

万智巍, 蒋梅鑫, 洪祎君, 等. 2017. 基于 Markov 和 GM 模型的江西省近 550 年旱涝变化研究[J]. 气象与减灾研究, 40(3): 178-183.

Wan Zhiwei, Jiang Meixin, Hong Yijun, et al. 2017. Study on drought and flood variation in Jiangxi province over the past 550 years based on Markov and GM models[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 40(3): 178-183.

基于 Markov 和 GM 模型的江西省 近 550 年旱涝变化研究

万智巍¹, 蒋梅鑫¹, 洪祎君², 贾玉连¹

1. 江西师范大学地理与环境学院 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101

摘要: 基于 1467—2016 年江西省九江、南昌、吉安、上饶和赣州 5 个代表站旱涝等级数据, 利用 Markov 和 GM 模型, 研究了江西省近 550 a 旱涝变化规律, 并对未来旱涝发展趋势进行预测。结果表明: Markov 和 GM 模型可以较好地对江西省旱涝状况进行预测, 其中 Markov 模型预测的总体正确率为 80%; GM 模型预测值的均方根误差为 0.284, 平均误差率为 5.18%。江西省 5 个代表站都属于涝多于旱的类型, 在 1 级旱灾方面, 南昌站频率最低, 仅为 3.8%, 吉安站最高, 达 9.4%; 在 5 级涝灾方面, 九江站频率最高, 达 13.4%, 南昌站最低, 仅为 7.5%; 从 3 级正常年份的出现频率看, 南昌站频率最高, 达 48.3%, 吉安站最低, 为 35.2%。Markov 模型预测结果显示, 2017—2021 年江西省 5 个代表站 3 级正常年份出现的概率最大, 大部分为 0.3—0.5; GM 模型预测结果显示, 九江、上饶和赣州站将处于偏涝状态, 而南昌和吉安站的旱涝等级为 2.8—2.9, 属于正常偏旱状态。

关键词: 旱涝变化, Markov 模型, GM 模型, 江西省

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2017)03-0178-06

doi: 10.12013/qxyjzjy2017-028

Study on Drought and Flood Variation in Jiangxi Province over the Past 550 Years Based on Markov and GM Models

Wan Zhiwei¹, Jiang Meixin¹, Hong Yijun², Jia Yulian¹

1. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research Ministry of Education, School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Based on drought and flood data of Jiujiang, Nanchang, Ji'an, Shangrao and Ganzhou five representative stations in Jiangxi province from 1467 to 2016, the law and future trend of drought and flood were discussed by using Markov and Grey Models. Results indicated that the drought and flood grade can be predicted efficiently in Jiangxi province based on Markov and GM Models. The accuracy rate of predictions of Markov model can reach 80%. The root mean square error and the average er-

收稿日期: 2017-06-09; 修订日期: 2017-07-30.

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(编号: GJJ150305); 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室开放基金(编号: PK2015003); 江西省重大生态安全问题监控协同创新中心项目(编号: JXS-EW-00); 江西省自然科学基金(编号: 20161BAB213075); 江西师范大学博士启动基金(编号: 6902).

作者简介: 万智巍, 博士, 讲师, 主要从事全球变化与历史水文学研究, E-mail: wzw3392008@sina.com.

蒋梅鑫(通信作者), 教授, 主要从事可持续发展研究, E-mail: jiangmx610519@126.com.

ror percentage of predictions of GM model was 0.284 and 5.18%, respectively. In the first grade of drought, the lowest frequency was only 3.8% that occurred in Nanchang, while the highest was 9.4% that appeared in Ji'an. In the fifth grade of flood, the highest frequency was 13.4% that occurred in Jiujiang, while the lowest was only 7.5% that appeared in Nanchang. In the third grade of normal years, the highest frequency occurred in Nanchang can reach 48.3%, while the lowest was 35.2% that appeared in Ji'an. The probability of drought and flood in five representative stations in Jiangxi province was predicted in the next five years based on Markov model, and the results showed that the probability of occurrence of third grade(normal years) was the largest, most of which can reach 0.3–0.5. Based on GM model, Jiujiang, Shangrao and Ganzhou were predicted in a state of flood in next five years, and the drought and flood levels of Nanchang and Ji'an will be 2.8 to 2.9 or so, in a normal state or some kind of drought.

Key words: drought and flood variation; Markov model; Grey model; Jiangxi province

0 引言

干旱和洪涝是影响江西省的主要气象灾害,对经济社会发展特别是农业生产造成的影响极大(王保生等,2006)。随着全球气候变化的进一步加剧,极端气候水文事件时有发生(郑国光,2000;范垂仁等,2008)。因此对旱涝发生规律,特别是长时间尺度下的旱涝演变过程研究成为目前全球变化研究的热点之一(葛全胜等,2016)。以往在进行旱涝研究时,主要是利用器测的降水和水文数据进行旱涝变化特征的探讨(曹永强等,2015),而中国大部分地区自 1949 年才开始有了比较完善的气象水文记录,因此利用这种方法研究我国旱涝变化所涉及的时间长度往往只有 60 a 左右(李斌和李洁,2016)。我国有着丰富的历史文献记录,其中就包含了大量的旱涝灾害的记载(龚高法,1983;Zheng et al,2006)。很多学者通过量化旱涝史料,建立了完善的历史时期旱涝和干湿等级指数序列(张德二等,1997;Ge et al,2008)。通过对历史资料进行参数化和定量化,可以极大地延长旱涝序列,并从长时间尺度分析旱涝演变规律(朱记伟等,2016)。由于旱涝变化影响因素多、致灾机制复杂,属于离散随机变量序列,因此普通的统计分析方法难以发现其演变规律(李双成和郑度,2003)。

近年来,很多学者开始利用多元统计方法和复杂系统理论来进行旱涝灾害演化研究。如,俞炳启和胡洛林(1995)利用模糊均生函数进行区域旱涝预测;徐家良(1996)利用多元门限回归方法建立了长江下游地区夏季旱涝预测模型;王艳姣等(2004)基于 BP 和 Elman 神经网络进行了福建省汛期旱涝变化的研究。其中马尔科夫预测模型(Markov Model, MM)和灰色系统预测模型(Grey Model, GM)被认为是预测复杂系统时间序列的有效方法,并广泛应用于水文、降雨、旱涝灾害预测等研究(邓聚龙,

1985;Chun et al,2015)。文中,拟利用 Markov 模型结合江西省 5 个站点近 550 a 的旱涝等级数据进行长时间旱涝演变规律的研究,并利用 GM 模型的优势,相互比较验证未来一段时间江西省的旱涝灾害等级。

1 数据和方法

1.1 旱涝等级数据

文中选取的代表站包括九江、南昌、吉安、上饶和赣州,选取这 5 个站是考虑与《中国近五百年旱涝分布图集》(中央气象局,1981)中江西地区的站点一致。研究的时间范围是 1467—2016 年。其中 1470—2000 年的旱涝等级数据主要参考《中国近五百年旱涝分布图集》及其后续补充材料(张德二和刘传志,1993;张德二等,2003)。对于 1467—1469 年和 2001—2016 年这两个时间段的数据则分别利用《江西水旱灾害》《江西省气候史料》《江西省气象志》(江西省气象志编纂委员会,1997),以及江西省基本气象站地面气候资料月值数据集中的相关旱涝灾害史料和现代器测降水资料进行旱涝等级划分。另外,1470—1950 年江西省范围内的 5 个站点部分年份有缺值,这一部分数据同样利用史料中的旱涝记载进行等级划分。为了使得重建的旱涝等级序列与降水量序列的变化趋势保持一致性,文中将“旱、偏旱、正常、偏涝、涝”分别用 1—5 级表示,旱涝等级指数的数值越大代表同一时期的降水量越大。

1.2 Markov 模型

Markov 模型是一种基于历史数据预测事件发生概率的方法,其原理是根据系统目前的状态预测其未来各时期变动状况的概率(徐建华,2014)。由于很多地理、气象、水文事件的发展都只与前一个时期的状态有关而与过去的状态无关,即其状态的转移过程是无后效性的。因此,将从某一状态转移到其他状态的可能性定义为状态转移概率:

$$P(E_i \rightarrow E_j) = P(E_j | E_i) = p_{ij} \quad (1)$$

式中, E_i 和 E_j 表示两种旱涝状态; p_{ij} 表示从旱涝状态 E_i 转向 E_j 的概率。文中旱涝等级为 1—5 级, 即 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 和 E_5 , 其状态转移概率矩阵可以表示为:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{15} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{25} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{51} & p_{52} & \cdots & p_{55} \end{bmatrix} \quad (2)$$

当目前的旱涝状态为 E_i 时, 那么下一时刻其状态可能转变为 E_j ($j = 1, 2, 3, 4, 5$), 因此 p_{ij} 满足以下条件:

$$\begin{cases} 0 \leq p_{ij} \leq 1 & (i, j = 1, 2, 3, 4, 5) \\ \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 & (i = 1, 2, 3, 4, 5) \end{cases} \quad (3)$$

如果存在一个非零向量 $\alpha = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$, 满足以下条件:

$$\begin{cases} 0 \leq x_i \leq 1 \\ \sum_{i=1}^n x_i = 1 \\ \alpha P = \alpha \end{cases} \quad (4)$$

那么, α 即旱涝状态转移的稳定概率向量。

1.3 GM 模型

GM 模型是系统学的一个应用分支, 其原理是通过对比系统过去所表现出的不完全信息进行分析处理, 并建立微分方程来描述其客观规律(邓聚龙, 1985)。GM(1,1)模型是灰色系统预测的主要模型之一(刘贤赵等, 2009), 其主要步骤为:

1) 设原始数据序列为 $x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(N)\}$;

2) 计算其累加序列 $x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(N)\}$, 并按照 $x^{(1)}$ 序列建立微分方程模型:

$$\frac{dx}{dt} + ax = u \quad (5)$$

3) 计算式(5)所对应的时间响应函数:

$$x^{(1)}(t+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (6)$$

4) 求出参数 a 和 u , 按照模型进行递推, 得到预测的累加序列, 再进行累减得到预测值。

2 江西省旱涝变化特征

2.1 旱涝频率

基于第 1.1 节中所述方法, 构建江西省 5 个代

表站近 550 a 旱涝等级序列, 统计得到各站点旱涝发生频率(表 1)。江西省 5 个代表站近 550 a 的旱涝发生频率具有一定的空间分布差异。总体上看, 不同旱涝等级的发生频率大体属于正态分布, 但部分站点的某一旱涝等级出现频率略有差异。在 1 级旱灾方面, 南昌站频率最低, 仅为 3.8%, 说明南昌地区的旱灾发生频率较低; 吉安站最高, 达 9.4%, 说明吉安地区的旱灾发生频率较高。在 5 级涝灾方面, 九江站频率最高, 达 13.4%, 说明九江地区较易出现涝灾; 南昌站最低, 仅为 7.5%, 说明南昌站出现涝灾的频率在所有代表站中最低。从 3 级正常年份的出现频率看, 南昌站的频率最高, 达 48.3%, 这也说明了南昌地区在旱涝灾害发生较其他地区少; 吉安站频率最低, 为 35.2%, 说明吉安地区旱涝灾害发生比较频繁。

表 1 1467—2016 年江西省 5 个代表站各级旱涝发生频率
Table 1 The frequency of each drought and flood grade of the five stations in Jiangxi province from 1467 to 2016

站点	旱涝发生频率/%				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
九江	8.38	17.66	40.98	19.67	13.31
南昌	3.82	16.02	48.46	24.23	7.46
吉安	9.29	20.19	35.56	25.12	9.84
上饶	5.61	18.03	38.96	23.36	14.05
赣州	4.17	16.56	45.54	22.98	10.75

2.2 旱涝状态转移概率

利用第 1.2 节中所述方法, 计算江西省 5 个代表站的旱涝等级状态转移概率矩阵(表 2), 其中数值表示某种旱涝等级状态于次年向某种旱涝等级状态转移的概率, 如九江站旱涝等级初始状态为 1 级, 那么其次年旱涝等级为 1—5 级的概率分别为 0.022、0.283、0.370、0.196、0.130。通过旱涝等级状态转移概率矩阵表, 可以方便地对未来时期旱涝等级进行预测。

2.3 旱涝状态的稳定概率

经过无穷次状态转移之后得到的状态概率(即稳定概率), 它能反映长时间序列发展趋势。根据式(4)计算得到江西省 5 个代表站的旱涝等级稳定概率(表 3)。仅从旱或涝两个状态来看, 江西省 5 个代表站都属于涝多于旱的类型。其中, 上饶站涝和偏涝的概率总和最大, 为 0.374, 南昌站涝和偏涝的概率总和最小, 为 0.317, 说明赣东地区较易受到涝灾的威胁; 吉安站出现旱和偏旱的概率总和最大, 为 0.295, 说明赣中地区较易受到旱灾的威胁。

表 2 江西省 5 个代表站的旱涝等级状态转移概率矩阵
Table 2 The probability matrix of drought and flood grade state of the five stations in Jiangxi province

站点	初始等级	次年转移等级				
		1	2	3	4	5
九江	1	0.022	0.283	0.370	0.196	0.130
	2	0.092	0.235	0.357	0.235	0.082
	3	0.067	0.142	0.476	0.178	0.138
	4	0.121	0.187	0.336	0.234	0.121
	5	0.110	0.123	0.411	0.151	0.205
南昌	1	0.095	0.238	0.476	0.190	0.000
	2	0.045	0.202	0.438	0.225	0.090
	3	0.034	0.136	0.506	0.253	0.072
	4	0.038	0.165	0.474	0.263	0.060
	5	0.024	0.171	0.488	0.171	0.146
吉安	1	0.077	0.327	0.192	0.308	0.096
	2	0.126	0.261	0.360	0.189	0.063
	3	0.077	0.191	0.387	0.237	0.108
	4	0.080	0.116	0.391	0.283	0.130
	5	0.130	0.222	0.296	0.296	0.056
上饶	1	0.188	0.188	0.469	0.094	0.063
	2	0.071	0.303	0.313	0.182	0.131
	3	0.051	0.131	0.472	0.206	0.140
	4	0.024	0.150	0.378	0.291	0.157
	5	0.052	0.208	0.247	0.338	0.156
赣州	1	0.125	0.250	0.375	0.125	0.125
	2	0.033	0.154	0.462	0.220	0.132
	3	0.032	0.156	0.512	0.212	0.088
	4	0.032	0.168	0.376	0.288	0.136
	5	0.085	0.186	0.407	0.237	0.085

3 模型检验与预测结果

3.1 模型检验

Markov 模型可以给出预测年份各旱涝等级的

表 3 江西省 5 个代表站各旱涝等级发生稳定概率

Table 3 Stability probability of each drought and flood grade of the five stations in Jiangxi

站名	旱涝发生概率/%						
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	1 级+2 级	4 级+5 级
九江	0.084	0.177	0.410	0.197	0.133	0.260	0.330
南昌	0.038	0.160	0.485	0.242	0.075	0.198	0.317
吉安	0.093	0.202	0.356	0.251	0.098	0.295	0.350
上饶	0.056	0.180	0.390	0.234	0.140	0.236	0.374
赣州	0.042	0.166	0.455	0.230	0.107	0.207	0.337

注:1 级+2 级表示旱和偏旱的概率总和;4 级+5 级表示偏涝和涝的概率总和。

表 4 2011—2016 年江西省 Markov 和 GM 模型旱涝预测值与实际旱涝等级对比

Table 4 Comparison of the prediction of Markov and GM model with the actual grade of drought and flood from 2011 to 2016

站名	旱涝等级					
	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
九江	2/-/2.106	4+/4.109	2-/2.112	4/*/4.115	4+/4.118	4+/3.821
南昌	2/*/1.893	4+/3.889	2/*/1.884	4+/3.880	3/0/2.875	3/0/2.871
吉安	1/-/0.937	4+/3.967	3/0/3.965	4+/4.963	3/0/2.961	3/0/2.959
上饶	2/*/1.953	4+/3.952	1/0*/0.951	4+/3.949	5+/4.615	4+/3.947
赣州	2-/1.951	4+/3.948	2/*/1.946	2-/1.914	5+/4.542	4+/3.940

注:数值分别表示实际旱涝等级/Markov 模型预测结果/GM 模型预测结果,其中“-”表示偏旱,“+”表示偏涝,“0”表示正常,“*”表示预测值与旱涝等级不符。

发生概率,考虑到该模型是根据历史上各旱涝等级出现的概率进行预测的,而历史数据表明 3 级正常年份出现的次数在 5 个站中都是最多的。为了更好地对未来旱和涝这两个情形进行预测,文中提出将 1 级(旱)和 2 级(偏旱)概率合并作为旱年出现的概率,5 级(涝)和 4 级(偏涝)合并作为涝年出现的概率,再比较旱涝概率的大小作为当年是偏旱还是偏涝的预测值。

对比分析 2011—2016 年旱涝等级值与 Markov 模型和 GM 模型的预测结果(表 4)可以发现,Markov 模型的预测结果与实际的旱涝等级有一定的差异,总体正确率达 80%,其中吉安的正确率为 100%,其余站的正确率为 67%—83%。GM 模型的预测值与实际旱涝等级之间的差别较小,其均方根误差为 0.284,平均误差率为 5.18%。由此可见,Markov 模型和 GM 模型的预测效果较好,可用来对江西省 5 个站的未来旱涝情况进行预测。

3.2 Markov 预测结果

利用 Markov 模型可以对未来的旱涝状态进行概率预测,通过计算可以得出江西省 5 个代表站 2017—2021 年的旱涝等级发生概率(表 5)。分析预测结果可知,各代表站未来 5 a 各旱涝等级的出现概率是不一致的,其中 3 级(正常)出现的概率最大,大部分数值为 0.3—0.5,并且 5 个代表站都是发生洪涝的概率大于干旱的概率。

3.3 GM 预测结果

为了进一步验证 Markov 模型的预测结果,利

表5 2017—2021年江西省5个代表站旱涝等级发生概率预测

Table 5 Probability prediction of drought and flood grade of the five stations in Jiangxi province from 2017 to 2021

站点	初始等级	旱涝发生概率				
		2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
九江	1	0.121 5	0.083 9	0.084 1	0.083 9	0.083 8
	2	0.186 9	0.184 7	0.177 6	0.176 8	0.176 6
	3	0.336 4	0.400 2	0.408 5	0.409 6	0.409 8
	4	0.233 6	0.200 3	0.197 4	0.196 8	0.196 7
	5	0.121 5	0.130 8	0.132 4	0.132 9	0.133 0
南昌	1	0.034 0	0.037 8	0.038 2	0.038 2	0.038 2
	2	0.135 8	0.158 3	0.160 0	0.160 1	0.160 2
	3	0.505 7	0.486 1	0.484 8	0.484 7	0.484 6
	4	0.252 8	0.243 6	0.242 5	0.242 3	0.242 3
	5	0.071 7	0.074 2	0.074 6	0.074 6	0.074 6
吉安	1	0.077 3	0.092 8	0.092 8	0.092 9	0.092 9
	2	0.190 7	0.200 4	0.201 9	0.201 9	0.201 9
	3	0.386 6	0.357 9	0.355 6	0.355 6	0.355 6
	4	0.237 1	0.250 6	0.251 3	0.251 2	0.251 2
	5	0.108 2	0.098 3	0.098 5	0.098 4	0.098 4
上饶	1	0.023 6	0.049 5	0.054 8	0.055 8	0.056 1
	2	0.149 6	0.175 5	0.179 6	0.180 2	0.180 2
	3	0.378 0	0.385 3	0.388 3	0.389 3	0.389 5
	4	0.291 3	0.245 2	0.236 0	0.234 1	0.233 7
	5	0.157 5	0.144 5	0.141 3	0.140 6	0.140 5
赣州	1	0.032 0	0.042 3	0.041 9	0.041 7	0.041 7
	2	0.168 0	0.166 2	0.165 8	0.165 6	0.165 6
	3	0.376 0	0.445 7	0.454 2	0.455 2	0.455 3
	4	0.288 0	0.235 9	0.230 3	0.229 9	0.229 8
	5	0.136 0	0.109 9	0.107 8	0.107 5	0.107 5

用GM模型基于江西省近550a的旱涝序列进行2017—2021年旱涝状况预测(表6)。分析表6可知,未来5a九江、上饶和赣州站将处于偏涝的状态,而南昌和吉安站的旱涝等级为2.8—2.9,属于正常偏旱的状态,这也与赣中地区旱灾的发生频率较江西其他地区高的特征相一致。

表6 2017—2021年江西省5个代表站旱涝等级预测
Table 6 Prediction of drought and flood grade of the five stations in Jiangxi province from 2017 to 2021

站点	旱涝等级				
	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
九江	3.361 5	3.369 4	3.377 3	3.385 2	3.393 2
南昌	2.900 8	2.896 8	2.892 8	2.888 8	2.884 8
吉安	2.992 9	2.991 4	2.989 8	2.988 3	2.986 8
上饶	3.345 4	3.344 1	3.342 8	3.341 6	3.340 3
赣州	3.337 3	3.335 1	3.332 9	3.330 7	3.328 5

综合Markov和GM模型的预测结果可以发现,Markov模型可以根据旱涝转移概率矩阵给出各代表站未来不同旱涝等级的发生概率,GM模型

可以给出具体的旱涝等级预测值。因此,可以利用这两种模型,在对未来发生不同等级旱涝概率预测的基础上,结合旱涝等级预测值进行综合判断。

4 小结

通过对1467—2016年江西省九江、南昌、吉安、上饶和赣州5个代表站旱涝等级数据的研究,利用Markov和GM模型对江西省旱涝变化进行预测,得到以下结论:

1) Markov和GM模型均可以较好地对江西省的旱涝状况进行预测。通过与2011—2016年实际旱涝等级数据的对比检验发现,Markov模型预测的总体正确率为80%,GM模型预测值的均方根误差为0.284,平均误差百分率为5.18%。

2) 江西省近550a来的旱涝发生频率具有一定的空间分布差异。在1级旱灾方面,南昌站频率最低,仅为3.8%,吉安站最高,为9.4%;在5级涝灾方面,九江站频率最高,为13.4%,南昌站最低,仅为7.5%;3级正常年份的频率中,南昌站最高,达48.3%,吉安站最低,为35.2%。

3) 基于Markov模型得到了江西省代表站的旱涝等级状态转移的稳定概率,发现江西省代表站都属于涝多于旱的类型。其中上饶站涝和偏涝的概率总和最高,为0.374;南昌站涝和偏涝的概率总和最低,为0.317;吉安站旱和偏旱的概率总和最高,为0.295,这说明赣中地区较易受到旱灾的威胁。

4) 通过Markov模型对未来5a江西省5个代表站旱涝等级概率的预测结果表明,3级正常年出现的概率最大,大部分值为0.3—0.5;GM模型的旱涝等级预测结果表明,未来5a九江、上饶和赣州站将处于偏涝的状态,而南昌和吉安两站的旱涝等级为2.8—2.9,属于正常偏旱的状态。

参考文献(References)

- 曹永强,曹阳,徐丹. 2015. 1961—2010年黄淮海流域旱涝时空变化特征[J]. 资源科学, 37(10):2068-2077. Cao Y Q, Cao Y, Xu D. 2015. Temporal and spatial variation in drought and floods in the Huang-Huai-Hai River Basin from 1961 to 2010[J]. Resour Sci, 37(10):2068-2077. (in Chinese)
- Chun S, Kim Y, Kwon H. 2015. Drought frequency analysis using hidden markov chain model and bivariate copula function[J]. J Korea Water Resour Assoc, 48(12):969-979.
- 邓聚龙. 1985. 灰色系统[M]. 北京:国防工业出版社:1-36. Deng J L. 1985. Gray System[M]. Beijing: Defense Industry Press:1-36. (in Chinese)
- 范垂仁,夏军,张利平,等. 2008. 中国水旱灾害长期预报[M].北京:

- 中国水利水电出版社:23-71. Fan C R, Xia J, Z LP, et al. 2008. Long term forecast of flood and drought in China[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press:23-71. (in Chinese)
- Ge Q S, Guo X F, Zheng J Y, et al. 2008. Meiyu in the middle and lower reaches of the Yangtze River since 1736[J]. *Sci Bull*, 53(1):107-114.
- 葛全胜,刘路路,郑景云,等. 2016. 过去千年太阳活动异常期的中国东部旱涝格局[J]. *地理学报*, 71(5):707-717. Ge Q S, Liu L L, Zheng J Y, et al. 2016. Spatial patterns of drought/flood over eastern China in the periods of anomalous solar activity during the past millennium[J]. *Acta Geogr Sin*, 71(5):707-717. (in Chinese)
- 龚高法. 1983. 历史时期气候变化研究方法[M].北京:科学出版社:56-132. Gong G F. 1983. History of climate change research methods[M]. Beijing:Science Press:56-132. (in Chinese)
- 李斌,李洁. 2016. 基于 SPEI 的鄱阳湖流域旱涝特征分析[J]. *水资源研究*, 5(5):488-494. Li B, Li J. 2016. Analysis on drought and waterlogging characteristics in the Poyanghu Basin based on SPEI[J]. *J Water Resour Res*, 5(5):488-494. (in Chinese)
- 李双成,郑度. 2003. 人工神经网络模型在地学研究中的应用进展[J]. *地球科学进展*, 18(1):68-76. Li S S, Zheng D. 2003. Applications of artificial neural networks to geosciences: Review and prospect[J]. *Adv Earth Sci*, 18(1):68-76. (in Chinese)
- 刘贤赵,张安定,李嘉竹. 2009. 地理学数学方法[M].北京:科学出版社:167-185. Liu X Z, Zhang A D, Li J Z. Geography mathematical methods[M]. Beijing: Science Press:167-185. (in Chinese)
- 江西省气象志编纂委员会. 1997. 江西省气象志[M].北京:方志出版社:1-354. Jiangxi Province meteorological chronicles editorial committee. 1997. Jiangxi Province meteorological Chronicles [M]. Beijing: Local Chronicles Press:1-354. (in Chinese)
- 王保生,刘文英,黄淑娥. 2006. 江西省旱涝灾害风险评估与农业可持续发展[J]. *气象与减灾研究*, 29(2):43-47. Wang B S, Liu W Y, Huang S E. 2006. Risk evaluation of drought and flood in Jiangxi and agricultural sustainable development [J]. *Meteor Disaster Reduction Res*, 29(2):43-47. (in Chinese)
- 王艳姣,邓自旺,王耀庭,等. 2004. 基于 BP 和 Elman 神经网络的福建省汛期旱涝预测模型[J]. *大气科学学报*, 27(6):776-783. Wang Y J, Deng Z W, Wang Y T, et al. 2004. Forecast models for Fujian rainy season drought/flood based on BP and Elman neural networks[J]. *Trans Atmos Sci*, 27(6):776-783. (in Chinese)
- 徐家良. 1996. 用多元门限回归模型作区域夏季旱涝预测[J]. *气象科学*, 16(4):391-395. Xu J L. 1996. Regional prediction of summer flood/drought with multivariate threshold regression model[J]. *Scientia Meteor Sinica*, 16(4):391-395. (in Chinese)
- 徐建华. 2014. 计量地理学[M].北京:高等教育出版社:1-189. Xu J H. 2014. Quantitative methods in geography[M]. Beijing: Higher Education Press:1-189. (in Chinese)
- 俞炳启,胡洛林. 1995. 用模糊均生函数作区域夏季旱涝预测[J]. *气象*, 21(12):32-34. Yu B Q, Hu L L. 1995. Regional prediction of summer floods/droughts with fuzzy mean generating function model[J]. *Meteor Mon*, 21(12):32-34. (in Chinese)
- 张德二,李小泉,梁有叶. 2003. 《中国近五百年旱涝分布图集》的再续补(1993—2000年)[J]. *应用气象学报*, 14(3):379-384. Zhang D R, Li X Q, Liang Y Y. 2003. Second supplement to the map of drought and flood in China in recent five hundred years(1993-2000)[J]. *J Appl Meteor Sci*, 14(3):379-384. (in Chinese)
- 张德二,刘传志. 1993. 《中国近五百年旱涝分布图集》续补(1980—1992年)[J]. *气象*, 19(11):41-45. Zhang D E, Liu C Z. 1993. Supplement to the map of drought and flood in China in recent five hundred years (1980-1992)[J]. *Meteor Mon*, 19(11):41-45. (in Chinese)
- 张德二,刘传志,江剑民. 1997. 中国东部 6 区域近 1000 年干湿序列的重建和气候跃变分析[J]. *第四纪研究*, 17(1):1-11. Zhang D E, Liu C Z, Jiang J M. 1997. Reconstruction of six regional dry/wet series and their abrupt changes during the last 1000 years in east China[J]. *Quat Sci*, 17(1):1-11. (in Chinese)
- 郑国光. 2000. 国际防灾减灾面临的一些问题和我国气象防灾减灾工作的基本思路[J]. *气象与减灾研究*, 23(4):1-5. Zheng G G. 2000. Some problems of international disaster prevention and mitigation and the basic thinking of meteorological disaster prevention and mitigation work in China[J]. *Meteor Disaster Reduction Res*, 23(4):1-5. (in Chinese)
- Zheng J, Wang W C, Ge Q, et al. 2006. Precipitation variability and extreme events in eastern china during the past 1500 years[J]. *Terr Atmos Ocean*, 17(3):579-592.
- 朱记伟,徐小钰,刘家宏,等. 2016. 渭河平原 2205 年旱涝灾害发生规律及演变特征分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 44(10):199-206. Zhu Ji W, Xu X Y, Liu J H, et al. 2016. Occurrence regularity and evolution characteristics of droughts and floods in Weihe plain during past 2205 years[J]. *J Northwest A&F Univ: Nat Sci Ed*, 44(10):199-206. (in Chinese)
- 中央气象局. 1981. 中国近五百年旱涝分布图集[M].北京:地图出版社:1-260. Central Meteorological Bureau. 1981. The map of drought and flood in China in recent five hundred years[M]. Beijing: Map Press:1-260. (in Chinese)