

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20212621

东江河流系统健康预警中的警源查证分析

方陈卓¹, 林支伟², 罗慈兰², 吴龙华¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 广东省东江流域管理局, 广东 惠州 516003)

摘要: 警源查证作为河流系统健康预警的一个关键环节,是消除警患、维护河流系统健康的重要依据。为此,在分析影响东江河流系统健康状况警源因素的基础上,构建了东江河流系统健康警源指标体系,并利用偏最小二乘回归法建立了东江河流系统健康警源查证模型。通过该模型对影响东江河流系统健康状况(2015~2019年)的警源进行了查证,分析了不同警源指标对东江河流系统健康状况的影响趋势和影响程度。结果表明,年降雨量对东江河流系统健康状况的促进作用最为直接和显著;另外流域内的生态用水、社会发展程度及河流管理水平等因素也同样具有促进作用;而流域内的洪水灾害、污水排放、生产生活用水和非生态友好型水利工程设施及流域外调水对东江河流系统的健康有明显的负面影响。

关键词: 河流系统健康; 预警; 警源查证; 偏最小二乘回归法; 东江

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)01-0046-04

1 概况

东江是广东省重要的四大水系之一,东江在广东省的社会经济发展中发挥着极其重要的作用,经过建国后六十多年的水利建设,东江流域形成了防洪、治涝、灌溉、供水、发电、水土保持、种植养殖、旅游等系统功能齐全、综合效益明显的水利整体布局,为农业和第二、三产业及社会各项事业的稳定发展及为社会安定人民安居乐业提供了相对可靠的防洪安全保障和水源保证。但随着流域内外各用水部门用水量的增加,东江流域也出现了一些健康问题,如东江部分河段水质不容乐观,局部及部分支流受到较重污染等^[1]。因此,对影响东江河流系统健康状况的警源进行查证分析,明确影响东江河流系统健康状况的主要警源因子,不但可为东江流域管理部门采取针对性治理措施,排除警患提供参考依据,也为维护东江整体生态环境安全和促进区域内经济社会的可持续发展,实现人水和谐共处,提供了有力支持。

2 东江河流系统健康的警源因素分析

对东江河流系统而言,影响其健康的警源因素可分为自然与人为两类,警情的发生往往是自然因素与人为因素相互结合、相互影响下共同作用的结果。

2.1 自然因素

自然因素是指自然界中一些容易诱发自然灾害从而引发河流系统健康警情的客观因素。对东江河流系统而言,评估时间尺度内的主要自然因素是降雨及其引发的洪涝灾害等。

降水是东江流域水量的主要来源。流域内平均雨量在1 500~2 400 mm之间,多年平均降雨量(1956~2005年)为1 795 mm。但流域内降雨空间分布不均匀,一般是中下游比上游多,西南多、东北少。年内降雨分布也不均匀,其中4~9月降水量占全年的80%以上,易造成洪涝灾害。因此,选取年降雨量、年最大降雨强度、洪涝引起的灾害次数作为反映自然因素影响东江河流系统健康的警源因子。

2.2 人为因素

人为因素是由于人类不当或过度活动直接导致河流系统健康产生警情的根源。对于东江河流系统,将从污水排放、流域内用水、水利工程、社会发展程度、河流管理水平等方面进行分析。

(1) 污水排放。东江流域经济发达、人口众多、城镇化率高,第三产业发展迅速,相关生活设施用水和居民生活用水等逐年增加,污水排放压力逐年增大。另一方面,东江流域内受稀土开采、果业开发和大型养殖等第二产业影响,也会产生大量污水。因此选取第二产业污水排放、第三

收稿日期: 2021-12-01, 修回日期: 2022-04-29

作者简介: 方陈卓(1999-),男,硕士研究生,研究方向为工程水力学, E-mail: zhuo128@qq.com

通讯作者: 吴龙华(1974-),男,副教授,研究方向为河流管理与工程水力学, E-mail: jxbywlh2003@hhu.edu.cn

产业污水排放、城镇生活污染排放量作为警源因子。

(2)流域内用水。根据广东省 2020 年统计,2019 年东江流域水资源总量为 $291.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,流域人均水资源量为 $899.17 \text{ m}^3/\text{人}$,大大低于全省 $1795.16 \text{ m}^3/\text{人}$ 的平均水平。且流域内不同地区的人均水资源量差异明显,从上游向下游呈不均匀减少的趋势,流域内各地区水资源量不足与用水量需求之间的矛盾日益严峻。因此选取工业用水量、农业用水量、生活用水量、生态用水作为警源因子。

(3)水利工程。2019 年跨流域引水工程的流域外调水占东江流域水资源总量 4.094% ;东江干流枫树坝以下建成或在建的 12 个梯级电站均未为洄游性的水生动物提供洄游通道。另外,在建设堤防的同时未能充分考虑某些穴居或两栖生物的栖息要求,大多采用硬质化护岸,干扰和破坏了这些生物的栖息环境和迁徙通道。因此选取鱼类洄游通道未设置率、河岸侵占率、流域外调水比例、河岸硬质化比作为警源因子。

(4)社会发展程度。2019 年广东省东江流域内常住总人口达 3236.33×10^4 人,流域内国内生产总值(GDP)为 38644.38×10^8 元,流域内平均城镇化率达 85.42% ,这也造成对东江水资源等的需求进一步增大。因此选取人口、GDP、城镇化率作为警源因子。

(5)河流管理。东江流域水利主管部门负责东江流域的水资源分配与调度、流域规划及流域内的巡查和执法等,经费保障和执法成效直接影响到管理效率。因此选取管理投入力度和违规事件查处力度作为警源因子。

东江河流系统健康警源指标体系见表 1。

3 警源查证模型

3.1 警源查证方法选取

在河流系统健康警源查证中,由于自变量(警源因素)对因变量(河流系统健康状态)的作用机理非常复杂且存在未知性,自变量之间也存在多重相关性关系,通常无法建立相应的确定性函数关系。因此,只能通过统计分析的方法来寻找它们之间的统计关系,以达到定量分析的目的。本文在进行东江河流系统健康预警的警源查证时,根据其警源因素(自变量)之间存在多重相关性且样本数少的特点,选择偏最小二乘回归法^[2,3]进行警源查证分析。

表 1 东江河流系统健康警源指标体系

Tab. 1 The alert sources index system of Dongjiang river system

警源因子	具体指标 (自变量)	含义或计算方法
自然因子	年降雨量	年降雨总量
	年最大降雨强度	年内最大降雨强度
	洪水灾害次数	年内由洪水引发的灾害次数
污水排放	第二产业污水排放量	年排放量
	第三产业污水排放量	年排放量
	城镇生活污染排放量	年排放量
流域内用水量	工业用水量	年用水量
	农业用水量	年用水量
	生活用水量	年用水量
	生态用水	年用水量
水利工程	鱼类洄游通道未设置率	河道中未设置鱼类洄游通道的梯级电站数量占梯级电站总数的百分比
	河岸侵占率	河岸被用于农民耕作、商业区、住宅区等其他工程设施的总长度占河岸总长度的百分比
	流域外调水比例	所有调水工程的年调水量占东江当年总径流量的百分比
社会发展程度	人口	河道沿线总常住人口
	GDP	河道沿线社会总产值
	城镇化率	城镇人口占总常住人口的比重
河流管理	管理投入力度	东江流域管理局年度经费预算
	违规事件查处力度	年内查处违规事件数占违规事件总数的百分比

3.2 基于偏最小二乘法的回归方程

在警源查证过程中,东江河流系统的健康状况是唯一因变量,而东江河流系统的警源指标则是自变量。基于偏最小二乘法建立回归方程的步骤如下。

步骤 1 对初始的自变量数据表 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}_{n \times p}$ 和因变量数据表 $Y = \{y\}_n$ 使用正规化方法进行标准化处理,得到标准化变量矩阵 E_0, F_0 。

步骤 2 在 E_0 上提取第一偏最小二乘成分 $t_1 = E_0 \omega_1$, 其中 $\omega_1 = E_0^T F_0 / \|E_0^T F_0\|$, 且 $\|\omega_1\| = 1$ 。实施 E_0, F_0 在 t_1 上的回归,求回归方程:

$$\begin{cases} E_0 = t_1 p_1^T + E_1 \\ F_0 = t_1 r_1 + F_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} p_1 = (E_0^T t_1) / \|t_1\|^2 \\ r_1 = (F_0^T t_1) / \|t_1\|^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} E_1 = E_0 - t_1 p_1^T \\ F_1 = F_0 - t_1 r_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, p_1, r_1 均为回归系数 (r_1 为标量); E_1, F_1 分别为 E_0, F_0 的残差。

步骤 3 以 E_1 取代 E_0 , 以 F_1 取代 F_0 , 用同样的方法重复步骤 1、2, 以此类推偏最小二乘回归的后续步骤, 最后利用交叉有效性判断确定成分 t 的提取个数, 并停止迭代。假设在第 h 步 ($h=2, 3, 4, \dots, m$) 精度满足要求, 停止提取成分。

这时得到 m 个成分, 实施 F_0 在 $(t_1, t_2, t_3, \dots, t_m)$ 上的回归, 得到:

$$F_0 = r_1 t_1 + r_2 t_2 + r_3 t_3 + \dots + r_m t_m \quad (4)$$

由于 $(t_1, t_2, t_3, \dots, t_m)$ 均为 E_0 的线性组合, 因此, F_0 可写为 E_0 的线性组合形式, 即:

$$F_1 = r_1 E_0 \omega_1^* + r_2 E_1 \omega_2^* + r_3 E_2 \omega_3^* + \dots + r_m E_{m-1} \omega_m^* \quad (5)$$

其中
$$\omega_h^* = \left[\prod_{j=1}^{h-1} (\mathbf{I} - \omega_j p'_j) \right] \omega_h$$

式中, \mathbf{I} 为单位矩阵; ω_h 为第 h 步成分的权重。

3.3 交叉有效性判断

记 y_i 为原始数据, $(t_1, t_2, t_3, \dots, t_m)$ 为在偏最小二乘回归过程中提取的成分, $\hat{y}_{(h-1)i}$ 为使用全部样本点并提取 $h-1$ 个成分回归建模后, 第 i 个样本点的拟合值。 $\hat{y}_{h(-i)}$ 为在建模时删去样本点 i , 取 h 个成分回归建模后, 再用此模型计算 y_i 的拟合值。 则对于因变量 Y , 成分 t_h 的交叉有效性定义为:

$$Q_h^2 = 1 - S_{\text{PRESS},h} / S_{\text{SS},h-1} \quad (6)$$

其中
$$S_{\text{SS},h-1} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{(h-1)i})^2$$

$$S_{\text{PRESS},h} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{h(-i)})^2$$

式中, $S_{\text{SS},h-1}$ 为用全部样本点拟合的具有 $h-1$ 个成分的方程的拟合误差; $S_{\text{PRESS},h}$ 为加了 1 个成分 t_h 含有样本点的扰动误差。

当 $Q_h^2 \geq 0.0975$ (即 $\sqrt{S_{\text{PRESS},h}} \leq 0.95 \sqrt{S_{\text{SS},h-1}}$) 时, 引进新的主成分 t_h 会对模型的预测能力有明显的改善作用。 反之, 则不能。

3.4 警源重要程度分析

为区分警源指标体系中不同警源因素重要程度的差异, 采用变量投影重要性指标来表示不同警源因素对东江河流系统健康状况的影响程度。 其定义为:

$$V_{\text{VIP}_j} = \sqrt{\frac{p}{R_d} \sum_{h=1}^m R_d \omega_{hj}^2} \quad (7)$$

其中
$$R_d = \sum_{h=1}^m R_d(y, t_h) = \sum_{h=1}^m r^2(y, t_h) \quad (8)$$

式中, V_{VIP_j} 为第 j 个自变量 x 解释因变量 y 的投影重要性; $R_d(y; t_h)$ 、 $R_d(y; t_1, t_2, t_3, \dots, t_m)$ 分别为 y 由 t_h 和 $(t_1, t_2, t_3, \dots, t_m)$ 所解释的变异精度, 分别代表 t_h 对 y 的解释能力和 $(t_1, t_2, t_3, \dots, t_m)$ 对 y 的累积解释能力; ω_{hj}^* 为 ω_h^* 的第 j 个分量。

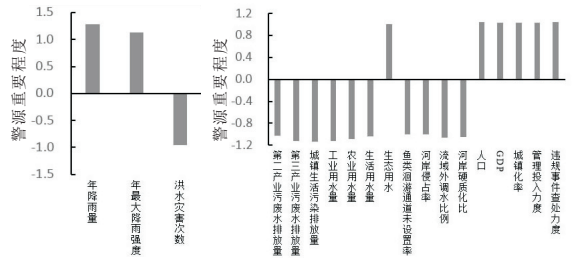
由于 x_j 对 y 的解释是通过 t_h 来传递的, 若 t_h 对 y 的解释能力很强, 而 x_j 在构造 t_h 时又起到了相当重要的作用, 则 x_j 对 y 的解释能力被视

为很大。 即若在 $R_d(y, t_h)$ 的值很大的 t_h 成分上, ω_{hj} 取很大的值, 则 x_j 对 y 的解释就有很重要的作用。 V_{VIP_j} 越大的 x_j , 表示它在解释 y 具有更加重要的作用。 因此, 可根据 V_{VIP_j} 的大小来判断警源因素对河流系统健康状况的影响程度。

4 警源查证结果与分析

4.1 警源查证结果

2015~2019 年东江河流系统健康状况评分(百分制)依次为 58.02、64.08、65.96、61.20、65.62。 结合各警源指标在 2015~2019 年度的统计数据, 利用本文警源查证模型对影响东江河流系统健康状况的警源因素进行了查证计算。 结果见图 1。



(a) 自然警源因素重要程度对比 (b) 人为警源因素重要程度对比

图 1 自然警源因素和人为警源因素重要程度对比
Fig. 1 Comparison of the importance of natural alert source factors and man-made alert source factor

4.2 自然警源因子分析

由图 1(a) 可看出, 在自然警源因素中, 年降雨量、年最大降雨强度对东江河流系统健康具有正面促进作用, 而洪水灾害对东江河流系统健康具有负面影响。 警源查证结果还显示年降雨量对东江河流系统健康的正面促进作用最为直接和显著。 东江流域 2015~2019 年的降雨量分别为 1 359.2、2 518.6、1 602.1、1 634.9、2 132.5 mm, 与评估期间各年份的健康评分趋势基本保持一致。 其中 2015 年降雨量是评估期内降雨量最少的年份, 较流域多年平均降雨量减少约 22.3%; 同期总径流量也较多年平均径流量减少约 12.5%。 降雨量不足不但无法充分保障维持东江河流自然生态系统所需的生态流量, 还会对东江河流系统社会服务功能的发挥形成制约。 由此可看出, 降雨量对东江河流系统健康状况有着关键性的直接影响。

4.3 人为警源因子分析

由图 1(b) 可看出, 在人为警源因素中, 生态用水、社会发展程度(人口、GDP、城镇化率)和河流管理(管理投入力度、违规事件查处力度)对东江河流系统健康有正面促进作用。 生态用水主要

用于维持河道稳定、水生或两栖生物栖息环境、相关物质与能量传输的顺畅等方面,有利于维护和促进东江河流系统的健康;社会发展程度的提高一方面表明经济发展水平的提高,另一方面也能够体现出人们对东江认知能力的提高,从而体现了人们维护和促进东江河流系统健康意愿和能力的提高;河流管理水平的提高有利于科学制定相关政策与制度、引导公众积极参与东江河流系统健康保护、及时制止损害东江河流系统健康的行为或措施等,从而进一步促进和改善东江河流系统的健康状况。查证结果还显示,污水排放(第二、三产业污水排放、城镇生活污染排放)、流域内非生态用水(工农业用水、生活用水)、流域外调水、非生态友好型水利工程(鱼类洄游通道未设置率、河岸侵占率、河岸硬化化比)对东江河流系统健康具有负面影响。

5 结论

a. 本文在分析影响东江河流系统健康警源

Analysis and Verification of Alert Source for Early Warning of Dongjiang River System Health

FANG Chen-zhuo¹, LIN Zhi-wei², LUO Ci-lan², WU Long-hua¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Dongjiang River Basin Administration of Guangdong Province, Huizhou 516003, China)

Abstract: As a key point in early-warning of river system health, alert source verification is an important basis for eliminating hidden trouble and maintaining the river system health. Based on the analysis of the alarm source factors affecting the health status of Dongjiang river system, the alarm source index system was constructed, and the alert sources verification model of Dongjiang river system health was established by the partial least squares regression (PLSR) method. This model was used to verify main alarm source factors for affecting the health status of the Dongjiang river system (2015-2019), and the influence trend and degree of different alarm source factor on the health status of Dongjiang river system were analyzed. The results show that annual rainfall is the most direct and significant positive effect factor on the health status of Dongjiang River system. In addition, factors such as ecological water use, social development and river management level in this basin also play a promoting role. However, the flood disaster, sewage discharge, water for production and living, non-eco-friendly water conservancy facilities in this basin, and inter-basin water transfer have obvious negative effects on the health of Dongjiang river system.

Key words: river system health; early-warning; alert source verification; partial least squares regression; Dongjiang River

(上接第 45 页)

Research on Spatial Differentiation of River Ecological Security Based on DPSFR and Matter-element Extension Model

ZHOU Wei¹, XU Hui¹, TAO Chan-chan²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Water Conservancy Engineering Technology Consulting, Nanjing 210029, China)

Abstract: The ecological security of rivers is not only closely related to the physical, chemical and biological integrity of the river itself, but also affected by the natural, economic and social conditions of the regions through which it flows. Based on the "driving force-pressur-state-function-response" (DPSFR) framework and matter-element extension model, a river ecological security evaluation system was constructed. Taking Hongru River as an example, it was divided into 10 evaluation units according to the spatial differences such as physical geography and water conservancy projects, and the river ecological security evaluation and spatial differentiation characteristics research were carried out. The results show that the ecological safety level of the Hongru River in 2017 was in a critical safety state, and there was a tendency to develop to an unsafe level. Its spatial differentiation characteristics were that the upstream was better than the downstream, and the tributaries were better than the mainstream, especially in the functional and response layers. Among the indicators, total phosphorus, per capita comprehensive water consumption, river longitudinal connectivity, and water quality assessment cross-section compliance rate are the main factors affecting the spatial distribution of ecological security differences in Hongru River. The response is a criterion layer that is significantly related to the spatial differentiation of the ecological security of the Hongru River.

Key words: river ecological security; DPSFR; matter element extension; Hongru River

因素的基础上,建立了东江河流系统健康的警源指标体系,利用偏最小二乘回归法构建了东江河流系统健康警源查证模型,并利用该警源查证模型对东江河流系统 2015~2019 年的健康状况进行查证分析。

b. 查证结果表明,年降雨量对东江河流系统健康的正面促进作用最为直接和显著;另外,生态用水、流域内社会发展状况和河流管理水平等因素也发挥了正面促进作用;而洪水灾害、流域内的污水排放、生产生活用水、流域外调水及非生态友好型水利工程设施对东江河流系统的健康有明显的负面影响。

参考文献:

- [1] 吴龙华,杨校礼. 广东省东江河流系统健康诊断体系构建[J]. 环境保护前沿, 2014, 4: 28-33.
- [2] 鲁庆华,任康乐,周凤玺. 基于偏最小二乘法实现非线性回归分析[J]. 甘肃科技, 2005(11): 146-148.
- [3] 罗批,郭继昌,李镡,等. 基于偏最小二乘回归建模的探讨[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2002(6): 783-786.