

# 基于非参数检验的水质变化趋势分析

陈耿,刘雷璐,李瑞瑜,张苒

(广东省生态环境监测中心,广东 广州 510308)

**摘要:**综合应用 Mann-Kendall(M-K)、季节性 Kendall(S-K)非参数检验方法和局部加权回归散点平滑法(LOWESS)分析东江流域长时间尺度(16 a)和短时间尺度(5 a)水质变化趋势,解析流量与点面源污染对水质指标变化的贡献。结果表明:东江干流 DO 呈明显下降趋势,TN 呈明显上升趋势;二级支流淡水河整治成效显著,水质呈明显改善趋势。流域中上游水体耗氧有机物相对稳定且水平较低,而下游存在较大量耗氧有机物排放。S-K 检验有利于发现不同月份水情影响下的水质变化,检验出东江干流  $\text{NH}_3 - \text{N}$  呈明显下降趋势。M-K(LOWESS)模型有利于解析各水质指标受上游集雨区汇水过程和点面源污染影响情况。

**关键词:**水质;趋势分析;非参数检验;局部加权回归;东江

中图分类号:X522

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2021)05-0036-05

## Analysis of Water Quality Trends Based on Non-parametric Test

CHEN Geng, LIU Lei-lu, LI Rui-yu, ZHANG Ran

(Guangdong Ecological and Environmental Monitoring Center, Guangzhou, Guangdong 510308, China)

**Abstract:** Mann-Kendall test, seasonal Kendall non-parametric test and local weighted regression scatter smoothing method (LOWESS) were comprehensively applied to analyze the water quality variation trends of long time scale (16 a) and short time scale (5 a) in Dongjiang river basin, and the contribution of stream flow, point and non-point sources pollution to the change of water quality index. The results showed that dissolved oxygen in the main stream of Dongjiang river was obviously decreasing while total nitrogen was obviously increasing. The water quality of the secondary tributary Danshui river was obviously improved after regulation. In the middle and upper reaches of the basin, oxygen-consuming organics were relatively stable and in low level, but a large amount of oxygen-consuming organics were discharged into the lower reaches. Seasonal Kendall test was helpful to find out the water quality change by the hydrologic conditions in different months. It tested out that ammonia nitrogen in the main stream had a significant downward trend. Mann Kendall(LOWESS) model was helpful to analyze the water quality influenced by the catchment of upstream rainwater, and point and non-point sources pollution.

**Key words:** Water quality; Trend analysis; Non-parametric test; Local weighted regression; Dongjiang river

研究水体质量变化规律,发现主要污染问题是水环境管理的基础性工作<sup>[1]</sup>。水质数据受季节、流量、污染源强等复杂因素影响,呈现非正态性、季节差异性、数值缺失和低于检测限等特征,常规统计分析方法难以有效识别其内在变化规律<sup>[2]</sup>。Mann-Kendall(M-K)和季节性 Kendall(S-K)等非参数检验方法由于不受样本值、分布类型等影响,被广泛应用于水质变化趋势识别<sup>[3-5]</sup>。S-K 检验是在 M-K 检验基础上考虑了季节性变化,提高水

质变化趋势检验的准确性<sup>[6-7]</sup>。局部加权回归散点平滑法(LOWESS)迭代加权最小平方拟合数据,可根据数据变化的实际规律进行局部直线拟合或曲线拟合。虽然梁中耀等<sup>[8]</sup>和 Lamon 等<sup>[9]</sup>应用

收稿日期:2020-09-16;修订日期:2021-07-29

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项“东江水质风险监控技术集成与应用示范研究”基金资助项目(2014ZX07206-005-003-001)

作者简介:陈耿(1985—),男,广东汕头人,高级工程师,硕士,主要从事环境监测管理工作。

STL(Seasonal-Trend Decomposition using LOESS)模型,Johnson 等<sup>[10]</sup>应用 S-K(LOWESS)模型开展水质趋势分析,但 LOWESS 算法尚未被应用于解析流量和点面源污染对水质指标变化的贡献。综合应用上述方法验证复杂影响因素下的水质变化也尚未见报道。

今利用东江流域的水质自动和人工监测数据,建立一套考虑季节性和流量影响、可有效识别不同时间尺度流域水质变化趋势的方法。基于 M-K 检验方法分析 1999—2015 年东江流域长时间尺度水质变化趋势,基于 S-K 检验方法分析 2011—2015 年东江流域短时间尺度季节性水质变化趋势,再分别采用剔除流量变化影响的 M-K(LOWESS)和 S-K(LOWESS)模型探讨解析河流流量与点面源污染对水质指标变化的贡献,以期为流域水污染控制提供技术支持。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

研究区为广东省境内的东江流域(E113°52′~E115°52′, N22°38′~N25°14′),地处亚热带季风气候区,年平均气温 20℃~22℃,年降水量 1 753 mm,4—9 月降水量占全年 80%以上,降水分布为西南多、东北少。东江干流全长 562 km(广东省境内 435 km),流域面积 35 340 km<sup>2</sup>(广东省境内 31 840 km<sup>2</sup>),流域地势东北高、西南低。东江流域各市 2018 年常住人口 1 632 万人,GDP 为 13 388 亿元,主要产业包括电子、机械、纺织服装、家具、石化、化工、造纸等。工业、农业和生活污染源沿干流及支流分布,主要集中在中下游。

### 1.2 数据来源

今选取东江流域中下游 4 个建有自动监测站的省控断面,包括干流的河源临江(E114°31′46″, N23°22′18″),惠州剑潭(E114°20′17″, N23°08′53″)和东莞桥头(E114°07′13″, N23°02′51″)3 个断面,以及二级支流淡水河的惠州西湖村(E114°25′03″, N22°46′49″)断面开展研究。采用 1999—2015 年的人工监测数据(部分监测指标自 2003 年开始)和 2011—2015 年的自动监测数据分别研究长时间尺度和短时间尺度的水质变化趋势。人工监测断面采样频次为每月 1 次,水质自动监测频次为每日 8 次~12 次。监测指标为水温(T)、pH 值、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(I<sub>Mn</sub>)、五日生化

需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、化学需氧量(COD)、浊度(TD)、电导率(EC)等。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 非参数检验方法

M-K 检验优势在于对变量分布无特殊要求,对数据规整性要求较小,适用于气象、水文、水质时间序列趋势和突变分析;缺点是当数据系列中出现震荡时,需要结合置信区间分析来获取综合性观测时间序列非平稳的调查分析<sup>[11]</sup>。今采用美国地质调查局(USGS)开发的 M-K 检验程序,具体公式参见文献[4]。

S-K 检验是 M-K 检验的改进方法,优点在于不用考虑水质监测数据的大小,仅考虑数据的相对顺序,不要求水质数据必须遵从正态分布,检验数据有漏测值和未检出值也不影响检验方法的应用<sup>[12]</sup>。其零假设  $H_0$  为随机变量与时间独立,且全年 12 个月的水质资料具有相同的概率分布。具体公式参见文献[13]。

显著性检验,给定显著性水平  $\alpha$ ,从标准正态分布表获得  $Z_{1-\alpha/2}$ ,应用双尾趋势检验。标准方差为  $Z$ ,若  $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$ ,则无趋势;反之则有趋势存在。通常取显著性水平  $\alpha$  为 0.10 和 0.01。 $\alpha \leq 0.01$  或  $0.01 < \alpha \leq 0.10$  分别指示检验具有极显著或显著水平。

#### 1.3.2 局部加权回归散点平滑法(LOWESS)

LOWESS 是拟合难以用具体函数描述响应关系数据的有效方法。在水质趋势分析中,LOWESS 的突出优点是能抵抗拟合中由异常数据引起的偏差,且在建立数学模型时只需考虑水质参数值与时间的基本形式,而不需要任何假设<sup>[11]</sup>。今所用的剔除流量变化影响的 Mann-Kendall(LOWESS)模型是先通过局部平滑获取最佳的浓度-流量拟合关系,通过实测浓度与拟合浓度的残差序列 M-K 分析来识别剔除流量影响,即上游点面源污染贡献后的水质过程趋势,进而可为本底条件下的水质变化规律研究提供理论依据。具体方法参照 USGS 的 SIR 2005—5275 文件<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 东江流域水质变化情况

按《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和《地表水环境质量评价办法(试行)》评价,东江

干流 2011—2015 年水质持续优良 (I 类 ~ III 类), 大部分一级支流水质优良, 中下游部分支流水质呈污染状态 (IV 类 ~ 劣 V 类); 优良水质断面比例为 86.3% ~ 91.3%, 每年逐步提高, 2013 年重度污染 (劣 V 类) 水质断面比例最高, 占 13.0%, 其余 4 年为 8.7% ~ 9.1% (见图 1)。河源临江断面水质状况较稳定, 5 年的综合水质均为 II 类; 惠州剑潭断面水质类别在 II 类 ~ III 类之间波动, II 类水质比例呈上升趋势, 可 2015 年稍有回落; 东莞桥头断面水质类别在 II 类 ~ IV 类之间波动, II 类水质比例呈上升趋势, 可 2012 年和 2015 年出现了 IV 类水质; 惠州西湖村断面的水质最差, 5 年的综合水质均为劣 V 类。图 2(a) — (f) 为 1999—2015 年东江干流 3 个监测断面各水质指标质量浓度变化。其中, TP 和 TN 指标 2003 年开始监测。由图 2 可见, 1999 年以来, 惠州剑潭和东莞桥头的 DO 基本在 I 类 ~ II 类之间波动, 河源临江的 DO 在 2009 年以前为 I 类, 而后逐渐与惠州剑潭趋近; 河源临江和惠州剑潭的  $I_{Mn}$  在 2008 年以前个别年份略超 I 类, 而后均为 I 类, 东莞桥头从 2011 年以后由 I 类变为 II 类; 河源临江和东莞桥头的  $NH_3-N$  稳定在 II 类, 惠州剑潭部分年份为 III 类, 其余均为 II 类; 3 个断

面  $BOD_5$  均稳定在 I 类、II 类, TP 基本在 I、II 类间波动; 河源临江的 TN 在 2011 年以前较为稳定, 而后缓慢上升, 惠州剑潭的 TN 呈先上升后平缓, 2008—2012 年间有一段快速上升期, 东莞桥头的 TN 呈先升后降, 2007—2010 年出现快速上升, 而后又快速下降趋近于惠州剑潭。

2.2 长时间尺度 M-K 趋势分析

采用 M-K 检验对 4 个研究断面 1999—2015 年逐年人工监测数据进行趋势分析, 结果见表 1。由表 1 可知, 东江干流 3 个断面 DO 均呈极显著或

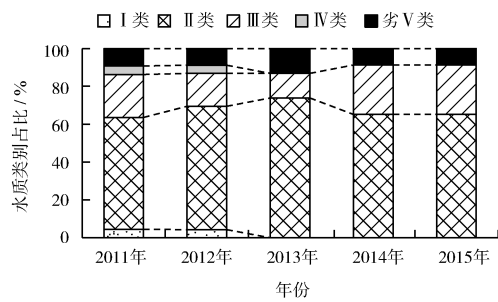


图 1 2011—2015 年东江流域断面水质类别占比  
Fig. 1 Proportion of water quality categories of Dongjiang river section from 2011 to 2015

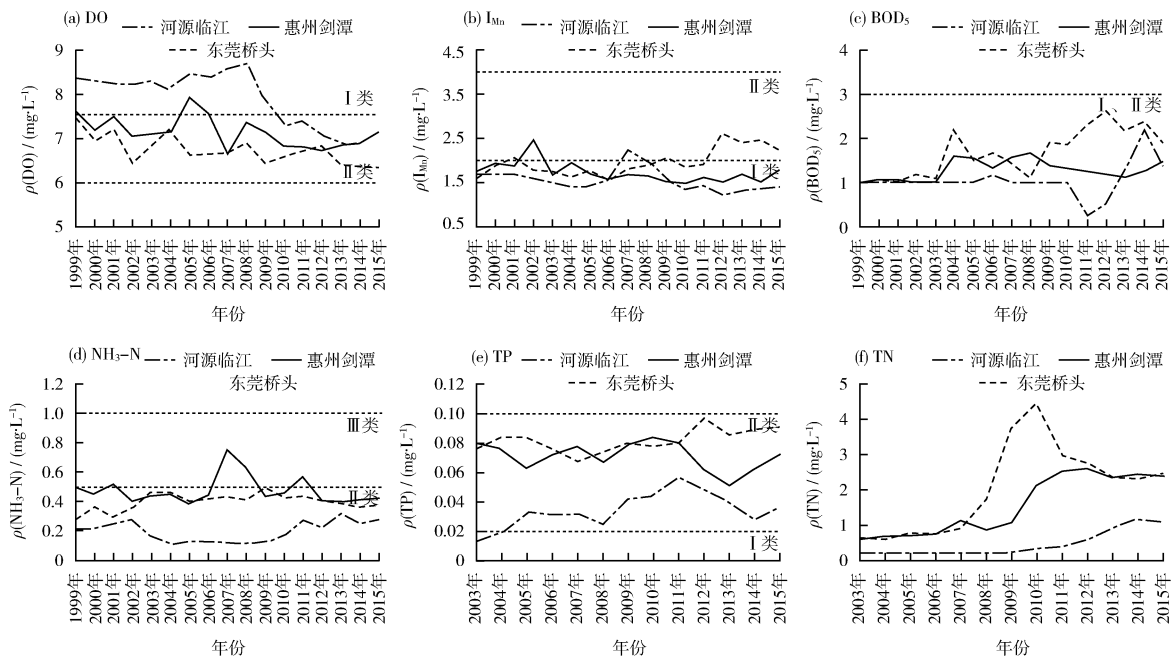


图 2 1999—2015 年东江干流 3 个监测断面各水质指标质量浓度变化  
Fig. 2 Change of concentration of each water quality index at 3 monitoring sections in the main stream of Dongjiang river from 1999 to 2015

表 1 M-K 检验和 S-K 检验趋势分析结果<sup>①</sup>  
Table 1 Trend analysis results by M-K test and S-K test<sup>①</sup>

检验方法	水质指标	河源临江			惠州剑潭			东莞桥头			惠州西湖村		
		Z	$\alpha$	趋势	Z	$\alpha$	趋势	Z	$\alpha$	趋势	Z	$\alpha$	趋势
M-K 检验	T	-1.032	0.302	-	1.033	0.302	-	1.242	0.214	-	0.991	0.322	-
	DO	-2.678	0.007	↓ *	-1.983	0.047	↓	-2.973	0.003	↓ *	2.842	0.005	↑ *
	I <sub>Mn</sub>	-2.556	0.011	↓	-2.313	0.021	↓	2.803	0.005	↑ *	-3.172	0.002	↓ *
	BOD <sub>5</sub>	1.068	0.286	-	0.953	0.341	-	3.425	0.001	↑ *	-0.495	0.620	-
	NH <sub>3</sub> -N	1.112	0.266	-	-1.030	0.303	-	0.453	0.651	-	-1.854	0.064	↓
	TP	1.834	0.067	↑	0.546	0.585	-	2.200	0.028	↑	-3.600	0	↓ *
	TN	2.989	0.003	↑ *	3.761	0	↑ *	2.257	0.024	↑	-3.355	0.001	↓ *
	COD	-1.677	0.104	-	1.100	0.271	-	3.233	0.001	↑ *	-3.497	0.001	↓ *
S-K 检验	T	-0.664	0.507	-	1.401	0.191	-	1.701	0.089	↑	2.990	0.003	↑ *
	TD	-2.491	0.013	↓	-2.728	0.177	-	-3.323	0.001	↓ *	-2.403	0.016	↓
	EC	-3.156	0.002	↓ *	-1.548	0.487	-	-1.909	0.056	↓	1.495	0.135	-
	DO	-1.750	0.080	↓	0	1	-	2.333	0.020	↓	3.322	0.001	↑ *
	I <sub>Mn</sub>	-1.171	0.242	-	3.205	0.061	↑	1.208	0.227	-	-1.495	0.135	-
	NH <sub>3</sub> -N	1.553	0.120	-	-3.503	0.054	↓	-4.619	0	↓ *	-4.083	0	↓ *
	TP	0.096	0.924	-	1.671	0.318	-	1.279	0.201	-	-3.583	0.003	↓ *
	TN	6.311	0	↑ *	2.580	0.205	-	2.894	0.004	↑ *			

①TP、TN、COD 为 2003—2015 年人工监测数据,其余水质指标为 1999—2015 年人工监测数据;变化趋势 \* 表示极显著变化, - 表示不显著变化(|Z| < 1.645 或  $\alpha > 0.1$ )。

显著下降趋势, TN 均呈极显著或显著上升趋势。河源临江和惠州剑潭的 I<sub>Mn</sub> 呈显著下降趋势, 而 BOD<sub>5</sub> 和 COD 呈不显著变化, 3 项指标基本在未检出和检出限水平附近波动, 说明水体中的快、中和低速耗氧有机物相对稳定且水平较低; 而下游的东莞桥头 I<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub> 和 COD 均呈极显著上升趋势, 说明剑潭—桥头约 30 km 的干流多年来耗氧有机物排放大量增加。吴佳宁等<sup>[6]</sup> 也发现, 东江下游 I<sub>Mn</sub> 有升高趋势。河源临江和东莞桥头 TP 呈显著上升趋势, 惠州剑潭 TP 呈不显著变化。总体来说, 近年来, 东江干流 N、P 污染负荷有所增加, 需要关注上游 N、P 的来源及影响因素。支流惠州西湖村断面 DO 呈极显著上升趋势, I<sub>Mn</sub>、TP、TN 和 COD 呈极显著下降趋势, NH<sub>3</sub>-N 呈显著下降趋势, BOD<sub>5</sub> 呈不显著变化。说明, 从长时间尺度上看, 惠州西湖村的水质状况呈改善趋势。

### 2.3 短时间尺度 S-K 趋势分析

采用 S-K 检验对研究断面 2011—2015 年逐月自动监测数据进行趋势分析, 结果见表 1。

由表 1 可知, 河源临江和东莞桥头的 TN 呈极显著上升趋势, DO 呈显著下降趋势, 与 M-K 检验趋势基本一致, 说明这两个断面的 DO、TN 年际对比和单月对比均有显著或极显著的变化趋势。此外, 还发现东莞桥头 NH<sub>3</sub>-N 呈极显著下降趋势,

说明考虑了不同月份水情影响可找出 M-K 难以发现的趋势。惠州剑潭的 DO 和 TN 均无显著变化, I<sub>Mn</sub> 呈显著上升, NH<sub>3</sub>-N 呈显著下降, 表现出与长时间尺度 M-K 检验不同的变化趋势。另外, 河源临江和东莞桥头的 TD 和 EC 呈显著或极显著下降趋势, 可以推断东江河源段和东莞段的流量 5 年间有所增加<sup>[15]</sup>。支流惠州西湖村断面 DO 呈极显著上升、TP 呈极显著下降, 与 M-K 检验趋势一致; NH<sub>3</sub>-N 呈极显著下降趋势, I<sub>Mn</sub> 呈不显著变化, 与 M-K 检验趋势不同。无论长时间或短时间尺度分析, 惠州西湖村水质改善效果明显。由此可见, 由于不同月份水情、分析时间跨度、采样频率等不同, S-K 检验与 M-K 检验的趋势分析结果存在一定差异。

### 2.4 剔除流量影响的 LOWESS 趋势分析

河段水质状况主要受流量和点面源污染两者共同影响。今收集了河源临江断面附近的河源水文站 2009—2015 年和惠州剑潭断面附近的博罗水文站 2011—2015 年的径流资料。为进一步分析水质变化规律, 解析流量与点面源对水质指标变化的贡献, 尝试使用剔除流量变化影响的 M-K (LOWESS) 和 S-K (LOWESS) 模型进行流量调节浓度检验, 并将检验结果分别与 M-K 和 S-K 的检验结果作比较, 见表 2 和表 3。

表2 M-K与M-K(LOWESS)趋势分析结果比较<sup>①</sup>Table 2 Comparison of M-K and M-K(LOWESS) trend analysis results<sup>①</sup>

水质指标	河源临江						惠州剑潭					
	M-K			M-K(LOWESS)			M-K			M-K(LOWESS)		
	Z	$\alpha$	趋势	Z	$\alpha$	趋势	Z	$\alpha$	趋势	Z	$\alpha$	趋势
T	-0.456	0.649	-	0	1.000	-	0	1.000	-	1.715	0.086	↑
DO	-1.802	0.072	↓	-0.901	0.368	-	1.715	0.086	↑	1.715	0.086	↑
I <sub>Mn</sub>	-0.300	0.764	-	0.601	0.548	-	0.505	0.613	-	1.225	0.221	-
BOD <sub>5</sub>	1.367	0.172	-	0.901	0.368	-	0.505	0.613	-	1.715	0.086	↑
NH <sub>3</sub> -N	1.802	0.072	↑	0.601	0.548	-	0	1.000	-	-0.735	0.462	-
TP	-1.202	0.230	-	-0.901	0.368	-	0	1.000	-	-1.715	0.086	↓
TN	2.703	0.007	↑*	2.103	0.036	↑	-0.735	0.462	-	-1.715	0.086	↓
COD	-0.300	0.764	-	0.300	0.764	-	0	1.000	-	0.245	0.807	-

①河源临江为2009—2015年人工监测数据,惠州剑潭为2011—2015年人工监测数据;变化趋势\*表示极显著变化,-表示不显著变化( $|Z| < 1.645$ 或 $\alpha > 0.1$ )。

表3 S-K与S-K(LOWESS)趋势分析结果比较<sup>①</sup>Table 3 Comparison of S-K and S-K(LOWESS) trend analysis results<sup>①</sup>

水质指标	河源临江		惠州剑潭	
	S-K趋势	S-K(LOWESS)趋势	S-K趋势	S-K(LOWESS)趋势
T	-	-	-	-
TD	↓	↓	-	-
EC	↓*	↓*	-	-
DO	↓	↓	-	-
I <sub>Mn</sub>	-	-	↑	↑
NH <sub>3</sub> -N	-	↑	↓	↓
TP	-	-	-	-
TN	↑*	↑*	-	-

①河源临江为2009—2015年自动监测数据,惠州剑潭为2011—2015年自动监测数据;变化趋势\*表示极显著变化,-表示不显著变化( $|Z| < 1.645$ 或 $\alpha > 0.1$ )。

由表2可知,M-K检验在流量调节浓度前后,趋势分析结果对比总体存在较大差异。河源临江的DO和NH<sub>3</sub>-N在流量调节前呈显著变化趋势,TN呈极显著上升趋势;剔除流量影响后,除I<sub>Mn</sub>和COD外,其他指标变化趋势均有所弱化( $|Z|$ 下降、 $\alpha$ 值上升),DO和NH<sub>3</sub>-N呈不显著变化,而TN呈显著上升趋势。这说明河道流量对东江河源段DO、NH<sub>3</sub>-N和TN的变化趋势有较大影响,上游集雨区汇水过程加剧了该3项指标的污染。I<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>、COD和TP在流量调节前后基本无太大差异,说明流量对其影响较小,两岸点面源污染是河源段有机污染物和TP的主要来源。惠州剑潭在流量调节前,除DO呈显著上升外,其他指标变化趋势均不显著,NH<sub>3</sub>-N、TP、COD甚至出现检验值

为0的情况;剔除流量影响后,除DO外,其他各指标变化趋势均有所强化( $|Z|$ 上升、 $\alpha$ 值下降),DO、BOD<sub>5</sub>呈显著上升趋势,TP、TN呈显著下降趋势。这说明流量对东江惠州段DO影响较小,对BOD<sub>5</sub>、TP和TN的变化趋势有减缓作用。惠州剑潭上游集雨区的汇水过程对BOD<sub>5</sub>有稀释缓解作用,而对TP、TN起阻碍改善作用,对I<sub>Mn</sub>、COD、NH<sub>3</sub>-N影响较小,两岸点面源污染是惠州剑潭段有机污染物和NH<sub>3</sub>-N的主要来源。

由表3可知,S-K检验在流量调节浓度前后对比差异不大,河源临江和惠州剑潭各项监测指标的变化趋势基本不变,仅河源临江的NH<sub>3</sub>-N由调节前的不显著变化变为流量调节后的显著上升趋势,但其 $|Z|$ 值变化较小, $\alpha$ 值与检验标准非常接近,显著性水平不高。可见,S-K检验实际上已经考虑了不同月份水情的变化,剔除流量影响的S-K(LOWESS)分析效果不明显。

### 3 结论

(1)低频次水质人工监测数据宜采用M-K检验作长时间尺度趋势分析,M-K(LOWESS)检验可解析流量与点面源对水质指标变化的贡献。高频次水质自动监测数据宜采用S-K检验作短时间尺度趋势分析,可以克服流量周期性变化对水质的影响,无须再作剔除流量变化影响的S-K(LOWESS)分析。

(2)东江干流DO呈明显下降趋势,TN呈明显上升趋势;二级支流淡水河整治成效显著,水质呈

(下转第45页)