

网络出版时间:2016-08-09 09:41 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.09.031
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160809.0941.062.html

引调水工程水源地水量水质联合风险研究

徐 聪,冯民权

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,陕西 西安 710048)

[摘 要] **【目的】**分析引调水工程水源地水量水质联合风险,为引调水工程的顺利建设提供科学依据。**【方法】**利用水质综合指数评价法对水质进行评价,分别利用水质综合指数和污染最为严重的指标与水量数据进行 Copula 水量水质联合分布函数的构建,并以引沁入汾工程为例对引调水工程水量水质联合风险进行研究。**【结果】**引沁入汾工程水源地水质状况良好,总体均能达到水质功能区Ⅳ类水要求;通过水量与水质综合指数计算得到的联合风险可以看出:就整个调水时期而言,有利于调水的概率为 99.29%,不利于调水的概率为 2.01%;通过水量与污染最为严重的水质指标 TN 计算得到的联合风险可以看出:就整个调水时期而言,有利于调水的概率为 32.16%,不利于调水的概率为 69.16%。**【结论】**引沁入汾工程水源地适合作为该工程的取水源地,但以后需加强对 TN 的控制和治理。

[关键词] 引沁入汾工程;水质综合指数评价法;Copula 函数;水量水质联合风险

[中图分类号] X824.04

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)09-0228-07

Joint risk of water quantity and quality in water sources of water diversion project

XU Cong, FENG Minquan

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: **【Objective】** This paper studied the joint risk of water quantity and quality in water sources of water diversion project to provide scientific basis for successful construction of water diversion project. **【Method】** Water quality was evaluated by synthetic index method. Water quantity data was used together with water quality synthetic index and the most serious pollution indicator to build the Copula joint distribution function. Then, the joint risk of water quantity and quality was investigated using the water diversion project from Qin River to Fen River as an example. **【Result】** The water sources of water diversion project from Qin River to Fen River have good water quality, and the overall water quality reaches ribbon ClassⅣ water requirements. From the joint risk calculated by water quality and quantity synthetic index, the probability that is conducive to diversion is 99.29%, and the probability that is not conducive to diversion is 2.01% during the entire water diversion period. From the joint risk of water contamination by the most serious water quality indicator TN, the probability that is conducive to diversion is 32.16% and the probability that is not conducive to diversion is 69.16%. **【Conclusion】** The water sources of water diversion project from Qin River to Fen River is suitable and the control and governance of TN should be strengthened in future.

[收稿日期] 2015-02-06

[基金项目] 高等学校博士学科点专项科研项目(20126118110015);中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科项目(106-00X101,106-5X1205);山西省中部引黄工程管理局计划基金项目(2014-9)

[作者简介] 徐 聪(1990—),男,河南长葛人,在读硕士,主要从事水环境模拟与预测研究。E-mail:1064974686@qq.com

[通信作者] 冯民权(1964—),男,山西永济人,教授,博士,博士生导师,主要从事水环境模拟与污染控制研究。E-mail:mqfeng@xaut.edu.cn

Key words: water diversion project from Qin River to Fen River; synthetic index method for water quality assessment; Copula function; joint risk of water quantity and quality

随着国民经济的快速发展和人民生活质量的不断提高,人们对水资源的需求和环境要求越来越高,一些原有的人类生存区域和空间的水资源已不能满足本区域国民经济发展和人类生活的需求。由于我国人均水资源总量不足及水资源时空分布不均匀,使我国许多地区的经济社会发展受制于水资源的供给能力,因而引调水工程应运而生。然而,引调水工程势必会对水源地的水量水质等带来一定的风险,对引调水工程水源地水量水质联合风险的研究可为工程建设提供科学依据。

目前,有关 Copula 函数在引调水工程方面的研究已有很多,但这些研究多基于径流丰枯遭遇^[1-9]、降水丰枯遭遇^[10-13]和洪水遭遇^[14-16]层面,少有基于水量水质联合风险的研究。少数作者利用 Copula 函数仅对水量水质联合分布进行了研究,但并未对联合风险进行具体分析^[17]。基于此,本研究利用 Copula 函数从 2 个角度对水源地水量水质联合风险进行研究,在构建 Copula 水量水质联合分布函数时,首先选取多个水质指标并引入水质综合评价的思想,基于水质综合指数评价法使用简便、评价结果直观及精确度和信息利用率高的优点,利用此方法对水源地水质进行综合评价,以便较完整地反映水污染程度^[18],并利用水质综合指数作为水质基础数

据,进行联合分布函数的构建,从而进行联合风险分析;其次选择水质指标中污染最为严重的一个指标作为水质基础数据,进行联合分布函数的构建及联合风险分析。最后以引沁入汾工程为例进行分析,旨在通过对取水源地水量水质联合风险的综合评价,为取水源地的选择和后期水量水质的监测管理提供参考。

1 理论基础

1.1 Copula 函数

Copula 函数是边缘分布为[0,1]区间均匀分布的联合分布函数,总体上可以分为椭圆型、阿基米德型和二次型 3 类,其中生成元为 1 个参数的阿基米德型 Copula 函数的应用最为广泛,其构造形式为:

$$C_{\theta}(u,v)=\varphi^{-1}[\varphi(u)+\varphi(v)],0\leq u,v\leq 1。$$
 (1)
式中: $C_{\theta}(u,v)$ 为 Copula 函数, $u、v$ 为边界分布函数, θ 为参数, φ 为 Copula 函数的生成元。

由式(1)所示的阿基米德型 Copula 函数的定义可知,只要算子的表示形式已知,就可确定一种相应的 Copula 函数形式。不同算子的选择会产生不同类别的阿基米德型 Copula 函数。几种常见的二维阿基米德型 Copula 函数^[19]如表 1 所示。

表 1 几种常见的二维阿基米德型 Copula 函数
Table 1 Several common two-dimensional Archimedean Copula functions

名称 Name	Copula 函数形式 Copula function	参数范围 Parameter set	τ 与 θ 的关系 Relationship between τ and θ	适用条件 Applicable conditions
Clayton Copula	$C(u,v)=(u^{-\theta}+v^{-\theta})^{-1/\theta}$	$\theta>0$	$\tau=\frac{\theta}{\theta+2}$	正相关 Positive correlation
GH Copula	$C(u,v)=\exp\{-[-(\ln u)^{\theta}+(\ln v)^{\theta}]^{\frac{1}{\theta}}\}$	$\theta\geq 1$	$\tau=1-\frac{1}{\theta}$	正相关 Positive correlation
Frank Copula	$C(u,v)=-\frac{1}{\theta}\ln\left[1+\frac{(e^{-\theta u}-1)(e^{-\theta v}-1)}{(e^{-\theta}-1)}\right]$	$\theta>0$	$\tau=1-\frac{4}{\theta}\left(1-\frac{1}{\theta}\int_0^{\theta}\frac{t}{e^t-t}dt\right)$	各种相关 Various correlation
Ali-Mikhail- Hap Copula	$C(u,v)=\frac{uv}{1-\theta(1-u)(1-v)}$	$-1\leq\theta<1$	$\tau=\left(\frac{3\theta-2}{\theta}\right)-\frac{2}{3}\left(1-\frac{1}{\theta}\right)^2\ln(1-\theta)$	弱相关 Low correlation

注:Frank Copula 函数 τ 与 θ 关系式中的 $t(t\in[0,\theta])$ 表示变量。
Note: $t(t\in[0,\theta])$ represents a variable in the relationship τ and θ in Frank Copula function.

表 1 中的 τ 是可以描述变量之间非线性相关关系的 Kendall 相关系数,可由下式计算:

$$\tau=\frac{2}{n(n-1)}\sum_{1\leq i< j\leq n}\text{sign}[(x_i-x_j)(y_i-y_j)]。$$
 (2)
式中: $(x_i,y_i)、(x_j,y_j)$ 为样本; n 为样本个数;
 $\text{sign}(x)$ 为符号函数, $\text{sign}(x)=\begin{cases}1,x>0;\\0,x=0,\\-1;x<0.\end{cases}$

1.2 Copula 函数的拟合优度检验

对一组数据系列,有多个不同 Copula 函数可供选择,其中最优的模型需要通过拟合优度检验进行优选^[7]。Copula 函数的拟合优度检验有多种方法,本研究拟选用以下方法进行拟合优度检验。

应用双样本 K-S 进行检验,双样本 K-S 检验统计量的定义为:

$$D=\max_{1\leq i\leq n}\left\{\left|C_i-\frac{n_i}{n}\right|,\left|C_i-\frac{n_i-1}{n}\right|\right\}。$$
 (3)

式中: C_i 为联合观测样本 (x_i, y_i) 的 Copula 值, n_i 为联合观测样本中满足 $x \leq x_i, y \leq y_i$ 的联合观测个数, n 为样本个数。

为了检验 Copula 函数的拟合优度,采用普通最小二乘法(OLS)的最小准则进行评价,离差平方和 OLS 的定义如下:

$$OLS=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(P_{ei}-P_i)^2}。$$
 (4)

式中: P_{ei} 为联合分布的经验频率, P_i 为联合分布的理论频率。

1.3 水质综合指数评价法

水质综合指数评价法参考 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的 5 级划分原则进行,定义转化指数^[20]为:

$$r_{ij}=\frac{S_{i\max}-S_{i\min}}{100}。$$
 (5)

式中: $S_{i\max}$ 为标准中 i 指标的最高级限值; $S_{i\min}$ 为 i 指标可能的最低值,假定 $S_{i\min}=0$ 。

将所有评价项目的各等级浓度限值做统一的规范化处理,规范化公式如下:

$$S_{ih}=\frac{S_{ih}}{r_{ij}}。$$
 (6)

式中: $i=1,2,\cdots,n; h=1,2,\cdots,m; s_{ih}$ 为第 i 个项目的 h 级限值; r_{ij} 为第 i 个项目的转化指数。

计算各级评价标准的综合指数,有:

$$I_h=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nS_{ih}。$$
 (7)

确定实测样本的指数为:

$$d_i=\frac{X_{ij}}{r_{ij}}。$$
 (8)

式中: X_{ij} 为 i 个指标的第 j 个实测值。

计算实测样本综合指数为:

$$I=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nd_i。$$
 (9)

2 水源地水量水质联合风险分析

本研究以引沁入汾工程为背景,对其水源地水量水质的联合风险进行研究。引沁入汾工程是在安泽县和川镇岭南村兴建和川取水输水工程,开凿分水岭—草峪岭隧洞,经新建五马水库调节,调水至汾河流域的大型跨流域自流引水工程,不仅可有效缓解汾东地区严重缺水的供需矛盾,改善当地生态环境,还可为汾河下游段实现清水复流做出积极贡献。引沁入汾工程平面示意图如图 1 所示。

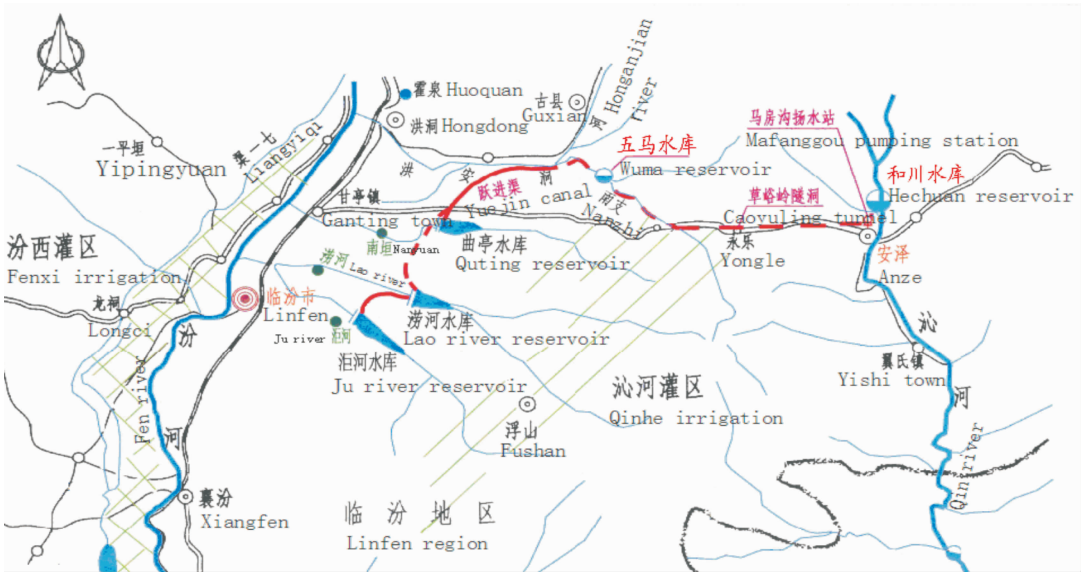


图 1 山西临汾市引沁入汾工程平面示意图

Fig.1 Schematic diagram of water diversion project from Qin River to Fen River in Linfen, Shanxi

2.1 基于水质综合指数的水量水质联合风险分析

2.1.1 基础数据 (1)水量数据.采用引沁入汾工程水源地飞岭水文站 1980—2010 年的年径流量数

据,作为构建 Copula 水量水质联合分布函数的基础数据。该水文站的实测年径流量时序如图 2 所示。

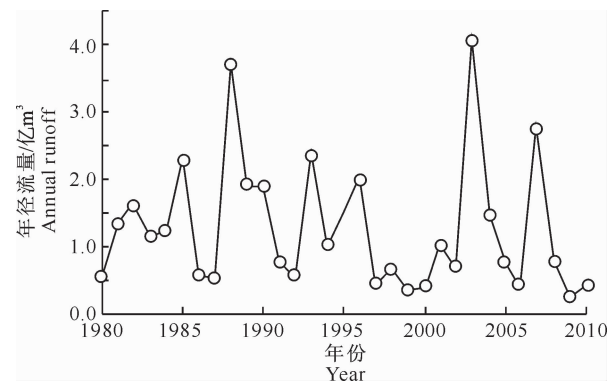


图2 飞岭水文站实测年径流量时序图

Fig.2 Measured annual runoff at Feiling hydrologic station

(2)水质数据。采用引沁入汾工程水源地飞岭水文站 1980—2010 年水质实测数据中的 6 个指标(高锰酸盐指数及COD、TP、NH₃-N、TN与

挥发酚含量)作为水质评价的基础数据,运用水质综合指数评价法对水质进行评价,得出水质综合指数值 I 。然后利用表 2 的综合指数法地表水环境质量等级划分标准对飞岭站进行水质综合指数评价,得到的结果如表 3 所示。

表 2 地表水环境质量等级划分标准

Table 2 Division standard of surface water environmental quality

综合指数(I_h) Synthetic index(I_h)	分级 Grade
$\geq 0 \sim \leq 12.555\ 6$	I
$> 12.555\ 6 \sim \leq 23.527\ 8$	II
$> 23.527\ 8 \sim \leq 40.833\ 3$	III
$> 40.833\ 3 \sim \leq 62.777\ 8$	IV
$> 62.777\ 8 \sim \leq 100.000\ 0$	V
$> 100.000\ 0$	劣 V Worse than V

表 3 基于水质综合指数评价法的沁河飞岭水文站 1980—2010 年的水质评价结果

Table 3 Water quality assessment at Feiling station of Qin River from 1980 to 2010 based on synthetic index method

年份 Year	综合指数(I) Synthetic index(I)	水质类别 Water quality grade	年份 Year	综合指数(I) Synthetic index(I)	水质类别 Water quality grade	年份 Year	综合指数(I) Synthetic index(I)	水质类别 Water quality grade
1980	14.890 8	II	1991	18.631 1	II	2002	46.593 9	IV
1981	15.014 9	II	1992	24.574 4	III	2003	43.268 5	IV
1982	16.030 5	II	1993	22.428 9	II	2004	43.274 3	IV
1983	17.831 3	II	1994	28.843 9	III	2005	31.666 7	III
1984	14.505 3	II	1995	18.793 0	II	2006	47.736 1	IV
1985	15.135 2	II	1996	17.254 8	II	2007	54.746 0	IV
1986	18.815 8	II	1997	21.633 2	II	2008	57.836 8	IV
1987	22.994 0	II	1998	42.080 3	IV	2009	33.991 8	III
1988	26.703 1	III	1999	39.414 4	III	2010	28.016 7	III
1989	24.283 0	III	2000	54.942 8	IV			
1990	21.299 7	II	2001	50.069 5	IV			

由于引沁入汾工程的输水工程坝址位于安泽县城北的沁河干流上,而沁河为黄河的一级支流,根据《山西省地表水域环境管理区域方案》,工程所在区域为工业用水功能,执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类水标准。因而,由表 2 和表 3 可以看出,引沁入汾工程水源地水质状况良好,总体均能达到水质功能区Ⅳ类水要求。表 3 中的水质综合指数 I 值,即为构建联合分布函数所用的水质数据。

2.1.2 边缘分布 Copula 函数方法不受变量边际分布形式的限制,对于单变量水文数据系列的分析,

在我国常假定水文变量服从皮尔逊Ⅲ型(P-Ⅲ)分布。因此,本部分选用 P-Ⅲ型,其分布表达式为:

$$P=P(x>x_p)=\frac{\beta^a}{\Gamma(\alpha)}\int_{x_p}^{\infty}(x-a_0)^{a-1}e^{-\beta(x-a_0)}dx.$$

(10)

式中: $\Gamma(\alpha)$ 为伽马函数; $\alpha=1/C_s^2$; $\beta=2/(\bar{x}C_sC_v)$,其中 $\bar{x}$ 为均值, C_s 为偏态系数, C_v 为变差系数; $a_0=x(1-2C_v/C_s)$ 。

采用矩法对 P-Ⅲ型分布进行参数估计,得到飞岭水文站水量和水质分布参数的估计值如表 4 所示。

表 4 飞岭水文站水量和水质二维边缘分布函数的参数估计值

Table 4 Parameter estimation of two-dimensional edge distribution function

指标 Index	均值 Average	变差系数 C_v	偏态系数 C_s	α	β	a_0
年径流量 Annual runoff	1.281 6	0.750 0	1.397 3	2.048 7	1.489 1	-0.094 2
水质综合指数 Synthetic index for water quality	30.106 5	0.451 9	0.658 5	9.224 6	0.223 2	-11.215 1

2.1.3 Copula 函数参数估计和类型选择 计算所得到的 Kendall 系数 $\tau = -0.165\ 6$, 呈弱负相关关系。从各 Copula 函数对变量相关关系的要求来看:

表 5 Copula 函数各参数计算结果

Table 5 Parameter calculation of Copula function

Kendall 系数 τ Kendall coefficient τ	参数 Parameter	Copula 函数类型 Copula function type	
		Frank	Ali-Mikhail-Hap
-0.165 6	θ	0.105 1	0.575 2
	D	0.218 7	0.239 3
	OLS	0.091 6	0.101 3

由表 5 可知, Frank Copula 函数的 OLS 值为 0.091 6, Ali-Mikhail-Hap Copula 函数的 OLS 值为 0.101 3, 所以, 本研究选用 Frank Copula 函数作为水量水质联合分布函数。

采用以下公式计算二维联合分布的经验频率, 即:

$$H(x,y)=P(X\leqslant x_i,Y\leqslant y_i)=\frac{\sum_{m=1}^i\sum_{n=1}^iN_{mn}-0.44}{N+0.12}。$$

(11)

式中: P 为满足 $X \leqslant x_i, Y \leqslant y_i$ 的经验概率, N_{mn} 为 $X \leqslant x_i$ 且 $Y \leqslant y_i$ 的数目, N 为样本容量。

图 3 为利用 Frank Copula 函数模型得出的研究区域在不同时间尺度下水量水质联合分布的理论分布与经验点的拟合情况, 其复相关系数 $R^2 = 0.939\ 9$, 拟合状况良好。

2.1.4 联合风险分析 根据前面所建立的模型对引沁入汾工程水源地水量水质联合风险进行研究,

Frank Copula、Ali-Mikhail-Hap Copula 函数适用于本研究的数据序列, 可以根据这 2 种函数来确定 θ 、 D 、 OLS 。各参数具体计算结果如表 5 所示。

可将水量水质的联合分布分为 18 种情况, 其联合分布概率的计算结果如表 6 所示。

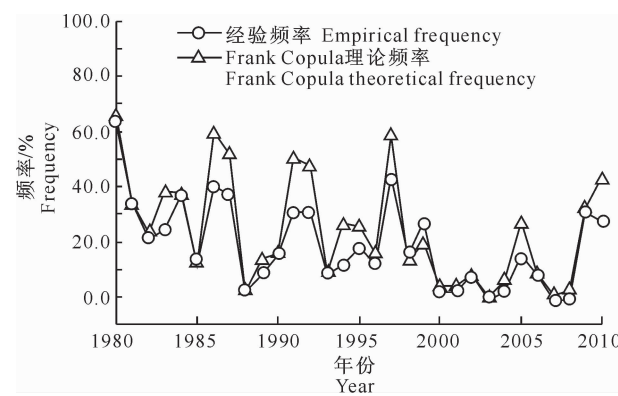


图 3 引沁入汾工程水源地水量水质联合分布理论分布与经验点的拟合情况

Fig. 3 Joint distribution of quantity and quality of water sources of water diversion project from Qin River to Fen River to fit the situation between experience points and theoretical distribution

表 6 引沁入汾工程水源地水量水质风险的联合分布概率

Table 6 Joint distribution probability of water quantity and quality risk of water sources of water diversion project from Qin River to Fen River

水量 Water quantity	I	II	III	IV	V	劣 V Worse than V
丰 Rich	2.65	9.20	15.54	6.28	0.68	0.00
平 Moderate	1.22	4.22	7.13	2.89	0.31	0.00
枯 Pool	3.94	13.69	23.18	9.35	1.01	0.01

注: 径流丰枯划分为: 丰水期 $\geqslant 1.15\bar{Q}$, $0.85\bar{Q} < \text{平水期} < 1.15\bar{Q}$, 枯水期 $\leqslant 0.85\bar{Q}$, $\bar{Q}$ 为多年平均径流量。表 7 同。
Note: Criteria for the classification of low and high runoffs: high flow state $\geqslant 1.15\bar{Q}$, $0.85\bar{Q} < \text{normal flow state} < 1.15\bar{Q}$, low flow state $\leqslant 0.85\bar{Q}$, $\bar{Q}$ is the annual average runoff volume. The same for Table 7.

对是否有利于调水, 本研究规定, 在水量水质联合分布的 18 种情况中, 若水源地水质达标 (即优于或等于 IV 类水), 则有利于调水; 反之, 则不利于调水。由表 6 可以看出, 丰水期、平水期、枯水期水质达标的分布概率分别为 33.67%, 15.46%, 50.16%, 因水质原因, 有利于调水的概率为 99.29%。同样可得, 丰、平、枯水期水质不达标的概率分别为 0.68%, 0.31%, 1.02%, 因水质不达标而

不利于调水的概率为 2.01%。总体而言, 引沁入汾工程水源地径流量无论处于哪种状态, 水质不达标的概率均较小。在不利于调水的组合中, 处于枯水期且水质不达标为最不利调水情况, 其概率为 1.02%; 在有利于调水的组合中, 处于丰水期且水质达标为最有利调水情况, 其概率为 33.67%, 处于枯水期且水质达标为有利调水最少的情况, 其概率为 50.16%。

若已知径流量的丰枯状态,可用条件概率的计算来预测水质情况。若已知径流处于丰水期,则预测水质超标的概率为:

$$P(Y>62.777\ 8|X\geqslant 1.473\ 8)=\frac{P(X\geqslant 1.473\ 8,Y>62.777\ 8)}{P(X\geqslant 1.473\ 8)}=2.03\%;$$

若径流处于平水期,则预测水质超标的概率为:

$$P(Y>62.777\ 8|1.089\ 4<X<1.473\ 8)=\frac{P(1.089\ 4<X<1.473\ 8,Y>62.777\ 8)}{P(1.089\ 4<X<1.473\ 8)}=2.05\%;$$

若径流处于枯水期,则预测水质超标的概率为:

$$P(Y>62.777\ 8|X\leqslant 1.089\ 4)=\frac{P(X\leqslant 1.089\ 4,Y>62.777\ 8)}{P(X\leqslant 1.089\ 4)}=2.01\%。$$

从条件概率的计算可以看出:无论径流量处于哪种状态,所预测水质的超标概率均较小。

2.2 基于 TN 的水量水质联合风险分析

采用引沁入汾工程水源地飞岭水文站 1980—2010 年的年径流量数据和污染最为严重的水质指

标 TN 作为构建 Copula 水量水质联合分布函数的基础数据。经过对比分析,水量采用 P-Ⅲ 型分布,水质指标 TN 采用 Gumbel 分布。经计算 Frank Copula 函数适合作为该联合分布的函数。

根据所建立的模型对引沁入汾工程水源地水量水质联合风险进行研究,可将水量与 TN 的联合分布分为 18 种情况,具体情况及计算结果如表 7 所示。在表 7 水量水质联合分布的 18 种情况中,若水源地 TN 达标(即优于或等于Ⅳ类水中 TN 的标准),则有利于调水;反之,则不利于调水。经过分析可以得出:就整个调水时期而言,有利于调水的概率为 32.16%,不利于调水的概率为 69.16%。在不利于调水的组合中,处于枯水期且 TN 不达标为最不利调水情况,其概率为 34.96%;在有利于调水的组合中,处于丰水期且 TN 达标为最有利调水情况,其概率为 10.91%,处于枯水期且 TN 达标为有利调水最少的情况,其概率为 16.23%。

表 7 基于 TN 的引沁入汾工程水源地水量水质风险的联合分布概率

Table 7 Joint distribution probability of water quantity and quality risk of water sources of water diversion project from Qin River to Fen River based on TN

水量 Water quantity	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	V	劣 V Worse than V
丰 Rich	0.94	1.22	3.62	5.13	5.52	17.93
平 Moderate	0.43	0.56	1.67	2.36	2.54	8.21
枯 Pool	1.39	1.82	5.39	7.63	8.21	26.75

3 结 论

(1)引沁入汾工程水源地水质状况良好,总体均能达到水质功能区Ⅳ类水要求。

(2)通过水量与水质综合指数计算得到的联合风险可以看出:就整个调水时期而言,有利于调水的概率为 99.29%,不利于调水的概率为 2.01%。在不利于调水的组合中,处于枯水期且水质不达标为最不利调水情况,其概率为 1.02%;在有利于调水的组合中,处于丰水期且水质达标为最有利调水情况,其概率为 33.67%,处于枯水期且水质达标为有利调水量最少的情况,其概率为 50.16%。

(3)通过水量与污染最为严重的水质指标 TN 计算得到的联合风险可以看出:就整个调水时期而言,有利于调水的概率为 32.16%,不利于调水的概率为 69.16%。在不利于调水的组合中,处于枯水期且 TN 不达标为最不利调水情况,其概率为 34.96%;在有利于调水的组合中,处于丰水期且 TN 达标为最有利调水情况,其概率为 10.91%,处

于枯水期且 TN 达标为有利调水最少的情况,其概率为 16.23%。

由此可以看出:引沁入汾工程水源地适合作为该取水工程的取水源地,但以后需加强对 TN 的控制和治理,该研究结果既可为引调水工程水源地水量水质联合风险的研究提供借鉴,也可作为引调水工程的建设提供科学依据。

[参考文献]

[1] 莫淑红,沈 冰,张晓伟,等.基于 Copula 函数的河川径流丰枯遭遇分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(6):131-136.
Mo S H,Shen B,Zhang X W,et al. Synchronous-asynchronous encounter probability of rich-poor runoff based on Copula function[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed), 2009,37(6):131-136.

[2] 丁志宏,冯 平,张 永.基于 Copula 模型的丰枯频率分析:以南水北调西线工程调水区径流与黄河上游来水的丰枯遭遇研究为例[J].长江流域资源与环境,2010,19(7):759-764.
Ding Z H,Feng P,Zhang Y. Rich poor frequency analysis of runoff based on Copula model:a case study on encounter proba-

- bility of rich-poor runoff between rivers in area of western route of south to north water transfer project and that of the upper reach of the Yellow river [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(7): 759-764.
- [3] 张忠波, 张双虎, 王 浩. 基于 Copula 函数的三峡工程供水期丰枯遭遇分析 [J]. 人民长江, 2012, 43(3): 5-8.
Zhang Z B, Zhang S H, Wang H. Analysis of wetness-dryness encounter in TGP water supply period based on Copula function [J]. Yangtze River, 2012, 43(3): 5-8.
- [4] 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 H, Luo Q, Huang J S. Synchronous asynchronous encounter analysis of multiple hydrologic regions based on 3D copula function [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 186-193.
- [5] 何庆升, 朱永忠. 应用高维 Copula 函数的月径流量联合概率分布研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2013, 27(8): 112-120.
He Q S, Zhu Y Z. Studying of annual flow joint probability distribution based on high dimensions Copula function [J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science Edition), 2013, 27(8): 112-120.
- [6] Jeong C, Lee T. Copula-based modeling and stochastic simulation of seasonal intermittent streamflows for arid regions [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2015, 9(4): 604-613.
- [7] 冯民权, 郝竹林, 张园园, 等. 禹门口调水工程水源区与受水区径流丰枯遭遇风险分析研究 [J]. 自然灾害学报, 2012, 21(6): 156-163.
Feng M Q, Hao Z L, Zhang Y Y, et al. Risk analysis of runoff rich poor encounter between water source area and receiving area of Yumenkou water transfer project [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(6): 156-163.
- [8] Yu K X, Xiong L H, Lars G. Derivation of low flow distribution functions using copulas [J]. Journal of Hydrology, 2014, 508: 273-288.
- [9] 牛军宜, 冯 平, 丁志宏. 基于多元 Copula 函数的引滦水库径流丰枯补偿特性研究 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(6): 1095-1100.
Niu J Y, Feng P, Ding Z H. Study of the wetness-dryness compensation characteristics of Luan River diversion reservoirs' inflow based on multivariate Copula Functions [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(6): 1095-1100.
- [10] 郑红星, 刘昌明. 南水北调东中两线不同水文区降水丰枯遭遇性分析 [J]. 地理学报, 2000, 55(5): 523-532.
Zheng H X, Liu C M. Analysis on a synchronism-synchronism of regional precipitation in planned South-to-North water transfer areas [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 523-532.
- [11] 熊其玲, 何小聪, 康 玲. 基于 Copula 函数的南水北调中线降水丰枯遭遇分析 [J]. 水电能源科学, 2009, 27(6): 9-11, 112.
- Xiong Q L, He X C, Kang L. Synchronous asynchronous encounter probability of rich poor precipitation between water source area and water receiving area based on Copula theory in middle route of South to North water transfer project [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(6): 9-11, 112.
- [12] 王 伟, 钟永华, 雷晓辉, 等. 引汉济渭工程水源区与受水区丰枯遭遇分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 23-26, 36.
Wang W, Zhong Y H, Lei X H, et al. Synchronous-asynchronous encounter probability of rich-poor precipitation between water source area and water receiving area of the Han-jiang-to-Weihe River water transfer project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 23-26, 36.
- [13] Zoubeida K B, Andras B. Modeling short duration extreme precipitation patterns using copula and generalized maximum pseudo-likelihood estimation with censoring [J]. Advances in Water Resources, 2015, 84: 1-13.
- [14] 陈 璐, 郭生练, 张洪刚, 等. 长江上游干支流洪水遭遇分析 [J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 323-330.
Chen L, Guo S L, Zhang H G, et al. Flood coincidence probability analysis for the upstream Yangtze River and its tributaries [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 323-330.
- [15] 李 伟. Copula 函数在多变量洪水联合分布中的应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
Li W. The application and research of multivariate flood joint distribution based on Copula theory [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [16] Fan Y R, Huang W W, Huang G H, et al. Hydrologic risk analysis in the Yangtze River basin through coupling Gaussian mixtures into copulas [J]. Advances in Water Resources, 2016, 88: 170-185.
- [17] 张 翔, 冉啟香, 夏 军, 等. 基于 Copula 函数的水量水质联合分布函数 [J]. 水利学报, 2011, 42(4): 483-489.
Zhang X, Ran Q X, Xia J, et al. Jointed distribution function of water quality and water quantity based on Copula [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 483-489.
- [18] 陈仁杰, 钱海雷, 阚海东, 等. 水质评价综合指数法的研究进展 [J]. 环境与职业医学, 2009, 26(6): 581-584.
Chen R J, Qian H L, Kan H D, et al. A review of comprehensive index methods in water quality assessment [J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2009, 26(6): 581-584.
- [19] Zhang L. Multivariate hydrological frequency analysis and risk mapping [D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2005.
- [20] 李凡修, 陈 武, 梅 平, 等. 浅层地下水环境质量评价的综合指数模型 [J]. 地下水, 2004, 26(1): 36-37.
Li F X, Chen W, Mei P, et al. Synthetic index model of shallow groundwater environment quality evaluation [J]. Ground Water, 2004, 26(1): 36-37.