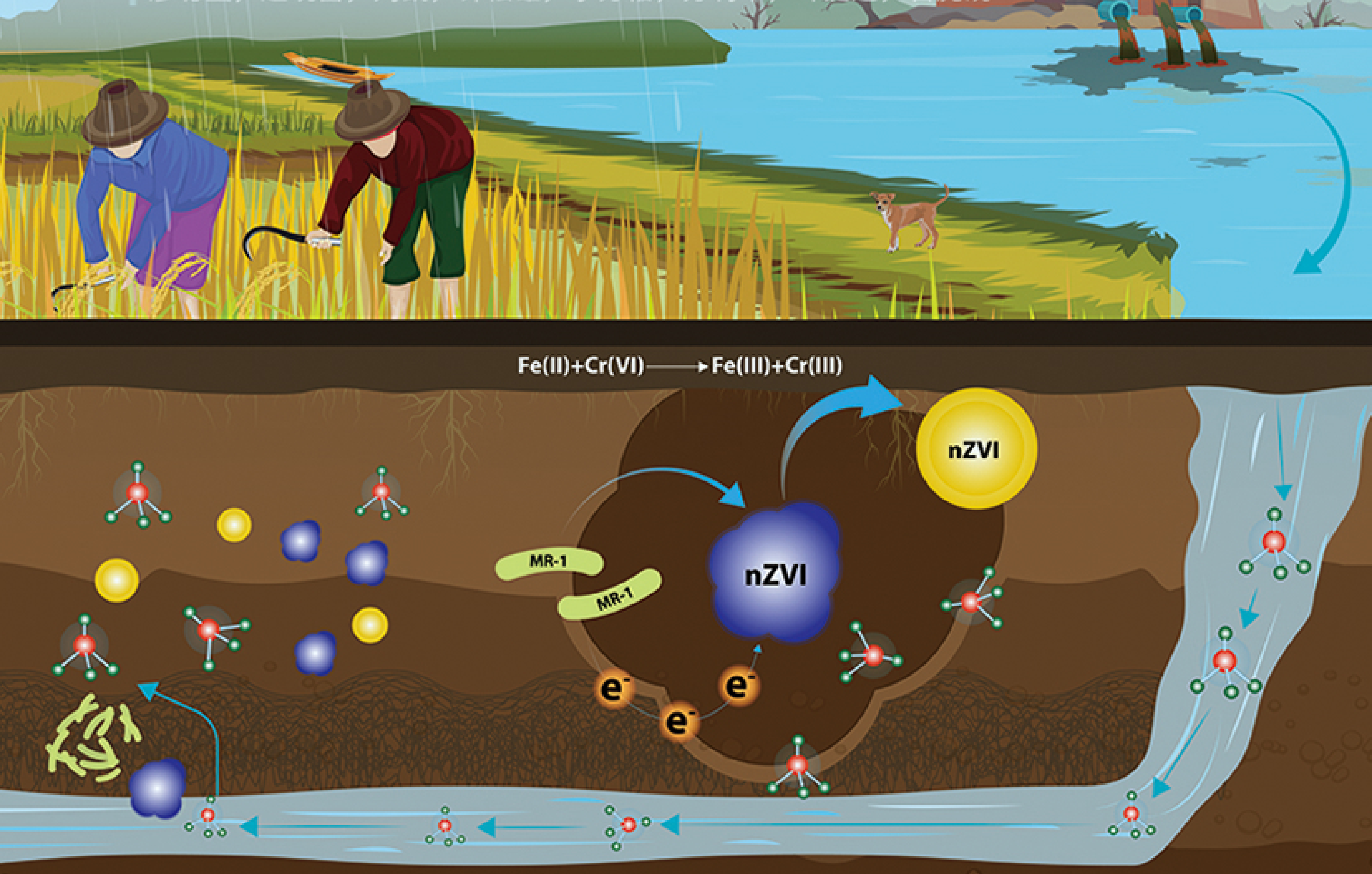
易方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚，赵晓蕾，刘凯，钟松雄，李芳柏，方利平，叶挺进，石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年9月
第42卷 第9期
Vol.42 No.9

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第42卷 第9期
2021年9月15日

目 次

生态环境知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第42卷 第9期 2021年9月
Vol.42, No.9 Sep., 2021

汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别

程兵芬[1,2], 张远[1], 夏瑞[1*], 张楠[1,2], 张新飞[1,2]

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 汉江是南水北调中线工程主要水源区和影响区,近年来汉江中下游水生态环境质量退化严重,河流水华频繁暴发,科学识别水环境质量时空变异及主要驱动因素成为优化上游调水工程重要管理需求. 本研究基于近年汉江水文水质多源数据,综合利用 Daniel 趋势检验、MK 突变分析、K-means 聚类、空间相异度和冗余分析等数学方法,系统揭示了汉江中下游水质时空变异特征及关键影响因素. 结果表明:①近年汉江干流水质总体较好,总体处于Ⅱ类,中下游部分断面水质为Ⅲ类; 多项水质指标多年来总体较好,但总磷和总氮负荷较高,近年 10 个断面总磷和总氮平均浓度分别处于 0. 028 ~ 0. 263 $mg \cdot L^{-1}$ 和 0. 630 ~ 1. 852 $mg \cdot L^{-1}$ 水平; ②时间变化上, Daniel 和 MK 突变结果发现 2004 ~ 2018 年宗关站总磷和总氮年变化趋势不显著,其它多项水质指标也无明显年变化趋势; 枯水期主要水质指标总氮、氨氮和五日生化需氧量总体大于丰水期,化学需氧量不同点位呈现出不同的丰枯变化规律,总磷丰水期浓度下降不明显; ③空间分布上, K-means 聚类和空间相异度结果发现不同断面水质指标变化趋势差异较大, 10 个水质监测断面总体上可以聚类为 3 类,上游水质指标最好,中游次之,下游较差; 值得注意的是,下游小河等断面多项水质指标均趋于改善,可能与近年来实施的控源减排和清澈养殖等保护行动和措施有关; ④在总体较高的氮磷负荷条件下,流量和水温是影响汉江中下游 3 个分区河流水质指标的重要因素,其中流量在上、下游对水质贡献率较大,水温则在中游贡献率最大.

关键词:汉江; 时空变异; 水质; 影响因素; 冗余分析(RDA)

中图分类号: X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)09-4211-11 **DOI**: 10. 13227/j. hjkx. 202012074

Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years

CHENG Bing-fen[1,2], ZHANG Yuan[1], XIA Rui[1*], ZHANG Nan[1,2], ZHANG Xin-fei[1,2]

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Hanjiang River is the main water source and influence area of the Middle Route of the South to North Water Transfer Project. In recent years, the water quality and ecological environment in the middle and lower reaches of the Hanjiang River has become seriously degraded and water blooms occur frequently. Scientific identification of the temporal and spatial variations in water environment quality (and the main driving factors) has become an important management requirement for optimizing the upstream water transfer project. The temporal and spatial variations and influencing factors of water quality in the Hanjiang River basin were systematically analyzed, based on multi-source data and using the Daniel trend test, Mann Kendall test, K-means cluster analysis, dissimilarity analysis, and redundancy analysis. Results showed that: ① in recent years, the main stream of the Hanjiang River had generally good water quality, which was generally classified as class Ⅱ of GB 3838-2002, while the water quality of some sections in the middle and lower reaches was classified as class Ⅲ. However, the total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) load was relatively high, with 10 stations in the Hanjiang River basin showing averaged concentrations of 0. 028-0. 263 $mg \cdot L^{-1}$ and 0. 630-1. 852 $mg \cdot L^{-1}$, respectively, during 2014-2018. ② From 2004 to 2018, TP and TN at Zongguan station did not show significant variation, and other water quality indexes did not exhibit any regular patterns. The concentrations of TN, NH_4^+-N, and BOD_5 in the dry season were higher than those in the wet season. In the wet season. the permanganate index showed different variation patterns, while TP concentration did not decrease significantly. ③ Different sections showed obvious differences in the variation of water quality indexes. However, the ten stations can be clustered into three categories: the upstream stations showed the best water quality, followed by the middle reaches, and the downstream stations showed the worst. The water quality at Xiaohe station improved significantly over the study period, which may be related to protection measures implemented in recent years, such as source control, emission reduction, and removal of aquaculture. ④ Water discharge and temperature were important factors affecting the water quality of the three regions in Hanjiang River. According to redundancy analysis, the contribution of discharge to water quality in the upstream and downstream areas was much larger, while the contribution of water temperature was greatest in the middle reaches of the river.

Key words: Hanjiang River; temporal and spatial variations; water quality; influencing factors; redundancy analysis (RDA)

收稿日期: 2020-12-09; **修订日期**: 2021-03-03

基金项目: 国家重点研究计划项目(2019YFC0408902); 美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23040500); 长江生态环境保护修复联合研究项目(2019-LHYJ-01-0102, 2019-LHYJ-01-0103)

作者简介: 程兵芬(1988 ~),女,博士研究生,主要研究方向为流域水生态, E-mail: bingfenlove@126.com

* 通信作者, E-mail: xiarui@craes.org.cn

近年来河流富营养化逐渐发展为全球化的水生态环境问题[1,2]. 河流富营养化不仅会对河流水质二次损坏,还严重威胁人类用水安全及水生态系统安全, 成为社会环境可持续健康发展的主要瓶颈[3]. 国内外研究表明,氮和磷等高营养负荷是导致河湖水体富营养化并发生水华现象的主要原因,也是各流域水质恶化的重要因素[4]. 随着未来我国社会经济的高速发展和城市化发展的加剧,河流水生态系统仍将面临诸多大尺度和高强度人类活动影响下的退化风险和复合环境压力. 汉江作为我国长江最大的支流多次出现了水华现象,其中自 1992 年汉江(河口以上河段)第一次硅藻水华暴发以来,在 1998、2000、2003、2008、2009、2010、2011 和 2016 年,前后共暴发了 9 次不同程度的水华事件,均发生在 2 ~ 4 月,严重时覆盖河段达到河口以上约 500 km,通常单次持续时间可达 20 d 之久[5~7]. 同时,汉江流域也是我国南水北调中线工程的水源区,南水北调工程的实施,将提高北方供水能力,但是存在导致下游径流量减少的风险,从而可能进一步加剧下游水质环境的恶化,直接影响下游武汉等城市的饮用水安全,成为当地政府的重要管理需求[8].

国内外很多学者针对长江和汉江水生态环境退化的特征和成因分析开展了较多研究,如陈善荣等[9]的研究发现, 2016 ~ 2019 年长江流域总磷、氨氮和化学需氧量均呈现明显的下降趋势,其中总磷和化学需氧量主要来自面源,氨氮主要来自点源. 陈善荣等[10]的研究指出长江中下游人口集中,农业源排放量大,城镇地区工业废水和城镇生活污水排放量大,加之水流迟缓,自净能力降低,易导致化学需氧量超标. 秦延文等[11]的研究发现长江流域总磷污染控制的关键是磷矿开采和磷化工综合治理. 李欣悦等[12]的研究指出受农业施肥和畜禽养殖影响,单位面积农业面源污染负荷高,加之上游来水总氮浓度高,是汉江总氮浓度偏高的主要原因. 张九红等[13]的研究指出近年来生活污水已逐渐成为汉江水污染的主要来源,水体中氮和磷等营养元素浓度高,是造成“水华”最根本的原因,应减少农药和化肥的消费,降低磷面源负荷. 刘成建等[14]的研究发现 2011 ~2018 年,汉江各水质指标年际变化较为复杂,水质总体改善,但氨氮指标不同点位变化趋势较大. 景朝霞等[15]的研究指出, 2014 年南水北调工程导致的汉江中下游水文形势和气候变化,是“水华”暴发及水质恶化的诱因等. 受观测条件制约,很多学者对某一时间段短期汉江水华现象及成因做了较多分析,但对不同时期、不同流域和不同断面水质指标时空变异特征研究较少; 水质时空变异与驱动因素主要集中在长江流域,近年缺乏对汉江水环境现状及变化特征的系统和整体的分析.

本文研究以汉江中下游为重点研究区域,基于长时间序列水文、水质和水生态等多源数据,综合利用 Daniel 趋势检验法、MK 突变检验法、K-means 聚类分析和冗余分析等方法系统分析了汉江流域水质时空变异特征及影响因素,以期为汉江“水华”防治和预警预报提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据

汉江发源于陕西省宁强县潘冢山,流经陕西、湖北两省, 于武汉市进入长江, 全长 1 577 km, 落差 1 964 m,流域面积 1.59×10^5 km^2. 汉江流域属北亚热季风气候区,气候温暖湿润,夏季平均气温 26℃, 冬季平均气温在 0℃ 间, 年平均降水量约为 897 mm,丰水期为 6 ~ 10 月, 枯水期为 11 月至来年 5 月. 汉江武汉段位于江汉平原地区,全长 50 km,是武汉市居民用水和工业用水的主要水源[7].

研究区域为汉江中下游,监测断面包括沈湾、白家湾、余家湖、转斗、皇庄、罗汉闸、岳口、汉南村、小河和宗关,研究时段为 2014 ~ 2018 年,该时段各点位水质指标数据较为完整,为逐月监测数据,水质参数主要有总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_4^+-N)、高锰酸盐指数、溶解氧(DO)和五日生化需氧量(BOD_5); 对于汉江水华频繁暴发区域——汉江武汉段(宗关站区域),为明确水华期间营养盐(TN 和 TP)长时间序列变化特征,研究时段延长到 2004 年, 主要采用 2011 ~ 2018 年逐月监测数据以及 2004 ~2018 年的 2 ~4 月的上、中、下旬数据. 此外,重点对汉江水华主要限制营养元素 TP 的时空变化特征及其影响因素进行分析[6,7]. 针对缺失数据,采用年均值进行替换; 测定结果低于分析方法检出限浓度时,按最低检出限的 1/2 浓度值进行统计分析. 采用的水文监测数据来源于中华人民共和国水文年鉴,均为同时期不同水文站的流量(Q)、流速(v)、水位(H)、水温(T)及降水(Precip)数据,观测断面位置及分类如图 1.

1.2 研究分析方法

1.2.1 Daniel 趋势检验法

Daniel 趋势检验又称 Spearman 的秩相关系数检验, Daniel 趋势检验法是对特定时间序列数据进行定量分析的常用方法,主要用于单因素小样本的检验[16]. 主要原理为,假设有 2 个变量 X 和 Y, R_X 和 R_Y 分别为其秩次,则通过式(1)计算这 2 个变量之间的相关系数:

$$r_S = \frac{\sum R_X R_Y - \frac{\sum R_X \sum R_Y}{N}}{\sqrt{\sum R_X^2 - \frac{\left(\sum R_X\right)^2}{N}} \times \sqrt{\sum R_Y^2 - \frac{\left(\sum R_Y\right)^2}{N}}} \tag{1}$$

当 R_X 和 R_Y 无相同等级时,公式化简如下：

$$r_S = 1 - \left(6\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2\right) \Big/ (n^3 - n) \tag{2}$$

式中,r_S 为 Spearman 秩相关系数,x_i 为浓度值从小到大排列的序号；y_i 为浓度值按时间排列的序号；n 为时间周期. 根据计算出的秩相关系数 r_S,取其绝对值,同 r_S 临界值(W_P)做比较,判断数据的变化趋势,即如果 $|r_S| \geqslant W_P$,表明变化趋势显著；当 $|r_S| \geqslant W_P$ 时,如果 r_S 是正值,表明数据呈现上升趋势；反之,则为下降趋势.

图 1　研究区地理位置及监测点位分布示意

Fig. 1　Geographical location and distribution of monitoring stations

1.2.2　MK 突变检验法

MK 统计检验方法不需要样本遵从一定的分布,且受异常值影响较小[17,18]. 设有一时间序列如下：$x_1, x_2, \cdots, x_n$,构造秩序列 r_i, r_i 含义为 $x_i > x_j$($1 \leqslant j \leqslant i$)的累计数. 定义：

$$S_k = \sum_{i=1}^{k} r_i \quad (k = 1, 2, \cdots, n) \tag{3}$$

假定一组时间序列是随机独立的变量,则对这组时间序列的统计量 UF_k 作如下定义：

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{Var(S_k)}} \tag{4}$$

式中, UF_k 为标准正态分布, $E(S_k)$ 为均值, $Var(S_k)$ 为方差；给定显著水平 α,查询正态分布表,得到临界值 U_α. UF_k 在时间变化中表示为 UF,将同样的分析方法应用到反序列 UB_k 中,在时间变化中表示为 UB. 通过统计序列 UF_k 和 UB_k 交叉点对序列 x 变化趋势进一步进行分析,同时明确突变时间,并指出突变区域.

1.2.3　K-means 聚类分析

K-means 是一种非层次聚类方法,由 Stuart Lloyd 在 1957 年提出其标准算法,直到 1982 年底才由 Stuart Loyd 在贝尔实验室发表[19]. 假设数据集合为 $(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2, \cdots, \boldsymbol{x}_n)$,并且每个 $\boldsymbol{x}_i$ 为 d 维的向量,在分类组数 k 值($k \leqslant n$)确定的前提下, K-means 可将原始数据分成 k 类,然后通过式(5)求最小值.

$$\arg\min \sum_{i=1}^{k} \sum_{x \in S_i} \| \boldsymbol{x} - \boldsymbol{\mu}_i \|^2 \tag{5}$$

1.2.4　CODs 相异度分析

CODs 方法 (coefficient of divergence) 从皮尔森相关系数发展而来,皮尔森相关系数可以用来说明不同污染物之间的相关性,而 CODs 方法用来表示 2 个数据集之间的相似性并计算差异度大小[20,21]. CODs 定义如下：

$$COD_{jk} = \sqrt{\frac{1}{p}\sum_{i=1}^{p}\left(\frac{x_{ij} - x_{jk}}{x_{ij} + x_{jk}}\right)^2} \tag{6}$$

式中, COD_{jk} 为一对监测断面 j 与 k 的相异系数, x_{ij} 和 x_{jk} 分别代表这 2 个监测断面的第 i 对监测浓度, p 为浓度对子的总数, CODs 数值为 0 表示毫无差别,彼此完全相同,数值为 1 表示差别最大,彼此百分之百相异；数值在 0 与 1 之间时,表示既有相同之处,也有一定程度的差异.

1.2.5　RDA 冗余分析法

冗余分析(redundancy analysis, RDA)是一种使用物种和环境因子组成数据的排序技术,是当前生态学领域较为常用的直接梯度变量约束排序分析方法(ordination analysis)[22]. 冗余分析最早由 Vandenwollenberg 发明,可以将环境因子和物种因子等样点投射到排序轴构成的二维平面上,并评价各因子之间的相关性和贡献度[23]. 它的主要原理如下：

$$\boldsymbol{Z}_1 = \boldsymbol{Z}_2 \boldsymbol{W}\boldsymbol{A} + \boldsymbol{E} \tag{7}$$

$$\mathrm{Rank}\,(\boldsymbol{W}\boldsymbol{A}) \leqslant \mathrm{Min}(r, t) \tag{8}$$

式中, $\boldsymbol{Z}_1$ 为独立的内生变量 $n \times r$ 矩阵, $\boldsymbol{Z}_2$ 为自变量或外生变量为 $n \times t$ 矩阵, $\boldsymbol{W}$ 为 $t \times d$ 权重矩阵, $\boldsymbol{A}$ 为 $d \times r$ 载荷矩阵, $\boldsymbol{E}$ 为 $n \times r$ 残差矩阵；式(8)为降秩回归模.

2　结果与讨论

2.1　宗关断面水质时间变化分析

由于宗关断面采样时间较长,数据较为全面,研究首先分析宗关断面各水质指标时间变化. 采样期间, 2004 ~ 2018 年的 2 ~ 4 月宗关站 TP 和 TN 平均值分别为 (0.107 ± 0.012) $mg \cdot L^{-1}$ 和 (1.945 ± 0.116) $mg \cdot L^{-1}$；2011 ~ 2018 年的 1 ~ 12 月宗关站 TP 和 TN 平均值分别为(0.091 ± 0.008) $mg \cdot L^{-1}$ 和

(1.863 ± 0.135) mg·L^{-1}；2014 ~ 2018 年的 1 ~ 12 月宗关站 TP、TN、NH_4^+-N、高锰酸盐指数、DO 和 BOD_5 平均值分别为(0.091 ± 0.022)、(1.852 ± 0.444)、(0.126 ± 0.086)、(2.650 ± 0.642)、(8.533 ± 1.928)和(1.161 ± 0.391) mg·L^{-1}. 2004 ~ 2018 年的 2 ~ 4 月宗关站 TP 与 TN 的 Pearson 相关性系数为 0.902，在 α = 0.01 水平(双侧)上显著相关，2018 年 1 ~ 12 月宗关站 TP 与 TN 的 Pearson 相关性系数为 0.378(P = 0.356)，相关性不明显；2 ~ 4 月水华期间 TP 与 TN 的相关性明显大于全年平均值，这与 Xia 等[6]的研究结果一致，表明水华期间显著性更强. 基于 Daniel 趋势检验法，2004 ~ 2018 年的 2 ~ 4 月和 2011 ~ 2018 年 1 ~ 12 月宗关站 TP 与 TN 变化趋势不显著，2014 ~ 2018 年 1 ~ 12 月宗关站主要水质指标变化趋势均不显著，没有通过 α = 0.05 显著性检验(表 1).

表 1 基于 Daniel 检验法汉江流域宗关站水质指标 10 年来浓度变化

Table 1 Trends of water indexes at Zongguan station in Hanjiang River over the past 10 years

年份	月份	样本量	指标	W_P(α = 0.05)	r_S	变化趋势检验
2004 ~ 2018	2 ~ 4	15	TP	0.514	-0.198	不显著
2004 ~ 2018	2 ~ 4	15	TN	0.514	0.225	不显著
2011 ~ 2018	1 ~ 12	8	TP	0.707	-0.19	不显著
2011 ~ 2018	1 ~ 12	8	TN	0.707	-0.5	不显著
2014 ~ 2018	1 ~ 12	5	TN	0.878	-0.3	不显著
2014 ~ 2018	1 ~ 12	5	TP	0.878	0	不显著
2014 ~ 2018	1 ~ 12	5	NH_4^+-N	0.878	-0.7	不显著
2014 ~ 2018	1 ~ 12	5	高锰酸盐指数	0.878	-0.1	不显著
2014 ~ 2018	1 ~ 12	5	DO	0.878	-0.5	不显著
2014 ~ 2018	1 ~ 12	5	BOD_5	0.878	-0.4	不显著

针对污染负荷较高的 TN 与 TP，基于 MK 突变方法发现 2004 ~ 2018 年宗关站 TP 突变点主要出现在 2008 年和 2014 年，TN 突变点主要出现在 2008 年和 2016 年；而 2017 ~ 2018 年 TP 与 TN 浓度又有所反弹上升(图 2). 2008 年出现突变主要与该年 2 ~ 4 月水华事件为近 20 年最为严重有关[7]；突变时段的 2014 年和 2016 年分别为 TP 和 TN 浓度近年最低点. 根据湖北省生态环境状况公报[24]，2014 ~ 2018 年汉江干流水质总体较好，20 个监测断面水质总体为 Ⅰ ~ Ⅱ 类，但支流断面超标时有发生. 本研究发现，2004 ~ 2018 年宗关站 TP 与 TN 年变化趋势不显著，2011 ~ 2013 年为 TP 和 TN 浓度总

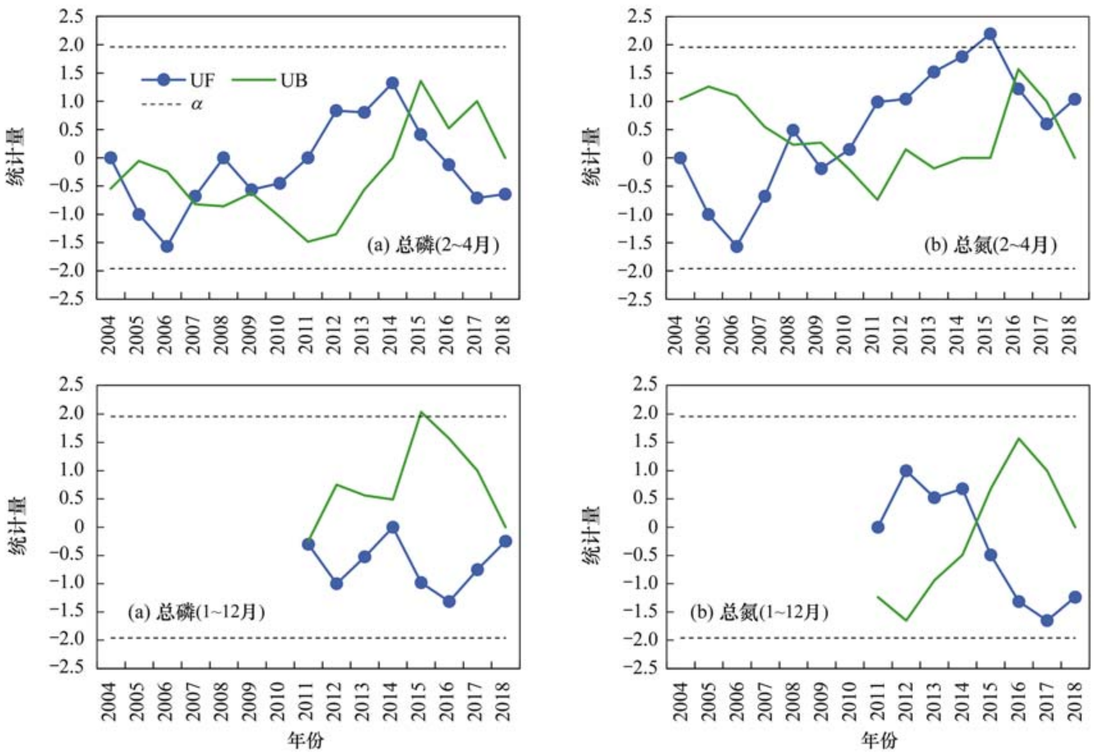


图 2 2004 ~ 2018 年的 2 ~ 4 月宗关站总磷与总氮突变分析

Fig. 2 Trends and mutation analysis of TN and TP at Zongguan station from February to April in 2004-2018

体均较高的一段时期；这与刘成建等[14]对汉江中下游水质分析的结果一致，其分析发现，2011～2018 年汉江中下游水质总体好转，2013～2014 年污染最重，2011～2013 年是重要转折期，农田和城市用地对汉江中下游水质恶化影响较大；而景朝霞等[15]的研究指出，2011～2014 年汉江中下游水质超标指标为 TP、TN 和 BOD_5，其中总氮超标最为严重. 从近年来汉江与长江水质突变结果对比上看，本研究与这些学者关于汉江和长江水质变化趋势的结果具有一定的可比性；如陈善荣等[10]的研究现发 2010～2019 年长江 TP 的年均值在 2014 年最高，超标时段主要出现在 2010～2014 年；娄保锋等[25]的研究发现 2003～2012 年长江干流 TP 浓度逐步上升，2014～2018 年逐步下降，TP 浓度下降主要是由于水污染防治措施和随泥沙汇入磷的减少引起的.

2.2　其它断面时间变化趋势分析

从研究区域其它断面和不同水质指标 Daniel 变化趋势检验结果上看（表 2），不同断面水质指标变化趋势差异较大. 2014～2018 年余家湖断面 TP 呈现明显的上升趋势，其余点位无明显变化趋势；这与刘成建等[14]对 2011～2018 年汉江流域多点位 TP 的分析结果一致. 上游余家湖点位水质明显转好，但 TP 近年有上升趋势，这可能与余家湖上游为唐白河流经重要农业区“南阳盆地”，导致未被农作物吸收的磷被携带入河有关；秦延文等[11]的研究指出“十一五”期间 COD 为国家总量控制重点指标，“十二五”期间增加了NH_4^+-N指标，而 TP 控制一直未被重视. 对于总氮，余家湖呈现明显下降趋势，岳口和小河断面则明显上升，且 2 断面近年水质有变差趋势；李欣悦等[12]的研究指出，农业施肥和畜禽养殖等农业面源排放及上游来水 TN 浓度偏高是汉江部分区域 TN 浓度居高不下的主要原因；王军霞等[26]的研究指出农业源是我国 TN 和 TP 主要排放源，分别占 TN 和 TP 排放量的 69.2% 和 81.0%，2014～2018 年不同断面NH_4^+-N浓度无明显变化趋势；张莺[27]的研究指出枯水期汉江NH_4^+-N受污废水点源排放影响大，丰水期受农业面源影响大. 对于高锰酸盐指数，汉南村呈现明显的上升趋势，小河呈现明显的下降趋势. 对于 DO，罗汉闸断面呈现下降趋势，余家湖、皇庄和小河呈现明显的上升趋势. 对于 BOD_5，小河呈现明显的下降趋势. 小河断面附近水质改善明显，多项水质指标均趋于改善，这可能与近年来实施的控源减排和清澈养殖等保护行动和措施有关. 汉南村和岳口部分水质指标有转差的趋势，需进一步关注和研究.

表 2　2014～2018 年的 1～12 月汉江流域各断面水质指标变化趋势及显著性检验1)

Table 2　Trend and significance test of water quality indexes at different stations in Hanjiang River basin from January to December in 2014-2018

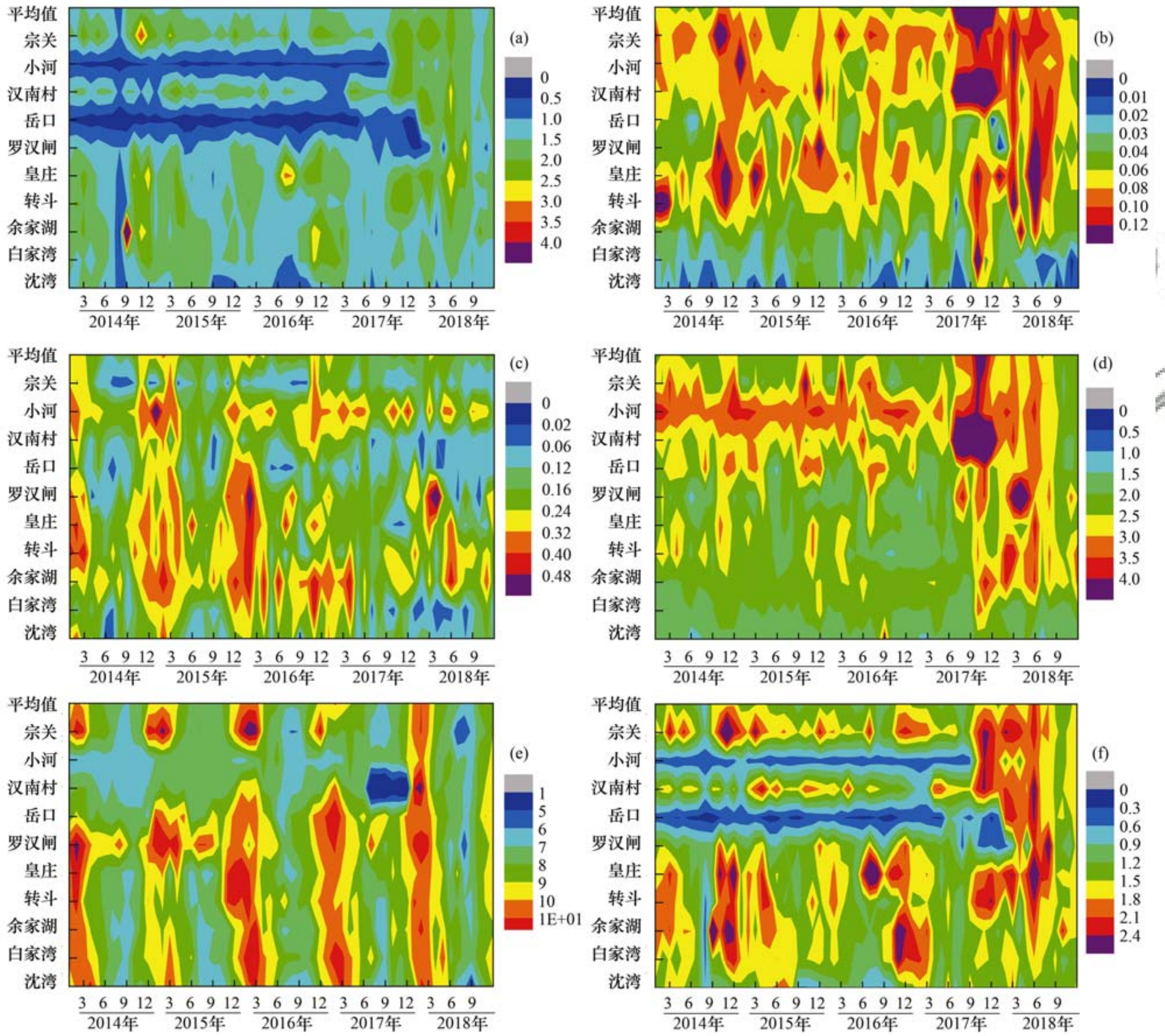
项目	TN	TP	NH_4^+-N	高锰酸盐指数	DO	BOD_5
沈湾	0.6	0.3	−0.5	0.6	−0.1	−0.5
白家湾	−0.5	0	−0.3	0	0.5	−0.5
余家湖	−0.9***	0.95***	−0.3	1	0.9***	−0.5
转斗	0.3	−0.3	−0.7	0.1	0.7	0.2
皇庄	0.3	0	−0.5	0	0.8**	0.3
罗汉闸	0.1	−0.2	0.4	0.6	−0.8**	0.1
岳口	0.9***	0.1	−0.7	−0.6	0.3	−0.9
汉南村	0.7	0.3	−0.6	0.8**	0.4	−0.6
小河	0.9***	0.5	0	−0.9***	0.9***	−0.9***

1）*、** 和 *** 分别表示通过 α 为 0.1、0.05 和 0.01 的显著性检验

2.3　丰枯期不同水质指标浓度对比

本文除研究年变化趋势外，还进一步分析了不同水质指标 2014～2018 年月变化和丰枯期浓度变化. 丰枯期在时间上的划分为丰水期（6～10 月）和枯水期（11 月至次年 5 月），结果见图 3 和表 3. 总体上看，TN、NH_4^+-N和 BOD_5 枯水期总体大于丰水期，高锰酸盐指数不同点位呈现出不同的丰枯变化规律，丰水期 TP 下降不明显. 具体来看，2014～2018 年汉江流域各断面 TP 无明显月变化规律，最高月与最低月均值仅差 0.024 $mg \cdot L^{-1}$，各月值差异不大；各断面枯水期 TP 平均值低于丰水期 0.013 $mg \cdot L^{-1}$；10 个监测断面中有转斗、沈湾、小河、皇庄和余家湖枯水期 TP 浓度高于丰水期，其余断面枯水期 TP 低于丰水期；陈善荣等[9]的研究指出，丰水期较多的雨水将流域沿岸磷矿和磷肥企业的磷冲刷入河，导致丰水期 TP 下降不明显；汉江流域各点位 TP 浓度无明显月变化规律也进一步显示汉江流域 TP 污染呈面源污染特征. 2014～2018 年汉江流域各点位 TN 和NH_4^+-N月变化规律较为显著，呈现出枯水期浓度高于丰水期特征；丰水期 TN 和NH_4^+-N均值分别比枯水期高出 0.127 $mg \cdot L^{-1}$ 和 0.067 $mg \cdot L^{-1}$，个别断面如罗汉闸和岳口 TN 枯水期略低

于丰水期；丰水期 6 ~ 10 月最低，较多的雨水和较大的流量稀释了 TN 和NH_4^+-N值，同时河流自净能力也大幅提升，综合导致丰水期 TN 和NH_4^+-N浓度较低；逐月分布上，TN 和NH_4^+-N的 Pearson 相关性系数为 0.681（P = 0.015），呈现明显正相关，这说明汉江流域 TN 和NH_4^+-N主要来自点源. 从流域均值上看，汉江流域各断面高锰酸盐指数、BOD_5 和 DO 的月变化规律较为显著，BOD_5 和 DO 呈现出枯水期值高于丰水期的特征，BOD_5 和 DO 枯水期均值分别比丰水期高出 0.246 mg·L^{-1}和 1.807 mg·L^{-1}. 高锰酸盐指数总体呈现出枯水期低于丰水期特征，其中岳口、汉南村和宗关断面枯水期浓度分别比丰水期低出 0.133、0.895 和 0.141 mg·L^{-1}，其余点位枯水期均值比丰水期高出 0.040 ~ 0.193 mg·L^{-1}. 丰水期大量的还原性物质进入汉江，导致 BOD_5 和 DO 低于枯水期. 尽管高锰酸盐指数不同点位呈现出不同的变化规律，但总的月变化幅度低于 BOD_5 和 DO，这说明高锰酸盐指数污染负荷除主要来自面源外，部分断面也受到附近点源污染影响，特别是受到沿汉江城镇和工厂污水排放的影响.



(a)TN，(b)TP，(c)NH_4^+-N，(d)高锰酸盐指数，(e)DO，(f)BOD_5；图例单位mg·L^{-1}

图 3 2014 ~ 2018 年不同月份不同断面水质指标变化

Fig. 3 Variations of water quality indicators at different stations in different months from 2014 to 2018

2.4 空间变异与聚类分析

从不同断面各项指标变化上看（图 3 和图 4），2014 ~ 2018 年 TP 汉南村断面浓度最高，为 0.263 mg·L^{-1}，沈湾断面最低，为 0.028 mg·L^{-1}；10 断面中仅汉南村 TP 平均值超过地表水环境质量标准（GB 3838-2002）Ⅱ 类水标准限值（TP = 0.1 mg·L^{-1}）. 2014 ~ 2018 年 TN 宗关断面最高，为 1.852 mg·L^{-1}，岳口断面最低，为 0.630 mg·L^{-1}；10 个断面中仅岳口和小河断面 TN 浓度低于地表水Ⅲ类水标准限值（TN = 1.0 mg·L^{-1}），均超过地表水Ⅱ

类水标准限值(TN = 0.5 mg·L^{-1}). 2014 ~ 2018 年 NH_4^+-N余家湖断面浓度最高,为 0.286 mg·L^{-1},宗关断面最低,为 0.126 mg·L^{-1}, 10 断面中NH_4^+-N值均低于地表水Ⅱ类水标准限值(NH_4^+-N = 0.5 mg·L^{-1}). 2014 ~2018 年高锰酸盐指数汉南村断面浓度最高,为 3.678 mg·L^{-1},沈湾断面最低,为 1.805 mg·L^{-1}, 10 断面中高锰酸盐指数值均低于地表水Ⅰ类水标准限值(高锰酸盐指数 = 15 mg·L^{-1}). 2014 ~ 2018 年 DO 浓度罗汉闸断面浓度最高,为 9.630 mg·L^{-1},小河断面最低,为 7.344 mg·L^{-1}, 10 断面中除汉南村和小河断面外, DO 浓度均高于地表水Ⅰ类水标准限值(DO = 7.5 mg·L^{-1}). 2014 ~2018 年 BOD_5 值小河断面最高,为 2.181 mg·L^{-1},转斗断面最低,为 1.083 mg·L^{-1}, 10 断面中 BOD_5 浓度均低于地表水Ⅰ类水标准限值(BOD_5 = 3.0 mg·L^{-1}). 由此可见, 2014 ~2018 年汉江流域 10 断面中,主要污染水质指标为 TP 和 TN,与总量减排约束性指标相关联的高锰酸盐指数和NH_4^+-N近年来已经明显改善. 由此可见,近年汉江干流水质总体较好,总体处于Ⅱ类; 研究区域 10 个断面水质差异较大,空间分布上呈现出从研究区域上游至中下游逐渐变差的特征,中下游部分断面水质为Ⅲ类.

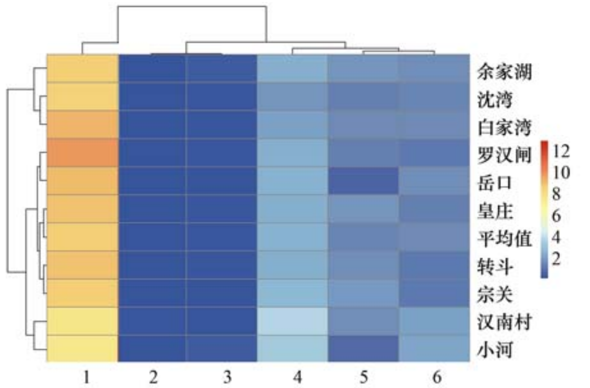
表 3 2014 ~2018 年不同断面丰水期、枯水期水质指标变化及差异统计/mg·L^{-1}

Table 3 Statistics of water quality indexes at different stations during the wet season and dry seasons from 2014 to 2018/mg·L^{-1}

断面	时段	TN	TP	NH_4^+-N	高锰酸盐指数	DO	BOD_5
沈湾	丰水期	1.163	0.023	0.123	1.782	6.856	1.148
	枯水期	1.297	0.031	0.192	1.822	9.425	1.418
	差异值	0.135	0.007	0.068	0.04	2.569	0.269
白家湾	丰水期	1.364	0.033	0.135	1.988	7.919	1.335
	枯水期	1.644	0.033	0.206	2.074	9.836	1.666
	差异值	0.28	0	0.071	0.086	1.917	0.331
余家湖	丰水期	1.71	0.047	0.257	2.366	7.359	1.627
	枯水期	1.713	0.047	0.306	2.509	9.376	1.712
	差异值	0.003	0.001	0.049	0.144	2.017	0.085
转斗	丰水期	1.397	0.064	0.217	2.239	7.703	0.988
	枯水期	1.714	0.073	0.264	2.432	9.608	1.151
	差异值	0.317	0.009	0.046	0.193	1.904	0.163
皇庄	丰水期	1.749	0.081	0.21	2.341	7.51	1.217
	枯水期	1.8	0.087	0.266	2.376	9.617	1.248
	差异值	0.051	0.006	0.056	0.035	2.107	0.03
罗汉闸	丰水期	1.29	0.073	0.162	2.283	8.773	0.889
	枯水期	1.284	0.058	0.284	2.339	10.047	1.282
	差异值	−0.006	−0.015	0.122	0.056	1.274	0.393
岳口	丰水期	0.638	0.06	0.099	2.607	8.019	1.489
	枯水期	0.624	0.059	0.168	2.474	9.618	1.712
	差异值	−0.014	−0.001	0.068	−0.133	1.599	0.223
汉南村	丰水期	1.64	0.346	0.13	4.2	6.477	1.811
	枯水期	1.676	0.204	0.172	3.305	8.118	2.198
	差异值	0.036	−0.142	0.041	−0.895	1.64	0.387
小河	丰水期	0.712	0.073	0.246	3.171	7.233	2.039
	枯水期	0.805	0.078	0.313	3.313	7.424	2.283
	差异值	0.093	0.005	0.067	0.142	0.191	0.244
宗关	丰水期	1.644	0.091	0.091	2.732	6.985	0.997
	枯水期	2.001	0.091	0.151	2.591	9.639	1.278
	差异值	0.357	0	0.06	−0.141	2.653	0.281
流域均值	丰水期	1.331	0.089	0.167	2.571	7.483	1.354
	枯水期	1.458	0.076	0.234	2.526	9.29	1.6
	差异值	0.127	−0.013	0.067	−0.044	1.807	0.246

本研究进而对 2014 ~2018 年汉江流域不同断面不同水质指标进行 K-means 聚类分析(图 4) ,可以发现,汉江流域 10 个水质断面总体上可以聚类为 3 类,第 1 类是余家湖、沈湾和白家湾断面,它们处于研究区域的上游,水质指标总体较好; 第 2 类是罗汉闸、岳口、皇庄、转斗和宗关断面,它们处于研究区域的中游,水质情况与 10 个断面平均值情况相当; 第 3 类为汉南村、小河断面,它们处于汉江流域的下游,各项水质指标与上游、中游有着明显的差异. 从主要的水质指标聚类结果上看, DO 和高锰酸盐指数为一类,它们的量值都较大, TP 和 TN 等剩余的水质指标为一类,它们的量值比较接近.

需要指出的是,宗关断面尽管位于汉江下游,距离长江和汉江交汇处仅 5 km,水动力和水质指标受长江水位顶托作用明显[28],因而本研究将宗关断面单独划为一类,不再并入第 2 类进行分析(下同). 综合来看,这 3 个聚类结果代表 9 个断面中的 3 种水质等级,第 1 类水质情况最优,第 2 类水质次之,第 3 类水质最差,超标的水质指标均为 TP 和 TN. 采用 K-means 非层次聚类方法 10 个断面的水质指标聚类时,并用兰德指数对聚类结果进行评价,兰德指数越大表示聚类效果准确性越高同时每个类内的纯度越高[29]. 结果显示, 3 类兰德指数为 0.65,比 2 ~6 类均高; 体现出聚类结果可信度.



1 表示 DO; 2 表示 TP; 3 表示NH_4^+-N;
4 表示高锰酸盐指数; 5 表示 TN; 6 表示 BOD_5

图 4 2014 ~2018 年汉江流域不同断面不同水质指标聚类结果

Fig. 4 Clustering results of water quality indexes for different sections of the Hanjiang River from 2014 to 2018, based on K-means method

对于单个水质指标, TP 和 TN 超标情况最为突出. 以 TP 为例, 2014 ~2018 年汉江流域不同断面 TP 时空聚类结果显示(图 5),与 10 个断面综合聚类结果相比,各断面 TP 单独聚类结果出现了较为明显的差异; 空间分布上, 10 个水质断面总体聚类为 3 类,第 1 类是余家湖、沈湾和白家湾断面,它们处于研究区域上游,水质指标总体较好,与综合聚类结果一致; 第 2 类是转斗、罗汉闸和岳口,第 3 类是汉南村、小河和皇庄, TP 的第 2、3 类与综合聚类的结果略有不同(图 5),一定程度上表明这些断面 TP 的大小存在一定的差异且 TP 有着自己独特的时空变异趋势(宗关断面不再分析). 从时间聚类上看,总体上也可以聚为 3 类,第 1 类是 2014 年 10 ~11 月、2017 年 10 月、2015 年 12 月、2018 年 3 月和 2018 年 6 月,这些月份 TP 浓度普遍偏高,特别是中下游各断面, TP 一度达到 0.15 mg·L^{-1}; 第 2 类是 2014 年 1 ~3 月、2015 年 1 月、2015 年 3 月、2017 年 11 月、2018 年 1 月、2018 年 5 月和 2018 年 7 ~8 月,这些月份中下游各断面 TP 浓度总体处于中等水平; 剩下的各月份聚为第 3 类. 采用 K-means 时空聚类分析对 2014 ~2018 年汉江流域不同断面水质指标分析, 10 个不同断面总体上聚类结果有所差异,上游的 3 个点位基本聚为一类,结果比较一致; 本研究区域中下游针对不同的水质指标聚类结果略有差异; 但结合总磷单独聚类和综合聚类的结果,本研究将其划分为区域中游罗汉闸、岳口、皇庄、转斗和宗关断面一类以及研究区域下游汉南村和小河断面一类.

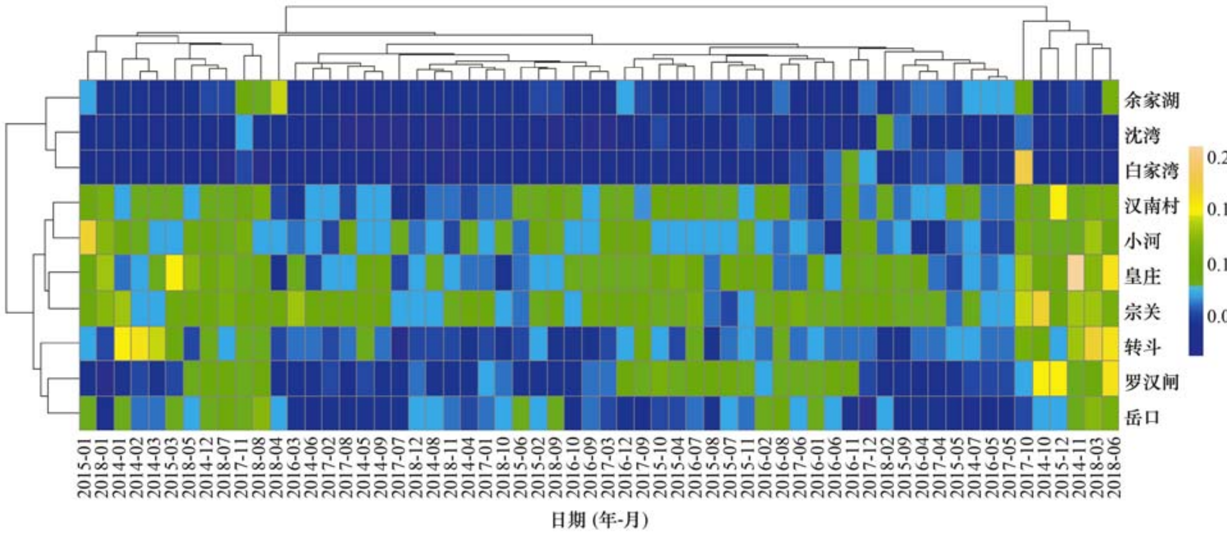


图 5 2014 ~2018 年汉江流域不同断面总磷时空聚类结果

Fig. 5 Temporal and spatial clustering results of TP in different sections of Hanjiang River basin from 2014 to 2018

基于 CODs 分析方法,进一步计算的 3 个聚类各项水质指标相异度结果统计显示(表 4),研究区域上中下游各项水质指标相异度系数有着明显的差异,可以明显区分出 3 个类别与均值的差异. 以 TP 为例,上游 3 个断面与所有断面平均值相异度系数为 0.419,下游汉南村和小河这 2 个断面与所有断面平均值相异度系数为 0.233,中游各个点位与平均值相异度系数为 0.254; 各类别相异度系数有着明显的差

异,不同类别间数值有着明显的不同,再次证明研究采用的聚类结果是合理的,结果是可接受的.

表 4　2014～2018 年汉江流域不同断面水质指标相异度系数分布

Table 4　CODs of water quality index in different sections of the Hanjiang River basin from 2014 to 2018

项目	TP	TN	NH_4^+-N	高锰酸盐指数	DO	BOD_5
区域上游断面	0.419	0.14	0.26	0.138	0.05	0.203
区域中游断面	0.254	0.231	0.278	0.109	0.061	0.219
区域下游断面	0.233	0.29	0.251	0.172	0.132	0.269

2.5　时空驱动因素识别

不同流域人类活动包括农业面源排放、城镇工业和生活污水排放及人为治理均会直接影响水体各项水质指标大小；如刘成建等[14]的研究发现农田和城市用地对汉江中下游水质恶化影响较大；范新凤等[30]的研究指出 2009～2017 年污染物排放和土地利用类型变化导致小清河水质变差；田伟等[31]的研究发现无锡蠡湖 TN 和 TP 等水质指标在 1997～2003 年最差, 2003 年经过综合治理后逐年改善,但近两年略有反弹等. 此外,近年南水北调取水工程和引江济汉工程等实施也会一定程度上改变汉江的水动力条件,也会导致水质指标变化；如潘晓雪等[32]的研究指出各形态 P 浓度沿程和时间变化不明显,“引江济太”期间颗粒态磷是望虞河水体 P 输入的主要形态.

本研究进一步分析了水动力和水环境等因素对水质空间变异的影响. 表 5 统计了 2014～2018 年不同断面水质指标间的相关性,研究区域上游 TP 与高锰酸盐指数呈现弱正相关性；区域中游 TP 与 TN 和高锰酸盐指数呈弱正相关性，TN 与NH_4^+-N和高锰酸盐指数呈弱正相关性；区域下游除 DO 与 TN 和NH_4^+-N无显著相关性外,其余指标之间均存在显著的正、负相关关系,相关系数绝对值较大. 与区域上游断面相比,中下游各水质指标有一定的相关性特别是区域下游,说明区域中下游水质指标影响因素更多；此外,各水质指标的变化范围 TP、高锰酸盐指数和 BOD_5 变幅较小,总体较为稳定,而 DO、NH_4^+-N和 TN 波动较大.

表 5　2014～2018 年不同断面各水质指标相关性统计分析1)

Table 5　Correlation statistics of total phosphorus and other water quality indicators at different stations from 2014 to 2018

	变量	TP	TN	NH_4^+-N	高锰酸盐指数	DO	BOD_5
区域上游	TP	1.000	-0.159	-0.028	0.416**	-0.070	-0.145
	TN	-0.159	1.000	-0.050	-0.103	-0.105	-0.050
	NH_4^+-N	-0.028	-0.050	1.000	0.075	0.127	-0.050
	高锰酸盐指数	0.416**	-0.103	0.075	1.000	0.250	-0.021
	DO	-0.070	-0.105	0.127	0.250	1.000	0.235
	BOD5	-0.145	-0.050	-0.050	-0.021	0.235	1.000
区域中游	TP	1.000	0.406**	0.245	0.511**	-0.023	-0.165
	TN	0.406**	1.000	0.317*	0.354**	0.088	0.003
	NH_4^+-N	0.245	0.317*	1.000	0.218	0.264*	0.136
	高锰酸盐指数	0.511**	0.354**	0.218	1.000	0.055	0.048
	DO	-0.023	0.088	0.264*	0.055	1.000	0.171
	BOD5	-0.165	0.003	0.136	0.048	0.171	1.000
区域下游	TP	1.000	0.285*	-0.263*	0.985**	-0.752**	-0.712**
	TN	0.285*	1.000	-0.270*	0.274*	-0.066	-0.258*
	NH_4^+-N	-0.263*	-0.270*	1.000	-0.288*	0.130	0.497**
	高锰酸盐指数	0.985**	0.274*	-0.288*	1.000	-0.738**	-0.698**
	DO	-0.752**	-0.066	0.130	-0.738**	1.000	0.590**
	BOD5	-0.712**	-0.258*	0.497**	-0.698**	0.590**	1.000

1）*、** 和 *** 分别表示通过 α 为 0.1、0.05 和 0.01 的显著性检验

本研究进一步结合汉江下游水质时空分布特征,采用 RDA 对 3 个区域的影响因素进行分析(表 6). 蒙特卡洛置换检验结果显示：流量($P=0.016$)和水温($P=0.014$)对上游区域水质变化影响显著,其贡献率分别达到 48.4% 和 43.1%. 汉江中游蒙特卡洛置换检验结果发现,水温($P=0.002$)对中游水质变化影响显著,其贡献率为 88.5%,其次是流量 6.8% ($P=0.26$)，汉江下游蒙特卡洛置换检验结果指出,水温($P=0.032$)和流量($P=0.09$)对下游水质变化影响显著,其贡献率分别为 50.7% 和 32.0%. 总体来

看,除人为活动影响外,在研究的水动力和气候变化因素中,流量、水温是影响汉江中下游3个分区河流水质指标的重要因素,其中流量在上和下游对水质贡献率较大,水温则在中游贡献率最大.

表6 2014~2018年不同区域水质指标主要影响要素RDA结果统计分析

Table 6 Factors influencing the water quality index at different stations from 2014 to 2018 based on RDA method

影响因素	上游		中游		下游	
	贡献率/%	P值	贡献率/%	P值	贡献率/%	P值
水温	43.1	0.014	88.5	0.002	50.7	0.032
流量	48.4	0.016	6.8	0.260	32.0	0.09
降水	5.5	0.574	2.6	0.638	13.6	0.314
水位	3.1	0.664	2.1	0.668	3.7	0.742

综上,不同区域水质指标变化影响因素众多,受各种因素的制约,下一步还应结合大数据,精细化分析人类活动和气候、水动力变化对不同区域水质的影响.

3 结论

(1)近年汉江干流水质总体较好,总体处于Ⅱ类,中下游部分断面水质为Ⅲ类; 多项水质多年来总体较好,但TP和TN负荷较高; 2004~2018年宗关站TP和TN年变化趋势不显著, 2014~2018年10个断面TP和TN平均浓度分别处于0.028~0.263 $mg\cdot L^{-1}$和0.630~1.852 $mg\cdot L^{-1}$水平. 枯水期汉江主要水质指标TN、NH_4^+-N和BOD_5浓度总体大于丰水期, COD不同点位呈现出不同的丰枯变化规律, TP丰水期浓度下降不明显.

(2)汉江流域从上游至下游,不同断面水质指标变化趋势差异较大; 10个水质断面总体上可以聚类为3类,上游水质指标最好,中游次之,下游较差. 下游小河断面多项水质指标均趋于改善,这可能与近年来实施的控源减排、清漱养殖等保护行动和措施有关.

(3)在总体较高的氮磷负荷条件下,冗余分析发现,流量和水温是影响汉江中下游3个分区河流水质指标的重要因素,其中流量在上和下游对水质贡献率较大,水温则在中游贡献率最大.

参考文献:

[1] Charlton M B, Bowes M J, Hutchins M G, *et al*. Mapping eutrophication risk from climate change: Future phosphorus concentrations in English rivers[J]. Science of the Total Environment, 2018, **613-614**: 1510-1526.

[2] Nguyen T T N, Némery J, Gratiot N, *et al*. Nutrient dynamics and eutrophication assessment in the tropical river system of Saigon- Dongnai (southern Vietnam)[J]. Science of the Total Environment, 2019, **653**: 370-383.

[3] Jarvie H P, Smith D R, Norton L R, *et al*. Phosphorus and nitrogen limitation and impairment of headwater streams relative to rivers in Great Britain: a national perspective on eutrophication[J]. Science of the Total Environment, 2018, **621**: 849-862.

[4] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al*. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. Science, 2019, **323**(5917): 1014-1015.

[5] Ji D B, Wells S A, Yang Z J, *et al*. Impacts of water level rise on algal bloom prevention in the tributary of Three Gorges Reservoir, China[J]. Ecological Engineering, 2017, **98**: 70-81.

[6] Xia R, Zhang Y, Wang G S, *et al*. Multi-factor identification and modelling analyses for managing large river algal blooms[J]. Environmental Pollution, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113056.

[7] Cheng B F, Xia R, Zhang Y, *et al*. Characterization and causes analysis for algae blooms in large river system[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, **51**, doi: 10.1016/j.scs.2019.101707.

[8] Xia R, Wang GS, Zhang Y, *et al*. River algal blooms are well predicted by antecedent environmental conditions[J]. Water Research, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116221.

[9] 陈善荣, 何立环, 张凤英, 等. 2016-2019年长江流域水质时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1100-1108.
Chen S R, He L H, Zhang F Y, *et al*. Spatiotemporal characteristics of surface water quality of the Yangtze River Basin during 2016-2019[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(5): 1100-1108.

[10] 陈善荣, 何立环, 林兰钰, 等. 近40年来长江干流水质变化研究[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1119-1128.
Chen S R, He L H, Lin L Y, *et al*. Change Trends of surface water quality in the Mainstream of the Yangtze River during the past four decades[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(5): 1119-1128.

[11] 秦延文, 马迎群, 王丽婧, 等. 长江流域总磷污染: 分布特征·来源解析·控制对策[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(1): 9-14.
Qin Y W, Ma Y Q, Wang L J, *et al*. Pollution of the total phosphorus in the Yangtze River basin: distribution characteristics, source and control strategy[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(1): 9-14.

[12] 李欣悦, 李昱燃. 2019年汉江干流水质评价与分析[J]. 环境研究与监测, 2020, **33**(3): 47-51.
Li X Y, Li Y R. Water quality evaluation and analysis of the main Stream of the Han River in 2019[J]. Environmental Research and Monitoring, 2020, **33**(3): 47-51.

[13] 张九红, 敖良桂. 汉江中下游水质现状及污染趋势分析[J]. 水资源保护, 2004, **20**(3): 46-48.
Zhang J H, Ao L G. Current situation of water quality of the middle and lower Hanjiang River and trend of its pollution[J]. Water Resources Protection, 2004, **20**(3): 46-48.

[14] 刘成建, 夏军, 宋进喜, 等. 汉江中下游水质时空特征与土地利用类型响应识别研究[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(4): 910-919.
Liu C J, Xia J, Song J X, *et al*. Spatial and temporal

characteristics of water quality and response identification of land use patterns in the middle and downstream of Hanjiang River [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(4): 910-919.

[15] 景朝霞, 夏军, 张翔, 等. 汉江中下游干流水质状况时空分布特征及变化规律[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(1): 104-115.
Jing Z X, Xia J, Zhang X, *et al*. Spatial and temporal distribution and variation of water quality in the middle and downstream of Hanjiang River[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(1): 104-115.

[16] Spearman C. The proof and measurement of association between two things[J]. American Journal of Psychology, 1904, **15**(1): 72-101.

[17] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, **13**(3): 245-259.

[18] Kendall M G. Rank correlation methods (4th ed.)[M]. London: Charles Griffin, 1975.

[19] Lloyd S P. Least squares quantization in PCM[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1982, **28**(2): 129-137.

[20] He J J, Gong S L, Yu Y, *et al*. Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities[J]. Environmental Pollution, 2017, **223**: 484-496.

[21] Wongphatarakul V, Friedlander S K, Pinto J P. A comparative study of $PM_{2.5}$ ambient aerosol chemical databases[J]. Environmental Science & Technology, 1998, **32**(24): 3926-3934.

[22] Von Wehrden H, Hanspach J, Bruelheide H, *et al*. Pluralism and diversity: trends in the use and application of ordination methods 1990-2007[J]. Journal of Vegetation Science, 2009, **20**(4): 695-705.

[23] 赖江山. 生态学多元数据排序分析软件 Canoco 5 介绍[J]. 生物多样性, 2013, **21**(6): 765-768.
Lai J S. Canoco 5: a new version of an ecological multivariate data ordination program[J]. Biodiversity Science, 2013, **21**(6): 765-768.

[24] 湖北省生态环境厅. 湖北省环境质量状况公报[R]. 武汉: 湖北省生态环境厅, 2014-2018.

[25] 娄保锋, 卓海华, 周正, 等. 近 18 年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1150-1162.
Lou B F, Zhuo H H, Zhou Z, *et al*. Analysis on alteration of water quality and pollutant fluxes in the Yangtze mainstem during recently 18 years[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(5): 1150-1162.

[26] 王军霞, 李莉娜, 陈敏敏, 等. 中国重点污染源总磷、总氮排放状况研究[J]. 环境污染与防治, 2015, **37**(10): 98-103, 110.
Wang J X, Li L N, Chen M M, *et al*. Research on total phosphorus and total nitrogen emission status of main pollution sources in China[J]. Environmental Pollution & Control, 2015, **37**(10): 98-103, 110.

[27] 张莺. 湖北省河流中氨氮的污染状况与特征[J]. 环境科学与技术, 2001, **24**(S1): 30-31.
Zhang Y. The pollution features of NH2-N in Hubei water bodies [J]. Environmental Science & Technology, 2001, **24**(S1): 30-31.

[28] 瞿月平, 黄勇, 何志高, 等. 长江回水顶托对汉江兴隆至汉川水沙过程的影响[J]. 中国水运, 2014, (11): 62-64.

[29] 梁萱. 空气质量的统计学评估方法及其应用[D]. 北京: 北京大学, 2017.
Liang X. Statistical evaluation method of air quality and its application[D]. Beijing: Peking University, 2017.

[30] 范新凤, 韩美, 王磊, 等. 小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1619-1628.
Fan X F, Han M, Wang L, *et al*. Analysis of water quality change and its driving factors of the Xiaoqing river estuary in recent ten rears[J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1619-1628.

[31] 田伟, 杨周生, 邵克强, 等. 城市湖泊水环境整治对改善水质的影响: 以蠡湖近 30 年水质变化为例[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 183-193.
Tian W, Yang Z S, Shao K Q, *et al*. Effect of a comprehensive improvement project on water quality in urban lakes: a case study of water quality variation in Lihu lake over the past 30 years[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 183-193.

[32] 潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 等. "引江济太"过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2800-2808.
Pan X X, Ma Y Q, Qin Y W, *et al*. Nutrients input characteristics of the Yangtze river and Wangyu river during the "water transfers on lake Taihu from the Yangtze River"[J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2800-2808.

HUANJING KEXUE Vol. 42 No. 9
Environmental Science (monthly) Sep. 15, 2021

CONTENTS