

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.013

基于多元统计的西安市河流水质评价及污染源解析

周 及^{1,2},关卫省^{1,2},付林涛³

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 宝鸡市生态环境局凤县分局, 陕西 宝鸡 721700)

摘要:以西安市2009—2017年地表河流水质的逐月监测数据为研究对象,利用多元统计学方法对水质进行综合分析;通过因子分析法探究水中主要污染物及其变化趋势,并分析污染源来源;利用主成分分析法综合评价各个采样点的水质。结果表明:2009—2017年间,24个水质指标可由4~6个主成分描述,方差累计贡献率在78%以上;对西安市河流水质影响最大的指标是有机物和氨氮类;根据主要控制指标的因子载荷,可知2009—2012年间水质整体趋于平稳,2013—2015年间污染加剧,但在2016—2017年又有不同程度的缓解;就采样点的地理位置而言,皂河污染最为严重,而黑河水质整体良好。

关键词:多元统计分析;主成分分析;因子分析;水质评价;污染源解析;西安市

中图分类号:X824;X501 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)02-0079-06

Water quality assessment and pollution source analysis of Xi'an river based on multivariate statistics // ZHOU Ji^{1,2}, GUAN Weisheng^{1,2}, FU Lintao³ (1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Feng County Branch of Baoji Ecological Environment Bureau, Baoji 721700, China)

Abstract: Taking the monthly monitoring data of surface river water quality in Xi'an from 2009 to 2017 as the research object, the comprehensive analysis of water quality is carried out by using multivariate statistical method, the main pollutants in water and their changing trend are explored by factor analysis method, and the sources of pollutants are analyzed. Comprehensive evaluation of water quality at each sampling point is made by principal component analysis. The results show that 24 water quality indicators can be described by 4 to 6 principal components from 2009 to 2017, and the cumulative contribution rate of variance is over 78%. The most influential indexes of Xi'an river water quality are organic matter and ammonia nitrogen. According to the factor load of the main control indicators, it can be seen that the overall water quality tends to be stable from 2009 to 2012, and the pollution intensifies from 2013 to 2015, but there are different degrees of mitigation in 2016 and 2017. In terms of the geographical location of the sampling points, Zaohe River is the most polluted, while the water quality of Heihe River is good as a whole.

Key words: multivariate statistical analysis; principal component analysis; factor analysis; water quality assessment; pollution source analysis; Xi'an City

自20世纪80年代到21世纪初,西安市工业用水量和生活用水量逐年增加,水资源的储备量和需求量大大失衡,水资源的管理及合理利用显得尤为重要^[1]。基于此,越来越多的水质监测项目被应用到实际生产生活中,然而水质监测中复杂冗长的检测指标给数据管理及分析工作带来很大困难。多元统计分析方法由于可以简化数据结构、提取潜在信

息,被广泛应用于水质分析中^[2-3]。Pati等^[4-5]将多元统计技术和水质评价指数结合,确定了研究区域饮用水及农业用水的适宜程度;Zare等^[6]通过研究建立了水质季节质量指数的评价模型。周丰等^[7-8]提出了适用于大尺度、多断面的水质评价方法。蔡广强等^[9]通过研究发现了南方某水库水质时空变化特征。利用多元统计分析的方法研究西安市及周

基金项目:国家自然科学基金(41472220);陕西省自然科学基金(2017JM2014)

作者简介:周及(1992—),女,硕士研究生,研究方向为水污染处理。E-mail: 731682474@qq.com

通信作者:关卫省,教授,博士生导师。E-mail: 100556377@qq.com

边地区的地表河流水质,主要集中在对泾河、灞河、渭河等代表河流的水体污染特征和污染因子来源进行分析^[10-13]。但是,多元统计分析样本数量越多,方法适用性越高,而相关研究受样本数量的局限,无法精确量化河流与河流之间污染的程度对比,无法判别不同年份间污染趋势的变化。

本文收集了西安市地表河流 2009—2017 年的监测数据,从多元统计分析的角度出发,利用因子分析法识别水中主要污染物,探究污染物的逐年变化趋势,初步分析污染物主要来源,并利用主成分综合排序对各个断面的污染情况进行综合评价,旨在为西安市地表水保护和治理提供科学依据和理论基础。

1 材料与方法

1.1 数据资料来源及预处理

通过收集《西安市水资源公报》中实测数据和调研西安市水利局统计资料,得到了 2009—2017 年西安市地表水近 40 个断面的逐月监测数据,选取 COD_{Mn}、BOD、石油类、粪大肠菌群、阴离子表面活性剂、NH₃-N、TN、TP 等 24 个指标为水质指标。采样点覆盖西安市主要河流,包括灞河、渭河、沣河、泾河、黑河、皂河及各个大小渠系,共 1 552 个检测样

本,有效个案 1 221 个,数据统计结果见表 1。在进行因子分析与聚类分析前对数据进行标准化处理,以消除量纲的影响^[14]。分析采用 IBM SPSS statistics 23 软件。

1.2 水质概况

西安市内主要河流有渭河、泾河、灞河、沣河、涝河、黑河、石川河,均属于黄河流域渭河水系^[15]。水资源总量多年平均为 19.73 亿 m³,2017 年全市水资源总量为 24.45 亿 m³^[1]。

依照 GB3838—2002《地表水环境质量标准》按功能区划分类别对西安市境内河流、水库水质进行评价,结果见表 2。2014 年水质污染总体较为严重,2015 年有所好转,但 2016 年综合污染指数上升了 9.8%,整体上 2017 年西安市河流水质污染有所减轻,水质综合污染指数较上年同期下降 19.9%^[1]。从河流角度来说,近几年皂河、新河、泾河、临河污染情况最为严重。

1.3 评价方法

1.3.1 因子分析法

因子分析法是一种降低变量维度的方法,它从研究原始变量相关矩阵出发,把关系复杂的变量归结为少数几个综合因子。在水质分析中,此方法主要用来提取污染因子和识别污染源^[16-17]。作为识

表 1 西安市地表水 2009—2017 年水质指标统计描述

Table 1 Statistical description of water quality indicators of Xi'an surface water from 2009 to 2017

指标	个案数	最小值	最大值	平均值	标准差
水温(℃)	1 552	0.000 00	32.000 0	14.744 000	7.148 500
pH	1 552	6.940 00	9.040 0	7.756 200	0.312 410
DO(mg/L)	1 552	0.100 00	18.900 0	7.023 500	2.988 630
COD _{Mn} (mg/L)	1 552	0.250 00	107.000 0	8.118 600	11.947 150
BOD(mg/L)	1 552	0.950 00	89.000 0	6.183 800	10.711 390
挥发酚(mg/L)	1 552	0.000 00	0.680 0	0.009 620	0.038 102
氰化物(mg/L)	1 552	0.002 00	0.018 0	0.002 030	0.000 537
As(mg/L)	1 221	0.000 20	0.049 7	0.004 299	0.006 892
Hg(mg/L)	1 552	0.000 01	0.001 7	0.000 027	0.000 071
Cr(VI)(mg/L)	1 552	0.002 00	0.013 0	0.002 050	0.000 462
Pb(mg/L)	1 552	0.000 50	0.060 0	0.003 346	0.002 791
Cd(mg/L)	1 552	0.000 05	0.002 0	0.001 210	0.000 764
石油类(mg/L)	1 552	0.005 00	8.980 0	0.258 950	0.560 143
Cu(mg/L)	1 221	0.000 50	0.048 0	0.000 786	0.001 983
Zn(mg/L)	1 221	0.001 40	1.130 0	0.038 538	0.080 088
氟化物(mg/L)	1 221	0.140 00	6.160 0	0.552 200	0.302 800
硫化物(mg/L)	1 221	0.002 50	4.920 0	0.022 419	0.163 740
粪大肠菌群(个)	1 221	1.000 00	20 000 000 000.000 0	66 633 775.120 000	639 314 668.942 000
阴离子表面活性剂(mg/L)	1 221	0.025 00	4.260 0	0.167 390	0.406 666
NH ₃ -N(mg/L)	1 552	0.012 50	52.670 0	4.027 595	7.404 931
COD _{Cr} (mg/L)	1 552	2.500 00	332.000 0	32.619 300	37.054 770
TN(mg/L)	1 221	0.470 00	63.700 0	8.952 870	8.802 751
TP(mg/L)	1 221	0.005 00	7.660 0	0.447 060	0.780 367
Si(mg/L)	1 221	0.000 05	0.009 0	0.000 530	0.001 089

表2 2014—2017年西安市主要河流水质概况

Table 2 Water quality of main rivers in Xi'an from 2014 to 2017

年份	总断面数/个	断面达标数/个	劣V类断面数/个	主要污染指标
2017年	32	16	10	NH ₃ -N、TP
2016年	32	9	12	NH ₃ -N、COD
2015年	32	18	12	TN、TP
2014年	30	5	—	TN

别污染源的有效工具,因子分析还可以量化出污染源的贡献率^[18]。因子分析的一般模型为

$$\begin{cases} X_1 = a_{11}f_1 + a_{12}f_2 + \dots + a_{1m}f_m + \varepsilon_1 \\ X_2 = a_{21}f_1 + a_{22}f_2 + \dots + a_{2m}f_m + \varepsilon_2 \\ \vdots \\ X_p = a_{p1}f_1 + a_{p2}f_2 + \dots + a_{pm}f_m + \varepsilon_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_1, f_2, \dots, f_m ($m \leq p$) 为公因子; a_{ij} 为因子载荷,反映 x_i 和 f_i 之间的相关程度^[19,20]; ε_i 为方程误差。

1.3.2 主成分分析法

主成分分析法 (principal components analysis, PCA) 是利用少数不相关的新变量反映原始变量,通过对新的变量进行排序、分类,解决多变量数据最佳综合简化的问题。利用主成分分析方法调查水质状况,并在此基础上对水质综合指标进行量化排序^[19-21],是主成分分析法在水质评价工作中发挥的最大作用。

近年来,主成分分析法在水环境质量评价应用的原理是,把很多指标参数放入同一个系统,并对这些指标参数进行定量化的分析研究,最终得出的主成分综合得分能够反映水体的水质状况,得分越高,水质污染状况越严重^[20-22]。主成分分析的基本步骤:①计算相关系数阵,检验待分析的变量是否适合做主成分分析;②根据研究问题所选定的初变量的特征判断求主成分的方法;③求协方差阵或相关阵的特征根及对应标准化特征向量;④确定主成分个数;⑤计算各个样品主成分得分。

2 结果与讨论

2.1 因子分析

2.1.1 数据标准化

由于数据量纲和数量级的不同,利用 SPSS 软件分别将 2009—2017 年的原始数据标准化,采用 Z-score 法进行标准化处理:

$$X_i = \frac{x_i - \bar{X}}{S} \quad (2)$$

式中: X_i 为原始变量经过标准化处理的值; x_i 为第 i 年原始数据; \bar{X} 为该年原始数据均值; S 为统计年份的标准差。

2.1.2 因子分析的适合性和相关性检验

各个年份的 KMO 和巴特利特检验结果见表 3, KMO 检验值均 ≥ 0.5 , 并且满足 $P < 0.05$ 的置信区间,达到检验要求,说明提取的主成分对于原始变量的解释程度较高且该分析是客观有效的。近似卡方、自由度和显著性的统计检验结果表明,即使球形假设被拒绝,也可以认为相关系数矩阵与单位矩阵有显著差异,即原数据适用于做因子分析。

表3 2009—2017年因子分析统计检验结果

Table 3 Statistical test results of factor analysis from 2009 to 2017

年份	KMO 检验值	巴特利特检验		
		近似卡方	自由度	显著性
2009年	0.506	1496.998	190	0.000
2010年	0.792	1476.600	210	0.000
2011年	0.779	1459.005	210	0.000
2012年	0.795	1278.155	210	0.000
2013年	0.765	965.133	190	0.000
2014年	0.744	1187.624	190	0.000
2015年	0.743	1398.094	190	0.000
2016年	0.689	670.740	190	0.000
2017年	0.688	1160.917	253	0.000

相关性矩阵中各个变量间的相关系数表明了因子间的相关度,越接近 1,相关度越高。9 年的相关性矩阵计算结果表明,指标 COD_{Cr} 与 COD_{Mn}、粪大肠菌群、NH₃-N、BOD 等指标正相关性很高,均达到 0.9 以上;而指标 DO 与 NH₃-N、COD_{Cr}、粪大肠菌群这些指标呈极大的负相关,其绝对值均达到 0.9 以上。通过各个年份的相关性矩阵可以看出因子间的相关程度很高,即适用于因子分析及降维处理。

2.1.3 提取公因子

通过 SPSS 对历年监测数据进行降维处理,从原有个数较多的变量中提取少数几个不可观测的因子,以反映历年监测指标的基本信息。并且根据变量间的相关性进行分组,从变量组内提取少数的潜在因子来反映本组的特性,从而使这些因子能够概括和归纳原有观测变量的大部分信息,解释变量的基本结构^[23]。

表 4 中,利用主成分分析法提取 2009—2017 年 24 个监测指标的主成分,2009 年、2011 年、2012 年、2014 年、2015 年提取了 4 个主成分,2010 年、2017 年提取了 5 个主成分,2013 年、2016 年提取了 6 个主成分,每个主成分下因子得分较高的控制指标也具有明显的分离度。结果显示原本的 24 个指标可以由 4~6 个主成分因子所描述,方差累计贡献率均在 78% 以上,说明提取的主成分因子可较好地描述原本庞大的数据。

表4 2009—2017年提取的公因子

Table 4 Common factors extracted from 2009 to 2017

年份	提取的主成分个数	方差累计贡献率/%	各年份水质主要控制指标			
			F_1	F_2	F_3	F_4
2009年	4	87.249	粪大肠菌群、Cu	氟化物、As	氟化物、硫化物	pH、Hg
2010年	5	84.163	COD _{Cr} 、阴离子表面活性剂	硫化物、Hg	Pb、粪大肠菌群	pH、水温
2011年	4	86.431	TP、NH ₃ -N	氟化物、Hg	As、Si	Cr(VI)、水温
2012年	4	83.771	COD _{Mn} 、COD _{Cr}	Cr(VI)、Cu	硫化物、Zn	Si、As
2013年	6	86.872	粪大肠菌群、NH ₃ -N	Zn、TP	Si、Hg	Cu
2014年	4	81.680	NH ₃ -N、COD _{Cr}	氟化物、水温	Hg、氟化物	As、Si
2015年	4	84.027	NH ₃ -N、COD _{Cr}	pH、水温	Si、Hg	Zn
2016年	6	80.642	COD _{Mn} 、COD _{Cr}	pH、TP	As、硫化物	Cr(VI)、Hg
2017年	5	78.253	NH ₃ -N、COD _{Cr}	Cd、Pb	Cr(VI)、Si	pH、氟化物

2.1.4 因子旋转

为更好地对公因子进行解释,本文对因子载荷矩阵做出正交变换,即在对应坐标系进行投影,从而使旋转后的因子载荷矩阵结构简化。利用凯撒正态化最大方差法对因子载荷进行旋转,将得到的结果由大到小进行排序,得到旋转后的成分矩阵。由于对每年的数据进行因子分析后得到的主成分含义不同, F_5 、 F_6 贡献率数小,因此主要选取前4个主成分 $F_1 \sim F_4$ 来研究。

2.1.5 污染源识别

从表4可得2009—2017年各个主成分表征的污染源:第一主成分(F_1)中COD_{Mn}、COD_{Cr}、NH₃-N具有较高的因子载荷,指示的是有机物污染源;氟化物、硫化物、Hg在 F_2 中占有较大的因子载荷,即 F_2 指示的是燃煤动力和冶金工业的污染源; F_3 中As、Si占比较大,指示的是电子和冶炼工业的污染源; F_4 则指示的是化工产业^[23-24]。总体来说,西安市的地表河流受有机物污染最为严重,其次是工业生产中产生的一些对环境和人体有很大损害的有毒物质。

初始因子载荷矩阵用于表征监测水质指标与主成分的相关程度,用于解释各个主成分变量的变异情况,其绝对值越接近1,表明相关程度越高,则该指标可以作为评价水质的主要控制指标^[10,24-25]。根据这一原则,并且结合指标所要表征的全面性以及避免重复,选取以下6个指标作为西安市河流的主要控制指标:COD_{Cr}、阴离子表面活性剂、NH₃-N、石油类、氟化物、硫化物,并且根据这6个指标与其主成分的因子载荷值绘制图1,评价这些指标9年间对主成分因子的影响情况。

由图1可知,2009—2017年COD_{Cr}、NH₃-N、阴离子表面活性剂3个指标均维持了较高的因子载荷。石油类污染物在2009—2015年间波动较小,2016年显著下降并达到最小值;氟化物基本维持较

低因子载荷,在2013—2014年间波动明显。综上,西安市河流水质受有机类、NH₃-N、阴离子表面活性剂污染最为严重,2011—2015年综合污染情况严重,2016年水质最好。

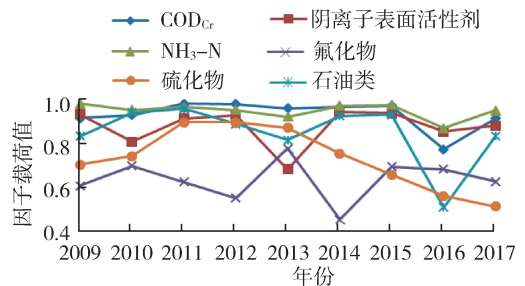


图1 2009—2017年污染物主要控制指标变化趋势

Fig. 1 Change trend of main pollutant control indicators from 2009 to 2017

2.2 主成分分析

2.2.1 主成分得分计算

若从原 P 个指标中提取了 m 个主成分(式(1)),则主成分得分计算公式为

$$\begin{cases} Y_1 = l_{11}X_1 + l_{12}X_2 + \cdots + l_{1m}X_m \\ Y_2 = l_{21}X_1 + l_{22}X_2 + \cdots + l_{2m}X_m \\ \vdots \\ Y_m = l_{p1}X_1 + l_{p2}X_2 + \cdots + l_{pm}X_m \end{cases} \quad (3)$$

式中: Y_i 为第 i 个主成分得分; X_i 为第 i 年原始变量值; $l_{i1}, l_{i2}, \cdots, l_{im}$ 为 X 协方差阵特征值对应特征向量。

将每年36~40个水质样品的原始变量值标准化处理后代入式(3),计算得出监测断面的各主成分得分,给予水质污染程度的定量化描述;各个主成分下的得分越大,说明受此主成分因子的影响越大,综合得分越高,表明水体受污染的程度越严重^[26-27]。

将各个主成分的特征根作权数,对每个主成分进行加权平均即得综合得分,主成分综合评定函数 Y 表示每年各断面综合污染情况。

$$Y = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n} Y_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n} Y_2 + \dots + \frac{\lambda_n}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n} Y_n \quad (4)$$

式中: Y_i 为各个断面在第 i 主成分下的得分情况; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 为每个主成分的特征根。

根据 2009—2017 年断面主成分综合得分计算结果,北石桥综合得分在 2009 年、2011 年、2014 年、2015 年得分最高,其中 2014 年与 2015 年得分高达 8.08、9.11。其次是丈八沟,综合得分在 2017 年达到最高,2009 年、2014 年位于第二;再次是雁秋门,综合得分在 2010 年、2012 年达到最高。小北门在 2009 年、2012 年得分最低,临河入渭在 2015 年、2017 年得分最低,其中小北门断面在 2009 年得分最低可达 0.11。

2.2.2 综合评价

a. 水质空间分布特征。各断面的主成分综合得分越高、排名越靠前,代表断面污染越严重。2009—2017 年主成分综合得分排名前 10 的断面综合得分情况见表 5。

由表 5 可知,北石桥除 2016 年、2017 年断流外,其余年份均为综合得分最高断面,其次,雁秋门、农场西站、丈八沟,说明这些断面综合污染最严重的,其中农场西站、雁秋门、丈八沟均属于皂河水系,北石桥属于渠系。文中未列出的断面艾蒿坪在 2009 年主成分综合得分最低,为 -2.209,田峪口在 2011 年得分达到最低,为 -2.191,它们均属于黑河水系。说明西安市主要地表水系中皂河污染最严重,黑河污染状况最轻。

b. 点源污染解析。北石桥、雁秋门、农场西站和丈八沟这 4 个主成分综合得分较高的断面,分析这几个断面第一、第二、第三等等主成分的得分,得出水质主要污染源如下:断面北石桥(2016—2017

年无水)在 2009—2015 年在第一主成分下得分均为正值,说明与 F_1 正相关,并且得分值较大,表明采样点北石桥的水质受 F_1 表征的氨氮类、有机类污染物影响最为显著; F_2 下的得分在 2009—2011 年为正值,在 2012—2015 年为负值,说明此采样点与 F_2 在前 3 年正相关,后面几年为负相关,说明北石桥 2009—2011 年受氟、硫化物和石油类污染物影响较为严重,而后面 4 年有所缓解^[27]。断面雁秋门在这 9 年间均在 F_1 上有较高得分,说明此采样点受氨氮和有机污染物影响严重,而在 F_2 、 F_3 上得分基本上为负值,因此可以看出雁秋门受氟、硫化物、砷硒、石油类污染物的影响较弱。同理,可知断面农场西站与丈八沟这两个采样点均受有机物和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染最为严重,其他污染物影响不太显著。

3 结 论

a. 通过降维处理将 24 个水质指标综合为 4~6 个主成分,且降维后主成分的方差累计贡献率均在 78% 以上,能较好地反映原水质指标的信息,有效简化监测数据。

b. 采用因子分析法得到了因子载荷较高的 7 个水质指标为: COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 、阴离子表面活性剂、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、石油类、氟化物、硫化物。通过分析 7 个水质指标的变化,发现西安市地表河流 2011 年到 2015 年综合污染情况严重,2016 年水质最好。

c. 通过主成分分析法,得到了 35~40 个监测断面的各主成分得分,其中北石桥、农场西站、雁秋门和丈八沟的综合得分最高,艾蒿坪、田峪口综合得分最低。表明西安市主要地表水系中皂河污染最严重,黑河污染程度最轻。通过分析得分最高的断面,发现有机物、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 对地表河流水质影响最为显著。

表 5 2009—2017 年污染最严重断面的主成分得分值

Table 5 The principal component score of the most polluted section in 2009—2017

断 面	主成分得分值								
	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
北石桥	7.32	4.95	7.80	4.28	4.07	8.08	9.11		
丈八沟	5.02	3.38	3.88	3.67	2.44	4.20	0.55	0.85	4.31
雁秋门	4.90	5.41	5.46	5.00	3.74	3.11	1.06	0.75	1.43
贾家滩	2.86	4.35	5.48	4.54	1.07	0.43	2.13	0.62	0.27
西兴隆	2.84	1.56	2.91	2.23	1.14	0.62	1.59	1.28	1.42
临河入渭口	0.69	-0.54	0.240	0.24	1.24	0.49	0.29	2.24	0.88
耿镇桥	0.48	-0.17	0.37	0.03	0.45	0.08	-0.20	0.53	0.32
天江人渡	0.36	0.40	0.32	0.46	1.02	0.66	0.53	1.20	0.69
农场西站	-0.46	4.66	4.27	4.71	5.04	3.26	2.61	2.82	2.27
新河入渭口	-0.70	0.49	0.84	1.65	0.97	1.16	1.83	1.89	1.99

参考文献:

- [1] 西安市水务局. 西安市 2017 年水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [2] 何艳冰, 陈佳, 黄晓军. 西安城市边缘区失地农民社区恢复力测度与影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(3): 126-136. (HE Yanbing, CHEN Jia, HUANG Xiaojun. Measurement and influencing factors of land-lost farmers' community resilience in urban fringe of Xi'an [J]. China Population Resources and Environment, 2019, 29(3): 126-136. (in Chinese))
- [3] 李一平, 施媛媛, 姜龙, 等. 地表水环境数学模型研究进展[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 1-8. (LI Yiping, SHI Yuanyuan, JIANG Long, et al. Advances in surface water environment numerical models [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 1-8. (in Chinese))
- [4] SANGEETA P, MIHIR K, DASH C K, et al. Assessment of water quality using multivariate statistical techniques in the coastal region of Visakhapatnam, India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(10): 6385-6402.
- [5] MOSTAFAEI A. Application of multivariate statistical methods and water-quality index to evaluation of water quality in the Kashkan River [J]. Environmental Management, 2014, 53(4): 865-881.
- [6] ZARE G A, SHEIKH V, SADODDIN A. Assessment of seasonal variations of chemical characteristics in surface water using multivariate statistical methods [J]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2011, 8(3): 581-592.
- [7] 周丰, 郭怀成, 刘永, 等. 基于多元统计分析和 RBFNNs 的水质评价方法[J]. 环境科学学报, 2007, 27(5): 846-853. (ZHOU Feng, GUO Huaicheng, LIU Yong, et al. A new approach for water quality assessment based on multivariate statistical analysis and radial basis function neural networks [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(5): 846-853. (in Chinese))
- [8] 富天乙, 邹志红, 王晓静. 基于多元统计和水质标识指数的辽阳太子河水质评价研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 473-480. (FU Tianyi, ZOU Zhihong, WANG Xiaojing. Water quality assessment for Taizi River watershed in Liaoyang section based on multivariate statistical analysis and water quality identification index [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(2): 473-480. (in Chinese))
- [9] 蔡广强, 张金松, 刘彤宙, 等. 基于主成分分析的中国南方某市水库水质评价[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(增刊 2): 88-94. (CAI Guangqiang, ZHANG Jinsong, LIU Tongzhou, et al. Water quality evaluation of reservoirs in the south of China based on principal component analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(Sup2): 88-94. (in Chinese))
- [10] 杨学福, 王蕾, 关建玲, 等. 基于多元统计分析的渭河西咸段水质评价[J]. 环境工程学报, 2016, 10(3): 1560-1565. (YANG Xuefu, WANG Lei, GUAN Jianling, et al. Comprehensive assessment of water quality in Xi'an-Xianyang section of Weihe River based on multivariate analysis method [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(3): 1560-1565. (in Chinese))
- [11] 杜麦, 陈小威, 王颖. 基于多元统计分析的泸灞河水质污染特征研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 88-92. (DU Mai, CHEN Xiaowei, WANG Ying. Study on water pollution characteristics of Chanba River based on multivariate statistical analysis [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(6): 88-92. (in Chinese))
- [12] 赵海萍, 陈旺, 李清雪, 等. 漳河上游水质时空分异特征及污染源识别[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 47-54. (ZHAO Haiping, CHEN Wang, LI Qingxue, et al. Spatio-temporal variation of water quality and pollutant source identification in upper reaches of Zhanghe River [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 47-54. (in Chinese))
- [13] 赵淑兰. 泸灞河流域水功能区纳污能力及入河污染物总量控制分析[J]. 陕西水利, 2012(5): 146-148. (ZHAO Shulan. Pollution capacity of water function area in Weihe River Basin analysis of the total amount of pollutants entering the river [J]. Shaanxi Water Resources, 2012(5): 146-148. (in Chinese))
- [14] 邱瑀, 卢诚, 徐泽, 等. 湟水河流域水质时空变化特征及其污染源解析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 2829-2837. (QIU Yu, LU Cheng, XU Ze, et al. Spatio-temporal variation characteristics and water pollution sources in the Huangshui River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(8): 2829-2837. (in Chinese))
- [15] 张静, 秦公伟. 西安市用水结构变化及驱动力分析[J]. 水资源保护, 2012, 28(4): 87-90. (ZHANG Jing, QIN Gongwei. Driving forces of change of water consumption structure in Xi'an City [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4): 87-90. (in Chinese))
- [16] MALIK A, TAULER R. Extension and application of multivariate curve resolution-alternating least squares to four-way quadrilinear data-obtained in the investigation of pollution patterns on Yamuna River, India: a case study [J]. Analytica Chimica Acta, 2013, 794(1): 20-28.
- [17] LIAO S W, SHEU J Y, CHEN J J, et al. Water quality assessment and apportionment source of pollution from neighbouring rivers in the Tapeng Lagoon (Taiwan) using multivariate analysis: a case study [J]. Water Science and Technology, 2007, 54(11/12): 47-55.

(下转第 104 页)

(1):260-266. (DANG Jianhua, WAHAP Halik, ZHANG Yuping, et al. Coupling coordinated development of population, economic and ecological system in the Turpan

Area of China [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35 (1):260-266. (in Chinese))

(收稿日期:2019-03-11 编辑:王 芳)

(上接第 84 页)

- [18] LIU C H, TIAN F L, CHEN J W. A comparative study on source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Daliao River, China: positive matrix factorization and factor analysis with non-negative constraints [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (10): 915-920.
- [19] 汪东华, 马艳梅. 多元统计分析与 SPSS 应用 [M]. 2 版. 上海: 华东理工大学出版社, 2018.
- [20] YANG L P, MEI K, LIU X M, et al. Spatial distribution and source apportionment of water pollution in different administrative zones of Wen-Rui-Tang (WRT) River Watershed, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(8): 5341-5352.
- [21] 孙立鑫, 林山杉. 基于 WASP 模型的农田退水对查干湖水水质影响的评价 [J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 88-94. (SUN Lixin, LIN Shanshan. Evaluation on impact of farmland withdrawal water on water quality of Chagan Lake based on WASP model [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 88-94. (in Chinese))
- [22] 刘潇, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价 [J]. 中国环境科学, 2015, 35 (10): 3187-3192. (LIU Xiao, XUE Ying, JI Yupeng, et al. An assessment of water quality in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on principal component analysis [J]. China Environmental Science,

2015, 35(10): 3187-3192. (in Chinese))

- [23] 孔海燕, 安国安, 史淑娟, 等. 以 PCA 分析为基础的水环境质量综合评价研究 [J]. 污染防治技术, 2019, 32 (1): 6-8. (KONG Haiyan, AN Guoan, SHI Shujuan, et al. Comprehensive evaluation of water environmental quality based on PCA analysis [J]. Pollution Control Technology, 2019, 32(1): 6-8. (in Chinese))
- [24] 向东进, 李宏伟, 刘小雅. 实用多元统计分析 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2005.
- [25] 李斌, 张鑫, 李娜, 等. 北京市春夏挥发性有机物的污染特征及源解析 [J]. 环境化学, 2018, 37 (11): 2410-2418. (LI Bin, ZHANG Xin, LI Na, et al. Pollution characteristics and source analysis of volatile organic compounds in spring and summer in Beijing [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37 (11): 2410-2418. (in Chinese))
- [26] 郝利霞. 城市河流的污染特性分析研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [27] 徐光宇, 柴国平, 徐明德, 等. 主成分分析法在汾河太原城区段水质评价中的应用 [J]. 环境工程, 2014, 32 (6): 122-124. (XU Guangyu, CHAI Guoping, XU Mingde, et al. Application of principal component analysis in water quality evaluation of Fenhe River in Taiyuan City [J]. Environmental Engineering, 2014, 32 (6): 122-124. (in Chinese))

(收稿日期:2019-10-21 编辑:彭桃英)

(上接第 96 页)

- [16] 朱党生, 张建永, 李扬, 等. 水生态保护与修复规划关键技术 [J]. 水资源保护, 2011, 27 (5): 59-64. (ZHU Dangsheng, ZHANG Jianyong, LI Yang, et al. Key technologies of water ecology protection and rehabilitation planning [J]. Water Resources Protection, 2011, 27 (5): 59-64. (in Chinese))
- [17] 徐伟, 董增川, 罗晓丽, 等. 基于改进 7Q10 法的滦河生态流量分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2016, 44 (5): 454-457. (XU Wei, DONG Zengchuan, LUO Xiaoli, et al. Analysis of ecological flow in Luanhe River based on improved 7Q10 method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5): 454-457. (in Chinese))
- [18] 涂晶晶, 陈森林, 艾学山, 等. 河流生态流量特征图及生态流量评价方法 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (1): 99-105. (TU Jingjing, CHEN Senlin, AI Xueshan, et al. Diagram of river ecological flow characteristics and evaluation method of ecological flow [J]. Water Resources

Protection, 2015, 31(1): 99-105. (in Chinese))

- [19] 陈昂. 环境流量研究的前沿问题与挑战 [J]. 水利水电科技进展, 2019, 39 (2): 1-6. (CHEN Ang. Frontiers and challenges of environmental flow research [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39 (2): 1-6. (in Chinese))
- [20] 尚松浩. 确定河流生态流量的几种湿周法比较 [J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (4): 41-44. (SHANG Songhao. Comparison of several wet-cycle methods for determining river ecological discharge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31 (4): 41-44. (in Chinese))
- [21] 黄初龙. 福建省社会经济转型期水资源供需平衡趋势分析 [J]. 水资源保护, 2010, 26 (3): 13-17. (HUANG Chulong. Analysis on the trend of water resources supply and demand balance in the period of socio-economic transition in Fujian Province [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(3): 13-17. (in Chinese))

(收稿日期:2019-08-04 编辑:彭桃英)