

汉江中下游干流水质状况时空分布特征及变化规律

景朝霞¹, 夏军^{1,2,3*}, 张翔^{1,3}, 王强¹, 石卫⁴, 马协一¹

1. 武汉大学, 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072
2. 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重点实验室, 北京 100101
3. 武汉大学水安全研究院, 湖北 武汉 430072
4. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010

摘要: 汉江是南水北调中线工程的水源区, 其中下游水质状况是国家和湖北省政府重点关注的饮用水安全问题。研究南水北调中线工程影响区汉江中下游干流的水质状况和特征, 为进一步分析工程运行对汉江中下游水质的影响奠定基础。收集了汉江中下游干流 11 个水质监测站 2011—2014 年 pH、 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 、 $\rho(\text{BOD}_5)$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 等 7 项水质指标, 应用水污染指数法和层次聚类分析法, 综合辨识 2011—2014 年汉江中下游干流的水环境时空变化特征。结果表明: ① 2011—2014 年汉江中下游干流水质整体为 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的Ⅳ类~Ⅴ类水体, 超标指标为 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{BOD}_5)$, 其中 $\rho(\text{TN})$ 超标最严重。② 为深入辨识 TN 负荷对研究区域水质的影响, 通过情景分析发现控制 $\rho(\text{TN})$ 可有效改善汉江中下游干流水质状况。③ 汉江中下游干流水质状况层次聚类分析表明, 在时间上将研究时段分为 2 类, 基本对应于汉江中下游的汛期和非汛期; 在空间上将水质监测断面(沈湾、泽口、新沟、宗关、转斗、皇庄、汉南村、石别、白家湾、余家湖、罗汉闸)分为 3 类, 其中第 3 类可细分为 3 个子类, 各子类所对应的水质监测断面与其空间分布基本对应。④ 汉江中下游干流富营养化严重, 其中 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 在非汛期分别呈显著降低和增加趋势, 汛期无明显变化。研究显示, 汉江中下游污染严重, 营养盐尤其丰富且 $\rho(\text{TN})$ 为主要影响因素。

关键词: 水质; 水污染指数法; 层次聚类分析; 水华; 汉江中下游干流

中图分类号: X824

文章编号: 1001-6929(2019)01-0104-12

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2018.07.25

Spatial and Temporal Distribution and Variation of Water Quality in the Middle and Downstream of Hanjiang River

JING Zhaoxia¹, XIA Jun^{1,2,3*}, ZHANG Xiang^{1,3}, WANG Qiang¹, SHI Wei⁴, MA Xieyi¹

1. State Key Lab of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China
2. 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
3. Research Institution for Water Security, Wuhan University, Wuhan 430072, China
4. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China

Abstract: Hanjiang River is the major water resource of the middle route of the South-to-North Water Transfer Project (SNWT), and water quality of the Middle and Downstream of HR (MDHR) is a critical issue for drinking water safety concerned by the national and Hubei provincial governments. To study the water quality status and characteristics of MDHR in the affected area of SNWT, and to lay the foundation for further research on the impact of the project operation on the water quality in MDHR, this study collected 7 water quality parameters from 11 monitoring sections in MDHR during 2011–2014 to comprehensively identify the temporal and spatial characteristics of the water quality in the study area, and apply the water quality index method and hierarchical cluster analysis method. The selected water quality parameters were pH, $\rho(\text{DO})$, $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$, $\rho(\text{BOD}_5)$, $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$, $\rho(\text{TP})$ and $\rho(\text{TN})$. The results were as follows: Firstly, water quality in MDHR was generally poorer than that of Category IV–V during 2011–2014 according to ‘the environmental quality standards for surface water’ (GB 3838–2012). The water quality parameters that failed to meet the standards were TN, TP and BOD_5 ,

收稿日期: 2018-02-27 修订日期: 2018-07-17

作者简介: 景朝霞(1992-)女, 四川绵阳人, jingzx@whu.edu.cn.

* 责任作者, 夏军(1954-)男, 湖北孝感人, 教授, 博士, 博导, 主要从事水文学及水资源研究, xiajun666@whu.edu.cn

基金项目: 湖北省水利水电规划勘测设计研究院科研资助项目

Supported by Research Funding Project by Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, China

among which TN was the most important indicator. Secondly, in order to further understand the impact of TN on the water quality of the study area, scenario analyses were performed by summarizing different concentration of TN, TP and both of them. The results indicated that controlling $\rho(\text{TN})$ could effectively improve the water quality in MDHR. And thirdly, the study applied a cluster analysis on the water quality in MDHR and divided the time into two categories, basically corresponding to the flood season and non-flood season in the study area. The monitoring sections were spatially divided into three major categories, namely Shenwan, Zekou, Xingou, Zongguan, Zhuangdou, Huangzhuang, Hannancun, Shilou, Baijiawan, Yujiahu, Luohanzha, among which the third one was further subdivided into 3 sub-categories corresponding to the geographical positions of the sections. Furthermore, the nutrient state analysis showed that the water body in MDHR suffered serious eutrophication and nutrient indexes such as $\rho(\text{TP})$ and $\rho(\text{TN})$ were significantly decreased and increased in the non-flood seasons, respectively, while there were no significant changes in the flood seasons. The results showed that water pollution in MDHR is heavy with serious eutrophication, and $\rho(\text{TN})$ is supposed to be the main factor.

Keywords: water quality; water pollution index; hierarchical cluster analysis; algae bloom; Middle and Downstream Hanjiang River

科学评估河流水质状况及变化特征是流域水环境管理的重要基础工作,也是综合考虑水质和水量因素实现水资源高效利用的保障。汉江是长江最大的支流,其中游丹江口水库是南水北调中线工程的水源地,下游江汉平原是湖北省重要的经济走廊。随着汉江流域经济社会的发展,水环境水生态压力加大,如1992—2016年汉江下游数次爆发硅藻“水华”,最大藻密度由 $2.1 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$ 增至 $5.1 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$,覆盖河段由潜江以下扩展至整个中下游^[1-2];2014年底,南水北调中线工程调水、丹江口水利枢纽蓄水泄水、引江济汉工程补水等将共同改变汉江中下游的水文情势,可能引发新的水环境、水生态问题^[3]。因此,人类活动影响下汉江下游水质状况及其变化趋势是当地政府和环保部门重点关注的问题,也是维系汉江中下游沿江居民饮用水安全的重要保障。

WQA (water quality assessment,水质评价)是采用特定方法定量描述水体质量优劣程度的分析手段。目前,国内外河流水质评价手段已经比较成熟,当前主流的方法有单因子评价法、水质指数法^[4]、模糊数学评价法^[5]、主成分分析法^[6]、人工神经网络^[7]等,其中,水质指数法使用简单、评价结果直观精确,能较为完整地反映地表水的污染程度,在国内外应用广泛^[8]。如CHEN等^[9]通过应用水质指数法综合评估了地下水和河段干流的水质综合状况;Bora等^[10-11]分别将水质指数法应用于加拿大Mackenzie河、葡萄牙Douro河的水质现状评价。此外,一些学者在汉江中下游开展了一系列研究,如张九红等分别从水质指标时空变化特征^[12-13]、水质综合评价^[14-15]、水量水质本底特性^[3]等角度分析了汉江中下游水质现状及趋势,但受资料限制,以往研究涉及的水质指标种类相对较少,并且研究时段多在2011年前,缺乏对近几年汉江中下游水环境现状及变化特征的分析。南水北调中线工程于2014年正式启动,在其影响区开展调水前

的水质综合评价与特征分析,对于优化上游闸坝调度与科学水管理的国家重大需求,具有重要的实际意义。

该研究基于汉江中下游干流11个水质断面2011—2014年7项水质指标,以及下游武汉段宗关水厂2003—2014年 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{Chla})$,应用水污染指数法、层次聚类分析和MK(Mann-Kendall)趋势分析等多种方法,综合评估人类活动影响下的汉江中下游水环境现状、时空分布特征及变化规律,并结合汉江下游频繁发生的“水华”问题,从水环境的角度探讨了防治对策,旨在为汉江中下游的水质改善、流域综合管理、水资源合理利用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 数据来源

汉江($106^{\circ}12'E \sim 114^{\circ}14'E$ 、 $30^{\circ}08'N \sim 34^{\circ}11'N$)是长江的一级支流,干流全长1577 km,流域面积 $15.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。丹江口市以上为上游,丹江口市至钟祥为中游,钟祥至河口为下游,其中汉江中下游(丹江口—河口)干流河长652 km,湖北境内流域总面积 $4.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,流经十堰、襄阳、荆门、孝感、武汉市等地市,区域经济发展,是全国重要的粮食生产基地,也是全省的新兴工业和汽车工业基地^[13-14]。

研究数据主要来源于:①湖北省水环境监测网汉江中下游干流11个水质监测断面的7项水质指标。11个监测断面为沈湾、白家湾、余家湖、转斗、皇庄、罗汉闸、泽口、石剅、新沟、宗关(见图1),其中,沈湾为老河口市入境断面;白家湾、余家湖分别为襄阳市入境断面和出境断面;转斗为钟祥市入境断面;罗汉闸为天门市入境断面;石剅为仙桃市出境断面;新沟为武汉市入境断面。7项水质指标为pH、 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 、 $\rho(\text{BOD}_5)$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{TN})$,监测频率为每月1次。②汉江下游宗关水厂2003—2014年 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 及 $\rho(\text{Chla})$,监测时间为2月、3月、4月、9月、10月,监测频率为每月2次,其中2003

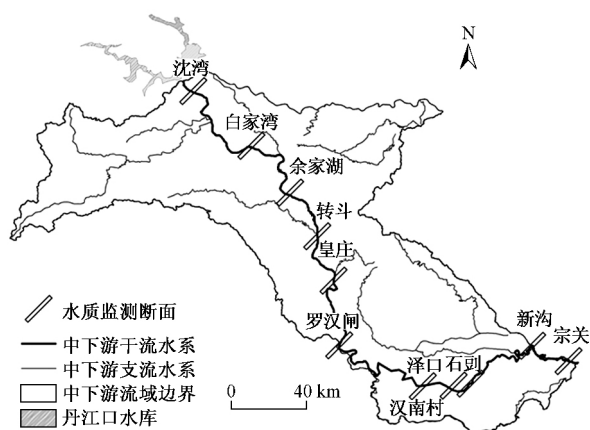


图1 汉江中下游流域及水质监测断面

Fig.1 Distribution of water quality monitoring sections at the Middle and Downstream of Hanjiang Basin

年2月缺测,数据统一为月尺度。

1.2 研究方法

1.2.1 层次聚类分析法

聚类分析是一种广泛应用的多元统计分析技术,通过将一批数据的个案或者变量的诸多特征按照关系的远近程度进行分类^[16]。最常用的聚类方法是层次聚类分析,其实质是将参与聚类的每个个体视为一类,根据两类之间的距离或者相似性逐步聚合,直到聚成一类。远近程度的定量描述方法有2种^[17]:①样本间距离,其测量的方法有欧式距离、平方欧式距离、契比雪夫距离、Block距离等;②样本与小类、小类间的距离,其测量方法有最远相邻法、重心聚类法、组间平均链接法、离差平方和法等。该研究利用SPSS 19.0软件进行水质指标时间和空间尺度的层次聚类分析,聚类方式为组间平均链接法,距离测量方式为平方欧氏距离。

1.2.2 卡尔森修正指数

Carlson^[18]提出了一种基于Chla、SD和TP的富营养化状态评价指数TSI(trophic state index),Kratzer

等^[19]基于Carlson的TSI指数提出了TN营养状态指数。这2种指数被广泛用于全球湖泊和河流富营养化状态评价中^[19-21]。该研究采用Kratzer等^[19]改进的TSI指数评价汉江中下游干流营养状态,计算公式见式(1)~(4),评价等级^[22]见表1。

$$TSI_{Chla} = 10 \left(6 - \frac{2.04 - 0.68 \ln [Chla]}{\ln 2} \right) \quad (1)$$

$$TSI_{TP} = 10 \left[6 - \frac{\ln (48 / [TP])}{\ln 2} \right] \quad (2)$$

$$TSI_{TN} = 10 \left[6 - \frac{\ln (1.47 / [TN])}{\ln 2} \right] \quad (3)$$

$$TSI = (TSI_{Chla} + TSI_{TP} + TSI_{TN}) / 3 \quad (4)$$

式中:TSI_{Chla}、TSI_{TP}和TSI_{TN}分别为Chla、TP和TN的营养状态指数;[Chla][TP][TN]分别为 ρ (Chla)、 ρ (TP)、 ρ (TN) $\mu\text{g/L}$ 。

表1 卡尔森修正指数TSI营养评价等级

Table 1 Trophic states associated with Carlson's TSI

TSI	营养等级
TSI<40	贫营养
40≤TSI<50	中营养
50≤TSI<70	富营养化等级
TSI≥70	超富营养

1.2.3 水污染指数法

水污染指数法^[23]以GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中推荐的单因子评价法为基础。该研究基于7项水质指标分别计算了WPI(水污染指数,water pollution index),在各断面分别取各指标对应的WPI最大值作为该断面的WPI值,并依据GB 3838—2002水质标准与WPI值(见表2)判断各断面的水质类别。其中,若单因子评价水质未超过V类水质标准,WPI计算见式(5);若 $\rho(\text{DO}) \geq 7.5 \text{ mg/L}$,WPI(DO)取20;若 $2 \leq \rho(\text{DO}) < 7.5$,WPI计算见式(6);若单因子评价水质超过V类水质标准,WPI计算见式(7)。

表2 GB 3838—2002水质标准与WPI值对应结果

Table 2 WPI and water quality classification in GB 3838—2002

GB 3838—2002 水质标准	I类	II类	III类	IV类	V类	劣V类
WPI	20	20<WPI≤40	40<WPI≤60	60<WPI≤80	80<WPI≤100	WPI>100

$$WPI(i) = WPI_i(i) + \frac{WPI_h(i) - WPI_i(i)}{C_h(i) - C_i(i)} \times [C(i) - C_i(i)] \quad C_i(i) < C(i) \leq C_h(i) \quad (5)$$

$$WPI(i) = WPI_i(i) + \frac{WPI_h(i) - WPI_i(i)}{C_i(i) - C_h(i)} \times$$

$$[C_i(i) - C(i)] \quad (6)$$

$$WPI(i) = 100 + \frac{C(i) - C_5(i)}{C_5(i)} \times 40 \quad (7)$$

式中: $C(i)$ 、 $C_i(i)$ 、 $C_h(i)$ 、 $C_5(i)$ 分别为第*i*个水质监测浓度值、水质项目所在类别标准下限浓度值及上限

浓度值和第 i 项目 GB 3838—2002 中 V 类标准浓度限值; $WPI(i)$ 、 $WPI_L(i)$ 、 $WPI_H(i)$ 分别各浓度值对应的水污染指数值;若 GB 3838—2002 中 2 个水质等级标准值相同,则按低分数值区间插值计算。pH 无量纲,评分值 WPI 取 20。

此外,若 $pH < 6$, $WPI(pH) = 100 + 6.67 \times (6 - [pH])$;若 $pH > 9$, $WPI(pH) = 100 + 8.00 \times ([pH] - 9)$;若 $\rho(DO) < 2 \text{ mg/L}$, $WPI(DO) = 100 + (2 - [DO]) / 2 \times 40$ 。

1.2.4 水污染指数评价指标及分析方法

1.2.4.1 断面占比

$$w = N_k / N \times 100\% \quad (8)$$

式中: w 为断面占比,%; N_k 为满足水质类别 k 要求的断面个数; N 为断面总数,个,该研究 N 为 11。该研究以断面占比分析研究时段内各类水质所占的断面数在断面总数中所占的比例。

1.2.4.2 超标率

$$\eta = m' / M \times 100\% \quad (9)$$

式中: η 为超标率,%; m' 为断面水质劣于目标水质的月份数; M 为研究时段的总月份数,该研究 M 为 48。该研究以超标率分析各断面水质超过目标水质的月份比例。

1.2.4.3 MK 趋势检验

MK 趋势检验^[24-25]是基于秩序的非参数检验方法,其零假设(H_0)为时间序列 $x_{i'}$ ($i' = 1, 2, \dots, n$) 为独立随机变量同分布样本,备择假设(H_1)为双边检验,假设 $x_{i'}$ 和 x_j ($j \leq n$ 且 $i' \neq j$) 的分布不同。检验中统

计量(S)和标准化统计值(Z)计算分别见式(10)(11)(12)。

$$S = \sum_{i'=1}^{n-1} \sum_{j=i'+1}^n \text{sgn}(X_j - X_{i'}) \quad (10)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_{i'}) = \begin{cases} 1, & X_j > X_{i'} \\ 0, & X_j = X_{i'} \\ -1, & X_j < X_{i'} \end{cases} \quad (11)$$

S 服从正态分布,平均值 $E(S) = 0$; 方差 $\text{Var}(S) =$

$[n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^m t_j(2t_j+5)]/18$ 。其中, m 为相同秩次的组数, t_j 为每组中秩次相同的个数。

当 $n > 10$ 时,标准化统计量(Z):

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (12)$$

给定显著性水平 α , 当 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则拒绝原假设, 即该时间序列上升或下降趋势显著。若 $Z > 0$, 则为上升趋势; $Z < 0$ 为下降趋势。该研究以 MK 趋势检验分析研究时段内水质类别、水质指标等变化趋势的显著性。

2 结果与分析

2.1 水质指标相关性分析及统计结果

计算汉江中下游 11 个水质监测断面 2011—2014 年各月水质指标的 Pearson 相关系数(见表 3), 分析各水质指标的相关关系及统计特征, 以明晰各指标在利用水污染指数法转化前的背景关系。

表 3 汉江中下游干流水质指标相关系数及统计参数

Table 3 Correlation coefficient and statistical parameters of water quality parameters in MDHR

水质指标	pH	$\rho(DO)$	$\rho(COD_{Mn})$	$\rho(BOD_5)$	$\rho(NH_3-N)$	$\rho(TP)$	$\rho(TN)$
pH	1						
$\rho(DO)$	0.128**	1					
$\rho(COD_{Mn})$	-0.166**	-0.08	1				
$\rho(BOD_5)$	-0.112**	0.057	0.056	1			
$\rho(NH_3-N)$	-0.420**	0.243**	0.218**	-0.028	1		
$\rho(TP)$	-0.372**	-0.06	0.319**	-0.075	0.299**	1	
$\rho(TN)$	-0.133**	-0.068	0.235**	-0.035	0.228**	0.179**	1

注: **表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

由表 3 可见, 各水质指标有一定的相关性, 主要表现在: pH 和 $\rho(DO)$ 、 $\rho(COD_{Mn})$ 、 $\rho(BOD_5)$ 、 $\rho(NH_3-N)$ 、 $\rho(TP)$ 、 $\rho(TN)$ 均呈显著相关, 其中与 $\rho(DO)$ 呈显著正相关, 与其他水质指标呈显著负相关; $\rho(DO)$ 与 $\rho(NH_3-N)$ 呈显著正相关; $\rho(COD_{Mn})$ 与 $\rho(NH_3-N)$ 、

$\rho(TP)$ 和 $\rho(TN)$ 均呈显著正相关, $\rho(NH_3-N)$ 与 $\rho(TP)$ 和 $\rho(TN)$ 呈显著正相关, 而水体中的 $\rho(TP)$ 和 $\rho(TN)$ 亦呈显著正相关。此外, 从各水质指标的变化范围可知, pH、 $\rho(DO)$ 、 $\rho(COD_{Mn})$ 和 $\rho(BOD_5)$ 在整个河段相对稳定, 而 $\rho(NH_3-N)$ 、 $\rho(TP)$ 和 $\rho(TN)$ 的波动大, 极

值比(最大值/最小值)分别为48、21和25。

2.2 水质现状时空分布

采用水污染指数法评价汉江中下游干流2011—2014年水质状况,并基于WPI计算各水质类别的断面占比。由图2可见,汉江中下游干流水质以GB 3838—2002 IV~劣V类为主,占比为60%~90%,水质达到I类或II类标准的月份不足20%。为进一步研究水质变化趋势,统计水质劣于IV类(即V类和劣V类)的占比之和,其线性变化率为-0.37, MK检验结果表明趋势显著($P < 0.1$)。从水质指标来看,7种水质指标和WPI值的线性变化率均为负,其中 $\rho(\text{BOD}_5)$ 趋势显著($P < 0.05$)。从年内分布看,汛期WPI的线性变化率为正,劣于IV类水质的占比为53%;非汛期为65%,WPI线性变化率为负,说明汉江中下游干流水质整体较差,且在非汛期明显劣于汛

期。控制汛期水质的关键指标为 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{TP})$,汛期约90%的月份以 $\rho(\text{TN})$ 为控制指标(即 WPI_{TN} 最大),约10%的月份以 $\rho(\text{TP})$ 为控制指标, $\rho(\text{TN})$ 变化率为正, $\rho(\text{TP})$ 为负,说明汛期水质恶化,尤其是TN负荷增加;非汛期水质控制指标为 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$,分别占94%、5%和1%,且线性变化率均为负,其中 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 趋势显著($P < 0.05$),说明非汛期水质有好转趋势。综合来看,汉江中下游干流水质有改善趋势,尤其是劣IV类水质的情况有改善;代表 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 是影响汉江中下游干流水质的关键指标,说明营养盐丰富,这可能与汉江中下游河段的营养盐本底浓度及沿岸的污染物排放有关;汛期和非汛期营养盐状态略有差别,可能是因为汛期河道水量多流速快,对 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 的稀释和降解作用较非汛期更强。

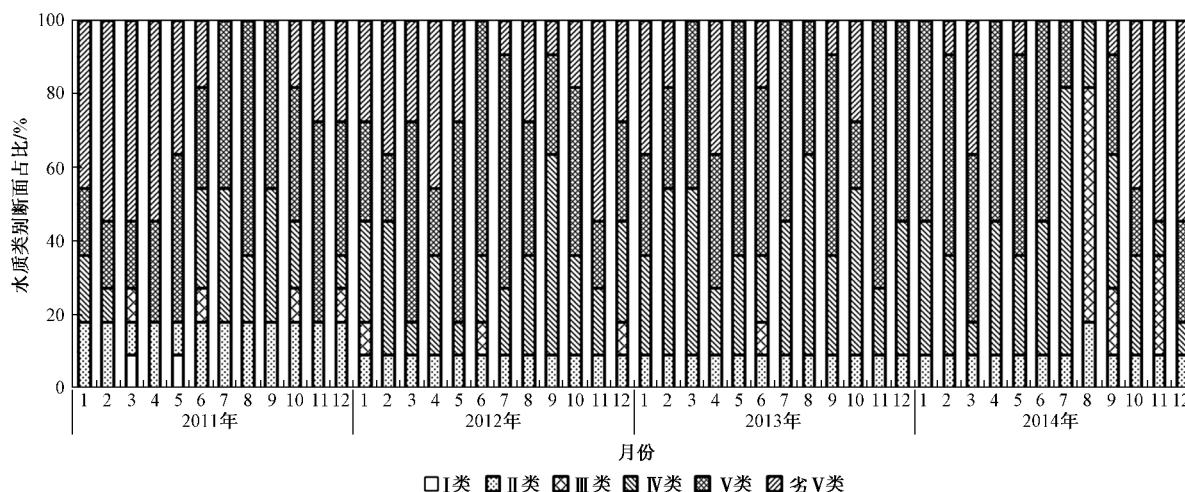


图2 2011—2014年汉江中下游各水质类别断面占比

Fig.2 Proportion of monitoring sections for water quality state classes during 2011–2014 in MDHR

在空间上统计各断面不同类别水质出现频次,结果见图3。由图3可见:泽口断面水质达GB 3838—

2002 II类标准;沈湾、白家湾及罗汉闸断面以IV类水质为主,其中,上游的沈湾断面部分月份水质达到

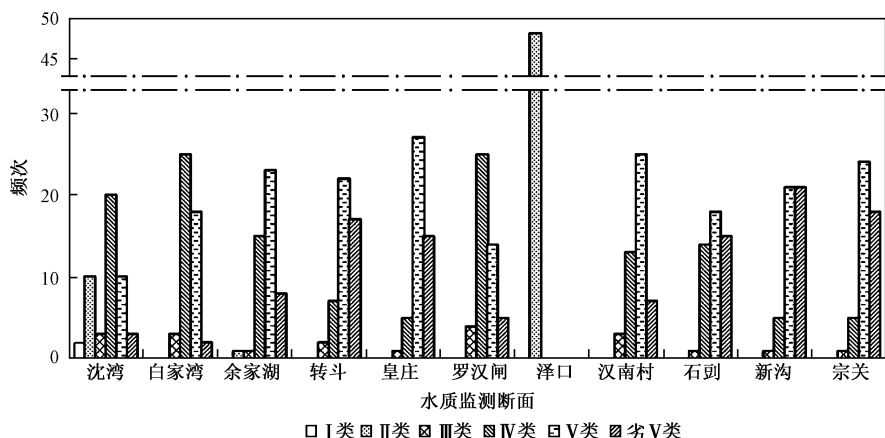


图3 基于WPI指数的汉江中下游干流水质类别频次统计

Fig.3 The frequencies of water quality classes basing on the WPI index in MDHR

I类或II类标准;余家湖、转斗、皇庄、汉南村、石别、新沟、宗关断面水质以V类为主,上游到下游劣IV类水质频次增加,其中,皇庄、新沟和宗关断面共有42个月水质劣于IV类。此外,7项水质指标线性趋势分析表明,各指标间线性斜率均为正值(pH与 $\rho(\text{DO})$ 除外),其中 $\rho(\text{TP})$ 趋势显著($P<0.05$),表明汉江中下游干流水质指标从上游到下游有恶化的趋势,其中,磷营养盐随空间分布变化显著。河道沿线水质恶化,除了上游水体中的污染物外,还可能受沿岸城镇、工厂等污水排放的影响,如转斗断面位于余家湖断面下游,为襄阳市和钟祥市交界断面,受

襄阳市城市污水的影响,转斗断面水质劣于余家湖断面。

根据湖北省水环境功能区划和湖北省地表水环境质量月报^[15],11个水质监测断面目标水质和超标水质指标情况见表4。从空间分布来看(见图4):泽口断面水质达标;沈湾断面超标率为73%;其余9个断面水质超标率大于90%。由表4可见 $\rho(\text{TN})$ 为公共超标水质指标,转斗等5个断面 $\rho(\text{TP})$ 超标,罗汉闸的 $\rho(\text{BOD}_5)$ 也存在超标问题。整体来看,汉江中下游干流的TN负荷长时间、大范围超过目标水质要求,可能是影响整体水质的关键指标。

表4 不同情境下各水质监测断面的主要超标污染物

Table 4 The main excessive pollutants of water quality monitoring sections under two different TN concentration scenarios

水质监测断面	目标水质	超标水质指标	
		评价结果	情景假设
沈湾	II类	TN	—
白家湾	II类	TN	—
余家湖	III类	TN	—
转斗	II类	TN、TP	TP
皇庄	II类	TN、TP	TP
罗汉闸	II类	TN、BOD ₅ 、TP	BOD ₅ 、TP

水质监测断面	目标水质	超标水质指标	
		评价结果	情景假设
泽口	III类	—	—
汉南村	II类	TN	—
石别	II类	TN、TP	TP
新沟	III类	TN、TP	TP
宗关	III类	TN	—

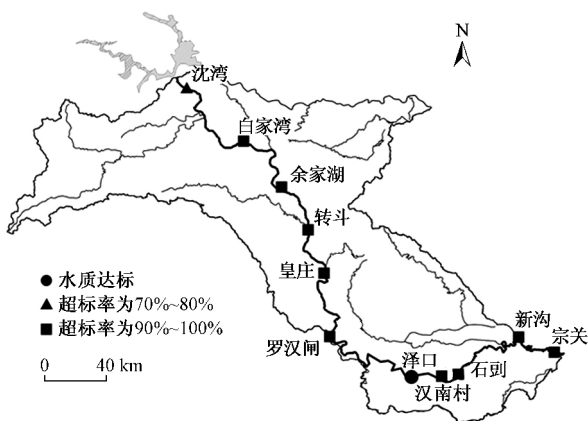


图4 基于WPI指数的汉江中下游干流水质超标率空间分布

Fig.4 The spatial distribution of rate of exceeded standard water quality basing on the WPI index in MDHR

为验证TN负荷对汉江中下游干流水质的影响,假设经过控制和治理 $\rho(\text{TN})$ 基本达到各监测断面目标水质要求,对比表4和图5可以看出,2011—2014年各月水质基本达到GB 3838—2002的II类或III类标准,各断面水质超标率明显降低(见图6),其中沈湾等5个断面水质达标,超标水质指标以 $\rho(\text{TP})$ 为主(见表4)。同理,若假定 $\rho(\text{TP})$ 达到水质要求,泽口断

面水质达标,剩余10个断面水质超标率为70%~100%(见图4),但转斗等5个断面水质有改善。若假定 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 均达标,仅有罗汉闸断面存在 $\rho(\text{BOD}_5)$ 超标情况,其余10个断面水质均达标,即汉江干流水质基本达到目标水质要求。整体来看,假设 $\rho(\text{TN})$ 达标的情景下汉江中下游干流水质明显改善,说明通过控制河道 $\rho(\text{TN})$ 改善水质效果显著。

2.3 水质状况聚类分析

对水质类别进行层次聚类分析,根据时间聚类可知(见图7(a)),水质在时间上可分为两大类:6—10月(共5个月)及1—5月、11—12月(共7个月),基本对应于汉江流域的汛期和非汛期。说明汛期和非汛期水质差异显著,但组内各月水质状况差异不大。综合水质现状评价结果可知,汉江中下游非汛期水质明显比汛期差,应作为水质治理和控制的重点时段。

根据空间聚类结果(见图7(b)),可将水质断面分为3类:①泽口断面,位于汉江干流下游,水质最好;②沈湾断面,为研究区域的上游断面,位于丹江口水库下游,监测襄樊市入境水质状况;③白家湾等9个监测断面水质状况相近,同属第三大类,说明汉江中下游干流大部分河段水质状况接近。第三大类断

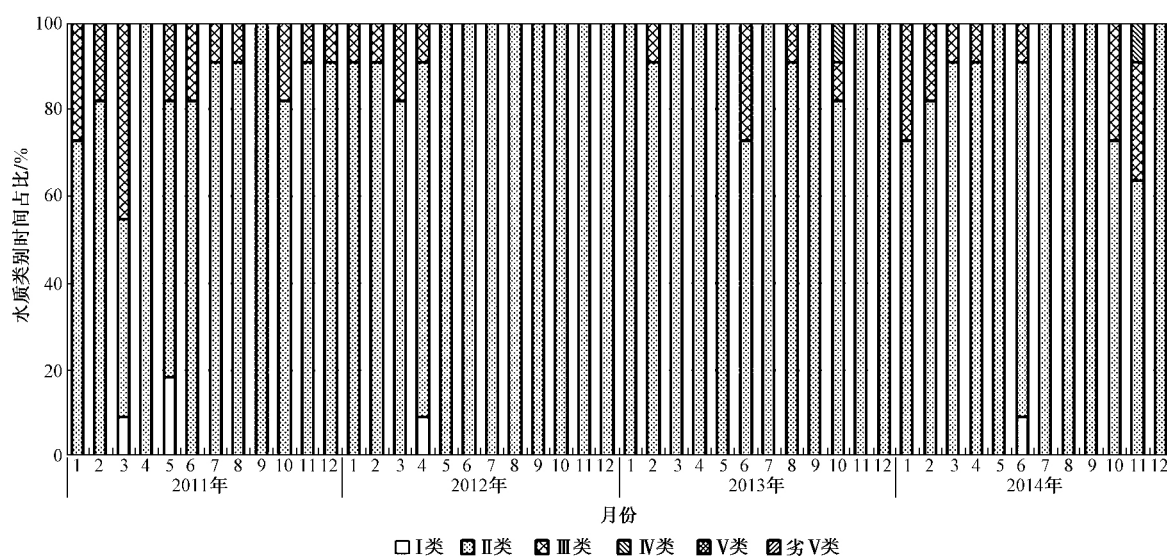


图5 假设情境下汉江中下游干流水质类别时间分布

Fig.5 The temporal variability of water quality monitoring sections proportions in the hypothesis scenarios in MDHR

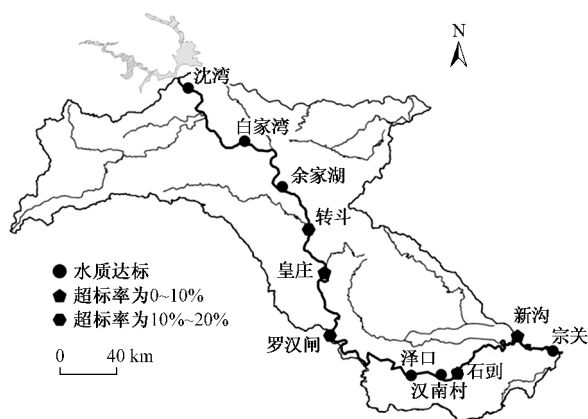


图6 假设情境下汉江中下游干流水质超标率空间分布

Fig.6 The spatial distribution of exceeding rate in the hypothesis scenarios in MDHR

面可进一步划分为3个子类,其中最下游的宗关和新沟、转斗和皇庄断面均为第1子类,可能由于其地理位置相近,水质状况类似;汉南村和石剑断面为第2子类;白家湾、余家湖、罗汉闸断面为第3子类,结合2.2节中各断面水质空间分布可知,该子类断面的水质空间分布类似,劣于上游的沈湾断面,但优于下游的皇庄、新沟等断面。综合来看,3个大类分别表示11个断面中的3种水质等级,第1类最优,第2类次之,第3类水质最差,其中,第3类的9个监测断面又可分为3个子类,大致按照各断面的地理位置分布,说明汉江中下游干流水质受地理位置空间分布影响较大,越到下游水质状况越差。

2.4 营养盐变化规律

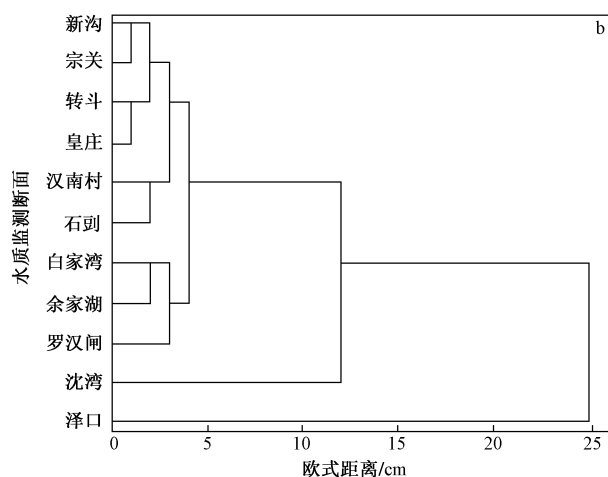
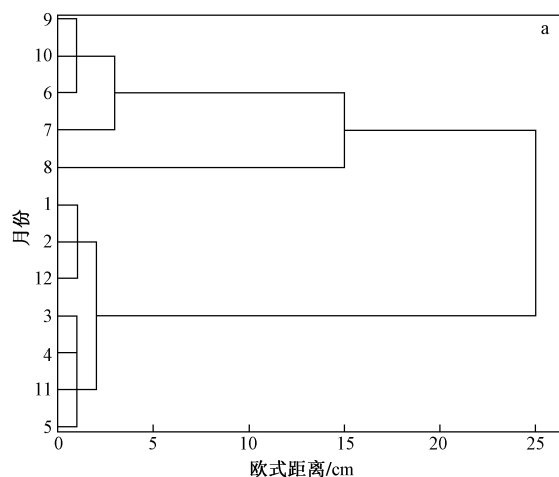


图7 汉江中下游干流水质的时间和空间尺度聚类分析结果

Fig.7 Dendrogram of temporal cluster analysis and spatial cluster analysis in MDHR

由2.1节分析可知 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 为主要超标指标. 1992年汉江首次发生“水华”事件后汉江中下游多次在非汛期爆发的“水华”, 2008年后更是连年发生. “水华”是藻类疯狂生长、聚集的结果, 营养盐作为藻类生长的必备元素, 其质量浓度与藻类生长过程息息相关. 因此, 分析营养盐质量浓度不仅有助于了解汉江中下游水环境营养状态, 更是研究汉江中下游“水华”频发机制并采取相应的防治措施的关键. 由空间聚类分析结果可知, 汉江中下游干流河段大部分断面可划归为同一类别. 因此, 以宗关水厂为例, 分析汛期和非汛期 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 变化规律, 结合

实测数据情况, 非汛期以2—4月为例, 汛期以9—10月为例.

$\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 在非汛期和汛期呈现出完全不同的变化规律(见图8). 非汛期 $\rho(\text{TP})$ 线性变化率为负, 下降趋势显著 ($P < 0.05$), 这可能是由汉江中下游非汛期河道流量降低引起的; $\rho(\text{TN})$ 线性变化率为正, 上升趋势显著 ($P < 0.05$), 这可能与农业发展造成的面源污染加剧有关. 汛期 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 线性变化率均为正, 并且变化趋势均不显著, 汛期 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 变化过程基本同步, 这可能是受汛期高流量对污染物的稀释和缓冲作用的影响.

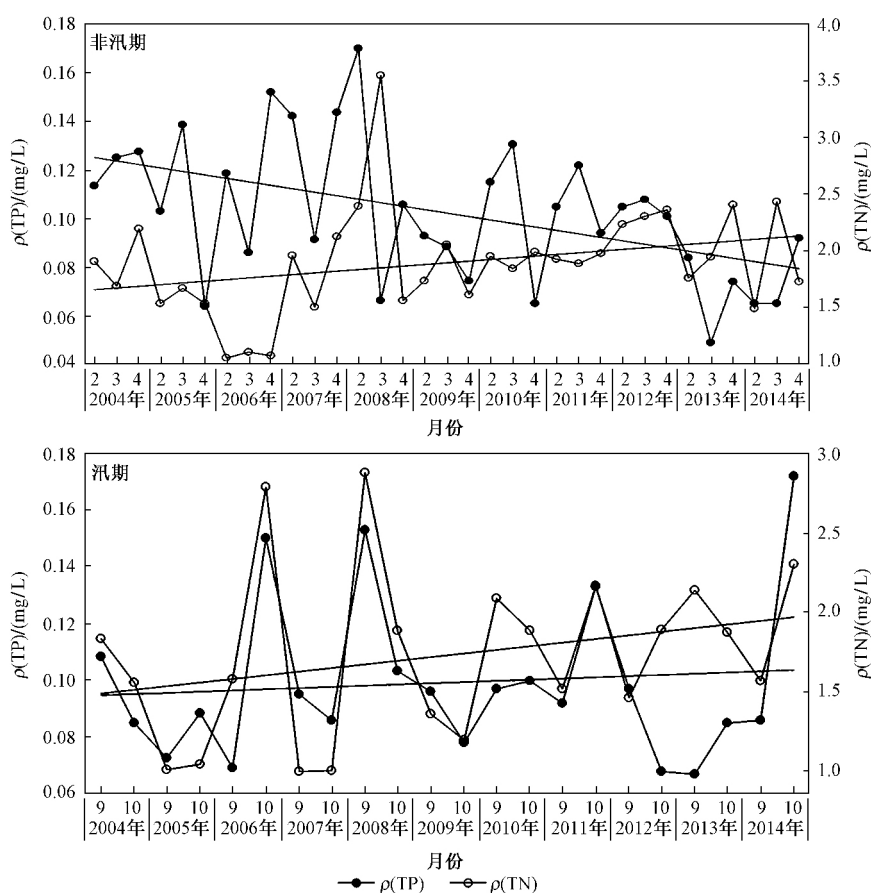


图8 宗关水厂非汛期和汛期 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 变化规律

Fig.8 The change of TP and TN of Zongguan water work during non-flood seasons and flood seasons

由TSI指数(见图9)可知, 汛期和非汛期的水体均为富营养状态 ($\text{TSI} > 50$), 其中 $\text{TSI}_{\text{汛期}} (57) < \text{TSI}_{\text{非汛期}} (61)$, 说明非汛期富营养化较汛期更为严重. 卢大远等^[26-27]在汉江中下游“水华”问题研究指出, 藻类的生长和繁殖过程与水体中的营养盐质量浓度密切相关. 非汛期 TSI_{Chla} 多次达到富营养状态, 汛期仅为8次, 说明非汛期更易满足藻类的生长和繁殖对营养盐的需求, 这与“水华”多次爆发于非汛期的实

际情况一致. 由于非汛期 $\rho(\text{TN})$ 显著增加, $\rho(\text{TP})$ 显著减少, 且 TSI_{TP} 和 TSI_{Chla} 的变化趋势基本同步, 峰值基本对应, 可见藻类生物量的变化与 $\rho(\text{TP})$ 的变化有关, 可以推测氮营养盐质量浓度基本可以满足藻类生长和繁殖过程中的需求, 氮元素不是限制藻类生长的关键因子, 而当 $\rho(\text{TP})$ 持续下降, 可能造成藻类摄取磷营养盐受阻, 进而成为藻类生长的限制营养盐条件.

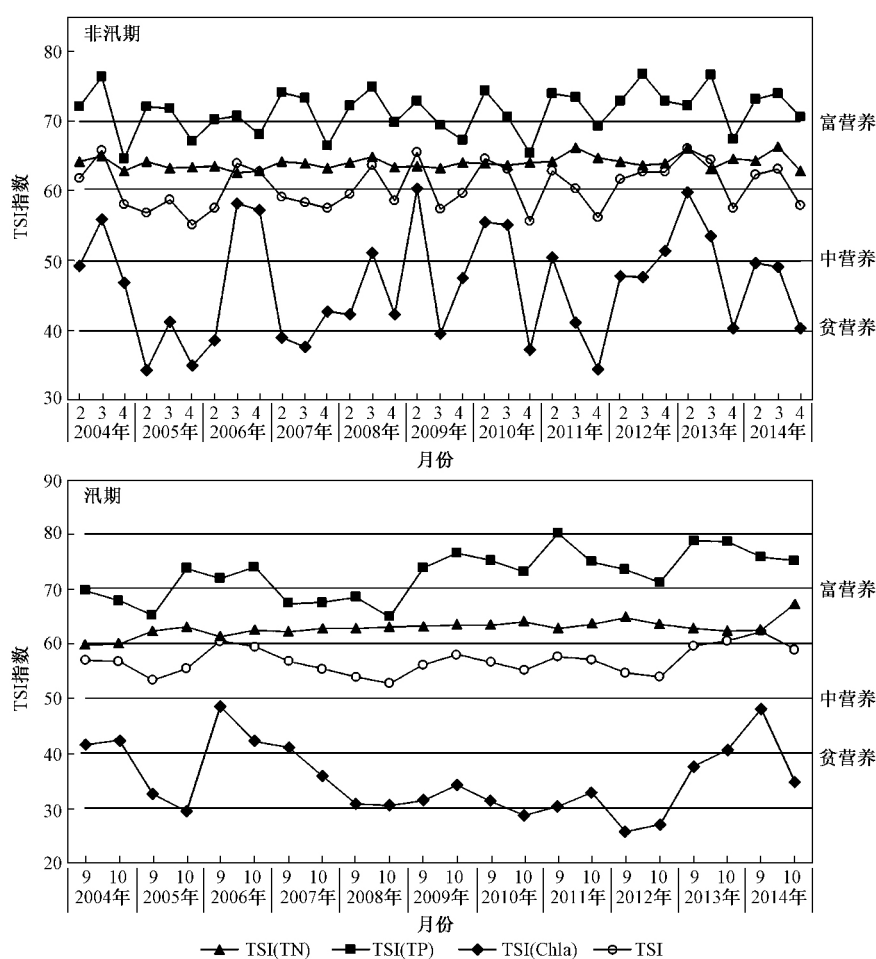


图9 宗关水厂汛期和非汛期富营养化指数 TSI 变化规律

Fig.9 The change of TSI index of Zongguan waterwork during non-flood seasons and flood seasons

3 讨论

3.1 汉江中下游干流污染物来源分析

2011—2014 年汉江中下游 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 在空间上均有上升趋势,并且 $\rho(\text{TP})$ 趋势显著.上游到下游水质变化可能受支流汇水和城镇污水的排放影响.汉江中下游包括唐白河、蛮河、竹皮河、汉北河等 8 条主要支流.唐白河由唐河和白河汇合,污染物主要来自于工业废水、城镇生活污水及上游农产区的氮磷、农药等面源污染物,水质以 GB 3838—2002 劣 V 类和 V 类为主,2011 年后水体有机污染加重, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 BOD_5 、P 几乎已无环境容量,并且唐白河属缺水地区,水体自净能力差^[15-28];蛮河工农业发展迅速,受沿岸县市生产和生活污水排放的影响,水体污染严重,甚至危及居民的用水安全,影响汉江襄阳段水质^[29];汉北河由天门河上段及下游人工开挖河道构成,渠化严重,水资源量短缺,水体自净能力低下,受天门市生活污水、工业废水及沿岸农业生产过程中的

农药、化肥等点源、面源污染的影响,天门河水体恶化^[30];竹皮河为荆门市区主要纳污河段,目前已丧失水资源利用工程,水质劣于 V 类,来自工业、生活、农业等方面的污水导致 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 严重超标^[31]. 11 个水质监测断面中,转斗断面地处蛮河、唐白河入江口的下游,皇庄上游有支流汇入,竹皮河于罗汉闸上游汇入汉江,沟断面有汉北河汇入.上述断面水质均受这些污染严重的支流的影响.此外,汉江中下游干流流经襄阳市、荆门市等 7 个主要城市,各城市经济快速发展,其中襄阳市、荆门市、仙桃市、孝感市为污染源密集分布的地市.据统计,2015 年汉江中下游农村面源废水、污水排放总量和生活污水排放总量分别为 26.3×10^4 和 4.7×10^4 t,分别集中在荆门和襄阳市,工业废水排放主要集中在襄阳市、荆门市、孝感市等地,排放总量约为 1.4×10^4 t^[32].

3.2 营养盐对汉江中下游水环境的影响

从汉江中下游干流水质状态评价及营养盐变化规律(见表 2、图 7)可以看出, TN 和 TP 是影响水环

境状况的关键指标,TSI指数(见图7)分析表明,汉江中下游河流富营养化程度严重,就水质改善来说,控制 $\rho(\text{TN})$ 可以显著改善汉江中下游的水质状况(见图4)。此外,水体的富营养化已产生一系列水生态问题。如1992—2016年汉江中下游频繁爆发春季硅藻“水华”,爆发范围由沙洋以下扩展到襄樊以下至下游武汉段河口,持续时间基本超过20 d,近年来发生频次更密集、藻类生物量增加,“水华”问题有加剧趋势。由2.3节可知:营养盐氮质量浓度丰富且“水华”多发的非汛期显著增加,可以满足藻类的生长; $\rho(\text{TP})$ 呈显著下降趋势。由非汛期 TSI_{Chla} 和 TSI_{TP} 的同步趋势可以推测 $\rho(\text{Chla})$ 变化可能受到 $\rho(\text{TP})$ 的限制。因此,从营养盐控制的角度来看,削减TP的负荷可能是限制汉江“水华”防治重要途径。当然,藻类的生长过程复杂,气候条件^[33-36]、水文情势^[37-41]等因素也与藻类的生长密切相关。2014年南水北调工程正式调水、引江济汉工程的运行可能引起的水文情势的变化、气候变化及人类活动等因素均可能成为“水华”爆发或加重的诱导因素。

3.3 水利枢纽工程对汉江中下游水环境状况的影响

汉江中下游地区兴建水库、跨流域调水、工农业及城市用水等人类活动频繁,其中丹江口水库的修建对河道天然流量过程影响最明显,水库蓄水运行后,汉江流量过程发生了明显变异^[42];随着南水北调中线工程的正式运行,汉江中下游的水文情势可能会进一步变化。此外,根据汉江综合规划,丹江口水库以下共兴建王甫洲等7个梯级枢纽工程,目前已建成的王甫洲水利枢纽、崔家营航电枢纽、兴隆枢纽、2014年12月正式调水的南水北调中线工程、2014年9月正式从长江补水的引江济汉工程的综合作用将进一步改变河道的天然水文情势,影响汉江中下游的水环境状况。

如丹江口水库蓄水导致下游河道流量、水位减少,水体的自净能力降低^[43],梯级水库改变河道的水体形态,蓄水后库区水位抬高、流速减缓,7个梯级水库中除碾盘山-兴隆枢纽外均为首尾衔接,全部建成后,可能存在将汉江中下游的天然河流形态变为水库形态,阻隔水动力条件的变化,改变营养盐、水温等分布特征的风险^[44]。水动力条件改变后,在丰富的营养盐供给条件下,来自唐白河等支流的藻源汇入干流后容易爆发“水华”。此外,已建成的3个梯级枢纽分别位于沈湾、白家湾、罗汉闸断面下游,其下游分别为白家湾、余家湖、泽口断面,库区水流减缓造成的污染物

稀释和降解能力减弱对监测断面的水质产生不利影响。

4 结论

a) 汉江中下游干流水质以GB 3838—2002 IV类~劣V类为主,断面占比为60%~90%;水质劣于IV类标准的断面占比线性斜率为负,说明研究区域水质有所改善;整体上 $\rho(\text{TN})$ 严重超标,假设 $\rho(\text{TN})$ 得到控制的情景下水质以II类和III类为主,监测断面水质超标率不足20%,说明削减TN负荷对改善汉江中下游干流水质效果显著。

b) 聚类分析在时间上分为汛期和非汛期2类,非汛期水质明显劣于汛期;空间上将水质监测断面分为3类,其中,第3大类水质断面又可大致按照地理位置分布分为4个子类,说明汉江中下游干流水质与其空间位置有关,由上游至下游水质恶化。

c) 汉江中下游水体富营养化严重,非汛期尤甚。 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 在非汛期和汛期的变化模式迥异;非汛期的 $\rho(\text{TP})$ 显著降低, $\rho(\text{TN})$ 显著增加;汛期 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 两项指标均无显著变化。

参考文献(References):

- [1] WANG Yonggui, ZHANG Wanshun, ZHAO Yanxin, et al. Modelling water quality and quantity with the influence of inter-basin water diversion projects and cascade reservoirs in the Middle-lower Hanjiang River[J]. Journal of Hydrology, 2016, 541: 1348-1362.
- [2] 刘强, 陈进, 黄薇. 南水北调工程实施后汉江水华发生可能性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(1): 60-65.
LIU Qiang, CHEN Jjin, HUANG Wei. Prediction on water south and environment carrying ability in Hanjiang River after the implement of South-to-North Water Diversion Project: possibility of algal blooming[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 9(3): 5-12.
- [3] 李雨, 王雪, 周波, 等. 中线调水前汉江中下游水量和水质本底特性及变化趋势分析[J]. 水文, 2015(5): 82-90.
LI Yu, WANG Xue, ZHOU Bo, et al. Characteristics and change trend of water quantity and quality in Middle and Lower Reaches of Hanjiang River before South-to-North water diversion running[J]. Journal of China Hydrology, 2015(5): 82-90.
- [4] ADRIANO B, RITA T, WILLIAM J W. A water quality index applied to an international shared river basin: the case of the Douro River[J]. Environmental Management, 2006, 38(6): 910-920.
- [5] LI Ranran, ZOU Zhihong, AN Yan. Water quality assessment in Qu River based on fuzzy water pollution index method[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 50(12): 87-92.
- [6] TAO Xuefeng, HUANG Tao, LI Xiaofeng, et al. Application of a PCA based water quality classification method in water quality assessment in the Tongjiyan Irrigation Area, China [C]// International Conference on Energy and Environmental Projection (ICEEP 2016). Shenzhen, China: Atlantis Press, 2016: 118-125.

- [7] XIA Rui, CHEN Zhi. Integrated water quality assessment of the Huai River Basin in China [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 20(2): 5014018.
- [8] 刘玲花, 吴雷祥, 吴佳鹏, 等. 国外地表水水质指数评价法综述 [J]. *水资源保护*, 2016, 1(32): 86-90.
- LIU Linghua, WU Leixiang, WU Jiapeng, *et al.* Review on surface water quality index assessment method in foreign countries [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 1(32): 86-90.
- [9] CHEN Jie, LIU Qing, QIAN Hui. Application of improved nemerow index method based on entropy weight for groundwater quality evaluation [J]. *International Journal of Environmental Sciences*, 2012, 2(3): 1284-1290.
- [10] BORA M, GOSWAMI D C. Water quality assessment in terms of water quality index (WQI): case study of the Kolong River, Assam, India [J]. *Applied Water Science*, 2017(7): 3125-3135.
- [11] ASHOK L, DOUG H, TRIBENI S. Application of CCME water quality index to monitor water quality: a case study of the Mackenzie River Basin, Canada [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 113(1/2/3): 411-429.
- [12] 陈燕飞, 张翔. 汉江中下游干流水质变化趋势及持续性分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1163-1167.
- CHEN Yanfei, ZHANG Xiang. Long-term trends and sustainability trends of water quality in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang Main Stream [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(7): 1163-1167.
- [13] 望志方, 张煦. 汉江水质与污染物的时空差异分析 [J]. *华中农业大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(6): 721-726.
- WANG Zhifang, ZHANG Xu. Spatio-temporal changing analysis on water quality and pollutants of Hanjiang River [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2010, 29(6): 721-726.
- [14] 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 Jiuhong, AO Lianggui. 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.
- [15] 彭聃, 李双双, 吴李文, 等. 汉江中下游水质变化趋势研究 [J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(S1): 428-432.
- PENG Dan, LI Shuangshuang, WU Liwen, *et al.* Trends of water quality in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River [J]. *Environmental Science & Technology (China)*, 2016, 39(S1): 428-432.
- [16] 周丰, 郭怀成, 黄凯, 等. 基于多元统计方法的河流水质空间分析 [J]. *水科学进展*, 2007, 18(4): 544-551.
- ZHOU Feng, GUO Huaicheng, HUANG Kai, *et al.* Multivariate statistical technique for spatial variation in river water quality [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(4): 544-551.
- [17] JOHNSON R A, WICHERN D W. Applied multivariate statistical analysis [J]. *Technometrics*, 2005, 47(4): 517-517.
- [18] CARLSON R E. A trophic state index for lakes [J]. *Limnology & Oceanography*, 1977, 22(2): 361-369.
- [19] KRATZER C R, BREZONIK P L. A carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2010, 17(4): 713-715.
- [20] DANTAS Ê W, BITTENCOURT-OLIVEIRA M D C, MOURA A D N. Dynamics of phytoplankton associations in three reservoirs in northeastern Brazil assessed using Reynolds' theory [J]. *Limnologia*, 2012, 42(1): 72-80.
- [21] HUNTER J, CARRICK C L S F. Assessment of phytoplankton nutrient limitation in productive waters: application of dilution bioassays [J]. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 1993, 50(10): 2208-2221.
- [22] CARLSON R E. Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs [C]//Proceedings of a national conference on enhancing the states' lake management programs: monitoring and lake impact assessment. Chicago: United States Environmental Protection Agency, 1991: 59-71.
- [23] 刘琰, 郑丙辉, 付青, 等. 水污染指数法在河流水质评价中的应用研究 [J]. *中国环境监测*, 2013, 29(3): 44-45.
- LIU Yan, ZHENG Binghui, FU Qing, *et al.* Application of water pollution index in water quality assessment of rivers [J]. *Environmental Monitoring of China*, 2013, 29(3): 44-45.
- [24] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [25] YUE Sheng, PILON P, PHINNEY B, *et al.* The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series [J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(9): 1807-1829.
- [26] 卢大远, 刘培刚, 范天俞, 等. 汉江下游突发“水华”的调查研究 [J]. *环境科学研究*, 2000, 13(2): 28-31.
- LU Dayuan, LIU Peigang, FAN Tianyu, *et al.* The investigation of 'water bloom' in the downstream of the Han River [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2000, 13(2): 28-31.
- [27] 殷大聪, 郑凌凌, 宋立荣. 汉江中下游早春冠盘藻 (*Stephanodiscus hantzschii*) 水华暴发过程及其成因初探 [J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(4): 451-458.
- YIN Dacong, ZHENG Lingling, SONG Lirong. *Stephanodiscus hantzschii* bloom in the Hanjiang River: spatio-temporal distribution and possible driving factors [J]. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(4): 451-458.
- [28] 刘小燕, 况明生, 代振, 等. 唐白河水污染分析及治理措施 [J]. *重庆文理学院学报*, 2014, 33(2): 82-86.
- LIU Xiaoyan, KUANG Mingsheng, DAI Zhen, *et al.* Water pollution analysis and control measures of Tangbai River [J]. *Journal of Chongqing University of Arts & Sciences*, 2014, 33(2): 82-86.
- [29] 罗育池, 蔡俊雄. 奎河流域水环境容量与水污染防治对策研究 [J]. *安全与环境工程*, 2010, 17(2): 26-29.
- LUO Yuchi, CAI Junxiong. Study on water environment capacity and water pollution control measures for Manhe Basin [J]. *Safety & Environmental Engineering*, 2010, 17(2): 26-29.
- [30] 周梦雷, 彭小思. 汉北河水生态水环境保护对策研究 [C]//河湖水生态水环境专题论坛论文集. 武汉: 湖北省水利学会, 2011: 1-7.
- [31] 刘春, 郑兰萍. 竹皮河水环境现状分析及治理保护措施 [J]. *资源节约与环保*, 2015(3): 215-216.
- [32] 湖北省环境保护厅, 湖北省质量技术监督局. DB 42/1318—

- 2017 湖北省汉江中下游流域污水综合排放标准[S].武汉:湖北省环境保护厅,2018.
- [33] BUM B K ,PICK F R. Factors regulating phytoplankton and zooplankton biomass in temperate rivers [J]. Limnology & Oceanography ,1996 ,41(7):1572-1577.
- [34] VIENY N R ,BATES B C ,CHARLES S P *et al.* Modeling adaptive management strategies for coping with the impacts of climate variability and change on riverine algal blooms [J]. Global Change Biology 2007 ,13(11):2453-2465.
- [35] HUBER V ,ADRIAN R ,GERTEN D. Phytoplankton response to climate warming modified by trophic state [J]. Limnology & Oceanography 2008 ,53(1):1-13.
- [36] XIA Rui ,CHEN Zhi ,ZHOU Yun. Impact assessment of climate change on algal blooms by a parametric modeling study in Han River[J]. Journal of Resources and Ecology 2012 ,3(3):209-219.
- [37] LONG Tianyu ,WU Lei ,MENG Guohu *et al.* Numerical simulation for impacts of hydrodynamic conditions on algae growth in Chongqing section of Jialing River , China [J]. Ecological Modelling 2011 ,222(1):112-119.
- [38] MAIER H R ,BURCH M D ,BORMANS M. Flow management strategies to control blooms of the cyanobacterium ,*Anabaena circinalis* in the River Murray at Morgan ,South Australia[J]. River Research & Applications 2001 ,17(6):637-650.
- [39] MITROVIC S M ,HARDWICK L ,DORANI F. Use of flow management to mitigate cyanobacterial blooms in the lower Darling River ,Australia[J]. Journal of Plankton Research ,2011 ,33(2):229-241.
- [40] KIM K ,PARK M ,MIN J H ,*et al.* Simulation of algal bloom dynamics in a river with the ensemble Kalman filter[J]. Journal of Hydrology 2014 ,519:2810-2821.
- [41] YANG Fang ,WANG Meng ,YE Min ,*et al.* Study of growth characteristics of water bloom in Han River [C]//International Conference on Informatics ,Cybernetics ,and Computer Engineering (ICCE2011) Melbourne ,Australia. Springer Berlin Heidelberg ,2011:461-466.
- [42] 封光寅 ,李文杰 ,周丽华 ,等.流量过程变异对汉江中下游河流健康影响分析[J].水文 2016 ,36(1):46-50.
- FENG Guangyin ,LI Wenjie ,ZHOU Lihua ,*et al.* Influence of flow process variation on river health in Middle and Lower Reaches of Hanjiang River[J]. Journal of China Hydrology 2016 ,36(1):46-50.
- [43] ACUNA V ,VILCHES C ,GIORGI A. As productive and slow as a stream can be:the metabolism of a pampean stream[J]. Journal of the North American Benthological Society 2011 ,30(1):71-83.
- [44] 文威 ,李涛 ,韩璐.汉江中下游干流水电梯级开发的水环境影响分析[J].环境工程技术学报 2016 ,6(3):259-265.
- WEN Wei ,LI Tao ,HAN Lu. Analysis of influence of water environment on development of hydropower cascade downstream of the Hanjiang River [J]. Journal of Environmental Engineering Technology 2016 ,6(3):259-265.

(责任编辑:张蕊)