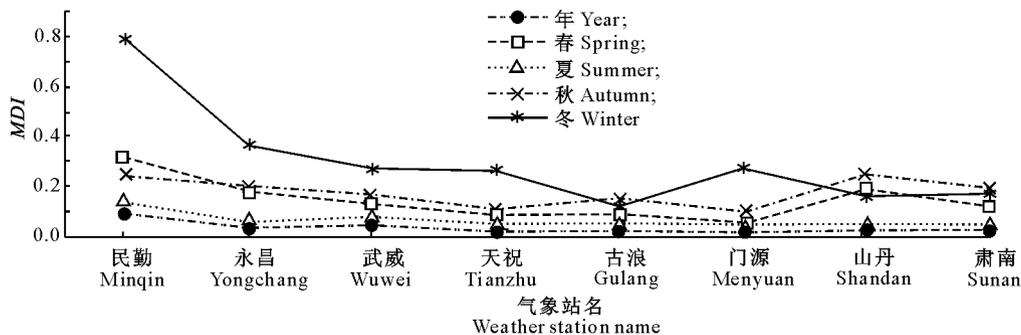


图 2 石羊河流域各气象站年季降雨序列边际无序指标(MDI)的比较

Fig. 2 Comparison of marginal disorder index(MDI) between annual time series and different seasons over different weather stations in Shiyang River Basin

3.2 石羊河流域降雨的月变异性

羊河流域 8 个气象站各季节及各月的边际无序指标

分析各月对其所属季节变异性的贡献,可得石

(MDI),结果如图 3 所示。

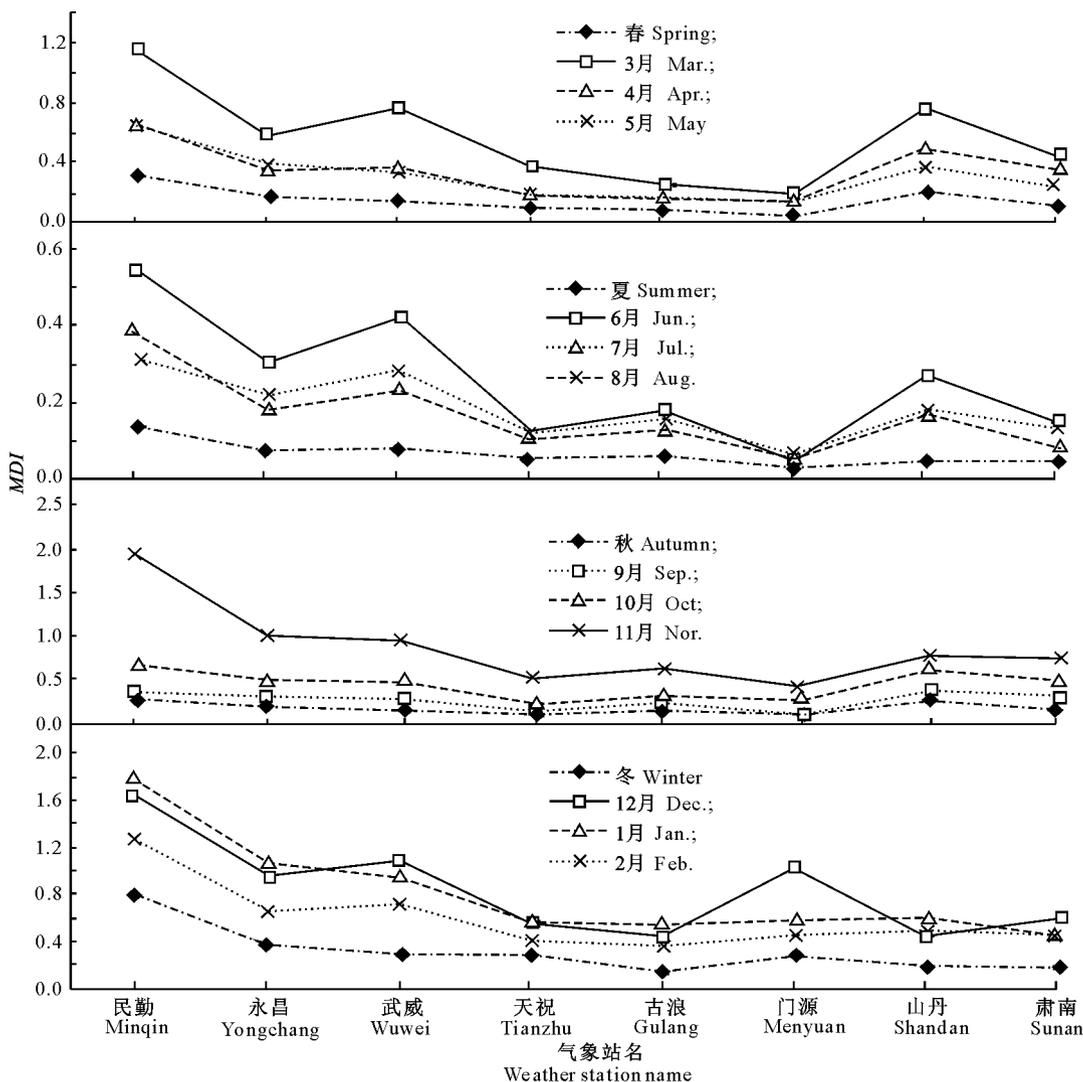


图 3 石羊河流域 8 个气象站春、夏、秋、冬各季及各月降雨序列边际无序指标(MDI)的比较

Fig. 3 Comparison of marginal disorder index (MDI) between precipitation of spring, summer, autumn, winter and individual months among different weather stations in Shiyang River Basin

从图 3 可以看出,8 个气象站春、夏、秋、冬季的 变异性小于其组成各月的变异性。大部分气象站春

季以 3 月份的变异性最大,夏季以 6 月份的变异性最大,秋季所有站均以 11 月的变异性最大,冬季以 12 月和 1 月份的变异性较为突出。所有气象站中变异性最大的是民勤,而民勤站降雨量在所有气象站中最小。

### 3.3 石羊河流域年降雨量分布的变异性

3.3.1 年降雨量分布在时间上的变异性 用分配无序指标(ADI)来度量年降雨量在不同月份分布的变异性,某月的 ADI 越大,那么一年中此月降雨量的变异性就越大。用每年所有站 ADI 的均值 MA-

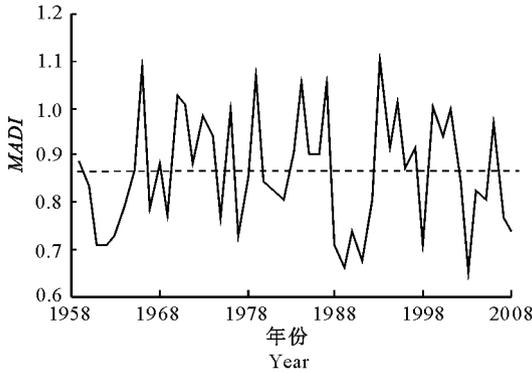


图 4 石羊河流域逐年降雨平均分配无序指标(MADI)的变化  
Fig. 4 Mean apportionment disorder index(MADI) of all stations over years in Shiyang River Basin

### 3.4 石羊河流域降雨日数分布的变异性

计算出逐年所有气象站和逐站所有年份的强度无序指标(IDI),然后用其均值即平均强度无序指

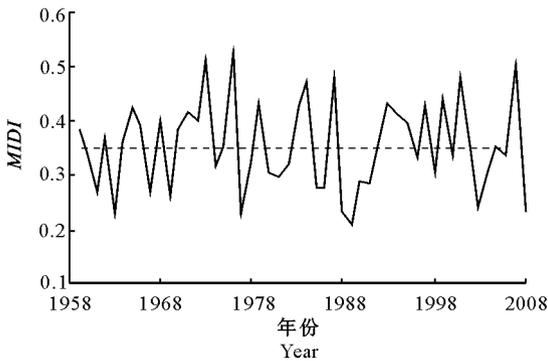


图 6 石羊河流域降雨日数逐年平均强度无序指标(MIDI)的变化

Fig. 6 Mean intensity disorder index(MIDI) of all year over stations in Shiyang River Basin

从图 6 可以看出,石羊河流域降雨日数分布变异性较高的年份分别为 1973,1976,1984,1987,

DI 表示这种变异性,可得石羊河流域 8 个气象站 1959—2008 年降雨量分布的 MADI(图 4)。从图 4 可以看出,石羊流域年降雨量分布变异性较高的年份分别为 1966,1979,1984,1987 和 1993 年。

3.3.2 年降雨量分布在空间上的变异性 用各站降雨量的多年分配无序指标的平均值(MADI)来表示年降雨量的空间变异性(图 5)。从图 5 可以看出,民勤、永昌、山丹与肃南站变异性较高,而古浪与门源站变异性较低,即流域年降雨量空间分布的变异性以东南部较低,而偏西和偏北部较高。

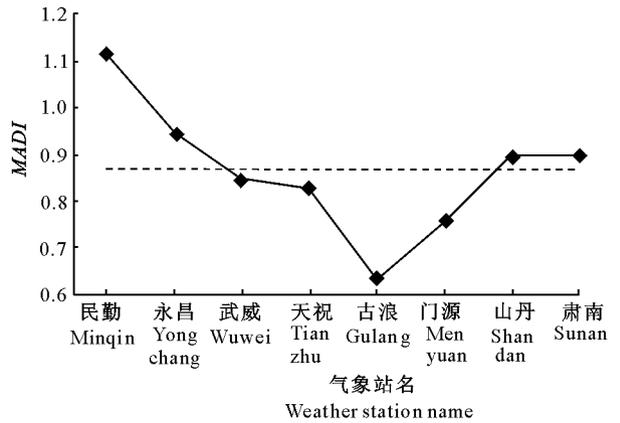


图 5 石羊河流域 8 个气象站降雨多年平均分配无序指标(MADI)的比较

Fig. 5 Mean apportionment disorder index(MADI) of all year among different weather stations in Shiyang River Basin  
标(MIDI)来表示降雨日数时空分布的变异性,其结果见图 6 和图 7。

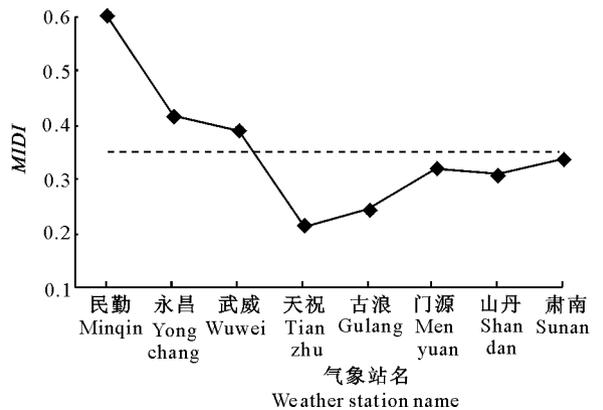


图 7 石羊河流域 8 个气象站降雨日数多年平均强度无序指标(MIDI)的比较

Fig. 7 Mean intensity disorder index(MIDI) of different weather stations averaged over years in Shiyang River Basin  
2001 和 2007 年。从图 7 可以看出,石羊河流域北部民勤、永昌、武威气象站降雨日数分布的变异性较

高,而东南部天祝和古浪两站的变异性较小。由此可见,在空间上,石羊河流域降雨日数与降雨量分布的变异性基本一致,即东南部变异性较低,偏西和偏北部变异性较高。

### 3.5 石羊河流域降雨年代的变异性

计算出不同年代石羊河流域所有气象站的年代分配无序指标 (*DADI*) 和年代强度无序指标 (*DI-DI*), 然后用其平均值即平均年代分配无序指标 (*MDADI*) 与平均年代强度无序指标 (*MDIDI*) 分别度量降雨量和降雨日数在年代上的变异性。将石羊

河流域降雨时间系列,即 1959—2008 年划分为 1959—1968、1969—1978、1979—1988、1989—1998 和 1999—2008 年 5 个年代,分别计算其 *MDADI* 与 *MDIDI*, 可得各年代不同时间序列的 *MDADI* 和 *MDIDI*, 结果如图 8,9 所示。从图 8,9 可以看出,降雨日数的年代变异性与降雨量的年代变异性一致,与其他时间序列相比,1—3 月和 11、12 月枯水季节的降雨量和降雨日数的年代变异性较高。1999—2008 年这 10 年 2 和 3 月份的变异性均高于其他年代,而 9—11 月的变异性均低于其他年代。

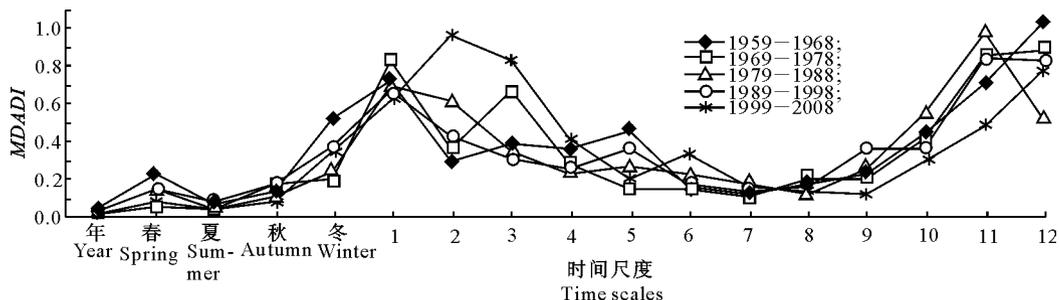


图 8 石羊河流域各年代不同时间尺度上 *MDADI* 的变化

Fig. 8 Mean decadal apportionment disorder index (*MDADI*) for different time scales over decades in Shiyang River Basin

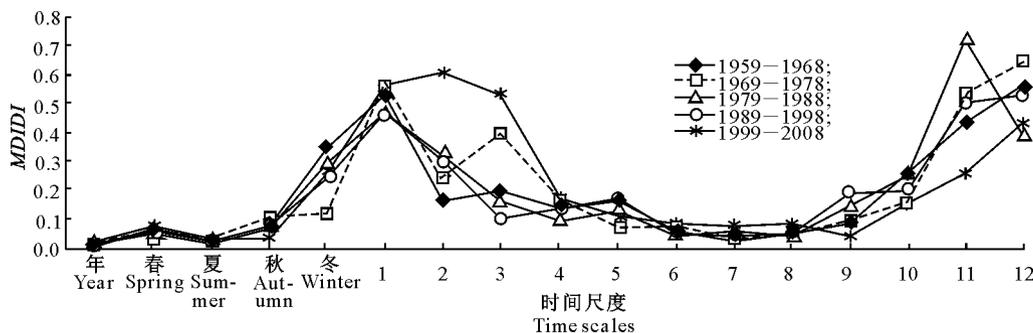


图 9 石羊河流域各年代不同时间尺度上 *MDIDI* 的变化

Fig. 9 Mean decadal intensity disorder index (*MDIDI*) for different time scales over defferent decades in Shiyang River Basin

### 3.6 Mann-Kendall 趋势性检验

利用 Mann-Kendall 无参检验研究石羊河流域降雨变异性的趋势变化,用各站计算得到的降雨年内分配无序指标 *ADI* 的时间序列来表示降雨分配的变异性,所得检验结果如表 1 所示。以  $\alpha=0.1$  为

标准时, Kendall 标准化变量 *U* 的临界检验值为  $\pm 1.282$ 。从表 1 数据可以看出,虽然各气象站变异性均有变化,但除天祝站降雨年内分配的变异性有显著减弱趋势外,其余各站均无显著变化。

表 1 石羊河流域各气象站分配熵指标变化趋势的 Mann-Kendall 检验

Table 1 Mann-Kendall test of apportionment entropy index trend over different weather stations in Shiyang River Basin

指标 Index	民勤 Minqin	永昌 Yongchang	武威 Wuwei	天祝 Tianzhu	古浪 Gulang	门源 Menyuan	山丹 Shandan	肃南 Sunan
<i>U</i>	0.460 1	0.777 9	-0.108 7	-2.149 8	0.058 6	-0.962	-0.911 8	-0.192 4
趋势 Trend	增加 Increase	增加 Increase	减少 Decrease	减少 Decrease	增加 Increase	减少 Decrease	减少 Decrease	减少 Decrease
显著性 Significance	无 No	无 No	无 No	显著 Notable	无 No	无 No	无 No	无 No

## 4 结 论

1) 熵理论可以用于研究降雨时空的变化特性,

可通过边际熵反映年、季、月不同时间序列降雨量的变化,用分配熵反映年内各月或年代内各年降雨分配的变化,用强度熵反映年内各月或年代内各年降

雨日数的变化。

2) 石羊河流域降雨量年序列变异性小于季序列, 而季序列变异性又小于月序列。不同季节对降雨量年变异性贡献不同, 与其他季节相比, 冬季的变异性最大, 夏季的变异性最小, 这与李洋等<sup>[9]</sup>对石羊河流域降水量的研究结论, 即“在 6—9 月份降水较多的季节  $C_V$  值小, 降水相对稳定; 在 1—5 月与 10—12 月份降水稀少的季节  $C_V$  值大, 降水稳定性差”相一致。季内各月对降雨量变异性的贡献也存在差别, 春季 3 月、夏季 6 月、秋季 11 月、冬季 12 月的变异性最为突出。不同季节与月份的降雨量空间变异性都不同, 但越是降雨稀少的地区(站), 其降雨量和降雨日数的变异性越大。不论是降雨量还是降雨日数的年代变异性, 均以夏季和 7 月份变异性较低, 而在其他时间尺度各年代降雨变异性差别较大, 在 1999—2008 年的 10 年中, 石羊河流域 2, 3 月份的降雨量和降雨日数的变异性明显较以前年代大。

3) 石羊河流域各站降雨年内分配的变异性除天祝站有显著减弱趋势外, 其余各站均无显著变化。

#### [参考文献]

- [1] Clark P U, Alley R B, Pollard D. Northern hemisphere ice-sheet influences on global climate change [J]. *Science*, 1999, 286: 1104-1111.
- [2] Milly P C D, Wetherald R T, Dunne K A, et al. Increasing risk of great floods in a changing climate [J]. *Nature*, 2002, 415: 514-517.
- [3] Mishra A K, Ozger M, Singh V P. An entropy-based investigation into the variability of precipitation [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 370: 139-154.
- [4] 徐利岗, 周宏飞, 梁川, 等. 中国北方荒漠区降水多时间尺度变异性研究 [J]. *水利学报*, 2009, 40(8): 1002-1011.  
Xu L G, Zhou H F, Liang C, et al. Multi-time scale variability of precipitation in the desert region of North China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(8): 1002-1011. (in Chinese)
- [5] 刘德地, 陈晓宏, 楼章华. 基于云模型的降雨时空分布特性分析 [J]. *水利学报*, 2009, 40(7): 850-857.  
Liu D D, Chen X H, Lou Z H. Analysis on characteristics of spatial-temporal precipitation distribution based on cloud model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(7): 850-857. (in Chinese)
- [6] 邱苑华. 管理决策与应用熵学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.  
Qiu Y H. Management decision and applied entropy [M]. Beijing: China Machine Press, 2002. (in Chinese)
- [7] 张继国. 降雨时空分布的信息熵研究 [D]. 南京: 河海大学, 2004.  
Zhang J G. Information entropy study on precipitation distribution in time and space [D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese)
- [8] 陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 等. 甘肃河西地区近 50 年气象和水文序列的变化趋势 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2002, 38(2): 163-170.  
Chen R S, Kang E S, Yang J P, et al. Variance tendency in the 50-year annual meteorological and hydrological series of Hexi region of Gansu Province [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2002, 38(2): 163-170. (in Chinese)
- [9] 李洋, 魏晓妹, 孙艳伟. 石羊河流域水文要素变化特征分析 [J]. *水文*, 2007, 27(3): 85-89.  
Li Y, Wei X M, Sun Y W. Analysis of the variety characteristics of hydrologic factors in Shiyang River Basin [J]. *Hydrology*, 2007, 27(3): 85-89. (in Chinese)
- [10] Kawachi T, Maruyama T, Singh V P. Rainfall entropy for delineation of water resources zones in Japan [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 246: 36-44.
- [11] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [12] 李玲萍, 杨永龙, 钱莉. 石羊河流域近 45 年气温和降雨特征分析 [J]. *干旱区研究*, 2008, 25(5): 705-710.  
Li L P, Yang Y L, Qian L. Analysis on the characteristics of temperature and precipitation in the Shiyang River Basin since recent 45 years [J]. *Arid Zone Research*, 2008, 25(5): 705-710. (in Chinese)