

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.01.11

闽江下游水质变化趋势分析

张鹏¹, 逢勇^{1,2}, 石成春³, 罗丹³

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 福州市环境科学研究院, 福建 福州 350011)

摘要:根据闽江水口水库运行以来1993—2011年闽江下游省控监测断面的主要水质数据,应用季节性肯达尔检验法对省控断面的水质指标变化趋势进行分析,并应用偏相关分析法对竹岐、魁岐断面的夏秋季(6—11月)DO降低的原因进行分析。结果表明:近十几年来,闽江下游水质总体较好,上段水口水库和下段的入海口河道水质变化不大,但邻近人口聚集地的河道水质状况呈下降趋势,其中竹岐、魁岐断面的夏秋季DO降低最为明显;竹岐和魁岐断面的夏秋季DO分别与竹岐断面径流量成极显著性正相关,偏相关系数分别为0.749和0.866,分别与福州市GDP成极显著性负相关,偏相关系数分别为-0.739和-0.875。

关键词:水质;季节性肯达尔检验;偏相关性分析;DO;闽江

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2018)01-0064-06

Analysis of change trend of water quality in Minjiang River downstream

ZHANG Peng¹, PANG Yong^{1,2}, SHI Chengchun³, LUO Dan³

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Fuzhou Research Academy of Environmental Sciences, Fuzhou 350011, China)

Abstract: According to the water quality data of the provincial monitoring sections of the Minjiang River downstream from 1993 to 2011, the seasonal Kendall method was used to analyze the trend of the water quality indices. The cause of the decrease of DO in summer and autumn (from June to November) of Zhuqi and Kuiqi sections was analyzed by the partial correlation analysis method. Results show that in recent decades, the water quality of the Minjiang River downstream is generally good and the water quality in the upper reach near the Shuikou reservoir and the lower reach near the estuary changes little. But the water quality of fluvial sections closed to population accumulation area shows a declining trend. Especially in summer and autumn, the DO concentrations in the Zhuqi and Kuiqi sections show an obvious reduction. The DO concentrations in Zhuqi and Kuiqi sections have significantly positive correlations with the runoff of Zhuqi Station, and the partial correlation coefficients are 0.749 and 0.866, respectively. The DO concentrations in Zhuqi and Kuiqi sections have significantly negative correlations with the GDP of Fuzhou, and the partial correlation coefficients are -0.739 and -0.875, respectively.

Key words: water quality; seasonal Kendall method; partial correlation analysis; DO; Minjiang River

闽江是福建省最大的河流,干流全长 541 km,流域面积 60 992 km²,上游沙溪、富屯溪和建溪三大支流在南平附近汇合后称闽江干流,南平以上为闽江上游,南平至水口水库为闽江中游,水口水库以下为闽江下游。闽江在福州市境内流域面积约 8 000 km²,长约 117 km,主要支流有安仁溪、梅溪、大目溪、溪源溪、陶江、大樟溪、源里溪、井下溪、小目溪、下洞江等。闽江水口水库位于闽清县,于 1993 年 4 月蓄水运行^[1-2]。闽江下游流经闽清、白沙、竹岐、侯官,至南台岛上游淮安处被分为南、北港两支流,南港、北港分流在洪汛期南港多,枯水期北港多,但由于南港近年严重挖沙,枯水期北港分流已经越来越少^[3]。南、北港至马尾处重新汇合。随着闽江流域社会经济快速发展,闽江流域污染物排放量逐年增大^[4],受河口潮汐环境的影响,水口水库下泄流量较小时,河道内污染物来回回荡^[5],水体交换时间延长^[6],严重威胁闽江下游水源地水质安全。

为全面掌握闽江下游水环境状况,分析河道水质变化趋势,增强管理工作的科学性、预见性,本研究采用季节性肯达尔检验法,对水口水库运行以来 1993—2011 年闽江下游干流和主要支流的水质变化趋势进行分析,并应用偏相关分析法对邻近人口聚集地的竹岐、魁岐断面夏秋季 DO 降低的原因进行分析,以期对闽江下游水环境管理和环境综合决策提供科学的依据。

1 研究资料和分析方法

1.1 研究资料

根据《水污染防治行动计划》设置的福州市国考、省考断面,选择闽江下游 7 个干流断面(格洋口

(国控断面)、下西园(省控,跨县界断面)、竹岐(国控、跨县界断面)、魁岐(省控断面)、湾边(省控断面)、闽安(国控断面)、琯头(国控、跨县界断面))和 2 个支流断面(梅溪口(省控断面)、大樟溪(国控断面))的水质数据(图 1),其中竹岐、魁岐、梅溪口靠近人口聚集区,水质受人为影响较大。根据闽江下游水污染特征和省控监测常规指标,确定 DO、COD_{Mn}、COD、BOD、NH₃-N、TP、TN 7 项指标为分析项目,选取水口水库运行以来 1993—2011 年各月的水质监测资料对闽江下游干流和支流的水质变化趋势和原因进行分析。

1.2 季节性肯达尔检验法

季节性肯达尔检验法是 Mann-Kendall 检验法的一种推广,其原理是将历年同月(同一时期)的水质数据进行比较,如果后面的监测值(时间上)大于前面的监测值,则记为“+1”,小于则记为“-1”,相等则记为“0”^[7-10]。如果求和大于 0,则判为上升趋势;如果求和小于 0,则判为下降趋势;如果求和等于 0,则判为无明显变化趋势。该方法适用于河湖等水质随季节性规律变化的多年变化趋势分析^[9,11-12]。

季节性肯达尔检验法的零假设 H_0 为随机变量,在时间上独立,假设 1 年 12 个月的水质数据具有相同的概率分布。设有 n 年 p 月的实测水质资料矩阵 X 为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}$$

(1)

式中: x_{np} 为第 n 年 p 月水质指标监测值。

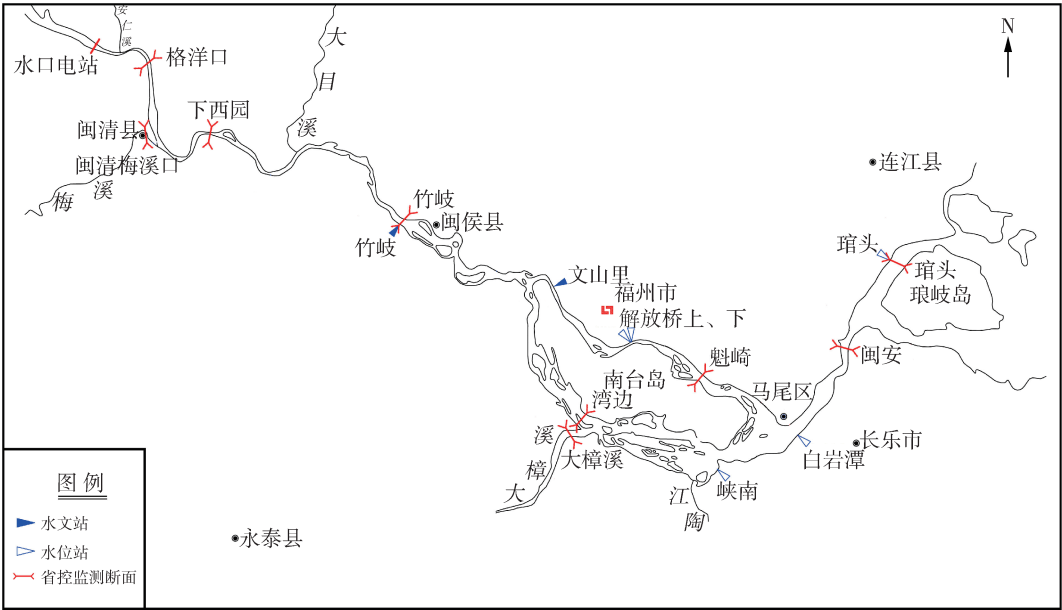


图 1 闽江下游省控断面位置分布

a. 对于 p 月中第 i 月 ($1 \leq i \leq p, p \leq 12$) 的情况, 根据季节性肯达尔检验法, 第 i 月历年水质序列相比较的“+1”和“-1”之和 S_i 为

$$S_i = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n G(x_{ij} - x_{ik}) \quad 1 \leq k < j \leq n \quad (2)$$

其中 $G(x_{ji} - x_{ki}) = \begin{cases} 1 & x_{ji} - x_{ki} > 0 \\ 0 & x_{ji} - x_{ki} = 0 \\ -1 & x_{ji} - x_{ki} < 0 \end{cases}$

设第 i 月内水质序列中共有 n_i 个非漏测值, 则第 i 月内可作比较的差值数据组个数 m_i 为

$$m_i = \frac{n_i(n_i - 1)}{2} \quad (3)$$

在零假设 H_0 下, 随机系列 S_i ($i = 1, 2, \dots, p$) 近似地服从正态分布, 则 S_i 的均值和方差为

$$E(S_i) = 0 \quad (4)$$

$$\sigma_1^2 = n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)/18 \quad (5)$$

若 n_i 个非漏测值中有 y 个数值相同, 则

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=1}^n n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)/18 - \sum y(y - 1)(2y + 5)/18 \quad (6)$$

b. 对于 p 月 ($p \leq 12$) 总体情况, 令 $S = \sum_{i=1}^p S_i$,

$m = \sum_{i=1}^p m_i$, 在零假设 H_0 下, p 月 S_i 的均值和方差为

$$E(S_i) = 0 \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^p \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^p \sum_{i=k}^p \sigma_{ik} \quad (8)$$

其中 $\sigma_i^2 = \text{Var}(S_i)$, $\sigma_{ik} = \text{Cov}(S_i, S_k)$

式中: S_i 和 S_k ($i \neq k$) 均为独立随机变量的函数, 即 $S_i = f(\mathbf{X}_i)$, $S_k = f(\mathbf{X}_k)$, 其中 $\mathbf{X}_i$, $\mathbf{X}_k$ 分别为第 i 月、 k 月历年的水质序列, 且 $\mathbf{X}_i \cap \mathbf{X}_k = \varphi$ 。

因为 $\mathbf{X}_i$ 和 $\mathbf{X}_k$ 分别来自 i 月和 k 月的水质实测资料, 且全体时间序列 $\mathbf{X}$ 中的所有元素都是独立的, 故协方差 $\text{Cov}(S_i, S_k) = 0$ 。将其代入式(5), 得

$$\text{Var}(S_i) = \sum_{i=1}^p \frac{n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)}{18} \quad (9)$$

当 n 年水质系列有 y 个数相同时, 同样也有

$$\text{Var}(S_i) = \sum_{i=1}^p \frac{n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)}{18} - \sum \frac{y(y - 1)(2y + 5)}{18} \quad (10)$$

若 $n \geq 10$, S 也服从正态分布, 且标准方差 Z 为

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

c. 趋势检验。肯达尔检验统计量 $t = S/m$, 在双尾趋势检验中, 如果 $|z| \leq z_{\alpha/2}$, 则接受零假设 H_0 。这里 $F_N(z_{\alpha/2}) = \alpha/2$, F_N 为标准正态分布函数, 则

$$F_N = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{|z|}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt \quad (12)$$

趋势检验的显著水平 α 值为

$$\alpha = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{|z|}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt \quad (13)$$

取显著性水平 α 为 0.1 和 0.01, 即当 $\alpha \leq 0.01$ 时, 说明肯达尔检验具有高度显著性水平; 当 $0.01 < \alpha \leq 0.1$ 时, 说明肯达尔检验是显著性的。在 α 值满足上述两条件情况下, 当 $t > 0$ 时, 则具有显著性(或高度显著性)上升趋势; 当 $t < 0$ 时, 则具有显著性(或高度显著性)下降趋势; 当 $t = 0$ 时, 则为无趋势。

1.3 偏相关分析方法

a. 两个变量间的相关分析。正态分布的等间距测度的变量 x 与 y 相关系数采用 Pearson 积矩相关公式^[12]计算:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (14)$$

式中: r_{xy} 为变量 x 、 y 的相关系数; $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为变量 x 、 y 的均值; x_i 、 y_i 分别为变量 x 、 y 的第 i 个观测值。

b. 偏相关分析。控制变量 z , 变量 x 、 y 之间的偏相关系数计算公式^[13]为

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (15)$$

式中: $r_{xy,z}$ 为控制了 z 的条件下, x 、 y 之间的偏相关系数; r_{xz} 、 r_{yz} 分别为变量 x 、 z 间的和变量 y 、 z 间的相关系数。

2 结果与分析

2.1 基于肯达尔检验法的水质变化趋势分析

经过计算, 闽江下游水质变化趋势分析结果见表 1。由表 1 可见, 9 个断面中有 6 个 DO 监测值呈现高度显著性下降趋势, 占 66.67%, 其他 3 个断面未有明显变化趋势, 可以得出闽江下游 DO 质量呈明显的恶化趋势。有 5 个断面的 COD_{Mn} 呈现显著性或高度显著性下降趋势, 占总数的 55.56%, 呈现显著性或高度显著性上升的有 2 个断面, 占 22.22%, 可以得出闽江下游 COD_{Mn} 质量呈好转趋势。有 5 个断面的 COD 呈现显著性或高度显著性下降趋势, 占总数的 55.56%, 呈现显著性或高度显著性上升的有 1 个断面, 占 11.11%, 另外 3 个断面 COD 监测数

表 1 闽江下游水质变化趋势分析结果

断面及指标		DO		COD _{Mn}		COD		BOD		NH ₃ -N		TP		TN	
		质量浓度均值/ (mg·L ⁻¹)	结果	质量浓度均值/ (mg·L ⁻¹)	结果	质量浓度均值/ (mg·L ⁻¹)	结果	质量浓度均值/ (mg·L ⁻¹)	结果	质量浓度均值/ (mg·L ⁻¹)	结果	质量浓度均值/ (mg·L ⁻¹)	结果	质量浓度均值/ (mg·L ⁻¹)	结果
干流	格样口	6.22	↓↓	2.49	↓↓	7.73	↓↓	1.1	☆	0.23	↓↓	0.05	↑	0.98	☆
	下西园	6.56	☆	2.33	☆	7.38	☆	1.14	↓↓	0.22	☆	0.05	↑↑	1.15	☆
	竹岐	7.15	↓↓	2.58	↓↓	9.43	↓↓	0.96	☆	0.22	☆	0.05	↑↑	1.36	☆
	魁岐	6.6	↓↓	3.18	↓	14.83	☆	1.25	☆	0.6	↑↑	0.08	↑↑	1.6	↑
	湾边	7.37	↓↓	2.65	↓↓	13.36	↑↑	1	↑↑	0.29	↑↑	0.04	↑↑	1.48	↑
	闽安	7.31	↓↓	3.72	↑↑	16.61	↓↓	1.05	☆	0.31	↓	0.06	↑↑	1.53	↑↑
	琯头	7.48	☆	3.85	↑↑	16.93	↓↓	1.01	☆	0.32	↓↓	0.05	↑↑	1.53	↑↑
支流	梅溪口	6.83	☆	5.5	↓↓	17.58	↓	2.63	↓↓	0.64	↓↓	0.13	↑↑	1.2	☆
	大樟溪	7.35	↓↓	2.52	↓↓	12.3	☆	0.99	↑↑	0.26	↑↑	0.05	↑↑	1.47	↑↑
上升率/%		—	0	—	22.22	—	11.11	—	22.22	—	33.33	—	100	—	55.56
下降率/%		—	66.67	—	55.56	—	55.56	—	22.22	—	44.44	—	0	—	0

注：↑表示显著上升趋势；↑↑表示高度显著上升趋势；↓表示显著下降趋势；↓↓表示高度显著下降趋势；☆表示无明显变化趋势。

据未有明显变化趋势,因此闽江下游 COD 质量呈好转趋势。有 2 个断面的 BOD 呈现显著性或高度显著性下降趋势,占总数的 22.22%,呈现显著性或高度显著性上升的有 2 个断面,占 22.22%,另外 5 个断面 BOD 监测数据未有明显变化趋势,总的来说,闽江下游 BOD 质量保持较好,未有明显变化趋势。4 个断面的 NH₃-N 呈现显著性或高度显著性下降趋势,占总数的 44.44%,呈现显著性或高度显著性上升的有 3 个断面,占 33.33%,另外 2 个断面 NH₃-N 监测数据未有明显变化趋势,可见闽江下游 NH₃-N 质量保持较好,稍微有好转趋势。9 个断面的 TP 均呈现显著性或高度显著性上升趋势,总的来说,闽江下游 TP 质量有明显恶化趋势。5 个断面的 TN 均呈现显著性或高度显著性上升趋势,另外 4 个断面 TN 监测数据未有明显变化,总的来说,闽江下游 TN 质量有明显恶化趋势。

总体来说,近十几年来闽江下游水体水质总体较好^[15],各指标均满足 GB3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类水要求,但局部水质有恶化趋势,尤其以 DO 为最。6 个 DO 监测值呈现高度显著性下降趋势的断面中,格样口断面靠近水口水库,DO 较低是由于水口水库底部泄水,低 DO 的水体复氧不及时所致;其他 5 个断面主要是靠近人口聚集地,DO 有明显的降低趋势,其中邻近福州市区的北港魁岐断面水质明显比其他干流断面的水质差,其主要受福州 2 条城市内河(白马河和光明港)的污染。琯头断面 DO 未有明显变化,由于靠近外海,受涨落潮影响,高 DO 的海水稀释,总体水质较好。支流的梅溪口断面受闽清镇的影响,水质相对较差,但近几年除了 TP 上升外,其他水质指标有明显好转趋

势,说明闽清治污措施卓有成效。

为更直观地分析闽江下游 DO 变化趋势,选取靠近闽侯县的竹岐断面和靠近福州市区的魁岐断面进行进一步研究,两个断面 DO 均有高度显著性下降趋势。为了排除温度、丰平枯下泄流量的影响,选择两个断面 1993—2011 年的夏秋季(6—11 月)DO 监测数据每 4 年一个均值进行分析,其变化趋势见图 2。由图 2 可见,竹岐、魁岐断面夏秋季 DO 均值总体呈现下降趋势。1997—2000 年 DO 比 1993—1996 年稍有降低,主要受竹岐断面流量增大的影响;2009—2011 年与 2005—2008 年竹岐断面流量变化不大的情况下,魁岐断面相比竹岐断面 DO 明显下降,一方面是由于污染物的增加,另一方面最主要原因是北港分流比的减小,流入北港的流量相比之前明显减少,统计可知 2009—2011 年北港平均流量为 387 m³/s(北港分流比为 40%),比 2005—2008 年的 675 m³/s(北港分流比为 23%)降低了 43%,然而竹岐断面流量仅仅降低了 6%。

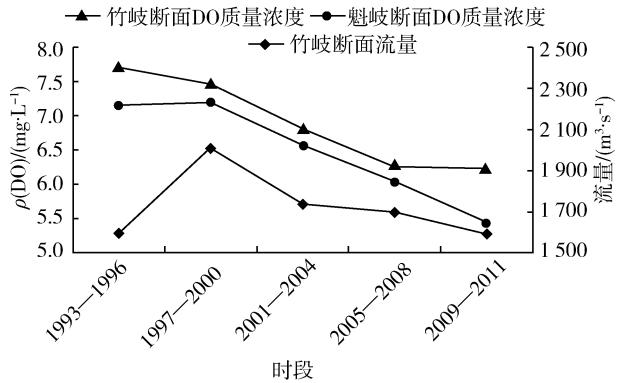


图 2 1993—2011 年竹岐、魁岐断面夏秋季 DO 及竹岐断面流量变化趋势

2.2 基于偏相关分析法的竹岐、魁岐断面 DO 降低原因分析

2.2.1 竹岐、魁岐断面 DO 与径流量的偏相关性分析

低 DO 主要发生在高温季节,分析 1993—2011 年夏秋季(6—11 月)竹岐、魁岐断面 DO 质量浓度均值与年均径流量的相关性,DO 质量浓度与径流量的散点分布及趋势线见图 3,可见两者有一定的线性关系。

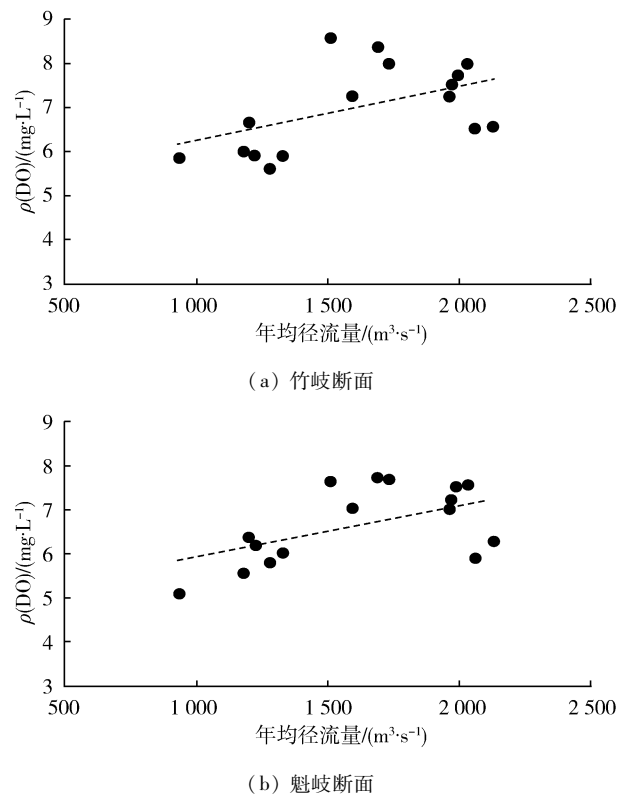


图 3 1993—2011 年竹岐和魁岐断面夏秋季 DO 与竹岐断面年均径流量关系

地区污染物排放量与生产总值一般呈线性关系,在污染物排放量不确定的情况下,由于闽江流域环境污染指数还未达到库兹涅茨曲线的拐点,尚处于环境污染随经济的增长而加重的阶段^[16],因此可以利用地区 GDP 的变化反映污染物排放量的变化。以福州市区 GDP 为控制变量,分析竹岐、魁岐多年夏秋季 DO 质量浓度与竹岐断面年均径流量的偏相关关系(因极端流量下 DO 与流量相关性不好,除去 1998、2010 年两个极端洪水年份)。1993—2011 年(1998、2010 除外),竹岐断面的夏秋季 DO 质量浓度与竹岐断面径流量有极显著性强相关,偏相关系数为 0.749,魁岐断面的夏秋季 DO 质量浓度与径流量有极显著性极强相关,偏相关系数为 0.866。可以看出,控制福州市 GDP 的情况下,随着闽江干流下游竹岐断面年均径流量的增大,竹岐、魁岐断面 DO 质量浓度呈现显著性增加趋势;反之,随着流量

的降低,两个断面 DO 质量浓度也降低^[17]。

2.2.2 竹岐、魁岐断面 DO 与福州市 GDP 的偏相关性分析

1993—2011 年夏秋季(6—11 月)竹岐、魁岐断面 DO 质量浓度均值与福州市 GDP 散点分布和趋势线见图 4,两者呈现出很好的线性关系。

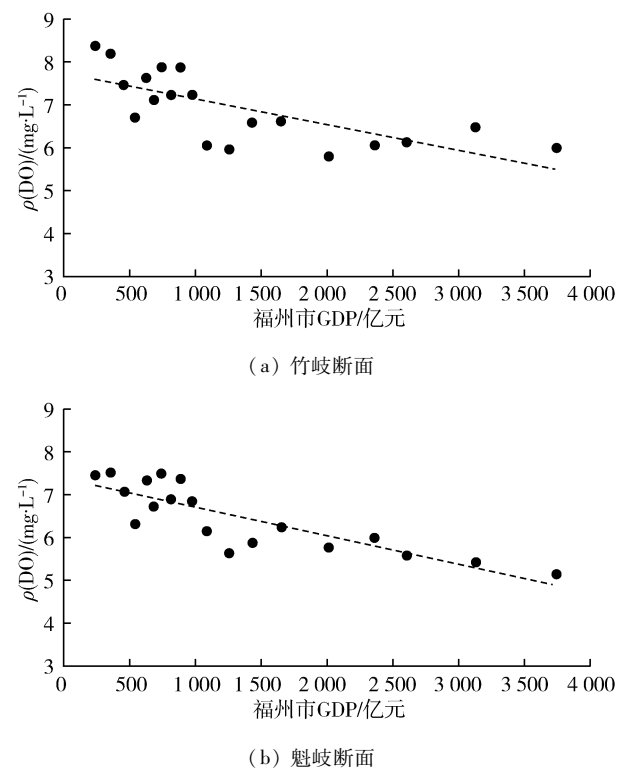


图 4 1993—2011 年竹岐和魁岐断面夏秋季 DO 与福州市 GDP 关系

以径流量为控制变量,分析 1993—2011 年竹岐、魁岐断面的夏秋季节 DO 与福州市 GDP 的偏相关性,可知竹岐断面的夏秋季 DO 与福州市 GDP 有极显著性强相关,偏相关系数为 -0.739,魁岐断面的夏秋季 DO 与福州市 GDP 有极显著性极强相关,偏相关系数为 -0.875。可以看出,在控制径流量的情况下,随着福州市 GDP 的增加,竹岐、魁岐断面 DO 质量浓度呈现显著性降低趋势,进而说明随着污染物排放量的增加,水体 DO 会越来越低。

3 结 论

a. 近十几年来,闽江下游水质总体较好,上段的水口水库和下段的入海口河道水质变化不大,但邻近人口聚集地的河道水质状况呈下降趋势,尤其是竹岐、魁岐断面夏秋季 DO 降低最为明显,北港魁岐断面的 DO 不仅受上游城市内河排污的影响,而且受北港分流比的影响。

b. 控制福州市 GDP 的情况下,1993—2011 年(1998、2010 除外)竹岐、魁岐断面的夏秋季 DO 质

量浓度与竹岐径流量均成极显著性正相关,偏相关系数分别为 0.749 和 0.866;控制径流量的情况下,1993—2011 年竹岐、魁岐断面的夏秋季 DO 与福州市 GDP 均成极显著性负相关,偏相关系数分别为 -0.739 和 -0.875。

参考文献:

[1] 周琦,池飞,逢勇,等.可利用水资源量正逆向联合计算方法[J].水资源保护,2016,32(5):42-46. (ZHOU Qi, CHI Fei, PANG Yong, et al. A combined forward and reverse method for available water resources calculation [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5): 42-46. (in Chinese))

[2] 张鹏,逢勇,石成春,等.基于 EFDC 的闽江干流下游 DO 变化研究[J].水资源保护,2016,32(5):91-96, 102. (ZHANG Peng, PANG Yong, SHI Chengchun, et al. Study of variation of dissolved oxygen in lower reaches of main stream of Minjiang River based on EFDC model[J]. Water Resource Protection, 2016, 32(5): 91-96, 102. (in Chinese))

[3] 叶丽清,胡朝阳,王新强.闽江下游闽清河段河道演变分析[J].水利与建筑工程学报,2014(6):164-167. (YE Liqing, HU Chaoyang, WANG Xinqiang. Evolution analysis of Minqing Channel in the lower reach of Minjiang River[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014(6): 164-167. (in Chinese))

[4] 罗进洲.基于 SMS 及 RS 的闽江福州段水污染控制研究[D].福州:福州大学,2004.

[5] 洪小筠.闽江下游感潮河段水污染特性分析[J].水利科技,2010(3):4-5. (HONG Xiaojun. Analysis on water pollution characteristics of tidal reach in Minjiang River downstream[J]. Hydraulic Science and Technology, 2010(3): 4-5. (in Chinese))

[6] 张鹏,石成春,逢勇,等.闽江下游径流量和北港分流比变化及其对水龄的影响研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(5):40-45. (ZHANG Peng, SHI Chengchun, PANG Yong, et al. The evolution of split ratio of North Channel and its impact on water age in Minjiang River downstream[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(5): 40-45. (in Chinese))

[7] 贾俊杰,逢勇,罗缙,等.肯达尔检验法在江阴市河流水质趋势分析中的应用[J].水资源与水工程学报,2014(3):83-89. (JIA Junjie, PANG Yong, LUO Jin, et al. Application of Kendall method to analysis of variation tendency of water quality in river of Jiangyin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014(3): 83-89. (in Chinese))

[8] 陈燕飞,张翔.汉江中下游干流水质变化趋势及持续性分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(7):1163-1167. (CHEN Yanfei, ZHANG Xiang. Long-term trends

and sustainability trends of water quality in the middle and lower reaches of Han Jiang main stream[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(7): 1163-1167. (in Chinese))

[9] 程曼曼.季节性肯达尔检验法在南湾水库水质趋势分析中的应用[J].河南水利与南水北调,2012(16):57-58. (CHENG Manman. Application of seasonal Kendall test method in water quality trend analysis of Nanwan Reservoir[J]. Henan Water Conservancy and South-to-North Water Transfer, 2012(16): 57-58. (in Chinese))

[10] 宋逸云,黄峰.衢江水沙变化趋势分析[J].水资源保护,2017,33(4):40-46. (SONG Yiyun, HUANG Feng. Trend analysis of runoff and sediment load variation in Qujiang River[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 40-46. (in Chinese))

[11] XIN Xiaokang, LI Kefeng, FINLAYSON Brian, et al. Evaluation, prediction, and protection of water quality in Danjiangkou Reservoir, China [J]. Water Science and Engineering, 2015, 8(1): 30-39.

[12] YENILMEZ F, KESKIN F, AKSOY A. Water quality trend analysis in Eymir Lake, Ankara [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2011, 36(5/6): 135-140.

[13] LI Yiping, TANG Chunyan, YU Zhongbo, et al. Correlations between algae and water quality: factors driving eutrophication in Lake Taihu, China [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, 11(1): 169-182.

[14] 张彦,窦明,余冬.闸控河段水质浓度影响关键因子识别[J].环境科学与技术,2015,38(1):61-67. (ZHANG Yan, DOU Ming, YU Dong. Key factors identification of influencing river water quality concentration [J]. Environmental Science and Technology, 2015, 38(1): 61-67. (in Chinese))

[15] 程学宁,卢毅敏.基于 SOM 和 PCA 的闽江流域地表水水质综合评价[J].水资源保护,2017,33(3):59-67. (CHENG Xuening, LU Yimin. Comprehensive evaluation of surface water quality in Minjiang River Basin based on SOM and PCA [J]. Water Resource Protection, 2017, 33(3): 59-67. (in Chinese))

[16] 程永隆,沈恒,许友勤.闽江梯级电站对水环境的影响[J].水资源保护,2011,27(5):114-118. (CHENG Yonglong, SHEN Heng, XU Youqin. Preliminary study on effect of Min River cascade hydropower stations on water environment [J]. Water Resource Protection, 2011, 27(5): 114-118. (in Chinese))

[17] ZHANG Peng, PANG Yong, PAN Hongche, et al. Factors contributing to hypoxia in the Minjiang River Estuary, Southeast China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(8): 9357-9374.

(收稿日期:2017-02-28 编辑:王 芳)