

李佳, 廉振强, 窦明, 等. 丹江库区水质时空分布特征及影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 181-189. LI J, LIAN Z Q, DOU M, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of water quality and influencing factors in Danjiang Reservoir area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 181-189. (in Chinese)

# 丹江库区水质时空分布特征及影响因素

李佳<sup>1</sup>, 廉振强<sup>2</sup>, 窦明<sup>1,3</sup>, 陈海燕<sup>2</sup>, 贾瑞鹏<sup>1</sup>, 李桂秋<sup>3</sup>

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001; 2. 河南省南水北调中线渠首生态环境监测中心, 河南 南阳 474475;  
3. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001)

**摘要:**为全面了解丹江库区近年来的水环境状况,基于 11 个监测断面 2015—2020 年的水质监测数据,使用 Mann-Kendall(M-K)趋势检验和 Pearson 相关分析等多元数据分析方法,结合改进的综合水质指数(water quality index, WQI)和综合营养状态指数(trophic level index, TLI),探究丹江库区自南水北调中线工程通水以来水质的时空分布特征和影响因素。结果表明:2015—2020 年,丹江库区水质指标呈现明显的季节变化和空间分布差异特征,水体污染以氮、磷为主,质量浓度较高的区域主要集中在库区北侧;库区整体上水质为“良”且处于中营养状态,支流水质相比库区污染较为严重,汛期水质差于非汛期,但年际间呈现逐渐改善的趋势;主要受控于降雨和人类活动等影响因素,由工业、生活、农业等导致的点源、面源污染负荷显著,因此未来在水源地水环境保护治理过程中,应加大对老鹳河、丹江等重点支流的污染治理,控制面源污染的排放。

**关键词:**丹江库区;综合水质指数;营养状态指数;时空变化;影响因素

**中图分类号:**TV214;X824 **文献标志码:**A **DOI:**10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0019

水质安全保障是南水北调中线工程运行调度管理的首要任务。尽管丹江口水库水质常年保持在 I ~ II 类水平,然而近年来局部库湾总氮、总磷指标逐渐增长,出现了富营养状态<sup>[1]</sup>。为此,加强对丹江口库区的水环境监测预警是受水区广大居民用水安全和工程效益切实发挥的迫切需要。

湖泊水库的水质情况受季节、气候、地形、水力调节、污染控制等因素影响而变化,并存在一定的变化规律。目前国内外对湖库的研究较为丰富:郭诗君等<sup>[2]</sup>发现丹江口水库不同点位、不同水层叶绿素 a 分布存在较大的空间异质性,并探讨了影响不同水层叶绿素 a 含量的关键驱动因子;曾庆慧等<sup>[3]</sup>探究密云水库不同监测点水环境相似性及空间分布特征,并分析识别影响水质的主要因子;全栋等<sup>[4]</sup>系统分析乌梁素海近年来水体营养状态的特征及演变过程,并定性分析湖泊富营养的关键影响因子;李颖等<sup>[5]</sup>通过分析水质的长期变化趋势,进而探讨

出淮河入湖水质是洪泽湖维持较高营养水平和水质空间分异的重要原因。上述研究均从不同角度识别造成水质变化的驱动因素,以期当地水环境管理和改善提供依据,进而对不同生态区采取针对性管理措施。为此,基于 2015—2020 年河南段丹江库区监测的水质指标,对丹江库区及主要支流自南水北调中线工程通水以来水质的差异性及其变化特征进行分析,同时建立 WQI<sub>min</sub>(water quality index)模型识别库区关键水质指标,进而探讨驱动水质指标变化的主要因素,为持续抓好南水北调中线工程水源地的水环境保护工作提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

丹江口水库(32°36'N ~ 33°48'N、110°59'E ~ 111°49'E)位于豫、鄂、陕交界的湖北省丹江口市和河南省淅川县境内,由汉江库区和丹江库区构成。

收稿日期:2022-04-26 修回日期:2022-11-30 网络出版时间:2023-01-12

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail//13.1430.TV.20230112.0959.001.html

基金项目:国家自然科学基金项目(51879239);河南省高等学校重点科研项目计划(21A570008);河南省科技攻关项目(222102320211)

作者简介:李佳(1998—),女,山东邹城人,主要从事水环境与生态保护研究。E-mail:1105794695@qq.com

通信作者:窦明(1975—),男,山东桓台人,教授,博士,主要从事水资源与水环境研究。E-mail:dou\_ming@163.com

本研究区域为淅川县境内的丹江库区,位于河南省南阳市西南方向,水面宽敞,库岸线短,主要支流有老鹳河、丹江、淇河、滔河。南水北调中线一期工程自 2014 年 12 月正式通水以来,北调水量不断增加,截至 2021 年 7 月累计输水超 400 亿  $\text{m}^3$ [6]。作为南水北调中线工程供水水源地,丹江口水库初始大坝高度 162 m,正常蓄水位 127 m,水域面积 745  $\text{km}^2$ ,其中丹江库区面积 362  $\text{km}^2$ ,占库区总面积的 48.6%;大坝加高到 176.6 m 后,正常蓄水位为 170 m,库区水面面积为 1 050  $\text{km}^2$ ,丹江库区面积为 546  $\text{km}^2$ ,占库区总面积的 52%。库区属亚热带季风气候,气候温和,四季分明,年均降水量 808 mm,年均气温 15.8  $^{\circ}\text{C}$ 。库区地势:西北高,以山地为主;东南低,以浅山丘陵为主[7]。丹江库区周边农业活动较频繁,土地利用以耕地和林地为主,其次为草地和灌丛[7]。

## 1.2 数据来源

选取丹江库区 11 个地表水环境责任目标断面的 13 项水体污染物指标,监测数据由河南省南水北调中线渠首生态环境监测中心提供,监测时段为 2015 年 1 月—2020 年 12 月,每月月初在水下 0.5 m 处采集水样,水质监测分析执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)。主要的水质监测指标包括 pH、水温(WT)、水位、电导率、透明度(SD)、溶解氧(DO)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、生化需氧量( $\text{BOD}_5$ )、化学需氧量(COD)和叶绿素 a(Chl-a)等。降水数据来源于中国地面气候资料月值数据集。水质监测点包括多个库区点位和 3 个支流断面。其中,支流断面包括丹江的史家湾和老鹳河的张营,支流交汇处为曹湾,库区监测点位主要有陶岔渠首、宋岗、土门、党子口、台子山和梁家岗,以及入库口处黑鸡嘴、出库口处五龙泉。

## 1.3 综合水质指数

由 Pesce 等[8]在 2000 年开发和改进的 WQI 方法将多个水质参数整合成一个可以代表整体水质的无量纲数,定义为综合水质指数  $I_{\text{WQI}}$ ,综合反映评价水环境质量状况,其计算公式为

$$I_{\text{WQI}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

式中: $n$ 为水质指标个数; $C_i$ 为第  $i$  个水质指标的归

一化值; $P_i$ 为第  $i$  个水质指标的权重。具体的归一化值、权重选取和计算方法详见参考文献 [9-13]。根据  $I_{\text{WQI}}$  值将水质状况分为优 [90~100]、良 [70~90)、中 [50~70)、差 [25~50)和极差 [0~25)5 个等级,符合我国实际的水质管理标准。

在本研究中,基于逐步多元线性回归选择关键参数,建立  $\text{WQI}_{\text{min}}$  模型。考虑参数权重的  $\text{WQI}_{\text{min}}$  模型记为  $\text{WQI}_{\text{min-m}}$ ,归一化值、权重选取和水质状况分级与 WQI 相同,根据公式(1)计算,而不考虑权重的 WQI 模型记为  $\text{WQI}_{\text{min-n}}$ ,综合水质指数计算公式为

$$I_{\text{WQI}_{\text{min-n}}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (2)$$

## 1.4 综合营养状态指数

综合营养状态指数法被广泛应用于评价中国湖泊(水库)的富营养化状况,通过公式(3)加权得到综合营养状态指数,定义为综合营养状态指数  $I_{\text{TLI}(\Sigma)}$ ,计算公式为

$$I_{\text{TLI}(\Sigma)} = \sum_{j=1}^m W_j I_{\text{TLI}(j)} \quad (3)$$

式中: $I_{\text{TLI}(\Sigma)}$ 为综合营养状态指数; $W_j$ 为第  $j$  种水质参数的营养状态指数的相关权重; $I_{\text{TLI}(j)}$ 为第  $j$  种水质参数营养状态指数; $m$ 为参与评价的参数个数。具体的参数权重、各水质参数营养状态指数的计算以及等级分类结果详见相关文献 [14]。

## 1.5 数据分析与处理

采用 Pearson 相关分析揭示水质指标之间的相关关系。Mann-Kendall(M-K) test 用于检验时间序列数据的变化趋势,通过计算统计值  $Z$  进行判断,若  $Z > 0$ ,呈增加趋势;反之表示呈减小趋势。本研究中  $\text{WQI}_{\text{min}}$  模型的建立分为两个步骤:采用逐步多元线性回归方法,选取建立  $\text{WQI}_{\text{min}}$  模型的关键参数;对  $\text{WQI}_{\text{min}}$  模型进行拟合验证。在进行逐步多元线性回归前进行对数变换  $\lg(x+1)$  预处理,以满足数据正态性。采用决定系数  $R^2$  来评估模型的拟合优度,利用百分比误差 PE 评价不同  $\text{WQI}_{\text{min}}$  模型的预测能力。

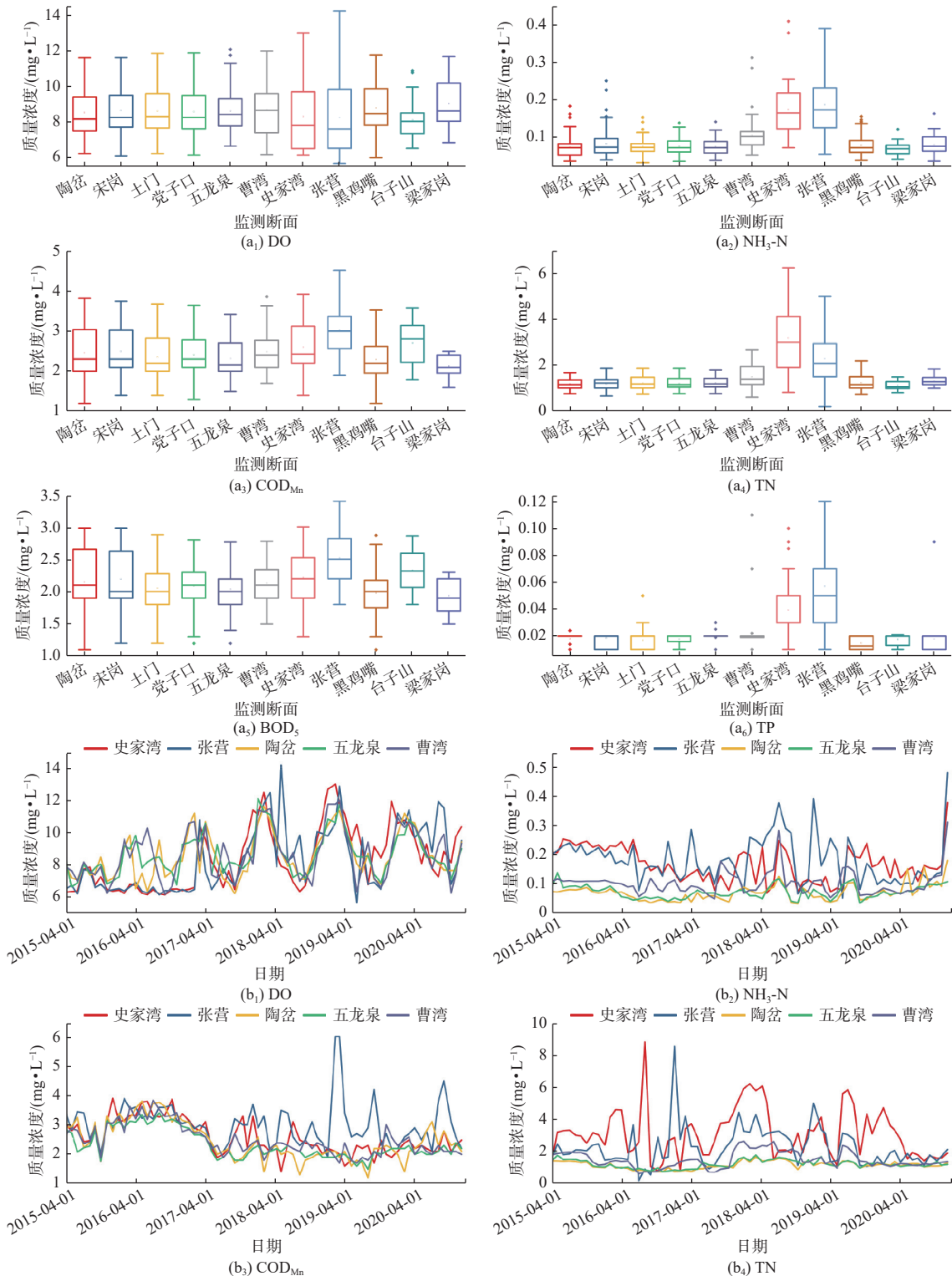
## 2 结果分析

### 2.1 主要水质理化特征分析

根据各监测断面 DO、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP

和TN等主要水质指标的空间箱型图结果[图1(a)]可知,丹江库区水体中DO总体质量浓度较高,各站点DO质量浓度平均值均>7.5 mg/L,且地区间无明显差异。COD<sub>Mn</sub>和BOD<sub>5</sub>质量浓度平均值分别为2.5和2.2 mg/L,除张营断面部分月份监测值略大外,库区各点位的COD<sub>Mn</sub>和BOD<sub>5</sub>质量浓度都分别低于饮用水水源地标准限值4和3 mg/L。NH<sub>3</sub>-N、

TN和TP质量浓度变化情况相似,均在张营和史家湾具有突出的高质量浓度,平均质量浓度分别为0.100、1.600和0.024 mg/L,但各监测站点的NH<sub>3</sub>-N和TP质量浓度均符合饮用水水源地标准限值0.5和0.2 mg/L,而TN质量浓度偏高,超过饮用水限制标准,成为水质安全的主要限制因子。



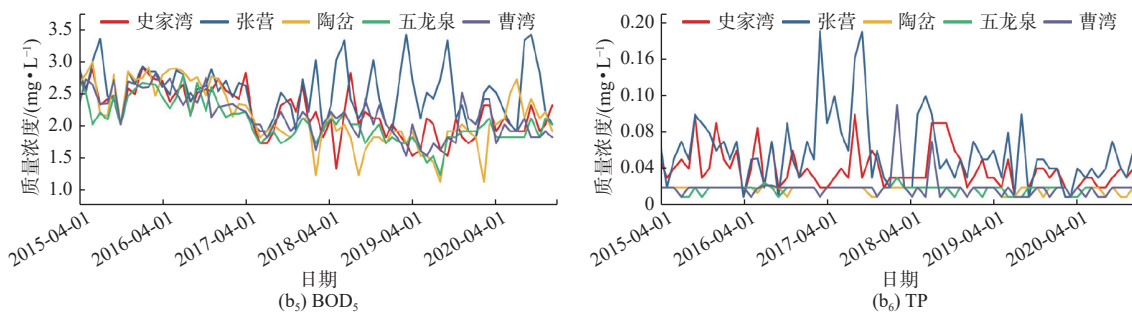


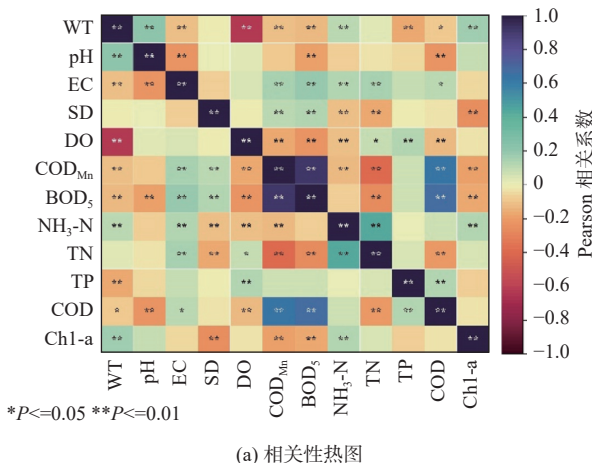
图 1 2015—2020 年各断面主要指标监测值及变化趋势

Fig. 1 Monitoring values and trends of key indicators by section from 2015 to 2020

对支流和库湾典型断面 6 个主要水质指标的时间序列进行分析,其变化趋势分布情况见图 1(b)。结果显示:陶岔、五龙泉、曹湾等库区监测断面 DO 呈现季节波动,在 2015—2017 年波动幅度较小,2018—2020 年波动幅度较大;支流史家湾和张营 DO 质量浓度在 2017 年 2 月之前无明显变化且处于较低值,随后与库区断面呈相同的季节变化。COD<sub>Mn</sub> 质量浓度无明显变化规律,5 个典型站点均先呈下降趋势,随之小幅度增加后明显下降;此后库区断面波动较小,而 2 个支流断面呈剧烈变化。BOD<sub>5</sub> 质量浓度则与 COD<sub>Mn</sub> 变化情况基本相似。库区断面的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度变化较平缓,支流张营和史家湾 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度要明显高于库区监测质量浓度值,且均在 2018—2019 年发生剧烈波动。库区断面的 TN 和 TP 无明显波动且处于较低值,高值多出现在支流断面,且张营和史家湾的 TN 和 TP 质量浓度均表现为大幅度升降,具有一定的季节性波动。

### 2.2 水质理化指标相关性分析

计算各水质指标之间的 Pearson 相关系数 [图 2(a)],

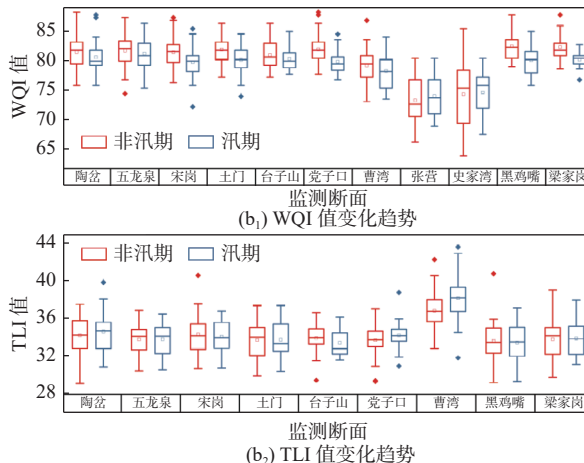


(a) 相关性热图

可看出 DO 与 WT、COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub> 等呈显著负相关; Chl-a 与 SD、COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub> 呈显著负相关,与 WT、NH<sub>3</sub>-N 呈显著正相关,而与 TN、TP 没有明显的相关性。研究显示,适宜的温度是藻类生长和繁殖的必备条件,而氮、磷等营养元素也是影响藻类生长的关键因子,但是丹江库区水体中的氮磷比为 49.693 ~ 117.448,因此磷是水体富营养化的限制因子,这可能是库区 Chl-a 与 TN、TP 相关性不显著的原因。

### 2.3 基于 TLI 和 WQI 的水质时空变化

库区不同时期各站点水质指数时空变化情况见图 2(b),可知库区整体上营养状态较好,绝大多数断面均处于中营养状态,仅在个别月份出现贫营养。库区内所有监测断面的 WQI 值变化范围为 72.3 ~ 88.2,水质均为“良”;曹湾位于支流交汇处,其水质情况体现了上游来水的污染现状,虽然监测时段内的 WQI 值略小于库区,但水质也均为“良”;张营和史家湾等支流断面的 WQI 值更低,且分别有 20.8%、27.8% 的监测月份出现水质为“中”。



(b) TLI 值变化趋势

图 2 水质指标的相关性及指数变化趋势分析

Fig. 2 Correlation of water quality index and analysis of index change trend

根据 M-K 检验法对各监测断面两项指数的时间序列进行分析,其变化趋势分布情况见表 1。M-K

趋势检验结果显示:宋岗、土门、党子口、台子山的 TLI 值呈现显著下降趋势,而其他站点均无明显升

降;除梁家岗的 WQI 值无明显升降外,其余站点均呈显著上升趋势。由此可见,在时间尺度上,库区水体作为核心水源地其水环境保持较好,入库河流水体污染物整体上呈现减小趋势,说明支流水质整

体上在逐渐改善。根据 2 个时期变化 [图 2(b)] 发现,汛期的 WQI 值小于非汛期,TLI 值在汛期大于非汛期,说明丹江库区非汛期水质要优于汛期水质。

表 1 M-K 趋势检验结果  
Tab. 1 Results of the M-K trend test

| 监测断面 | COD <sub>Mn</sub> | DO      | NH <sub>3</sub> -N | TN      | TP      | BOD <sub>5</sub> | WQI    | TLI     |
|------|-------------------|---------|--------------------|---------|---------|------------------|--------|---------|
| 陶岔   | -3.899↓           | 2.416↑  | 1.599—             | 1.274—  | -2.183↓ | -5.124↓          | 2.455↑ | -1.872— |
| 宋岗   | -5.571↓           | 1.721—  | 0.112—             | 0.982—  | -1.891— | -6.509↓          | 3.306↑ | -1.949↓ |
| 土门   | -4.283↓           | 1.614—  | -0.214—            | 1.113—  | -2.387↓ | -5.537↓          | 3.802↑ | -1.959↓ |
| 党子口  | -4.320↓           | 2.175↑  | -12.150↓           | 0.875—  | -2.673↓ | -5.283↓          | 2.885↑ | -2.232↓ |
| 五龙泉  | -3.495↓           | 2.090↑  | 1.230—             | 0.715—  | -0.880— | -5.333↓          | 2.858↑ | 0.569—  |
| 曹湾   | -5.159↓           | 1.901—  | -0.958—            | -0.637— | -1.621— | -5.941↓          | 3.082↑ | -0.896— |
| 史家湾  | -4.924↓           | 5.255↑  | -3.699↓            | -1.157— | -2.295↓ | -5.877↓          | 5.712↑ |         |
| 张营   | -2.367↓           | 5.304↑  | -2.586↓            | -0.579— | -2.236↓ | -2.363↓          | 4.254↑ |         |
| 黑鸡嘴  | -5.134↓           | -0.006— | 1.390—             | 1.996↑  | -1.327— | -5.153↓          | 2.124↑ | -0.785— |
| 台子山  | -0.954—           | 0.518—  | -2.438↓            | -3.106↓ | -1.389— | -2.942↓          | 1.989↑ | -3.174↓ |
| 梁家岗  | 1.580—            | -1.553— | 0.749—             | -4.291↓ | -1.362— | 0.708—           | 0.354— | -0.667— |

注:数据为M-K检验Z值;↑表示增加趋势,↓表示减小趋势,—表示无趋势。

### 2.4 关键水质参数的选择

将 2015—2019 年水质指标质量浓度(527 组)作为训练数据,进行多元线性逐步回归分析。结果表明,基于训练数据,NH<sub>3</sub>-N 对 WQI 值的贡献最大, $R^2=0.589$ ,而依次加入 DO( $R^2=0.773$ )、COD<sub>Mn</sub>( $R^2=0.857$ )、TN( $R^2=0.902$ )等参数后  $R^2$  值会显著增加。此外,将 WT、BOD<sub>5</sub> 选作第 5 和 6 个参数略微提高了模型的性能。因此,选择 NH<sub>3</sub>-N、DO、COD<sub>Mn</sub>、TN 作为 WQI<sub>min</sub> 模型评价丹江库区水质的基本参数,并考虑和评估引入 WT、BOD<sub>5</sub> 对模型 WQI<sub>min</sub> 的影响。

以 NH<sub>3</sub>-N、DO、COD<sub>Mn</sub>、TN 作为 WQI<sub>min</sub> 的关键

指标,并依据  $R^2$  和 PE 值对 WQI<sub>min</sub> 模型的性能进行综合评估(表 2)。结果表明,根据回归选择增加参数确实可以提高  $R^2$ ,且考虑权重的模型在解释 WQI 值时比没有考虑权重的模型表现更好。此外,基于训练数据集模型 WQI<sub>min-n3</sub> 呈现出最低的 PE 值,表明它是本研究中最合适的 WQI<sub>min</sub> 模型。基于验证数据的 WQI<sub>min</sub> 预测拟合结果表明,从  $R^2$  和 PE 值来看,WQI<sub>min-n3</sub> 模型表现出最好的性能( $R^2=0.8977$ )。可看出本研究提出的 WQI<sub>min</sub> 模型由 NH<sub>3</sub>-N、DO、COD<sub>Mn</sub>、TN 和 BOD<sub>5</sub> 共 5 个参数组成,不仅能够很好反映丹江库区水质状况,还有利于简化 WQI 值计算和监测成本。

表 2 WQI<sub>min</sub> 模型的参数率定结果  
Tab. 2 Parameter calibration results of the WQI<sub>min</sub> models

| 参数  | WQI <sub>min-m</sub> (考虑参数权重) |       |       |       | WQI <sub>min-n</sub> (不考虑参数权重) |       |       |      |
|---|-------------------------------|-------|-------|-------|--------------------------------|-------|-------|------|
|   | 模型                            | $R^2$ | $P$   | PE/%  | 模型                             | $R^2$ | $P$   | PE/% |
| NH <sub>3</sub> -N、DO、COD <sub>Mn</sub> 、TN                     | $m_1$                         | 0.915 | <0.01 | 11.73 | $n_1$                          | 0.944 | <0.01 | 5.04 |
| NH <sub>3</sub> -N、DO、COD <sub>Mn</sub> 、TN、WT                  | $m_2$                         | 0.878 | <0.01 | 12.25 | $n_2$                          | 0.966 | <0.01 | 5.63 |
| NH <sub>3</sub> -N、DO、COD <sub>Mn</sub> 、TN、BOD <sub>5</sub>    | $m_3$                         | 0.941 | <0.01 | 8.17  | $n_3$                          | 0.963 | <0.01 | 2.91 |
| NH <sub>3</sub> -N、DO、COD <sub>Mn</sub> 、TN、WT、BOD <sub>5</sub> | $m_4$                         | 0.913 | <0.01 | 9.20  | $n_4$                          | 0.988 | <0.01 | 3.43 |

### 3 讨论

#### 3.1 关键水质特征因子分析

通过以上分析发现,  $\text{NH}_3\text{-N}$  对 WQI 变化的贡献最大, 水库氨氮大部分来源于外源输入<sup>[15]</sup>, 其自身含量通常处于较低水平, 一旦  $\text{NH}_3\text{-N}$  发生变化说明出现明显大量外源污染输入<sup>[16]</sup>, 支流断面监测值要高于库区且具有剧烈波动, 这可能与上游支流沿岸生活污水排放和城镇基础设施等情况有关。水库中 DO 与 WT 呈负相关且具有一定的季节变化, 这可能是由于冬季温度低, 地表水中氧气的溶解度增大, 且低温抑制了水生生物的耗氧活动, 减少了水体中氧气的消耗。TN 直接决定着水质的优劣情况, 黑鸡嘴断面呈显著增加趋势, 台子山和梁家岗呈显著下降趋势, 其他断面无明显变化, 这可能是由于黑鸡嘴位于入库口处, 受上游支流农业面源污染较大。对关键指标进行 M-K 趋势检验(表 1), 总体来看: 库区  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{BOD}_5$  除台子山和梁家岗无明显趋势外, 其他断面均呈显著减小趋势, 表明有机污染源减少; 氨氮和总氮在支流和出库口附近呈显著减少, 而库区无明显变化, 这可能是库区蓄水量大, 对水质指标起到了稀释的作用, 因而质量浓度变化不大。

#### 3.2 上游支流对水体污染物的影响分析

支流上游区域有重金属污染企业, 如有色金属汞、钒和钼矿采选加工工业等; 随着生活用水量增加, 城镇生活污水(垃圾、粪便以及畜禽养殖)排放量较大; 同时水库流域内以种植业为主, 每年使用的农药和化肥有逐年增加的趋势<sup>[17-18]</sup>。根据研究结果, TN 和 TP 质量浓度较高的区域主要集中在丹江库区北侧, 即支流丹江河和老鹤河及其交汇处, 且高质量浓度点位周边农业种植行为活跃, 由土壤养

分流失等农业面源导致的氮磷面源污染负荷明显。张营和史家湾有部分月份 WQI 出现“中”, 可看出库区水质较好, 而支流丹江河和老鹤河水体污染较为严重, 且史家湾比张营更差些, 说明支流沿岸污染问题有待进一步解决。曹湾位于丹江河与老鹤河交汇处, 其 TLI 值显著高于其他库区站点, 这可能与上游支流沿岸生活污水和化肥农药等排放有关。丹江入库口处黑鸡嘴断面 TN 质量浓度呈显著增加趋势, 说明上游支流来水的水质影响着库区水质, 是库区重要的外源污染来源。

#### 3.3 降水对水体污染物的影响分析

根据研究结果, TN 是库区主要的超标因子, 陶岔、土门、宋岗等库区东侧监测站点的 TN 质量浓度与降水量的关系见图 3, 可看出各月降水量年际变化大, 呈现夏季(6—8 月)最大、秋季(9—11 月)次之、春(3—5 月)冬季(12 月—次年 2 月)最低的变化趋势, 而降水量变化直接影响库区径流、水位以及水库蓄水量的变化。12 月—次年 5 月处于枯水期, 降水量少, 库区周边主要土地利用类型为农田, 水体中的氮主要来自于地表径流携带, 因此入库水量的减少导致 TN 质量浓度的降低; 此外春季水生动植物开始生长、微生物活性提高, 也有利于吸收降解水体中的氮。在 7 月进入丰水期后, 暴雨集中, 强度大、历时短, 入渗有限, 容易冲刷侵蚀地表, 库区周边分布有大量农村和耕地, 大面积土壤中残留的化肥和农药随着水土流失冲刷汇入地表径流<sup>[3]</sup>, 携带入水库造成 N 营养盐质量浓度超标。此外, 对比图 2(b)发现汛期水质质量浓度要高于非汛期, 冬季枯水期又开始下降, 这可能与汛期雨水充沛携带大量污染物进入水库有关。

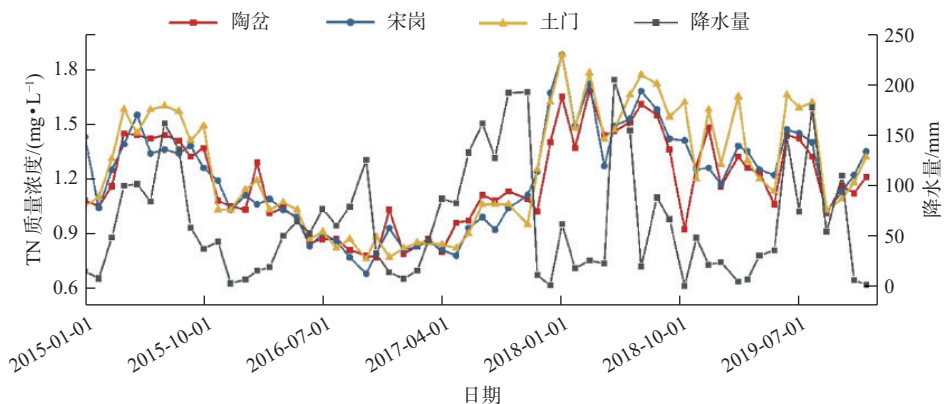


图 3 典型站点降水量与 TN 变化趋势

Fig. 3 Trends in precipitation and TN at typical sites

### 3.4 水位对水体污染物的影响分析

在丹江口大坝加高工程完工后,丹江口水库由年调节改善为不完全年调节水库,坝顶高程从162 m加高至176.6 m<sup>[19]</sup>,丹江口水库水位抬升后大量农田耕地将被淹没。消落区无序耕种现象依然时有发生,加剧了库周面源污染输入<sup>[20-22]</sup>。新淹没区域土壤的氮磷释放<sup>[23-25]</sup>、库周土壤侵蚀以及周边农村生活等面源污染都成为威胁库区水质的重要因素。2015—2020年水位年内变化规律为4—6月降到最低,进入汛期后7—9月份库区水位持续增长直至

9月达到最高水平,有些年份可能会在9、10月进入秋汛,水位相应地在12月达到最高,之后随着降水量的减少和水库持续供水,导致水库水位持续性降低直至次年4月,从而进入下一个周期。从库区水位和TN质量浓度分析(图4)可知,TN质量浓度与水位整体上呈现相似的变化趋势说明:水位上升时,消落带被淹没,大量的消落带植被被淹没然后死亡,被分解的植物释放出大量的有机物<sup>[20,26]</sup>进入水库水体,从而TN质量浓度增大导致水质较差;当水库处于低水位时,相应的TN质量浓度处于较低值。

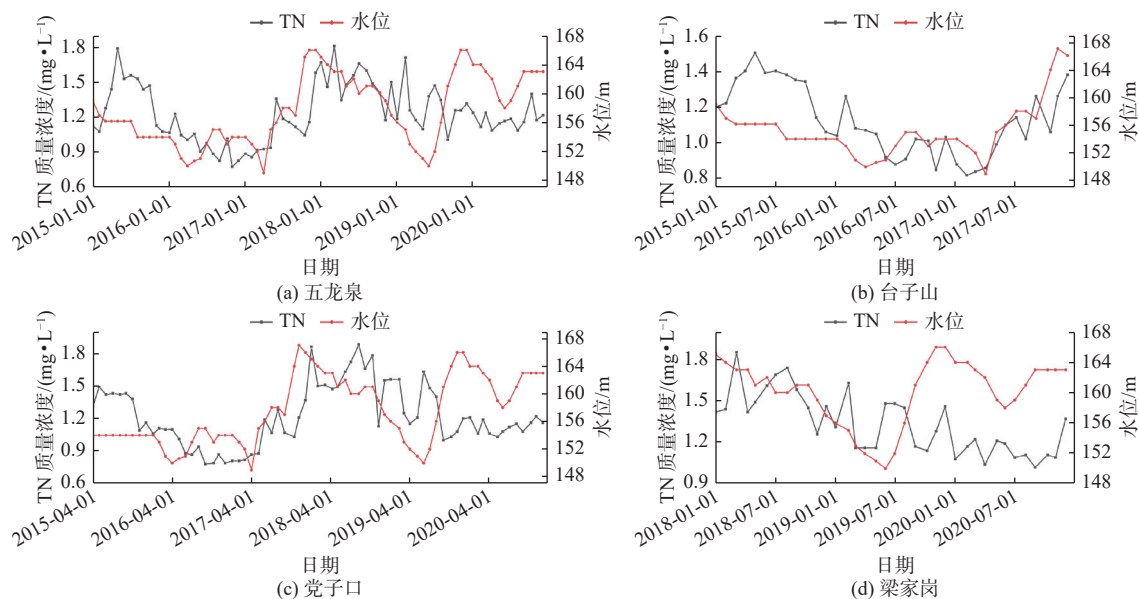


图4 典型站点水位与TN变化趋势

Fig. 4 Trend of water level and TN at typical sites

## 4 结论

各监测站点的水化学特征具有明显的空间分布差异性,NH<sub>3</sub>-N、TN、TP等指标在支流丹江河和老鹤河具有突出高值;库区水质较好,支流污染较为严重,反映出支流水体受到了人类活动的强烈影响进而营养盐的累积现象问题突出。

根据WQI值,除了张营和史家湾有部分月份出现“中”外,其他水质均为“良”;除梁家岗无明显升降外,其他监测断面的WQI值呈现显著上升趋势。丹江库区整体上处于中营养状态,且呈现减小趋势。

NH<sub>3</sub>-N、DO、COD<sub>Mn</sub>、TN和BOD<sub>5</sub>这5个参数对库区水质的贡献率较大,其组成的WQI<sub>min</sub>模型能够很好地反映库区水质。

TN和TP质量浓度较高的区域主要集中库区北侧,主要受控于降雨和人类活动等因素影响,由工业、生活、农业等导致的点源、面源污染负荷明

显,说明上游支流对库区水质影响较大。

### 参考文献:

- [1] 赵康平,杨文杰,沙健,等.丹江口水库水体营养状态空间特征分析[J].环境科学与技术,2020,43(3):51-58. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2020.03.007.
- [2] 郭诗君,王小军,韩品磊,等.丹江口水库叶绿素a浓度的时空特征及影响因子分析[J].湖泊科学,2021,33(2):366-376. DOI: 10.18307/2021.0206.
- [3] 曾庆慧,秦丽欢,程鹏,等.1990年以来北京密云水库主要水环境因子时空分布特征[J].湖泊科学,2016,28(6):1204-1216. DOI: 10.18307/2016.0606.
- [4] 全栋,史小红,赵胜男,等.2006—2017年乌梁素海夏季水体营养状态及影响因子[J].湖泊科学,2019,31(5):1259-1267. DOI: 10.18307/2019.0503.
- [5] 李颖,张祯,程建华,等.2012—2018年洪泽湖水质时空变化与原因分析[J].湖泊科学,2021,33(3):715-726. DOI: 10.18307/2021.0308.

- [6] 赵志楠, 王俊健, 张元娜, 等. 南水北调中线水源区浮游植物群落结构及其生物多样性[J]. *南水北调与水利科技*, 2022, 20(5): 914-924. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0091](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0091).
- [7] MA F, LI C, WANG X, et al. A Bayesian method for comprehensive water quality evaluation of the Danjiangkou Reservoir water source area, for the middle route of the South-to-North Water Diversion Project in China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2014, 8(2): 242-250. DOI: [10.1007/s11707-013-0395-6](https://doi.org/10.1007/s11707-013-0395-6).
- [8] PESCE S F, WUNDERLIN D A. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River[J]. *Water Research*, 2000, 34(11): 2915-2926. DOI: [10.1016/S0043-1354\(02\)00182-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00182-3).
- [9] KANNEL P R, LEE S, LEE Y S, et al. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 132(1): 93-110. DOI: [10.1007/s10661-006-9505-1](https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1).
- [10] RAMESH S, SUKUMARAN N, MURUGESAN A G, et al. An innovative approach of drinking water quality index: A case study from southern Tamil Nadu, India[J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(4): 857-868. DOI: [10.1016/j.ecolind.2010.01.007](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.01.007).
- [11] WU Z, WANG X, CHEN Y, et al. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 914-922. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.08.293](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.293).
- [12] TIAN Y, JIANG Y, LIU Q, et al. Using a water quality index to assess the water quality of the upper and middle streams of the Luanhe River, northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 667: 142-151. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.02.356](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.356).
- [13] NONG X, SHAO D, ZHONG H, et al. Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method[J]. *Water Research*, 2020, 178: 115781. DOI: [10.1016/j.watres.2020.115781](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115781).
- [14] 贺康康, 王敬富, 李玉麟, 等. 贵阳市百花湖近10年(2009—2018年)的水质时空变化[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(2): 494-506. DOI: [10.18307/2021.0215](https://doi.org/10.18307/2021.0215).
- [15] 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 等. 近年全国地表水水质变化特征[J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4419-4429. DOI: [10.13227/j.hjkk.202111299](https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202111299)
- [16] 叶焰中, 陈凡, 黄廷林. 基于水质综合指数法对亚热带水源型水库水质评价[J/OL]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 116-124.
- [17] 赵文耀, 胡家庆. 丹江口水库流域面源污染现状分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2007, 29(2): 50-52. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2007.02.019](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2007.02.019).
- [18] 吴川, 张玉龙, 张克荣, 等. 丹江口水库水质的遥感监测[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(6): 75-80. DOI: [10.3724/SP.J.1201.2013.06075](https://doi.org/10.3724/SP.J.1201.2013.06075).
- [19] 孙建芸, 袁琳, 王新生, 等. 基于GF\_1卫星的丹江口水库水面面积-蓄水量-水位相关性研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(5): 89-96. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.05.014](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.05.014).
- [20] 曾祉祥, 雷沛, 张洪, 等. 丹江口水库典型消落区土壤氮磷赋存形态及释放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(5): 1383-1392. DOI: [10.13671/j.hjkkxb.2014.0888](https://doi.org/10.13671/j.hjkkxb.2014.0888).
- [21] 马利民, 张明, 滕衍行, 等. 三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响[J]. *环境科学*, 2008(4): 1035-1039. DOI: [10.13227/j.hjkk.2008.04.023](https://doi.org/10.13227/j.hjkk.2008.04.023).
- [22] ZHANG B, FANG F, GUO J, et al. Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics relevant to the soil composition of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 40: 153-159. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2011.12.024](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.024).
- [23] 王剑, 尹炜, 赵晓琳, 等. 丹江口水库新增淹没区农田土壤潜在风险评估[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(1): 157-164.
- [24] 尹炜, 朱惇, 雷俊山, 等. 丹江口水库典型消落区不同土地利用类型土壤养分分布[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1185-1191. DOI: [10.11870/cj-lyzyyhj201507015](https://doi.org/10.11870/cj-lyzyyhj201507015).
- [25] 雷沛, 曾祉祥, 张洪, 等. 丹江口水库农业径流小区土壤氮磷流失特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 44-48. DOI: [10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.03.009](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.03.009).
- [26] AKHTAR M S, OKI Y, NAKASHIMA Y, et al. Microcosm investigation on differential potential of free-floating azolla macrophytes for phytoremediation of p-controlled water eutrophication[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2016, 18(1): 204-212.



## Spatio-temporal distribution characteristics of water quality and influencing factors in Danjiang Reservoir area

LI Jia<sup>1</sup>, LIAN Zhenqiang<sup>2</sup>, DOU Ming<sup>1,3</sup>, CHEN Haiyan<sup>2</sup>, JIA Ruipeng<sup>1</sup>, LI Guiqiu<sup>3</sup>

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Ecological Environment Monitoring Center of Midline Project of South to North Water Division, Nanyang 474475, China; 3. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In 2012, the State Council of China issued an opinion on the implementation of the strictest water resources management system. It aims to effectively strengthen water pollution prevention and control, improve the quality of the water environment in key river basins, and prevent the eutrophication of rivers and lakes. Danjiangkou Reservoir, as the most important water storage and water supply facility in China, plays a crucial role in the supply of safe water. In recent years, due to the expansion of Danjiangkou Reservoir, the rise of water level, the increase of water storage, and the increase of exogenous nutrient salt content, coupled with the fluctuation of water level, nutrient salt, and other hydrological and environmental conditions brought by the water transfer and water supply of Danjiangkou Reservoir, all will increase the potential risk of reservoir eutrophication. Therefore, strengthening the monitoring and early warning of the water environment is an urgent need for the water safety of the residents in the receiving area and the effective performance of the project.

To comprehensively understand the water environment status based on data from 11 monitoring sections from 2015 to 2020, with the help of multivariate data analysis methods such as Mann-Kendall (M-K) trend test, multiple linear stepwise regression analysis, and Pearson correlation analysis, and combined with the improved integrated water quality index (WQI) and integrated trophic level index (TLI), the spatial and temporal distribution patterns and influencing factors of water quality in the Danjiang Reservoir area since the commissioning of the South-North Water Transfer Central Project were explored.

According to the research results, from 2015 to 2020, water quality indicators showed obvious seasonal changes and spatial distribution differences in the Danjiang Reservoir area. Water pollution was mainly nitrogen and phosphorus, and the mass concentration of higher areas was mainly on the northern side of the reservoir. The overall water quality in the reservoir area was "good" and in the mesotrophic state, tributary water quality was more seriously polluted than the reservoir area, and the water quality in flood season was worse than that in non-flood season.  $\text{NH}_3\text{-N}$ , DO,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , TN and  $\text{BOD}_5$  were the five key indicators that contribute the most to the water quality of Danku. It is mainly controlled by factors such as rainfall and human activities, and the point and non-point source pollution loads caused by life, industrial and agricultural activities.

At this stage, nitrogen and phosphorus are the main sources of pollution in the Danku. In the future, during the treatment of water environment protection in water sources, pollution control of key tributaries such as the Laoguan River and the Danjiang River should be increased to control the discharge of non-point source pollution and provide reference in terms of water dispatch for the South-North Water Transfer Central Project.

**Key words:** Danjiang Reservoir; water quality index; trophic level index; spatio-temporal variation; influencing factor