

东江中上游主要控制断面水质变化特征*

江涛, 张晓磊, 陈晓宏, 林凯荣

(中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275)

摘要: 根据2001–2007年东江干流中上游博罗站、河源站和龙川站的监测资料, 采用季节性Kendall检验方法, 对COD_{Mn}、BOD₅和NH₃-N等水质参数的浓度变化趋势进行分析, 结果表明: (1)3个断面的BOD₅浓度都呈高度显著上升趋势; (2)龙川断面COD_{Mn}和NH₃-N的浓度变化不显著, 而河源和博罗断面COD_{Mn}的浓度呈显著下降趋势、NH₃-N浓度呈显著上升趋势; (3)中游主要控制断面水质变化速率大于上游; (4)水质变化受流量的影响相对较小, 主要是由陆域污染物排放量的变化所引起的。

关键词: 季节性Kendall检验法; 水质变化; 东江

The characteristics of water quality change for the main control sections in the middle and upper reaches of East River

JIANG Tao, ZHANG Xiaolei, CHEN Xiaohong & LIN Kairong

(School of Geographical Science and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, P.R.China)

Abstract: Changes of the concentrations of COD_{Mn}, BOD₅ and NH₃-N from main sections of the middle and upper reaches of East River were identified, by using the method of seasonal Kendall test for water quality data from Longchuan, Heyuan and Boluo monitoring stations during 2001–2007. The results suggest that: (1) the concentrations of BOD₅ increase significantly at all stations; (2) the concentrations of COD_{Mn} and NH₃-N do not display a significant trend at Longchuan control section, and the concentrations of COD_{Mn} showed a decreasing trend and NH₃-N showed an increasing trend at both Heyuan and Boluo control sections; (3) change in the rate of water quality from the middle reaches is larger than that from the upper reaches; (4) the water quality change is mainly influenced by the change of waste discharge.

Keywords: Seasonal Kendall test; water quality change; East River

对河流水质变化的研究, 一直是众多学者所关注的问题, 相关的文献也比较多^[1-4]。目前常用的方法是对单项污染指标采用简单直观的图解法、基于参数检验的回归分析法以及非参数检验方法进行水质变化趋势研究。本文选取东江中上游河段主要控制站点的水质、水量监测资料, 采用季节性Kendall检验法对COD_{Mn}、BOD₅和NH₃-N的变化趋势进行分析。

东江是珠江流域三大水系之一, 发源于江西省寻乌县桫髀钵, 干流长度至石龙为 520km, 石龙以上流域总面积 27040km², 其中广东省境内 23540km², 占 87.06%。东江是河源、惠州、东莞、广州等沿岸城市主要生产、生活水源地, 同时通过跨流域调水供应深圳和香港地区的用水, 供水人口 3000 余万。随着东江流域经济的高速发展、城镇化速度加快, 东江水资源开发利用表现出明显的南方季节性缺水和水质性缺水特征^[5]。因此, 对东江干流水质的变化特征进行分析, 对东江流域水质保护和水资源管理具有重要的意义。

1 数据来源与分析方法

1.1 数据来源

龙川站、河源站和博罗站是广东省水环境监测中心东江流域水质控制站网中的重要监测站点(图 1),

* 国家自然科学基金重点项目(50839005)和国家自然科学基金项目(50809078)联合资助。2009-01-06收稿; 2009-03-13收修改稿。江涛, 女, 1965年生, 博士, 副教授; E-mail: eesjt@mail.sysu.edu.cn.

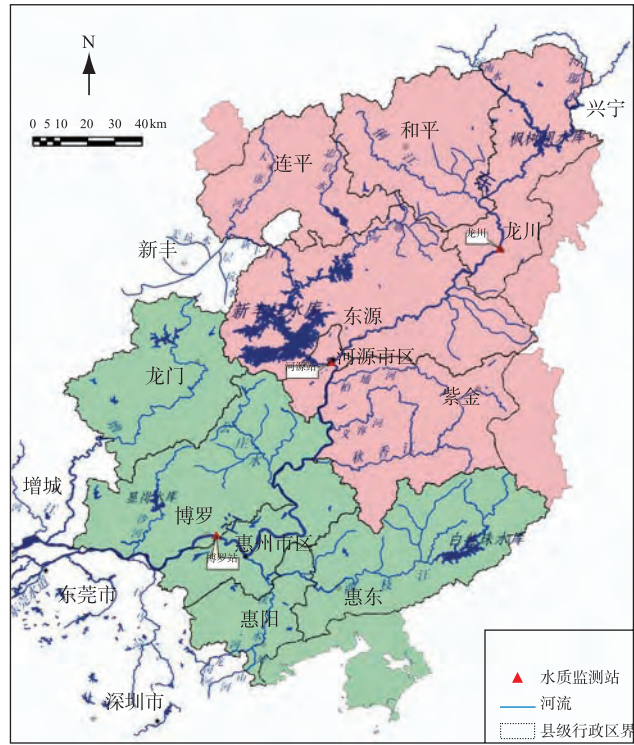


图1 水质监测站点位置

Fig.1 Location of water quality monitoring stations

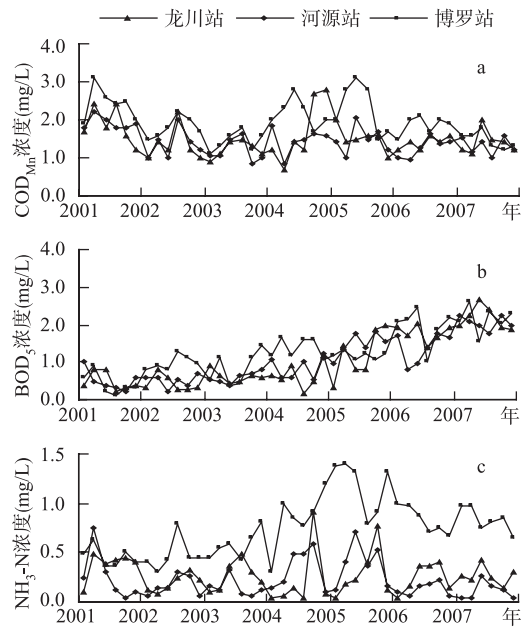


图2 水质监测站点污染物浓度监测序列: COD_{Mn}(a); BOD₅(b); NH₃-N(c)

Fig.2 The pollutant concentration data of the water quality monitoring stations: COD_{Mn}(a); BOD₅(b); NH₃-N(c)

监测项目为《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)24项基本项目, 龙川站和河源站的平均监测频次为6次/a、博罗站的监测频次为12次/a. 龙川站控制面积为7699km²、河源站控制面积为15750km²、博罗站控制面积为25325km². 鉴于目前东江水质的污染特点, 本文选取2001-2007年各站点COD_{Mn}、BOD₅和NH₃-N等水质参数的浓度监测序列(图2)进行研究分析.

1.2 分析方法

由于影响水质的因素复杂和非正态分布等原因, 本文选取属非参数检验方法的季节性Kendall检验法进行水质变化特征分析. 季节性Kendall检验是Mann-Kendall检验的一种推广, 它首先由Hirsch等^[6]于1982年提出. 对于季节性肯达尔检验来说, 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. 则设有 n 年 P 月的水质观测资料序列 x_{ij} , 对于 P 月中第 i ($i < P$)月的情况. 令第 i 月历年水质序列值相比较(后面的数与前面的数之差)的正负号之和 s_i 为:

$$s_i = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_{ij} - x_{ik}), \quad (1 \leq k < j) \quad (1)$$

由此, 第 i 月内可作比较的差值数据组个数 m_i 为:

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

式中, n_i 为第 i 月内水质序列中非漏测值个数.

在零假设下, 随机序列 S_i ($i=1, 2, \dots, P$)近似地服从正态分布, 则 S_i 的均值和方差分别为:

$$E(S_i)=0, \quad \delta_i^2 = \text{Var}(s_i) = \frac{1}{18} [n_i(n_i-1)(2n_i+5)]$$

对于 n 年 P 月的总体情况, 令 $s = \sum_{i=1}^P s_i$, $m = \sum_{i=1}^P m_i$, 在零假设下, P 月 S 的均值为 $E(s) = \sum_{i=1}^P E(s_i) = 0$,

方差为 $\delta^2 = \text{Var}(s) = \sum_{i=1}^P \frac{n_i(n_i-1)(2n_i+5)}{18}$. Kendall发现, 当 $n > 10$ 时, S 也服从正态分布, 并且标准方差 Z 为:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, & \text{当 } s > 0 \\ 0, & \text{当 } s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, & \text{当 } s < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Kendall检验统计量 τ 定义为: $\tau = S/m$. 由此, 在双尾趋势检验中, 对于给定的趋势检验显著性水平 α , 如果 $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$, 则接受零假设. 这里 $\Phi(Z_{\alpha/2}) = \alpha/2$, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数. 通常取显著性水平 α 为0.1和0.01, 当 $\alpha \leq 0.01$ 时, $|Z| > 2.567$, 说明检验具有高度显著性水平; 当 $0.01 < \alpha \leq 0.1$ 时, $1.645 < |Z| < 2.567$, 说明检验是显著的. 在 α 计算结果满足上述二条件情况下, 如果 τ 为正, 则表明水质序列具有显著或高度显著上升趋势; 若 τ 为负时, 说明水质序列趋势是下降的; 当 τ 为零时, 表明无趋势.

检验出水质升、降趋势后还要进行肯达尔斜率 r 估计, 对水质变化趋势的大小给出定量的分析. 斜率 $|r|$ 越大, 反映年平均上升或下降的幅度越大. 此外, 为了判断水质趋势是由河流流量的因素造成的, 还是由污染源的变化引起, 还需进行流量调节浓度的检验, 即通过对河流流量 Q 与污染物浓度相关的残差分析来判断流量对污染物浓度影响的程度, 具体的计算方法在此不再赘述, 可参考相关文献^[7-9]. 本文直接采用美国地质调查局(USGS)开发的季节性Kendall检验程序进行检验.

2 结果

2.1 水质变化趋势

根据水质监测数据, 2007年东江干流中上游河段主要控制断面水质整体状况良好, 龙川站和河源站各项水质参数的浓度值均小于《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)II类标准限值, 博罗站均小于III类标准限值. 对2001-2007年龙川站、河源站和博罗站的COD_{Mn}、BOD₅和NH₃-N等参数的浓度监测序列

进行季节性 Kendall 检验, 检验结果见表 1.

表 1 季节性 Kendall 检验结果
Tab.1 The results of seasonal Kendall test

站点	项目	Z	r	趋势
龙川站	COD _{Mn}	0.253	0.001	不显著
	BOD ₅	3.974	0.290	高度显著上升
	NH ₃ -N	0.247	0.001	不显著
河源站	COD _{Mn}	-2.355	-0.017	显著下降
	BOD ₅	5.972	0.293	高度显著上升
	NH ₃ -N	2.035	0.002	显著上升
博罗站	COD _{Mn}	-2.471	-0.033	显著下降
	BOD ₅	7.177	0.328	高度显著上升
	NH ₃ -N	4.257	0.060	高度显著上升

东江中上游河段水质有如下变化特点(表 1):

(1)中上游主要控制断面水质都呈下降的趋势, 且中游博罗站控制断面水质变差的趋势更显著. 龙川站 BOD₅ 浓度呈高度显著上升趋势, COD_{Mn} 和 NH₃-N 浓度变化趋势不显著; 河源站和博罗站的 COD_{Mn} 浓度均呈显著下降趋势, BOD₅ 浓度呈高度显著上升趋势, NH₃-N 浓度分别呈显著和高度显著上升趋势. 与上游龙川站和河源站相比, 博罗站水质下降的趋势更显著.

(2)中上游主要控制断面各参数浓度的变化速率 r 不同, 博罗站的变化速率最大, 河源站次之, 龙川站最小; 在受检验的 3 个参数中, BOD₅ 的浓度上升速率最快, 平均每年上升 0.30mg/L 左右; 龙川站 COD_{Mn} 和 NH₃-N 的浓度变化速率较小, 为每年 0.001mg/L; 河源站、博罗站 COD_{Mn} 浓度年平均下降速率分别为 0.017mg/L、0.033mg/L, 但博罗站氨氮浓度的上升速率远大于河源站, 博罗站氨氮年平均上升 0.060mg/L, 而河源站年平均只上升 0.002mg/L.

2.2 流量调节浓度结果

河流水质受流域内的土壤、植被、地质成分及化学性质、降雨、径流以及人类活动等多方面的影响, 但对于南方流域来说, 河流水质变化的主要驱动因素是河道废污水的排放和径流的变化^[10]. 为了判断水质变化与流量的关系, 需进行季节性 Kendall 流量调节浓度检验, 检验结果见表 2, 其中 R^2 为反映流量和污染物浓度相关关系的参数. 并点绘出污染物浓度和流量 Q 之间的关系图(图 3, 图 4). 因龙川站流量资料不全, 本文只对河源和博罗两监测站的指标进行流量调节浓度检验.

各单项指标的流量调节浓度的残差序列显示出与实测数据一致的变化趋势, 说明流量不是引起水质变化趋势的主要原因, 而主要是由污染源变化所致(表 2). 河源站和博罗站 COD_{Mn} 的流量调节浓度呈显著下降趋势, 表明来源有所减少; BOD₅ 和 NH₃-N 的流量调节浓度均呈显著或高度显著上升趋势, 故其来源有所增加. 一般来说, 若河流水质污染主要来自点源, 则河水流量增加时, 由于稀释自净作用增强, 河水中污染物的浓度应降低. 根据河源、博罗站水量、水质同步资料, 点绘出污染物浓度和流量之间的关系图. 两站点污染物的浓度与流量的关系基本不符合上述规律, 说明水质变化来自点源和面源的综合作用(图 3, 图 4).

表 2 季节性 Kendall 流量调节浓度检验结果
Tab.2 The seasonal Kendall test results of the flow-adjusted concentrations

站点	项目	Z	R^2	趋势
河源站	COD _{Mn}	-1.652	-0.125	显著下降
	BOD ₅	4.986	0.525	高度显著上升
	NH ₃ -N	1.713	0.250	显著上升
博罗站	COD _{Mn}	-1.834	-0.175	显著下降
	BOD ₅	6.932	0.550	高度显著上升
	NH ₃ -N	4.517	0.425	高度显著上升

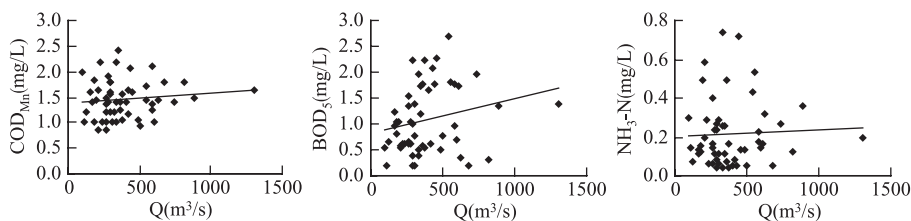


图 3 河源站污染物浓度与流量关系

Fig.3 The relationships between pollutant concentration and flow in Heyuan station

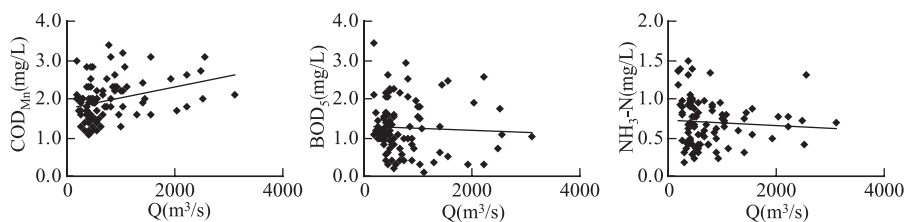


图 4 博罗站污染物浓度与流量关系

Fig.4 The relationships between pollutant concentration and flow in Boluo station

3 讨论

2001-2007 年东江流域中上游地区经济社会发展迅速, 废污水排放量也相应增加(图 5)。河源市和惠州市的 GDP 分别以每年 22.7%、15% 的速度递增, 2007 年达到 332.34 亿元、1104.98 亿元; 相应地, 污水排放量以每年 17.19%、14.33% 的速度递增, 2007 年河源市为 4.56×10^8 t、惠州市达到 5.36×10^8 t。一般来说, 随着废污水排放量的增加, 污染物排放量也应增加。但由于 COD 是我国污染物排放总量控制的主要指标, 通过全面开展“一控双达标”、城市环境综合整治和创建国家环保模范城市等活动, 点污染源的 COD 排放量呈下降趋势。根据广东省环境统计资料, “十五”期间, 东江上游河源市 COD 排放量平均每年递减 7.9%, 2005 年为 1.9×10^4 t; 中游惠州市平均每年递减 13.2%, 2005 年为 1.7×10^4 t。COD 排放量的减少应该是导致博罗站、河源站 COD 浓度呈下降趋势的主要原因。根据河源市统计年鉴, 龙川站上游的和平县和龙川县在“十五”期间, 社会经济发展迅速, 2001 年两县生产总值 33.76 亿元, 到 2005 年两县生产总值 67.01 亿元, 年均增长率为 18.7%, 人口增长也较快, 2001 年两县常住人口 97.16 万人, 到 2005 年达到 106 万人, 年均增长率 2.2%, 而工业废水达标排放率只有 80% 左右, 城镇生活污水处理率为零, 大量废污水未经处理就直接排放, 这应该是导致龙川站水质呈下降趋势的原因之一。

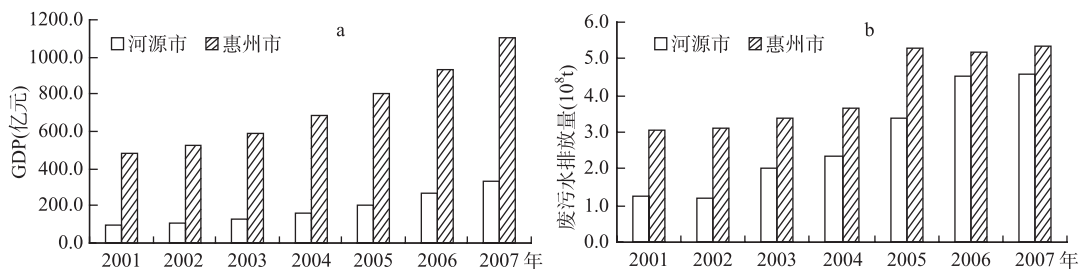


图 5 2001-2007 年东江中上游地区生产总值(a) ①和废污水排放量(b) ②

Fig.5 GDP(a) and waste discharge(b) of the upper-middle region in Dongjiang basin from 2001 to 2007

① 2000-2008 年《河源市统计年鉴》, 《惠州市统计年鉴》。

② 2001-2007 年《广东省水资源公报》。

随着点源污染逐步得到有效控制, 面源对水体污染的贡献不断增加. 根据文献[11]提出的面源污染总量的估算方法, 可以估算出河源站 2001 年点源与面源的污染物通量比 COD 为 53:47、NH₃-N 为 60:40、BOD₅ 为 70:30, 2007 年点源与面源的污染物通量比变为 COD 为 44:56、NH₃-N 为 35:65、BOD₅ 为 44:56. 东江中上游地区是广东省的主要农业生产区, 为促进农业增效增收, 流域内化肥农药施用量不断增加. 根据各市统计年鉴, 2006 年河源市农药、化肥施用量分别为 2684t、60317t, 农田化肥平均施用量为 583kg/hm², 2001-2006 年期间农药化肥施用量平均每年递增 2.4%; 2007 年惠州市农药、化肥施用量分别为 5398t、83521t, 化肥平均施用量达 818kg/hm², 2001-2007 年期间农药化肥施用量平均每年递增 1.4%. 在汛期, 虽然降雨产生径流加强了对污染物的稀释作用, 但伴随降雨径流, 通过淋溶、冲刷作用将流域地表的污染物如农田里的农药、化肥、动植物残体及土壤中的 N、P 等营养物质带入河流中, 使水体中污染物的含量相对增加. 面源污染, 尤其是农药化肥施用量的不断增加也是引起河水中污染物浓度变化的重要原因之一.

对下游博罗站来说, 其水质呈下降趋势的另一个原因是受区间淡水河污染的影响. 淡水河位于东江中上游, 是西枝江的一级支流, 东江的二级支流, 由发源于深圳的三大支流——横岭水、龙岗水、坪山水汇合而成, 在惠州市惠阳区境内汇入西枝江而流入东江. 淡水河跨深圳、惠州两市, 其中 77% 的流域面积由深圳市管辖. 根据相关文献^[12], 由于深圳上游大量未经处理的工业生活废水直接排放造成淡水河水质严重污染, NH₃-N、BOD₅ 指标常年为劣 V 类; 西枝江下游受淡水河的污染及两岸废水的排放, 水质受轻、中度污染, 为 IV-V 类水质, 主要污染指标为 COD_{Mn}、BOD₅ 和 NH₃-N, 支流的水质污染因而也影响了东江干流的水质.

4 结论

东江中上游水质状况总体良好. 但近几年来, 随着东江中上游地区经济的快速发展, 中上游主要控制断面水质总体呈下降的趋势. 上游龙川站 BOD₅ 呈上升趋势, COD_{Mn} 和 NH₃-N 变化趋势不显著; 河源和博罗站的 NH₃-N 和 BOD₅ 呈上升趋势, 而 COD_{Mn} 呈下降趋势; 总体来看, 中游主要控制断面水质下降的趋势更显著、速率更大, 且 3 项检验指标中 BOD₅ 的上升速率最大. 导致水质变化的主要原因是点源和面源污染物排放量的变化, 受流量影响相对较小. 因此, 为稳定东江的良好水质, 保障饮水安全, 一是要加强点源和面源的综合治理, 尤其是对农药、化肥使用的控制, 同时加快城镇生活污水处理设施建设; 二是强化用水定额管理, 促进节约用水, 减少废污水排放量.

5 参考文献

- [1] 张勇, 王云, 叶文虎. 上海市地表水水质近20年的变化. 环境科学学报, 2002, 22(2): 247-251.
- [2] 史一鸣, 吕军. 曹娥江干流水质有机污染时空变异分析和可生化性研究. 水土保持学报, 2006, 20(4): 143-147.
- [3] 陈咏淑, 吴甫成, 吕焕哲等. 近20年来湘江水质变化分析. 长江流域资源与环境, 2004, 13(5): 508-512.
- [4] 李波, 濮培民. 淮河流域及洪泽湖水质的演变趋势分析. 长江流域资源与环境, 2003, 12(1): 67-73.
- [5] 刘丙军, 陈晓宏, 张灵等. 中国南方季节性缺水地区水资源合理配置研究. 水利学报, 2007, 38(6): 732-733.
- [6] Hirsch RM, Slack JR, Smith RA. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 1982, 18: 107-121.
- [7] Hirsch RM, Slack JR. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 1984, 20(6): 727-732.
- [8] 彭文启, 张祥伟. 现代水环境质量评价理论与方法. 北京: 化学工业出版社, 2005: 151-159.
- [9] 杨建波, 张炎斋. 季节性肯达尔检验法在淮河流域水质趋势分析中的应用. 水文, 1991, 5: 44-47.
- [10] 王浩, 陈敏建, 唐克旺. 水生态环境价值和保护对策. 北京: 清华大学出版社, 北京大学出版社, 2004: 62.
- [11] 王明海. 面源污染对河流水质影响的分析与估算. 人民黄河, 1993, 4: 7-9.
- [12] 林振雄, 李鹏书. 淡水河污染及入河排污口对西枝江河水质的影响分析. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(增刊2): 403-406.