

卫河流域河南段水体污染物时空差异性特征分析

张彦, 邹磊, 李平, 窦明, 黄仲冬, 梁志杰, 齐学斌

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0573>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

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>

磷酸铵镁堆肥产品养分释放特性及其肥效研究

李丹阳, 元传仁, 卫亚楠, 李国学

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2066-2073 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0186>

2000—2014年河南畜养产污核算及规律分析

付强, 吴根义, 潘鹏, 王万同

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1323-1329 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0646>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

卫河流域河南段水体污染物时空差异性特征分析

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

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2. 郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001; 3. 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; 4. 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院重点实验室, 北京 100101; 5. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001)

摘要: 为了揭示卫河流域河南段水体污染物时空差异性特征, 选取流域9个监测断面水体污染物COD、NH₃-N和TP的监测数据, 利用M-K检验、Pettitt突变检验法、聚类分析和判别分析等方法对不同时期水体污染物的变化趋势、时空分布以及差异性进行分析。结果表明: 卫河干流、共产主义渠和汤河的水质状况相对较差, 淇河和安阳河的水质状况较好, NH₃-N为卫河流域河南段主要的水体污染物。大部分监测断面的水体污染物在不同时期均呈现出显著减小的趋势, COD和NH₃-N的突变时间多集中在2016年和2017年, 而TP的突变时间多集中在2017年和2018年。各监测断面的COD和NH₃-N处于IV类及以上水质标准的占比呈现出非汛期 > 汛期, 而TP呈现出汛期 > 非汛期; 不同时期的水体污染物的空间聚类结果有效且相对较好, 监测断面鹤壁耿寺COD质量浓度和浚县前枋城TP质量浓度在不同时期的波动性均较小, 其余监测断面COD和TP质量浓度的波动性相对较大; 各监测断面NH₃-N质量浓度在不同时期的波动性具有一定的相似性。研究表明, 卫河流域河南段水体污染物具有明显的时空差异性特征。

关键词: 卫河流域; 河南; 时空差异性; 聚类分析; 判别分析

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)01-0132-12 doi:10.11654/jaes.2021-0573

Characteristics of spatio-temporal differences of water pollutants in the Henan section of the Wei River basin

ZHANG Yan^{1,2,3}, ZOU Lei⁴, LI Ping^{1,3}, DOU Ming^{2,5}, HUANG Zhongdong¹, LIANG Zhijie^{1,3}, QI Xuebin^{1,3*}

(1. Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 2. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Laboratory of Quality and Safety Risk Assessment for Agro-Products on Water Environmental Factors, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang 453002, China; 4. 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; 5. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To reveal the spatiotemporal difference characteristics of water pollutants in the Henan section of the Wei River basin, the monitoring data of water pollutants COD, NH₃-N, and TP from nine monitoring sections in the Wei River basin were collected, and the change trends, spatio-temporal distribution, and differences of water pollutants in different periods were analyzed using the Mann-Kendall test, Pettitt mutation test, cluster analysis, and discriminant analysis. The results showed that the water quality was relatively poor in the main stream of the Wei River, Communist canal, and Tang River, while those of the Qi River and Anyang River were relatively good. NH₃-N

收稿日期: 2021-05-17 录用日期: 2021-08-06

作者简介: 张彦(1989—), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 助理研究员, 研究方向为水资源及水环境。E-mail: zhangyan09@caas.cn

*通信作者: 齐学斌 E-mail: qxb6301@sina.cn

基金项目: 河南省自然科学基金项目(212300410310); 国家重点研发计划项目(2021YFD1700901); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(FIRI20210105); 国家自然科学基金项目(51879239, 42101043)

Project supported: The Natural Science Foundation of Henan Province, China (212300410310); The National Key Research and Development Program of China 2021YFD1700901; The Fundamental Research Funds for the Central Public-interest Scientific Institution (FIRI20210105); The National Natural Science Foundation of China (51879239, 42101043)

was the main water pollutant in the Henan section of the Wei River basin. Most of the water pollutants in the monitoring sections showed a significant decreasing trend across different periods; the mutation times of COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ were mostly concentrated in 2016 and 2017, whereas those of TP were mostly concentrated in 2017 and 2018. The proportion of COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ in class IV and above water quality standards showed non-flood season > flood season, while TP showed flood season > non-flood season. The spatial clustering results of water pollutants were effective and relatively good in different periods: the fluctuations of COD concentration in Hebi Gengsi and TP concentration in Xunxian Qianfangcheng in different periods were small, while the fluctuations of COD and TP concentrations in the other monitoring sections were relatively large, and the fluctuations in $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in different monitoring sections in different periods had certain similarities. The water pollutants in the Henan section of the Wei River basin show obvious spatio-temporal differences.

Keywords: Wei River basin; Henan; spatio-temporal difference; cluster analysis; discriminant analysis

随着经济社会和城市化进程的快速发展,人类活动对流域水体污染物时空差异性的影响越发显著,有效开展流域水体污染物时空差异性特征研究有助于流域水环境管理部门的决策,并可为流域水生态环境保护 and 农业生产提供一定的依据^[1-2]。目前,相关学者利用统计分析方法开展了河流或湖泊水质时空变化规律的研究,如白会滨等^[3]、王昱等^[4-5]、杨巧等^[6]、杨蕾等^[7]、李发荣等^[8]、王翠榆等^[9]、苏程佳等^[10]和董雯等^[11]分别利用不同的统计分析方法分析了海河流域、黑河流域、昆明市盘龙河流域、宁夏阅海湿地、牛栏江流域、晋城市沁河流域、潭江流域和渭河西咸段水质时空变化特征并对其污染源进行解析;刘双爽等^[12]、钱文瀚等^[13]和任岩等^[14]揭示了汉丰湖和高阳湖流域、太湖流域、新疆艾比湖流域水环境的分异规律;李颖等^[15]利用M-K检验和广义可加模型(GAM)分析了洪泽湖水水质变化特征及驱动因素;张胜等^[16]结合综合污染指数法和综合营养状态指数评价法对汉江中下游丰枯水期水质时空变化特征进行了分析;王一旭等^[17]结合自组织映射人工神经网络模型(SOM)和随机森林模型(RF)对茗溪流域的水质进行了空间差异性评估;白晓燕等^[18]利用Pettitt变异点分析法和M-K检验法定量判断了珠江三角洲城市群水源地水质的时空变化趋势。

卫河流域作为海河水系南运河的重要支流,在城市和工农业经济发展中起到了关键的作用,然而经济社会发展 and 人类活动都给予水生态环境带来了危害,2018年海河流域工业废水和城镇生活污水排放总量达到了59.46亿t。相关学者初步开展了卫河流域水质变化规律及污染因子识别相关研究^[19-21],但对于流域河南段整体水体污染状况及时空差异性特征还需进一步研究,本文利用Mann-Kendall非参数检验法、Pettitt突变检验法、聚类分析和判别分析等方法,对卫河流域河南段不同时期水体污染物分布特征进行统计,并分析了水体污染物的变化趋势和突变特征,最

后揭示了水体污染物在不同时期的时空差异性特征,研究成果可为卫河流域河南段的水环境治理提供一定的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及数据来源

卫河流域为海河流域南运河的重要支流,发源于山西省陵川县夺火镇,至河北省馆陶县与漳河汇合,流经焦作、新乡、鹤壁、安阳、濮阳5个省辖市,流域面积约为1.53万 km^2 ,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^[1,21]。

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各地市9个地表水环境责任目标断面的3项水体污染物指标。卫河干流监测断面主要有卫辉皇甫、汤阴五陵、浚县王湾和大名龙王庙,其中大名龙王庙为河南省界的监测断面,共产主义渠监测断面有卫辉下马营,淇河监测断面有浚县前枋城,汤河监测断面有鹤壁耿寺和石辛庄,安阳河监测断面有丁家沟,监测断面具体位置见图1。水体污染物指标主要为化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)和总磷(TP),其中COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的监测时段为2014年1月至2020年12月,TP的监测时段为2016年1月至2020年12月,本文所涉及的不同时期中汛期为6—9月,其余月份为非汛期;水质监测数据分析参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)执行。

1.2 研究方法

1.2.1 Mann-Kendall非参数检验法

Mann-Kendall(M-K)是一种基于秩序的非参数检验方法,被广泛应用于径流、降水、气温和水质等水文水环境要素序列的趋势或突变检验^[3,22-23]。 Z_{MK} 为M-K非参数检验法的标准化检验统计值,主要表示



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 in the Wei River basin

时间序列数据的变化趋势,具体详细说明见参考文献[2]。另外,定义统计变量 UF_k 为:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{Var(s_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $s_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} (k=2, 3, \dots, n); a_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases}, 1 \leq j < i;$

$E(s_k) = k(k+1)/4; Var(s_k) = k(k-1)(2k+5)/72。$

本研究将水质序列 x 按降序排列,再按式(1)计算,同时使

$$\begin{cases} UB_k = -UB_{k'} \\ k' = n + 1 - k \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

通过分析 UF_k 和 UB_k 的变化可以分析序列 x_i 的趋势变化和突变点,当 UF_k 和 UB_k 的曲线超过置信区间 $[-1.96, 1.96]$ 时,说明水质序列上升或下降的趋势比较显著;当 UF_k 和 UB_k 的曲线在置信区间的内部相交时,表示该点所对应的时刻是序列突变开始的时刻。

1.2.2 Pettitt 突变检验法

Pettitt 突变检验法是一种非参数突变点检测的方法,计算简单且受异常值影响较小,广泛用于水文气象以及水质时间系列的突变分析,可用于卫河流域河南段水体污染物突变点检验,具体计算过程如下^[18,24-25]:

给定水体污染物 n 个样本的时间序列 $x_i, i=1, 2, 3, \dots, n$, 定义统计变量 U_i :

$$U_{i,n} = U_{i-1,n} + V_{i,n} \quad (3)$$

$$V_{i,n} = \sum_{j=1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (4)$$

Pettitt 定义统计量 K_i 获取最显著的可能突变点:

$$K_i = \max_{1 \leq i \leq n} |U_i| \quad (5)$$

利用统计量 P 判定突变点是否满足给定显著性水平:

$$P = 2 \exp\left(\frac{-6K_i^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (6)$$

当 $P < 0.05$ 时表示存在统计上的显著突变点。

1.2.3 聚类分析

聚类分析是一种探索性的模式识别技术,其中层次聚类分析(HCA)方法目前应用较为常见,主要根据不同监测断面间的相似程度逐次聚合,直到聚成一类,本研究将卫河流域河南段水质特征按照监测时间和监测断面的地理位置进行聚类,进而分析卫河流域河南段水体污染物的时空变化特征^[26-28]。

1.2.4 判别分析

判别分析主要是根据聚类分析结果进而识别具有显著性的水体污染物指标,其是按照一定的判别原则建立判别函数,进而通过水体污染物数据系列确定判别系数,并计算判别指标^[4,9,14]。判别函数表达式为:

$$f(G_i) = G_i + \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot p_{ij} \quad (7)$$

式中: $f(G_i)$ 为第 i 类的判别函数; G_i 为第 i 类的固有常数; n 为参与判别分析的指标个数; w_{ij} 为相应的判别系数; p_{ij} 为第 i 类第 j 个指标值。

2 结果与分析

2.1 水体污染物统计结果分析

卫河流域河南段干流及其支流不同时期水体污染物均值统计分析结果如表1所示。由表可知,在汛

期和非汛期,卫河干流、共产主义渠和汤河的COD质量浓度均值在Ⅳ类水质标准以上, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度达到了劣Ⅴ类水质标准,淇河和安阳河的COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度均值处于Ⅲ类水质标准以下,其中共产主义渠COD质量浓度均值在汛期达到最大,为 $33.96 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,汤河 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度均值在非汛期达到最大,为 $3.48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;卫河干流、共产主义渠、汤河和安阳河TP质量浓度均值在Ⅳ类水质标准以上,淇河TP质量浓度均值处于Ⅱ类水质标准以下,其中共产主义渠TP质量浓度均值在汛期达到最大,为 $0.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;另外,汤河COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度在汛期和非汛期的最大值和最小值间差值最大,说明其波动性较大。整体上在非汛期时 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量浓度值相对较大,在汛期时TP的质量浓度值相对较大,COD质量浓度变化不明显。卫河流域河南段水体中,淇河和安阳河的水质状况较好,卫河干流、共产主义渠和汤河的水质状况相对较差。卫河流域河南段中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染程度最高。

2.2 不同时期水体污染物变化趋势分析

根据M-K检验法和Pettitt突变检验法对卫河流域河南段9个监测断面水体污染物的数据系列进行分析,得到各监测断面水体污染物在不同时期的变化趋势及突变点情况(表2)。本文仅列出河南省界的监测断面大名龙王庙水体污染物不同时期M-K检验

和Pettitt突变检验图(图2)。大部分监测断面的水体污染物在汛期和非汛期均呈现出显著减小的趋势,监测断面石辛庄的COD在汛期呈现出显著的增加趋势,监测断面卫辉皇甫和大名龙王庙的COD以及卫辉下马营的TP在汛期的变化趋势均不显著,监测断面石辛庄的COD在非汛期呈显著下降趋势,监测断面丁家沟的COD在汛期和非汛期的变化趋势均不显著;淇河监测断面浚县前枋城的COD和TP在汛期和非汛期,及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在汛期的变化趋势均不显著,这可能是由于该监测断面水质一直较好。根据M-K检验法和Pettitt突变检验法得到的各监测断面水体污染物的突变时间基本上具有一致性,水体污染物COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的突变时间多集中在2016年和2017年,而水体污染物TP的突变时间多集中在2017年和2018年;在汛期,水体污染物COD的突变时间多集中在7月, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP的突变时间在不同监测断面呈现较大的差异,而在非汛期水体污染物的突变时间在不同监测断面具有较大的差异性。

2.3 不同时期水体污染物时空分布特征

各监测断面水体污染物在不同时期的水质类别占比如图3所示。在汛期监测断面汤阴五陵、浚县王湾、卫辉下马营、鹤壁耿寺COD处于Ⅳ类及以上水质标准的占比分别为64.29%、78.57%、78.57%、67.86%,而在非汛期时均有所增加,分别为66.07%、89.29%、

表1 卫河流域河南段不同时期水体污染物均值统计($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 1 Mean value statistics of water pollutants in different periods in Henan section of Wei River basin($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

河流 River	指标 Index	化学需氧量COD		氨氮 $\text{NH}_3\text{-N}$		总磷TP	
		汛期 Flood season	非汛期 Non-flood season	汛期 Flood season	非汛期 Non-flood season	汛期 Flood season	非汛期 Non-flood season
卫河干流	最小值	7.00	9.00	0.02	0.02	0.06	0.07
	最大值	50.50	70.00	9.75	11.00	1.19	1.30
	均值	24.92	27.56	2.22	2.82	0.29	0.26
共产主义渠	最小值	13.00	9.00	0.03	0.05	0.03	0.04
	最大值	65.25	61.10	8.46	12.03	1.22	0.67
	均值	33.96	31.39	2.17	3.22	0.33	0.24
淇河	最小值	6.00	2.00	0.02	0.02	0.01	0.01
	最大值	33.00	33.00	0.72	0.97	0.12	0.12
	均值	13.51	12.06	0.19	0.19	0.04	0.04
汤河	最小值	9.00	5.00	0.04	0.03	0.03	0.06
	最大值	124.00	127.00	12.20	14.20	0.79	0.89
	均值	29.15	33.20	2.56	3.48	0.27	0.28
安阳河	最小值	8.50	7.03	0.04	0.03	0.04	0.04
	最大值	32.50	40.55	2.58	4.69	0.91	0.46
	均值	17.50	21.02	0.50	1.09	0.26	0.22

表2 水体污染物不同时期变化趋势及突变点结果

Table 2 Variation trend and mutation point of water pollutants in different periods

河流 River	监测断面 Monitoring section	时间 Time	化学需氧量COD				氨氮NH ₃ -N				总磷TP			
			Z _{MK} 值 Z _{MK} value	M-K趋势检验 M-K trend test	突变时间 Mutation time		Z _{MK} 值 Z _{MK} value	M-K趋势检验 M-K trend test	突变时间 Mutation time		Z _{MK} 值 Z _{MK} value	M-K趋势检验 M-K trend test	突变时间 Mutation time	
					M-K突变检验 M-K mutation test	Pettitt突变检验 Pettitt mutation test			M-K突变检验 M-K mutation test	Pettitt突变检验 Pettitt mutation test			M-K突变检验 M-K mutation test	Pettitt突变检验 Pettitt mutation test
卫河干流	卫辉皇甫	汛期	-1.30	□	—	2016年8月	-4.35	∇	2016年9月	2017年6月	-4.74	∇	2018年6月	2018年7月
		非汛期	-5.16	∇	2016年1月	2016年10月	-7.74	∇	2018年1月	2017年5月	-5.17	∇	2017年10月	2017年10月
	汤阴五陵	汛期	-3.77	∇	2016年6月	2016年8月	-3.99	∇	2016年6月	2016年8月	-1.98	∇	2017年7月	2017年9月
		非汛期	-6.06	∇	2017年1月	2017年10月	-6.74	∇	2017年2月	2017年5月	-4.87	∇	2018年2月	2018年1月
	浚县王湾	汛期	-2.96	∇	2015年7月	2016年8月	-4.25	∇	2016年8月	2016年8月	-3.70	∇	2018年6月	2019年7月
		非汛期	-5.21	∇	2016年5月	2016年4月	-7.93	∇	2017年5月	2017年4月	-5.15	∇	2017年5月	2018年10月
	大名龙王庙	汛期	-1.88	□	2016年6月	2016年7月	-4.74	∇	2016年9月	2017年7月	-2.53	∇	2017年8月	2017年8月
		非汛期	-5.27	∇	2016年3月	2016年10月	-6.35	∇	2016年3月	2017年3月	-3.32	∇	2017年5月	2017年11月
共产主义渠	卫辉下马营	汛期	-4.82	∇	2017年7月	2018年6月	-4.98	∇	2016年6月	2016年9月	-1.82	□	—	2017年8月
		非汛期	-6.48	∇	2017年5月	2017年5月	-7.29	∇	2017年3月	2017年4月	-4.12	∇	2017年10月	2017年11月
淇河	浚县前枋城	汛期	0.77	□	—	2019年8月	-1.52	□	—	2017年7月	-1.59	□	—	—
		非汛期	1.54	□	—	2019年10月	-2.88	∇	2015年3月	2017年10月	-1.12	□	—	2017年11月
汤河	鹤壁耿寺	汛期	-3.89	∇	2017年7月	2017年7月	-4.58	∇	2017年7月	2017年8月	-2.60	∇	2016年8月	2017年8月
		非汛期	-5.05	∇	2017年11月	2017年5月	-6.24	∇	2017年12月	2017年10月	-4.39	∇	2017年12月	2018年1月
	石辛庄	汛期	2.27	Δ	2016年7月	2016年7月	-4.46	∇	2017年9月	2018年6月	-4.47	∇	2018年8月	2018年8月
		非汛期	0.28	∇	—	—	-6.18	∇	2017年4月	2017年4月	-5.21	∇	2017年11月	2018年5月
安阳河	丁家沟	汛期	-0.38	□	—	—	-3.54	∇	2018年6月	2015年9月	-5.09	∇	2018年7月	2018年8月
		非汛期	-0.30	□	—	—	-4.52	∇	2017年1月	2017年2月	-4.19	∇	2017年5月	2017年10月

注: □表示增加或减小趋势不显著, ∇表示呈现显著减小趋势, Δ表示呈现显著增加趋势, —表示突变时间不显著。

Note: □ indicates that the increasing or decreasing trend is not significant, ∇ indicates a significant decreasing trend, Δ indicates a significant increasing trend, and — indicates that the mutation time is not significant.

80.36%、80.36%;监测断面浚县前枋城COD处于Ⅳ类及以上水质标准的占比均较小,汛期和非汛期分别为7.14%和5.36%;而在非汛期时监测断面鹤壁耿寺COD达到劣Ⅴ类水质标准的占比为35.71%。

在汛期时监测断面卫辉皇甫和鹤壁耿寺NH₃-N处于Ⅳ类及以上水质标准的占比分别为64.29%和67.86%,而在非汛期时均有所增加,分别为69.64%和75.00%;监测断面浚县前枋城NH₃-N均处于Ⅲ类及以下水质标准;在汛期和非汛期时监测断面卫辉皇甫NH₃-N达到劣Ⅴ类水质标准的占比分别为64.29%和62.50%。

在汛期监测断面卫辉皇甫和浚县王湾TP处于Ⅳ类及以上水质标准的占比均为65.00%,在非汛期时分别为60.00%和65.00%,监测断面浚县前枋城TP均处于Ⅲ类及以下水质标准;在汛期时监测断面汤阴五陵和卫辉下马营TP达到劣Ⅴ类水质标准的占比分别为30.00%和25.00%。

整体上,对于水体污染物COD和NH₃-N,处于Ⅲ

类及以下水质标准的占比各监测断面呈现出汛期>非汛期,处于Ⅳ类及以上水质标准的占比各监测断面呈现出非汛期>汛期;对于水体污染物TP,大部分监测断面处于Ⅲ类及以下水质标准的占比呈现出非汛期>汛期,处于Ⅳ类及以上水质标准的占比呈现出汛期>非汛期。

2.4 不同时期水体污染物时空差异性分析

为了分析卫河流域河南段不同时期水体污染物时空差异性特征,首先根据聚类分析将不同时期水体污染物进行空间尺度下聚类,结果如图4所示。由图可知,水体污染物COD和TP在汛期和非汛期时的空间聚类结果具有一致性,在空间尺度上将监测断面均分为两组,对于COD,A组的监测断面主要包括卫辉皇甫、卫辉下马营、浚县前枋城、浚县王湾、汤阴五陵、石辛庄、丁家沟和大名龙王庙,B组的监测断面包括鹤壁耿寺;对于TP,A组的监测断面主要包括卫辉皇甫、卫辉下马营、浚县王湾、汤阴五陵、鹤壁耿寺、石辛庄、丁家沟和大名龙王庙,B组的监测断面包括浚县

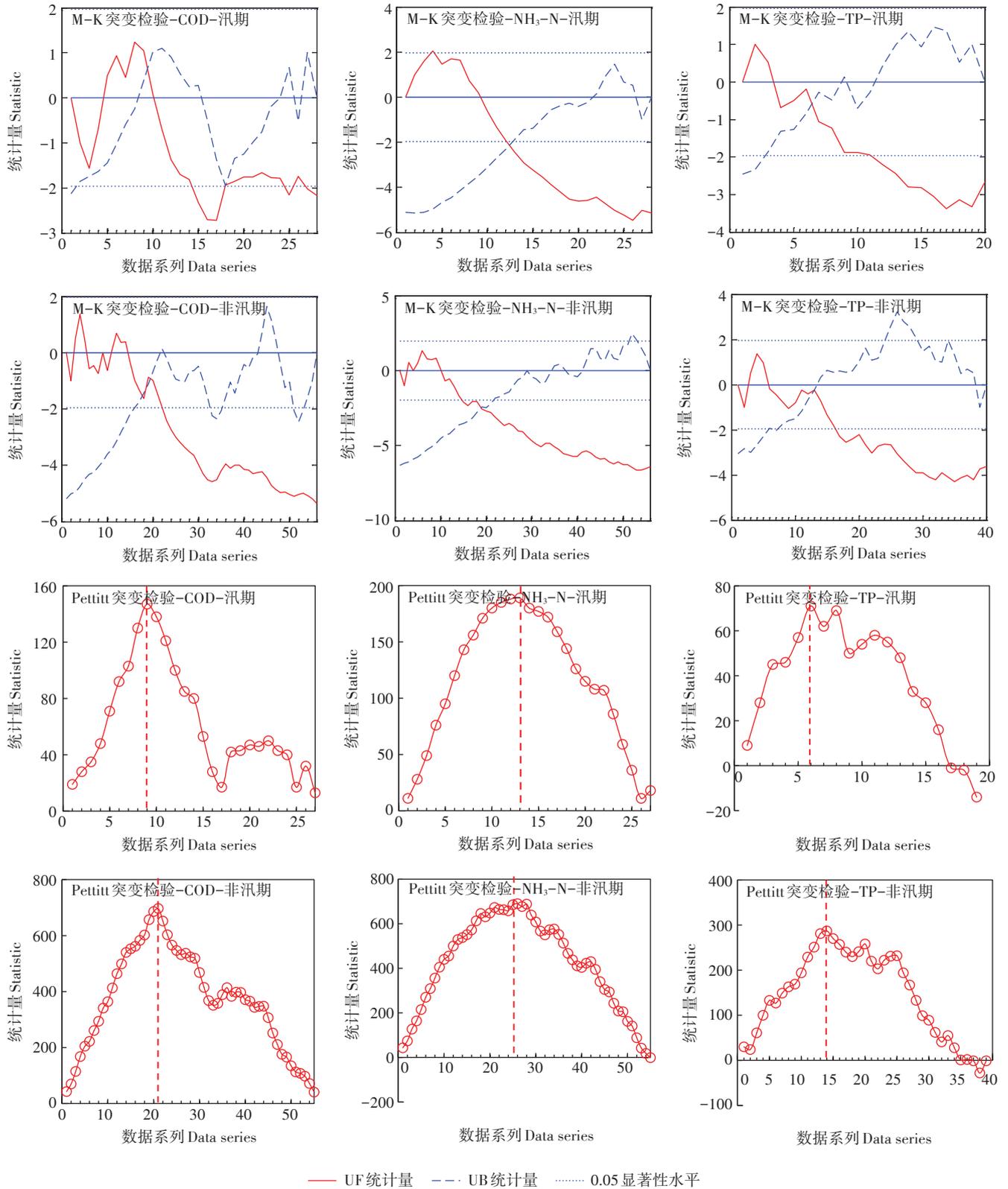


图2 大名龙王庙水体污染物不同时期突变检验图

Figure 2 The inspection chart of the water pollutants in Daminglongwangmiao section in different periods

前枋城。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在汛期和非汛期时的空间聚类结果不一致,汛期A组的监测断面包括卫辉下马营、浚县

前枋城、浚县王湾、汤阴五陵、石辛庄、丁家沟和大名龙王庙,B组的监测断面包括卫辉皇甫和鹤壁耿寺;

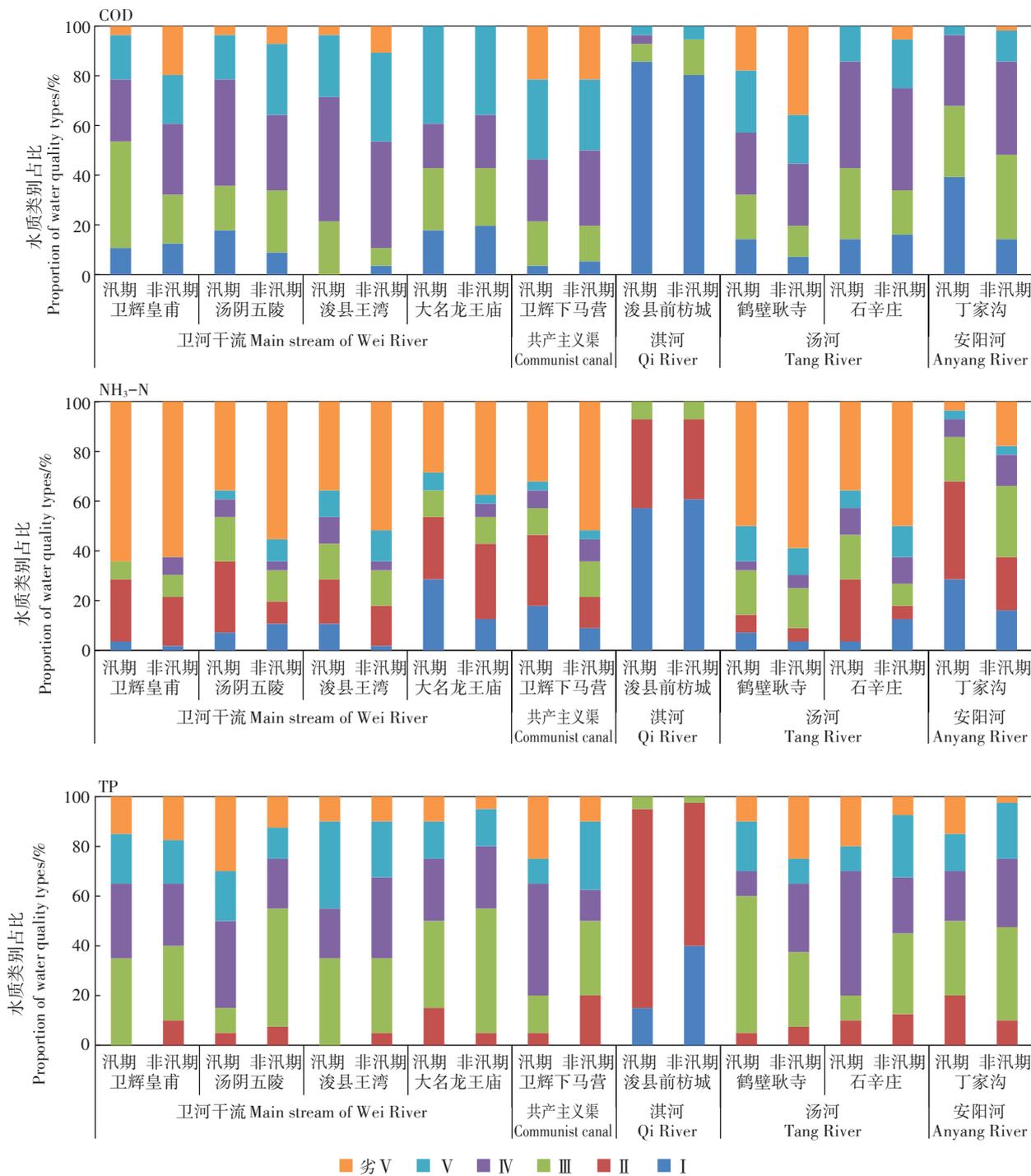


Figure 3 Proportion of water quality types in different monitoring sections in different periods

非汛期 A 组的监测断面包括卫辉皇甫、卫辉下马营、浚县王湾、汤阴五陵、鹤壁耿寺和石辛庄, B 组的监测断面包括浚县前枋城、丁家沟和 大名龙王庙。

对不同时期水体污染物指标空间尺度上聚类结果进行判别分析, 结果如表 3 和表 4 所示。由表 3 可知, 判别分析的判别函数基本可以解释所有水体污染

物在不同时期的信息, COD 在汛期和非汛期时 Wilks 的 Lambda 值分别为 0.003 和 0.012, 卡方系数分别为 20.002 和 15.389; NH₃-N 在汛期和非汛期时 Wilks 的 Lambda 值分别为 0.026 和 0.068, 卡方系数分别为 12.734 和 9.420; TP 在汛期和非汛期时 Wilks 的 Lambda 值分别为 0.030 和 0.017, 卡方系数分别为 12.247 和

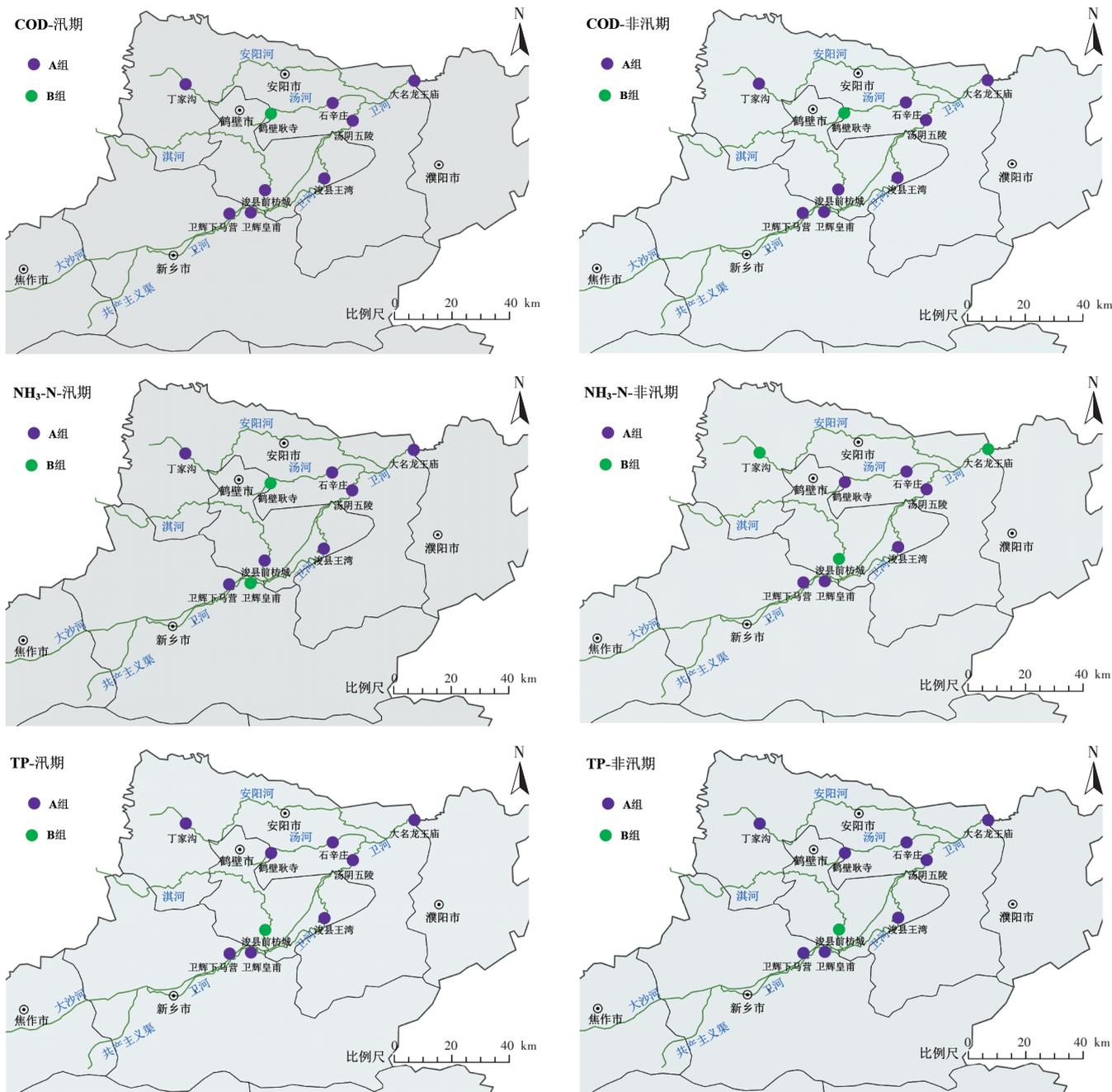


图4 不同时期水体污染物空间尺度聚类结果

Figure 4 Spatial scale cluster analysis of water pollutants in different periods

14.240;在不同时期水体污染物判别函数的显著性检验值均小于0.05,说明在不同时期下水体污染物的空间聚类结果有效。

由表4可知,在汛期时COD空间聚类分析结果B组的判别分析交叉验证正确率较大,为62.50%,在非汛期时A组的判别分析交叉验证正确率较大,为87.50%;在汛期和非汛期时 $\text{NH}_3\text{-N}$ 空间聚类分析结果均为A组的判别分析交叉验证正确率较大,分别为57.10%和66.70%,在汛期和非汛期时TP空间聚类分

析结果均为A组的判别分析交叉验证正确率较大,分别为62.50%和87.50%。总体来说,卫河流域河南段水体污染物在不同时期的空间聚类结果相对较好。

从卫河流域河南段不同时期水体污染物不同分组的差异性(图5)可知,A组的COD在汛期和非汛期时差异性较大,而B组的差异性相对较小;A组和B组的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在汛期和非汛期时差异性均不明显;A组的TP在汛期和非汛期时差异性较大,而B组的差异性相对较小。结果表明,监测断面鹤壁耿寺COD质量

表3 不同时期水体污染物指标空间尺度上判别分析统计检验

Table 3 The statistical test of discriminant analysis on spatial scale of water pollutant indexes in different periods

水质指标 Water quality index	时期 Period	特征值 Characteristic value	相关性 Correlation	Wilks的Lambda值 Lambda value of wilks	卡方系数 Chi-square coefficient	df	Sig.
化学需氧量 COD	汛期	302.340	0.998	0.003	20.002	7	0.006
	非汛期	80.200	0.994	0.012	15.389	7	0.031
氨氮 NH ₃ -N	汛期	37.026	0.987	0.026	12.734	7	0.039
	非汛期	13.754	0.966	0.068	9.420	7	0.024
总磷 TP	汛期	32.086	0.985	0.030	12.247	7	0.043
	非汛期	57.471	0.991	0.017	14.240	7	0.047

表4 不同时期水体污染物指标空间尺度上判别分析交叉验证正确率(%)

Table 4 The cross validation accuracy of discriminant analysis on spatial scale of water pollutants in different periods(%)

分组 Group	化学需氧量COD		氨氮NH ₃ -N		总磷TP	
	汛期Flood season	非汛期Non-flood season	汛期Flood season	非汛期Non-flood season	汛期Flood season	非汛期Non-flood season
A组	37.50	87.50	57.10	66.70	62.50	87.50
B组	62.50	12.50	42.90	33.30	37.50	12.50
合计	33.30	77.80	55.60	55.60	55.60	77.80

浓度和浚县前枋城TP质量浓度在不同时期的波动性均较小,其余监测断面COD和TP质量浓度的波动性相对较大;各监测断面NH₃-N质量浓度在不同时期的波动性具有一定的相似性。

3 讨论

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,水体污染物导致卫河流域河南段的水体受到不同程度的污染,卫河流域河南段各地区水体污染物排放量、农用化肥和农药使用情况如图6和图7所示。卫河流域河南段所辖地市2018年废污水排放总量为9.53亿t,COD排放总量为

6.67万t,NH₃-N排放总量为0.96万t;2019年农用化肥使用折纯量为171.87万t,农药使用量为2.39万t。研究表明淇河的监测断面浚县前枋城的水体状况最好,这与鹤壁市整体水体污染物排放量和化肥农药使用量相对较小有关;卫河流域河南段COD和NH₃-N在不同时期基本呈现出显著减小的趋势,这与各地市COD和NH₃-N的排放量呈现减小趋势一致(图6),同时COD和NH₃-N的突变时间多集中在2016年和2017年,这与卫河流域河南段各地市2016年以来防治城镇生活和工业污染、整治城市黑臭水体以及减少农业面源污染等方面的工作有关^[21];但是从近几年各地市农用化肥和农药使用趋势看(图7),减小趋势不显著,这也是影响卫河流域河南段水质的主要因素,

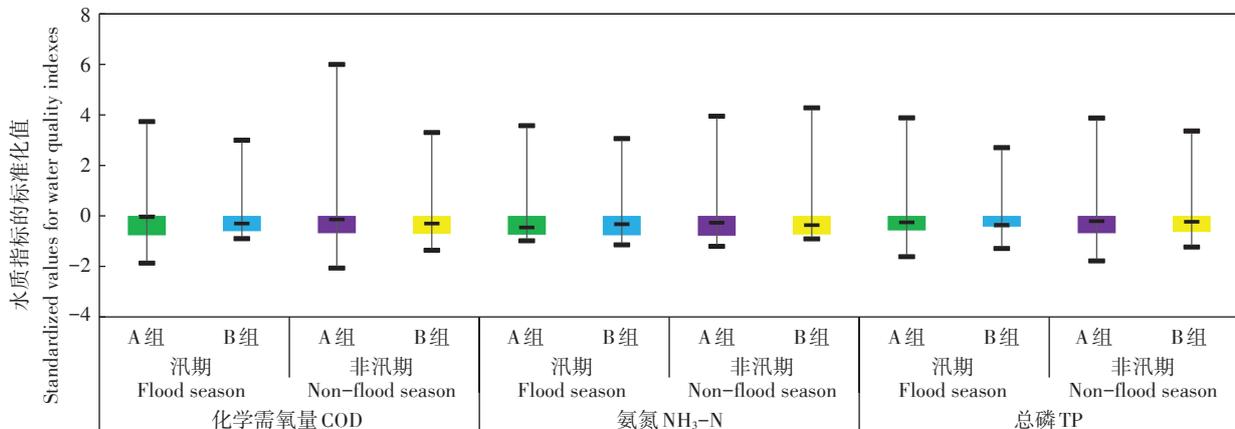


图5 不同时期水体污染物指标不同分组的差异性

Figure 5 Differences of water pollutant indexes of different groups in different periods

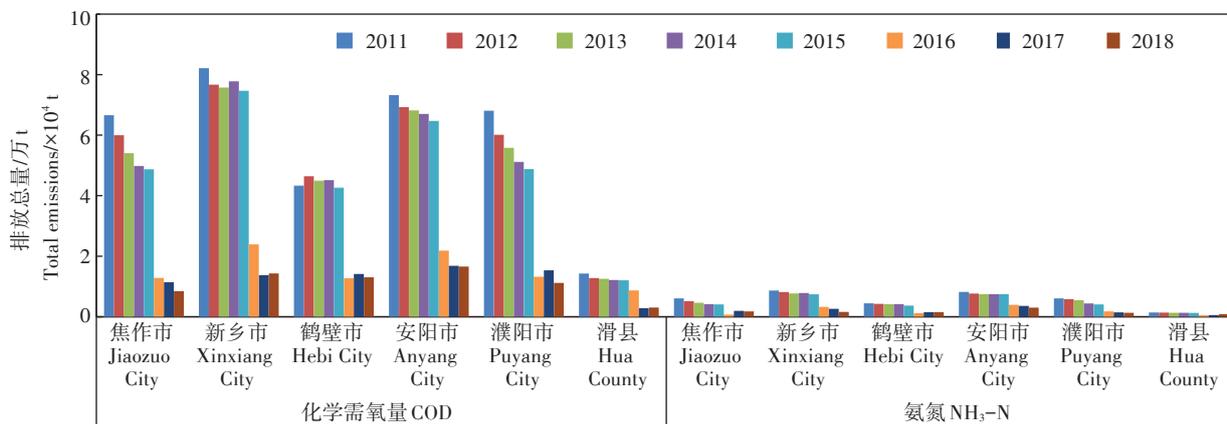


图6 卫河流域河南段各地区水体污染物排放量统计

Figure 6 Discharge statistics of water pollutants in Henan section of Wei River basin

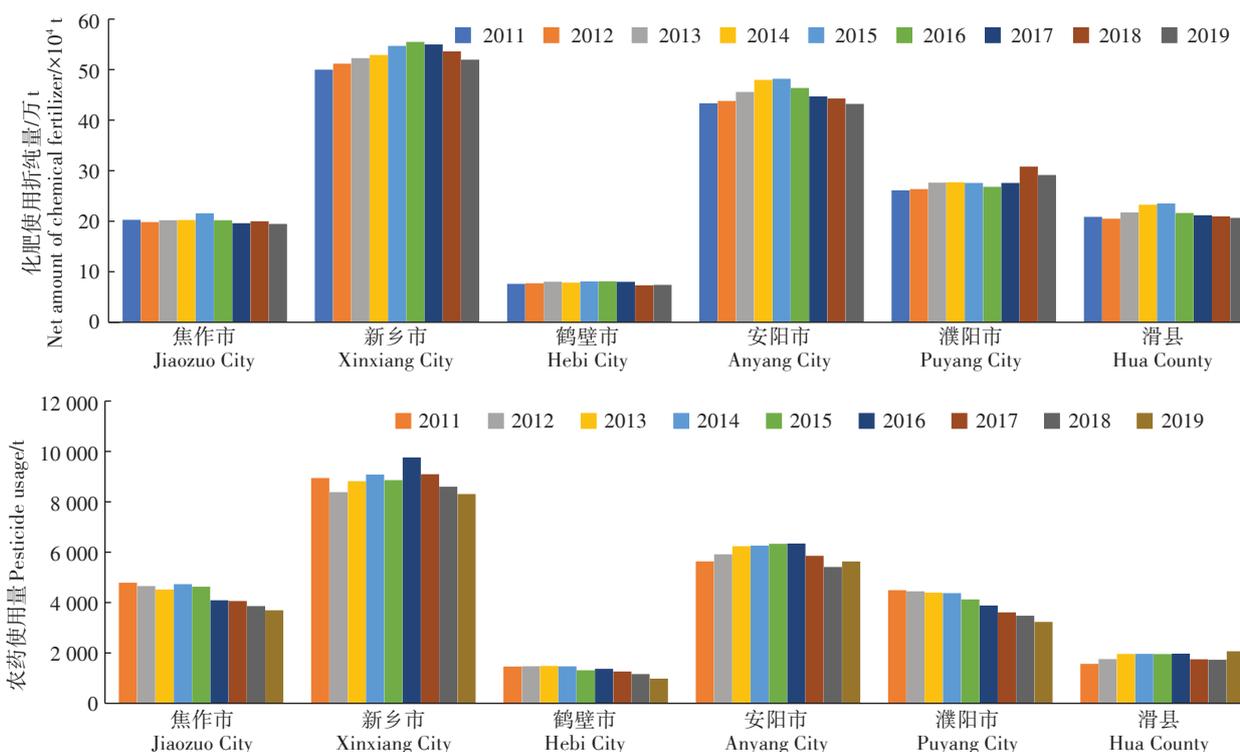


图7 卫河流域河南段各地区农用化肥和农药使用量

Figure 7 Discharge statistics of agricultural fertilizers and pesticides in Henan section of Wei River basin

因此,今后要加强卫河流域河南段农用化肥和农药的控制,防控流域内农业面源污染。

各监测断面水体污染物 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在非汛期的污染程度较大,而 TP 在汛期的污染程度较大,这主要是由于 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染主要来自于工业和生活污水,在非汛期时流域河道内径流量较小,使得污染程度较大;而 TP 污染主要来自农业面源污染,在汛期时通过地面径流作用进入河道,使污染程度较大。整体上,卫河流域河南段各监测断面水体

污染物具有一定的时空差异性和相似性,要改善流域内河流水体环境,各地市需要进一步加强水污染防治工作。

结合相关研究^[1,19-20]可知,1980年以前卫河流域水体受到的污染较轻,1990年到2003年由于受到经济社会快速发展的影响,污染程度加重,2004年到2010年污染状况有所好转,但仍然严峻,2011年之后政府治理水体污染力度的逐步加强,特别是2016年以来卫河流域水环境得到了进一步的改善。虽然卫

河流域河南段水体污染状况存在波动反复的现象,但整体上随着各方面治理措施的完善,卫河流域河南段的水环境质量状况将得到改善。

4 结论

(1)卫河干流、共产主义渠和汤河的水质状况相对较差,淇河和安阳河的水质状况较好, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为卫河流域河南段主要的水体污染物;各监测断面的水体污染物在不同时期基本上呈现出显著减小的趋势,仅监测断面石辛庄的COD在汛期呈现出显著的增加趋势;COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的突变时间多集中在2016年和2017年,而TP的突变时间多集中在2017年和2018年。

(2)水体污染物COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 处于Ⅲ类及以下水质标准的占比各监测断面呈现出汛期>非汛期,处于Ⅳ类及以上水质标准的占比各监测断面呈现出非汛期>汛期;TP处于Ⅲ类及以下水质标准的占比大部分监测断面呈现出非汛期>汛期,处于Ⅳ类及以上水质标准的占比呈现出汛期>非汛期。

(3)不同时期下水体污染物的空间聚类结果有效且相对较好,监测断面鹤壁耿寺COD质量浓度和浚县前枋城TP质量浓度在不同时期的波动性均较小,其余监测断面COD和TP质量浓度的波动性相对较大;各监测断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度在不同时期的波动性具有一定的相似性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张彦, 梁志杰, 李平, 等. 河南省2009—2017年水体污染物时空分布特征解析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 91-98, 144. ZHANG Y, LIANG Z J, LI P, et al. Spatiotemporal variation of pollutants in water bodies from 2009 to 2017 in Henan Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(10): 91-98, 144.
- [3] 白会滨, 刘淑曼, 俞淞, 等. 海河流域水质时空变异规律的分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 290-297. BAI H B, LIU S M, YU S, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of water quality in Haihe River basin[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2020, 56(2): 290-297.
- [4] 王昱, 卢世国, 冯起, 等. 黑河上中游水质时空分异特征及污染源解析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10): 4194-4204. WANG Y, LU S G, FENG Q, et al. Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in the upper and middle reaches of Heihe River[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(10): 4194-4204.
- [5] 王昱, 卢世国, 冯起, 等. 梯级筑坝对黑河水质时空分布特征的影响[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1539-1551. WANG Y, LU S G, FENG Q, et al. Effect of cascade dam construction on the spatio-temporal variations of water quality in Heihe River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1539-1551.
- [6] 杨巧, 李仕杰, 朱润军, 等. 昆明市盘龙江流域水质的时空差异性分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(12): 45-48. YANG Q, LI S J, ZHU R J, et al. Spatial-temporal difference analysis of water quality in basin of Panlongjiang River in Kunming City[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(12): 45-48.
- [7] 杨蕾, 滕向宁, 马正虎, 等. 宁夏闽海湿地水质评价及其空间差异性研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 640-649. YANG L, QU X N, MA Z H, et al. Water quality evaluation and spatial difference of Yuehai wetland in Ningxia[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(3): 640-649.
- [8] 李发荣, 李玉照, 刘永, 等. 牛栏江污染源解析与空间差异性分析[J]. 环境科学研究, 2013, 26(12): 1356-1363. LI F R, LI Y Z, LIU Y, et al. Source apportionment and spatial pattern analysis of River Nilanjiang[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(12): 1356-1363.
- [9] 王翠榆, 杨永辉, 周丰, 等. 沁河流域水体污染物时空分异特征及潜在污染源识别[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2267-2278. WANG C Y, YANG Y H, ZHOU F, et al. Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in River Qinhe basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(9): 2267-2278.
- [10] 苏程佳, 陈晓宏, 谭永强, 等. 潭江水质时空变化特征及其驱动因子[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 109-116. SU C J, CHEN X H, TAN Y Q, et al. Analysis of spatial-temporal change characteristics and its driving factors of water quality in Tanjiang River[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4): 109-116.
- [11] 董雯, 王瑞琛, 李怀恩, 等. 渭河西咸段水质时空变异特征分析[J]. 水力发电学报, 2020, 39(11): 80-89. DONG W, WANG R C, LI H E, et al. Spatiotemporal characteristics analysis of water pollutants in Xixian New Area in Weihe River basin[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(11): 80-89.
- [12] 刘双爽, 袁兴中, 王晓锋, 等. 不同水位期汉丰湖和高阳湖上覆水时空分异特征[J]. 中国环境科学, 2020, 40(11): 4965-4973. LIU S S, YUAN X Z, WANG X F, et al. Spatial-temporal differentiation of water quality under different water level conditions of Hanfeng and Gaoyang lakes in Three Gorges Reservoir[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(11): 4965-4973.
- [13] 钱文瀚, 高月香, 张毅敏, 等. 基于多元统计分析的漏湖水水质时空变化特征及原因解析[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(1): 116-128. QIAN W H, GAO Y X, ZHANG Y M, et al. Analysis of characteristics and reasons of temporal and spatial changes of Gehu Lake water quality based on multivariate statistical analysis[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(1): 116-128.
- [14] 任岩, 张飞, 王娟, 等. 新疆艾比湖流域地表水丰水期和枯水期水质分异特征及污染源解析[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5): 1143-1157. REN Y, ZHANG F, WANG J, et al. Spatio-temporal characteristics and source identification of surface water pollutants in Lake Ebinur

- Watershedm, Xinjiang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(5): 1143-1157.
- [15] 李颖, 张祯, 程建华, 等. 2012—2018年洪泽湖水水质时空变化与原因分析[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(3): 715-726. LI Y, ZHANG Z, CHENG J H, et al. Water quality change and driving forces of Lake Hongze from 2012 to 2018[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(3): 715-726.
- [16] 张胜, 林莉, 王珍, 等. 汉江中下游丰枯水期水质时空变化特征[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(8): 49-53. ZHANG S, LIN L, WANG Z, et al. Spatio-temporal variation of water quality in the middle-lower Hanjiang River[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(8): 49-53.
- [17] 王一旭, 王飞儿, 俞洁. 基于自组织映射与随机森林耦合模型的流域水质空间差异性评估[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(6): 2278-2285. WANG Y X, WANG F E, YU J. Self-organizing map random forest coupling model based spatial heterogeneity evaluation of water quality in the watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(6): 2278-2285.
- [18] 白晓燕, 位帅, 时序, 等. 特大城市群城市集中饮用水源地水质时空变化特征[J]. *水电能源科学*, 2018, 36(3): 42-45, 204. BAI X Y, WEI S, SHI X, et al. Spatial and temporal analysis of urban drinking water quality trends in mega-regions[J]. *Water Resources and Power*, 2018, 36(3): 42-45, 204.
- [19] 孟春芳, 何长海, 田珂宁, 等. 卫河水系新乡段水质时空分异及污染因子识别[J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(4): 1461-1467. MENG C F, HE C H, TIAN K N, et al. Identification of water pollutants in Xinxiang section of Wei River basin in terms of spatio-temporal features and pollution contributors[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(4): 1461-1467.
- [20] 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 等. 漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别[J]. *环境科学*, 2012, 33(2): 359-369. XU H S, XU Z X, TANG F F, et al. Spatiotemporal variation analysis and identification of water pollution sources in the Zhangweinan River basin[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(2): 359-369.
- [21] 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 X. 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.
- [22] 邹磊, 余江游, 王飞宇, 等. 渭河流域极端降水时空演变规律及其对大气环流因子的响应[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(3): 764-774. ZOU L, YU J Y, WANG F Y, et al. Spatial-temporal variations of extreme precipitation indices and their response to atmospheric circulation factors in the Weihe River basin[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(3): 764-774.
- [23] 贾飞飞, 李鑫, 孙翠洋, 等. 1951—2016年黄羊河流域径流变化特征及影响因素分析[J]. *辽宁师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 42(2): 262-267. JIA F F, LI X, SUN C Y, et al. Characteristics of runoff variation in the Huangyang River basin from 1951 to 2016[J]. *Journal of Liaoning Normal University(Natural Science Edition)*, 2019, 42(2): 262-267.
- [24] 刘茂峰, 高彦春, 甘国靖. 白洋淀流域年径流变化趋势及气象影响因素分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(8): 1438-1445. LIU M F, GAO Y C, GAN G J. Long-term trends in annual runoff and the impact of meteorological factors in the Baiyangdian watershed[J]. *Resources Science*, 2011, 33(8): 1438-1445.
- [25] 邹磊, 夏军, 张印, 等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 53-60. ZOU L, XIA J, ZHANG Y, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River basin[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1): 53-60.
- [26] 朱琳, 王雅南, 韩美, 等. 武水河水质时空分布特征及污染成因的解析[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(6): 2150-2156. ZHU L, WANG Y N, HAN M, et al. Spatio-temporal distribution of water quality and source identification of pollution in Wushui River basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(6): 2150-2156.
- [27] 汤云, 卢毅敏, 吴升. 闽江流域水质时空分布特征及污染源解析[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(8): 30-35, 48. TANG Y, LU Y M, WU S. Spatio-temporal distribution and source identification of water pollutants in Minjiang River basin[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(8): 30-35, 48.
- [28] 王欢欢, 白洁, 刘世存, 等. 白洋淀近30年水质时空变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(5): 1051-1059. WANG H H, BAI J, LIU S C, et al. Spatial and temporal variations in the water quality of Baiyangdian Lake in the recent 30 years[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1051-1059.