

张胜楠,李发永,刘松江,等.塔里木河上游水质评价多元统计方法比较研究[J].环境科学与技术,2025,48(11):118-132. Zhang Shengnan, Li Fayong, Liu Songjiang, et al. Comparative study on multivariate statistical methods for water quality assessment in the upper Tarim River Basin[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(11): 118-132.

塔里木河上游水质评价多元统计方法比较研究

张胜楠^{1,2}, 李发永^{1,2}, 刘松江¹, 张娟香^{1,2*}, 尤永军^{1,2}

(1. 塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔 843300;

2. 塔里木大学塔里木绿洲农业教育部重点实验室, 新疆 阿拉尔 843000)

摘要:塔里木河在南疆生态环境保护和社会经济发展中具有重要地位与作用。为评估塔里木河流域上游水质情况,该研究选取10个包含22项水质参数的采样点2020-2022年的水质数据,基于主成分分析法(PCA)筛选关键水质参数,借助最简水质综合评价指数法(WQI_{min})、加拿大水质指数法(CCME-WQI)、熵权水质指数法(EWQI)和新型综合水质指数法(WQI-DET)对塔里木河流域上游水质进行了综合评价,并对各方法的适用性进行对比分析。结果表明:(1)塔里木河上游水质BOD₅、TN、TP、F⁻、NH₃-N部分监测点超过Ⅲ类水质标准,各项水质指标均存在不同程度的空间差异性。(2)选取TN、TP、NH₃-N、COD、BOD₅、F⁻、pH、TH、Zn、Pb、Cu、Mn和Fe共13项指标用于综合评价塔里木河上游水体污染程度的主要参数。(3)塔里木河上游水质评价等级以“中等”和“良好”为主,3年来水质呈下降趋势,各断面水质情况变化幅度不大,整体水质状况较好。WQI_{min}评价结果为“良好”(Ⅱ类);CCME-WQI为“中等”(Ⅲ类);EWQI为“良好”(Ⅱ类);WQI-DET为“良好”(Ⅱ类)或“中等”(Ⅲ类),部分点位出现Ⅰ类和Ⅳ类水质。(4)WQI_{min}和EWQI在塔里木河流域上游水质评价方面具有较强的优越性,可为同类水质评价提供技术依据。

关键词:水质评价; 主成分分析法(PCA); 多元分析; 塔里木河上游

中图分类号:X824 文献标志码:A doi:10.19672/j.cnki.1003-6504.0735.25.338 文章编号:1003-6504(2025)11-0118-15

Comparative Study on Multivariate Statistical Methods for Water Quality Assessment in the Upper Tarim River Basin

ZHANG Shengnan^{1,2}, LI Fayong^{1,2}, LIU Songjiang¹, ZHANG Juanxiang^{1,2*}, YOU Yongjun^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China;

2. Key Laboratory of Tarim Oasis Agriculture (Tarim University), Ministry of Education, Alaer 843000, China)

Abstract: Tarim River plays an important role in ecological protection and socio-economic development in southern Xinjiang. To evaluate water quality in the upper reaches of the Tarim River Basin, 10 sampling points with 22 water quality parameters were selected, and key water quality parameters were screened using principal component analysis (PCA) based on water quality data from 2020-2022. The water quality was assessed through WQI_{min}, CCME-WQI, EWQI, and WQI-DET methods, with comparisons made regarding their applicability. The results showed that concentrations of BOD₅, TN, TP, F⁻, and NH₃-N in the upper reaches exceeded Class III water quality standards, exhibiting spatial variations across parameters. TN, TP, NH₃-N, COD, BOD₅, F⁻, pH, TH, Zn, Pb, Cu, Mn, and Fe were identified as key parameters for comprehensive water pollution assessment. Water quality in the upper reaches was predominantly rated as “medium” (Class III) and “good” (Class II), showing a gradual decline over three years with relatively stable section-wise variations. WQI_{min} and EWQI evaluations indicated “good” (Class II) status, while CCME-WQI showed “medium” (Class III). WQI-DET results varied between “good” (Class II) and “medium” (Class III), with occasional Class I and IV ratings at specific sites. WQI_{min} and EWQI demonstrated superior applicability for water quality assessment in this basin, providing technical references for similar evaluations.

Key words: water quality assessment; principal component analysis (PCA); multivariate analysis; upper reaches of Tarim River

水是维持干旱区生态系统稳定和完整的关键因素之一^[1],也对当地自然环境和人类社会的可持续发展起着重要作用^[2]。河流是最重要的淡水资源,在保证饮用水供应、支持农业灌溉、满足工业用水需求、提供优美景观等方面发挥着不可替代的作用^[3]。然而,随着经济的快速发展和城市化进程,土地开发和人类活动的影响加剧了工业废水、生活污水和养殖废水的排放,导致河流水质恶化^[4],严重影响水资源的正常利用^[5]。因此,准确评估流域水质污染状况、了解水质时空分布特点是流域水环境治理与管理的基础工作,对水环境安全保障、水资源科学管理和持续利用具有重要意义^[6-8]。

水质评价是采用某评价方法定量描述水体污染程度的分析手段^[9]。目前,水质评价的方法主要包括单因子指数法^[10]、综合污染指数法^[11]、模糊数学评价法^[12]、人工神经网络法^[13]以及主成分分析法^[14]等,以上方法应用于水质评价中各有利弊。单因子指数法评价过于简单,无法反映综合水质状况^[15];综合污染指数法权重的确定主观性较强,无法科学地确定各水质状况;模糊数学评价法计算过程比较复杂且评价结果容易出现偏差^[16];人工神经网络法是一种智能方法,具有较强的自适应学习能力,但对数据要求过于严格^[17]。传统的综合水质标识指数法(WQI)是最常用的流域水质评价方法^[18],但WQI需要大量的水质参数,会产生额外的经济和时间成本,对于环境保护预算有限的地区不适用^[19]。流域水环境是一个动态系统,水质信息复杂多变,加之监测数据收集不全,导致单一的评价方法在水质评价方面具有一定的局限性,将多种评价方法有机结合更能科学合理地评价河流的水质状况,探索一种既准确又用户友好的水质评估方法将显著提高水环境管理的有效性。研究表明,将WQI与聚类分析(CA)、主成分分析(PCA/FA)等多元统计分析方法相结合(WQI_{min})^[20],将熵权系数与WQI方法相结合(EWQI)^[21],从检测指标的超标范围、超标频率和超标幅度分析研究区域水环境质量(CCME-WQI)^[22],改进WQI得到的新型综合水质指数法(WQI-DET)^[23]等在地表水质量评估中得到了广泛应用,这些方法可以减少水环境参数监测数量和降低分析测试费用,提高分析结果的可靠性,为定量分析和解决地表水水质污染问题提供了更为实用、科学的方法和基础^[14]。目前国内缺乏对WQI中主成分分析(PCA)、熵权系数等方法的科学应用以及与其他改进WQI方法的比较研究。

塔里木河流域位于“丝绸之路经济带”的核心区域,是中国最大的内陆河^[24],也是我国乃至世界上最干旱、水资源供需缺口最大、生态最脆弱的地区之一^[25],在干旱区水资源研究方面具有代表性^[26]。水资源的稀

缺是制约南疆生态环境保护和社会经济可持续发展的关键因素,水质问题也可能导致水资源短缺。近年来随着“一带一路”战略下南疆社会经济的高速发展和城市规模的扩大,不断增加的环境压力导致塔里木河水环境功能严重退化^[24],因此评估塔里木河水质对保护干旱区水环境污染、水资源短缺和流域生态安全等问题具有重要意义^[27]。目前塔里木河流域研究多集中于水资源开发^[28],水污染研究起步较晚,且多限于硬度、矿化度和悬浮物,对有机物、重金属等影响研究不足,难以全面评估流域的污染状况和主要污染因子^[29]。为科学合理地评估塔里木河上游水质污染状况,本文基于上游阿拉尔—沙雅段2020—2022年10个监测断面22个水质参数数据,使用主成分分析法(PCA)筛选出影响水质的主要因子,选取最简水质综合评价指数法(WQI_{min})、加拿大水质指数法(CCME-WQI)、熵权水质指数法(EWQI)和新型综合水质指数法(WQI-DET)4种多元统计分析方法开展水质综合评价及其时空分析,并对评价结果进行比较,验证4种多元统计分析方法在水质评价中的适用性,以期为塔里木河的水污染防治、水环境的健康发展及区域可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

塔里木河流域位于新疆天山和昆仑山之间,由9个主要水系和144条河流组成,总面积 $1.02 \times 10^6 \text{ km}^2$,地表径流量约 39.8 km^3 ^[30],是世界上最大的封闭水文排水系统之一^[31]。流域干流全长1 321 km,自身不产流,目前仅有阿克苏河、和田河、叶尔羌河、开都—孔雀河可提供水资源^[31],形成了“四源一干”的格局。研究区位于塔里木河上游($40^\circ 28' 57'' \text{ N} \sim 40^\circ 54' 19'' \text{ N}$, $80^\circ 56' 50'' \text{ E} \sim 82^\circ 24' 04'' \text{ E}$),西起塔河源,东至阿克苏沙雅县三号大桥(图1)。伴随区域内人口数量增加、城市规模扩大及生活方式的变化,流域内污染物排放总量呈现持续增加态势,污染源包括阿拉尔和阿克苏工业、农业、生活污染源及库车、沙雅、新和农业、畜牧业污染源等。区域内主要土地利用类型包括山地、绿洲、自然植被和荒漠地,其中绿洲农业主要种植棉花、香梨、石榴、苹果等,灌溉的主要方法是滴灌。水资源短缺和生态环境脆弱是制约塔里木盆地河流可持续管理和区域经济发展的2个关键因素^[1]。

1.2 水样采集

根据流域土地利用类型和水文地形条件,2020—2022年3—4月(每年一次)选取塔里木河上游布设具有代表性的10个监测断面TH1~TH10(图1)采集水样,即塔河源TH1(和田河与阿克苏河交汇处)、阿拉尔

市监测断面 TH2、阿拉尔市塔里木大道 TH3、十团六连 TH4、沙雅县团结农场村 TH5、沙雅县(沙漠中) TH6、沙雅大桥 TH7、十四团 TH8、十五团 TH9、和田河大桥 TH10, 样品采集、存储与预处理严格按照《水质采样、样品保存和管理技术规定》(HJ 493-2009)进行。水质指标 pH、电导率(EC)、总硬度(TH)、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD₅)、悬浮物(SS)、氟化物(F⁻)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)

按照《水与废水监测分析方法》(第四版)^[32]中规定的标准方法进行检测和分析。砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、镍(Ni)、铅(Pb)、锌(Zn)使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, EXPEC-7000)进行测定,所有测试项目均设置空白对照和平行对照进行质量控制,每次测定重复3次,以确保实验结果的可靠性。22项水质指标测定均在塔里木大学塔里木绿洲农业教育部重点实验室完成,分析按照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)要求进行^[33]。

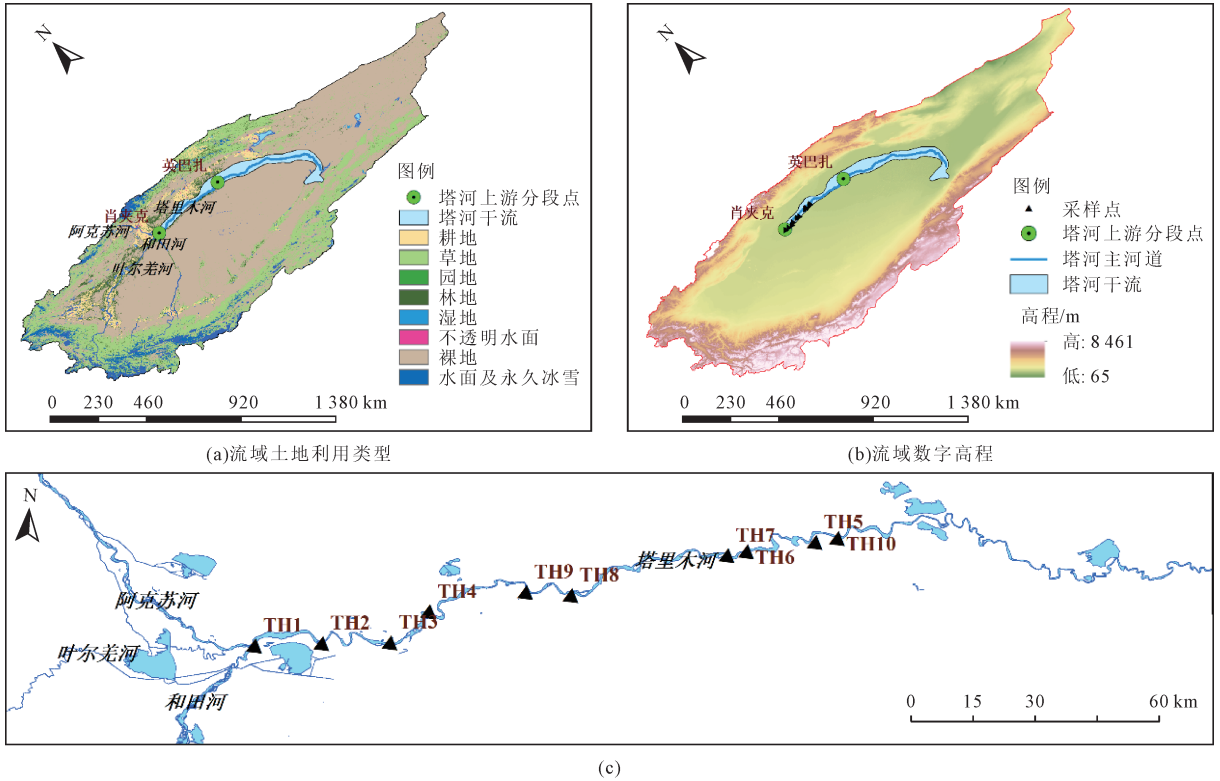


图1 塔里木河上游流域监测断面示意图
Fig.1 Schematic diagram of monitoring sections in upper Tarim River Basin

1.3 水质指标的选取

主成分分析法(PCA)是一种通过检测主要成分来降低数据复杂性和促进结果可视化的技术^[20],被广泛用于选择水质评价指标和评价水环境质量^[34]。本研究以塔里木河上游的22项水质指标为基础,采用PCA确定影响水质的主要指标。

1.4 水质评价方法

1.4.1 最简水质综合评价指数法(WQI_{min})

最简水质综合评价指数法(WQI_{min})是基于PCA

选定的水质指标建立的快速准确评估水体水质的方法,可以降低分析成本^[35]。计算公式为:

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

式中, n 为水质指标的数量, C_i 为指标 i 的归一化值, P_i 为指标 i 的权重(数值为 1~4)(表 1), 数值借鉴其他学者的研究成果^[36,37]。根据 WQI_{min} 评分将水质分为 5 个等级^[14](表 2)。

表 1 水质指标的权重(P_i)
Table 1 Weights (P_i) of water quality parameters

指标	pH	EC	TH	DO	COD	BOD ₅	TN	TP	NH ₃ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N
P_i	1	1	2	4	3	3	3	4	3	2	2
指标	SS	F ⁻	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Fe	Mn	Ni
P_i	3	2	4	4	3	3	2	2	1	1	1

表 2 水质指数分类表
Table 2 Water quality index classification

水质分级	优秀	良好	中等	较差	极差
	I类	II类	III类	IV类	V类
最简水质综合评价指数法(WQI _{min})	90~100	70~90	50~70	25~50	0~25
加拿大水质指数法(CCME-WQI)	95~100	80~95	65~80	45~65	0~45
熵权水质指数法(EWQI)	0~25	25~50	50~100	100~150	≥150
新型综合水质指数法(WQI-DET)	60~100	40~60	20~40	0~20	<0

1.4.2 加拿大水质指数法(CCME-WQI)

在国际上,加拿大水质指数法 CCME-WQI 因其计算简单,选择水质变量灵活,被广泛用于淡水水体水质评价,用以保护水生生物^[38]。CCME-WQI 计算公式为:

$$WQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \quad (2)$$

式中, F_1 =(未达标的的水质指标数/总水质指标数)×100, F_2 =(未达标的检测次数/总检测次数)×100, F_3 = $nes/(0.01 \times nes + 0.01)$, $nes = \sum_{i=1}^n e_i$ /总检测次数, e_i =(未达标浓度值/评价标准)-1。水质标准根据 CCME-WQI 值划分为 5 个等级^[22,39](表 2)。

1.4.3 熵权水质指数法(EWQI)

熵权法是根据指标所代表信息量的大小来赋权的方法,所赋权重更加客观,具有较好的可靠性和实用性^[40,41]。计算公式为:

$$e_i = \frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^n \left[\frac{1 + Z_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1 + Z_{ij})} \ln \frac{1 + Z_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1 + Z_{ij})} \right] \quad (3)$$

$$w'_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^m (1 - e_i)} \quad (4)$$

式中, Z_{ij} 为水样 j 水质指标 i 的标准值, m 为水质指标的总数, n 为水样的总数, e_i 为水质指标 i 的熵权值, w'_i 为水质指标 i 的熵权系数法权重。根据 EWQI 值将水质分为 5 个等级^[42](表 2)。

1.4.4 新型综合水质指数法(WQI-DET)

WQI-DET 根据《地表水环境质量标准》的水质分级标准进行定制,范围为 $-\infty \sim 100$, 指数范围更广,可以更加细致地区分不同水质等级^[43]。计算公式如下:

$$WQI-DET^j = 100 - \max\left(0, \frac{c_{ij} - c_i^I}{c_i^V - c_i^I}\right) \times 100 \quad (5)$$

$$WQI-DET^j = \min(WQI-DET^j_1, \dots, WQI-DET^j_n, \dots, WQI-DET^j_n) \quad (6)$$

式中, $WQI-DET^j_i$ 为水样 j 的水质指标 i 的 WQI-DET 值, c_{ij} 为水样 j 的水质指标 i 的浓度, c_i^I 和 c_i^V 分别为 I 类和 V 类水体中水质指标 i 的限值。根据 WQI-DET 值进行水质分级(表 2)^[44]。

1.5 数据处理与分析

数据基础处理使用 Excel 2019, PCA 使用 SPSS 21.0 构建,绘图使用 Origin 2021 和 ArcGIS 10.8。

2 结果与讨论

2.1 确定水质评价指标

采用主成分分析法对塔里木河上游 2020-2022 年所有监测断面选定的 22 项水质指标的原始数据进行标准化处理,通过主成分分析定量判断各断面水质污染的主要影响因素。根据 Kaiser 规则和 KMO-Bartlett 球形检验^[23,45],采用最大方差法对 22 项水质指标的因子载荷矩阵进行正交变换,提取特征值大于 1 的 7 个主成分。7 个确定成分中所有变量的因子载荷均呈现合理分布,各 0.30~0.50、0.50~0.70 和 VF 值 >0.70 的因子载荷分别对应弱、中、强相关性。不同年份主成分分析结果如表 3 所示,2020 年、2021 年和 2022 年累积方差贡献率分别达 90.49%、93.08% 和 92.80%,能够反映流域污染物指标数据的绝大部分信息。将 2020 年、2021 年和 2022 年载荷值最大的水质因子作为选取本次研究评价指标的参考。图 2 显示 2020-2022 年总分析结果的累积方差贡献率达 71.96%, VF1、VF2 和 VF3 对水质影响最大,方差贡献率分别为 17.52%、12.72% 和 11.60%,3 个成分的分量载荷如图 2(b)所示。以各成分的因子载荷绝对值大于 0.70 的水质指标作为水质评价因子,由图 2 可以看出, VF1 对 TN 和 F 具有强正载荷(0.824 和 0.785); VF2 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 Zn 具有强正载荷(0.718 和 0.814),对 pH 具有强负载荷(-0.729); VF3 对 COD、 BOD_5 和 Pb 具有强正载荷(0.796、0.892 和 0.700); VF4 对 TH 具有强正载荷(0.733); VF5 对 Cu 具有强正载荷(0.812); VF6 对 TP 具有强正载荷(0.712),对 Fe 具有强负载荷(-0.735); VF7 对 Mn 具有强负载荷(-0.790)。

Pearson 相关系数大于 0.5 表明变量之间存在一定的相关性^[8,12,37],可作为水质指标的选取依据。塔里木河上游水质指标之间的相关系数热图(图 3)表明, F1 中的 TN 和 F 在 0.01 水平上呈显著正相关; F2 中的 pH 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在 0.001 水平上呈显著负相关; F3 中的

表 3 塔里木河上游不同年份主成分分析结果
Table 3 Principal component analysis of water quality index in the Tarim River Basin in different years

年度	参数	主成分因子						
		1	2	3	4	5	6	7
2020	特征值	5.64	4.46	3.31	2.07	2.01	1.26	1.15
	贡献率/%	25.63	20.30	15.05	9.43	9.14	5.74	5.21
	累积贡献率/%	25.63	45.92	60.97	70.40	79.54	85.28	90.49
	载荷值最大水质因子	COD	Fe	pH	F ⁻	Zn	TP	NO ₃ ⁻ -N
2021	特征值	5.36	4.66	3.11	2.70	1.99	1.39	1.27
	贡献率/%	24.35	21.20	14.14	12.28	9.05	6.30	5.77
	累积贡献率/%	24.35	45.54	59.68	71.96	81.01	87.31	93.08
	载荷值最大水质因子	NH ₃ -N	EC	SS	TH	BOD ₅	COD	Cd
2022	特征值	5.56	4.00	3.02	2.99	2.29	1.43	1.12
	贡献率/%	25.27	18.20	13.71	13.60	10.42	6.50	5.09
	累积贡献率/%	25.27	43.47	57.18	70.78	81.20	87.70	92.80
	载荷值最大水质因子	Cd	Mn	COD	Cu	Zn	TN	TP

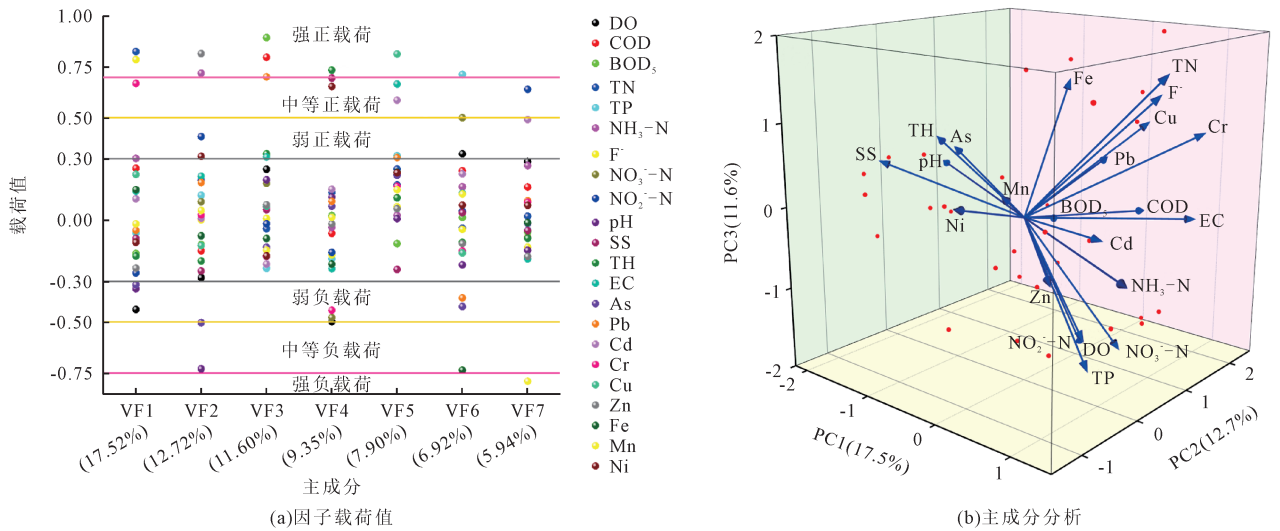


图 2 塔里木河上游水质指标的主成分分析结果图
Fig.2 Principal component analysis of water quality index in the Tarim River Basin

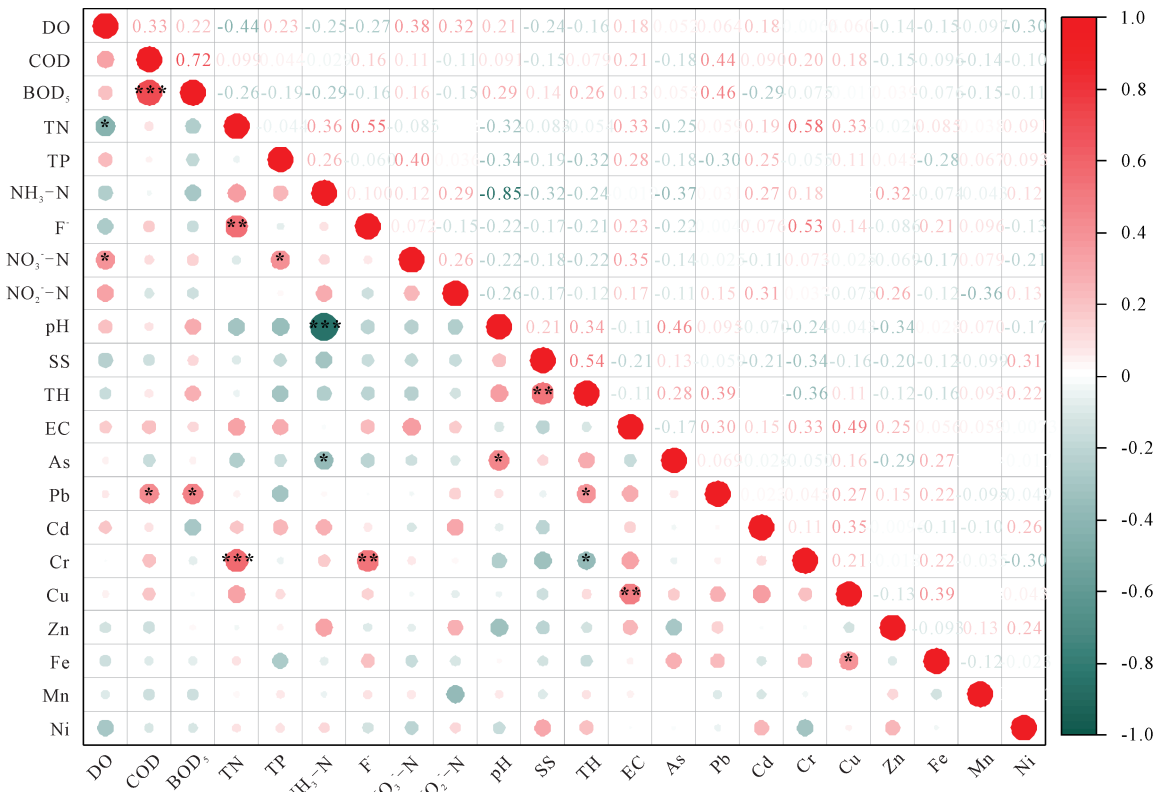
COD和BOD₅在0.001水平上呈显著正相关,COD和Pb、BOD₅和Pb在0.05水平上呈显著正相关。相关性越显著的污染物作为水质指标的选取依据越可靠,说明单个水质指标可以反映同一因子中其余水质指标的变化。F3中Pb与F4的TH呈显著正相关,F5中Cu与F6的Fe呈显著正相关,说明不同因子的水质指标之间可以相互印证,提高水质评价的准确性,这些水质指标在。TN和TP是引起水体富营养化的关键因素;高浓度的F⁻可能是农业活动排放或土壤中富氟矿物风化的结果;COD和BOD₅是评价水体污染程度的重要指标;TH影响水体水生生态系统健康的重要因素;pH对水生生物生长分布有重要影响,通常被认为是水质的重要指标;重金属会对水生态环境和生物体造成严重危害,作为典型的水体累积性污染物可以指示水体污染程度。因此,根据主成分分析结果和指标的环境关注程度高低,选取TN、TP、NH₃-N、COD、BOD₅、F⁻、pH、TH、Zn、Pb、Cu、Mn和Fe共13项

指标用于综合评价塔里木河上游水体污染程度的主要指标。

2.2 水质评价指标变化和时空分布特征

2.2.1 指标变化趋势

所选水质指标在2020-2022年间的变化趋势如图4所示,箱形图中的异常值可以用研究区域内采样点之间水质的显著差异来解释。重金属Mn、Pb、Cu、Zn和Fe无显著的时间变化,且浓度均远低于地表水I类水质标准。水质pH、总硬度随时间的变化不显著,pH平均值为7.97,水体呈中性至弱碱性;TH平均值为303.04 mg/L,总硬度偏高,塔里木河主要靠山地降水和高山融雪补给,自然侵蚀和泥沙运输过程导致pH和总硬度的含量较高。pH和TH三年变化趋势为2020年>2021年>2022年,原因是其主要受气候、温度等因素的影响,研究表明塔里木河流域年降水量和年平均气温整体均呈上升趋势^[46],导致河流水量增加,稀释了水体碱性离子(如HCO₃⁻、CO₃²⁻),导致pH趋近



注: * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$ 。

图3 塔里木河上游水质指标相关系数热图
Fig.3 Correlation coefficient thermogram of water quality index in the Tarim River Basin

中性;同时气温升高加剧盆地地区水资源的蒸发,且工业废水和生活污水排放含有的酸碱物质也会干扰河流pH值的稳定^[47]。COD在3.14~17.30 mg/L范围内变化,平均值为8.72 mg/L,均未超过Ⅲ类水质标准,说明塔里木河不存在富营养化污染。BOD₅、TN、TP、F和NH₃-N 5项指标存在部分监测点超过Ⅲ类水质标准的情况。其中,COD与BOD₅均呈2021年降低2022年上升的趋势,趋势变化COD大于BOD₅,2021年降低可能与工业停产与农业减排的短期效应有关。2022年人口增加、经济快速发展导致有机污染物增加,尤其是难降解有机物增加(如石油工业排放的烃类、农药残留等)。F在0.35~1.07 mg/L范围内变化,平均值为0.58 mg/L,6.67%的样品超过Ⅲ类水质标准。F在3年间呈增加趋势,与塔里木河上游含氟化物矿物的长期风化侵蚀作用和农业生产中含氟化肥的使用有关^[47]。NH₃-N在0.17~1.35 mg/L范围内变化,平均值为0.50 mg/L,3.33%的样品超过Ⅲ类水质标准。TN、TP和BOD₅的Ⅲ类水质超标率较高,分别达到了13.33%、40.00%和36.67%。综上所述,COD、TN、TP、F和NH₃-N 3年内的平均浓度呈增加趋势,可能是由于塔里木河流域气候、温度、经济发展、土地利用变化等因素的影响,降雨和温度的细微变化,会使河流径流量发生明显的改变,且上游阿拉尔段经济

快速发展,人口数量剧增,农业和畜禽养殖业规模扩大,流域内污染物排放总量呈现增加态势。BOD₅呈现随时间而逐渐降低的趋势,且2021年和2022年河流水质总体保持稳定,但Ⅲ类水质超标率仍较高,说明塔里木河上游水质仍普遍受到人为活动的影响。

图5为塔里木河上游不同监测断面水质指标的变化趋势,可以看出各断面pH值在7.0~8.5之间变化,2020年和2022年pH值无显著差异,2021年各断面显著下降,可能与工业停产与农业减排的短期效应有关。监测断面TH1(叶尔羌河、和田河和阿克苏三河交汇处)是位于上游区域最靠近上游边界的监测点,该监测点的各项水质指标浓度普遍较高,说明三河沿途的岩石自然风化和人类各项活动的影响导致塔河源断面污染较重。COD、BOD₅和Pb的空间分布规律较一致,2021年浓度降低,浓度最高的断面均位于TH3阿拉尔市和TH9十五团,COD和BOD₅反映水体被有机物污染的程度,主要来自生活污水和工业废水的排放,以及动植物腐烂的分解,Pb代表了汽车尾气的排放、停车场和城市道路的细颗粒物的冲刷,因此人口集中活跃的城市区域使得大量工业和城市废水排入河流导致水中污染物增加,也说明了2021年污染物排放减少。TN、NH₃-N和F的空间分布规律较一致,浓度最高的断面均位于TH4十团六连,TH4以农

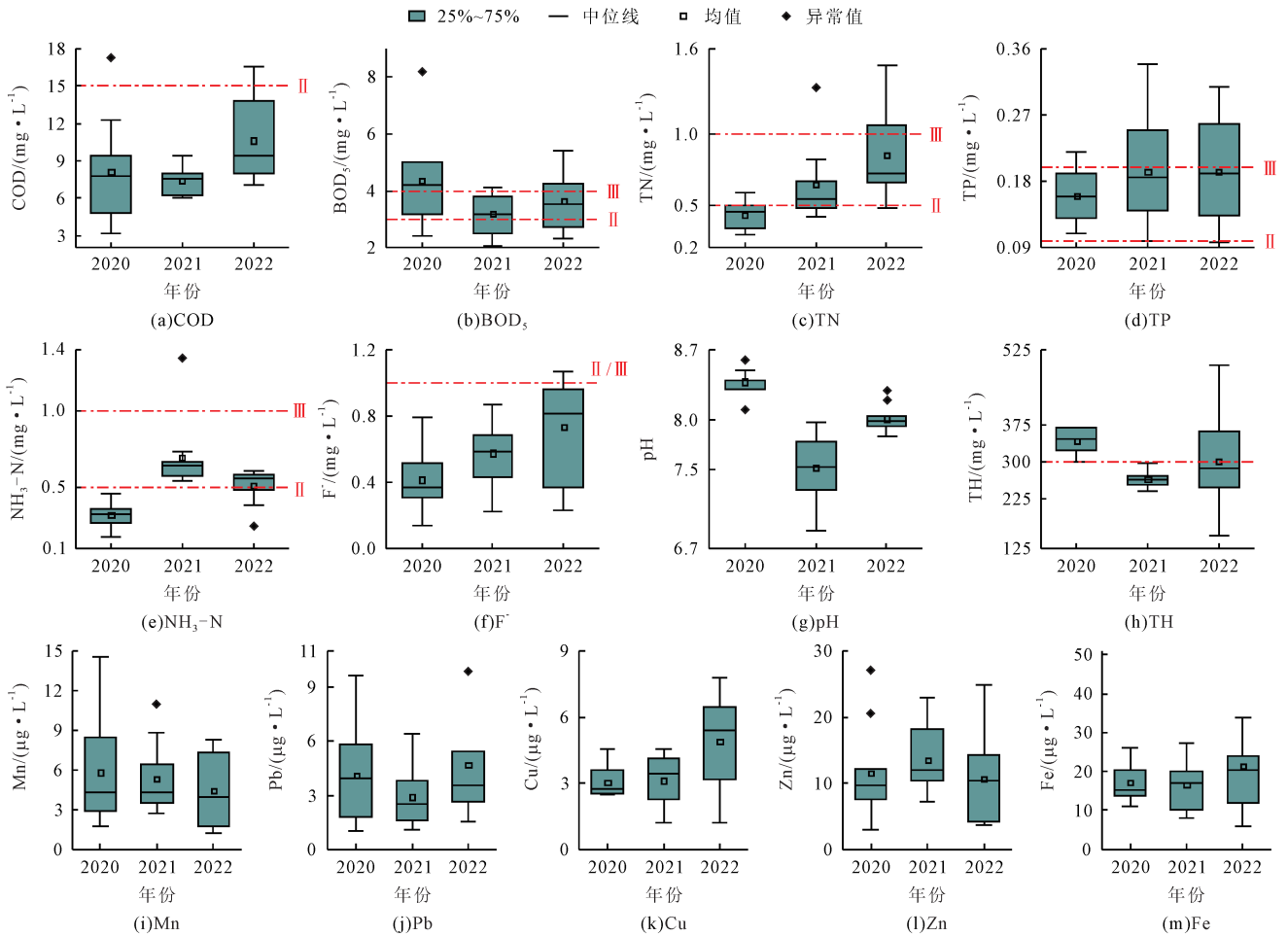


图4 塔里木河上游水质指标时间变化趋势
Fig.4 Time variation trend of water quality index in the Tarim River Basin

业和小型养殖业为主,化肥和农药施用量的增加,随着地表径流把污染物带入河流中。TP浓度最高的断面位于TH2阿拉尔市监测断面和TH6沙雅县,同样属于人口集中和以农业、小型养殖业为主的区域。Mn、Cu、Zn和Fe浓度远低于地表水I类水质标准,高浓度断面位于采样区域的中下游,途径人类活动密集区,排放的生活污水和工农业废水导致塔里木河水质变差,说明重金属污染与人类活动密切相关。总体来看,研究区域水质指标空间分布虽具有差异性,但含量高的点基本都出现在河流汇合处及人类活动的密集区,河流水文系数的变化、城市产业结构和经济发展水平、人类活动等因素导致了水质指标的空间变化,并反映在污染物负荷上。

总之,塔里木河上游水质指标随时空的不同有明显差异,与已有研究结论一致^[48]。这种时空分布表明,研究区水质与当地政策调整 and 人类活动强度的变化有关^[49,50]。河长制的实施、地方性流域水资源管理法规的出台以及水污染防治方案的实施,对塔里木河流域的管理和保护起到了积极作用。但随着经济的快速发展,塔里木河流域上游建设用地、农业用地和

生活用地的比例大幅提升,反映了人类活动加剧。根据以往对水质和土地利用响应关系的研究,人类用地面积的增加导致工业、农业和生活污水的排放可能是影响区域水质的关键因素^[51]。

2.2.2 指标时空分布特征

为了探究塔里木河上游水质的时空分布特征,根据各采样点12个水质指标的平均值,采用聚类分析分析采样点间的相似性和差异性(图6(a))。结果表明,所有采样点可分为3组,代表了3种不同类型的区域分布特征。第一组(绿色)代表污染较严重的区域,包括TH3阿拉尔市塔里木大道和TH6沙雅县位于人类活动的密集区。第二组(蓝色)由TH2阿拉尔市监测断面、TH4十团六连和沙雅县团结农场村TH5采样点组成,与其他区域相比污染较轻微。第三组(红色)包含了所有剩余的采样点,污染程度不一,与区域的地理位置、季节变化、人类活动等因素存在潜在关联。根据2020–2022各水质指标的平均值,采用聚类分析水质的时间特征(图6(b))。结果表明,12项水质指标在不同年份具有显著的差异。3年来监测断面的大部分水质指标呈现上升趋势,可能是由于塔里木河上游

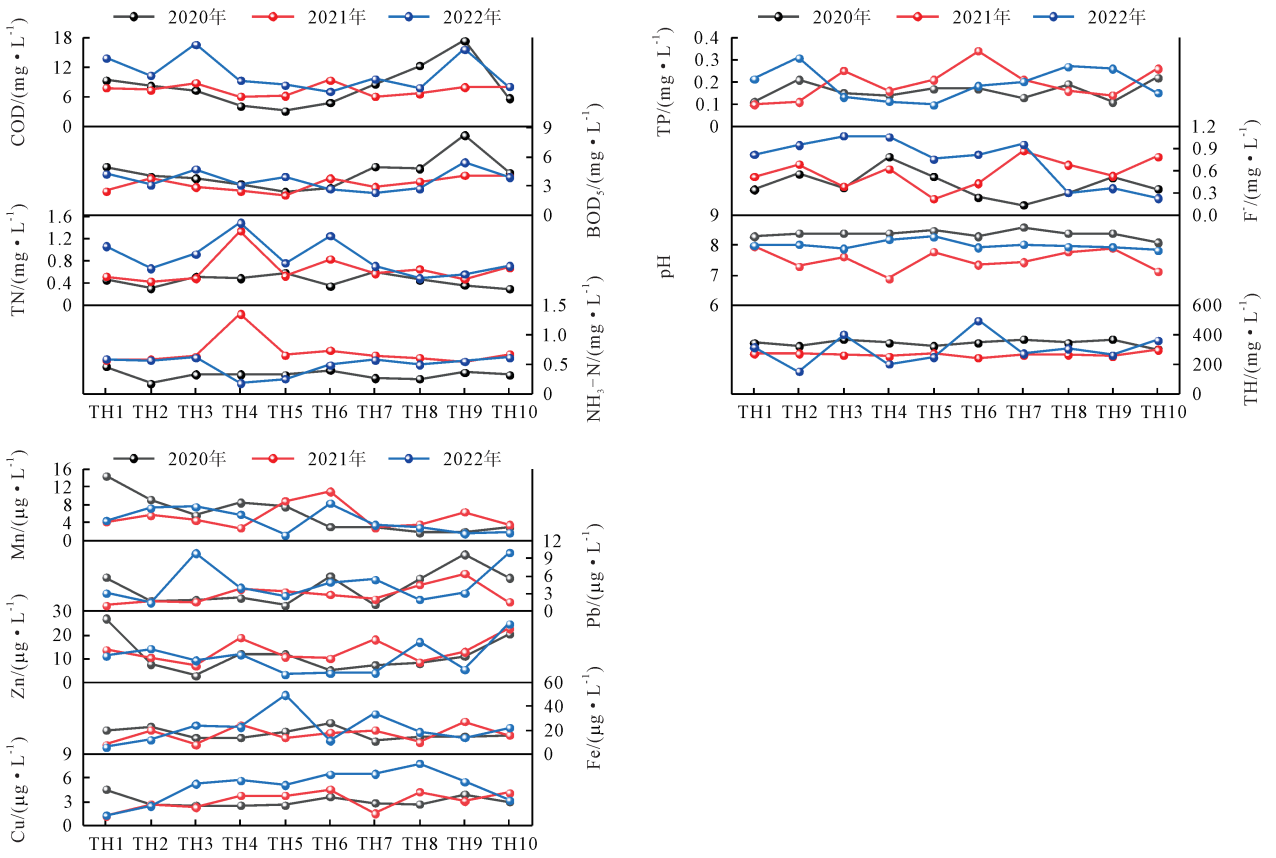


图5 塔里木河上游水质指标空间变化趋势
Fig.5 Spatial variation trend of water quality index in the Tarim River Basin

阿拉尔段经济快速发展,人口数量剧增,农业和畜禽养殖业规模扩大,流域内污染物排放总量呈现增加态势,但2022年与2021年相比水质指标变化不明显,说

明污染现象在2022年得到控制。由于聚类分析结果与水质指标时空变化趋势结果一致,可以有效地评价水质的时空分布特征。

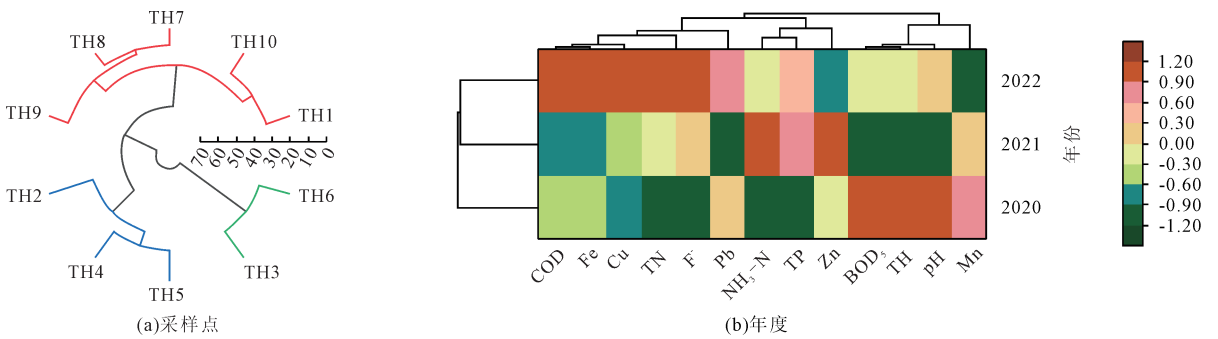


图6 塔里木河上游水质指标时空分布特征
Fig.6 Spatial and temporal distribution characteristics of water quality index in the Tarim River Basin

2.3 水质评价结果

2.3.1 最简水质综合评价指数法(WQI_{min})

塔里木河上游2020-2022年10个监测断面WQI_{min}值变化情况和各等级逐年占比如图7所示。图7(a)和图7(b)结果表明,3年来监测期间的WQI_{min}值均位于60-80之间,水质状况较好,但WQI_{min}年均值呈现下降趋势,2021年“中等”占比增加10%，“良好”占比下降至80%,2022年“中等”占比继续增加至30%，“良好”占比

下降至70%。可能是随着“一带一路”地区工业化和城市化的快速发展,塔里木河上游阿拉尔段人类活动加剧,越来越多的工业农业废水和生活污水流入塔里木河流域,而非点源污染也逐年增加。先前的研究报道,塔里木河流域内大多数地表水水质为优良和良好;2022年阿克苏地区质量状况分析报告中也指出,塔里木河沙雅断面等16个断面中平均水质类别均为II类,占比88.88%。图7(c)反映了10个监测断面年WQI_{min}

值的空间变化,过去3年监测断面的平均水质指数在70.18至76.55之间,所有采样点均属于“良好”水质等级。TH2和TH5水质优于其他样点,TH5周围的土地利用类型以草地和林地为主,导致断面附近的河流水质优于其他地点。TH4和TH9水质普遍劣于其余断面,与各种工业、农业和居民活动有关。从时空分布

的角度看,塔里木河上游WQI_{min}值的变化不均匀,水质表现出一定的时空差异性,水质较差的区域主要集中在人类活动和农业活动强度较大的区域,说明水质与自然因素和当地社会经济发展有直接的关系^[10,20]。根据WQI_{min}值的分类,塔里木河上游水质评价等级均为“良好”,总体平均值为73.35,水质状况良好。

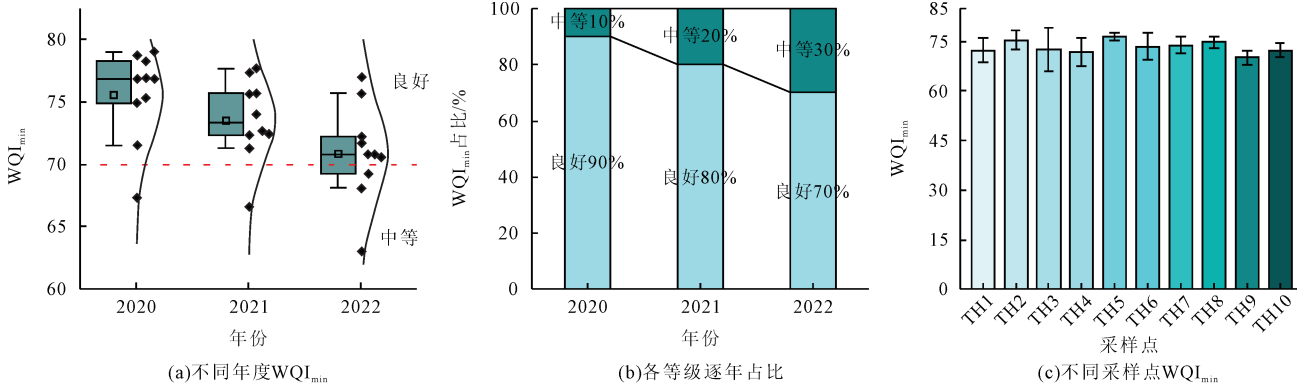


图7 塔里木河上游水质指标的WQI_{min}值及各等级逐年占比
Fig.7 Temporal characteristic and grade distribution characteristics of WQI_{min} values in the Tarim River Basin

2.3.2 加拿大水质指数法(CCME-WQI)

以《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的Ⅲ类水标准为参考,根据确定的13项水质指标,采用CCME-WQI法对塔里木河上游2020-2022年的水质进行评价,评价结果见图8。图8(a)表明,2020-2022年的CCME-WQI平均值分别为82.69、80.78和74.55,根据CCME-WQI的分级标准可知,3年的水质状态分别“良好”“良好”和“中等”,说明断面水质总体较好。但根据CCME-WQI的大小来看,塔里木河上游水质逐年呈下降趋势,2022年水质整体最差,采样点“中等”比例达到100%(图8(b))。新疆作为丝绸之路的经济带核心区,近些年加大工业、农业和畜牧业投入力度,工业废水、生活污水及农田灌溉量等不断增长,增加了城市集约化程度较高区域水体中营养元

素、有机物及重金属等对河流的污染负荷。图8还可以看出塔里木河上游10个监测断面的平均水质指数在78.17至80.30之间,“良好”水质比例只占到20%，“中等”水质比例为80%(图8(b))。图8(c)显示只有TH5和P10的CCME-WQI值在80.00以上,表明断面水质较其他断面好,其中TH5结果与WQI_{min}结果一致,TH10可能是因为途径地域较偏远,人类活动少且河流自净作用。其余采样点CCME-WQI值均小于80,按照平均CCME-WQI值的高低依次为:TH7(79.96)、TH6(79.69)、TH3(79.53)、TH8(79.37)、TH2(79.18)、TH1(78.67)、TH4(78.51)、TH9(78.17)。其中,TH9水质污染程度最重,TH9位于研究区的中游,可能因为这部分位于人类活动的密集区,排放的生活污水和工业废水导致塔里木河污

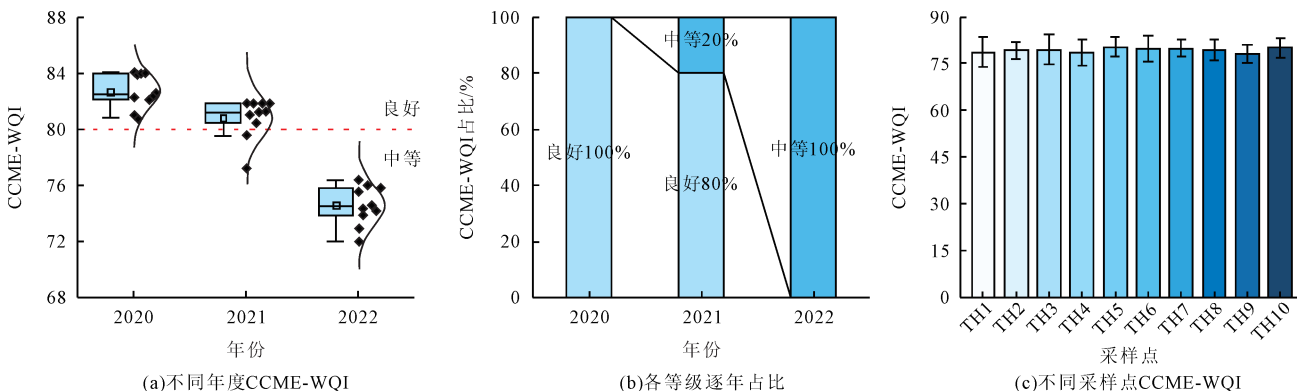


图8 塔里木河上游CCME-WQI法水质评价结果
Fig.8 Results of CCME-WQI water quality evaluation in the Tarim River Basin

染严重,说明污染与人类活动密切相关。总之,CCME-WQI 结果说明塔里木河上游水质时空评价等级为“中等”,总体平均值为 79.34,3 年来水质呈下降趋势,各断面水质情况变化幅度不大,整体水质状况较好。

2.3.3 熵权水质指数法(EWQI)

塔里木河上游EWQI水质评价结果见图9。EWQI 值越小,水质越好。图9(a)显示2020-2022年10个监测断面EWQI值在36.68~59.19之间,水质评级等级为“良好”和“中等”。从时间上来看,从2020年至2022年EWQI年均值分别为46.24、41.26与49.12,水质状态均为“良好”,但整体水质呈先上升后下降趋势,2021年较2020年“良好”比例上升了10%,2022年较2021年“中等”比例上升了40%,且有较多监测断面的EWQI值超过50,说明流域周边城市快速发展、人口

急剧增加、工农业扩大规模均对塔里木河流域的水质有影响。从空间上看,2020-2022年间TH1、TH6和TH9的EWQI均较高,水质相较其它断面差,TH5和TH10水质则优于其他断面。2022年TH3的EWQI最高,水质突然变差与经济发展和人口增加有关。总体来看,10个监测断面的EWQI年均值在40.68~48.90之间,均属于“良好”水质等级。人口密集且工农业活动频繁的断面水环境质量较差,上游的TH1断面的EWQI值也相对高,三河沿途的各种人类活动的影响导致TH1水质较差;相对上游而言,TH5和TH10断面的水质经过长距离的自净作用,污染物进行降解,且下游地区人口稀少,活动强度低,致使下游EWQI值总体低于上游。总之,EWQI结果说明塔里木河上游整体水质状况较好,评价等级为“良好”,3年来水质总体呈下降趋势。

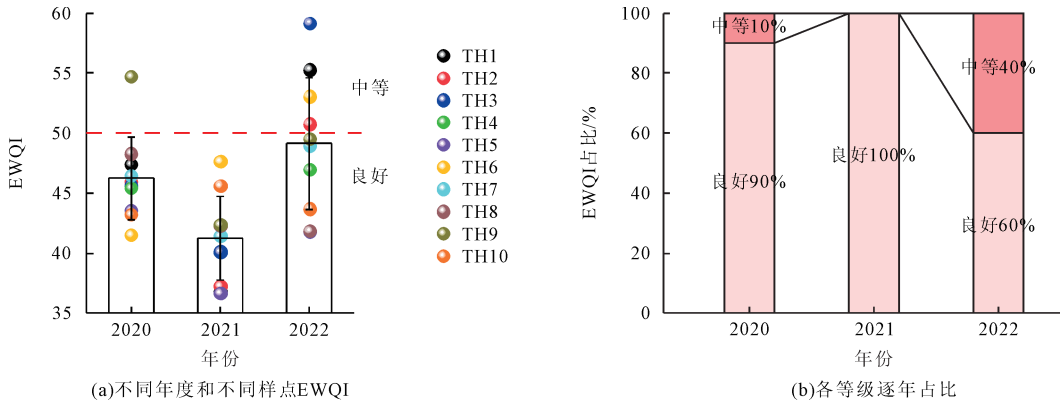


图9 塔里木河上游EWQI水质评价结果
Fig.9 Results of EWQI water quality evaluation in the Tarim River Basin

2.3.4 新型综合水质指数(WQI-DET)

塔里木河上游WQI-DET水质评价结果见图10, WQI-DET值越大,水质越好。图10(a)表明,2020-2022年塔里木河上游的WQI-DET的平均值分别为40.37、45.48和35.80,等级分别为“良好”“良好”和“中等”,评价结果与EWQI一致,整体水质也是先好转后恶

化。10个监测断面中,超过半数断面在3年间的WQI-DET年均值低于40,2021年有20%的断面WQI-DET较高(>60),水质评价为优;2021和2022年均出现10% WQI-DET较低(<20)的断面,水质评价为差,水质良好或优秀的断面数量明显减少($P<0.05$)。TH1、TH8和TH10断面的水质优于TH6,这与前3种方法得

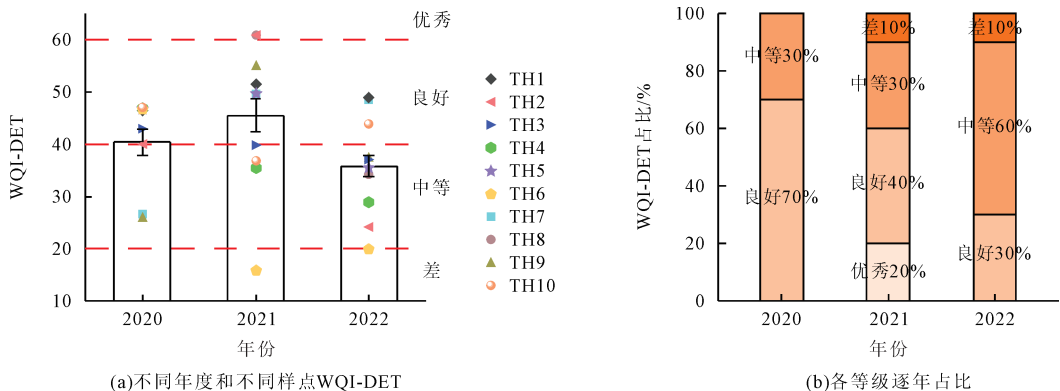


图10 塔里木河上游WQI-DET水质评价结果
Fig.10 Results of WQI-DET water quality evaluation in the Tarim River Basin

到的评价结果有差异。总之,2020-2022年塔里木河上游整体水质状况较好,评价等级为“良好”或“中等”,3年来水质总体呈下降趋势。

2.4 不同方法水质评价结果的对比

2.4.1 不同方法的水质评价结果

为了分析不同方法在塔里木河上游水质评价中的适用性和有效性,对WQI_{min}、CCME-WQI、EWQI和WQI-DET 4种评价结果进行对比(图11),寻求最优方法。WQI_{min}、CCME-WQI和EWQI这3种方法的水质评价结果较为一致,均为II类和III类(图12)。WQI_{min}和

EWQI相同等级的水质类别占比也相等,II类水质占比83.33%,III类水质占比16.67%,水质整体评价等级为“良好”,但2020年EWQI中III类占比较高。CCME-WQI结果中II类水质仅占60.00%左右,III类水质占比上升至40.00%(2022年占比较高),水质整体评价等级为“中等”。WQI-DET评价结果中除46.67%和40.00%的水质分别为II和III类外,还出现6.67%的I类水质(2021年的TH2和TH8),6.67%的IV类水质(TH6),与WQI_{min}和EWQI评价结果相差较大,而与CCME-WQI评价结果差异较小。

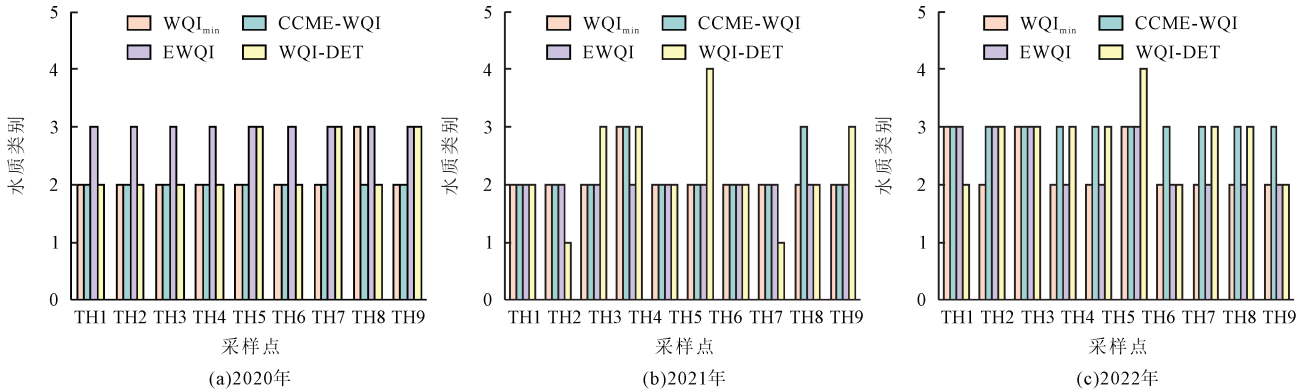


图11 不同方法水质评价结果对比
Fig.11 Comparison of water quality evaluation results by different methods

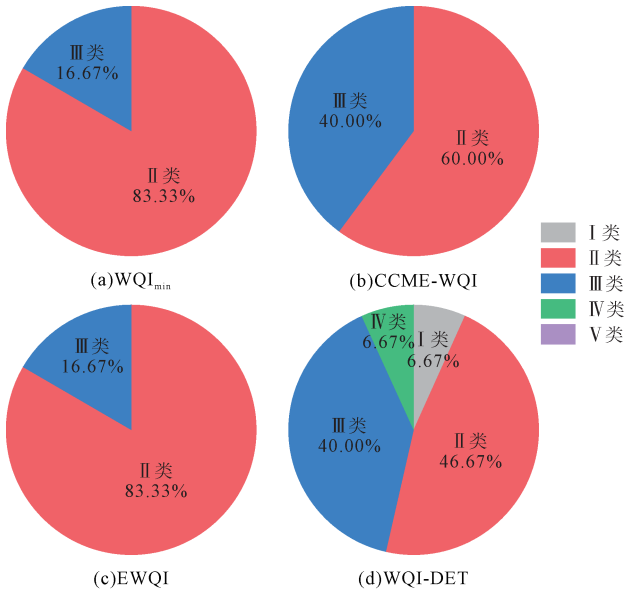


图12 塔里木河上游4种水质评价方法结果
Fig.12 Results of four water quality evaluation methods in the Tarim River Basin

4种评价方法对塔里木河上游水质评价的结果整体上存在一致性,具体优缺点表现在:(1)WQI_{min}因对水质参数简化,可降低分析成本,但评价结果对局部污染敏感,空间异质性显著。本研究结果显示,2021年TH2和TH8采样点的水质较好,这与其他3种评价方法的结果不一致,与该区域实际环境情况不符。(2)CCME-WQI因基于国际通用水质基准,DO

和pH等基础指标权重较高,整体评价结果趋于保守。本研究结果显示塔里木河上游水质时空评价等级为“中等”,与其余3种评价方法的结果不一致。(3)EWQI通过数据驱动赋权,能够客观反映污染物浓度分布的离散性,但需高密度监测数据支撑。本研究监测数据较完整,结果显示除2020年之外与WQI_{min}分析较一致。(4)WQI-DET综合生态毒性权重与多维度参数,评价结果更具生态意义。本研究结果显示,塔里木河上游水质等级包括I类、II类、III类和IV类,这与其他3种评价方法的结果不一致;不同年度和不同采样点的评价结果也与其余3种方法差异较大,因其复杂算法导致对I-II类、III-IV类边界的精细化区分能力受限,不推荐在本研究中使用。

2.4.2 不同方法适用性分析

本研究通过线性回归分析,系统地判断4种水质评价方法在塔里木河上游水质分析中的有效性和可靠性,结果如图13所示。结果表明,WQI_{min}与CCME-WQI($R^2=0.408, P<0.05$)、EWQI($R^2=0.471, P<0.05$)呈显著相关性,表明简化模型(WQI_{min})通过PCA筛选关键水质参数后可有效模拟综合模型(CCME-WQI和EWQI)的评价结果,其关键水质参数的选择及权重分配上具有较强一致性,但CCME-WQI对数据的

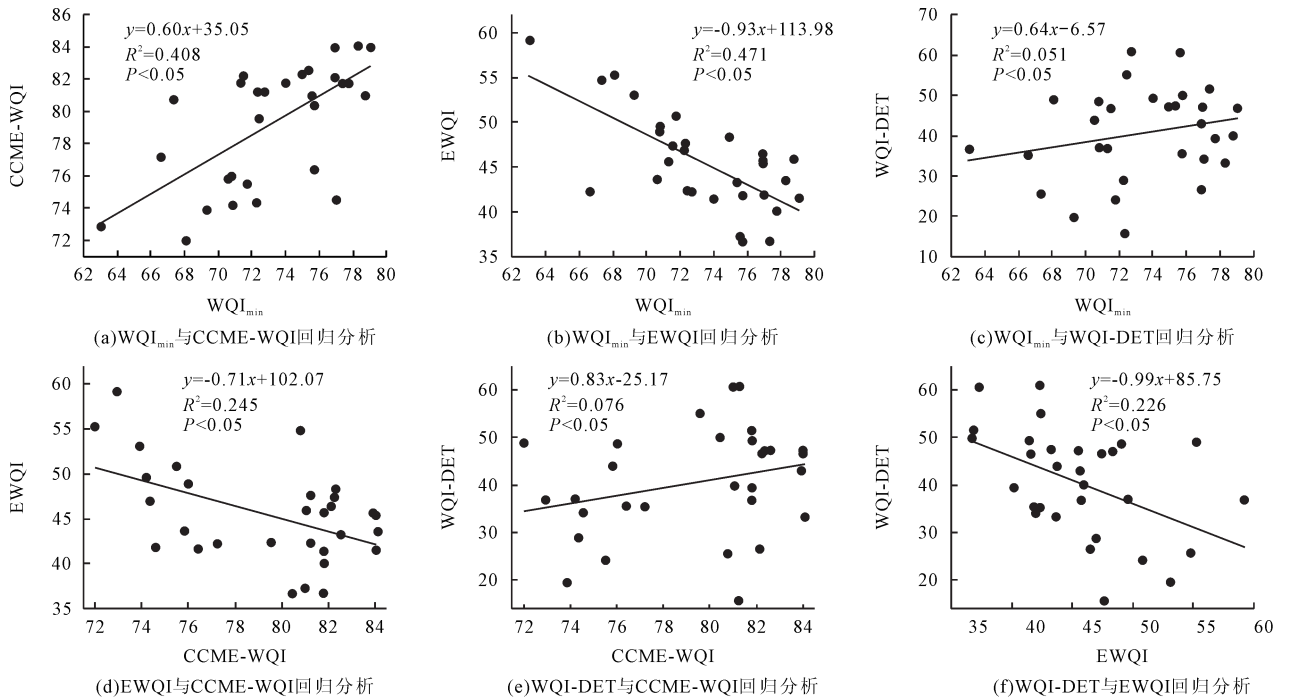


图13 不同水质评价结果线性回归分析

Fig.13 Linear regression analysis of different water quality evaluation methods

完整度要求较高且本研究中水质评价结果与 WQI_{min} 和EWQI存在一定的差异性。 $WQI-DET$ 与其他方法的回归结果相关性较低($R^2<0.250$, $P<0.05$)且评价结果与其余3种方法差异性较大,说明在分析塔里木河上游水质时 $WQI-DET$ 有效性不高。因此,选择 WQI_{min} 与EWQI评价塔里木河上游水质更符合实际情况,即反映了主、客观因素对水质结果的影响,在水质评价方面具有较强的优越性。

综上所述, WQI_{min} 、CCME-WQI、EWQI 和 $WQI-DET$ 4种方法在水质评价结果上均具有一定的可靠性,直观地反映出塔里木河上游水体存在着程度不一的污染现象。 WQI_{min} 能一定程度上通过筛选出的关键水质参数较为真实地反映水体的整体状况;EWQI可作为水质评价分析的重要辅助方法。

3 结论

(1)塔里木河上游水质属中性至弱碱性的高浊水,总硬度偏高,重金属符合地表水 I类水质标准,但 BOD_5 、TN、TP、F和 NH_3-N 存在部分监测点超过 III类水质标准的情况,超标率分别为 36.67%、13.33%、40.00%、6.67%和 3.33%,且各项水质指标均存在不同程度的空间差异性,表明塔里木河上游水质普遍受到人为活动的影响。

(2)根据主成分分析结果和指标的环境关注程度高低,选取 TN、TP、 NH_3-N 、COD、 BOD_5 、F、pH、TH、Zn、Pb、Cu、Mn 和 Fe 共 13 项指标用于综合评价塔里

木河上游水体污染程度的主要指标。

(3) WQI_{min} 评价结果显示,塔里木河上游水质评价等级为“良好”(II类),总体平均值为 73.35,水质状况良好。CCME-WQI评价结果显示,塔里木河上游水质评价等级为“中等”(III类),总体平均值为 79.34,3年来水质呈下降趋势,各断面水质情况变化幅度不大,整体水质状况较好。EWQI评价结果显示,塔里木河上游整体水质状况较好,评价等级为“良好”(II类),3年来水质总体呈下降趋势。 $WQI-DET$ 评价结果显示,塔里木河上游整体水质状况较好,评价等级为“良好”(II类)或“中等”(III类),部分点位出现 I类和 IV类水质。

(4)通过对不同评价方法的对比研究,建议使用 WQI_{min} 和EWQI开展塔里木河上游水质评价,即反映了主、客观因素对水质结果的影响,在水质评价方面具有较强的优越性,且评价结果更符合塔里木河流域上游实际情况。在水质评价管理实际工作中,建议结合单因子指数评价法对水质类别进行判定。

[参考文献]

- [1] Yan D, Chen L, Sun H W, et al. Allocation of ecological water rights considering ecological networks in arid watersheds: a framework and case study of Tarim River Basin[J]. Agricultural Water Management, 2022,267:107636.
- [2] Zhang H, Li H F, Gao D D, et al. Source identification of surface water pollution using multivariate statistics com-

- combined with physicochemical and socioeconomic parameters [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,806:151274.
- [3] Zhao X H, Liu X J, Xing Y, et al. Evaluation of water quality using a Takagi-Sugeno fuzzy neural network and determination of heavy metal pollution index in a typical site upstream of the Yellow River[J]. *Environmental Research*, 2022,211:113058.
- [4] Wang X, Zhang M, Liu L L, et al. Using EEM-PARAFAC to identify and trace the pollution sources of surface water with receptor models in Taihu Lake Basin, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,321:115925.
- [5] Gao Y Y, Wang S T, Zhang C X, et al. Assessing the impact of urban form and urbanization process on tropospheric nitrogen dioxide pollution in the Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Pollution*, 2023,336:122436.
- [6] Peng Y J, Liu L L, Wang X, et al. Source apportionment based on EEM-PARAFAC combined with microbial tracing model and its implication in complex pollution area, Wujin District, China[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 346:123596.
- [7] 林涛,尹静,张博,等. 改进综合水质标识指数法在珠江口水系水质评价中的应用[J]. *水资源保护*, 2022,38(4):166-173.
Lin Tao, Yin Jing, Zhang Bo, et al. Application of improved comprehensive water quality identification index method in water quality evaluation of the Pearl River Estuary[J]. *Water Resources Protection*, 2022,38(4):166-173.
- [8] Zhang H, Ren X N, Chen S K, et al. Deep optimization of water quality index and positive matrix factorization models for water quality evaluation and pollution source apportionment using a random forest model[J]. *Environmental Pollution*, 2024,347:123771.
- [9] 景朝霞,夏军,张翔,等. 汉江中下游干流水质状况时空分布特征及变化规律[J]. *环境科学研究*, 2019,32(1):104-115.
Jing Zhaoxia, Xia Jun, Zhang Xiang, et al. Spatial and temporal distribution and variation of water quality in the middle and downstream of Hanjiang River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019,32(1):104-115.
- [10] 游如玥,敖天其,朱虹,等. 小流域水质评价方法对比研究 [J]. *四川环境*, 2021,40(2):73-81.
You Ruyue, Ao Tianqi, Zhu Hong, et al. Comparative study on water quality evaluation methods of small watersheds[J]. *Sichuan Environment*, 2021,40(2):73-81.
- [11] Tang M, Zeng H, Wang K. Bayesian water quality evaluation model based on generalized triangular fuzzy number and its application[J]. *Environmental Processes*, 2022,9(1):6.
- [12] 杨浩,张国珍,杨晓妮,等. 基于模糊综合评判法的洮河水环境质量评价[J]. *环境科学与技术*, 2016,39(S1):380-386.
Yang Hao, Zhang Guozhen, Yang Xiaoni, et al. Comprehensive evaluation on water environment quality of Tao River based on fuzzy comprehensive method[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,39(S1):380-386.
- [13] 杨咪,徐盼盼,钱会,等. 基于人工蜂群算法的BP双隐层神经网络水质模型[J]. *环境监测管理与技术*, 2018,30(1): 21-26.
Yang Mi, Xu Panpan, Qian Hui, et al. Water quality evaluation model based on artificial bee colony algorithm and BP double hidden layer neural network[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2018, 30(1): 21-26.
- [14] Gao J, Deng G Y, Jiang H B, et al. Water quality pollution assessment and source apportionment of lake wetlands: a case study of Xianghai Lake in the Northeast China Plain[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023,344:118398.
- [15] Noori R, Berndtsson R, Hosseinzadeh M, et al. A critical review on the application of the national sanitation foundation water quality index[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 244:575-587.
- [16] 董春燕,周运涛,李君轶,等. 基于模糊综合评价的长江中游水质分析[J]. *淡水渔业*, 2021,51(2):55-62.
Dong Chunyan, Zhou Yuntao, Li Junyi, et al. Water quality analysis of the middle Yangtze River based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Freshwater Fisheries*, 2021,51(2): 55-62.
- [17] 张婷,王学雷,耿军军,等. 基于MIKE21和灰色模式识别模型的洪湖水水质模拟与评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(9):2090-2100.
Zhang Ting, Wang Xuelei, Geng Junjun, et al. Application of the MIKE21 and grey-mode identification model to monitor and assess water quality for Honghu Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018,27(9):2090-2100.
- [18] Yan T, Shen S L, Zhou A N. Indices and models of surface water quality assessment: review and perspectives[J]. *Environmental Pollution*, 2022,308:119611.
- [19] Wu T, Wang S R, Su B L, et al. Understanding the water quality change of Yilong Lake based on comprehensive assessment methods[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107714.
- [20] Chen K, Liu Q M, Jiang Q L, et al. Source apportionment of surface water pollution in North Anhui Plain, eastern China, using APCS-MLR model combined with GIS approach and socioeconomic parameters[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143:109324.

- [21] 魏晓倩,姜建芳,冯肖嘉文,等. 城市建筑垃圾填埋区地下水水质对比和溯源[J]. 中国环境科学, 2024,44(7):3843–3857.
Wei Xiaoqian, Jiang Jianfang, Feng Xiaojiawen, et al. Comparison and source apportionment of groundwater quality in urban construction waste landfill areas[J]. *China Environmental Science*, 2024,44(7):3843–3857.
- [22] 吴怡,王成,王华,等. 基于 CCME–WQI 方法的鄱阳湖流域乐安河水水质分析[J]. 环境科学, 2024,45(9):5235–5243.
Wu Yi, Wang Cheng, Wang Hua, et al. Analysis of water quality of Le'an River in Poyang Lake basin based on CCME–WQI method[J]. *Environmental Science*, 2024,45(9):5235–5243.
- [23] 张京新,蔡庆旺,康子怡,等. 渭河流域水质分析评价及预测模型[J/OL]. 环境科学, 2024:1–32.(2024–11–28). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202408033>.
Zhang Jingxin, Cai Qingwang, Kang Ziyi, et al. Analysis, evaluation and prediction model of water quality in Weihe River Basin[J/OL]. *Environmental Science*, 2024:1–32.(2024–11–28). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202408033>.
- [24] Lu Q, Liu F J, Li Y J, et al. Study on the relationship between water resources utilization and economic growth in Tarim River Basin from the perspective of water footprint [J]. *Water*, 2022,14(10):1655.
- [25] 陈亚宁,郝兴明,陈亚鹏,等. 新疆塔里木河流域水系连通与生态保护对策研究[J]. 中国科学院院刊, 2019,34(10):1156–1164.
Chen Yaning, Hao Xingming, Chen Yapeng, et al. Study on water system connectivity and ecological protection countermeasures of Tarim River Basin in Xinjiang[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019,34(10):1156–1164.
- [26] 王珊珊,王金林,周可法,等. 塔里木河下游土地利用/覆被变化对生态输水的响应[J]. 水资源保护, 2021,37(2):69–74.
Wang Shanshan, Wang Jinlin, Zhou Kefa, et al. Response of land–use/land cover change to ecological water conveyance in the lower reach of Tarim River[J]. *Water Resources Protection*, 2021,37(2):69–74.
- [27] Mirdashtvan M, Najafinejad A, Malekian A, et al. Sustainable water supply and demand management in semi–arid regions: optimizing water resources allocation based on RCPs scenarios[J]. *Water Resources Management*, 2021,35(15):5307–5324.
- [28] Li J Y, Cui L B, Dou M, et al. Water resources allocation model based on ecological priority in the arid region[J]. *Environmental Research*, 2021,199:111201.
- [29] 吴琼,梁伊,高凡,等. 新疆阿拉尔市苦咸水水化学特征、分布及成因分析[J]. 环境化学, 2021,40(3):737–745.
Wu Qiong, Liang Yi, Gao Fan, et al. Analysis of chemical characteristics, distribution and cause of formation of brackish water in Alar City, Xinjiang[J]. *Environmental Chemistry*, 2021,40(3):737–745.
- [30] Hou Y F, Chen Y N, Ding J L, et al. Ecological impacts of land use change in the arid Tarim River Basin of China[J]. *Remote Sensing*, 2022,14(8):1894.
- [31] Hartmann H, Snow J A, Su B D, et al. Seasonal predictions of precipitation in the Aksu–Tarim River basin for improved water resources management[J]. *Global and Planetary Change*, 2016,147:86–96.
- [32] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
State Environment Protection Administration. *Water and Wastewater Monitoring Method*[M]. Beijing: China Environmental Press.
- [33] GB 3838–2002, 地表水环境质量标准[S].
GB 3838–2002, *Environmental Quality Standards for Surface Water*[S].
- [34] Liu L L, Dong Y C, Kong M, et al. Insights into the long–term pollution trends and sources contributions in Lake Taihu, China using multi–statistic analyses models[J]. *Chemosphere*, 2020,242:125272.
- [35] Zhou Y, Wang X M, Li W Y, et al. Water quality evaluation and pollution source apportionment of surface water in a major city in southeast China using multi–statistical analyses and machine learning models[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023,20(1):881.
- [36] Kannel P R, Lee S, Lee Y S, et al. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007,132(1/2/3):93–110.
- [37] Wu Z S, Wang X L, Chen Y W, et al. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,612:914–922.
- [38] Canadian Council of Ministers of the Environment. *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*[R]. 2017.
- [39] Rahman K, Barua S, Imran H M. Assessment of water quality and apportionment of pollution sources of an urban lake using multivariate statistical analysis[J]. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021,5:100309.
- [40] 田福金,马青山,张明,等. 基于主成分分析和熵权法的新安江流域水质评价[J]. 中国地质, 2023,50(2):495–505.
Tian Fujin, Ma Qingshan, Zhang Ming, et al. Evaluation of water quality in Xin'anjiang River Basin based on principal

- component analysis and entropy weight method[J]. *Geology in China*, 2023,50(2):495–505.
- [41] Liu Z Z, Zhu H H, Cui X W, et al. Groundwater quality evaluation of Dawu water source area based on water quality index (WQI): comparison between Delphi method and multivariate statistical analysis method[J]. *Water*, 2021, 13(8): 1127.
- [42] 郑紫吟, 储小东, 徐金英, 等. 南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化[J]. *环境科学*, 2023,44(7):3846–3854.
- Zheng Ziyin, Chu Xiaodong, Xu Jinying, et al. Evaluation of shallow groundwater quality and optimization of monitoring indicators in Nanchang[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(7):3846–3854.
- [43] Wang X P, Liu X J, Wang L Q, et al. A holistic assessment of spatiotemporal variation, driving factors, and risks influencing river water quality in the northeastern Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2022,851(Pt 1):157942.
- [44] Ranjbar Jafarabadi A, Raudonytė–Svirbutavičienė E, Shadmehri Toosi A, et al. Positive matrix factorization receptor model and dynamics in fingerprinting of potentially toxic metals in coastal ecosystem sediments at a large scale (Persian Gulf, Iran)[J]. *Water Research*, 2021,188:116509.
- [45] Haji Gholizadeh M, Melesse A M, Reddi L. Water quality assessment and apportionment of pollution sources using APCS–MLR and PMF receptor modeling techniques in three major rivers of South Florida[J]. *Science of the Total Environment*, 2016,566:1552–1567.
- [46] 李文文. 气候变化与人类活动影响下的塔里木河流域水资源利用研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- Li Wenwen. Study on the Utilization of Water and Soil Resources in Tarim River Basin Under the Influence of Climate Change and Human Activities[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2022.
- [47] 高静. 新疆塔里木河流域阿克苏地区段水污染治理综合效益研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2020.
- Gao Jing. Research on the Comprehensive Benefits of Water Pollution Control in the Prefecture Section of the Tarim River Basin in Xinjiang[D]. Alaer: Tarim University, 2020.
- [48] 陈生熬, 程勇, 范镇明, 等. 塔里木河上游阿拉尔段水质的时空特征[J]. *水生态学杂志*, 2014,35(5):15–21.
- Chen Sheng'ao, Cheng Yong, Fan Zhenming, et al. Spatial-temporal characteristics of water quality in the upper reaches of the Tarim River in Alar[J]. *Journal of Hydroecology*, 2014,35(5):15–21.
- [49] Xiao J, Gao D D, Zhang H, et al. Water quality assessment and pollution source apportionment using multivariate statistical techniques: a case study of Laixi River Basin, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(2): 287.
- [50] Zhong M F, Zhang H Y, Sun X W, et al. Analyzing the significant environmental factors on the spatial and temporal distribution of water quality utilizing multivariate statistical techniques: a case study in Balihe Lake, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018,25(29):29418–29432.
- [51] Ding J, Jiang Y, Liu Q, et al. Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of Dongjiang River Basin, China: a multi-scale analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2016,551:205–216.