

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222429

Copula 函数在漳河上游联合干旱特征分析中的应用

宋亚轩^{a,b}, 索梅芹^{a,b}, 刘丽博^{a,b}

(河北工程大学 a. 水利水电学院; b. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为综合描述漳河上游干旱事件, 选取月降水数据计算标准化降水指数, 应用游程理论识别干旱历时和干旱强度两种干旱特征变量, 并采用 Copula 函数构建两种干旱特征变量间的联合分布, 探究干旱特征的时空分布。结果表明, 漳河上游 2001~2020 年发生频率最高干旱事件为 3 个月历时干旱, 干旱强度范围为 2.24~4.92; 干旱历时和干旱强度间存在强正相关性, Frank Copula 函数为二者最优联合分布; 干旱特征联合重现期范围为 18.56~23.94 年, 在漳河上游西北和东南流域表现 2 个干旱高风险区, 同现重现期范围为 22.25~31.94 年, 在西北、东北和东南流域表现 3 个干旱高风险区。联合分布综合分析了干旱事件, 可为全面评估旱情提供科学参考。

关键词: 漳河上游; Copula 函数; 干旱历时; 干旱强度; 联合分布

中图分类号: [TV11] **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)10-0001-05

1 概况

漳河属于海河流域漳卫南运河水系, 由清漳河和浊漳河两大支流共同构成, 于涉县合漳村汇流, 自西向东流入岳城水库, 水库之上为漳河上游。该流域地处 35.87~37.65°N, 112.44~114.20°E, 流经山西、河南和河北三省, 属温带季风气候, 横穿太行山脉, 以山区地貌为主, 气候和地貌造成流域内降雨时空分布不均^[1]。由于气候变暖及地理因素, 沿岸地区旱情多发, 典型的干旱事件如漳河上游自 1997 年连续 5 年发生旱情, 2009 年发生 50 年一遇特大干旱, 2015 年入冬流域内出现持续性干旱事件^[2]。因此, 亟需针对漳河上游干旱问题开展干旱演变趋势和时空分布特征相关研究。赵安周等^[3]基于改进的干旱严重度指数对海河流域四季的干旱等级进行了趋势分析和时空分布评价; 吴伟伟^[4]采用 Z 指数揭示了山西省晋中地区干旱严重程度发生频次年际与季节变化规律; 相恺政等^[5]探究了海河流域气象干旱和水文干旱频率的年尺度和季尺度空间分布。但以往针对漳河上游干旱研究多以单变量干旱特征为主, 忽略了干旱特征变量之间的相互影响。干旱事件是极其

复杂的, 发展过程存在多重不确定性, 通常表现为多种特征变量并存现象^[6-7]。然而, 用以表征多种变量相关性的传统多变量联合分布通常假定边缘分布相同, 如多变量正态分布、多变量对数正态分布和多变量 Gumbel 等, 致使其应用受到局限^[8]。可灵活针对每个特征变量选用不同边缘分布进行多元联合分布构建的 Copula 函数, 并广泛应用于水文多变量频率分析中, 不仅能有效描述多种特征变量间的相关性, 且构建方法简单、计算过程简洁。鉴此, 针对漳河上游的干旱事件, 本文基于标准化降水指数(SPI), 通过游程理论提取干旱历时和干旱强度两种干旱特征变量, 应用 Copula 函数构建二者的联合分布, 综合分析干旱事件的时空分布特征, 以期为漳河上游的干旱管理提供理论支撑。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

数据选取漳河上游流域内 11 个气象站点(和顺、左权、榆社、武乡、沁县、襄垣、屯留、长治、平顺、黎城、涉县)2001~2020 年月降水序列。数据来源于全球陆地数据同化系统(GLDAS) (ht-

收稿日期: 2022-11-17, 修回日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61873084)

作者简介: 宋亚轩(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源, E-mail: Songyx_2020@qq.com

通讯作者: 索梅芹(1983-), 女, 博士、副教授, 研究方向为水文学及水资源, E-mail: suomeiqin@hebeu.edu.cn

tps://search.earthdata.nasa.gov/。

2.2 研究方法

2.2.1 干旱特征识别

标准化降水指数(SPI)可用来描述不同时间尺度下的干旱过程,本文选用 SPI3 作为干旱指标,干旱等级的划分依据国家标准《气象干旱等级》(GB/T 20481-2017)(表 1)^[9]。基于月降水数据通过游程理论^[10]进行干旱识别,提取出干旱历时和干旱强度。

表 1 SPI 干旱等级划分标准

Tab. 1 Drought classification standard of SPI

等级	无旱	轻旱	中旱	重旱	特旱
SPI 值	(-0.5,+∞)	(-1.0,-0.5]	(-1.5,-1.0]	(-2.0,-1.5]	(-∞,-2.0]

2.2.2 边缘分布函数

构建联合分布首先需要选取干旱历时与干旱强度的边缘分布函数。本文选取常用的 6 种分布函数(表 2)对干旱历时和干旱强度进行拟合,并采用最大似然法估计未知参数,最后经拟合度检验确定最优的边缘分布^[11]。

表 2 边缘分布函数

Tab. 2 Marginal distribution function

函数	概率密度
Gamma	$f(x a, b) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-\frac{x}{b}}, \Gamma(a) = \int_0^\infty u^{a-1} e^{-u} du$
Normal	$f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, x \in R$
Weibull	$f(x a, b) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}$
Exponential	$f(x \mu) = \frac{1}{\mu} e^{-\frac{x}{\mu}}$
Loglogistic	$f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \frac{1}{x} \frac{e^z}{(1+e^z)^2}, z = \frac{\log x - \mu}{\sigma}, x \geq 0$
Lognormal	$f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), x > 0$

2.2.3 Copula 函数

采用三个典型的 Archimedean Copula 函数,即 Gumbel Copula、Clayton Copula 和 Frank Copula 函数对干旱历时和干旱强度进行联合分析,函数表达式见表 3。

表 3 Archimedean Copula 函数表达式

Tab. 3 Archimedean Copula function expressions

Copula	参数范围	函数形式
Gumbel	[1, ∞)	$\exp\left\{-\left[\sum_{j=1}^d (-\ln \mu_j)^\theta\right]^{\frac{1}{\theta}}\right\}$
Clayton	(0, ∞)	$\left[\left(\sum_{j=1}^d u_j^{-\theta}\right) - d + 1\right]^{-\frac{1}{\theta}}$
Frank	R	$-\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{\prod_{j=1}^d (e^{-\theta u_j} - 1)}{(e^{-\theta} - 1)^{d-1}}\right]$

相关性度量可用来表明干旱历时和干旱强度

间相关性,设随机变量 X、Y 具有联合分布函数 Copula C,即 C(u, v),则 Kendall τ 和 Spearman ρ_n 分别定义为:

$$\tau = 4 \int_0^1 \int_0^1 C(u, v) dC(u, v) - 1 \quad (1)$$

$$\rho_n = 12 \int_0^1 \int_0^1 uv dC(u, v) - 3 \quad (2)$$

选择均方根误差(R_{MSE})和赤池信息量准则(AIC)对理论分布进行拟合度检验。R_{MSE}、AIC 数值越小说明理论分布和经验分布拟合程度越好,公式分别为:

$$M_{SE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [F_e(x_1, x_2, \dots, x_d) - F(x_1, x_2, \dots, x_d)]^2 \quad (3)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{M_{SE}} \quad (4)$$

$$AIC = N \log M_{SE} + 2k \quad (5)$$

式中, M_{SE} 为均方误差; N 为样本数量; F_e(x₁, x₂, ..., x_d) 为经验分布; F(x₁, x₂, ..., x_d) 为联合分布; k 为 Copula C 参数个数。

2.2.4 干旱特征重现期

干旱历时重现期 T_d、干旱强度重现期 T_s 分别为:

$$T_d = E_t F_D(d) / [1 - F_D(d)] \quad (6)$$

$$T_s = E_t F_S(s) / [1 - F_S(s)] \quad (7)$$

式中, F_D(d)、F_S(s) 分别为干旱历时 D 与干旱强度 S 的边缘分布函数; E_t 为干旱事件平均间隔期。

干旱联合重现期 T(d, s)、干旱同现重现期 (T*(d, s)) 分别为:

$$T(d, s) = E_t / [P(D \geq d \cup S \geq s)] = E_t / [1 - C(F_D(d), F_S(s))] \quad (8)$$

$$T^*(d, s) = E_t / [P(D \geq d \cap S \geq s)] = \frac{E_t}{1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))} \quad (9)$$

式中, F_D(d)、F_S(s) 分别为干旱历时 D 与干旱强度 S 的边缘分布函数; C(F_D(d), F_S(s)) 为两者的联合分布函数。

3 结果与分析

3.1 漳河上游干旱特征识别

漳河上游各站点平均 SPI3 波动状态见图 1。由图 1 可知, SPI3 < -0.5 共计 75 次,其中春季干旱事件(SPI3 < -0.5) 17 次,夏季干旱事件(SPI3 < -0.5) 19 次,秋季干旱事件(SPI3 < -0.5)

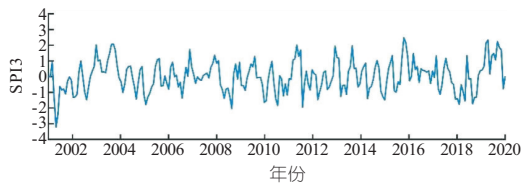


图 1 漳河上游 SPI3 变化过程

Fig. 1 Changing process of SPI3 in Zhanghe upstream

21 次, 冬季干旱事件 (SPI3 < -0.5) 18 次。运用游程理论提取干旱历时和干旱强度 (部分结果见表 4), 发现漳河上游最长干旱历时为 8 个月, 发生于 2018 年 8 月~2019 年 3 月, 最低干旱强度为 1.21, 发生于 2007 年 8~9 月。根据干旱历时和干旱强度散点图可知, 漳河上游干旱历时为 3 个月干旱事件频率最高, 其干旱强度范围在 2.24~4.92 之间。结合漳河上游管理局发布干旱事件公告, 实际干旱事件和理论干旱事件结果基本吻合。2001 年是漳河上游发生连续干旱的第 5 个年份, 发生春夏连旱且 4 月后旱情加重。2006、2008 年分别发生春旱、冬旱。2009 年上半年发生 50 年一遇特大干旱事件。2014、2015、2018、2019 年均发生不同程度的冬季干旱。

表 4 干旱历时和干旱强度提取结果

Tab. 4 Extract results from drought duration and drought severity

开始年月	结束年月	干旱历时	干旱强度	开始年月	结束年月	干旱历时	干旱强度
2001-04	2001-10	7	9.45	2014-12	2015-02	3	2.80
2006-03	2006-04	2	1.91	2015-07	2015-09	3	3.64
2007-08	2007-09	2	1.21	2018-08	2019-03	8	9.62
2008-09	2009-01	5	5.78				

3.2 Copula 函数联合分布构建

3.2.1 边缘分布函数

通过最大似然估计得出 6 种分布拟合干旱历时和干旱强度的未知参数 (表 5), 进而获得干旱历时和干旱强度经验分布与理论分布拟合结果。为准确选取最优边缘分布, 采用 AIC 检验 (表 5), 最终选取对实测数据拟合最优的 Lognormal 作为干旱历时和干旱强度的边缘分布。

表 5 概率分布拟合参数及优度检验

Tab. 5 Probability distribution fitting parameters and goodness test

函数	参数	历时	强度	历时 AIC	强度 AIC
Gamma	a	5.29	3.16	82.67	69.91
	b	0.63	0.82		
Normal	μ	3.36	3.82	90.66	76.46
	σ	1.62	2.36		
Weibull	A	3.38	4.33	84.65	73.13
	B	2.22	1.75		
Exponential	μ	3.36	3.82	90.99	86.14
Loglogistic	μ	1.07	3.44	89.41	75.73
	σ	0.24	1.24		
Lognormal	μ	1.11	1.17	80.98	67.68
	σ	0.42	0.56		

3.2.2 联合分布函数

采用 Gumbel Copula、Clayton Copula 和 Frank Copula 函数构建干旱历时与干旱强度联合分布, 并通过最大似然估计求 Copula C 中参数 θ , 再依据式 (1)、(2) 算得干旱历时与干旱强度之间相关系数, 确定干旱历时与干旱强度的 Kendall τ 的范围在 0.68~0.82 之间, Spearman ρ_n 的范围在 0.86~0.96 之间, 表明两变量之间呈正相关关系且具有较强的相关性, 其中 Gumbel Copula 和 Frank Copula 函数两个特征变量之间的相关性均高于 Clayton Copula 函数。

基于所得参数, 运用 3 种 Copula 函数分别构建干旱历时与干旱强度的联合分布。图 2 为 Gumbel Copula、Clayton Copula 和 Frank Copula 函数构建的联合分布理论值与经验值的比较情况。由图 2 可知, 三种类型 Copula 函数构建的联合分布理论值与经验值拟合结果良好。为进一步确定最优联合分布, 采用 R_{MSE} 、AIC 对联合分布理论值和经验值进行检验 (表 6), 最终选取计算结果均最小的 Frank Copula 函数构建干旱历时和干旱强度联合分布。

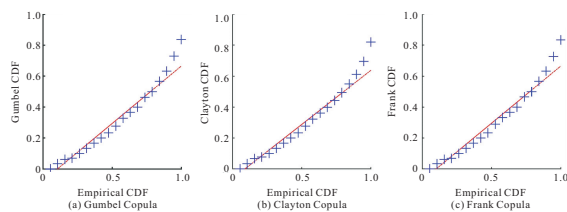


图 2 干旱特征经验与理论联合累积概率分布对比

Fig. 2 Comparison of theoretical and empirical joint cumulative probability distribution for drought characteristics

表 6 联合分布函数优度检验

Tab. 6 Joint distribution functions goodness test

Copula 函数	R_{MSE}	AIC
Gumbel	0.016	-105.42
Clayton	0.019	-101.13
Frank	0.015	-107.27

3.3 干旱特征重现期

3.3.1 单变量干旱特征重现期

漳河上游 3 个月历时干旱事件发生频率高, 基于式 (6)、(7), 分别计算干旱历时重现期 ($D > 3$) 和干旱强度重现期 ($S > 3$)。重现期小说明干旱发生频次越高, 干旱事件的风险性也随之增加。根据计算结果可知, 干旱历时重现期范围为 7.92~17.94 年 (图 3(a)), 西北部和东南部重现期相较于漳河上游重现期均偏小, 表现为干旱风险区, 其中西北部浊漳河北源一带干旱风险性最高。干旱强度重现期范围为 10.51~21.81 年 (图 3(b)), 此时干旱风险区位于漳河上游西北部和

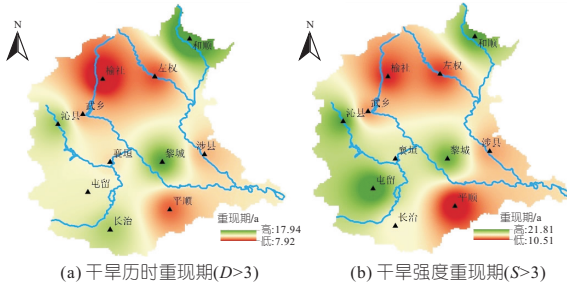


图 3 干旱历时和干旱强度重现期空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of drought duration and drought severity return period

东南部,其中东南部浊漳河干流一带重现期最小,该区域干旱风险性高于其他区域。由此可知,漳河上游单变量干旱特征重现期存在差异,在空间分布上干旱风险区较为相似。

3.3.2 联合干旱特征重现期

基于式(8)、(9),分别计算漳河上游干旱联合重现期($D > 3, S > 3$)和干旱同现重现期($D > 3, S > 3$)。依据计算结果可得,干旱联合重现期范围为 18.56~23.94 年(图 4(a)),其中,清漳河东源、浊漳河西源、浊漳河南源和浊漳河汇流流域重现期均相对偏高,干旱事件风险程度相对偏低,干旱风险区位于漳河上游西北部和东南部。干旱同现重现期范围为 22.25~31.94 年(图 4(b)),此时,漳河上游干旱风险区分布于漳河上游西北部的清漳河西源、东北部的浊漳河北源一带及东南部的清、浊漳河汇流流域。根据漳河上游联合干旱时空特征可知,干旱联合重现期小于干旱同现重现期,联合干旱特征在空间分布上具有相似性。

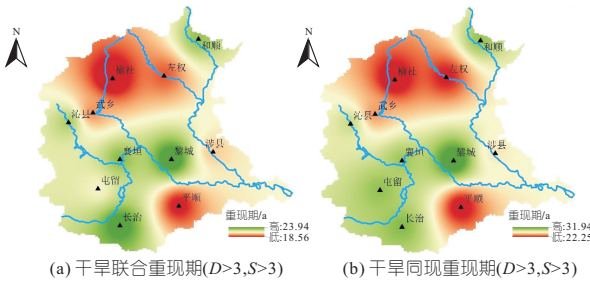


图 4 干旱特征联合重现期和同现重现期空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of joint return period and co-occurrence return period of drought characteristics

3.3.3 结果比较

基于单变量干旱特征分析可知(表 7),榆社站干旱历时重现期最小,为 7.92 年,其他 10 个站点干旱历时重现期均大于 10 年,因而榆社站所辖区域为干旱高风险区;平顺站干旱强度重现期最小,为 10.51 年,其他 10 个站点干旱强度重现期均大于 11 年,此时平顺站所辖区域为干旱高风险区。基于联合干旱特征分析可得(表 7),榆社站、

表 7 单变量干旱特征重现期和联合干旱特征重现期
Tab. 7 Univariate drought characteristics return period and joint drought characteristics return period ^a

站点	干旱历时重现期	干旱强度重现期	干旱联合重现期	干旱同现重现期
和顺	17.95	20.64	22.74	29.51
左权	10.06	12.07	20.13	22.75
榆社	7.92	11.61	18.56	22.25
武乡	11.32	13.74	20.43	25.25
沁县	14.86	20.57	22.48	28.44
襄垣	12.13	16.91	22.86	29.39
屯留	13.02	21.82	21.54	29.62
长治	14.58	15.89	23.68	29.84
平顺	10.16	10.51	19.34	22.74
黎城	16.10	20.06	23.95	31.95
涉县	11.41	13.95	20.95	26.63

平顺站的干旱联合重现期小于 20 年,其余 9 个气象站点干旱联合重现期均大于 20 年,此时漳河上游榆社站所辖区域和平顺站所辖区域均表现为干旱高风险区;干旱同现重现期在榆社站、左权站和平顺站时间间隔小于 25 年,其余 8 个气象站点干旱同现重现期均大于 25 年,说明榆社站、左权站和平顺站所辖区域为漳河上游干旱的三个高风险区。综合单变量干旱特征和联合干旱特征重现期及空间分布可知,漳河上游单变量干旱特征重现期小于联合干旱特征重现期,单变量干旱特征和联合干旱特征在时间上存在差异;此外,漳河上游的干旱风险区均处于流域西北部和东南部,在空间分布上具有相似性,但高风险区存在差别。具体表现为干旱历时在榆社站所处西北部重现期相对偏低,干旱强度在平顺站所处东南部重现期相对偏低,可视为漳河上游单一干旱高风险区。然而,联合干旱特征在位于漳河上游西北部的榆社站、左权站所辖区域和东南部平顺站所辖区域重现期均相对偏小,流域内突出多个干旱高风险区。因此,相对于单变量干旱特征在漳河上游站点所辖区域表现为单一干旱高风险区,联合干旱特征在空间分布中表现为多个干旱高风险区,且包含了单变量干旱特征独立表现为干旱高风险的区域。由此可见,联合干旱特征不仅反映了干旱特征变量间的相关性,且可综合描述漳河上游的干旱事件。

4 结论

a. 干旱历时和干旱强度之间具有强正相关性;漳河上游联合干旱特征在空间上表现为多个干旱高风险区,且存在差异性;联合分布有益于对漳河上游干旱事件进行全面性评估。

b. 与单变量干旱特征相比,联合干旱特征将单变量干旱特征联合分析,有效反映了干旱特征变量间相关性,综合描述了漳河上游干旱事件的

时空分布。

c. 本文仅考虑了降水影响下的干旱特征时空分布, 然而干旱形成的原因复杂多变, 可联合其他径流、蒸散发等干旱影响因素进一步探究漳河上游干旱事件变化。

参考文献:

[1] 徐明. 漳河上游流域子流域划分研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.

[2] 漳河上游管理局. 漳河要闻[EB/OL]. [2022. 10. 10]. <http://www.hwcc.gov.cn/zhsyj/jgyw/>.

[3] 赵安周, 张安兵, 王冬利, 等. 海河流域干旱时空变化及驱动因素分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(4): 859-872.

[4] 吴伟伟. 基于 Z 指数的晋中地区干旱变化特征及成因分析[J]. 水文, 2022, 42(2): 91-95, 101.

[5] 相恺政, 赵安周, 胡小枫, 等. 1980-2019 年海河流域气象干旱和农业干旱变化及传播特征[J]. 水资源与

水工程学报, 2022, 33(2): 194-202.

[6] 顾佳帅, 李琼芳, 牛铭媛, 等. 基于多维 Copula 函数的淮河上游气象干旱特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(8): 83-87, 92.

[7] 韩会明, 刘喆玥, 刘成林, 等. 基于 Copula 函数的赣江流域气象干旱特征分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 9-13.

[8] 刘章君, 郭生练, 许新发, 等. Copula 函数在水文水资源中的研究进展与述评[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 148-159.

[9] 全国气候与气候变化标准化技术委员会. 气象干旱等级: GB/T 20481-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[10] 周平, 周玉良, 金菊良, 等. 合肥市干旱识别及基于 Copula 的特征值重现期分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(12): 1-5.

[11] 潘奇鑫. Copula 函数在宿迁古黄河流域月降雨量模拟中的运用[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.

Application of Copula Function in Analysis of Joint Drought Characteristics in Zhanghe Upstream

SONG Ya-xuan^{a,b}, SUO Mei-qin^{a,b}, LIU Li-bo^{a,b}

(a. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power; b. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: The aim of this paper is to describe the drought events in the Zhanghe upstream comprehensively. Firstly, monthly precipitation data were selected to calculate standardized precipitation index. And then, both drought duration and drought severity were identified according to runoff theory. Finally, Copula function was adopted to establish joint distribution between drought duration and drought severity to explore the spatial and temporal distribution of drought characteristics. The results show that the highest frequent drought events in the Zhanghe upstream from 2001 to 2020 is 3 months drought, and the drought severity ranges from 2.24 to 4.92; There is a strong positive correlation between drought duration and drought severity, and Frank Copula function is the most optimal joint distribution function of them; The joint return period of drought characteristics ranges from 18.56-23.94 years, and the northwest and southeast parts of the Zhanghe upstream basin are the two key drought risk areas; The co-occurrence return period of drought characteristics ranges from 22.25-31.94 years, and the northwest, northeast and southeast parts of the Zhanghe upstream basin are the three key drought risk areas. Consequently, it can be obtained that the joint distribution can analyze drought events comprehensively, and thus provide scientific guidance for thorough evaluation of drought.

Key words: Zhanghe upstream; Copula function; drought duration; drought severity; joint distribution

(上接第 9 页)

Research and Application of Drought Control and Digital Twin in Feiyun River Basin

ZHOU Xiao-li¹, ZHANG Ren-gong², HUANG Dong-yang³, CHEN Shan-jia³

(1. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China; 2. Zhejiang Yugong Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 310002, China; 3. Wenzhou Water Conservancy Bureau, Wenzhou 325000, China)

Abstract: In view of the relatively serious drought in the Feiyun River basin in recent years, the inability to effectively utilize the regulating capacity of the counter-regulating reservoir, and the inability to effectively guarantee the timeliness and scientificity of the operation, which affect the water supply safety of nearly 6 million people in Wenzhou, the anti-drought operation model and data center of the Feiyun River basin are established. The real-time data of rainfall, water level, water supply flow and ecological flow of multiple reservoirs in the basin are quoted. The meteorological data including 1 h, 3 h, 6 h short-term and imminent grid forecast data, and 1 d, 3 d, 7 d, 15 d, 30 d, 90 d and other long-term rainfall forecast data are introduced. Combined with water and soil moisture in the basin, reservoir and basin evaporation, support vector regression (SVR) calculation method is used to develop a distributed digital twinning business system based on SPARK components, which realizes early warning of available water supply, drought-resistant water level early warning, drought-resistant days early warning and ecological flow early warning, increases the use of the anti-regulation storage capacity of 2.8 million cubic meters and the reserve storage capacity of 2.93 million cubic meters. Thus, it provides data basis and technical support for the drought-resistant decision-making, scientific scheduling and "four pre-" realization in the Feiyun River basin.

Key words: Feiyun River Basin; drought resistance; dispatching rules; digital twin; multi-scale early warning