

南水北调东线(江苏段)水质变化趋势分析

王一舒^a, 逢勇^{a,b}, 罗缙^a, 贾俊杰^a, 张鹏^a

(*河海大学 a. 环境学院; b. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098*)

摘要: 为科学指导调水工作, 全面掌握南水北调东线江苏段地表水资源质量状况及其水质变化趋势, 应用季节性 Kendall 检验法, 选取溶解氧、高锰酸盐指数、五日生化需氧量、氨氮、石油类、挥发酚 6 项污染指标, 对 2001 - 2012 年南水北调东线(江苏段)14 个控制断面水质变化进行分析评价, 从污染物类型、河流级别和行政区域三个方面对水质变化结果进行分析比较。结果表明: 2001 - 2012 年间, ①按污染物种类分, 南水北调东线江苏段研究区域内 6 项水质评价指标均呈变好趋势; ②按河流级别分, 支流水质呈变好趋势, 输水干线水质除石油类指标趋势变差外, 其它均呈变好趋势; ③按行政单位分, 扬州段 BOD₅、淮安段石油类、宿迁段溶解氧和 COD_{Mn} 水质变差外, 其它段均呈变好趋势。

关键词: 季节性 Kendall 检验; 水质; 水质评价; 南水北调; 江苏省

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0104-04

Analysis of change tendency of water quality in east line of south-to-north water diversion project of Jiangsu section

WANG Yishu^a, PANG Yong^{a,b}, LUO Jin^a, JIA Junjie^a, ZHANG Peng^a

(*a. College of Environment ; b. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes , Ministry of Education , Hohai University , Nanjing 210098 , China*)

Abstract: In order to provide guidance for water diversion work, it is necessary to master comprehensively the water quality status and water quality change trend of south - to - north water diversion project area of Jiangsu province. The paper applied the seasonal Kendall method and chose six pollution indices such as DO, COD_{Mn}, BOD₅, NH₃-N, petroleum and volatile phenol from 2001 to 2012 in water route in South-to-north water diversion project area of Jiangsu province to analyze water quality variation tendency of water quality. The results showed that from 2001 to 2012: ①According to type of pollutants, the six water quality indices changed for better. ② According to grade of rivers, the water quality of tributary is good, the water quality of trunk stream except oil index become worse, the other show better trend. ③ According to administrative unit, the water quality is poor because of BOD₅ in Yangzhou section, Petroleum in Huaian section, DO and COD_{Mn} in Suqian section, the other segment shows better trend.

Key words: seasonal Kendall method; water quality; water quality assessment; south-to-north water diversion project; Jiangsu province

由于京、津、冀、鲁地区和淮河流域生态环境日益恶化, 在这样的背景下, 实施南水北调工程, 从长江引水缓解北部水资源缺乏的状况^[1]。南水北调东线江苏段^[2-3]南起长江, 北至微山湖, 输水主干线约 617 km, 设计总水头差约 40.0 m, 沿途设 13 个梯级^[4], 共 22 处枢纽、34 座泵站, 逐级抽水入东平湖, 全程约 300 km。为确保北调水质达到Ⅲ类水标准, 2000 - 2012 年

期间, 东线江苏段治污工程项目共 102 项^[5], 实际投资 70.24 亿元, 具体包括工业结构调整项目 16 项, 工业综合治理项目 49 项, 城镇污水处理及再生利用项目 26 项, 流域综合整治项目 6 项, 截污导流项目 5 项。本文通过应用季节性 Kendall 检验法, 对 2001 - 2012 年南水北调东线江苏段 14 个控制断面水质变化进行分析评价, 进一步了解南水北调东线江苏段通过

收稿日期: 2014-02-25; 修回日期: 2014-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179053); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07506-006-05, 2012ZX07506-007-01); 江苏省水利科技项目(2012016)

作者简介: 王一舒(1989-), 女, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源规划与保护。

治污工程水质的改善效果。

1 站点布置及分析项目

1.1 输水路线及监测断面位置

南水北调东线江苏段输水通过三江营和高港2个引水口门从长江引水,三江营为主要引水口,高港在长江水位较低时补充引水。

南水北调东线江苏段输水干线上有6个水质监测断面,由南往北依次为:江都西闸断面、戴楼断面、五叉河口断面、马陵翻水站断面、张楼断面和蔺家坝断面。除输水干线外,南水北调东线支流水质控制断面有8个,由南往北依次为:泰西断面、三垛西断面、老山乡、临淮乡、沙集西闸断面、单集桥断面、沙庄桥断面和李集桥断面。

1.2 分析项目

根据南水北调东线江苏段地表水污染特点,确定溶解氧、高锰酸盐指数、五日生化需氧量、氨氮、石油类、挥发酚6项指标为分析项目,采用江苏省环保局提供的2001-2012年水质监测资料对南水北调东线江苏段进行水质趋势分析。

2 分析方法

季节性肯达尔检验^[6-8]是Mann-Kendall检验的一种推广。该检验的思路是用多年收集的数据,分别计算各季节(或月份)的Mann-Kendall检验统计量 S 及其方差 $\text{Var}(S)$,再把各季节统计量相加,计算总统计量。如果季节数和年数足够大,可通过总统计量与标准正态表之间的比较来进行统计显著性趋势检验^[9-10]。

季节性肯达尔检验法原理是将每断面历年相同月或同一时期的水质资料进行比较,如果后面的值(时间上)高于前面的值,记为“+”号,低于则记作“-”号。如果“+”的个数比“-”多,则判为上升趋势;如果“-”个数比“+”多,则判为下降趋势;如果“+”、“-”的个数分别为50%,则判为无趋势。其适用于数据值有随季节性规律变化的多年趋势分析,该方法分析计算公式如下:季节性肯达尔检验的零假设 H_0 为随机变量,与时间独立,假定全年12个月的水质资料具有相同的概率分布。

设有 n 年 p 月的水质资料序列 X 为:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{np} \end{bmatrix}$$

式中: X_{11}, \dots, X_{np} 为月水质浓度监测值。

(1) 对于 p 月中第 i 月($i \leq p$)的情况

令第 i 月历年水质系列相比较(后面的数与前面的数之差)的正负号之和 S_i 为

$$S_i = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n G(x_{ij} - x_{ik}) \quad (1 \leq k < j \leq n) \quad (1)$$

$$G(x_{ij} - x_{ik}) = \begin{cases} 1 & x_{ij} - x_{ik} > 0 \\ 0 & x_{ij} - x_{ik} = 0 \\ -1 & x_{ij} - x_{ik} < 0 \end{cases}$$

第 i 月内可以作比较的差值数据组个数 m_i 为

$$m_i = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n |G(x_{ij} - x_{ik})| = \frac{n_i(n_i - 1)}{2} \quad (2)$$

式中: n_i 为第 i 月内水质系列中非漏测值个数。

在零假设下,随机系列 S_i ($i = 1, 2, \dots, p$)近似地服从正态分布,则 S_i 的均值和方差如下:

均值: $E(S_i) = 0$

方差: $\sigma_1^2 = \text{Var}(S_i) = n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)/18$

当 n_i 个非漏测值中有 y 个数相同,则

$$\begin{aligned} \sigma_1^2 &= \text{Var}(S_i) \\ &= \sum_{i=1}^n (n_i - 1)(2n_i + 5)/18 - \\ &\quad \sum y(y - 1)(2y + 5)/18 \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 对于 p 月总体情况

$$\text{令 } S = \sum_{i=1}^p S_i, \quad m = \sum_{i=1}^p m_i$$

在零假设下, p 月的均值和方差为

$$\text{均值: } E(S_i) = \sum_{i=1}^p S_i = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, p)$$

$$\text{方差: } \sigma^2 = \text{Var}(S_i) = \sum_{i=1}^p \sigma_i^2 + \sum \sigma_{ik}$$

$$= \sum_{i=1}^p \text{Var}(S_i) + \sum_{i=1}^p \sum_{i=k}^p \text{Cov}(S_i, S_k) \quad (4)$$

式中: S_i 和 S_k ($i \neq h$)都是独立随机变量的函数,即 $S_i = f(X_i)$, $S_h = f(X_h)$,其中 X_i 为 i 月历年的水质序列, X_h 为 h 月历年的水质序列,并且 $X_i \cap X_h = \phi$ 。

因为 X_i 和 X_h 分别来自 i 月和 h 月的水质资料,并且总体时间序列 X 的所有元素是独立的,故协方差 $\text{Cov}(S_i, S_h) = 0$ 。将其代入式(4),得

$$\text{Var}(S_i) = \sum_{i=1}^p \frac{n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)}{18}$$

当 n 年水质系列有 y 个数相同时,同样有

$$\begin{aligned} \text{Var}(S_i) &= \sum_{i=1}^p \frac{n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)}{18} - \\ &\quad \frac{\sum y(y - 1)(2y + 5)}{18} \end{aligned}$$

当 $n \geq 10$ 时, S 服从正态分布, 且标准方差 Z 为

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

(3) 趋势检验

Kendall 检验计量 t 定义为: $t = \frac{S}{m}$, 由此在双尾

趋势检验中, 如果 $|z| \leq z_{\alpha/2}$, 则接受零假设。这里 $F_N(Z_{\alpha/2} = \alpha/2)$, F_N 为标准正态分布函数, 即:

$$F_N = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{|z|}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$$

α 为趋势检验的显著水平, 其值为:

$$\alpha = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{|z|}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$$

取显著性水平 α 为 0.1 和 0.01, 即当 $\alpha \leq 0.01$ 时, 说明检验具有高度显著性水平, 当 $0.01 < \alpha \leq 0.1$ 时, 说明检验是显著的。

在 α 计算结果满足上述两条件情况下, 当 t 为正时, 则说明具有显著(或高度显著性)上升趋势; 当 t 为负时, 则说明具有显著(或高度显著性)下降趋势; 当 t 为零时, 则无趋势。

3 水质变化趋势

经过计算, 南水北调东线江苏段各控断面水质变化趋势分析结果见表 1。

表 1 南水北调东线江苏段水质变化趋势分析结果

河流等级	河流	断面名称	DO	COD _{Mn}	BOD ₅	NH ₃ -N	石油类	挥发酚
干流	新通扬运河	江都西闸	↑	↓	↓	↓	↓	↓
		入江水道	↓	↓	↑	↓	↑	↓
	里运河	五叉河口	↑↑	↓↓	↓↓	↓	↑	↓
	里运河	马陵翻水站	↓↓	↓↓	↑↑	↓↓	↑	↓
	中运河	张楼	↑	↓↓	↓	↑	↑	↓
	不牢河	蔺家坝	↑↑	↓	↓	↓↓	↓	↓
	支流	复新河	沙庄桥	↑	↓	↑↑	↑	↑↑
沿河		李集桥	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓	↑
房亭河		单集桥	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓
徐沙河		沙集西闸	↑	↓	↓↓	↓	↓	↑
淮河		老山乡	↑	↓	↓	↓	↑	↓
新通扬运河		泰西	↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓	↓↓
北澄子河		三垛西	↑	↓	↑↑	↓	↓↓	↓↓
老汴河		临淮乡	↑	↓	↓↓	↑↑	↓↓	↓

注: “↑”显著上升趋势; “↑↑”高度显著上升趋势; “↓”显著下降趋势; “↓↓”高度显著下降趋势。

3.1 按污染物种类分析

(1) 溶解氧 (DO)。溶解氧在 14 个断面中, 12 个断面呈上升趋势, 占 85.7%; 2 个断面呈下降趋势, 占 14.3%, 上升趋势断面多于下降趋势断面, DO 质量呈变好趋势。

(2) 高锰酸盐指数 (COD_{Mn})。高锰酸盐指数在 14 个断面中, 14 个断面均呈下降趋势, 其中 6 个断面呈现显著下降趋势, COD_{Mn} 质量呈变好趋势。

(3) 五日生化需氧量 (BOD₅)。五日生化需氧量在 14 个断面中, 9 个断面呈下降趋势, 占 64.3%; 5 个断面呈上升趋势, 占 35.7%, 上升趋势断面小于下降趋势断面, BOD₅ 质量呈变好趋势。

(4) 氨氮 (NH₃-N)。氨氮在 14 个断面中, 11 个断面呈下降趋势, 占 78.6%; 3 个断面呈上升趋势,

占 21.4%, 上升趋势断面小于下降趋势断面, 氨氮质量呈变好趋势。

(5) 石油类。石油类在 14 个断面中, 8 个断面呈下降趋势, 占 57.1%; 6 个断面呈上升趋势, 占 42.9%, 上升趋势断面小于下降趋势断面, 石油类质量呈变好趋势。

(6) 挥发酚。挥发酚在 14 个断面中, 12 个断面呈上升趋势, 占 85.7%; 2 个断面呈下降趋势, 占 14.3%, 上升趋势断面多于下降趋势断面, 挥发酚质量呈变好趋势。

2001 年以来, 南水北调东线江苏段输水干线污染指标 COD_{Mn}、BOD₅、NH₃-N、石油类和挥发酚, 呈上升趋势断面小于下降趋势断面; DO 指标呈上升趋势断面多于呈下降趋势断面。因此, 南水北调东

线江苏段水资源质量总体状况呈好转趋势。

3.2 按河流级别分析

南水北调东线江苏段共 14 个水质控断面,其中 6 个断面位于输水干线,8 个断面位于输水干线周边

支流,由表 1 可分析得到输水干线和支流水质变化趋势,具体见表 2。由表 2 可见,输水干线水质除石油类外水质全面变好,支流 6 项评价指标均呈变好趋势。

表 2 南水北调东线江苏段输水干线及支流水质变化趋势结果表

河流级别	DO	COD _{Mn}		BOD ₅		NH ₃ -N		石油类		挥发酚		
输水干线	上升趋势	66.7	上升趋势	0	上升趋势	33.3	上升趋势	16.7	上升趋势	66.7	上升趋势	0
	下降趋势	33.3	下降趋势	100	下降趋势	66.7	下降趋势	83.3	下降趋势	33.3	下降趋势	100
变化情况	+		+		+		+		-		+	
支流	上升趋势	100	上升趋势	0	上升趋势	25	上升趋势	25	上升趋势	25	上升趋势	25
	下降趋势	0	下降趋势	100	下降趋势	75	下降趋势	75	下降趋势	75	下降趋势	75
变化情况	+		+		+		+		+		+	

注:“+”水质变好;“-”水质变差。

3.3 按行政区域分析

南水北调东线江苏段横跨扬州、泰州、淮安、宿迁和徐州 5 个行政区域,研究区域内有 14 个控制断面,其中扬州 2 个、泰州 1 个、淮安 3 个、宿迁 2 个和徐州 6 个。针对每个行政区域分析其水质变化情况,具体结果见表 3。由表 3 可见,各行政区域水质大部分呈变好趋势,除扬州段 BOD₅、淮安段石油类、宿迁段溶解氧和 COD_{Mn}水质变差。

表 3 南水北调东线江苏段各行政区域水质变化趋势结果表

行政单位	DO	COD _{Mn}	BOD ₅	NH ₃ -N	石油类	挥发酚
扬州	+	+	-	+	+	+
泰州	+	+	+	+	+	+
淮安	+	+	+	+	-	+
宿迁	-	-	+	+	+	+
徐州	+	+	+	+	+	+

注:“+”水质变好或无明显趋势;“-”水质变差。

4 结 语

为全面掌握南水北调东线江苏段地表水资源质量状况,分析研究区域内水质变化趋势,及时了解输水水质变化动态。本文采用季节性肯达尔检验法,对 2001-2012 年南水北调东线江苏段研究区域内水质变化趋势进行了分析检验,并从污染物类型、河流级别和行政区域 3 个方面对水质变化结果进行进一步分析比较。结果表明:①按污染物种类分,2001-2012 年,南水北调东线江苏段研究区域内 6 项水质评价指标均呈变好趋势。②按河流级别分,支流水质均呈变好趋势,输水干线水质除石油类指标趋势变差,其中变差断面占干流总断面 66.7%,其它

均呈变好趋势。③按行政单位分,扬州段 BOD₅、淮安段石油类、宿迁段溶解氧和 COD_{Mn}水质变差外,各段其他指标均呈变好趋势。可见,通过治污工程的实施,南水北调东线江苏段水质大部分呈变好趋势,但部分河段的污染物质仍需进一步控制。

参考文献:

- [1] 李红艳. 南水北调东线国家水权初始分配研究[J]. 人民黄河,2008,30(3):12-14.
- [2] 汪 斌,程绪水. 治污先行 建设南水北调东线清水廊道[J]. 水资源保护,2002,18(1):15-17,22.
- [3] 刘玉年,万 一,徐亚东. 南水北调东线一期工程水质分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(3):264-268.
- [4] 顾 颖,颜志俊,彭岳津. 南水北调东线工程水量调度仿真研究[J]. 南水北调与水利科技,2008,6(1):73-76.
- [5] 张树麟,王会容,朱乾德. 南水北调东线江苏段水污染防治成效研究[C]//. 2011 中国环境科学学会学术年会论文集(第一卷). 中国环境科学学会,2011. 5.
- [6] 王志明,吴文强,李双喜,何新宝. 肯达尔检验方法在干旱区河流水质趋势分析中的应用[J]. 石河子大学学报,2005,23(4):510-512.
- [7] 吴 师,高嵩嵘. 安徽省地表水水质变化趋势分析[J]. 水资源保护,2006,22(5):74-76,83.
- [8] 时志敏,苏慧艳. 基于季节性 Kendall 法的大凌河朝阳段水质趋势分析[J]. 地下水,2009,31(3):88+101.
- [9] 李怡庭,翁建华. 黄河干流重点河段水质变化趋势分析及水质管理对策探讨[J]. 水文,2003,23(5):16-19.
- [10] 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,2004,20(3):86-88.