

卫河流域河南段不同时期水环境风险评估

张彦, 邹磊, 窦明, 李平, 梁志杰

引用本文:

张彦, 邹磊, 窦明, 李平, 梁志杰. 卫河流域河南段不同时期水环境风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1778–1789.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0999>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

降雨和施肥对秦岭北麓俞家河水质的影响

郭泽慧, 刘洋, 黄懿梅, 晏江涛, 腾飞, 王永斌

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 158–166 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0893>

复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟——以南京市云台山河流域为例

任智慧, 赵春发, 王青青, 徐蕴韵, 郭加汛, 王腊春

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 174–184 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0853>

大沽河溶解态无机氮时空分布特征及来源探讨

夏云, 张波涛, 姜德娟

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 182–190 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0809>

沱江水质模糊综合评价及主要污染物的预测研究

符东, 吴雪菲, 易珍言, 陈永灿

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2844–2852 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0730>

农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评价研究——以淮河流域为例

宋大平, 左强, 刘本生, 邹国元, 刘东生

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1219–1231 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1374>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张彦, 邹磊, 窦明, 等. 卫河流域河南段不同时期水环境风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1778-1789.

ZHANG Y, ZOU L, DOU M, et al. Water environmental risk assessment across different periods in the Henan section of the Wei River basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(8): 1778-1789.

卫河流域河南段不同时期水环境风险评估

张彦^{1,2}, 邹磊³, 窦明^{2,4*}, 李平^{1,5}, 梁志杰¹

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2. 郑州大学水利与土木工程学院, 郑州 450001; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程国家重点实验室, 北京 100101; 4. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001; 5. 农业农村部农产品质量安全水环境因子风险评估实验室, 河南 新乡 453002)

摘要: 为了评估卫河流域河南段不同时期水环境风险, 选取卫河流域4个监测断面和3种水体污染物[化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)和总磷(TP)]的监测数据, 通过建立边缘分布函数和优选Copula函数构建适宜的水体污染物三维联合风险分布模型, 分析了不同时期卫河流域水体污染物的组合风险概率。结果表明: 监测断面卫辉皇甫(非汛期和汛期)、浚县王湾(非汛期)和大名龙王庙(非汛期和汛期)的水体污染物间拟合优度最好的三维Copula函数为Gaussian Copula函数, 监测断面浚县王湾(汛期)和汤阴五陵(非汛期和汛期)的水体污染物间拟合优度最好的三维Copula函数为 t Copula函数; 在非汛期和汛期大名龙王庙水体污染物均处于Ⅰ~Ⅲ类水质标准的联合概率最大, 分别为26.30%和21.61%, 卫辉皇甫水体污染物至少有一个指标处于劣Ⅴ类水质标准时的联合风险概率最大, 分别为52.34%和56.53%; 当仅NH₃-N处于劣Ⅴ类水质标准时, 监测断面卫辉皇甫、浚县王湾、汤阴五陵和大名龙王庙非汛期水体污染物的联合风险概率分别为25.68%、22.94%、24.68%和13.47%, 汛期水体污染物的联合风险概率分别为28.01%、10.31%、6.16%和4.12%; 在非汛期和汛期监测断面卫辉皇甫和浚县王湾主要受工业废水和生活污水污染的影响且其主导水体污染物均为NH₃-N, 在汛期时监测断面汤阴五陵和大名龙王庙主要受农业面源污染的影响且其主导水体污染物由非汛期的NH₃-N转变为汛期的TP。研究表明, 受到不同污染源的影响卫河流域河南段不同时期水体污染物的联合风险概率具有一定的差异性。

关键词: 卫河流域; 河南; Copula函数; 水体污染物; 风险评估

中图分类号: X52; X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)08-1778-12 doi:10.11654/jaes.2022-0999

Water environmental risk assessment across different periods in the Henan section of the Wei River basin

ZHANG Yan^{1,2}, ZOU Lei³, DOU Ming^{2,4*}, LI Ping^{1,5}, LIANG Zhijie¹

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 5. Laboratory of Quality and Safety Risk Assessment for Agro-Products on Water Environmental Factors, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang 453002, China)

Abstract: In order to evaluate the water environmental risk in the Henan section of the Wei River basin across different periods, monitoring data on three kinds of water quality indicators[chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen (NH₃-N) and total phosphorus (TP)] were selected at four monitoring sections. The appropriate three-dimensional joint risk probability distribution model of water pollutants

收稿日期: 2022-10-09 录用日期: 2023-01-10

作者简介: 张彦(1989—), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事水资源与水环境研究。E-mail: zhangyan09@caas.cn

*通信作者: 窦明 E-mail: dou_ming@163.com

基金项目: 河南省自然科学基金项目(212300410310); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(FIRI2022-01); 国家自然科学基金项目(42101043, 51879239)

Project supported: The Natural Science Foundation of Henan Province, China(212300410310); The Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund(FIRI2022-01); The National Natural Science Foundation of China(42101043, 51879239)

was constructed by establishing the marginal distribution function and the optimal Copula function, and the combined risk probability of water pollutants in different periods was analyzed. The results showed that the Gaussian Copula function was the best three-dimensional Copula function for the water pollutants in the monitoring sections of Weihui Huangfu (non-flood season and flood season), Xunxian Wangwan (non-flood season) and Daming Longwangmiao (non-flood season and flood season), and t Copula function were the best three dimensional Copula function for the water pollutants at Xunxian Wangwan (flood season) and Tangyin Wuling (non-flood season and flood season). The maximum joint probabilities were respectively 26.30% and 21.61% in non-flood season and flood season at Daming Longwangmiao when the water pollutants were in the I – III water quality standard, while the maximum joint risk probabilities were 52.34% and 56.53% in non-flood season and flood season at Weihui Huangfu when at least one index of the water pollutants was in the inferior V water quality standard. The joint risk probabilities of the water pollutants in non-flood season were 25.68%, 22.94%, 24.68% and 13.47% at Weihui Huangfu, Xunxian Wangwan, Tangyin Wuling and Daming Longwangmiao, respectively when only $\text{NH}_3\text{-N}$ was under the quality standard of inferior V, while the joint risk probabilities of the water pollutants in flood season were 28.01%, 10.31%, 6.16% and 4.12%, respectively. The monitoring sections of Weihui Huangfu and Xunxian Wangwan were mainly affected by industrial wastewater and domestic sewage pollution during the non-flood and flood seasons, and the dominant water pollutant was $\text{NH}_3\text{-N}$. The monitoring sections of Tangyin Wuling and Daming Longwangmiao were mainly affected by agricultural non-point sources of pollution during the flood season, and the dominant water pollutant changed from $\text{NH}_3\text{-N}$ during the non-flood season to TP in flood season. The joint risk probabilities of water pollutants in the Henan section of the Wei River basin were different in different periods.

Keywords: Wei River basin; Henan; Copula function; water pollutant; environmental risk assessment

随着社会经济的快速发展和人民生活水平的不断提高,诱发流域水环境问题日益凸显,流域水环境风险不断增加,从而限制了流域水环境绿色健康持续发展^[1-2]。流域水环境风险是指河湖水体受到有毒有害污染物的污染风险,进而给河湖生态环境健康带来危害,其影响因素主要有风险源、河流特性、自然地理和社会发展条件以及水污染治理能力等^[3]。目前,利用贝叶斯、蒙特卡罗、神经网络、遥感(RS)和地理信息系统(GIS)等技术方法建立的随机模型、灰色模型、模糊模型、信息熵模型、健康风险评估模型以及生态系统服务功能(INVEST)和德尔菲法风险评估模型等被普遍应用于流域水环境风险评价中^[4-6],如:王泽正等^[7]通过贝叶斯网络拓扑结构分析与启发式搜索算法快速辨析了饮马河流域内典型污染源及其污染贡献;祝慧娜等^[8]构建了河流水环境污染风险模糊综合评价模型对湘江水环境风险进行评价;徐凌云等^[9]和叶帮玲^[10]分别利用INVEST和RS+GIS风险评估模型对黑水河流域和湘江长沙段水质污染发生风险进行了评估;宋策等^[11]、王越兴等^[12]和李中原等^[13]分别利用二维水流水质模型、压力-状态-响应模型和健康风险评估模型对汉江上游水源地、深圳水库水源地以及白龟山水库水源地的水质风险及健康风险进行了评估;Derbalah等^[14]运用风险商方法对日本河流的生态毒理学风险进行了评估;施恩等^[15]和罗昊等^[16]分别建立了适用于辽河流域辽宁段和流溪河流域水环境累积风险的评估体系;李海燕^[17]利用GIS技术和相

对风险评价模型对大宁河水环境风险进行评估并划分了风险等级;Zhu等^[18]、Xu等^[19]和Safakhah等^[20]分别评估了有机物在白洋淀和抚河、黄浦江及伊朗波斯湾北端穆萨河口中的水环境生态风险。

此外,Copula函数作为一种计算变量间风险概率的方法,被广泛应用于降水径流丰枯遭遇、水质水量联合分布和水生态环境稳态关系分析中^[21],如:杨蕊等^[5]构建了基于Vine Coupla函数的水环境多因子联合风险模型并识别出了南四湖潜在水环境多因子联合风险;牛军宜等^[22]运用Copula函数理论定量地分析了水体污染物的超标风险概率;张彦等^[23]和王起峰等^[24]基于Copula函数分别评估了小型湖泊和太湖不同分区富营养化的风险。虽然Copula函数理论目前已应用于水环境风险研究中,但其中大部分仅注重单一的水质、水量或污染物的超标风险,而整体上河流水环境组合风险评估的研究相对较少,为此本研究以卫河流域河南段为研究对象,选择卫河流域河南段4个主要的监测站点和3个水体污染物指标,在建立边缘分布、Copula联合分布函数的基础上,定量分析卫河流域河南段不同时期水体污染物指标间的组合风险概率,研究成果对卫河流域水环境管理和综合防治具有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及数据来源

卫河属于海河流域漳卫南水系,其发源于山西省陵川县夺火镇,至河北馆陶与漳河汇合,流经河南省

焦作市、新乡市、鹤壁市、安阳市和濮阳市5个省辖市,流域面积约为1.53万km²,流域内主要河流包括卫河干流、大沙河、共产主义渠、淇河、安阳河、马颊河、汤河等^[25-26]。卫河流域河南段受到城市扩张以及工农业发展的影响,其水体污染物主要来自于工业废水、生活污水以及农田化肥和农药的施用^[27]。根据《2018年度河南省环境统计年报》,2018年新乡市、鹤壁市和安阳市废水排放总量分别为31 449.00万、9 542.93万t和16 698.13万t,化学需氧量(COD)排放总量分别为14 307.04、13 056.43 t和16 607.54 t,氨氮(NH₃-N)排放总量分别为1 584.82、1 510.93 t和3 021.79 t。根据各地市统计年鉴(2021),2020年新乡市、鹤壁市、安阳市和邯郸市农用化肥施用量分别为51.13万、6.97万、40.12万t和41.81万t,农药使用量分别为7 992、892、5 206 t和5 128 t;辉县市、浚县、汤阴县和大名县农用化肥施用量分别为7.79万、4.33万、4.06万t和4.09万t,农药使用量分别为897.4、530、497 t和658.0 t。

本研究数据主要来源于《河南省地表水环境责任目标断面水质周报》、各地市的《地表水环境责任目标断面水质月报》和《环境质量月报》等,本文选取了卫河流域河南段卫河干流的4个地表水环境责任目标断面的3项水体污染物指标,监测断面主要有卫辉皇甫、汤阴五陵、浚县王湾和卫辉皇甫,具体位置详见图1。水体污染物指标主要为COD、NH₃-N和总磷

(TP),监测时段为2015年7月至2020年12月。在文中所涉及的不同时期中,汛期为6—9月份,其余月份为非汛期;水质监测数据分析执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)。

1.2 研究方法

1.2.1 边缘分布建立

根据卫河流域河南段4个监测站点逐月的监测数据,得到水体污染物(COD、NH₃-N和TP)的监测序列{ x_n | $n = 1, 2, \dots, N$ }, N 是监测序列的个数。对于监测序列{ x_n }中的任意一个样本值 x_m ,如果监测序列{ x_n }中小于 x_m 的数目为 N_m ,那么可以把 x_m 对应的累积概率表示为:

$$P(x_m) = P(x_i \leq x_m) = \frac{N_m}{N} \quad (1)$$

式中: $P(x_m)$ 为事件 $x_i \leq x_m$ 的概率函数; x_i 为某一水质监测指标。求出监测序列{ x_n }中所有样本值的概率,得到监测序列{ x_n }的概率分布曲线。

1.2.2 联合分布概率

假设 X 、 Y 和 Z 分别表示卫河流域河南段水环境事件中具有相互关系的指标序列,其边缘分布函数分别为 $u=F(x)$ 、 $v=F(y)$ 、 $w=F(z)$,则其三维联合分布概率的表达式如下^[28]:

$$F_{uvw}(u, v, w) = P(X \leq x, Y \leq y, Z \leq z) = \int_{-\infty}^u \int_{-\infty}^v \int_{-\infty}^w f(u, v, w) du dv dw = C(u, v, w) \quad (2)$$



图1 卫河流域河南段水体污染物监测断面分布

Figure 1 Distribution of water pollutant monitoring sections at the Wei River basin

1.2.3 Copula联合分布函数的建立

卫河流域河南段水体污染是水质恶化的一种综合表征,其评价指标通常由多个水体污染物指标构成,故其水环境组合风险是由水体污染物指标超过标准限值形成不同的组合风险。因此,利用Copula函数建立各水体污染物指标间的联合分布函数,进而定量分析卫河流域河南段的水环境组合风险概率。基于三维Copula函数的水环境组合风险评估分布模型^[28-32]为:

Gaussian Copula:

$$C(u, v, w; \rho) = \Phi_{\rho}[\Phi^{-1}(u), \Phi^{-1}(v), \Phi^{-1}(w)] \quad (3)$$

t-Copula:

$$C(u, v, w; \rho, k) = t_{\rho, k}[t_k^{-1}(u), t_k^{-1}(v), t_k^{-1}(w)] \quad (4)$$

式中: ρ 是对角线上的元素全为1的三阶对称正定矩阵; Φ_{ρ} 表示相关系数矩阵为 ρ 的三元标准正态分布的分布函数; Φ^{-1} 表示标准正态分布的分布函数的逆函数; $t_{\rho, k}$ 表示相关系数矩阵为 ρ ,自由度为 k 的标准三元 t 分布的分布函数; t_k^{-1} 表示自由度为 k 的三元 t 分布的分布函数的逆函数。

1.2.4 Copula函数拟合度检验和拟合优度评价

Copula函数的拟合度检验主要是分析所选用的Copula函数是否合适,能不能恰当地描述变量之间的相关性。通过拟合度检验的Copula函数可以根据拟合优度评价指标进行下一步的优选Copula模型,本文主要运用K-S检验的统计量 D 进行Copula函数的拟合度检验。拟合优度评价是筛选Copula函数联合分布概率的重要标准,常用的拟合优度评价方法主要有图形评价分析法、均方根误差法、赤池信息量准则法和贝叶斯信息准则法,这些方法的原理和求解过程可参考文献[28, 33]。

$$D = \max_{1 \leq k \leq n} \left\{ \left| C_k - \frac{m_k}{n} \right|, \left| C_k - \frac{m_k - 1}{n} \right| \right\} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_c(i) - P_0(i)]^2} \quad (6)$$

$$AIC = n \ln MSE + 2m \quad (7)$$

$$BIC = n \ln MSE + m \ln n \quad (8)$$

式中: D 为K-S检验的统计量; C_k 为联合观测样本 $x_k = (x_{1k}, x_{2k})$ 的Copula函数值; m_k 为联合观测样本中满足 $x \leq x_k$,同时满足 $x \leq x_{1k}, x \leq x_{2k}$ 的联合观测值的个数; n 为变量级数的长度; $RMSE$ 为均方根误差; MSE 为均方误差; AIC 为赤池信息量准则; BIC 为贝叶斯信息准则; $P_c(i)$ 为Copula函数的多元联合概率分布的计算值; $P_0(i)$ 为Copula函数的多元联合概率分布的经验

值; m 为模型参数的个数。

2 结果与分析

2.1 边缘分布建立

对卫河流域河南段监测断面水体污染物(COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP)的边缘分布函数进行K-S检验可知,对于监测断面卫辉皇甫,在非汛期和汛期,COD与TP的Pearson秩相关系数分别为0.430和0.476($P < 0.01$), Kendall秩相关系数分别为0.224和0.225($P < 0.05$), $\text{NH}_3\text{-N}$ 与TP的Pearson秩相关系数分别为0.721和0.782($P < 0.01$), Kendall秩相关系数分别为0.565和0.591($P < 0.01$)。对于监测断面浚县王湾,在非汛期和汛期,COD与TP的Pearson秩相关系数分别为0.637和0.425($P < 0.01$), Kendall秩相关系数分别为0.427和0.323($P < 0.01$), $\text{NH}_3\text{-N}$ 与TP的Pearson秩相关系数分别为0.697和0.576($P < 0.01$), Kendall秩相关系数分别为0.513和0.604($P < 0.01$)。对于监测断面汤阴五陵,在非汛期和汛期,COD与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的Pearson秩相关系数分别为0.643和0.631($P < 0.01$), Kendall秩相关系数分别为0.425和0.385($P < 0.01$), COD与TP的Pearson秩相关系数分别为0.514和0.678($P < 0.01$), Kendall秩相关系数分别为0.362和0.448($P < 0.01$), $\text{NH}_3\text{-N}$ 与TP的Pearson秩相关系数分别为0.560和0.810($P < 0.01$), Kendall秩相关系数分别为0.499和0.344($P < 0.01$)。对于监测断面大名龙王庙,在非汛期和汛期,COD与TP的Pearson秩相关系数分别为0.531和0.239($P < 0.05$), Kendall秩相关系数分别为0.325和0.211($P < 0.05$), $\text{NH}_3\text{-N}$ 与TP的Pearson秩相关系数分别为0.381和0.741($P < 0.05$), Kendall秩相关系数分别为0.338和0.394($P < 0.05$)。受篇幅限制,本文仅将监测断面大名龙王庙不同时期水体污染物边缘分布图列出,如图2所示。由上可知,卫河流域河南段各监测断面水体污染物间均具有较高的相关性,故可以在卫河流域河南段利用Copula函数建立各监测断面水体污染物间的三维联合分布函数。

2.2 Copula函数选择

本文选用Gaussian和 t Copula函数构建卫河流域河南段各监测断面水体污染物(COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP)指标间的三维联合分布模型。三维联合分布模型的参数估计、K-S检验以及拟合优度评价结果如表1所示。由表1可知,各监测断面不同Copula函数的统计量 D 在非汛期和汛期均符合K-S检验的95%显著性水平 [$D < 0.181 (n=43)$, $D < 0.275 (n=23)$, $\alpha=0.05$], 表明

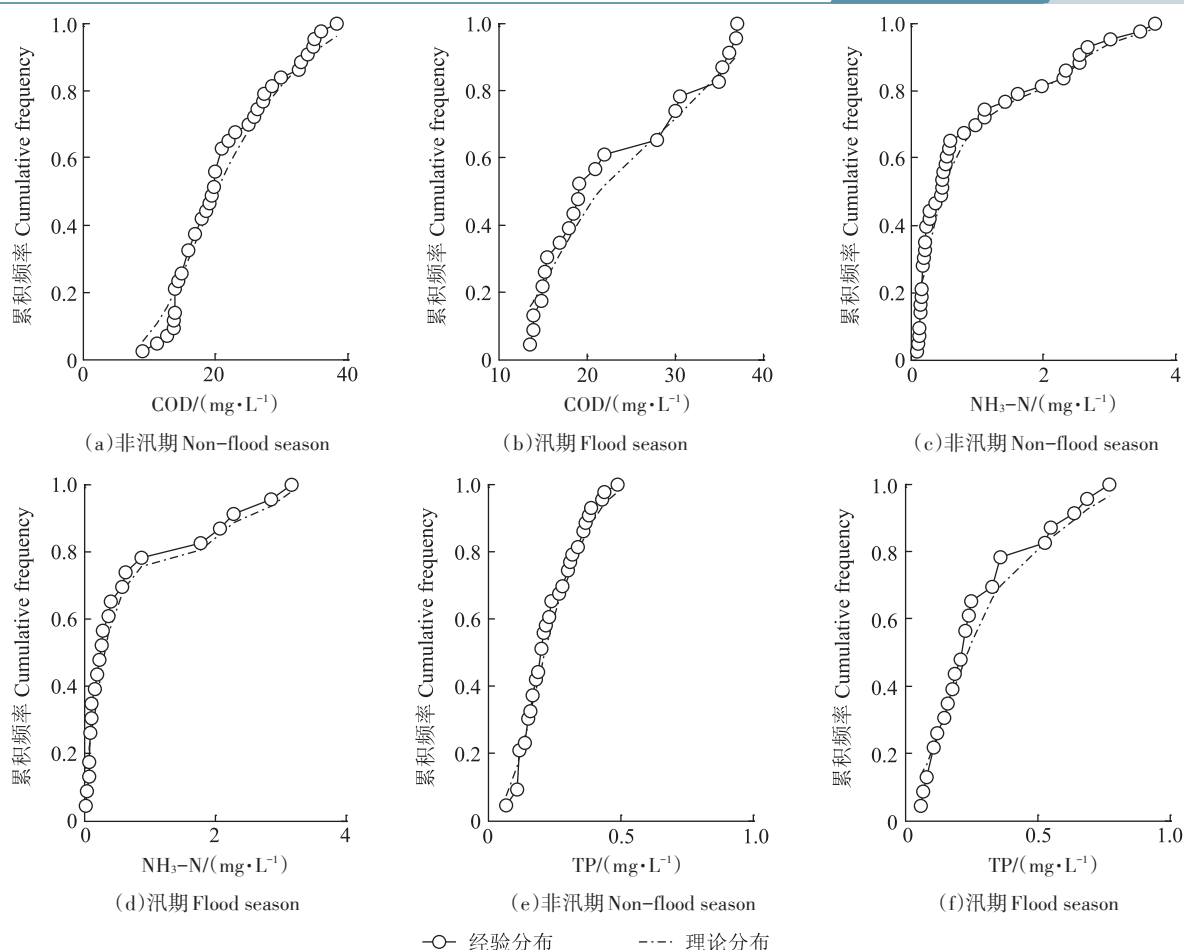


图2 大名龙王庙不同时期水体污染物边缘分布

Figure 2 Marginal distribution of the water pollutants at the Daming Longwangmiao station

所选 Copula 函数均通过检验。

利用均方根误差法、赤池信息量准则法及贝叶斯信息准则法对非汛期和汛期各监测断面水体污染物指标间的 Copula 函数进行拟合优度评价,结果见表 1。在非汛期,监测断面卫辉皇甫、浚县王湾和大名龙王庙水体污染物指标间的拟合度最优的均为 Gaussian Copula 函数,其 *RMSE* 最小分别为 0.033 9、0.036 7 和 0.038 1, *AIC* 最小分别为 -285.12、-277.56 和 -275.01, *BIC* 最小分别为 -281.60、-274.04 和 -271.49;监测断面汤阴五陵水体污染物指标间的拟合度最优的为 *t* Copula 函数,其 *RMSE*、*AIC* 和 *BIC* 均最小,分别为 0.037 0、-277.52 和 -273.99。在汛期,监测断面卫辉皇甫和大名龙王庙水体污染物指标间的拟合度最优的均为 Gaussian Copula 函数,其 *RMSE* 最小分别为 0.044 0 和 0.049 7, *AIC* 最小分别为 -137.60 和 -132.03, *BIC* 最小分别为 -135.33 和 -129.76;监测断面浚县王湾和汤阴五陵水体污染物指标间的拟合度最优的均

为 *t* Copula 函数,其 *RMSE* 最小分别为 0.054 6 和 0.038 4, *AIC* 最小分别为 -127.68 和 -143.89, *BIC* 最小分别为 -125.41 和 -141.62。因此,分别选择拟合优度最好的 Copula 函数构建各监测断面水体污染物指标间三维联合分布模型。

各监测断面水体污染物指标间的三维联合概率函数的理论频率与经验频率的拟合情况如图 3 所示。在 Gaussian Copula 函数下监测断面卫辉皇甫非汛期和汛期、浚县王湾非汛期、大名龙王庙非汛期和汛期水体污染物理论频率与经验频率间的相关系数分别为 0.992 4、0.980 3、0.992 2、0.980 9 和 0.980 9,在 *t* Copula 函数下监测断面浚县王湾汛期、汤阴五陵非汛期和汛期水体污染物理论频率与经验频率间的相关系数分别为 0.986 7、0.992 8 和 0.991 1。则各监测断面水体污染物指标间的三维联合概率函数的理论频率与经验频率的拟合情况均较好,表明选取的 Copula 函数建立的三维联合分布模型较为合理。

表1 不同时期各监测断面水体污染物指标间的三维联合概率分布拟合优度评价

Table 1 Goodness of fit evaluation of the two-dimensional joint probability distribution of the water pollutants at each monitoring section in different periods

时期 Period	监测断面 Monitoring section	Gaussian Copula					t Copula				
		参数 Parameter	D	RMSE	AIC	BIC	参数 Parameter	D	RMSE	AIC	BIC
非汛期 Non-flood season	卫辉皇甫 Weihui Huangfu	$\rho_{12}=0.410\ 2$	0.083\ 6	0.033\ 9	-285.12	-281.60	$\rho_{12}=0.542\ 2$	0.080\ 2	0.034\ 2	-284.21	-280.68
		$\rho_{13}=0.434\ 1$					$\rho_{13}=0.551\ 7$				
		$\rho_{23}=0.784\ 1$					$\rho_{23}=0.845\ 7$				
	浚县王湾 Xunxian Wangwan	$\rho_{12}=0.482\ 0$	0.098\ 8	0.036\ 7	-277.56	-274.04	$\rho_{12}=0.582\ 3$	0.097\ 7	0.038\ 5	-274.11	-270.59
		$\rho_{13}=0.598\ 4$					$\rho_{13}=0.674\ 6$				
		$\rho_{23}=0.689\ 2$					$\rho_{23}=0.772\ 2$				
	汤阴五陵 Tangyin Wuling	$\rho_{12}=0.615\ 3$	0.089\ 0	0.037\ 4	-276.57	-273.04	$\rho_{12}=0.729\ 3$	0.083\ 3	0.037\ 0	-277.52	-273.99
		$\rho_{13}=0.520\ 0$					$\rho_{13}=0.644\ 2$				
		$\rho_{23}=0.646\ 8$					$\rho_{23}=0.747\ 2$				
	大名龙王庙 Daming Longwangmiao	$\rho_{12}=0.353\ 1$	0.096\ 1	0.038\ 1	-275.01	-271.49	$\rho_{12}=0.512\ 6$	0.098\ 0	0.040\ 2	-270.38	-266.85
		$\rho_{13}=0.510\ 7$					$\rho_{13}=0.647\ 4$				
		$\rho_{23}=0.423\ 7$					$\rho_{23}=0.568\ 6$				
汛期 Flood season	卫辉皇甫 Weihui Huangfu	$\rho_{12}=0.225\ 1$	0.109\ 8	0.044\ 0	-137.60	-135.33	$\rho_{12}=0.340\ 3$	0.114\ 3	0.045\ 5	-136.05	-133.78
		$\rho_{13}=0.409\ 3$					$\rho_{13}=0.460\ 4$				
		$\rho_{23}=0.803\ 9$					$\rho_{23}=0.872\ 7$				
	浚县王湾 Xunxian Wangwan	$\rho_{12}=0.285\ 4$	0.142\ 5	0.055\ 5	-126.92	-124.65	$\rho_{12}=0.400\ 6$	0.138\ 9	0.054\ 6	-127.68	-125.41
		$\rho_{13}=0.398\ 4$					$\rho_{13}=0.498\ 2$				
		$\rho_{23}=0.696\ 4$					$\rho_{23}=0.768\ 9$				
	汤阴五陵 Tangyin Wuling	$\rho_{12}=0.531\ 0$	0.107\ 9	0.039\ 6	-142.42	-140.15	$\rho_{12}=0.695\ 6$	0.096\ 4	0.038\ 4	-143.89	-141.62
		$\rho_{13}=0.692\ 0$					$\rho_{13}=0.580\ 0$				
		$\rho_{23}=0.562\ 2$					$\rho_{23}=0.570\ 0$				
	大名龙王庙 Daming Longwangmiao	$\rho_{12}=0.253\ 2$	0.200\ 6	0.049\ 7	-132.03	-129.76	$\rho_{12}=0.434\ 1$	0.237\ 0	0.053\ 0	-129.07	-126.80
		$\rho_{13}=0.252\ 0$					$\rho_{13}=0.441\ 3$				
		$\rho_{23}=0.639\ 5$					$\rho_{23}=0.747\ 4$				

2.3 水体污染物联合风险分析

2.3.1 非汛期水体污染物联合风险概率

基于优选的 Copula 函数建立非汛期各监测断面水体污染物指标间的三维联合分布模型,得到水体污染物指标间的联合分布概率 $P(X\leq x, Y\leq y, Z\leq z)$ 如图4所示,其联合风险概率如表2所示。由各监测断面水体污染物指标间联合风险结果(表2)可知,在非汛期,监测断面卫辉皇甫、浚县王湾、汤阴五陵和大名龙王庙的水体污染物(COD、NH₃-N和TP)均处于Ⅰ~Ⅲ类水质标准的联合概率分别为14.35%、9.25%、21.61%和26.30%,而均处于劣Ⅴ类水质标准的联合风险概率分别为3.51%、2.14%、2.52%和0.44%。当水体污染物(COD、NH₃-N和TP)中至少有一个指标处于劣Ⅴ类水质标准时,监测断面卫辉皇甫、浚县王湾、汤阴五陵和大名龙王庙水体污染物的联合风险概率分别为52.34%、42.04%、42.89%和24.42%。

另外,当仅COD处于劣Ⅴ类水质标准时,监测断面卫辉皇甫、浚县王湾、汤阴五陵和大名龙王庙水体污染物的联合风险概率分别为0.95%、0.79%、0.12%和0.28%;当仅NH₃-N处于劣Ⅴ类水质标准时,监测断面卫辉皇甫、浚县王湾、汤阴五陵和大名龙王庙水体污染物的联合风险概率分别为25.68%、22.94%、24.68%和13.47%;当仅TP处于劣Ⅴ类水质标准时,监测断面卫辉皇甫、浚县王湾、汤阴五陵和大名龙王庙水体污染物的联合风险概率分别为1.70%、2.92%、2.17%和5.48%。由此可见,当仅NH₃-N处于劣Ⅴ类水质标准时,各监测断面水体污染物的联合风险概率均最大,说明在非汛期卫河流域河南段的主导水体污染物为NH₃-N。

2.3.2 汛期水体污染物联合风险概率

基于优选的 Copula 函数建立汛期各监测断面水体污染物指标间的三维联合分布模型,得到水体污染

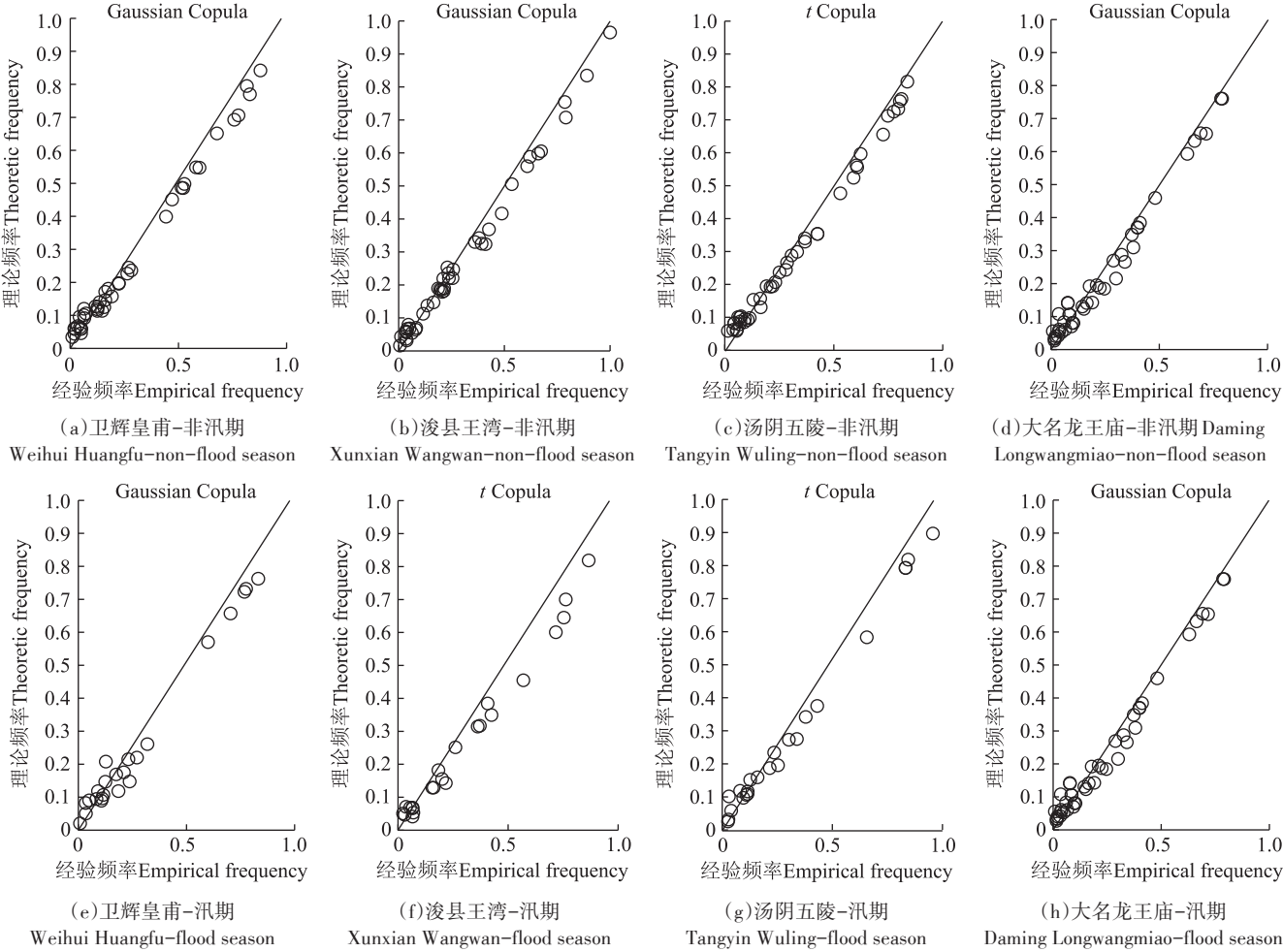


图3 不同时期各监测断面水体污染物指标的理论频率与经验频率拟合图

Figure 3 Fitting figure of the theoretic and empirical joint frequency between the water pollutants at each monitoring section in different periods

表2 非汛期各监测断面水体污染物间的三维联合风险概率(%)

Table 2 Three dimensional joint risk probability between the water pollutants at each station in the non-flood season(%)

化学需氧量 COD	氨氮 NH ₃ -N	总磷TP											
		卫辉皇甫 Weihui Huangfu			浚县王湾 Xunxian Wangwan			汤阴五陵 Tangyin Wuling			大名龙王庙 Daming Longwangmiao		
		I~Ⅲ	Ⅳ~Ⅴ	劣Ⅴ	I~Ⅲ	Ⅳ~Ⅴ	劣Ⅴ	I~Ⅲ	Ⅳ~Ⅴ	劣Ⅴ	I~Ⅲ	Ⅳ~Ⅴ	劣Ⅴ
I~Ⅲ	I~Ⅲ	14.35	8.07	0.15	9.25	4.20	0.02	21.61	11.25	0	26.30	15.89	0.84
	Ⅳ~Ⅴ	2.84	3.09	0.35	1.89	1.47	0.07	2.12	1.23	0	1.16	1.01	0.24
	劣Ⅴ	2.15	6.96	2.71	0.70	1.40	0.15	0.94	2.54	1.85	2.21	2.89	0.50
Ⅳ~Ⅴ	I~Ⅲ	8.10	3.40	0.32	13.52	10.82	0.66	7.15	2.63	0.67	11.06	15.68	3.12
	Ⅳ~Ⅴ	2.90	4.91	0.88	4.01	12.80	2.17	4.58	6.54	1.50	1.57	2.91	1.28
	劣Ⅴ	1.64	14.93	16.06	2.49	18.35	11.65	3.54	17.66	9.57	1.04	7.33	3.70
劣Ⅴ	I~Ⅲ	0.25	0.24	0.02	0.05	0.25	0.07	0	0	0.40	0.04	0.15	0.17
	Ⅳ~Ⅴ	0.12	0.34	0.10	0.04	0.45	0.27	0.01	0.11	0.05	0.01	0.08	0.11
	劣Ⅴ	0.15	1.46	3.51	0.02	1.09	2.14	0.17	1.36	2.52	0.02	0.25	0.44

物指标间的联合分布概率 $P(X\leq x, Y\leq y, Z\leq z)$ 如图5所示,其联合风险概率如表3所示。由各监测断面水体

污染物指标间联合风险结果(表3)可知,在汛期,监测断面卫辉皇甫、浚县王湾、汤阴五陵和大名龙王庙

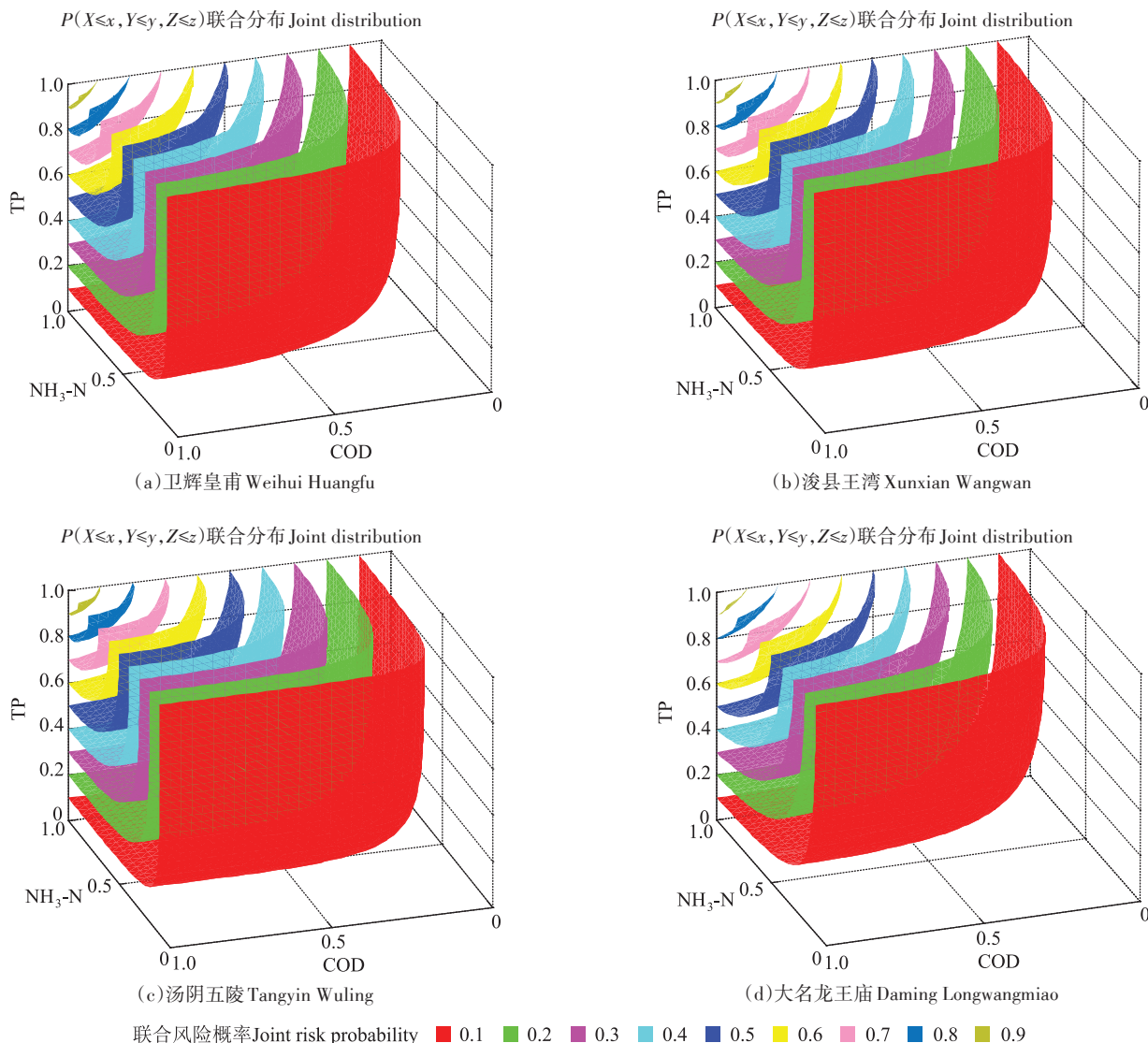


图4 非汛期各监测断面水体污染物指标间的三维联合概率图

Figure 4 Joint probability distribution of the three-dimensional Copula functions between the water pollutants at each station in the non-flood season

的水体污染物(COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP)均处于Ⅰ~Ⅲ类水质标准的联合概率分别为12.92%、10.45%、12.20%和21.61%,而均处于劣Ⅴ类水质标准的联合风险概率分别为1.45%、1.57%、2.10%和0.59%。当水体污染物(COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP)中至少有一个指标处于劣Ⅴ类水质标准时,监测断面卫辉皇甫、浚县王湾、汤阴五陵和大名龙王庙水体污染物的联合风险概率分别为56.53%、29.13%、46.36%和32.42%。

另外,当仅COD处于劣Ⅴ类水质标准时,监测断面卫辉皇甫、浚县王湾、汤阴五陵和大名龙王庙水体污染物的联合风险概率分别为0.41%、1.36%、0.18%和1.28%;当仅 $\text{NH}_3\text{-N}$ 处于劣Ⅴ类水质标准时,监测

断面卫辉皇甫、浚县王湾、汤阴五陵和大名龙王庙水体污染物的联合风险概率分别为28.01%、10.31%、6.16%和4.12%;当仅TP处于劣Ⅴ类水质标准时,监测断面卫辉皇甫、浚县王湾、汤阴五陵和大名龙王庙水体污染物的联合风险概率分别为1.44%、3.81%、22.57%和15.43%。由此可见,当仅 $\text{NH}_3\text{-N}$ 处于劣Ⅴ类水质标准时,监测断面卫辉皇甫和浚县王湾水体污染物的联合风险概率最大,说明在汛期卫河流域河南段监测断面卫辉皇甫和浚县王湾的主导水体污染物为 $\text{NH}_3\text{-N}$;而当仅TP处于劣Ⅴ类水质标准时,监测断面汤阴五陵和大名龙王庙水体污染物的联合风险概率最大,说明在汛期卫河流域河南段监测断面汤阴五

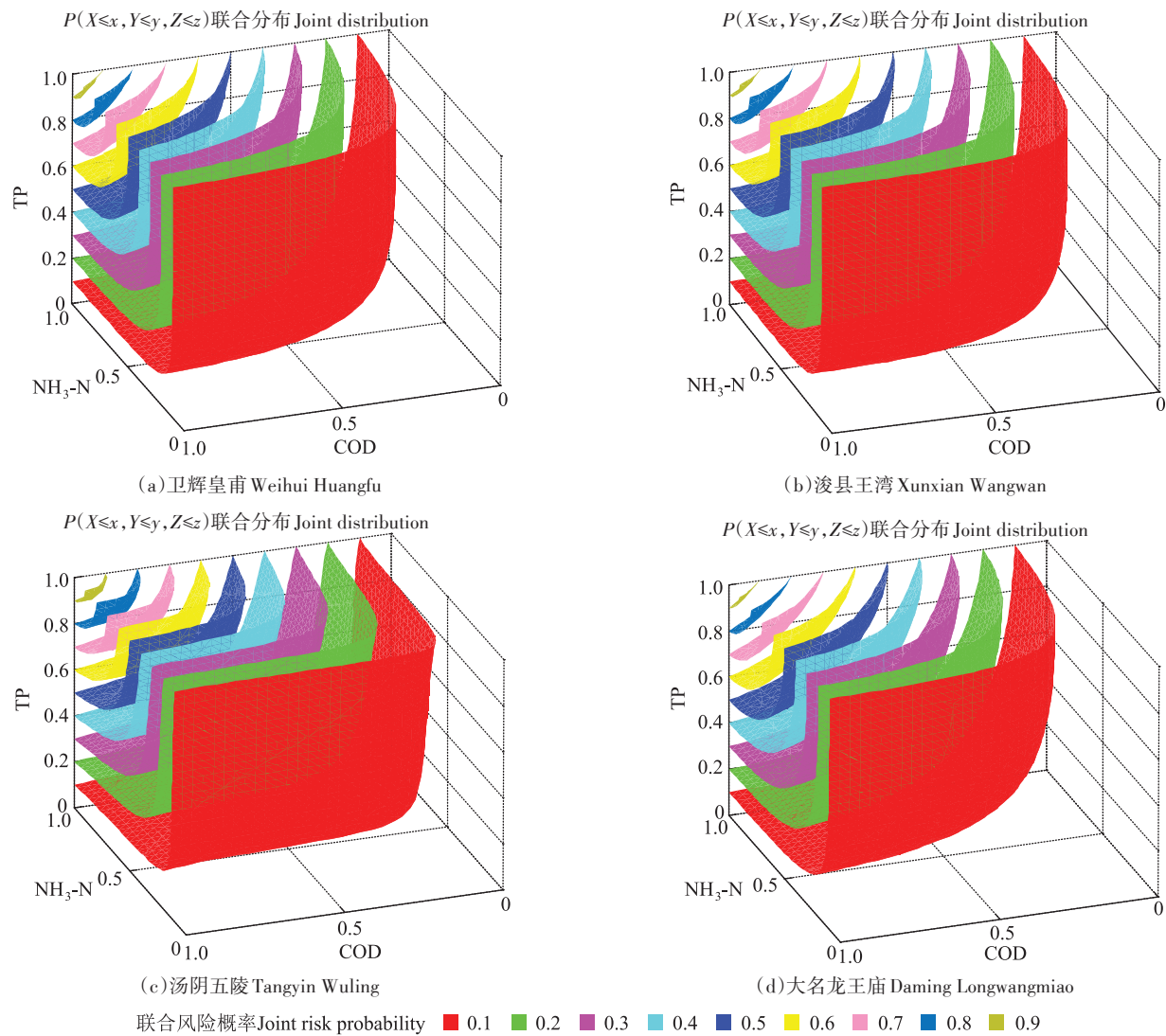


图5 汛期各监测断面水体污染物指标间的三维联合概率图
Figure 5 Joint probability distribution of the three-dimensional Copula functions between the water pollutants at each station in the flood season

表3 汛期各监测断面水体污染物间的三维联合风险概率(%)
Table 3 Three dimensional joint risk probability between the water pollutants at each station in the flood season (%)

化学需氧量 COD	氨氮 NH ₃ -N	总磷TP											
		卫辉皇甫 Weihui Huangfu			浚县王湾 Xunxian Wangwan			汤阴五陵 Tangyin Wuling			大名龙王庙 Daming Longwangmiao		
		I ~ III	IV ~ V	劣 V	I ~ III	IV ~ V	劣 V	I ~ III	IV ~ V	劣 V	I ~ III	IV ~ V	劣 V
I ~ III	I ~ III	12.92	8.96	0.09	10.45	7.86	0	12.20	21.95	6.01	21.61	12.11	4.51
	IV ~ V	1.18	2.45	0.21	0.93	2.19	0.28	0.52	1.90	1.06	0.54	1.03	1.12
	劣 V	1.21	12.66	6.16	0.07	1.52	0.63	1.40	1.23	0.61	0.48	1.41	2.90
IV ~ V	I ~ III	6.90	6.01	0.38	13.56	18.03	0.94	1.06	10.51	7.60	17.37	12.62	7.60
	IV ~ V	1.04	4.01	0.76	1.75	16.10	2.59	0.42	5.08	7.90	0.69	1.61	2.20
	劣 V	0.87	13.27	18.63	0.26	8.46	10.67	0.77	2.76	14.10	0.70	1.53	7.15
劣 V	I ~ III	0.08	0.22	0.04	0	0.05	0.38	0.11	0.03	0.27	0.51	0.63	0.52
	IV ~ V	0.01	0.10	0.07	0	1.31	0	0	0.04	0	0.04	0.10	0.19
	劣 V	0.01	0.31	1.45	0.40	0	1.57	0.35	0.02	2.10	0.04	0.20	0.59

陵和大名龙王庙的主导水体污染物为TP。

总体看来,卫河流域河南段监测断面大名龙王庙的水质状况最好,浚县王湾和汤阴五陵的水质状况次之,卫辉皇甫的水质状况最差。

3 讨论

目前,流域水环境面临着污染事件频发、水生态环境破坏等问题,这严重制约了流域经济社会的发展和生态环境保护的进程^[34]。根据2021年新乡市、鹤壁市和安阳市环境质量概要或地表水水质月报,新乡市、鹤壁市和安阳市地表水责任目标断面累计达标率分别为60.5%、88.1%和64.0%,其中卫河流域责任目标断面卫辉皇甫、汤阴五陵和浚县王湾的累计达标率分别为50.0%、75.0%和91.7%,可知卫河流域河南段地表水水体环境仍需进一步改善。卫河流域主要受工业废水、生活污水、畜禽养殖废水以及农业面源污染的影响,因此要从治理城镇生活污染、深化工业污染防治、开展畜禽养殖污染治理、优化生态水量调配、整治城市黑臭水体、减少农村农业面源污染、预防水污染事件等方面组织展开工作,进而改善卫河流域地表水环境质量。

流域水环境风险受到多方面因素的影响,开展流域水环境风险评估可以进一步识别流域水环境风险的主要污染源,进而有针对性地建立流域水环境风险防控系统以降低水环境污染带来的损害。在卫河流域,河南省相关管理部门要求限制废污水的排放,加强农用化肥和农药的控制并防控流域内农业面源污染^[27]。本研究表明,与非汛期相比汛期各监测断面水体污染物处于劣V类水质标准的联合风险概率略有降低,说明在汛期卫河流域河南段水体环境质量相对有所好转,这主要是因为汛期河流径流量比较大,对水体污染物的稀释效应增强,同时汛期河流水体的自净能力有所提升。当仅COD处于劣V类水质标准时,各监测断面水体污染物的联合风险概率均较小,说明卫河流域河南段主要污染物为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP,这与李婧等^[26]的研究结果一致,即 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP是河南省辖海河流域的主要污染因子。张亚丽等^[35]的研究表明卫河汤阴五陵河段COD基本处于无警和轻警级别,而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度严重超标且大多是巨警,这与本研究中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 处于劣V类水质标准时,监测断面汤阴五陵水体污染物的联合风险概率在非汛期最大的结果一致。在非汛期时,卫河流域河南段的主导水体污染物为 $\text{NH}_3\text{-N}$,这主要是由于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染主要来自于

工业废水和生活污水,且在非汛期时流域河道内径流量较小使得 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染程度较大;在汛期时,卫河流域河南段监测断面卫辉皇甫和浚县王湾的主导水体污染物为 $\text{NH}_3\text{-N}$,而监测断面汤阴五陵和大名龙王庙的主导水体污染物为TP,这主要是由于TP污染主要来自农业面源污染,在汛期时农业面源污染排放的磷使河流水体磷的污染程度增大,这与相关研究表明农业面源排放的磷为地表水污染总负荷的24%~71%是一致的^[36]。另外,监测断面汤阴五陵和大名龙王庙分别位于安阳市和邯郸市,其在安阳河和汤河汇入到卫河之后的河段,受到面源污染的范围较大,因此面源污染占据了主导地位,使其主导水体污染物由非汛期的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 转变为了汛期的TP。总体来说,虽然流域环境质量得到了持续改善,但流域水环境风险及管控形势仍相对严峻,因此要加强流域水环境基准、数据监测以及风险评估等方面的科学研究,提出流域水环境风险管理的战略思路,进一步加强流域水环境风险防控体系建设,为流域水环境综合管理和污染防治提出建议和措施。

4 结论

(1)通过对各监测断面水体污染物联合概率Copula函数优选,结果表明监测断面卫辉皇甫非汛期和汛期、浚县王湾非汛期、大名龙王庙非汛期和汛期的水体污染物间拟合优度最好的三维Copula函数为Gaussian Copula函数,监测断面浚县王湾汛期及汤阴五陵非汛期和汛期的水体污染物间拟合优度最好的三维Copula函数为 t Copula函数。

(2)非汛期和汛期各监测断面水质状况具有一致性:大名龙王庙的水质状况最好,在非汛期和汛期其水体污染物均处于I~Ⅲ类水质标准的联合概率最大,分别为26.30%和21.61%;卫辉皇甫水质状况最差,在非汛期和汛期其水体污染物有一个指标处于劣V类水质标准时的联合风险概率最大,分别为52.34%和56.53%。

(3)监测断面卫辉皇甫和浚县王湾在非汛期和汛期的主导水体污染物均为 $\text{NH}_3\text{-N}$,说明其主要受工业废水和生活污水污染的影响;监测断面汤阴五陵和大名龙王庙的主导水体污染物由非汛期的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 转变为汛期的TP,表明汛期时面源污染占据了主导地位。

参考文献:

[1] 任晓强,管孝艳,陶园,等.白洋淀流域水环境风险评估综述[J].中

- 国农村水利水电, 2021(1):22-27. REN X Q, GUAN X Y, TAO Y, et al. Review of water environment risk assessment in Baiyangdian basin[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(1):22-27.
- [2] 董文平, 马涛, 刘强, 等. 流域水环境风险评估进展及其调控研究[J]. 环境工程, 2015, 33(12):111-115. DONG W P, MA T, LIU Q, et al. Research on risk assessment and control of basin water environment[J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(12):111-115.
- [3] 任晓强, 李娜, 管孝艳, 等. 白洋淀上游河流水环境风险评价[J]. 中国农村水利水电, 2022(2):27-33. REN X Q, LI N, GUAN X Y, et al. Water environment risk assessment of the upper reaches of Baiyangdian Lake[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(2):27-33.
- [4] 张彦, 李平, 梁志杰, 等. 灌区水生态环境风险评估研究进展[J]. 水资源保护, 2021, 37(5):159-168. ZHANG Y, LI P, LIANG Z J, et al. Research progress on risk assessment of water ecological environment in irrigation districts[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(5):159-168.
- [5] 杨蕊, 吴时强, 高学平, 等. 基于 Vine Coupla 函数的河湖连通水环境多因子联合风险识别研究[J]. 水利学报, 2020, 51(5):606-616. YANG R, WU S Q, GAO X P, et al. A Vine Copula-based study on identification of multivariate water environmental risk under different connectivity of rivers and lakes[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(5):606-616.
- [6] 金菊良, 吴开亚, 李如忠. 水环境风险评价的随机模拟与三角模糊数耦合模型[J]. 水利学报, 2008, 39(11):1257-1261, 1266. JIN J L, WU K Y, LI R Z. Coupling method of stochastic simulation with triangular fuzzy numbers for water environment risk assessment[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(11):1257-1261, 1266.
- [7] 王泽正, 张帅, 王利民, 等. 基于贝叶斯网络拓扑结构的水环境风险溯源: 以饮马河流域为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(5):2299-2304. WANG Z Z, ZHANG S, WANG L M, et al. Water environmental risk tracing based on the combination of Bayesian network topology: a case study of Yinma River basin[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(5):2299-2304.
- [8] 祝慧娜, 袁兴中, 梁婕, 等. 河流水环境污染风险模糊综合评价模型[J]. 中国环境科学, 2011, 31(3):516-521. ZHU H N, YUAN X Z, LIANG J, et al. An integrated model for assessing the risk of water environmental pollution based on fuzziness[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(3):516-521.
- [9] 徐凌云, 丁玲. 基于 INVEST 模型的黑水河流域水质风险评估[J]. 人民珠江, 2019, 40(1):146-152. XU L Y, DING L. Water quality risk assessment in Hehui River basin based on INVEST model[J]. *Pearl River*, 2019, 40(1):146-152.
- [10] 叶帮玲. 湘江长沙段水质评价与风险评估研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2019. YE B L. Study on water quality evaluation and risk assessment of Changsha section of Xiangjiang River[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2019.
- [11] 宋策, 谭奇林. 水电工程干扰下饮用水水源地的水质风险评估[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(1):59-65. SONG C, TAN Q L. Water quality risk assessment of drinking water source zone disturbed by hydroelectric power projects[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(1):59-65.
- [12] 王越兴, 尹魁浩, 林高松, 等. 城区水源地污染风险评估方法及实例研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(5):316-320. WANG Y X, YIN K H, LIN G S, et al. Environmental risk assessment for the urban drinking water sources: methodology and case study[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(5):316-320.
- [13] 李中原, 王国重, 张继宇, 等. 白龟山水库水源地水质风险评估[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(7):43-46. LI Z Y, WANG G Z, ZHANG J Y, et al. Water quality risk assessment in Baiguishan reservoir water source[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019, 58(7):43-46.
- [14] DERBALAH A, CHIDYA R, JADOON W, et al. Temporal trends in organophosphorus pesticides use and concentrations in river water in Japan, and risk assessment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 79(5):135-152.
- [15] 施恩, 尚彦辰, 李亚峰. 辽河流域辽宁段累积性水环境风险评估研究[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(3):348-352. SHI E, SHANG Y C, LI Y F. Study on cumulative water environment risk assessment of Liao River basin in Liaoning Province[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43(3):348-352.
- [16] 罗昊, 黄亮, 马颖怡, 等. 流域水环境累积风险评估研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(5):189-194. LUO H, HUANG L, MA Y Y, et al. Study on water environment accumulative risk assessment of river basin[J]. *Environmental Science and Management*, 2017, 42(5):189-194.
- [17] 李海燕. 流域水环境生态风险评价指标体系的构建及应用: 以大宁河为例[J]. 人民长江, 2022, 53(4):59-64. LI H Y. Index screening and application for assessment of water environment ecological risk in Daning River Basin[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(4):59-64.
- [18] ZHU A X, LIU P Y, GONG Y C, et al. Residual levels and risk assessment of tetrabromobisphenol A in Baiyang Lake and Fuhe River, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 200:110770.
- [19] XU L, GRANGER C, DONG H Y, et al. Occurrences of 29 pesticides in the Huangpu River, China: highest ecological risk identified in Shanghai metropolitan area[J]. *Chemosphere*, 2020, 251:126411.
- [20] SAFAKHAH N, GHANEMI K, NIKPOUR Y, et al. Occurrence, distribution, and risk assessment of bisphenol A in the surface sediments of Musa estuary and its tributaries in the northern end of the Persian Gulf, Iran[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 156:111241.
- [21] 王飞宇, 张彦, 王偲, 等. 基于 Copula 函数的汉江流域降水径流丰枯遭遇研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(8):95-105. WANG F Y, ZHANG Y, WANG C, et al. Using Copula model to analyze consecutive wetting-drying occurrence in rainfall-runoff in Hanjiang basin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(8):95-105.
- [22] 牛军宜, 吴泽宁, 冯平. 水环境系统组合风险评估方法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(9):2097-2103. NIU J Y, WU Z N, FENG P. Combined risk assessment method of water environment system[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2012, 32(9):2097-2103.
- [23] 张彦, 窦明, 李桂秋. 基于 Copula 函数的水体富营养化联合风险概率研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(10):4204-4213. ZHANG Y, DOU M, LI G Q. The analysis of joint risk probability of eutrophication based on Copula function[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018,

- 38(10):4204-4213.
- [24] 王起峰,王春阳,王勇. 基于Copula函数与经验频率曲线的富营养化风险分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(30):17037-17039. WANG Q F, WANG C Y, WANG Y. Eutrophication risk assessment based on Copula and empirical frequency[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(30):17037-17039.
- [25] 冯卫,孟春芳,冯利,等. 卫河水系新乡段历年不同水期水质变化分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8):121-128. FENG W, MENG C F, FENG L, et al. The tendency and changes of water quality in Xinxiang section of the Wei River basin at different periods[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(8):121-128.
- [26] 李婧,唐敏,梁亦欣. 2015—2018年河南省辖海河流域水质改善效果评价[J]. 环境工程, 2020, 38(5):60-64, 190. LI J, TANG M, LIANG Y H. Evaluation of water quality improvement effect in Haihe River basin in Henan Province from 2015 to 2018[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(5):60-64, 190.
- [27] 张彦,邹磊,李平,等. 卫河流域河南段水体污染物时空差异性特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1):132-143. ZHANG Y, ZOU L, LI P, et al. Characteristics of spatio-temporal differences of water pollutants in the Henan section of the Wei River basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(1):132-143.
- [28] 宋松柏,蔡焕杰,金菊良,等. Copula函数及其在水文中的应用[M]. 北京:科学出版社, 2012. SONG S B, CAI H J, JIN J L, et al. Copula function and its application to hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [29] 侯芸芸. 基于Copula函数的多变量洪水频率计算研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010. HOU Y Y. Multivariate flood frequency analysis based on Copula functions[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [30] KOTZ S, NADARAJAH S. Some extremal type elliptical distributions[J]. *Statistics & Probability Letters*, 2001, 54(2):171-182.
- [31] NADARAJAH S, KOTZ S. Information matrices for some elliptically symmetric distribution[J]. *SORT*, 2005, 29(1):43-56.
- [32] NADARAJAH S. Fisher information for the elliptically symmetric pearson distributions[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 178(2):195-206.
- [33] ZHANG J P, LIN X M, GUO B T. Multivariate copula-based joint probability distribution of water supply and demand in irrigation district[J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(7):2361-2375.
- [34] 周旋,侯向英,郭丕斌. 山西省黄河流域水环境安全风险评价研究[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(12):35-40. ZHOU X, HOU X Y, GUO P B. Study on risk assessment of water environment safety in the Yellow River basin of Shanxi Province[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, 60(12):35-40.
- [35] 张亚丽,王艺铭,史淑娟,等. 基于QUAL2K模型的鹤壁卫河水质模拟预警研究[J]. 中国环境监测, 2018, 34(5):138-143. ZHANG Y L, WANG Y M, SHI S J, et al. Simulation and early warning of water quality in Hebi Wei River based on QUAL2K model[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, 34(5):138-143.
- [36] 李秀芬,朱金兆,顾晓君,等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4):81-84. LI X F, ZHU J Z, GU X J, et al. Current situation and control of agricultural non-point source pollution[J]. *China Population Resources and Environment*, 2010, 20(4):81-84.

(责任编辑:李丹)