

叶天舒. 辽宁省主要流域降水特征及丰枯遭遇分析[J]. 人民珠江, DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

辽宁省主要流域降水特征及丰枯遭遇分析

叶天舒

(辽宁省河库管理服务中心(辽宁省水文局), 辽宁 沈阳 110003)

摘要:采用线性倾向估计、小波分析等方法,分析辽宁省辽河流域、浑太河流域等6个主要流域降水量的趋势性、周期性特征,并采用Copula函数对任意两主要流域年降水丰枯遭遇特征进行定量识别。主要结论:除辽河、大小凌河流域外,辽宁省各流域年降水量均呈下降趋势,东部地区YLJ流域及辽东沿海诸河下降幅度最为明显(-0.545、-0.753 mm/a)。各流域年降水量呈现4~5、9~14、30~35 a 3个周期。辽宁省任意2主要流域降水丰枯遭遇特征呈现明显地域差异性,相邻流域丰枯同步率较高,YLJ流域-辽东沿海流域丰枯同步率达0.72;东部地区流域(YLJ流域、辽东沿海流域)与西部地区流域(大小凌河流域)降水丰枯异步性较大。研究结果可为辽宁省水网建设规划提供依据,也可为“东水济辽”三线调水方案提供支撑。

关键词:降水特征;趋势性;周期性;丰枯遭遇;Copula函数;辽宁省

中图分类号:TV121+.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-10

受气候条件及下垫面共同影响,中国水资源在时空分布上极不均衡,已成为制约区域经济发展的重要瓶颈。在此背景下,南水北调、引江济淮、珠三角水资源配置等跨流域调水工程的建设运用,通过人为手段进行水资源的空间调配,逐渐成为有效缓解水资源时空分布不均的重要手段^[1-2]。降水是陆地水资源的重要来源,分析水源区、受水区降水的特征及丰枯遭遇概率,不仅是水网建设规划的重要支撑,也是调水决策的重要依据。辽宁省水网历经多年建设,已初步形成“东西调配、南北互济、河库联通、联合调度”的格局,构建了横跨浑江、辽河、浑河、大凌河、碧流河等流域的北、中、南三线“东水济辽”调水工程^[3-7]。辛云峰等^[8]表示,应明确调水工程的主、客水丰枯异步性,充分发挥调水工程的水资源再配置作用;程岩^[9]论证了鸭绿江(以下代称YLJ)流域东水西调工程建设的合理性;韩春雷^[10]分析了大伙房水库调水工程建设成效,表明其明显改善辽宁省中部城市的水资源短缺问题;李智慧^[11]分

别从自然地理、工程及水文三方面分析了辽宁省中部、南部、东部和西北部适合跨流域调水的条件。以上水资源调配研究仅针对特定流域的特定调水工程,或以行政区划为范围开展,而实际水资源的流动是以流域范围为界限的,目前还缺乏对辽宁省全范围内以流域为对象的研究。本文旨在明确辽宁省各主要流域降水特征及流域间的降水量丰、平、枯遭遇特征,有助于进一步完善辽宁省水网布局,同时也为水库群跨流域调水决策的制定提供重要依据。

本文基于相关研究成果,将辽宁省划分为辽河流域、浑太河流域、大小凌河流域、鸭绿江流域、辽西沿海诸河、辽东沿海诸河6个主要流域(片区),采用线性趋势法、小波分析法对各流域1956—2023年降水系列的趋势性、周期性进行分析,并采用Copula函数法,分析不同流域年降水量的丰枯遭遇特征,以为防洪减灾、水资源优化配置、水网建设规划提供技术支撑。

基金项目:国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFC3213000)

收稿日期:2025-12-11 **修回日期:**2026-01-21

作者简介:叶天舒(1989-),女,硕士研究生,高级工程师,主要从事水文情报预报及气象成因分析等工作。E-mail:836757024@qq.com

1 资料与方法

1.1 资料来源

辽宁省河网密布,集水面积 10 km² 以上河流共 3 565 条^[6],本文结合河流空间位置、水文区划,并参照相关研究^[12-14],将辽宁省划分为辽河流域、浑太河流域、大小凌河流域、YLJ 流域、辽西沿海诸河、辽东

沿海诸河 6 个主要流域(片区)。基于辽宁省基础资料数据库,考虑资料序列连续性、代表性,选取 1971—2023 年(逐日资料,缺测日降水量利用相邻日期降水量进行线性插补)合计 53 a 资料序列完整的 407 处雨量站作为依据站,计算各流域 1956—2023 年面雨量系列,建立本研究的基础数据集。流域划分及站点分布见图 1

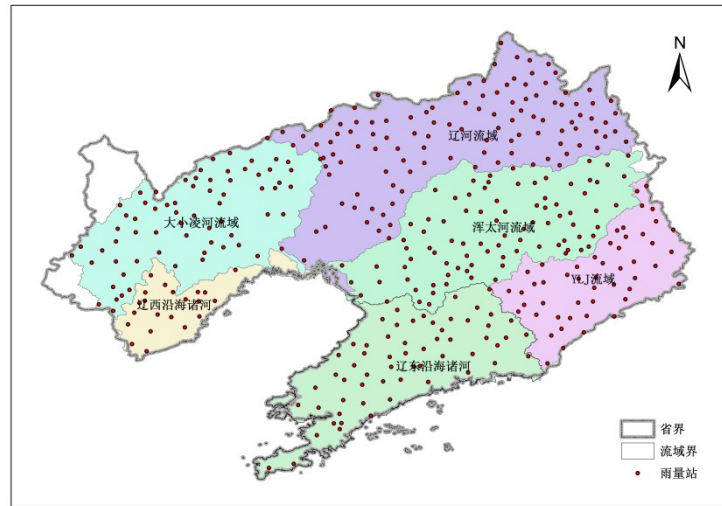


图 1 辽宁省主要流域及雨量站分布

Fig. 1 Map of major river basins and distribution of precipitation stations in Liaoning Province

1.2 研究方法

1.2.1 趋势性、周期性分析

采用线性倾向估计法、小波分析法,分析辽宁省主要流域年降水量的趋势性及周期性特征。在此基础上,采用皮尔逊相关系数,对各流域年降水量的相关性进行初步分析。

a) 线性倾向估计法是对各流域年降水系列进行线性拟合,判定其整体变化趋势。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon \quad (1)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{X} \quad (3)$$

式中, n 为样本数量; \bar{X} 为 X 的样本均值; \bar{Y} 为 Y 的样本均值; β_0 为截距; β_1 反映了年降水量变化的趋势性。

b) 小波分析法是一种时频分析方法,通过将序列分解为一系列小波的叠加,能够同时提供时域和频域的信息。该方法具有时频局部化及多尺度分解的能力,广泛应用于水文领域中,用于处理水文时间序列中普遍存在的非平稳性、多时间尺度变化。

1.2.2 Copula 函数构建

降水丰枯遭遇分析实质是进行水文要素多维联合分布的求解及分析,常用方法主要包括统计分析法、Moran 法、Fei 法及 Copula 函数法等^[15]。Copula 函数由于边缘分布灵活,分析精度高,在多维水文系列丰枯同异步分析中应用较广^[2,16-25],即可将任意 n 个($n \geq 2$) 随机变量的边缘分布相融合,建立多维联合概率分布模型。因此,本研究采用 Copula 函数分析辽宁省 6 个主要流域中任意两个流域年降水量的丰枯遭遇特征。

常用的 Copula 函数包括阿基米德族、椭圆族、二次族等。其中,阿基米德族 Copula 函数对变量之间的非线性相关性捕捉较好,在水文领域应用较多。研究选用 5 种常用的阿基米德 Copula 函数作为备选,其函数表达式如下:

Clayton Copula:

$$C(u, v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1, 0)^{-1/\theta} \quad (4)$$

Gumbel Copula:

$$C(u, v) = \exp\left(-\left[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta\right]^{1/\theta}\right) \quad (5)$$

Frank Copula:

$$C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \ln\left(1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1}\right) \quad (6)$$

Joe Copula:

$$C(u, v) = 1 - \left[(1 - u)^\theta + (1 - v)^\theta - (1 - u)^\theta(1 - v)^\theta\right]^{1/\theta} \quad (7)$$

AMH Copula:

$$C(u, v) = \frac{uv}{1 - \theta(1 - u)(1 - v)} \quad (8)$$

式中, u, v 分别为两个变量的最优边缘分布函数; θ 为 Copula 函数参数。

因此,如需构造 Copula 函数,首先要确定不同变量的最优边缘分布函数。选择在水文频率分析中应用较多的正态分布(Normal)、伽马分布(Gamma)、对数正态分布(Log-normal)、威布尔分布(Weibull)、广义极值分布(Gev)5 种频率分布作为备选边缘分布,分别对辽宁省 6 个主要流域 1956—2023 年降水量系列进行拟合。各分布概率密度函数如下:

正态分布(Normal):

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

伽马分布(Gamma):

$$f(x|k, \theta) = \frac{1}{\Gamma(k)\theta^k} x^{k-1} e^{-\frac{x}{\theta}} \quad (10)$$

对数正态分布(Log-normal):

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

威布尔分布(Weibull):

$$f(x|\lambda, k) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (12)$$

广义极值分布(Gev):

$$f(x|\mu, \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi} - 1} e^{-\left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{1}{\xi}}} \quad (13)$$

以上计算了边缘分布函数及多种 Copula 函数,究竟哪个是最优的,需要进行拟合优度分析。本文采用 Kolmogorov-Smirnov(K-S)拟合检验法方法(D 统计量越小越优),并结合赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC, 越小越优),选择最优边缘分布函数及最适宜的 Copula 函数。

综合以上内容,构造 Copula 函数步骤如下:计算单个变量的不同边缘分布函数,并通过拟合优度分析确定拟合效果最好的边缘分布;计算任意 2 个变量的不同 Copula 函数及其参数;进行不同 Copula 函数的拟合优度分析,确定最优 Copula 函数。

2 流域年降水特征

以 1956—2023 年辽宁省主要流域年降水量系列为样本,采用线性倾向估计确定辽宁省各主要流域整体变化趋势,分析结果见表 1。由表 1 可知,除辽河流域、大小凌河流域外,辽宁省主要流域年降水量均呈下降趋势。其中东部地区 YLJ 流域及辽东沿海诸河下降幅度最为明显(分别为 -0.545、-0.753 mm/a);辽河流域、大小凌河流域近年降水量较大,整体呈现上升趋势(分别为 0.561、0.022 mm/a)。

依据小波分析法对辽宁省各主要流域年降水量的周期性特征进行分析,以辽河流域为例,小波实部图及小波方差图见图 2。由图 2 可知,辽河流域年降水量第一主周期为 35~36 a,第二主周期为 15~16 a(图 2b);目前在这两个主要周期上均处于丰水期(图 2a),这也是辽河流域年降水量系列呈现增加趋势的原因。其余各流域周期性特征见表 2。由表 2 可知,辽宁省各主要流域整体呈现 3 个周期:4~5、9~14、30~35 a。其中,辽河流域以 35 a 长周期最为显著;浑太子河流域、大小凌河流域、YLJ 流域

表 1 辽宁省主要流域年降水量线性趋势

Tab. 1 Linear trend of annual precipitation in major river basins in Liaoning Province

序号	流域	多年平均降水量/mm	线性趋势 (mm·a ⁻¹)
1	辽河流域	564.6	0.561
2	浑太河流域	712.5	-0.004
3	大小凌河流域	480.0	0.022
4	YLJ流域	—	-0.545
5	辽西沿海诸河	573.7	-0.093
6	辽东沿海诸河	734.5	-0.753

注:YLJ为界河,其多年平均降水量隐藏。

以9~14 a周期最为显著;辽西沿海诸河、辽东沿海诸河以4~5 a周期最为显著。

表 2 辽宁省主要流域周期性特征

Tab. 2 Periodic characteristics of major river basins in Liaoning Province

序号	流域	第1主周期/a	第2主周期/a
1	辽河流域	35	15
2	浑太河流域	12	35
3	大小凌河流域	9	30
4	YLJ流域	13	35
5	辽西沿海诸河	4	12
6	辽东沿海诸河	5	14

3 主要流域降水丰枯遭遇分析

3.1 最优边缘函数确定

在构造最优 Copula 函数前,首先要确定变量的最优边缘函数,利用 1.2 部分的 5 种频率分布作为备选边缘分布,计算 D 值及 AIC 值进行拟合优度分析,见表 3。

由表 3 可知,辽河流域、大小凌河流域、辽西沿海诸河年降水量最优边缘分布为伽马分布(Gamma);浑太河流域、YLJ 流域年降水量最优边缘分布为广义极值分布(GEV);辽东沿海诸河年降水量最优边缘分布为对数正态分布(Log-normal)。确定最优边缘分布后,进行 Copula 函数的优选。

3.2 最优 Copula 函数确定

对辽宁省 6 个主要流域进行任意 2 个主要流域的 Copula 函数计算,共计 15 种组合,以辽河流域-浑太河流域为例,5 种二维 Copula 函数 D 值及 AIC 值见表 4。

由表 4 可知,对于辽河流域-浑太河流域, Frank Copula 函数拟合的 D 统计量(0.059)及 AIC 值(-68.4)均为最小, Frank Copula 函数为辽河流域-浑太河流域年降水量系列的最优 Copula 函数,其联合分布概率(CDF)见图 3。

图 3 反映了辽河流域-浑太河流域年降水量概率状态的协同依赖关系。横轴为辽河流域年降水系列累积概率(CDF),纵轴为浑太河流域年降水系

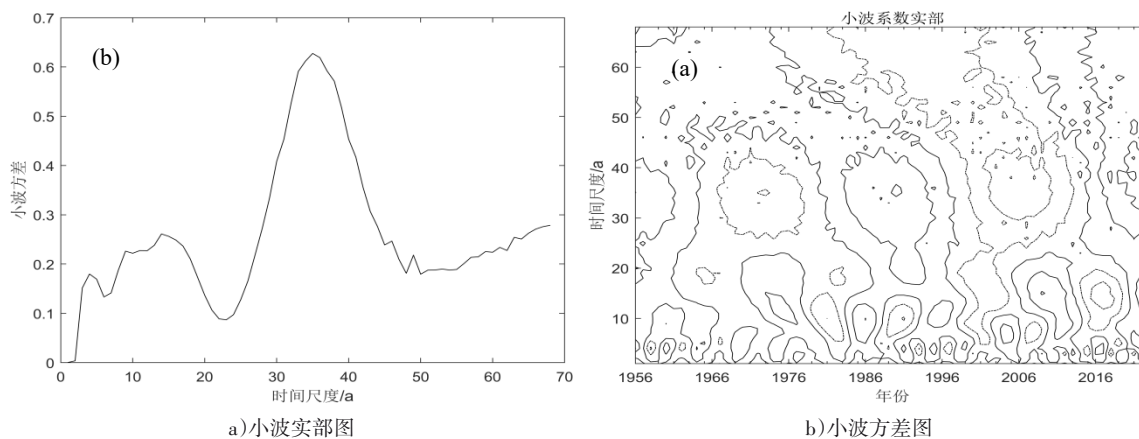


图 2 辽河流域小波实部图及小波方差图

Fig. 2 Wavelet real part and wavelet variance maps of the Liao River Basin

表 3 辽宁省主要流域年降水量边缘分布拟合结果

Tab. 3 Fitting results of the marginal distribution of annual precipitation of major river basins in Liaoning Province

流域	Normal		Gamma		Log-normal		Weibull		GEV	
	D	AIC	D	AIC	D	AIC	D	AIC	D	AIC
辽河	0.113	846	0.080	837	0.091	842	0.102	854	0.312	880
浑太河	0.130	870	0.068	862	0.091	864	0.150	879	0.062	863
大小凌河	0.098	836	0.060	830	0.077	833	0.093	842	0.585	1 027
YLJ	0.086	920	0.067	914	0.066	915	0.104	928	0.065	915
辽西	0.130	883	0.071	871	0.113	876	0.114	887	0.600	1 113
辽东	0.090	885	0.062	885	0.064	886	0.108	891	0.636	1 165

表 4 辽河流域-浑太河流域年降水量 Copula 函数对比检验

Tab. 4 Comparative test of Copula functions for annual precipitation between Liao River Basin and Huntai River Basin

序号	Copula 函数	统计特征	
		D	AIC
1	Clayton	0.088	-53.6
2	Gumbel	0.088	-53.5
3	Frank	0.059	-68.4
4	Joe	0.118	-37.8
5	AMH	0.118	-43.4

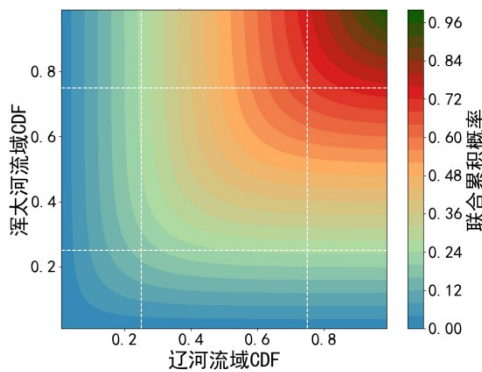


图 3 辽河流域-浑太河流域 Frank Copula 分布
Fig. 3 Frank Copula distribution between Liao River Basin and Huntai River Basin

列累积概率(CDF),联合累积概率用不同颜色表示。从图 3 可反映出在一定联合累积概率下辽河流域-浑太河流域的可能累积概率组合。采用相同方法

进行其余各流域的 Copula 函数优选,结果见表 5。

表 5 辽宁省任意 2 个主要流域的 Copula 函数优选结果
Tab. 5 Optimal results of Copula functions for any two major river basins in Liaoning Province

流域	浑太河流域	大小凌河流域	YLJ 流域	辽西沿海	辽东沿海
辽河流域	Frank	Frank	Gumbel	Frank	Frank
浑太河流域		Frank	Clayton	Frank	Frank
大小凌河流域			Clayton	Clayton	Frank
YLJ 流域				Clayton	Frank
辽西沿海					Frank

由表 5 可知,辽河流域-YLJ 流域年降水量系列最优 Copula 函数为 Gumbel Copula;浑太河流域-YLJ 流域、大小凌河流域-YLJ 流域、大小凌河流域-辽西沿海诸河、YLJ 流域-辽西沿海诸河最优二维 Copula 函数为 Clayton Copula,其余各流域组合最优二维 Copula 函数均为 Frank Copula。

3.3 丰枯遭遇分析

为识别辽宁省任意 2 个主要流域年降水量丰枯遭遇特征,在确定最优 Copula 函数基础上,将年降水量系列基于 $P=25\%$ 、 75% 频率划分为丰水、平水、枯水 3 个级别。任意 2 个流域年降水系列 X 、 Y 之间形成丰-丰、丰-平、丰-枯,平-丰、平-平、平-枯,枯-丰、枯-平、枯-枯共计 9 种组合状态, $P(X, Y)$ 代表给定条件下的组合概率,各组合概率按下式计算,下标 f, k 分别代表丰、枯。

丰水-丰水:

$$P(X > X_{pf}, Y > Y_{pf}) = 1 - u_{pf} - v_{pf} + C(u_{pf}, v_{pf}) \quad (14)$$

丰水-平水:

$$P(X > X_{pf}, Y_{pk} < Y < Y_{pf}) = v_{pf} - v_{pk} + C(u_{pf}, v_{pk}) - C(u_{pf}, v_{pf}) \quad (15)$$

丰水-枯水:

$$P(X > X_{pf}, Y < Y_{pk}) = v_{pk} - C(u_{pf}, v_{pk}) \quad (16)$$

平水-丰水:

$$P(X_{pk} < X < X_{pf}, Y > Y_{pf}) = u_{pf} - u_{pk} + C(u_{pk}, v_{pf}) - C(u_{pf}, v_{pf}) \quad (17)$$

平水-平水:

$$P(X_{pk} < X < X_{pf}, Y_{pk} < Y < Y_{pf}) = C(u_{pf}, v_{pf}) - C(u_{pf}, v_{pk}) - C(u_{pk}, v_{pk}) + C(u_{pk}, v_{pk}) \quad (18)$$

平水-枯水:

$$P(X_{pk} < X < X_{pf}, Y < Y_{pk}) = C(u_{pf}, v_{pk}) - C(u_{pk}, v_{pk}) \quad (19)$$

枯水-丰水:

$$P(X < X_{pk}, Y > Y_{pf}) = u_{pk} - C(u_{pk}, v_{pf}) \quad (20)$$

枯水-平水:

$$P(X_{pk} < X, Y_{pk} < Y < Y_{pf}) = C(u_{pk}, v_{pf}) - C(u_{pk}, v_{pk}) \quad (21)$$

枯水-枯水:

$$P(X < X_{pk}, Y < Y_{pk}) = C(u_{pk}, v_{pk}) \quad (22)$$

任意2个主要流域丰枯遭遇概率见表6。可知,辽宁省主要流域降水丰枯遭遇特征呈现显著地域差异。相邻流域丰枯同步率较高,YLJ流域-辽东沿海流域丰枯同步率达0.72,辽河流域-浑太河流域、辽河流域-大小凌河流域、辽河流域-辽西沿海诸河、浑太河流域-YLJ流域、浑太河流域-辽东沿海诸河、大小凌河流域-辽西沿海诸河、辽西沿海诸河-辽东沿海诸河同步率均在0.60以上。东部地区流域与中部、西部地区流域降水丰枯异步性较大,其中YLJ流域与大小凌河流域丰枯同步率仅为0.48;其余各流域丰枯同步率为0.5~0.6。

4 结论

研究将辽宁省主要河流划分为辽河流域、浑太

河流域、大小凌河流域、YLJ流域、辽西沿海诸河、辽东沿海诸河6个流域,采用线性倾向估计、小波分析等方法,对各流域年降水量系列趋势性、周期性进行分析,并采用Copula函数法,对任意两主要流域年降水丰枯遭遇特征进行识别,主要结论如下。

a)除辽河流域、大小凌河流域外,辽宁省各流域年降水量均呈下降趋势。其中东部地区YLJ流域及辽东沿海诸河下降幅度最为明显。辽宁省各主要流域整体呈现3个周期:4~5、9~14、30~35 a。其中,辽河流域以35 a长周期最为显著;浑太子河流域、大小凌河流域、YLJ流域以9~14 a周期最为显著;辽西沿海诸河、辽东沿海诸河以4~5 a周期最为显著。

b)辽宁省任意2个主要流域降水丰枯遭遇特征呈现地域差异特征。相邻流域丰枯同步率较高,YLJ流域-辽东沿海流域丰枯同步率达0.72;东部地区河流与西部地区河流降水丰枯异步性较大,YLJ流域与大小凌河流域丰枯同步率仅为0.48。

本文结论可为辽宁省防洪减灾、水资源优化配置以及水网规划建设提供数据支撑和参考。

表 6 辽宁省任意两主要流域降水丰枯遭遇频率(图中频率越大颜色越深)

Tab. 6 Wet-dry encounter frequency of precipitation between any two major river basins in Liaoning Province (the higher the frequency, the darker the color.)

流域名	浑太河	大小凌河	YLJ	辽西沿海诸河	辽东沿海诸河
辽河	枯 0.00 0.07 0.17	枯 0.00 0.08 0.16	枯 0.02 0.09 0.14	枯 0.00 0.08 0.16	枯 0.01 0.10 0.14
	平 0.07 0.35 0.07	平 0.08 0.33 0.08	平 0.11 0.30 0.09	平 0.08 0.33 0.08	平 0.10 0.31 0.10
	丰 0.17 0.07 0.00	丰 0.16 0.08 0.00	丰 0.12 0.11 0.02	丰 0.16 0.08 0.00	丰 0.14 0.10 0.01
	丰 平 枯	丰 平 枯	丰 平 枯	丰 平 枯	丰 平 枯
浑太河		枯 0.01 0.10 0.13	枯 0.00 0.11 0.14	枯 0.01 0.10 0.14	枯 0.00 0.08 0.16
		平 0.10 0.29 0.10	平 0.05 0.34 0.11	平 0.10 0.31 0.10	平 0.08 0.34 0.08
		丰 0.13 0.10 0.01	丰 0.19 0.05 0.00	丰 0.14 0.10 0.01	丰 0.16 0.08 0.00
		丰 平 枯	丰 平 枯	丰 平 枯	丰 平 枯
大小凌河			枯 0.03 0.13 0.09	枯 0.00 0.10 0.15	枯 0.01 0.11 0.13
			平 0.10 0.27 0.13	平 0.05 0.35 0.10	平 0.11 0.28 0.11
			丰 0.12 0.10 0.03	丰 0.20 0.05 0.00	丰 0.13 0.11 0.01
		丰 平 枯	丰 平 枯	丰 平 枯	丰 平 枯
YLJ				枯 0.02 0.13 0.09	枯 0.00 0.07 0.18
				平 0.09 0.28 0.13	平 0.07 0.36 0.07
				丰 0.13 0.09 0.02	丰 0.18 0.07 0.00
			丰 平 枯	丰 平 枯	丰 平 枯
辽西沿海诸河					枯 0.01 0.10 0.15
					平 0.10 0.31 0.10
					丰 0.15 0.10 0.01
				丰 平 枯	丰 平 枯

参考文献:

- [1] 胡江,李星,朱清帅,等. 国家水网背景下调水工程运行风险评估技术研究进展[J]. 水科学进展,2025,36(6):1042-1057.
Hu Jiang, Li Xing, Zhu Qingshuai, et al. Research progress on operational risk assessment technologies for water transfer projects in the background of the National Water Network[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(6): 1042-1057. (in Chinese)
- [2] 张强. 跨流域调水远程受水区水资源规划若干关键问题研究[D]. 大连:大连理工大学,2012.
Zhang Qiang. Research on Several Key Issues of Water Resources Planning in Remote Water Receiving Areas of Inter-basin Water Diversion [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [3] 谷长叶,韩义超,等. 跨流域调水联合调度研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
Gu Changye, Han Yichao, et al. Research on Joint Scheduling of Inter-basin Water Diversion [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014. (in Chinese)
- [4] 曹永强,张亮亮,王学风,等. 近50年辽宁省气温及降水量变化趋势与突变特征分析[J]. 水电能源科学,2016,34(1):6-9,39.
Cao Yongqiang, Zhang Liangliang, Wang Xuefeng, et al. Trend and Abrupt Change Analysis of Annual Temperature and Precipitation in Liaoning Province over the Past 50 years [J]. Hydropower Energy Science, 2016, 34(1): 6-9, 39. (in Chinese)
- [5] 于小苇. 辽宁省重点引调水工程运行调度探究[J]. 东北水利水电,2019,37(3):62-65.
Yu Xiaowei. Research on the Operation and Scheduling of Key Water Diversion and Regulation Projects in Liaoning Province [J]. Water Resources and Hydropower of Northeast China, 2019,

- 37(3):62-65. (in Chinese)
- [6] 辽宁河湖编委会. 辽宁河湖[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2021.
Liaoning River and Lake Compilation Committee. Liaoning River and Lake [M]. Beijing: China Water & Power Press 2021. (in Chinese)
- [7] 张心怡,冯琳,赵琳. 辽宁省水资源优化配置工程调度关键问题探讨[J]. 水利规划与设计,2016(1):57-59.
Zhang Xinyi, Feng Lin, Zhao Lin. Discussion on Key Issues of Water Resources Optimal Allocation Project Scheduling in Liaoning Province [J]. Water Resources Planning and Design, 2016(1):57-59. (in Chinese)
- [8] 辛云峰,李波. 跨流域调水工程的水资源管理问题研究[J]. 吉林水利,2006(S1):30-32.
Xin Yunfeng, Li Bo. Research on Water Resources Management Issues of Inter-Basin Water Diversion Projects [J]. Jilin Water Conservancy, 2006(S1):30-32. (in Chinese)
- [9] 程岩. 辽宁省淡水资源重新配置的战略构想——兼论鸭绿江的东水西调[J]. 辽东学院学报(自然科学版),2007(1):17-21.
Cheng Yan. East-to-west Water Transmission of Yalu River : A Strategic Vision to Address Fresh Water Resource Problems of Liaoning Province [J]. Journal of Liaodong University (Natural Science Edition), 2007(1):17-21. (in Chinese)
- [10] 韩春雷. 大伙房水库调水背景下的辽宁省中部地区水资源供需平衡分析[J]. 吉林水利,2016(4):32-34.
Han Chunlei. Analysis of Water Supply and Demand Balance in Central Liaoning Province under the Background of Water Diversion from Dahuofang Reservoir [J]. Jilin Water Conservancy, 2016(4):32-34. (in Chinese)
- [11] 李智慧. 辽宁省跨流域调水条件分析[C]//中国水利学会. 中国水利学会2015学术年会论文集(下册). 辽宁省水利水电勘测设计研究院,2015:305-308.
Li Zhihui. Analysis of Inter-basin Water Transfer Conditions in Liaoning Province [C]// Chinese Hydraulic Engineering Society. Proceedings of the 2015 Academic Annual Conference of the Chinese Hydraulic Engineering Society (Volume 2. Liaoning Provincial Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute , 2015:305-308. (in Chinese)
- [12] 辽宁省水文局. 辽宁省雨洪计算新方法研究与应用[M]. 沈阳:辽宁省科学技术出版社,2018.
Liaoning Provincial Hydrological Bureau. Research and Application of New Methods for Rain and Flood Calculation in Liaoning Province [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2018. (in Chinese)
- [13] 王一萍. 辽宁省大、小凌河中小流域相似度分析[J]. 水与水技术,2025(00):28-32.
Wang Yiping. Similarity Analysis of Small and Medium-sized Basins of the Big and Small Linghe in Liaoning Province [J]. Water and Water Technology, 2025(00):28-32. (in Chinese)
- [14] 梁卓然. 辽宁省浑河太子河中小流域水文特征相似性分析[J]. 东北水利水电,2025,43(2):20-22.
Liang Zhuoran. Analysis of Similarity of Hydrological Characteristics in Small and Medium-sized Basins of Hunhe and Taizihe in Liaoning Province [J]. Water Resources and Hydropower of Northeast China, 2025, 43 (2) : 20-22. (in Chinese)
- [15] 刘一休,王静文,孙仁豪. 基于非对称 Copula 函数降水径流丰枯遭遇分析[J]. 水电能源科学,2025,43(4):12-16.
Liu Yixiu, Wang Jingwen, Sun Renhao. Research on Wetness-dryness Encountering of Rainfall-runoff Based on Asymmetric Copula Function [J]. Hydropower Energy Science, 2025, 43(4) : 12-16. (in Chinese)
- [16] 叶津辰,陈娟,付茹萍,等. 南水北调东线工程水源区径流丰枯遭遇及转移规律[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2025,23(5):1059-1067.
Ye Jinchun, Chen Juan, Fu Ruping, et al. Runoff wetness-dryness encountering and transfer laws in water source area of East Route of South-to North Water Transfers Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23 (5) : 1059-1067. (in Chinese)
- [17] 阮俞理,张建云,王乐扬,等. 长江和黄河流域降水丰枯遭遇及不确定性分析[J]. 水科学进展,2024,35(6):865-876.
Ruan Yuli, Zhang Jianyun, Wang Leyang, et al. Analysis of Precipitation Wetness-Dryness Encountering and Its Uncertainty in the Yangtze River and Yellow River Basins [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(6) : 865-876. (in Chinese)
- [18] 吴茂琳,黄生志,周伟,等. 陕北-关中-陕南丰枯遭遇时空演变及其对水网布局的影响[J]. 水利水电技术(中英文),2025,56(10):165-178.
Wu Maolin, Huang Shengzhi, Zhou Wei, et al. Spatiotemporal Evolution of Wet-Dry Encounters in Northern, Central, and Southern Shaanxi and Their Effects on Water Network layout [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56 (10) : 165-178. (in Chinese)
- [19] LATIF Shahid, MUSTAFA F. Copula-based multivariate flood probability construction: a review [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(3): 132.
- [20] 任立良,万仪欣,袁山水,等. 黄河流域三维极端降水时空动态

- 演变机制[J/OL]. 水资源保护, 1-15 [2026-01-20]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20250407.1608.004>.
- Ren Lilaing, Wan Yixin, Yuan Shanshui, et al. The Mechanism of Spatiotemporal Dynamic Evolution of Three-Dimensional Extreme Precipitation in the Yellow River Basin [J/OL]. Water Resources Protection, 1-15 [2026-01-20]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20250407.1608.004>. (in Chinese)
- [21] 王易, 姚蕊, 孙鹏, 等. 基于 Copula 函数的淮河流域非平稳气象干旱特征研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(11): 26-38.
- Wang Yi, Yao Rui, Sun Peng, et al. Characterization of non-stationary meteorological drought in Huaihe River Basin based on Copula function [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(11): 26-38. (in Chinese)
- [22] 徐鹏程, 朱彤, 黄旭, 等. Copula 函数在水文多元分析中的应用研究进展[J]. 南昌工程学院学报, 2025, 44(3): 1-9.
- Xu Pengcheng, Zu Tong, Huang Xu, Research Progress on the Application of Copula Function in Hydrological Multivariate Analysis [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2025, 44(3): 1-9. (in Chinese)
- [23] 谢华, 罗强, 黄介生. 基于三维 copula 函数的多水文区丰枯遭遇分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 186-193.
- Xie Hua, Luo Qiang, Huang Jiesheng. Analysis of the encounter between abundance and drought in Multiple hydrological regions Based on three-dimensional copula function [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 186-193. (in Chinese)
- [24] 吕福水. 基于 Copula 的韩江支流丰枯径流频率分析[J]. 人民珠江, 2017, 38(7): 55-60.
- Lyu Fushui. Analysis on Drought and Flood Flow Probability in Hanjiang River Tributary Based on Copula Function [J]. Pearl River, 2017, 38(7): 55-60. (in Chinese)
- [25] 张赵毅, 何艳虎, 林柱良, 等. 基于 Copula 函数的珠江三角洲上游来水丰枯遭遇分析[J]. 人民珠江, 2021, 42(12): 30-41.
- Zhang Zhaoyi, He Yanhu, Lin Zhuliang, et al. Copula-based Wetness-Dryness Encountering Analysis of Upstream Runoff in the Pearl River Delta [J]. Pearl River, 2021, 42(12): 30-41. (in Chinese)

Analysis of Precipitation Characteristics and Wet - Dry Encounter in Major River Basins of Liaoning Province

YE Tianshu

(Liaoning River and Reservoir Management Service Center, Liaoning Hydrology Bureau, Shenyang 110003, China)

Abstract: To systematically explore the variation characteristics of annual precipitation and the interaction between different river basins in Liaoning Province, this study employed multiple scientific methods including linear trend estimation and wavelet analysis. Prior to investigating the wet-dry encounter relationships between basins, a critical step was taken to determine the optimal marginal distribution function for each individual basin—this function mathematically describes the probability distribution of annual precipitation in a single basin, laying the foundation for subsequent bivariate analysis. Additionally, the Copula function, a powerful tool in multivariate statistics for modeling the dependence structure between two or more random variables (independent of their marginal distributions), was calibrated to capture the correlation between precipitation series of any two basins, which involved classifying precipitation status into "wet," "normal," and "dry" categories for each basin and calculating the probability of synchronous (e. g., both wet or both dry) and asynchronous (e. g., one wet and the other dry) occurrences between pairs of basins. The main conclusions are as follows: Except for the Liao River Basin and the Daxiaoling River Basin, the annual precipitation of other major basins in Liaoning Province shows a decreasing trend, among which the YLJ River Basin and the coastal rivers in eastern Liaoning in the eastern region have the most significant decline, with the rates of -0.545 mm/a and -0.753 mm/a respectively. The annual precipitation of each major basin presents three periodicities, namely 4-5 years, 9-14 years and 30-35 years. The Gamma function is selected as the optimal marginal distribution function for the Liao River Basin, the Daxiaoling River Basin and the coastal rivers in western Liaoning; the GEV (Generalized Extreme Value) function is the optimal one for the Huntai River Basin and the YLJ River Basin; and the Log-normal function is the best fit for the coastal rivers in eastern Liaoning. The wet-dry encounter characteristics of precipitation between any two major basins in Liaoning Province show obvious regional differences. The wet-dry synchronization rate

is relatively high in adjacent basins, with the rate reaching 0.72 between the YLJ River Basin and the coastal river basin in eastern Liaoning. In contrast, there is a large asynchrony in precipitation wet-dry conditions between the basins in the eastern region (the YLJ River Basin and the coastal rivers in eastern Liaoning) and those in the western region (the Daxiaoling River Basin). The research results can provide a scientific basis for the construction and planning of the water network in Liaoning Province, and also offer technical support for the three-line water diversion scheme of "Transferring Water from Eastern Liaoning to Western Liaoning."

Keywords: Precipitation characteristics; trend; periodicity; wet-dry encounter; Copula function; Liaoning Province

(责任编辑:李泽华)