

Water Quality Change Trends in the Main Stream of Yangtze River

Wenxun Dong, Yanjun Zhang*, Sumiao Wang, Jinjin Wu, Jianhua Zhao, Xin Xu, Yixuan Zou

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: *zhangyj1015@hotmail.com

Received: Dec. 9th, 2019; accepted: Jan. 23rd, 2020; published: Feb. 10th, 2020

Abstract

Four different types of water quality data, including COD_{mn} , BOD_5 , NH_3-N and TP, in the 12 water quality monitoring sections from 2008 to 2018, which are converted into the single factor water quality identification indexes, are used to analyze the trend in the main stream of the Yangtze River. Meanwhile, the Mann-Kendall trend test and the seasonal Kendall trend test are used in this paper. The results show that: 1) in the past ten years, both on the annual and monthly scales, the water quality of the main stream of the Yangtze River has continued to be better and has shown a trend of improvement or gradual stabilization; 2) the comprehensive water quality is basically below the grade III level. The three indexes COD_{mn} , BOD_5 and NH_3-N meet the grade II level, except that the TP mostly meets the grade III level; 3) the concentration of the COD_{mn} , BOD_5 , NH_3-N and TP in the main stream meet the management target basically, but the concentration of BOD_5 has a rising trend.

Keywords

Water Quality, Trend Analysis, Single Factor Water Quality, Identification Index, The Main Stream of Yangtze River

长江干流水质变化趋势研究

董文逊, 张艳军*, 王素描, 吴金津, 赵建华, 许昕, 邹蕙轩

武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室, 湖北 武汉
Email: *zhangyj1015@hotmail.com

收稿日期: 2019年12月9日; 录用日期: 2020年1月23日; 发布日期: 2020年2月10日

摘要

利用攀枝花等12个主要的水质监测控制断面于2008~2018年间实测水质资料中的高锰酸盐指数(COD_{mn})、五日

作者简介: 董文逊, 男, 安徽巢湖人, 硕士研究生, 主要从事水资源水环境方面研究。
*通讯作者。

生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)和总磷(TP)4个水质项目数据,通过转化为河流水质标识指数,探讨长江干流水质的变化趋势情况,并采用Mann-Kendall趋势检验和季节性Kendall趋势检验两种方法,对长江干流水质的变化趋势进行了分析研究。研究表明:1)近十年以来,无论是在年尺度上还是月尺度上,长江干流水质在不断好转并呈现出继续好转或逐渐稳定的趋势,综合水质基本在III类水质标准;2)除TP指标多处于III类水质标准范围内,COD_{mn}、BOD₅和NH₃-N三个指标在II类水质标准范围内波动;3)长江干流的COD_{mn}、BOD₅、NH₃-N和TP四项指标基本能够满足水质管理目标,但BOD₅指标有上升的趋势。

关键词

水质,趋势分析,单因子水质,标识指数,长江干流

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长江流域是中国经济发展最发达的流域之一,也是覆盖人口最大的流域之一,长江水质的好坏直接关乎超过5亿人的生活。近二十年来,随着长江流域内的社会经济不断发展和人口规模的不断扩大,虽然长江流域水资源总量变化不大,但流域内的废污水排放总量不断增加[1],使得长江干流水质受到了一定程度的影响;同时,随着国家战略对水环境质量的日益重视,又较大程度地遏制了长江干流水质的进一步恶化并且水质现状也有所转好[2]。因此,对长江流域内水体的水质变化趋势研究将有助于水环境保护工作的进一步开展和规划。张煦等基于水质理化指标将丹江口水库湖北库区水域划分为四个区域进行了水质变化趋势的分析,发现主要的污染指标均有所降低且趋于稳定[3]。王艳分等采用主成分分析法筛选出水质污染的主要驱动因素,并通过多元回归分析识别了不同阶段洞庭湖水环境演变的关键影响因素[4]。陈燕飞等采用季节性肯德尔检验法并结合叠加性指数法和Hurst指数对汉江中下游干流水质的变化趋势进行了分析[5]。彭珂等利用季节性肯德尔检验分析了湘江长沙段的水质变化趋势[6]。王小焕等采用R/S法对三峡库区长江干流入出库水质的变化趋势进行了分析研究[7]。盛海燕等分析了新安江水库水质演变规律及其与水文气象因子之间的关系[8]。现有的研究或局限于长江流域的湖泊、支流和干流的部分河段,或仅仅对长江干流的进行现状评价和定性分析而未采用趋势分析工具对长江干流水环境进行定量评价。因而本文综合长江干流多个水质监测断面的水质数据并结合相应的趋势分析工具,对长江干流水质变化的趋势进行分析与研究。

本文利用攀枝花、屏山、宜昌、九江、南通等12个主要的水质监测控制断面2008~2018年实测水质资料中的高锰酸盐指数(COD_{mn})、五日生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)和总磷(TP)4个水质项目数据,采用河流单因子水质标识指数评价方法将四个水质项目的浓度数据转化为水质标识指数,对长江干流不同监测断面的水质变化情况进行了分析,通过Mann-Kendall检验对各监测断面不同污染物的单因子水质标识指数的年均值变化趋势进行了分析,并用季节性Kendall检验法对月综合水质标识指数进行变化趋势的检验分析。

2. 研究区域概况

长江发源于青藏高原的唐古拉山脉各拉丹冬峰西南侧,自西而东横贯中国中部,于崇明岛以东注入东海,全长6300余公里,为世界第三长河流,并且长江水系发达,直接汇入长江的大小支流约7000余条,延伸至贵州、甘肃、陕西、河南、广西、广东、浙江、福建8个省、自治区的部分地区[9]。长江干流流域面积达180万km²,约占中国陆地总面积的1/5。

长江干流宜昌以上为上游,长4504 km,流域面积100万km²,其中直门达至宜宾称金沙江,长3464 km。

宜宾至宜昌河段习称川江,长 1040 km。宜昌至湖口为中游,长 955 km,流域面积 68 万 km²。湖口以下为下游,长 938 km,流域面积 12 万 km²。

长江流域片河流水质总体较好,以符合或优于 III 类水质标准为主,长江干流水质 III 类水质为主并且总体水质趋好。同时,流域内的水库水质相对较好,以 II 类水质和 III 类水质为主,但流域内湖泊的富营养化程度较高,水库的营养水平呈现出从低营养状态向高营养状态变化的趋势。另外,根据水功能区区划的要求,流域内纳入评价范围的水功能区总体达标率在 60%左右[2]。

3. 方法介绍

3.1. 河流单因子水质标识指数

单因子水质指数 P 由一位整数、小数点后两位或三位有效数字组成[10],表示为

$$P_i = X_1 \cdot X_2 X_3 \quad (1)$$

式中, X_1 代表第 i 项水质指标的水质类别; X_2 代表监测数据在 X_1 类水质变化区间中所处的位置,根据公式按四舍五入的原则计算确定; X_3 代表水质类别与水功能区设定类别的比较结果,是评价指标的污染程度, X_3 为一位或两位有效数字。

根据本文研究需要,单因子水质指数采用一位整数、小数点后一位有效数字,即

$$P_i = X_1 \cdot X_2 \quad (2)$$

的形式,并对不同污染物的河流单因子水质标识指数求其算术平均值 I_i ,即

$$I_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} P_i \quad (3)$$

用以代表河流的综合污染情况[11]。

3.2. Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 趋势检验是一种收到世界气象组织(WMO)推荐并得到广泛应用的非参数检验方法。它由 Mann 和 Kendall 提出[12][13],被众多研究应用到降水、温度、径流和水质等时间序列的分析上。Mann-Kendall 趋势检验不需要待检验的时间序列遵从一定的分布,并且一些异常值也不会影响趋势检验的结果,因此该方法非常适用于诸如水文、气象等不遵从某一常见分布的时间序列数据。

3.3. 季节性 Kendall 趋势分析

对于月尺度的水质数据来说,一般的 Mann-Kendall 趋势分析并不适用,并且月尺度的水质数据具有很强的季节性特征,因而,季节性 Kendall 趋势分析更适用于月尺度水质数据的趋势分析[14]。该检验方法具有不受河道流量周期性变化、漏测值和未检出值影响的优点。

季节性 Kendall 检验的原理是将历年相同月或季的水质资料进行比较,如果后面的值(在时间上)高于前面的值记为“+”号,否则记作“-”号。如果正号的个数比负号的多,则可能为上升趋势;反之,则可能为下降趋势。如果水质资料不存在上升或下降趋势,则正、负号的个数分别为 50%。然而,河道流量具有一年一度的周期性变化,河流水质组分浓度大多受流量周期性变化的影响,因此,将汛期与非汛期的水质资料进行比较,会存在一定的误差。季节性 Kendall 检验将水质资料在历年相同月份间进行比较,从而避免了汛期和非汛期的影响[15]。

4. 长江干流水质趋势分析

为了对长江干流的水质变化趋势进行分析,本文以攀枝花、朱沱、宜昌、汉口、南通等十二个水质监测断面的月监测数据为基础,以综合水质、COD_{mn}、BOD₅、NH₃-N 和 TP 五个类别作为评价指标,按照《地表水环

境质量标准》(GB 3838-2002)的评价标准, 分别从年和月两个时间尺度上进行了时间序列的趋势分析。

4.1. 长江干流水质的年尺度趋势分析

2008 年到 2018 年间各水质监测断面的污染评价指标的水质标识指数年均值变化情况如图 1 所示。整体来看, 长江干流水质以 II 类水和 III 类水为主, 并且主要呈现出下降或上下波动的态势, 但不同污染评价指标的水质标识指数反映出不同的变化趋势, TP 的评价结果最差, BOD₅ 的评价结果最好。

由综合水质的水质标识指数分析结果可知, 12 个监测断面的年均值均在 2.0 左右浮动, 根据水质标识指数的计算原则, 这意味着 12 个监测断面综合水质的年均值在 II 类水质标准上下浮动。其中, 攀枝花、新市镇、朱沱、寸滩、清溪场、九江、大通和南通八个监测断面有较明显的下降趋势。

由 COD_{mn} 的水质标识指数分析结果与综合水质的水质标识指数结果较为类似, 12 个监测断面的年均值均在 2.0 左右浮动, 即 12 个监测断面的 COD_{mn} 年均值同样在 II 类水质标准上下浮动。其中, 攀枝花、新市镇、屏山、朱沱、寸滩、清溪场、九江和南通八个监测断面有较明显的下降趋势, 宜昌、螺山、汉口和大通四个监测断面仅表现出上下波动的特征。

由 BOD₅ 的水质标识指数分析结果可知, 12 个监测断面的年均值均在 1.5 左右浮动, 即 12 个监测断面 BOD₅ 的年均值在 I 类水和 II 类水质标准内浮动。其中, 新市镇和屏山两个监测断面有轻微的上升趋势, 但仍然保持在 II 类水质标准之下, 其余十个监测断面仅表现出上下波动或稳定的特征。

由 NH₃-N 的水质标识指数分析结果可知, 攀枝花到汉口的九个监测断面年均值均在 1.5 左右浮动, 而九江到南通的三个监测断面年均值均在 2.5 左右浮动, 即上中游的九个监测断面 NH₃-N 的年均值在 I 类水和 II 类水质标准内浮动, 下游三个监测断面 NH₃-N 的年均值在 II 类水和 III 类水质标准内浮动。其中, 朱沱、寸滩、清溪场、九江、大通和南通六个监测断面有较明显的下降趋势, 攀枝花、新市镇和屏山三个监测断面有较显著的上升趋势, 但仍然保持在 III 类水质标准之下, 宜昌、螺山和汉口三个监测断面仅表现出上下波动或稳定的特征。

由 TP 的水质标识指数分析结果可知, TP 的结果波动幅度最大, 且 12 个监测断面的年均值均显著高于其他评价指标。其中, 攀枝花、新市镇和屏山三个监测断面的水质标识指数年均值由 3.5 左右下降到 2.0 左右, 朱沱、寸滩和清溪场三个监测断面的水质标识指数年均值由 4.0 左右下降到 3.0 左右, 宜昌、螺山、汉口和南通四个监测断面年均值在 3.0 左右波动, 而九江和打通两个监测断面年均值在 3.5 左右波动。

对 12 个监测断面五种污染评价指标水质标识指数的年均值进行 Mann-Kendall 趋势检验, 检验结果如表 1 所示。12 个监测断面的五类污染指标共计 60 组数据中: 1) 检测出下降趋势的数据占整体 70%。其中, 检测出的下降趋势数据中, 在 95%置信区间内显著下降的数据占整体 41.7%, 在 90%置信区间内显著下降的数据占整体 10.0%, 未在 90%置信区间内但仍有下降趋势的数据占整体 18.3%; 2) 检测出上升趋势的数据占整体 25%。其中, 在 95%置信区间内显著上升的指标数量占整体 8.3%, 在 90%置信区间内显著上升的数据占整体 0%, 未在 90%置信区间内但仍有上升趋势的数据占整体 8.3%。虽然检测出部分监测断面的部分指标有上升趋势, 但所有具有上升趋势的指标的水质标识指数近三年内均在 3.0 以下, 即评价指标依然满足 III 类水质标准的要求; 3) 未检测出变化趋势的数据占整体 5%。

Table 1. The results of the Mann-Kendall trend test of the annual mean values of different water pollutants

表 1. 各污染物年均值的 Mann-Kendall 趋势分析结果

类别	攀枝花	新市镇	屏山	朱沱	寸滩	清溪场	宜昌	螺山	汉口	九江	大通	南通
综合水质	-2.33 ↓,**	-1.87 ↓,*	-1.71 ↓,*	-3.27 ↓,**	-2.96 ↓,**	-2.80 ↓,**	0.31 ↑,-	-1.40 ↓,-	0.47 ↑,-	-1.79 ↓,*	-1.25 ↓,-	-2.86 ↓,**
COD _{mn}	-2.68 ↓,**	-2.89 ↓,**	-2.26 ↓,**	-2.49 ↓,**	3.67 ↑,**	-3.43 ↓,**	-0.08 ↓,-	-1.64 ↓,-	-1.48 ↓,-	-2.07 ↓,**	-0.36 ↓,-	-2.33 ↓,**

Continued

BOD ₅	-2.45	2.73	3.16	-0.70	1.42	0	-3.32	2.66	1.25	0	0.99	-2.00
	↓,**	↑,**	↑,**	↓,-	↑,-	-	↓,**	↑,**	↑,-	-	↑,-	↓,**
NH ₃ -N	-0.81	2.89	-2.02	-2.96	-2.89	-2.80	0.40	-1.57	0.16	-2.15	-1.43	-2.68
	↓,-	↑,**	↓,**	↓,**	↓,**	↓,**	↑,-	↓,-	↑,-	↓,**	↓,-	↓,**
TP	-1.79	-2.42	1.41	-2.89	-2.18	-2.18	1.17	-1.25	1.40	-1.71	-1.79	0
	↓,*	↓,**	↑,-	↓,**	↓,**	↓,**	↑,-	↓,-	↑,-	↓,*	↓,*	-

↑,**: 95%置信区间内显著上升; ↑,*: 90%置信区间内显著上升; ↑,-: 有上升趋势; -: 未检测出趋势; ↓,**: 95%置信区间内显著下降; ↓,*: 90%置信区间内显著下降; ↓,-: 有下降趋势。

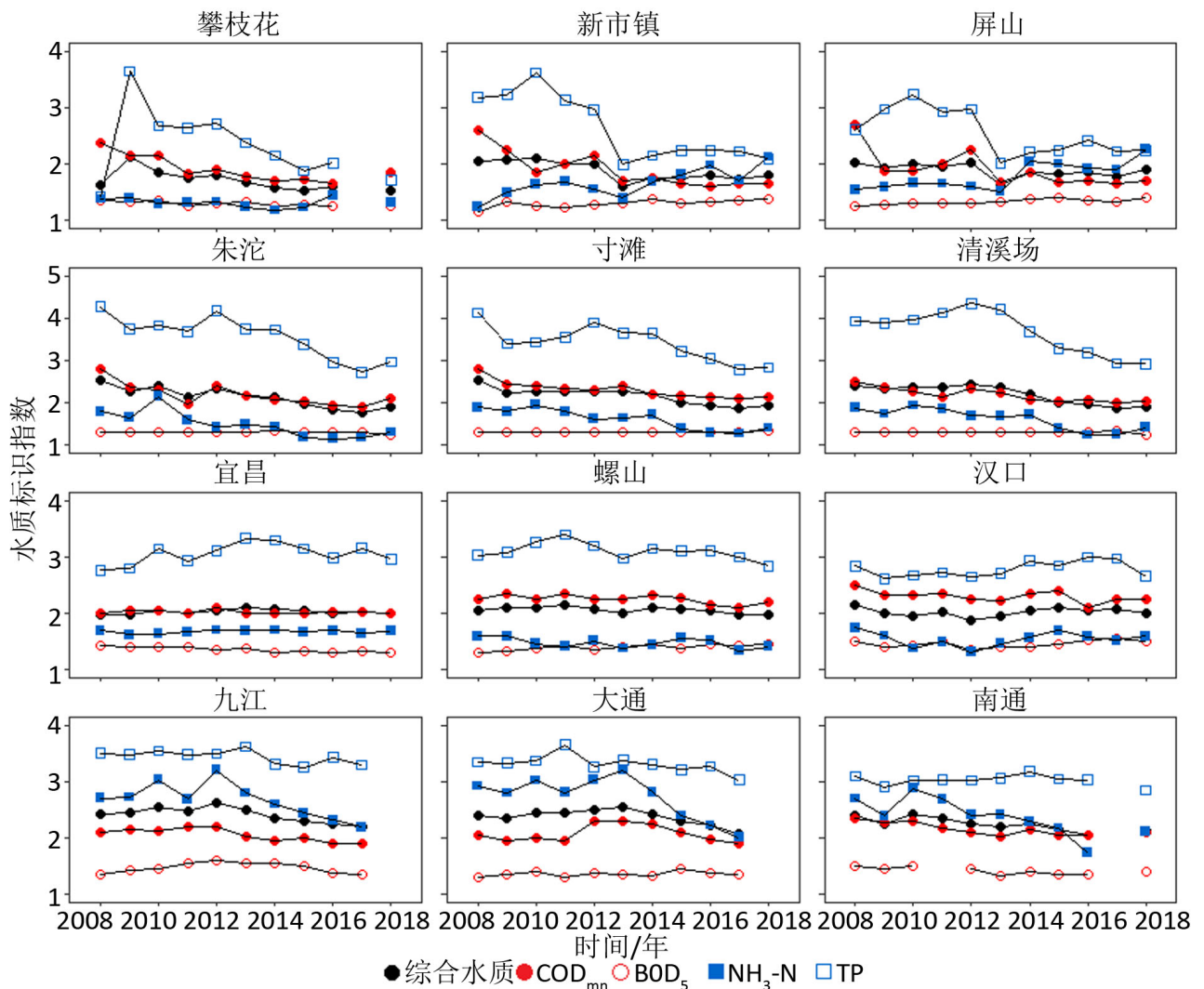


Figure 1. Annual changes of water quality identification indexes of different pollutants at different monitoring sections

图 1. 各监测断面不同污染物的水质标识指数年均值变化图

4.2. 长江干流水质的月尺度趋势分析

2008 年到 2018 年间 12 个监测断面的综合水质的水质标识指数月均值变化如图 2 所示。由图中结果可知，仅有朱沱和寸滩两个监测断面的综合水质标识指数曾在 2008 年和 2009 年的夏季接近 4.0，其余监测断面在各月

的综合水质标识指数均在 3.5 及以下,其中绝大多数监测断面的综合水质标识指数在近三年里都小于 3.0,另外,从不同年份的同一月份来看,12 个监测断面的综合水质标识指数均有显著的下降趋势并趋于稳定。

进一步分析各监测断面综合水质标识指数的变化情况,并对年内最大值和最小值的变化进行趋势分析,结果如图 3 所示。由图中结果可以发现,各监测断面的变化趋势呈现出三种不同的特征:1) 水质不断好转并趋于稳定。攀枝花、新市镇、朱沱、寸滩、清溪场和南通六个监测断面呈现出年极大值、年极小值与月值的趋势线不断下降且相互靠近的特征,反映出这六个断面的综合水质标识指数正处于趋于稳定的过程中;2) 水质已符合要求并达到稳定。屏山、宜昌、螺山和汉口四个监测断面则呈现出年极大值、年极小值和月值的趋势线互相平行且没有明显的上升或者下降的趋势,反映出这四个断面的综合水质标识指数已经达到稳定的状态;3) 水质不断好转但已基本达到稳定。九江和大通两个监测断面则呈现出年极大值、年极小值和月值的趋势线互相平行但依然处于下降的趋势,反映出这两个监测断面的综合水质标识指数仍然处于下降的过程中却已达到基本稳定的状态。

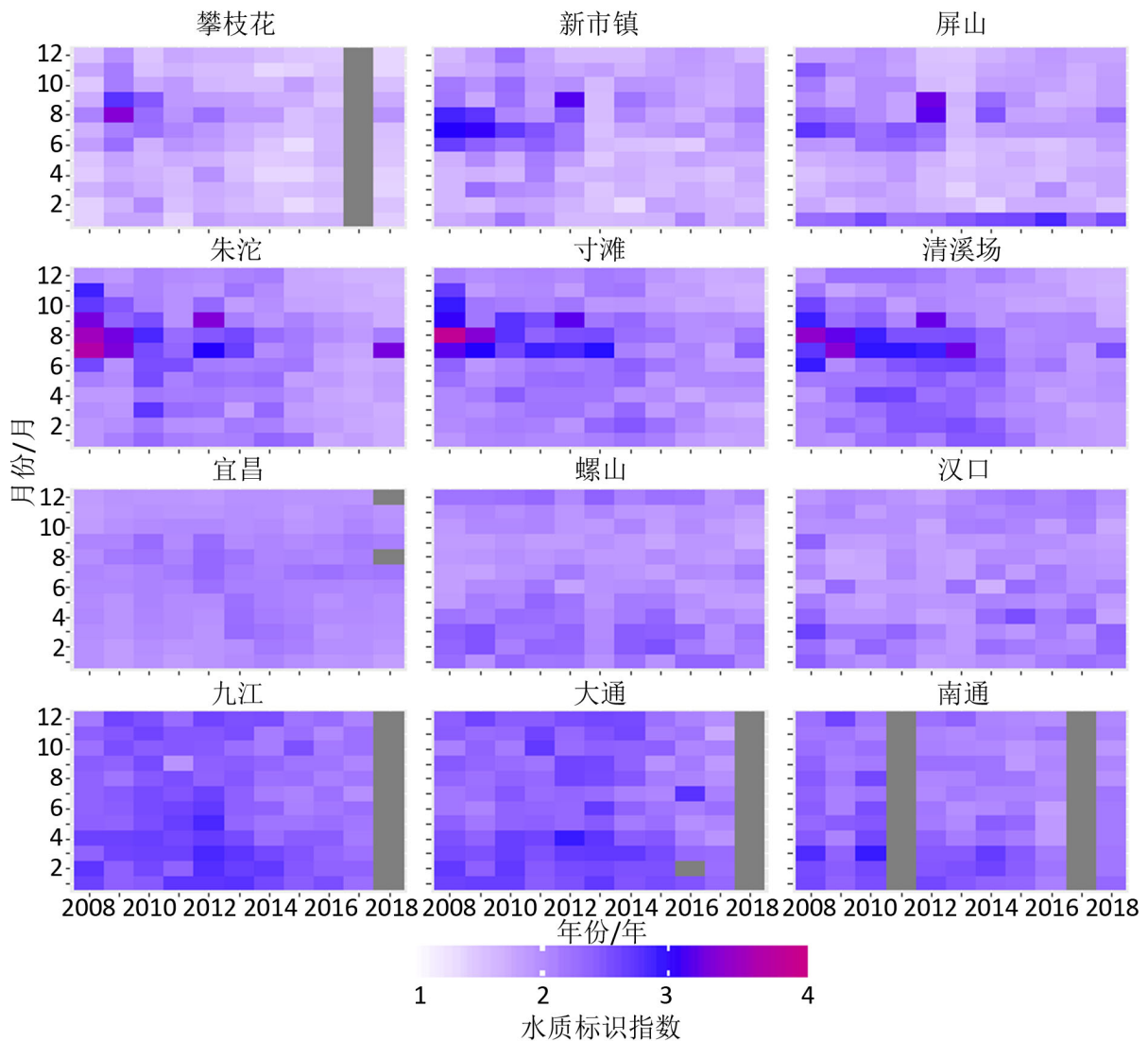


Figure 2. The identification index of comprehensive water quality of each monitoring sections (gray block indicates lack of monitoring data)

图 2. 各监测断面的综合水质标识指数变化图(灰色区块表示缺乏监测数据)

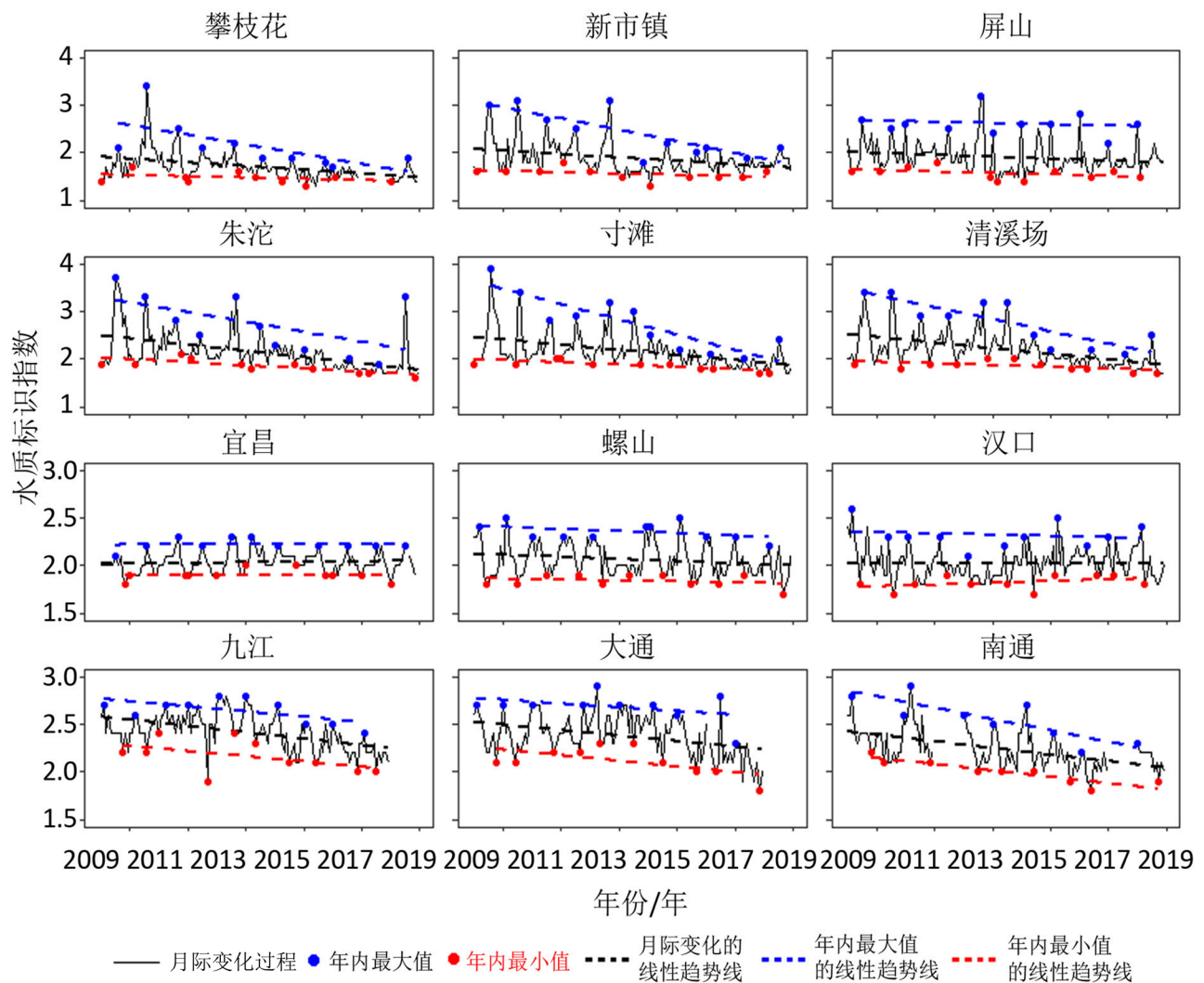


Figure 3. Monthly changes of the identification index of comprehensive water quality in each monitoring section
图 3. 各监测断面综合水质标识指数的月际变化图

对 12 个监测断面 5 种评价指标各月的水质标识指数进行季节性 Kendall 趋势分析, 结果如表 2 所示。12 个监测断面的五类污染指标共计 60 组数据中: 1) 检测出下降趋势的数据占总体的 70.0%。其中, 在 95% 置信区间内显著下降的数据占总体的 65.0%, 在 90% 置信区间内显著下降的数据占总体的 1.7%, 未在 90% 置信区间内但仍有下降趋势的数据占总体的 3.3%; 2) 检测出上升趋势的数据占总体的 28.3%。其中, 在 95% 置信区间内显著上升的数据占总体的 18.3%, 在 90% 置信区间内显著上升的数据占总体的 1.7%, 未在 90% 置信区间内但仍有上升趋势的数据占总体的 8.3%。另外, 在检测出具有上升趋势的数据中, 以 BOD_5 数据为主, 但各断面 BOD_5 的水质标识指数基本处于 1.0 至 2.0 的范围之内, 远低于 III 类水质标准的要求; 3) 未检测出变化趋势的数据占总体的 1.7%。

结合年尺度趋势分析的结果可知, 在 2008 年~2018 年间, 无论是年尺度还是月尺度, 除了 BOD_5 在 II 类水质标准内有微弱的上升趋势外, 其余四项评价指标均有明显的下降趋势, 且一部分监测断面的部分评价指标已经达到稳定的状态, 在 II 类水质标准内上下波动, 另一部分监测断面的部分指标也已经趋于稳定的状态, 在未来的水环境管理中也会达到稳定的状态。

Table 2. System resulting data of standard experiment
表 2. 标准试验系统结果数据

类别	攀枝花	新市镇	屏山	朱沱	寸滩	清溪场	宜昌	螺山	汉口	九江	大通	南通
综合水质	-6.38	-3.64	-2.40	-8.17	-6.66	-7.54	1.70	-2.33	1.36	-5.20	-3.87	-5.97
	↓,**	↓,**	↓,**	↓,**	↓,**	↓,**	↑,*	↓,**	↑,-	↓,**	↓,**	↓,**
COD _{mn}	-6.17	-8.38	-7.08	-4.55	-2.86	-2.23	0.50	-3.06	-2.73	-6.87	0	-4.88
	↓,**	↓,**	↓,**	↓,**	↓,**	↓,**	↑,-	↓,**	↓,**	↓,**	-	↓,**
BOD ₅	-4.30	4.46	3.40	1.58	3.07	5.95	-8.07	4.59	2.97	-0.60	2.69	-1.73
	↓,**	↑,**	↑,**	↑,-	↑,**	↑,**	↓,**	↑,**	↑,**	↓,-	↑,**	↓,*
NH ₃ -N	-2.77	5.09	5.02	-8.09	-7.62	-7.69	0.47	-2.71	-0.14	-5.06	-5.03	-5.45
	↓,**	↑,**	↑,**	↓,**	↓,**	↓,**	↑,-	↓,**	↓,-	↓,**	↓,**	↓,**
TP	-4.72	-5.42	-3.53	-6.21	-5.31	-6.81	3.66	-2.37	2.82	-2.49	-2.80	1.06
	↓,**	↓,**	↓,**	↓,**	↓,**	↓,**	↑,**	↓,**	↑,**	↓,**	↓,**	↑,-

↑,**: 95%置信区间内显著上升; ↑,*: 90%置信区间内显著上升; ↑,-: 有上升趋势; -: 未检测出趋势; ↓,**: 95%置信区间内显著下降; ↓,*: 90%置信区间内显著下降; ↓,-: 有下降趋势。

5. 结论与展望

1) 随着国家战略层面和发展规划对水环境的日益重视,长江干流的整体水环境达到 III 类水质标准的要求,且部分监测断面达到了 II 水质标准的要求,长江干流的 COD_{mn}、BOD₅、NH₃-N 和 TP 的监测现状基本达到水质目标要求。总体来看,长江干流的水环境现状基本实现了“经济发展与环境保护并行”的战略规划要求。

2) 长江干流的大部分监测断面的水环境质量处于稳步上升的过程中,各项水质评价指标也处于不断下降的过程中。部分已经达到或接近 II 类水质标准的监测断面的水环境质量则已经达到稳定的状态。

3) 在五类水质评价指标中,BOD₅ 在绝大部分的监测断面中均检测出了上升的趋势。虽然各监测断面的 BOD₅ 现状已基本达到 II 类水质标准的要求,且现阶段的上升幅度不大,但如果不及时处理这种上升趋势,未来可能会对长江干流水质产生一定程度的影响。因此,水环境管理部门应该对这类存在变差趋势的评价指标加强监督管理,并在日常的水环境质量考核工作中,加大对这些指标的考核力度,以防水环境质量出现“先好再坏”的现象。

4) 本文分析了 2008 年到 2018 年的长江干流上 12 个监测断面的水质数据,并且只分析了 BOD₅、COD_{mn}、NH₃-N、TP 和综合水质五个指标,依然存在监测断面数量不够、评价指标选择不够充分的不足之处,同时趋势分析也仅仅局限于历史数据的分析,缺少对未来水环境质量的预测分析,需要在未来的研究中对此加以更进一步的分析讨论。

基金项目

本文由国家重点研发计划(2017YFA0603704)资助。

参考文献

- [1] 陈进, 刘志明. 近 20 年长江水资源利用现状分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1): 1-4.
CHEN Jin, LIU Zhiming. Analysis of water resources utilization in the Changjiang River basin in recent two decades. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(1): 1-4. (in Chinese)
- [2] 卓海华, 湛若云, 王瑞琳, 等. 长江流域片水资源质量评价与趋势分析[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 122-129.
ZHUO Haihua, SHEN Ruoyun, WANG Ruilin, et al. Evaluation and trend analysis on water resources quality of Yangtze River

- basin. *Yangtze River*, 2019, 50(2): 122-129. (in Chinese)
- [3] 张煦, 熊晶, 程继雄, 等. 丹江口水库湖北库区水质分区及长期变化趋势[J]. 中国环境监测, 2016, 32(1): 64-69.
ZHANG Xu, XIONG Jing, CHENG Jixiong, et al. The spatial distribution and long-term variation trend of water quality of Danjiangkou Reservoir in Hubei Province. *Environmental Monitoring in China*, 2016, 32(1): 64-69. (in Chinese)
- [4] 王艳分, 倪兆奎, 林日彭, 等. 洞庭湖水环境演变特征及关键影响因素识别[J]. 环境科学学报, 2018, 38(7): 2554-2559.
WANG Yanfen, NI Zhaokui, LIN Ripeng, et al. Evolution characteristics of the Dongting Lake water environment and revealing its key influent factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(7): 2554-2559. (in Chinese)
- [5] 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. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(7): 1163-1167. (in Chinese)
- [6] 彭珂, 董晓钢, 张晓范, 等. 季节性 Kendall 检验分析湘江长沙段水质变化趋势[J]. 中国环境监测, 2014, 30(1): 82-85.
PENG Ke, DONG Xiaogang, ZHANG Xiaofan, et al. The seasonal Kendall inspection in water quality variation trend analysis at Changsha Section of Xiang River. *Environmental Monitoring in China*, 2014, 30(1): 82-85. (in Chinese)
- [7] 王小焕, 邵景安, 王金亮, 等. 三峡库区长江干流入库水质评价及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 2017, 37(2): 554-565.
WANG Xiaohuan, SHAO Jing'an, WANG Jinliang, et al. Water quality assessment and its changing trends in the reservoir inflow and outflow along the Yangtze River mainstream in the Three Gorge Reservoir Area. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(2): 554-565. (in Chinese)
- [8] 盛海燕, 吴志旭, 刘明亮, 等. 新安江水库近 10 年水质演变趋势及与水文气象因子的相关分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 118-127.
SHENG Haiyan, WU Zhixi, LIU Mingliang, et al. Water quality trends in recent 10 years and correlation with hydro-meteorological factors in Xin'anjiang Reservoir. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(1): 118-127. (in Chinese)
- [9] 郭海晋, 王政祥, 邹宁. 长江流域水资源概述[J]. 人民长江, 2008(17): 3-5.
GUO Haijin, WANG Zhengxiang and ZOU Ning. Water resources of the Yangtze Basin. *Yangtze River*, 2008(17): 3-5. (in Chinese)
- [10] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005(3): 321-325.
XU Zuxin. Single factor water quality identification index for environmental quality assessment of surface water. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005(3): 321-325. (in Chinese)
- [11] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005(4): 482-488.
XU Zuxin. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005(4): 482-488. (in Chinese)
- [12] MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- [13] KENDALL, M. G. Rank correlation methods. 4th Edition. London: Griffin, 1970.
- [14] HIRSCH, R. M., SLACK, J. R. and SMITH, R. A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 1982, 18(1): 107-121. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00107>
- [15] 胡国华, 唐忠旺, 肖翔群. 季节性 Kendall 检验及其在三门峡水库水质趋势分析中的应用[J]. 地理与地理信息科学, 2004(3): 86-88.
HU Guohua, TANG Zhongwang and XIAO Xiangqun. Trend analysis of water quality of Sanmenxia Reservoir of the Yellow River. *Geography and Geo-Information Science*, 2004(3): 86-88. (in Chinese)