

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.05.012

太湖下游河网区水质变化特征与引水调控效果

张伊佳¹, 陈星¹, 许钦², 李慧敏¹, 许钊³, 李炳峰¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029;
3. 中国水权交易所股份有限公司, 北京 100053)

摘要:为探究复杂水文水动力条件及污染来源区域的引水调控效果,选取太湖下游河网区29个断面2007—2018年 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 逐月监测数据,采用单因子评价法、综合污染指数法、聚类分析法、Pearson相关分析法以及单因素方差法进行分析。结果表明,研究区水质情况在时间上可分为两个阶段,2015年为水质整体转好的拐点;空间上可分为6类断面,距离引水口较近的断面改善效果较好,引水改善范围逐年扩大;不同水质指标对引水量的响应情况不同, $\text{NH}_3\text{-N}$ 在距离引水口较近的断面与引水量呈显著负相关关系,而 COD_{Mn} 与引水量呈显著负相关关系的断面更多;不同引水量对水质指标的影响存在空间差异,综合得出引水量为2.0亿~2.5亿 m^3 时对水质的改善效果最优。
关键词:平原河网区;水质;时空分布;引水调控;最优引水量;太湖

中图分类号:TV213.4;X171 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)05-0079-08

Characteristics of water quality change in the downstream river network area of Taihu Lake and effect of water diversion control // ZHANG Yijia¹, CHEN Xing¹, XU Qin², LI Huimin¹, XU Zhao³, LI Bingfeng¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, 210098, China; 2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, 210029, China; 3. China Water Rights Exchange Co., Ltd, Beijing, 100053, China)

Abstract: To explore the water diversion control effect in complex hydro-hydrodynamic conditions and polluted source areas, the downstream river network area in Taihu Lake Basin was selected as the research object. Based on the monthly monitoring datas of $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD_{Mn} in 29 sections of the study area from 2007 to 2018, single-factor evaluation method, comprehensive pollution index method, cluster analysis method, Pearson correlation analysis and one-way ANOVA were used for analysis. The results show that the water quality in the study area can be divided into two periods in terms of time with 2015 being the inflection point for the overall improvement of water quality. Sections can be divided into six categories in terms of space, with the section closer to the water intake having a better improvement effect and the scope of improvement expanding by water diversion year by year. Different water quality indicators have different responses to water diversion quantity with $\text{NH}_3\text{-N}$ significantly negatively correlated with water diversion quantity in the section closer to the water intake, while in more sections, COD_{Mn} has negative correlation with water diversion quantity. There are spatial differences in the influence of different water diversion quantities on the water quality index. It is concluded that when the water diversion quantity is 200 million-250 million m^3 , the improvement effect of water quality is the best.

Key words: plain river network; water quality; spatial and temporal distribution; water diversion control; optimal water diversion quantity; Taihu Lake

社会经济高速发展与人类活动的影响造成我国河湖水环境恶化,水系连通状况也随之改变,引水改善水环境已成为提升河湖水环境的重要途径^[1-2]。通过引水促进水系连通,一方面可加快河道水体流动,

缩短水体换水周期;另一方面也可对河道内污染物起到稀释作用。研究表明,引水对河网区各主要河道水质均有所改善,但改善的效果存在时空异质性^[3],水流不畅^[4-5]、河道连通性^[6]、点源面源污染等都是影

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2018YFC0407704);国家自然科学基金(51879163,51579148,51779146)

作者简介:张伊佳(1995—),女,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源。E-mail: hhuzjy@qq.com

通信作者:陈星,副教授。E-mail: 77574471@qq.com

响水质改善效果的重要因素^[7];王超等^[8]发现“引江济太”可改善太湖流域的水环境质量,但平原河网区水流流向复杂,易出现回流、雍水现象,工程调度尤为为重要;何文学等^[9]发现河流的自净能力与水力条件密切相关,所以要合理设置调水配水方案;陈昌军等^[10]以江南水乡某平原河网地区为例,通过各引水方案效果的比选,得出了推荐引水规模。

太湖流域下游地势平坦、水系密集、河道比降小,城镇化、工业化程度高,污染严重,河网水文水动力条件及污染来源复杂^[11-12]。因此研究这一区域水质时空变化特征,分析太浦闸引水与其下游平原河网区水质时空变化规律的关系,对平原河网区引水调控实践与水质改善具有重要意义。

1 研究区概况

以受太浦闸引水影响的太湖下游河网为研究对象,该区域处于上海、江苏和浙江 3 个省市之间,包括太浦河、吴淞江、浏河等多条河流。研究区位于太湖流域东侧,为亚热带季风气候,四季分明、热量充裕、雨水丰沛。多年平均气温为 15 ~ 17 ℃,多年平均降水量 1 177 mm,降水年际变化明显,年内雨量分配不均^[13]。研究区地势平坦、河网密布,河流流速缓慢,水体自净能力弱。

“引江济太”工程自 2006 年起进入长效化调水阶段,其主要工程太浦闸既能调蓄太湖水位,又能引水改善下游河网区水质^[14]。采用研究区 2007—2018 年 NH₃-N 与 COD_{Mn} 逐月监测数据,选择覆盖研究区

的 29 个重点断面,具体为:沪苏边界的长村桥、南浔大桥、升罗桥、太师桥、乌桥、洛东大桥、思源大桥、圣塘桥、太平桥、北虹大桥、双林桥、章湾圩公路桥、陶庄枢纽、金泽、浙沪边界的金丝娘桥、东海桥、青阳汇、六里塘大桥、新风路桥、俞汇北大桥、清凉大桥、大舜枢纽、丁栅枢纽、枫南大桥,苏浙边界的周庄大桥、珠砂港大桥、千灯浦闸、石浦大桥、太和大桥(图 1)。

2 研究方法

2.1 水质评价

水质评价方法采用单因子评价法^[15]和综合污染指数法^[16],评价标准执行 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的Ⅲ类标准。

2.2 聚类分析

考虑到水质在时间、空间上的差异性及相似性,采取应用较为广泛的层次聚类分析法^[17]。首先对原始数据使用 Z-score 方法进行变换,以消除量纲影响;以 Seucclidean 距离度量样本之间的距离,运用 Ward 算法生成具有层次结构的聚类树;按照监测时间和监测断面的地理位置进行分类,进而分析研究区水质的时空变化特征。

2.3 相关性分析

采用 Pearson 相关系数描述 2 个定距变量间联系的紧密程度,用于度量两个变量 X 和 Y 之间的相关性,样本的相关系数用 r 表示。 $r > 0$ 表明两个变量正相关, $r < 0$ 表明两个变量负相关, r 值介于 -1 与 1 之间,绝对值越大表明相关性越强^[18]。在实际

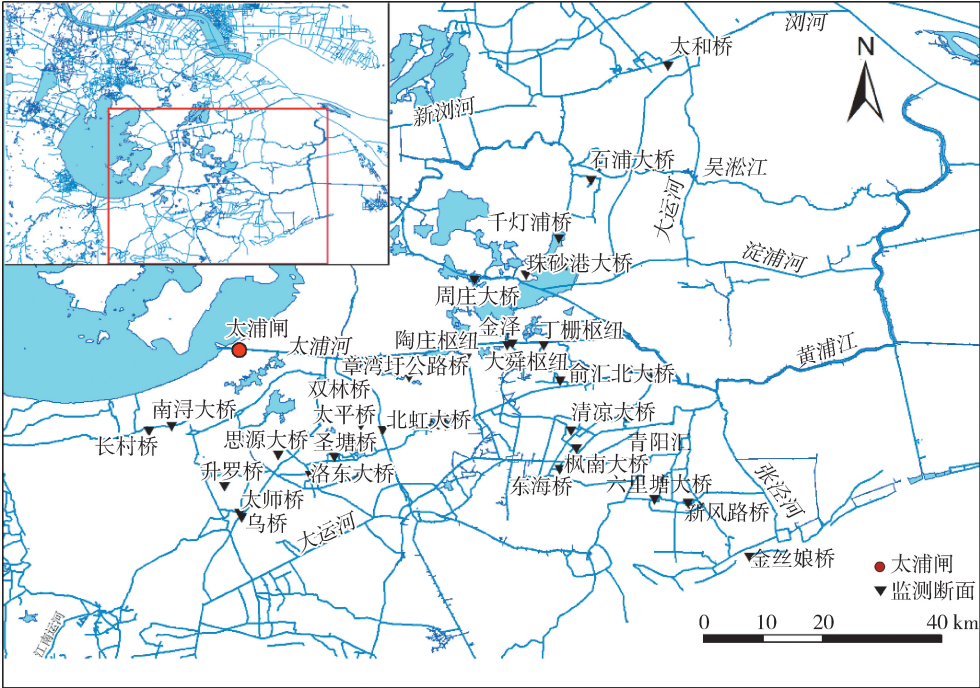


图 1 研究区监测断面分布
Fig. 1 Monitoring sections of study area

分析中, r 大都利用样本数据计算, 带有一定的随机性, 因此需要对相关关系的显著性进行检验。相关关系的显著性采用 t 检验, 计算 t 检验的统计量和对应的概率 P 值。当 $P < 0.05$ 时, 拒绝零假设, 说明两变量之间存在着显著的线性相关关系; 当 $P \geq 0.05$ 时, 接受零假设, 表明两变量间不存在线性相关关系。

2.4 单因素方差分析

在引水改善水质过程中, 考虑到不同引水量对水质改善程度的差异性及相似性, 采用方差分析的方法对各评价指标在不同引水量区间上的显著差异性检验, 以判断是否存在显著差异^[19]。本文的控制变量是引水量, 属于单因素方差分析, 显著性检验公式为

$$\lambda^2/n = \frac{|W|}{|B+W|} \sim \Lambda(p, n-m, m-1) \quad (1)$$

式中: n 为样本数; B 为组间离差平方和矩阵; W 为组内离差平方和矩阵; p 为向量维数; m 为水平数。 Λ 统计量服从自由度为 $(p, n-m, m-1)$ 的 Λ 分布, 当 λ^2/n 值大于显著水平 α 时, 则表明在该控制变量下不同水平各总体均值不存在显著性差异, 反之, 则

存在显著性差异。

事后多重比较采用 LSD (least significant difference) 法, 用 t 检验完成各组均数间的比较, 故比较适合于一对平均数间的比较, 或多个平均数都与对照组平均数比较。

3 结果与分析

3.1 水质指标时间变化特征

3.1.1 年际变化

根据 2007—2018 年研究区 29 个断面的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 COD_{Mn} 质量浓度逐月监测数据, 计算各年 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 COD_{Mn} 质量浓度的平均值、标准差、Ⅲ类超标倍数和超标率, 结果见表 1, 各类标准所占比例见图 2。2007—2018 年研究区水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度降低 65%, COD_{Mn} 质量浓度降低 32%, 且标准差、Ⅲ类超标倍数均逐渐变小, 水质波动明显减弱。2007 年研究区 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度大部分为Ⅳ类、Ⅴ类甚至劣Ⅴ类, COD_{Mn} 污染水平相对于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 较轻, 大部分为Ⅳ类; 至 2018 年, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度Ⅲ类达标率达 78.7%, COD_{Mn} 质量浓度Ⅲ类达标率高达 90.5%。

表 1 2007—2018 年 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 污染特征

Table 1 Water quality characteristics of $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD_{Mn} from 2007 to 2018

年份	$\text{NH}_3\text{-N}$				COD_{Mn}			
	质量浓度平均值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	标准差/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Ⅲ类超标倍数	Ⅲ类超标率/%	质量浓度平均值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	标准差/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Ⅲ类超标倍数	Ⅲ类超标率/%
2007	1.86	1.78	1.86	59.8	7.13	2.50	1.19	62.4
2008	1.75	1.62	1.75	54.3	6.40	2.48	1.07	45.5
2009	1.44	1.26	1.44	51.7	6.27	2.15	1.05	46.3
2010	1.56	1.39	1.56	55.5	6.11	1.85	1.02	48.9
2011	1.86	1.74	1.86	58.6	6.38	2.18	1.06	49.4
2012	1.89	1.79	1.89	57.8	6.32	1.93	1.05	50.0
2013	1.63	1.55	1.63	53.6	6.41	2.88	1.07	57.1
2014	1.30	1.36	1.30	47.0	5.99	2.17	1.00	41.7
2015	1.09	1.13	1.09	34.5	5.07	1.94	0.84	24.7
2016	0.76	0.76	0.76	25.3	5.34	1.34	0.89	27.6
2017	0.67	0.61	0.67	20.7	5.23	1.26	0.87	22.4
2018	0.64	0.55	0.64	21.3	4.82	0.94	0.80	9.5

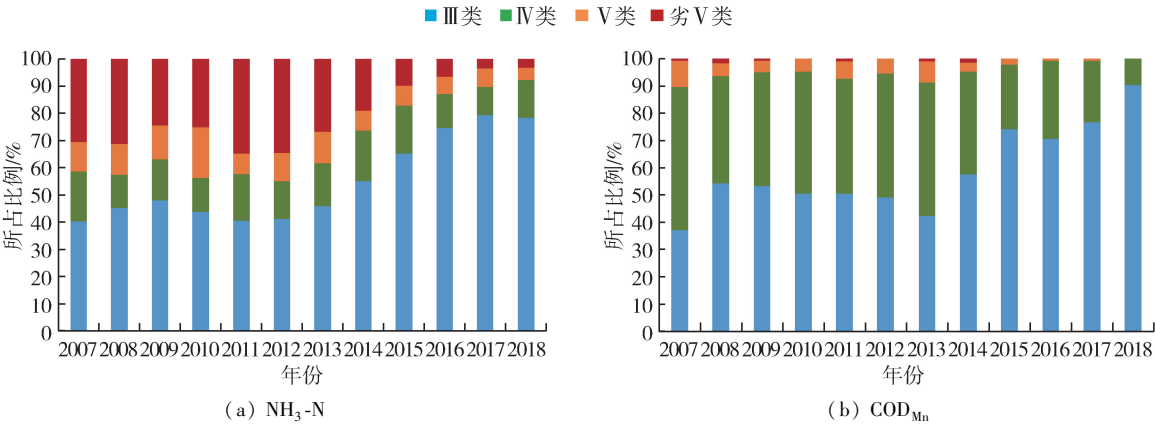


图 2 2007—2018 年 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 水质类别占比

Fig. 2 $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD_{Mn} water quality category ratio from 2007 to 2018

计算研究区 2007—2018 年各监测断面逐月综合污染指数,根据系统聚类计算结果提取各阶段数据所属年份占比,可知研究区水质变化可以分为 2 个阶段,第 1 阶段 88 个数据,第 2 阶段 40 个数据。第 1 阶段中 2007—2014 年的数据占 90.9%,2015—2018 年的数据占 9.1%,研究区水体平均综合污染指数达 1.36,整体处于超标状态,其中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度超标 1.62 倍, COD_{Mn} 质量浓度超标 1.05 倍;第 2 阶段中 2007—2014 年的数据占 30%,2015—2018 年的数据占 70%,研究区水体平均综合污染指数为 0.82, $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 COD_{Mn} 质量浓度均达到地表水Ⅲ类标准。2015—2018 年的逐年综合污染指数分别为 0.97、0.82、0.77、0.72,流域水质整体转好。

3.1.2 年内分布

根据时间聚类分析结果,分别计算 2007—2014 年与 2015—2018 年各断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 COD_{Mn} 质量浓度月均值,见图 3。可以看出, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度在 2007—2014 年的汛期(5—9 月)呈现明显的下降趋势,汛期结束后逐渐升高;2015—2018 年 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度年内变化趋于平缓。 COD_{Mn} 质量浓度在 2007—2014 年的汛期有较弱的增加趋势;2015—2018 年 COD_{Mn} 质量浓度年内变化趋于平缓。

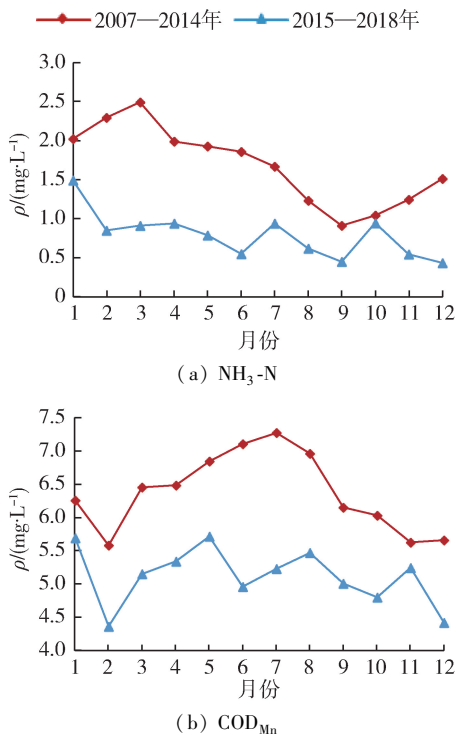


图3 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 COD_{Mn} 质量浓度月均值年内分布
Fig.3 Annual distribution of mean concentration of $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD_{Mn}

3.2 水质指标空间分布特征

根据时间聚类分析结果,分别计算 2007—2014 年与 2015—2018 年各断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 COD_{Mn} 质量浓

度的平均值(表 2)。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度基本呈现从西至东逐渐升高的趋势, COD_{Mn} 质量浓度在太湖湖区较高,随后呈现从西至东升高的趋势。分析研究区各断面综合污染指数空间分布情况,根据空间聚类结果及空间位置将研究区监测断面分为 6 类,结果见图 4。由图 4 可见,流域水质情况具有明显的空间分布特征,位于太浦河上受太浦闸引水直接影响的 A 类断面是研究区最优水质区域,说明引水对水质改善显著;水质较优的 A 类、B 类断面受太湖优质来水影响,主要集中于研究区西侧;水质较差的 C 类、D 类、E 类、F 类断面集中于研究区东侧,其中 D 类、E 类位于嘉兴市,该区域河道水面坡降小,部分河道还受潮沙顶托,排水不畅,污染物易累积,水体置换周期长^[20];C 类、F 类断面毗邻昆山市、太仓市和上海市,该区域人口密度大,水资源开发强度大,受工业废水和生活污水排放的双重影响,水体污染较严重^[21]。

表 2 各断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 COD_{Mn} 质量浓度平均值

Table 2 Average value of $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD_{Mn} concentration in each section (单位:mg/L)

断面	$\text{NH}_3\text{-N}$		COD_{Mn}	
	2007—2014 年	2015—2018 年	2007—2014 年	2015—2018 年
石浦大桥	5.29	1.99	7.00	5.55
千灯浦闸	3.02	0.93	6.09	4.90
周庄大桥	1.95	0.84	5.39	4.71
珠砂港大桥	0.69	0.32	5.03	4.09
金 泽	0.72	0.28	4.63	3.90
双林桥	1.45	0.70	6.88	5.16
太平桥	1.56	1.11	6.90	6.33
北虹大桥	1.65	0.93	6.94	5.55
太师桥	0.72	0.47	5.05	4.55
青阳汇	3.75	0.69	7.74	5.77
六里塘大桥	2.49	0.52	7.73	5.75
丁栅枢纽	0.61	0.27	4.65	3.81
太和大桥	2.71	1.90	3.25	3.13
陶庄枢纽	0.64	0.42	5.77	4.93
章湾圩公路桥	0.95	1.31	4.69	4.01
长村桥	0.31	0.27	6.02	4.80
升罗桥	1.46	1.49	4.14	4.13
思源大桥	0.88	0.72	6.16	6.08
南浔大桥	0.63	0.46	9.31	6.82
圣塘桥	0.75	0.43	4.91	4.34
洛东大桥	0.81	0.45	5.34	4.68
乌 桥	2.07	0.87	5.96	5.23
大舜枢纽	0.70	0.28	8.89	5.56
枫南大桥	3.02	1.16	5.12	3.93
清凉大桥	1.88	0.71	7.64	5.73
东海桥	2.92	1.33	6.73	5.55
金丝娘桥	2.41	1.00	7.61	5.63
新风路桥	1.71	0.65	8.90	6.10
俞汇北大桥	0.53	0.31	8.45	6.24



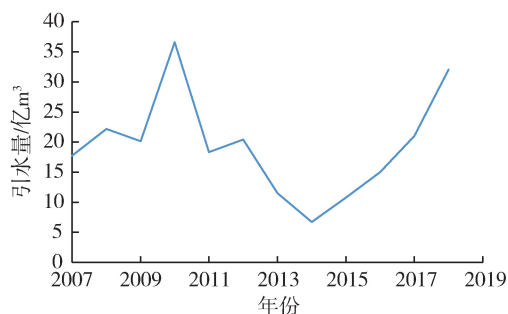
图4 断面分类

Fig. 4 Classification of Sections

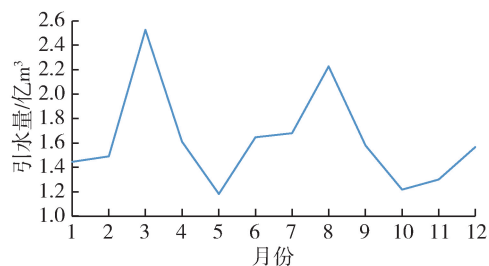
3.3 水质指标对引水的响应规律

3.3.1 太浦闸引水量变化规律

根据 2007—2018 年太浦闸引水量逐月监测数据,计算各年引水量月平均值及各年相同月份平均值,结果如图 5 所示。由图 5 可见,引水量受降水、水质、工程调度等不同情况影响,年际变化较大,范围在 6.72 亿 ~ 36.60 亿 m^3 间波动。2014 年开始,“引江济太”工程进入扩大调水阶段,引水量逐年上升。引水量的年内分布变化明显,引水主要集中在



(a) 年际分布



(b) 年内分布

图5 太浦闸引水量年际和年内分布

Fig. 5 Annual and monthly distribution of water diversion in Taipu Gate

降水量偏少的春季与水环境问题突出的夏季。

3.3.2 水质指标与引水量的相关性

针对 3.2 节划分的 6 类断面,将引水时段分为汛期(5—9 月)与非汛期(10 月至次年 4 月),对各类断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 COD_{Mn} 平均质量浓度与引水量进行 Pearson 相关性分析。结果表明,汛期引水量与研究区水质变化虽然呈负相关趋势($r < 0$),但无显著负相关关系。非汛期引水量与水质指标负相关关系明显:对于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度的变化,引水量与 C 类断面在显著性水平 0.05 级别相关性显著, Pearson 相关系数为 -0.297 ,显著性水平为 0.013;对于 COD_{Mn} 质量浓度变化,引水量与 A、B 类断面在 0.05 级别相关性显著, Pearson 相关系数分别为 -0.261 、 -0.306 ,显著性水平分别为 0.032、0.011,与 E 类断面在显著性水平 0.01 级别相关性显著, Pearson 相关系数为 -0.383 ,显著性水平为 0.001。距离引水口较近的 C 类断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量浓度对引水量变化有较强响应,随着流程增加, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度与引水量相关性减弱;说明随着引水距离增加,加之沿程污染物汇入,引水对污染物的稀释降解效果减弱。 COD_{Mn} 质量浓度对引水的响应更为敏感,与引水量呈显著负相关的断面分布更广;说明引水促进污染物稀释,增加河道溶解氧含量,加快了 COD_{Mn} 的降解。距离引水口较远的 E 类断面在引水前 COD_{Mn} 质量浓度较高,因此引水对其改善效果也较为显著。2016 年太湖流域降水量达 1792.4 mm,较常年偏多 46%,作为特殊年份分析。2016 年汛期无引水,非汛期引水与各类断面的水质指标均无明显相关性;

说明降水量增大造成研究区水量增加,由此削弱了引水的水质改善效果。

3.3.3 引水距离对水质改善的影响

计算各断面引水距离,分析不同年份引水距离与综合污染指数的关系,选取变化较明显的 2007、2014、2018 年为示例,如图 6 所示。可以看出引水距离越长,综合污染指数越大,表明引水距离对水质的改善有较大影响。不同引水距离下综合污染指数的变化趋势逐年减缓,且不断降低,说明随着水质的好转,引水距离的影响趋于弱化。随着水量调度的不断完善以及流域水环境治理工作的推进^[22],引水可影响的范围逐渐扩大,断面达标率从 2007 年的 45% 增长到 2018 年的 90%,达标断面平均引水距离从 43.07 km 扩大至 52.66 km,研究区水质改善效果显著。

3.3.4 引水量对水质改善的影响

由 3.3.2 节可知,非汛期引水量与各类断面水质指标均有负相关关系,进一步对影响水质改善的引水量范围进行定量分析。根据引水量分布,将 0~0.5 亿 m³ 记为 1 级、0.5 亿~1.0 亿 m³ 记为 2 级、1.0 亿~1.5 亿 m³ 记为 3 级、1.5 亿~2.0 亿 m³ 记为 4 级、2.0 亿~2.5 亿 m³ 记为 5 级、2.5 亿~3.5 亿 m³ 记为 6 级、3.5 亿~7.0 亿 m³ 记为 7 级。采用单因素方差分析法,对各类断面的 NH₃-N、COD_{Mn} 质量浓度进行分析,研究其在不同引水量区间上的显著差异性,并通过事后 LSD 多重比较得出水质指标存在差异的引水量区间。

对于 NH₃-N 质量浓度的方差齐次性检验可知各断面方差均具有齐次性($P > 0.05$),可进行下一步分析。由方差分析可知,A、C、F 类断面分别在 94.8%、93.1%、93.6% 的概率下存在不同引水量区间下的显著性差异,对这 3 类断面的 NH₃-N 质量浓度进行 LSD 事后多重比较,结果见表 3。A 类断面的 2~6 级引水量之间、C 类断面的 3 级与 4 级、7 级引水量之间、F 类断面的 2 级、3 级与 5 级引水量之

间对应的 NH₃-N 质量浓度存在 95% 以上的显著差异。图 7 为 A、C、F 类断面各级引水量下 NH₃-N 质量浓度平均值,可以看出,A、C 类断面 4 级引水量为最大效率点,F 类断面 5 级引水量为最大效率点、4 级引水量为次最大效率点。

表 3 NH₃-N 质量浓度 LSD 事后多重比较结果

Table 3 LSD-t of NH ₃ -N concentration							
断面类型	引水量分级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级	7 级
A 类	1	0.322	0.445	0.688	0.698	0.100	0.974
	2		0.631	0.047 *	0.030 *	0.273	0.247
	3			0.074	0.046 *	0.134	0.368
	4				0.962	0.011 *	0.604
	5					0.090	0.885
	6						0.189
C 类	1	0.366	0.181	0.782	0.909	0.959	0.651
	2		0.478	0.091	0.208	0.304	0.087
	3			0.016 *	0.038	0.113	0.022 *
	4				0.568	0.693	0.802
	5					0.946	0.448
	6						0.561
F 类	1	0.529	0.422	0.560	0.424	0.807	0.646
	2		0.796	0.079	0.024 *	0.270	0.163
	3			0.033	0.006 *	0.176	0.096
	4				0.789	0.704	0.917
	5					0.525	0.733
	6						0.804

注: * 代表在显著性水平 0.05 级别显著。

对 COD_{Mn} 质量浓度进行方差齐次性检验,可知各断面方差均具有齐次性($P > 0.05$),可进行下一步分析。由方差分析得到 E 类断面在 99.4% 的概率下存在不同引水量区间下的显著性差异,对其 COD_{Mn} 质量浓度进行 LSD 事后多重比较,结果见表 4。E 类断面的 2~7 级引水量对应的 COD_{Mn} 质量浓度均存在 95% 以上的显著性差异。图 8 为 E 类断面各级引水量下 COD_{Mn} 质量浓度平均值,可以看出,从 2 级引水量开始,水质有很大提升;从 5 级引水量

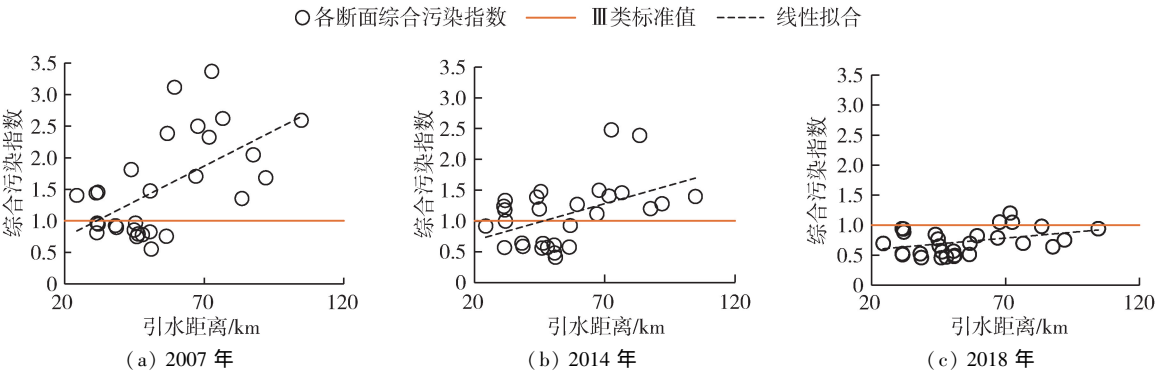


图 6 部分年份引水距离与综合污染指数关系

Fig. 6 Relationship between water diversion distance and comprehensive pollution index in some years

开始,COD_{Mn}达到地表水Ⅲ类标准值。

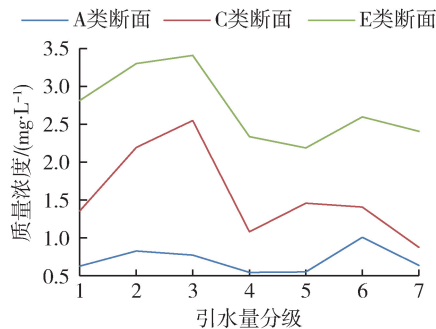


图7 A、C、E类断面各级引水量下NH₃-N质量浓度平均值

Fig.7 Mean value of NH₃-N concentration of section A、C、E under the value of water diversion

表4 COD_{Mn}质量浓度LSD事后多重比较结果
Table 4 LSD-t of COD_{Mn} concentration

断面类型	引水量分级	2级	3级	4级	5级	6级	7级
E类	1	0.283	0.930	0.917	0.419	0.357	0.277
	2		0.014 *	0.048 *	0.001 *	0.002 *	0.003 *
	3			0.965	0.119	0.138	0.109
	4				0.238	0.217	0.162
	5					0.779	0.564
	6						0.766

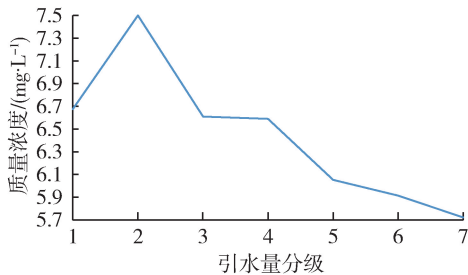


图8 E类断面各级引水量下COD_{Mn}质量浓度平均值

Fig.8 Mean value of COD_{Mn} concentration of section E under the value of water diversion

改善NH₃-N质量浓度的最大效率引水量是4级,次大效率引水量为5级;COD_{Mn}质量浓度在引水量达到5级以后达标并有明显改善。综合两类水质指标,引水量为5级(2.0亿~2.5亿m³)时,水质改善效果相对最优。

4 结 论

a. 研究区水质变化有明显的时空差异性,总体水质改善明显,波动显著减弱。在时间上可分为2个阶段,第1阶段为2007—2014年,研究区水质较差;第2阶段为2015—2018年,研究区水质整体逐年转好,年内不同水质指标变化趋势不同。空间上整体呈现从西至东污染物浓度逐渐升高的趋势,COD_{Mn}质量浓度在太湖出湖区明显偏高,位于太浦河上游太浦闸引水直接影响的A类断面是研究区

最优水质区域。

b. 引水对不同水质指标改善情况不同。NH₃-N质量浓度与引水量相关性随流程增加明显减弱;COD_{Mn}质量浓度对引水的响应更为敏感,引水对其的改善范围更广。引水距离对水质改善情况有较大影响,引水距离越长,综合污染指数越大,水质改善效果越差。近年来随着水量调度的不断完善以及流域水环境治理工作的推进,引水可影响的范围逐渐扩大。

c. 根据单因素方差分析得出改善NH₃-N质量浓度的最大效率引水量是4级(1.5亿~2.0亿m³),COD_{Mn}质量浓度在引水量达到5级以后达标并有明显改善。综合两类水质指标得出,引水量为5级(2.0亿~2.5亿m³)时,水质改善效果最优。

参考文献:

[1] MA X,WANG L, WU H, et al. Impact of Yangtze River water transfer on the water quality of the Lixia River watershed, China[J]. Plos One, 2015, 10(4): e0119720.

[2] 陈传友,沈镭,胡长顺,等. 我国大西线“江河连通”调水新格局的设想与评析[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 1-8. (CHEN Chuanyou, SHEN Lei, HU Changshun, et al. Analysis of and preliminary comments on new pattern of rivers-connected water transfer along Great Western Line of China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 1-8. (in Chinese))

[3] 马小雪,王腊春. 引江调水对平原河网区水环境质量的影 响[J]. 浙江农业学报, 2015 (6): 1048-1055. (MA Xiaoxue, WANG Lachun. Influence of water transfer from the Yangtze River on the water quality in plain river network areas[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015 (6): 1048-1055. (in Chinese))

[4] 张琳,王民,杨启红,等. 基于二维数学模型的调水方案水环境改善效果研究[C]//中国环境科学学会科学与技术年会论文集(2017). 北京: 中国环境科学学会, 2017: 2546-2552.

[5] 陈庆江,丁瑞,赵海. 平原河网区活水畅流对水动力和水质的改善效果[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3): 8-13. (CHEN Qingjiang, DING Rui, ZHAO Hai. Improvement effect of hydrodynamics and water quality by flowing water in plain river network area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3): 8-13. (in Chinese))

[6] 崔广柏,陈星,向龙,等. 平原河网区水系连通改善水环境效果评估[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1429-1437. (CUI Guangbo, CHEN Xing, XIANG Long, et al. Evaluation of water environment improvement by interconnected river network in plain area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1429-1437. (in

- Chinese))
- [7] HU L, HU W, ZHAI S, et al. Effects on water quality following water transfer in Lake Taihu, China [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(4) : 471-481.
 - [8] 王超,卫臻,张磊,等.平原河网区调水改善水环境实验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(2) : 136-138. (WANG Chao, WEI Zhen, ZHANG Lei, et al. Experimental study on improvement of water environment bywater diversion in plain river networks[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2005, 33(2) : 136-138. (in Chinese))
 - [9] 何文学,邹冰,陈冬云,等.平原河网区调水配水改善水环境方案设计[J]. 中国给水排水, 2012, 28(17) : 63-67. (HE Wenxue, ZOU Bing, CHEN Dongyun, et al. Design of water transfer and distribution schemes of river network in plain areas for improving water environment [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(17) : 63-67. (in Chinese))
 - [10] 陈昌军,张卫飞.平原河网区城市引水工程水质改善预测研究[J]. 人民长江, 2012, 43(17) : 88-90. (CHEN Changjun, ZHANG Weifei. Prediction research on water quality improvement through water diversion project for a city in plain river network area[J]. Yangtze River, 2012, 43(17) : 88-90. (in Chinese))
 - [11] 陆志华,李勇涛,钱旭,等.考虑太湖水质指标的流域骨干工程调度方案[J]. 水资源保护, 2018, 34(6) : 48-52. (LU Zhihua, LI Yongtao, QIAN Xu, et al. Scheduling scheme of Taihu Basin key projects considering water qualityindex of Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6) : 48-52. (in Chinese))
 - [12] 王子悦,李一平,董志强,等.太湖流域平原河网分流比影响因素[J]. 水资源保护, 2019, 35(4) : 49-54. (WANG Ziyue, LI Yiping, DONG Zhiqiang, et al. Influencing factors of flow diversion ratio in plain river networks of Taihu Lake Basin [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4) : 49-54. (in Chinese))
 - [13] 钟晶晶,王玉,杨雪姣,等.太湖流域河流与湖泊间主要水质指标的空间关联特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(8) : 2176-2182. (ZHONG Jingjing, WANG Yu, YANG Xuehuo, et al. Spatial correlation of major water quality indices between the lake and rivers in Taihu Lake Basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(8) : 2176-2182. (in Chinese))
 - [14] 周小平,翟淑华,袁粒. 2007—2008 年引江济太调水对太湖水质改善效果分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(1) : 40-43, 48. (ZHOU Xiaoping, ZHAI Shuhua, YUAN Li. Influences of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on water quality of Taihu Lake between 2007 and 2008[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1) : 40-43, 48. (in Chinese))
 - [15] 潘苹,黄晓荣,魏晓玥,等. 三种常用水质评价方法的对比分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(6) : 51-55. (PAN Qun, HUANG Xiaorong, WEI Xiaoyue, et al. A comparative analysis of three common water quality evaluation methods[J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2019(6) : 51-55. (in Chinese))
 - [16] 朱媛媛,田进军,李红亮,等.丹江口水库水质评价及水污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2016(1) : 139-147. (ZHU Yuanyuan, TIAN Jinjun, LI Hongliang, et al. Water qaulity assessment and pollution profile identification of Danjiangkou Reservoir, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016(1) : 139-147. (in Chinese))
 - [17] 马振,周密.聚类分析在秦淮河水水质指标相关性研究中的应用[J]. 水文, 2018, 38(1) : 77-80. (MA Zhen, ZHOU Mi. Application of cluster analysis in correlation study on water quality indexes [J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(1) : 77-80. (in Chinese))
 - [18] 朱锦杰,章传银,王伟,等.两湖平原地下水微动态影响因素相关性分析[J]. 测绘科学, 2016, 40(12) : 7-11. (ZHU Jinjie, ZHANG Chuanyin, WANG Wei, et al. Analysis of correlation between groundwater, air pressure and precipitation in plain areas of Hubei and Hunan province[J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 40(12) : 7-11. (in Chinese))
 - [19] 张涛,陈求稳,易齐涛,等.太湖流域上游平原河网区水质空间差异与季节变化特征[J]. 湖泊科学, 2017, 29(6) : 1300-1311. (ZHANG Tao, CHEN Qiuwen, YI Qitao, et al. Spatial and seasonal variations of water quality in the upstream plain river networks of the Taihu Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(6) : 1300-1311. (in Chinese))
 - [20] 吴海松,陈吉.嘉兴市地表水环境现状及治理对策建议[J]. 产业与科技论坛, 2013(23) : 114-116. (WU Haisong, CHEN Ji. The present situation of surface water environment in Jiaxing City and countermeasures [J]. Industrial & Science Tribune, 2013(23) : 114-116. (in Chinese))
 - [21] 张姗姗,张磊,张落成,等.苏南太湖流域污染企业集聚与水环境污染空间耦合关系[J]. 地理科学, 2018, 38(6) : 954-962. (ZHANG Shanshan, ZHANG Lei, ZHANG Luocheng, et al. Coupling relationship between polluting industrial agglomeration andwater environment pollution in southern Jiangsu of Taihu Lake basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(6) : 954-962. (in Chinese))
 - [22] 朱伟,谈永琴,王若辰,等.太湖典型区 2010—2017 年间水质变化趋势及异常分析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2) : 296-305. (ZHU Wei, TAN Yongqin, WANG Ruochen, et al. The trend of water quality variation and analysis in typical area of Lake Taihu, 2010-2017 [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(2) : 296-305 (in Chinese))

(收稿日期:2019-09-20 编辑:王 芳)