

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.007

2010—2019 年黄河干流兰州和白银段水质时空变化特征

徐发凯,何 丽,王一帆,何 昌,牛 毓,刘文君,宋伟宏

(甘肃省环境监测中心站,甘肃 兰州 730020)

摘要:基于综合污染指数法,结合单因子污染指数法及累积距平法等多种统计分析方法,定量分析了黄河流域兰州和白银段 7 个监测断面水质时空变化特征。结果表明:兰州段和白银段 2010—2019 年水质综合状况良好,各监测断面综合污染指数均在 0.25 以下;监测断面水质空间差异显著($P < 0.05$),兰州段整体水质优于白银段,扶和桥断面水质显著优于除新城桥外的其他断面($P < 0.05$);季节方面,兰州段综合污染指数在春、冬季高于夏、秋季($P < 0.05$),白银段水质季节性波动不明显;兰州段水质明显改善始于 2014 年,且经历了综合污染指数平稳下降(2014—2017 年)和快速下降(2018—2019 年)两个阶段;白银段水质发生转变时间滞后于兰州段(2016 年),2017—2019 年水质明显好转。

关键词:水质;综合污染指数法;时间序列分析;黄河干流兰州段;黄河干流白银段

中图分类号:TV213.4;X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)04-0044-07

Temporal and spatial variation characteristics of water quality in Lanzhou and Baiyin section of the Yellow River mainstream from 2010 to 2019//XU Fakai, HE Li, WANG Yifan, HE Chang, NIU Yu, LIU Wenjun, SONG Weihong
(Gansu Environmental Monitoring Center, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Based on the comprehensive pollution index method, combined with single factor pollution index method, cumulative anomaly method and other statistical analysis methods, the temporal and spatial variation characteristics of water quality of 7 sections in Lanzhou and Baiyin section of the Yellow River mainstream were quantitatively analyzed. The results show that the comprehensive water quality of Lanzhou and Baiyin sections was good from 2010 to 2019, and the comprehensive pollution indexes of each section were all below 0.25. The water quality of each section had significant spatial difference ($P < 0.05$) and the overall water quality of Lanzhou section was better than Baiyin section. The water quality of Fuhe Bridge section was significantly better than other sections except Xincheng Bridge ($P < 0.05$). In terms of season, the comprehensive pollution indexes of water quality in spring and winter were higher than those in summer and autumn ($P < 0.05$) in Lanzhou section while the seasonal fluctuation of water quality in Baiyin section was not obvious. The water quality of Lanzhou section notably improved from 2014 and experienced two periods including the stable decline period of comprehensive pollution index (2014-2017) and rapid decline period of comprehensive pollution index (2018-2019). The water quality change time of Baiyin section lagged behind Lanzhou section (2016) and the water quality improved significantly from 2017 to 2019.

Key words: water quality; comprehensive pollution index method; time series analysis; Lanzhou section of the Yellow River mainstream; Baiyin section of the Yellow River mainstream

黄河是我国第二大河,全长约 5 464 km,流域面积为 752 443 km²,甘肃是黄河流经的第三个省份。黄河干流甘肃段处于黄河上游,流域面积为 14.59 万 km²,其地理位置及区域特性对于黄河污水治理战略部署至关重要。过去由于甘肃段污水处

理压力较大,大量的工业废水、生活污水在未得到有效处理的情况下直接排入黄河,严重影响了甘肃社会经济的发展,甚至限制了黄河中下游地区城乡居民的生活用水和工农业生产用水^[1-2]。随着甘肃省政府对于流域污染防治工作越来越重视,相继出台

基金项目:国家重点研发计划(2019YFD1100103);甘肃省环境监测中心站 2020 年度计划(GHJ-2020-01)

作者简介:徐发凯(1976—),男,高级工程师,主要从事环境监测与污染治理研究。E-mail: 26622638@qq.com

通信作者:宋伟宏(1968—),男,教授级高级工程师,主要从事环境监测与污染治理研究。E-mail: song@gsemc.cn

了多项政策来统筹治理工作,并建立了省控监测断面网络观测水质的动态变化。经过长期治理行动,甘肃省地表水水质已得到显著改善^[3-5]。鉴于此,阐明黄河流域甘肃段的水质时空变化特征,对于今后明晰流域污染治理方向及制定生态恢复策略具有重要意义。

水质评价是对水体质量进行定性或定量划分的有效方法,是实现合理开发、配置水资源的重要手段。国内外主流的水质评价方法有很多,常用的有污染指数法(单因子、综合污染指数)^[6-9]、内梅罗水污染指数法^[10-12]、主成分分析法^[13-15]及灰色系统评价法^[16-17]等。其中,内梅罗水污染指数法是兼顾极值或最大值的计权型指数计算方法,多应用于地下水污染评价;主成分分析法具有简化计算和综合水质指标信息的优势,适用于多指标、短序列的监测数据分析;而综合污染指数法运算过程简便,其结果能够准确地反映水质综合状况,在地表水水质时空变化分析中应用广泛^[18-21]。

本文基于2010—2019年黄河干流兰州段和白银段7个监测断面水质逐月监测数据,采用综合污染指数法对水质进行评价,并结合方差分析及累积距平法,分析黄河流域兰州段和白银段监测断面水质时空变化特征,以期为甘肃省流域污染治理提供参考。

1 研究区概况

兰州市和白银市位于甘肃省中部,是黄河上游极为重要的重工业城市。据不完全统计,黄河干流甘肃段年排放废水超过2.5亿t,其中生活污水排放量接近1.5亿t,约占废水排放总量的60%。黄河干流兰州段废水排放量约为1.75亿t,约占甘肃段的70%;白银段废水排放量约为0.3亿t,占甘肃段的12%左右^[22]。由于白银距兰州很近,因此白银段上游输入的污水压力较大,河水自净程度较低。

兰州市位于陇西黄土高原西部,是青藏高原向黄土高原的过渡地区,年平均气温在10℃左右,年平均降水量约为300mm,主要集中在6—9月。黄河兰州段全长152km,其中流经市区45km,提供了兰州市大部分的生活用水和生产用水。黄河兰州段共设扶和桥、湟水桥、新城桥、包兰桥和什川桥5个地表水监测断面,其中扶河桥、包兰桥、什川桥均为国控断面,新城桥、湟水桥为省控断面,什川桥为兰州市出境监测断面。

白银市地处黄土高原和腾格里沙漠过渡地带,年平均气温为6~9℃,年降水量在180~450mm之间,雨季集中在7—9月。白银段是黄河甘肃段的末

端,黄河从西峡口进入白银市,呈“S”形先后流经白银区、靖远县、平川区、景泰县,于黑山峡下北长滩乌龙漩口出境进入宁夏,全长258km,占甘肃总流程的28.3%。白银市年均入境流量293亿m³,流域面积1.47万km²。目前黄河白银段共设有青城桥、靖远桥和五佛寺断面3个地表水监测国控断面,其中青城桥为白银市入境断面,五佛寺为出境断面。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 综合污染指数法

综合污染指数是各项单因子污染指数之和与单因子个数的比值,能够全面、准确地反映水质的综合状况^[7]。本文依据GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中Ⅲ类水质标准,先采用式(1)计算单因子污染指数,然后采用式(2)计算综合污染指数^[18]。

$$R_i = \rho_i / \rho_{si} \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (2)$$

式中: R_i 为水质因子*i*的污染指数; R 为综合污染指数; ρ_i 为水质因子*i*的实测质量浓度,mg/L; ρ_{si} 为水质因子*i*Ⅲ类水标准的质量浓度,mg/L; n 为水质因子个数。

2.1.2 单因素方差分析法与最小显著差异*t*检验

单因素方差分析能够直接反映样本组间的整体均值差异,而最小显著差异*t*检验可以定量分析样本组间的具体差异。本文采用单因素方差分析法判定水质在监测断面、季节及年度方面是否存在显著性差异,采用最小显著差异*t*检验定量分析监测断面间、季节间与年度间的具体差异。

2.1.3 累积距平法

时间序列分析能够准确地反映观测变量的变化规律及波动特点,本文采用时间序列分析中常用的累积距平法分析黄河流域兰州段和白银段7个监测断面水质2010—2019年的综合污染指数变化趋势。累积距平法是一种由累积分布曲线判断变化趋势的分析方法^[18],能直观地描述观测变量在时间尺度上的阶段性特征,计算公式为

$$L_j = \sum_{j=1}^m R_j - \bar{R} \quad (3)$$

式中: L_j 为第*j*年的距平累积值; R_j 为第*j*年的综合污染指数; $\bar{R}$ 为各断面综合污染指数序列2010—2019年的平均值。

采用R语言软件对以上数据进行分析,其中单因素方差分析采用AOV函数计算,最小显著差异*t*检验采用agricolae包中LSD.test函数计算,绘图则

在 ggplot2 包中完成。

2.2 数据来源

采用2010—2019年兰州段和白银段7个监测断面(不包括湟水桥断面,该断面在黄河一级支流湟水河上,不在黄河干流上)水质逐月数据,监测指标包括水温、pH值、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD)、5日生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、铜、锌、氟化物、硒、砷、汞、铬、铅、氰化物、挥发酚、石油类、阴离子表面活性剂和硫化物等共20项。以上指标测定均依照GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的监测标准执行。

3 结果与分析

3.1 水质的空间变化特征

2010—2019年兰州段和白银段整体水质状况良好,属于Ⅲ类水范畴,综合污染指数均在0.25以下。监测断面水质按综合污染指数从小到大排序为扶和桥(0.171)、新城桥(0.188)、包兰桥(0.201)、什川桥(0.203)、青城桥(0.209)、五佛寺(0.212)、靖远桥(0.217),且存在显著的空间差异($P < 0.01$),即兰州段综合污染指数低于白银段,上游断面水质优于下游断面。最小显著差异 t 检验结果表明扶和桥断面水质最优,综合污染指数除了与新城桥断面无显著差异外,显著低于其他断面($P < 0.05$),而包兰桥、什川桥、青城桥、靖远桥和五佛寺

这5个断面水质较为接近,未达到显著差异水平。

因甘肃段水体化学污染严重,故选用COD_{Mn}、BOD₅、NH₃-N和TP4个指标,分析兰州段和白银段监测断面2010—2019年单因子污染指数变化特征(图1)。由图1可知:①各断面COD_{Mn}污染指数总体均呈下降趋势,其中兰州段监测断面(扶和桥、新城桥、包兰桥和什川桥)2010—2013年呈上升趋势,2014—2019年逐渐下降;白银段监测断面(青城桥、靖远桥、五佛寺)呈缓慢下降趋势,整体高于兰州段各断面。②各断面BOD₅污染指数在2010年比较接近,均在0.5~0.6之间,2010—2019年兰州段4个断面均呈显著下降趋势;白银段监测断面在2010—2014年较为稳定,明显高于兰州段监测断面,2015—2019年出现显著降低,2017年起兰州段与白银段监测断面污染指数较为接近。③2010—2019年各断面NH₃-N污染指数变化趋势较为一致,均呈下降趋势,其中兰州段新城桥及扶和桥断面NH₃-N污染指数明显低于其他5个断面。④TP污染指数在2010—2019年的变化趋势与BOD₅类似,空间上变化趋势存在明显的两极分化。白银段3个断面TP污染指数较高,呈先上升后下降趋势,而兰州段各监测断面要显著低于白银段监测断面,并且在时间上变化趋势与白银段相反,呈“V”形趋势变化,并于2015年达到最低值。

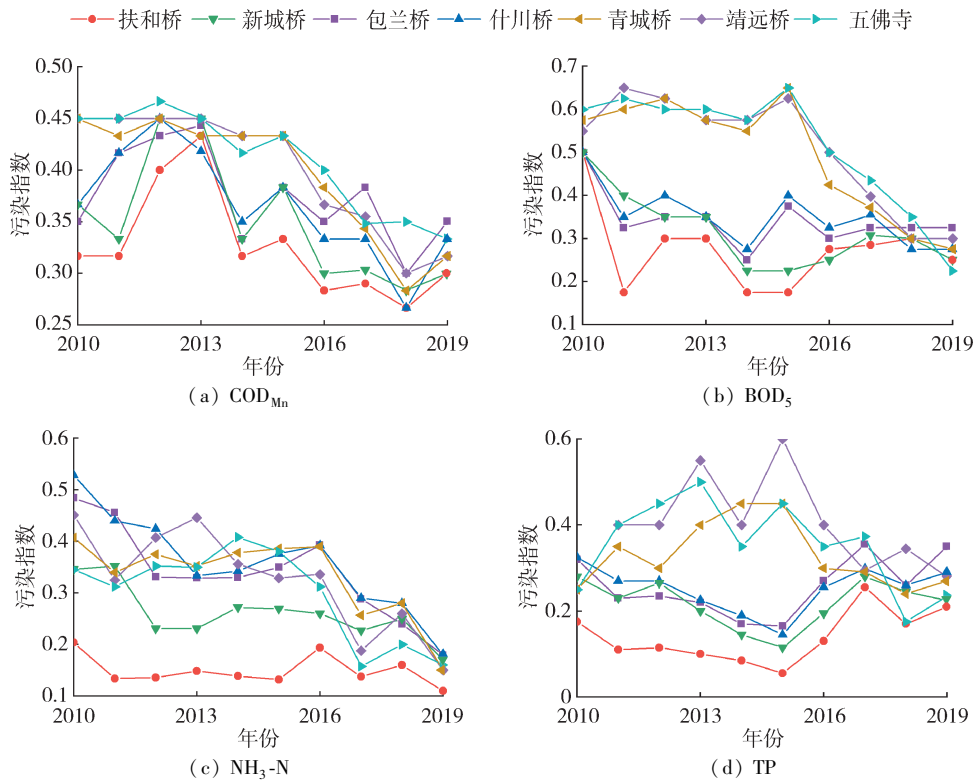


图1 单因子污染指数空间变化特征

Fig.1 Spatial variation characteristics of single factor pollution index

3.2 水质的季节变化特征

将 2010—2019 年水质逐月数据按 3—5 月(春季)、6—8 月(夏季)、9—11 月(秋季)、12 月至次年 2 月(冬)时间段进行季节划分,分析兰州段和白银段监测断面水质的季节变化特征。结果表明,兰州段监测断面综合污染指数从小到大顺序为秋季、夏季、春季、冬季,白银段为秋季、春季、夏季、冬季,兰州段水质季节变化规律与白银段存在差异。兰州段水质具有显著的季节性差异($P < 0.01$),即冬季综合污染指数最高(0.19),秋季最低(0.17),春、冬季综合污染指数显著高于夏、秋季($P < 0.05$);白银段综合污染指数季节差异未达到显著水平($P = 0.776$),具体表现为夏、冬季综合污染指数略高于春、秋季。

以 COD_{Mn} 、 BOD_5 、 NH_3-N 、TP、COD 和氟化物 6 个化学指标为例,利用单因素方差分析法进一步分析兰州段水质主要化学污染物的季节差异,结果如表 1 所示。表 1 表明,兰州段各监测断面有明显季节性差异的化学指标并不统一。位于最上游的扶河桥断面 TP 呈现季节波动($P < 0.05$),而位于它下游的新城桥断面化学指标不随季节波动。包兰桥断面 COD_{Mn} 和 NH_3-N 具有明显的季节趋势($P < 0.01$),而最下游的什川桥断面则为 BOD_5 ($P < 0.05$) 和 NH_3-N ($P < 0.01$) 季节性差异最大。

与兰州段水质状况类似,白银段各监测断面水质化学污染物的季节特征也表现出多元化(表 2)。上游的青城桥断面以 BOD_5 ($P < 0.05$) 和 NH_3-N ($P < 0.01$) 的季节变化为主,位于中间的靖远桥断面 NH_3-N ($P < 0.01$)、TP ($P < 0.05$) 及 COD ($P <$

0.05)3 个指标均呈现出季节差异。而最下游的五佛寺断面化学指标在全年内较为稳定,化学污染物受季节影响较小。

3.3 水质随时间变化趋势

图 2 为兰州段和白银段监测断面 2010—2019 年的综合污染指数累积距平曲线。兰州段监测断面水质变化趋势为单峰“几”字形,并具有明显的阶段性特征。2010—2013 年各监测断面综合污染指数距平均为正数,累积距平曲线呈显著上升趋势,表明该

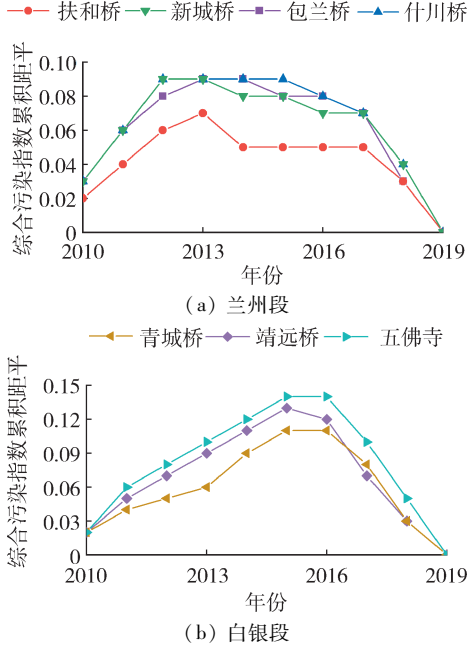


图 2 兰州段和白银段监测断面综合污染指数累积距平曲线
Fig. 2 Cumulative anomaly curve of comprehensive pollution index of each section in Lanzhou and Baiyin sections

表 1 兰州段监测断面水质主要化学指标季节差异

Table 1 Seasonal differences of main chemical pollutants in monitoring section of Lanzhou section

指标	F 值				P 值			
	扶和桥	新城桥	包兰桥	什川桥	扶和桥	新城桥	包兰桥	什川桥
COD_{Mn}	0.798	0.678	4.788	4.788	0.504	0.572	<0.01	0.682
BOD_5	1.034	2.417	1.467	1.467	0.391	0.085	0.242	<0.05
NH_3-N	0.520	0.736	4.948	4.948	0.672	0.538	<0.01	<0.01
TP	3.250	0.885	1.248	1.248	<0.05	0.459	0.309	0.146
COD	0.120	1.202	0.584	0.584	0.947	0.325	0.630	0.286
氟化物	0.482	0.200	0.478	0.478	0.697	0.895	0.700	0.301

表 2 白银段监测断面水质主要化学指标季节差异

Table 2 Seasonal differences of main chemical pollutants in monitoring section of Baiyin section

指标	F 值			P 值		
	青城桥	靖远桥	五佛寺	青城桥	靖远桥	五佛寺
COD_{Mn}	0.082	0.856	0.783	0.969	0.474	0.512
BOD_5	3.225	2.410	2.326	<0.05	0.085	0.093
NH_3-N	5.378	6.668	1.471	<0.01	<0.01	0.241
TP	2.511	3.100	0.933	0.076	<0.05	0.436
COD	1.207	4.328	2.125	0.323	<0.05	0.116
氟化物	1.584	0.914	1.333	0.213	0.445	0.281

时段各监测断面水质并无明显的好转,综合污染指数要远高于2010—2019年平均水平;2014—2017年各监测断面水质变化开始出现拐点,综合污染指数距平由正值转变为0或负值,累积距平曲线则呈缓慢下降趋势,表明该时间段各监测断面水质开始逐渐转好,综合污染指数则接近2010—2019年的平均水平;2018—2019年兰州段监测断面水质得到显著改善,综合污染指数距平持续为负值,累积距平曲线则呈显著下降趋势,水质达到2010—2019年最好水平。

白银段各监测断面水质变化趋势区别于兰州段,呈倒“V”字形单峰趋势。2010—2015年白银段综合污染指数累积距平曲线一直为上升趋势,2016年开始呈下降趋势,可知白银段水质真正得到改善是始于2016年,要明显滞后于上游兰州段的2014年。2017—2019年白银段综合污染指数距平持续为负,累积距平曲线呈显著下降趋势,表明白银段水质状况正持续变好。

4 讨论

4.1 水质的季节波动原因

黄河干流兰州段水质状况存在显著的季节波动,春、冬两季水质优于夏、秋两季,而白银段综合污染指数在年内无明显季节性趋势,即相邻河段水质在季节动态上的规律并不统一。该结果与邵志江等^[7,23]研究结果较一致。一般认为,水质季节波动跟流域断面水量差异及当地排污环境有关^[24]。研究区域雨季集中在6—9月,降水量占全年80%以上。丰水期黄河流速、流量增大加速了夏、秋两季污染物输送和转移,而冬季流域径流量锐减,导致水体中污染物流通较慢且容易沉积,对春季水质也存在一定的影响^[23,25]。另外,断面水质变化不仅受降水量影响,各时期水温差异也是影响水质的重要因素。水体自净能力主要依靠微生物的净化功能,当水温低于15℃时对硝化反应有明显的抑制作用,而水温升高时有助于水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的转化及有机质去除量的增加^[26-28];白银段水质各个季节均劣于兰州段水质,且夏季污染物含量要略高于其他季节,原因一是白银市人口总量远低于兰州市人口,上游生活污水输入量占黄河干流白银段生活污水总量的比例很高;二是白银段重工业企业居多,工业废水和面源污染是其主要污染物来源,而工业污染排放不像生活污水排放呈现周期性变化,均匀化的排放模式一定程度上掩盖了白银段的水质季节变化特征。

4.2 水质的年际变化趋势

时间序列趋势分析表明,2010—2019年兰州段

水质改善的拐点是出现在2014年,2014年后黄河干流兰州段水质经历了缓慢提升(2014—2017年)和显著提升(2018—2019年)两个阶段。而白银段水质状况拐点明显滞后于兰州段(2016年),2010—2015年水质状况劣于2010—2019年平均水平,2016—2019年水质明显好转,综合污染指数呈持续下降趋势。

水质年际变化趋势与当地政府水污染治理政策、水污染治理力度直接相关。兰州市2014年发生“4·11”自来水污染事件后,曾引起了社会强烈不满,政府对水污染治理非常重视,兰州市环境保护局对黄河兰州段376个排污口进行了摸底排查,重点对75个存在排污现象的排污口逐一进行整治,对私设暗管、偷排、漏排和污水超标排放的违法企业严肃查处。2015年兰州市对黄河两岸43处污水溢流口截流整治,市内9座污水处理厂投运,同时对市内重点企业实施废水排放总量控制,使污水不再直排黄河。可见污染治理力度逐年增大是促使兰州段水质改善的重要原因^[29]。白银市作为中国铜城,有色金属资源丰富,在过去工业废水排放一直是老大难问题。近些年在高强度治理下工业废水排放问题得到妥善处理,而面源污染则逐渐成为新的主要污染物来源。杨苏才等^[30]研究发现白银段面源污染对水体污染物的贡献率高达44%,其中总大肠菌群、COD和TP等指标严重超标。本文研究结果表明:黄河干流白银段TP、 BOD_5 等指标污染指数显著高于兰州段,与前人的研究结果较为一致。为此,白银市政府先后开展了白银段东大沟流域重金属污染农田、历史遗留含铬污染土壤、东大沟重金属河道等多项整治修复工程,从政策层面督导水污染治理问题,从而加速水质向好转变。

5 结论

a. 虽然黄河干流兰州段和白银段水质均属于Ⅲ类,但兰州段综合污染指数明显低于白银段,其中扶河桥断面水质最佳,靖远桥断面水质最差。

b. 兰州段整体水质在春、冬两季会变差,而白银段水质季节差异不大。化学指标方面,各断面有明显季节趋势的指标差异较大。

c. 2010—2019年两个河段水质均有了显著提升,综合污染指数呈显著下降趋势,但总体而言,黄河水体污染治理仍是一项艰巨而漫长的任务。

参考文献:

- [1] 甘肃省环境保护局. 甘肃省环境状况公报[R]. 兰州: 甘肃省环境保护局, 2000.

- [2] 南忠仁,杨苏才,徐文青,等. 黄河白银段水污染成因分析及防治对策[J]. 水土保持研究,2006(6):123-125. (NAN Zhongren, YANG Sucai, XU Wenqing, et al. Analysis of the cause of water pollution and its control strategies in Baiyin reach of the Yellow River [J]. Research of Soil and Water Conservation,2006(6):123-125. (in Chinese))
- [3] 赵有益,刘彤彤. 黄河兰州段水质模糊综合评价[J]. 人民黄河,2010,32(6):48-49. (ZHAO Youyi, LIU Tongtong. Fuzzy comprehensive evaluation of water quality in Lanzhou section of the Yellow River[J]. Yellow River,2010,32(6):48-49. (in Chinese))
- [4] 郑自宽,丁再盛. 甘肃省地表水功能区水质变化特征分析[J]. 人民黄河,2012,34(10):53-54. (ZHENG Zikuan, DING Zaisheng. Analysis on characteristics of water quality change in surface water function zone of Gansu Province[J]. Yellow River,2012,34(10):53-54. (in Chinese))
- [5] 甘肃省环境保护厅. 甘肃省环境状况公报[R]. 兰州:甘肃省环境保护厅,2010.
- [6] 孙艺珂,王琳,祁峰,等. 改进综合水质指数法分析黄河水质演变特征[J]. 人民黄河,2018,40(7):78-81. (SUN Yike, WANG Lin, QI Feng, et al. Analysis of water quality evolution of the main stream of the Yellow River based on improved integrated water quality index [J]. Yellow River,2018,40(7):78-81. (in Chinese))
- [7] 邵志江,郑斌,汪涛. 永定河上游主要河流地表水水质时空变化特征[J]. 自然资源学报,2020,35(6):1338-1347. (SHAO Zhijiang, ZHEN Bin, WANG Tao. Spatiotemporal variations of surface water quality of main rivers in the upper reaches of Yongding River[J]. Journal of Natural Resources,2020,35(6):1338-1347. (in Chinese))
- [8] 陈妮,武周虎,郭琦,等. 2006—2015年南四湖水质评价及改善效果分析[J]. 水电能源科学,2018,36(6):44-47. (CHEN Ni, WU Zhouhu, GUO Qi, et al. Evaluation of water quality and analysis of improvement effect in Nansi Lake during the 2006-2015 [J]. Water Resources and Power,2018,36(6):44-47. (in Chinese))
- [9] 时文静,卞新民,张尚清,等. 江苏省农村地表水功能区水环境高锰酸盐指数评价与空间分析[J]. 江苏农业科学,2011,39(2):460-463. (SHI Wenjing, BIAN Xinmin, ZHANG Shangqing, et al. Evaluation and spatial analysis of permanganate index of water environment in rural surface water functional areas of Jiangsu Province [J]. Jiangsu Agricultural Science,2011,39(2):460-463. (in Chinese))
- [10] 刘修英,黄功学,郑志宏,等. 贾鲁河郑州段水质评价和污染源解析[J]. 水资源保护,2020,36(4):40-46. (LIU Xiuying, HUANG Gongxue, ZHENG Zhihong, et al. Water quality evaluation and pollution source apportionment to Zhengzhou section of Jialu River [J]. Water Resources Protection,2020,36(4):40-46. (in Chinese))
- [11] 康若熙,谢文理,赵文星,等. 从水质变化趋势看常州市武南区域重点河流治理成效[J]. 中国环境科学,2019,39(10):4186-4193. (KANG Ruoxi, XIE Wenli, ZHAO Wenxin, et al. Spatiotemporal trends in water quality and the effectiveness of water treatment projects for Wunan District, Changzhou [J]. China Environmental Science,2019,39(10):4186-4193. (in Chinese))
- [12] 徐彬,林灿尧,毛新伟. 内梅罗水污染指数法在太湖水质评价中的适用性分析[J]. 水资源保护,2014,30(2):38-40. (XU Bin, LIN Canxiao, MAO Xinwei. Analysis of applicability of Nemerow pollution index to evaluation of water quality of Taihu Lake [J]. Water Resources Protection,2014,30(2):38-40. (in Chinese))
- [13] 刘贤梅,周忠发,张昊天,等. 基于主成分分析的喀斯特山区河流水质评价及水质时空特征分析:以贵州省张维河为例[J]. 环境工程,2019,37(10):49-54. (LIU Xianmei, ZHOU Zhongfa, ZHANG Haotian, et al. Assessment of water quality and its spatial and temporal characteristics of rivers in karst mountain area based on principal component analysis: a case study on Zhangwei River in Guizhou Province [J]. Environmental Engineering,2019,37(10):49-54. (in Chinese))
- [14] 高星琪,董志,李令军,等. 官厅水库上游河流水质空间变异多元统计分析[J]. 湿地科学,2019,17(1):106-111. (GAO Xingqi, DONG Zhi, LI Lingjun, et al. Multivariate statistical analysis on spatial variability of water quality in Guanting Reservoir upstream rivers [J]. Wetland Science,2019,17(1):106-111. (in Chinese))
- [15] 周及,关卫省,付林涛. 基于多元统计的西安市河流水质评价及污染源解析[J]. 水资源保护,2020,36(2):79-84. (ZHOU Ji, GUAN Weisheng, FU Lintao. Water quality assessment and pollution source analysis of Xi'an river based on multivariate statistics [J]. Water Resources Protection,2020,36(2):79-84. (in Chinese))
- [16] 吴彬,臧淑英,那晓东,等. 灰色关联分析与内梅罗指数法在克钦湖水体重金属评价中的应用[J]. 安全与环境学报,2012,12(5):134-137. (WU Bin, ZHANG Shuying, NA Xiaodong, et al. Application of grey relation analysis and Nemerow pollution index in water quality evaluation for heavy metals in Keqin Lake [J]. Journal of Safety and Environment,2012,12(5):134-137. (in Chinese))
- [17] 张龙玲,徐慧,管桂玲,等. 改进的综合水质标识指数法在上海市长宁区水质评价中的应用[J]. 水资源保护,2014,30(3):81-84. (ZHANG Longlin, XU Hui, GUAN Guilin, et al. Application of improved comprehensive water quality identification index method to evaluation of water quality in Changning District, Shanghai City [J]. Water Resources Protection,2014,30(3):81-84. (in Chinese))

- [18] 王欢欢,白洁,刘世存,等.白洋淀近30年水质时空变化特征[J].农业环境科学学报,2020,39(5):1051-1059. (WANG Huanhuan, BAI Jie, LIU Shicun, et al. Spatial and temporal variations in the water quality of Baiyangdian Lake in the recent 30 years[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(5): 1051-1059. (in Chinese))
- [19] 郭丽峰,孟宪智,周绪申,等.滦河干流水质时空变化分析[J].安徽农业科学,2015,43(1):196-199. (GUO Lifeng, MENG Xianzhi, ZHOU Xushen, et al. Analysis on temporal-spatial variation of water quality in mainstream of Luanhe River[J]. Journal of Anhui Agricultural, 2015, 43(1):196-199. (in Chinese))
- [20] 刘秀花,杨军,胡秀锦.黄河宁夏段水质现状及变化趋势分析[J].人民黄河,2006(3):57-58. (LIU Xiuhua, YANG Jun, HU Xiujin. Analysis on the current situation and change trend of water quality in Ningxia section of the Yellow River[J]. Yellow River, 2006(3): 57-58. (in Chinese))
- [21] 梁涛,王浩,丁士明,等.官厅水库近三十年的水质演变时序特征[J].地理科学进展,2003,22(1):38-44. (LIANG Tao, WANG Hao, DING Shiming, et al. An evolution of water quality in Guanting Reservoir during the past three decades[J]. Progress in Geography, 2003, 22(1):38-44. (in Chinese))
- [22] 甘肃省生态环境厅.甘肃省环境状况公报[R].兰州:甘肃省生态环境厅,2018.
- [23] 王华光,刘碧波,李小平,等.滇池新运粮河水水质季节变化及河岸带生态修复的影响[J].湖泊科学,2012,24(3):334-340. (WANG Guanghua, LIU Bibo, LI Xiaoping, et al. Seasonal variation of water quality of Xinyunliang River, Dianchi Basin and the impact of the riparian ecological restoration[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(3):334-340. (in Chinese))
- [24] 庞博,王铁宇,吕永龙,等.洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析[J].环境科学,2013,34(1):379-384. (PANG Bo, WANG Tiewu, LYU Yonglong, et al. Temporal variation of water quality and driving factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou[J]. Environmental Science, 2013, 34(1):379-384. (in Chinese))
- [25] 赵雷,廖晓斌,周真明,等.泉州某水库水质季节变化原因及对策探究[J].中国给水排水,2020,36(1):36-42. (ZHAO Lei, LIAO Xiaobin, ZHOU Zhenming, et al. Seasonal changes of water quality of a reservoir in Quanzhou City and countermeasures[J]. China Water and Wastewater, 2020, 36(1):36-42. (in Chinese))
- [26] 者萌,张雪芹,孙瑞,等.西藏羊卓雍错流域水体水质评价及主要污染因子[J].湖泊科学,2016,28(2):287-294. (ZHE Meng, ZHANG Xueqin, SUN Rui, et al. Assessment of water quality and the pollution factors of waters in Yamzhog Yumco Basin, Tibet[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(2):287-294. (in Chinese))
- [27] 冉桂花,葛继稳,苗文杰,等.三峡库区古夫河水质时空分异特征[J].生态学报,2013,33(17):5385-5396. (RAN Guihua, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al. Spatial-temporal differentiation of water quality in Gufu River of Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17):5385-5396. (in Chinese))
- [28] 胡玉,帅钰,杜永,等.丹江口库区神定河水水质污染成因分析[J].人民长江,2019,50(11):44-48. (HU Yu, SHUAI Yu, DU Yong, et al. Causal analysis of water pollution of Shending River in Danjiangkou Reservoir[J]. Yangtze River, 2019, 50(11):44-48. (in Chinese))
- [29] 冯书涛,马和梅,俞发荣.黄河兰州段水污染现状分析[J].人民黄河,2005(6):28-29. (FENG Shutao, MA Hemei, YU Rongfa. Analysis of water pollution in Lanzhou section of the Yellow River[J]. Yellow River, 2005(6): 28-29. (in Chinese))
- [30] 杨苏才,南忠仁,牛亚萍,等.因子分析在水质评价与成因分析中的应用[J].人民黄河,2006(5):37-39. (YANG Sucui, NAN Zhongren, NIU Yaping, et al. Application of factor analysis in water quality evaluation and cause analysis[J]. Yellow River, 2006(5):37-39. (in Chinese))

(收稿日期:2020-09-03 编辑:熊水斌)

(上接第43页)

- [16] 刘建华,黄亮朝.黄河下游水资源利用与高质量发展关联评估[J].水资源保护,2020,36(5):24-30. (LIU Jianhua, HUANG Liangchao. Evaluation of correlation between water resources utilization and high-quality development in the lower reaches of the Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 24-30. (in Chinese))
- [17] 张淑霞,史洪森,陈全才.阿拉善地区水资源利用现状及对策[J].内蒙古水利,2012(6):55-56. (ZHANG Shuxia, SHI Hongsen, CHEN Quancai. Current situation and countermeasures of water resources utilization in Alashan area[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2012(6):55-56. (in Chinese))
- [18] 王帅,饶文波,金可,等.阿拉善地区降水同位素特征与水汽来源[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):411-419. (WANG Shuai, RAO Wenbo, JIN Ke, et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristic and moisture source of precipitation of Alxa Desert Plateau[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5):411-419. (in Chinese))

(收稿日期:2020-08-14 编辑:王芳)