

新疆艾比湖流域地表水丰水期和枯水期水质分异特征及污染源解析*

任 岩^{1,2,3}, 张 飞^{1,2,3**}, 王 娟^{1,2,3}, 张 月^{1,2,3}, 杨胜天^{1,4}, Abduwasit Ghulam⁵, Kung Hsiangte⁶

(1: 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

(2: 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

(3: 新疆智慧城市与环境建模普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

(4: 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

(5: 美国圣路易斯大学可持续发展中心, 圣路易斯 63108)

(6: 美国孟菲斯大学地球科学系, 孟菲斯 38152)

摘 要: 采用2015年艾比湖流域54个采样点的10个地表水水质指标数据, 首先利用水质指数模型(WQI)和地统计学方法对流域水质污染情况进行全局评价, 然后利用层次聚类法、判别分析法和因子分析法分析艾比湖流域地表水丰水期和枯水期水质分异特征。在水质时空分异特征研究的基础上, 利用主成分回归分析法对艾比湖流域水质进行污染源解析。结果表明: 艾比湖流域丰水期WQI值介于38~70之间, 枯水期WQI值介于31~71之间, 艾比湖流域丰水期的地表水水质污染情况比枯水期严重, 而艾比湖、博尔塔拉河和精河靠近艾比湖湖区的河道污染程度均比其他河道严重。由聚类分析和判别分析得出艾比湖流域丰水期和枯水期的水质采样点在空间上均被分成A、B两组, A组包括艾比湖湖区西部、奎屯河、古尔图河和四棵树河, B组包括艾比湖湖区东部、精河和博尔塔拉河。艾比湖流域丰水期和枯水期的水体主要受到化学需氧量、溶解氧、氨氮和悬浮物浓度等指标的影响, B组水质污染指标的值相比于A组的值偏高, B组区域内存在高污染企业, 艾比湖流域水环境治理工作需主要集中在B组所包括的艾比湖湖区、博尔塔拉河和精河。④艾比湖湖区、精河和博尔塔拉河地表水体的污染主要来自于有机物污染和营养物质污染, 其次为工矿业污染; 而奎屯河、古尔图河、四棵树河地表水体的污染主要来自于有机物污染, 其次为营养物质污染, 生物污染的影响较为微弱。该研究结果可为艾比湖流域地表水水环境改善和治理提供一定参考。

关键词: 艾比湖流域; 多元统计方法; 水质指数; 时空分布; 污染源解析

Spatio-temporal characteristics and source identification of surface water pollutants in Lake Ebinur Watershed, Xinjiang

REN Yan^{1,2,3}, ZHANG Fei^{1,2,3**}, WANG Juan^{1,2,3}, ZHANG Yue^{1,2,3}, YANG Shengtian^{1,4}, ABDUWASIT Ghulam⁵ & KUNG Hsiangte⁶

(1: College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, P.R.China)

(3: Key Laboratory of Xinjiang Wisdom City and Environment Modeling, Urumqi 830046, P.R.China)

(4: College of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China)

(5: Center for Sustainability, Saint Louis University, St. Louis 63108, USA)

(6: Department of Earth Sciences, University of Memphis, Memphis 38152, USA)

Abstract: Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants are important for the management and protection of water resources. In this study, water-quality index (WQI) modeling, hierarchical cluster analysis, discriminant analysis,

* 国家自然科学基金项目(41361045)和国家自然科学基金-新疆联合基金项目(U1503302)联合资助。2016-07-10 收稿; 2016-10-31 收修改稿。任岩(1989~), 女, 硕士研究生; E-mail: arielrenyan@163.com.

** 通信作者; E-mail: zhangfei3s@163.com.

factor analysis and principle analysis of multiply linear regression (APCS-MLR) were used to analyze the water quality data sets from river network during 2015, including 10 parameters monitored at 54 different sites in Lake Ebinur Watershed of Xinjiang. Using GIS to study the spatio-temporal characteristics and source identification of surface water pollutants were the major goals of this study. The results showed that: The value of WQI varies between 38 and 70 during wet season when the water levels were high, while the value was between 31 and 71 during dry season. The Lake Ebinur water quality deterioration was more significant during wet season, and the water pollution status at Lake Ebinur, Bortala River and Jinghe River near Lake Ebinur were more serious than other tributaries. By cluster analysis and discriminant analysis, the basin could be divided into two groups. The group A included the eastern area of Lake Ebinur, Kuitun River, Guertu River and Sikeshe River. The group B included the western area of Lake Ebinur, Jinghe River and Bortala River. Water quality at the B group of Lake Ebinur Watershed was mainly influenced by chemical oxygen demand, dissolved oxygen, ammonia nitrogen and suspended solids concentrations during the dry season, more serious than the group A because there are some high polluting enterprises at the group B region, while the water environment governance mainly concentrated in the B region. In Lake Ebinur, Jinghe River and Bortala River, water pollutants mainly came from organic and nutrient pollution, followed by mining and industrial pollution. In Kuitun River, Guertu River and Sikeshe River, surface water pollutants mainly came from organic and biological pollution, followed by nutrient pollution, while biological pollution effects were relatively weak. Results of the water quality study would provide valuable and useful information for the future management of water resources in Lake Ebinur.

Keywords: Lake Ebinur Watershed; multivariate statistical methods; water quality index; spatio-temporal distribution; source identification

内陆河流作为区域居民生活污水、工业废水和地表径流排放的主要载体最易遭受到污染和破坏^[1-2]. 近几十年来,政府已逐步开展了大量内陆河流域水质监测项目,并获得大量的水质监测数据. 由于各个监测指标及监测点之间存在复杂的相互影响,导致大量监测数据并不能充分利用与分析,这也给水质专家和地方决策者如何采取有效措施管理和改善水环境提出了挑战^[3-5]. 因此,从大量的环境监测数据中挖掘有用的信息,探索水质的时空分布模式,识别潜在污染源和污染源的解析能够提高人们对区域环境状况的认识,帮助决策者建立高效合理的水环境管理方案^[6].

近年来,各类数学及统计评价方法被广泛用于水质评价、时空分异、潜在污染源识别和解析的研究. 水质指数(water quality index, WQI)模型与其他水质模型相比具有简单易行、灵活多变等特点,对地表水体及水体富营养化污染尤其敏感,在水质综合评价中取得了令人满意的效果^[7]. 多元统计技术相比于近来被应用较多的神经网络、模糊综合评价和灰色评价法等方法更为简便、普适性广,它不仅能够对复杂的多源数据降维简化,又能保证主要信息不丢失,提高分析结果的可靠性,在实际应用中可以获得很好的效果^[8]. 聚类分析、判别分析、因子分析和主成分回归分析作为传统的多元统计技术,在水质时空分异特征及潜在污染源识别、解析中得到广泛应用^[9]. 国内外学者利用多元统计技术分别对太湖流域^[10]、陕西洋河^[11]、沁河流域^[12]、洞庭湖^[13]、土耳其中部近海^[14]、温瑞塘河流域^[15]以及德国北部低洼地区^[16]的污染物时空分异特征及潜在污染源识别进行了研究,并取得了满意的效果. 内陆河流域的水质时空分异特征和污染源解析研究较成熟^[17-21],也有学者利用多元统计方法评估了近海海域的地表水质量^[22],分析了地下水的水质状况^[23],此外, Mohammadpour 等^[24]利用 WQI 和改进模型分析了人工湿地方面水质的时空特征. 但这些研究割裂了时间与空间相互作用的机制,只是单独探讨了时间或空间上分异特征及污染源识别,忽略了时间对空间分布规律及其污染源的影响.

艾比湖流域是古丝绸之路的要道,同时也是准噶尔盆地、天山北坡经济带,水环境的好坏直接影响到第二条亚欧大陆桥和国家级二类口岸阿拉山口的发展以及该流域的可持续发展^[25]. 作为内陆河流域,艾比湖流域对区域工农业发展及生态环境保护起着重要作用. 以往的研究多是对艾比湖流域进行水质评价,而没有分析水质的时空分异特征和污染源解析,因此本文选择 5 月和 10 月的地表水采样点,分析艾比湖流域丰水期和枯水期的地表水水污染时空分异特征,并联合水质时空因子进行污染源解析. 故本文首先根据艾比湖流域河网水质监测数据,应用水质指数 WQI 模型对艾比湖流域河网水质进行综合评价;然后采用聚类分析对艾比湖流域丰水期和枯水期的水质采样点进行空间分组,同时利用判别分析验证聚类分析空间分组结

果的可信度;其次基于聚类分析结果,采用因子分析法研究艾比湖流域水质时空分异特征及识别显著性污染指标;最后结合时空联合因子分析的结果采用主成分回归分析中基于受体的源分配模型,识别不同时期不同区域水环境污染源以及主要污染源对河道水质的影响,为艾比湖流域地表水水环境治理提供科学依据.

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区概况

艾比湖流域(43°38′~45°52′N,79°53′~85°02′E)包括奎屯河、四棵树河、古尔图河、精河、阿恰勒河、大河沿子河、博尔塔拉河7条河流,其中博河、精河和奎屯河是主要的3大支流,地跨博尔塔拉蒙古自治州的博乐市、温泉县和精河县,塔城地区的乌苏市和托里县南部,伊犁直属的奎屯市和克拉玛依的独山子区.流域面积50621 km²,其中山地面积24317 km²,平原区面积25762 km²,湖泊面积542 km².流域西、南、北三面环山,中间为谷地平原,东部有尾间艾比湖,是一个具有典型干旱区山地—绿洲—荒漠生态环境特点的区域,湖区多年平均降水不足100 mm,而山区降水相对较多,是湖区的主要水源补给区^[26].近年来,由于人类大规模的垦荒活动,导致艾比湖不断涸缩,湖水量减少,目前只有博尔塔拉河、精河、奎屯河,分别从西、南、东3个方向注入艾比湖,成为湖水的主要来源.湖面呈椭圆状,面积650 km²,平均水深为2~3 m,湖面海拔189 m^[27].艾比湖流域包括博尔塔拉蒙古自治州、奎屯市、独山子、乌苏市、托里县,是北疆地区重要的棉花、粮食、畜牧业基地和石油化工基地.研究区水质监测采样点和水系分布如图1所示.

1.2 数据收集

2015年5月和10月分别采集艾比湖流域54个采样点(图1)的地表水样品.选取化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)浓度、五日生化需氧量(BOD₅)、总氮(TN)浓度、总磷(TP)浓度、氨氮(NH₃-N)浓度、pH、悬浮物(SS)浓度、色度、浊度10个指标进行测定.所有样本的采集及检测分析严格按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的方法进行.

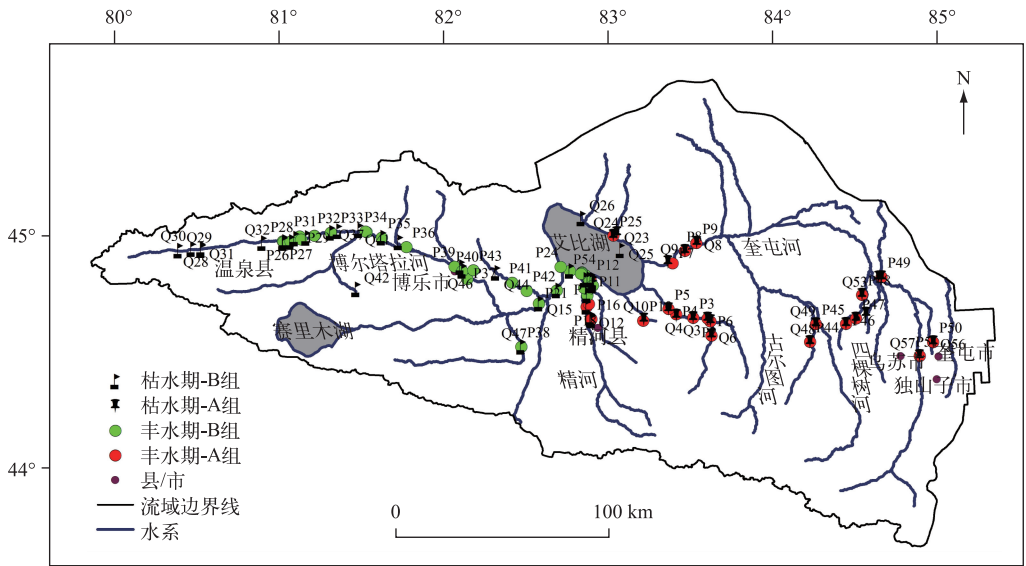


图1 艾比湖流域地理位置

Fig.1 Geographical location of Lake Ebinur Watershed

1.3 研究方法

1.3.1 WQI 模型 水质指数是综合了多个水质参数的归一化无量纲数,需要考虑的参数取决于水的用途,常考虑的水质参数包括 DO 浓度、BOD₅、COD、pH 值、SS 浓度、NH₃-N 浓度、TN 浓度和 TP 浓度等^[24],该模型较为成熟,在国内也得到广泛应用^[28].本文主要利用该模型对整个流域的水质污染情况进行全局评价,参考

Mohammadpour 等^[24]关于马来西亚滨州湿地的综合水质模型 WQI , 选择了 DO 浓度、 BOD_5 、 COD 浓度、 pH 、 SS 浓度、 NH_3-N 浓度 6 个水质参数, 将这些水质参数变量根据分类指数函数 (SI) 转变成非空间变量, 不同参数的 SI 计算公式见表 1.

表 1 水质指数的分类指数函数^[24]
Tab.1 The sub-index equations for WQI

水质参数	取值 ^a	分类指数函数
DO	$X \leq 8$	$SI_{DO} = 0$
	$8 < X < 92$	$SI_{DO} = -0.395 + 0.03X^3 - 0.0002X^3$
	$X \geq 92$	$SI_{DO} = 100$
BOD_5	$X \leq 5$	$SI_{BOD_5} = 100.4 - 4.23X$
	$X > 5$	$SI_{BOD_5} = (108e^{-0.055X}) - 0.1X$
COD	$X \leq 20$	$SI_{COD} = 99.1 - 1.33X$
	$X > 20$	$SI_{COD} = (103e^{-0.0157X}) - 0.04X$
NH_3-N	$X \leq 0.3$	$SI_{NH_3-N} = 100.5 - 105X$
	$0.3 < X < 4$	$SI_{NH_3-N} = (94e^{-0.573X}) - 51X - 21$
	$X \geq 4$	$SI_{NH_3-N} = 0$
SS	$X \leq 100$	$SI_{SS} = (97.5e^{-0.00676X}) + 0.05X$
	$100 < X \leq 1000$	$SI_{SS} = (71e^{-0.0016X}) + 0.015$
	$X \geq 1000$	$SI_{SS} = 0$
pH	$X < 5.5$	$SI_{pH} = 17.2 - 17.2X + 5.02X^2$
	$5.5 \leq X < 7$	$SI_{pH} = -242 + 95.5X - 6.67X^2$
	$7 \leq X < 8.75$	$SI_{pH} = -181 + 82.4X - 6.05X^2$
	$X \geq 8.75$	$SI_{pH} = 536 - 77X + 2.76X^2$

^a X 代表的变量单位是 mg/L , 其中 pH 无量纲.

WQI 模型计算公式为^[23]:

$$WQI = 0.22SI_{DO} + 0.19SI_{BOD_5} + 0.16SI_{COD} + 0.15SI_{NH_3-N} + 0.16SI_{SS} + 0.12SI_{pH} \quad (1)$$

式中, SI 代表分类指数. 模型根据输入水质监测数据将采样点水质归一化到 0~100 之间, 并根据水体污染的程度, 从 0~100 将水质由差到极好划分为 6 类, 分别对应严重污染 (<31.0)、污染 (31.0~51.9)、轻度污染 (51.9~76.5)、较好 (76.5~92.7) 和好 (>92.7)^[24].

1.3.2 层次聚类分析 聚类分析 (CA) 是根据对象距离远近或相似性大小进行分类的多元统计方法. 本文利用该方法对采样点的水质数据做空间分类, 采用的层次聚类分析 (HCA) 是应用最广泛的聚类方法, 该法以逐次聚合的方式将距离最近或者最相似的对象聚成一个类簇, 直至最后聚成一类^[29-30]. 本文采用的计算方法是欧氏距离平方和离差平方方法.

聚类分析要求数据符合正态分布, 在进行分析之前, 需要利用 K-S 非参数检验^[29]对采样点水质数据进行正态检验. 结果显示, 采样点各监测指标除 BOD_5 外均以 95% 或更高的可信度服从正态分布; 采样点各指标偏离正态分布, 进行自然对数转换后^[30], 各监测指标除 pH 和 SS 外均能够以 95% 或更高的可信度服从正态分布. 为了消除变量单位量纲的影响, 需要对数据进行标准化处理 (均值为 0, 方差为 1).

1.3.3 判别分析 判别分析 (DA) 是多变量统计分析中用于判别样品所属类别的一种统计分析方法. 可以用来判别 CA 分析结果和识别显著性的污染指标. 此方法分为 3 类: 标准式、前进式和后退式. 相比之下, 后退式 DA 方法具有更好的指标降维能力和判别能力^[31]. 所以, 本文采用该方法对 1.3.2 节的聚类分析做验证分析, 利用后退式 DA 方法对原始数据进行时空差异性分析, 并采用交叉验证法 (Cross-validation) 检验此方法的判别能力. 相应的判别函数表达式为:

$$f(G_i) = C_i + \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot p_{ij} \quad (2)$$

式中, $f(G_i)$ 表示第 i 类的判别函数, C_i 为第 i 类的固有常数, n 表示参与判别分析指标个数, p_{ij} 表述第 i 类第 j

个指标值, w_{ij} 表示对应的判别系数.

1.3.4 因子分析法 因子分析(FA)是一种既可以降低变量维数,又可以对变量进行分类的广泛应用的方法^[32]. 其实质是从多个实测的原变量中提取出较少的、互不相关的抽象综合指标,即因子. 每个原变量可用这些提取出的公共因子的线性组合表示,具体参见公式(3). 同时,根据各个因子对原变量的影响大小,也可将原变量划分为等同于因子数目的类数. 在水质分析中,此方法主要用于提取污染因子和识别污染源^[33],本文在聚类分析和判别分析的基础上,利用该方法分析各类水质指标的主要污染因子.

$$Z_k = a_{k1} \cdot F_1 + a_{k2} \cdot F_2 + \dots + a_{km} \cdot F_m + U_k (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中, Z_k 表示第 k 个变量的标准化分数, a_{km} 表示第 m 个因子相对于第 k 个变量的因子载荷, F_m 表示第 m 个公共因子, U_k 为 Z_k 的唯一因素, m 表示所有变量公共因子的数目, n 表示变量的个数.

因子分析要求变量间要有一定的相关性,所以在数据分析之前需要利用巴特莱检验(KMO)^[29]检验数据应用因子分析的可行性. 同时,考虑到水质指标数量级上的差异,需要对数据再进行标准化(均值为0,方差为1). 一般来说,分析结果只选取特征值大于1的因子^[33]. 因子分析及判别分析均采用原始数据.

1.3.5 主成分回归分析 主成分回归分析法(APCS-MLR)是一种基于因子得分评价各个因子对各个变量贡献的统计方法. 其原理是将变量值与因子得分进行多元线性回归,根据回归参数得到针对各个因子的估计值,从而确定因子对各个变量的贡献,具体参见公式(4)^[34]. 目前,这种方法在水质评价中用于计算污染因子对各个评价指标的贡献率^[35],本文在因子分析的基础上,对各个主要污染因子分析水质污染的贡献率.

$$M_s = a_{os} + \sum_{p=1}^n A_{ps} \cdot APCS_p \quad (4)$$

式中, M_s 表示第 s 个变量的实测值, a_{os} 表示第 s 个变量的多元回归的常数项, A_{ps} 表示第 p 个因子对第 s 个变量的回归系数, $APCS_p$ 表示调整后的第 p 个因子的分数, n 表示因子个数. $A_{ps} \cdot APCS_p$ 表示第 p 个因子对 M_s 的质量浓度贡献,所有样本的 $A_{ps} \cdot APCS_p$ 的平均值就是表示因子平均绝对贡献率. 研究中多元统计分析及水体综合水质空间分析采用的是 Microsoft Excel 2010、SPSS 19 和 ArcGIS 10.0 软件.

2 结果与分析

2.1 水质指标的统计特征

5月属于丰水期,10月属于枯水期^[14,36-37]. 总体上来看,艾比湖流域的地表水水环境污染比较严重. 丰水期,COD、TP、TN、NH₃-N、BOD₅和DO浓度均值分别为46.93、0.07、1.97、0.63、1.85和4.46 mg/L,根据《地表水环境质量标准》,DO属于Ⅳ类水质标准,TN属于Ⅴ类水质标准,NH₃-N属于Ⅲ类水质标准,TP属于Ⅱ类水质标准,COD超出Ⅴ类水质标准的1.17倍,BOD₅则分别属于Ⅰ类水质标准. 枯水期,COD、TP、TN、NH₃-N、BOD₅和DO浓度的均值分别为15.58、0.08、1.06、0.08、2.09和8.29 mg/L,与《地表水环境质量标准》中相应指标Ⅴ类水标准进行比较可知,DO属于Ⅰ类水标准,TN属于Ⅳ类水标准,NH₃-N属于Ⅰ类水质标准,TP属于Ⅱ类水质标准,COD、BOD₅则分别属于Ⅰ类和Ⅱ类水质标准(表2). 综上所述,丰水期比枯水期的水质污染严重.

2.2 WQI 水质综合评价

通过计算得到,丰水期WQI值的范围是38~70,枯水期WQI值的范围是31~71. 按照采样点的数量计算,丰水期有18.50%处于污染,83.30%处于轻度污染. 枯水期有5.20%处于污染,94.70%处于轻度污染. 总体来看,丰水期的艾比湖流域水质污染情况较为严重,相比较来看枯水期水质情况较好,普遍只有轻度污染.

从WQI采样断面丰水期和枯水期的空间分布(图2)可知,丰水期的污染区域主要分布在艾比湖湖区,精河、博尔塔拉河和奎屯河靠近艾比湖的支流;枯水期的污染区域主要分布在艾比湖湖区;丰水期的污染区域大于枯水期;枯水期的轻度污染区域大于丰水期. 总体来看,丰水期和枯水期的艾比湖湖区和周边的河道污染程度要比外围河道严重,主要分布在艾比湖湖区、博尔塔拉河、精河和奎屯河靠近艾比湖的河道. 丰水期的污染情况要比枯水期严重,这可能因为艾比湖流域的丰水期是施肥和喷洒农药的主要季节,艾比湖流域主要支流流经精河县、博乐市、温泉县和乌苏县等地的农田绿洲,这些地区的农耕活动会影响沿途支流的水质^[38-39].

表 2 丰水期和枯水期水质指标的统计描述

Tab.2 Statistical description of water quality indexes of surface water during wet and dry seasons

统计值	COD/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	NH ₃ -N/ (mg/L)	色度	pH	浊度	BOD ₅ / (mg/L)	DO/ (mg/L)	SS/ (mg/L)
均值(丰水期)	46.93	0.07	1.97	0.63	19.04	8.66	131.96	1.85	4.46	213.26
均值(枯水期)	15.58	0.08	1.06	0.08	9.47	8.16	4.86	2.09	8.29	18.98
标准差(丰水期)	81.93	0.15	2.61	2.39	53.98	0.35	269.24	4.05	2.94	675.12
标准差(枯水期)	22.98	0.09	1.08	0.06	6.73	0.15	5.36	6.30	1.08	36.59
均方根误差(丰水期)	11.15	0.02	0.36	0.33	7.35	0.05	36.64	0.55	0.40	91.87
均方根误差(枯水期)	3.04	0.01	0.14	0.01	0.89	0.02	0.71	0.83	0.14	4.85
最小值(丰水期)	1.00	0.01	0.25	0.04	5.00	7.65	3.00	0.50	0.20	4.00
最小值(枯水期)	5.00	0.02	0.12	0.03	5.00	7.53	1.00	0.50	5.20	5.00
最大值(丰水期)	485.00	1.10	18.51	17.76	400.00	9.23	1316.00	18.60	12.90	4729.00
最大值(枯水期)	131.00	0.61	6.17	0.51	40.00	8.50	30.00	44.50	10.00	220.00

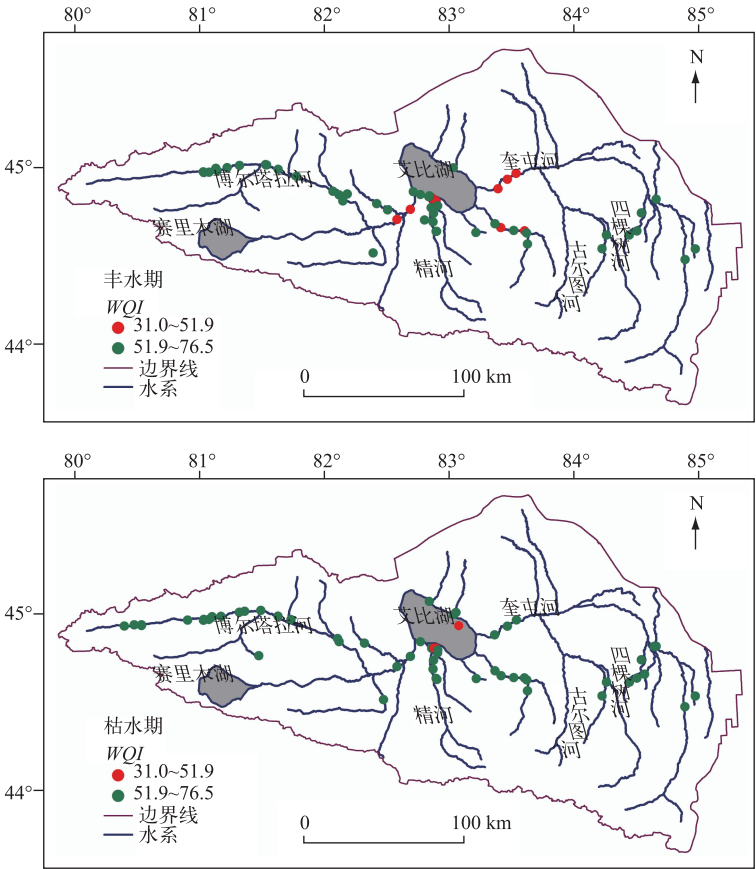


图 2 WQI 采样断面丰水期和枯水期空间分布

Fig.2 The spatial distribution of WQI during wet and dry seasons

2.3 水质污染特征的时空相似性与差异性

丰水期空间尺度的聚类分析和判别分析表明,空间上可以将采样点分为 2 组(图 3):A 组包括 P1、P2、

P4、P5、P6、P7、P10、P11、P12、P14、P15、P17、P18、P19、P22、P30、P31、P32、P33、P34、P35、P45、P49 和 P50 这 24 个采样点,主要位于奎屯河、古尔图河、四棵树河和精河的部分支流;B 组包括 P3、P8、P9、P13、P16、P20、P21、P23、P24、P25、P26、P27、P28、P29、P36、P37、P38、P39、P40、P41、P42、P43、P44、P46、P47、P48、P51、P52、P53 和 P54 这 30 个采样点,主要位于博尔塔拉河、精河和艾比湖湖区. 采样点聚类分析结果的判别分析交叉验证正确率达到 95.70% (表 3),误判区的区域主要集中在艾比湖湖区和 3 大主要支流的连接河段,总体分类结果较好.

表 3 水质污染的空间判别分析*

Tab.3 Spatial and temporal discriminate analysis of water pollution in Lake Ebinur Watershed

时间尺度分析结果				空间尺度分析结果			
分组		样本个数	正确率	分组		样本个数	正确率
A 组	丰水期	30	62.50%	丰水期	A 组	22	8.60%
	枯水期	37	37.50%		B 组	27	91.40%
	合计	67	55.60%		合计	49	86.20%
B 组	丰水期	24	72.70%	枯水期	A 组	24	91.70%
	枯水期	20	27.30%		B 组	38	8.30%
	合计	44	52.60%		合计	62	95.70%

* 卡方检验, Sig. 小于 0.05.

枯水期空间尺度的聚类分析和判别分析表明,空间上也是将采样点分为 2 组(图 3):A 组包括 Q1、Q4、Q6、Q7、Q10、Q11、Q12、Q19、Q21、Q23、Q27、Q28、Q29、Q32、Q34、Q35、Q37、Q41、Q48、Q49、Q50 这 21 个采样点,主要位于奎屯河、古尔图河和四棵树河;B 组包括 Q2、Q3、Q5、Q8、Q9、Q13、Q14、Q15、Q16、Q17、Q18、Q20、Q22、Q24、Q25、Q26、Q30、Q31、Q33、Q36、Q38、Q39、Q40、Q42、Q43、Q44、Q45、Q46、Q47、Q51、Q52、Q53、Q54 这 33 个采样点,主要位于博尔塔拉河、精河和艾比湖湖区. 采样点聚类分析结果的判别分析交叉验证正确率达到 86.20% (表 3),误判区的区域主要集中在艾比湖湖区和 3 大主要支流的连接河段,总体分类结果较好.

根据艾比湖流域丰水期和枯水期的水质聚类结果,做了 A、B 两组分区的空间分布图(图 1). 从图中可以看出,丰水期 A 组和枯水期 A 组主要分布在奎屯河、古尔图河、四棵树河和艾比湖湖区西部;丰水期 B 组和枯水期 B 组主要分布在博河、精河和艾比湖湖区东部.

从艾比湖流域水质污染物同一时期不同分组的差异性(图 4)可以看出:丰水期 A 组的 COD 和 DO 浓度较高,污染主要来源于有机物,主要反映了与有机物相关的因素对地表水体的影响. 该区域地势较为平坦,河道水流长年滞流,水体复氧能力差^[40],这可能是 COD 和 DO 浓度较高的主要原因. 丰水期 B 组的 SS 和 COD 浓度较高,该区域范围主要包括温泉县、博乐市和精河县的两大支流博尔塔拉河和精河,沿线有工矿企业等,污染主要来源于工矿企业的废水污染超标(数据来自博州水利局官网 <http://slj.xjboz.gov.cn/>). 枯水期 A 组与丰水期 A 组的情况类似,COD 和 DO 浓度相对较高. 枯水期 B 组也主要分布在博河、精河,该区域的 COD、DO 和 NH₃-N 浓度均较高,首先因为该区域有工矿企业和污水处理厂,其次由于是枯水期流域水量较小,水流较缓,该区域属于盐渍化比较严重的地区,10 月地表植被已经枯萎,导致盐渍化程度更加严重,这也是 COD 浓度较高的原因. NH₃-N 浓度较高主要是因为支流流经农业区,10 月是春夏作物和秋冬作物的交替时期,主要污染物来源于农业营养物质、畜牧业污染、生活污水和污水处理厂等的影响^[1].

总体来看,艾比湖流域的水质污染情况在空间上具有一定的相似性,丰水期和枯水期的 COD 浓度均相较于其他水质指标偏高,B 组水质污染指标的值相比于 A 组的值较高. 在空间上也有一定差异性,丰水期 A 组的 COD 浓度相较于 B 组偏高, B 组的 BOD₅、NH₃-N 和 SS 浓度相较于 A 组偏高;枯水期 B 组的 COD、BOD₅和 NH₃-N 浓度比 A 组偏高,A 组的 SS 和 DO 浓度比 B 组偏高. 艾比湖流域地表水环境治理主要集中在艾比湖湖区,需要引清入渠和河道疏通等,同时需要对两大支流流经的工矿企业污水排放等加强监督和管理.

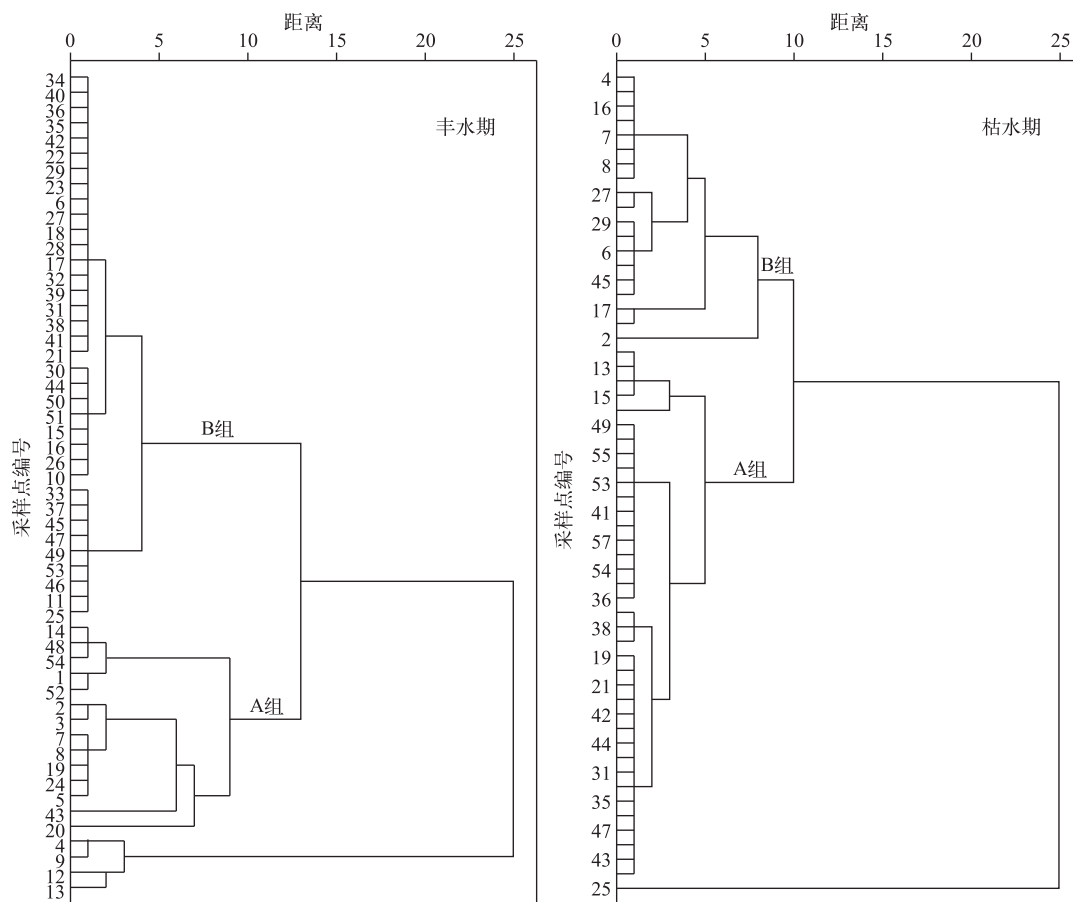


图3 艾比湖流域不同时期水质污染的空间尺度聚类分析

Fig.3 Spatial cluster analysis of water pollution in Lake Ebinur Watershed

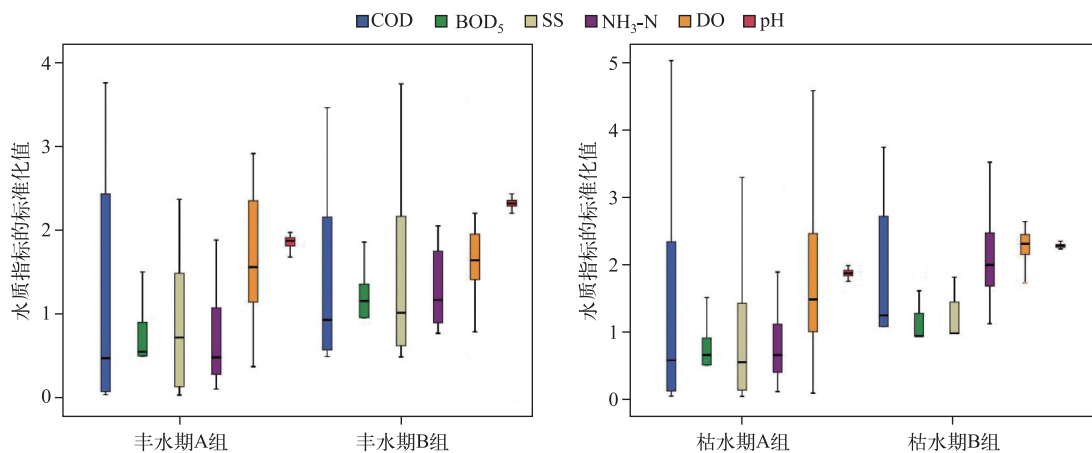


图4 艾比湖流域水质指标同一时期不同分组的差异性

Fig.4 The water quality indexes of different groups in the same period of Lake Ebinur Watershed

2.4 时空联合因子对污染源的识别和解析

空间聚类结果判别分析所建立的判别函数对不同聚类分组进行判别验证,发现空间上 A 组和 B 组的判别正确率分别为 91.40%、91.70%,总判别正确率为 95.70%(表 3)。说明同一区域在不同时期或者同一时期内不同区域的水质指标分布规律存在明显差异。同时,从艾比湖流域水质指标各空间分组在不同时期的空间差异(图 5)可以看出,空间 A 组和 B 组在不同时期内的污染水平有着较大的差异。因此,有必要将时间及空间聚类分析结果有机结合,对不同区域在不同时段下的污染源进行解析,为水环境管理和改善提供更为详尽的理论依据。

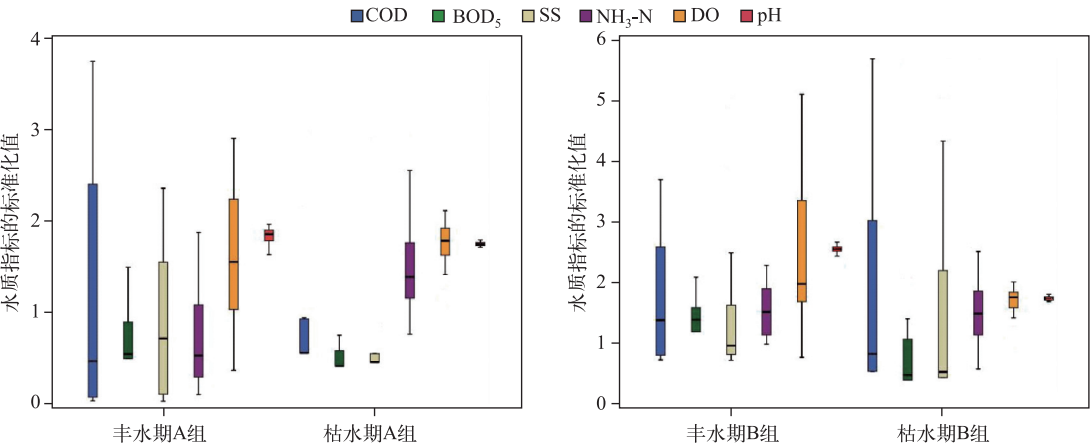


图 5 艾比湖流域水质指标同一分组不同时期的差异性

Fig.5 The water quality indexes of the same group in different periods of Lake Ebinur Watershed

2.4.1 空间分组各时段因子分析及污染源识别 不同空间分组各时段的水质指标相关系数矩阵特征值、贡献率和累计贡献率,如表 4 所示。根据表 4 选出主因子,并对初始主因子载荷矩阵进行方差极大化正交旋转得到载荷矩阵因子(表 5),选择载荷矩阵因子 $\geq 0.65^{[41]}$ 的归为主因子,一般是由多项水质指标组合而成。利用 KMO 检验和 Bartlett 球形方法对地表水体标准化的监测数据进行相关矩阵检验。丰水期、枯水期的空间 A 组和 B 组的 KMO 值均是 0.52, Bartlett 的显著性也是 0.00,满足 $P < 0.05$ 置信度,检验结果表明因子分析是有效的(表 5)。根据特征因子 >1 的原则^[33]对空间 A 组在丰水期和枯水期分别提取 3 个因子(最大方差旋转),累积解释方差分别为 82.31%和 72.53%(表 5);根据特征因子 >1 的原则^[33]对空间 B 组在丰水期和枯水期分别提取 3 个和 2 个因子(最大方差旋转),累积解释方差分别为 74.30%和 76.85%(表 5)。

表 4 各水质指标相关系数矩阵特征值、贡献率和累计贡献率

Tab.4 Correlation coefficient matrix eigenvalue, contribution rate, and cumulative contribution rate of water quality indexes

指标	丰水期 A 组			枯水期 A 组			丰水期 B 组			枯水期 B 组		
	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
COD	2.42	40.31	40.31	2.09	34.87	34.87	2.05	34.17	34.17	1.10	18.39	18.39
BOD ₅	1.52	25.32	65.63	0.85	14.08	86.61	1.39	23.21	57.37	3.51	58.47	76.85
DO	1.00	16.68	82.31	1.06	17.62	72.53	1.02	16.93	74.30	0.03	0.44	77.29
pH	0.65	10.87	93.18	1.20	20.04	54.91	0.46	7.72	94.37	0.16	2.66	79.95
NH ₃ -N	0.25	4.15	97.33	0.55	9.18	95.79	0.74	12.35	86.65	0.86	14.34	94.30
SS	0.16	2.67	100.00	0.25	4.21	100.00	0.34	5.63	100.00	0.34	5.71	100.00

丰水期 A 组:F1 的方差贡献率为 36.74%,表征因子为 COD 和 BOD₅,并且都呈正相关,同时由表 6 可知

COD 和 BOD_5 之间有显著相关性, Pearson 相关系数都在 0.7 以上, 表明 F1 主要代表生物、化学需氧量相关污染源, 而此类污染主要来源于有机物, 因此 F1 主要反映了与有机物相关的生活用水和第三产业废水的污染对地表水体的影响; F2 的方差贡献率为 26.95%, 表征因子为 NH_3-N , 呈正相关, 此类主要来源于过量的营养物质污染, 根据塔城地区环境保护局官网 (<http://www.tcdqhb.gov.cn>) 公布的 2015 年上半年废水排放污染企业名单可知, 本区有乌苏市天然番茄制品有限公司, 因此可以推断 F2 主要因为工业和生活污水排入河道, 导致营养物质过剩, 同时也跟这个时期大量的农业活动有关; F3 的方差贡献率为 18.62%, 表征因子为 SS, 呈正相关, 推断 F3 主要来源于傍河而立的高污染企业废水废料的排放。

枯水期 A 组: F1 的方差贡献率为 31.30%, 表征因子为 COD 和 pH, 其中 COD 呈正相关, pH 呈负相关, 由表 6 可知 COD 和 pH 之间也呈显著负相关, 说明它们之间也是相互影响的, 因此 F1 代表着有机物污染源, 随着有机物污染的加重, 水质 pH 值呈现负增加; F2 的方差贡献率为 23.17%, 表征因子为 BOD_5 和 DO, 其中 BOD_5 呈负相关, DO 呈正相关, 由表 6 可知两者相关性一般, 说明两者之间不影响, 跟丰水期 A 组的 F1 基本一致, 不同的是本时段 DO 在第 2 因子中占有较大的载荷, 说明这一时段水流量减少, 河道中出现滞留, 水体复氧能力差, 导致水体中 DO 浓度减少, 因此 F2 代表着生物、化学污染物; F3 的方差贡献率为 18.06%, 表征因子为 SS, 根据伊犁州环境保护局官网 (<http://www.ylepa.gov.cn/index.aspx>) 公布的 2015 年下半年废水排放污染企业名单可知, 本区有新疆天玉生物科技有限公司, 推断本区水质污染主要源于生物科技公司的废水、废料排放。

表 5 时空联合因子分析因子载荷矩阵

Tab.5 Loading of 6 variables on significant principal components for spatio-temporal factor analysis

指标	丰水期 A 组			枯水期 A 组			丰水期 B 组			枯水期 B 组	
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2
COD	0.94	0.06	0.01	0.84	-0.32	0.09	0.88	0.10	0.03	0.8	-0.51
BOD_5	0.92	-0.05	0.01	-0.08	-0.78	-0.33	0.81	0.11	0.04	0.94	-0.25
DO	0.56	0.47	0.14	-0.31	0.76	-0.18	0.67	-0.23	-0.31	0.01	0.96
NH_3-N	-0.14	0.94	0.03	0.52	0.29	-0.37	-0.21	0.87	-0.07	0.93	0.00
pH	-0.37	-0.71	0.41	-0.89	0.06	0.07	-0.32	-0.75	-0.09	-0.37	0.29
SS	0.08	-0.04	0.96	-0.04	0.11	0.89	-0.05	-0.01	0.97	0.87	0.05
特征值	2.20	1.62	1.12	1.88	1.39	1.08	2.02	1.38	1.06	3.29	1.33
方差贡献率/%	36.74	26.95	18.62	31.30	23.17	18.06	33.64	22.97	17.69	54.75	22.11
累积方差贡献率/%	36.74	63.69	82.31	31.30	54.47	72.53	33.64	56.61	74.30	54.75	76.86
KOM		0.52			0.52			0.52			0.52
Sig.		0.00			0.00			0.00			0.00

表 6 丰水期和枯水期水质指标间的 Pearson 相关系数

Tab.6 Pearson correlation coefficients between water quality indexes of wet and dry seasons

	丰水期						枯水期					
	DO	BOD_5	COD	NH_3-N	SS	pH	DO	BOD_5	COD	NH_3-N	SS	pH
DO	1	0.32 *	0.46 **	-0.18	-0.15	-0.23	1	-0.20	-0.40 **	-0.03	-0.01	-0.10
BOD_5	0.32 *	1	0.72 **	-0.02	-0.04	-0.27 *	-0.20	1	0.89 **	0.88 **	0.70 **	-0.58 **
COD	0.46 **	0.72 **	1	-0.05	-0.04	-0.31 *	-0.40 **	0.89 **	1	0.68 **	0.63 **	-0.43 **
NH_3-N	-0.18	-0.02	-0.05	1	0	-0.26	-0.03	0.88 **	0.68 **	1	0.65 **	-0.57 **
SS	-0.16	-0.04	-0.04	0	1	-0.02	-0.01	0.70 **	0.63 **	0.65 **	1	-0.38 **
pH	-0.23	-0.27 *	-0.31 *	-0.26	-0.02	1	-0.10	-0.58 **	-0.43 **	-0.57 **	-0.38 **	1

* 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关; ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。

丰水期 B 组: F1 的方差贡献率为 33.64%, 表征因子为 COD、 BOD_5 和 DO, 均呈正相关, 由表 7 可知 COD

和 BOD₅ 呈显著相关,两者与 DO 都呈显著正相关,跟枯水期 A 组的 F2 基本一致,不同的是本时段的 COD 在第 2 因子中占有较大的载荷,说明随着 BOD₅ 的增加,DO、COD 也跟着增加,因此 F1 主要代表着营养物质、耗氧有机物以及生物、化学需氧量相关的污染物;F2 的方差贡献率为 22.97%,表征因子为 NH₃-N,与其他各水质指标的相关性都一般(表 6),表明 F2 代表着季节性污水排放的营养物质过量污染;F3 的方差贡献率为 17.69%,表征因子为 SS,同丰水期 A 组的 F2,本区域博尔塔拉蒙古自治州西部矿业有限和博尔塔拉蒙古自治州西域福乐矿业有限责任公司的排放物分别超标 2 倍和 4 倍(数据来源于博州环境保护局官网 <http://hbj.xjboz.gov.cn/hjzl.htm>),因此推断 F3 主要代表工矿业排放物的污染。

枯水期 B 组:F1 的方差贡献率为 54.75%,表征因子为 COD、BOD₅、NH₃-N 和 SS,由表 6 可知,4 种指标的相关性均较高,跟丰水期 A 组的 F1 基本一致,不同的是本时段 NH₃-N 和 SS 在第 1 因子中占有较大的载荷,说明 COD 和 BOD₅ 浓度的增加会影响 NH₃-N 和 SS 浓度,但因为本区域温泉县供排水有限责任公司排出的废水中 SS 浓度超过城镇污水处理厂污染物排放标准的 1 倍(数据来自于博州水利局官网公开监测数据),因此 F1 主要代表营养物质、耗氧有机物和工矿企业废水污染;F2 的方差贡献率为 22.11%,表征因子为 DO,因此 F2 主要代表生物化学污染源。

依据因子分析,在丰水期和枯水期艾比湖流域主要受到 COD、DO、NH₃-N 和 SS 浓度等指标的影响,空间 B 组整体比空间 A 组污染因子多,丰水期比枯水期的污染情况严重。从水质时空联合因子分析来看,艾比湖流域水环境治理工作需主要集中在空间 B 组所包括的艾比湖湖区、精河和博尔塔拉河部分河道。

2.4.2 污染源解析和贡献率估算 通过上述分析,确定了污染源的数量和特征,进一步利用主成分回归分析法计算污染源贡献率。E/O 是回归分析中估计值与实测值的比值,主要集中在 1.00 左右,表明了回归结果较为准确^[2]。A、B 两组中 SS 浓度和 pH 两种水质指标对各项污染源的贡献率的 R²均小于 0.5,这说明这两种指标对各项污染源的贡献率不大,那么主要对 COD、BOD₅、DO 和 NH₃-N 4 种水质指标的污染贡献率进行分析。空间 A 组地表水体的污染主要来源于有机物污染和营养物质污染,其中有机物污染主要影响 BOD₅ 和 COD 浓度,定量化的污染贡献率分别为 57.60% 和 55.30%,营养物质污染主要影响 COD、DO 和 NH₃-N 浓度,贡献率分别为 41.60%、30.30% 和 50.80%;空间 B 组地表水体的污染主要来源于有机物污染,其次为营养物质污染,生物污染的影响较为微弱;有机物污染主要影响 COD、BOD₅ 和 DO 浓度,贡献率分别为 64.40%、47.60% 和 20.20%,营养物质的污染主要影响该区域 NH₃-N 和 COD 浓度,其影响贡献率为 63.10% 和 21.40% (表 7)。

表 7 艾比湖流域水质指标各污染源贡献率

Tab.7 The pollution contribute rates of water quality indexes to Lake Ebinur Watershed

指标	A 组(贡献率/%)					B 组(贡献率/%)				
	有机物污染	营养物质污染	工矿业污染	R ²	E/O	有机物污染	营养物质污染	R ²	E/O	
COD	55.30	41.60	29.80	0.96	1.00	64.40	21.40	0.90	1.00	
BOD ₅	57.60	—	13.40	0.87	1.00	47.60	—	0.86	1.01	
DO	10.70	30.30	6.90	0.83	1.02	20.20	0.37	0.75	0.98	
NH ₃ -N	6.80	50.80	—	0.70	0.99	12.40	63.10	0.64	1.02	
SS	3.20	2.30	50.70	0.41	1.00	—	5.80	0.25	1.00	
pH	1.90	0.90	—	0.30	0.03	6.20	5.80	0.12	0.98	

3 讨论

本文选择 WQI 模型,首次用于评价艾比湖流域的水质污染情况,主要因为该模型与其他水质指数模型相比的优势是运算简单、参数设定可以结合研究区水质保护提升目标而设定,而且也被国内外专家学者成熟应用在地表水和干旱半干旱区的水质研究。其中,李义禄等^[2]和杨柳等^[28]利用 WQI 模型研究内陆湖泊地表水污染时空分异特征,Bassam 等^[42]利用该模型研究干旱半干旱亚地区伊拉克西北部 Sinjar 的水质污染情况。研究区艾比湖流域也属于干旱半干旱地区,与伊拉克的生态环境相似,所以本文选择 WQI 模型来研

究艾比湖流域的地表水水质污染状况.

根据前人相关研究可知,辽河流域^[43]、晋江流域^[44]、三峡流域^[45]和太湖流域^[10]等内陆河流域在水质污染源解析的研究较多,但是处于干旱区的艾比湖流域在这方面的研究较少,因此本文尝试探讨该地区的水质污染源解析以及水质时空分异特征.由弥艳等^[27]和博乐市水文水资源勘测大队的调查研究^[46]可知,艾比湖流域两大主要支流(精河和博河)的入湖量在丰水期和枯水期差异较大,因此本文选择丰水期和枯水期两个典型时期对艾比湖流域的水质污染情况进行评价,这样能够较全面地解析艾比湖湖区及周边水质的污染源.本文针对艾比湖流域丰水期和枯水期的水质分异特征及污染源解析结果得出,艾比湖流域丰水期的水质污染比枯水期严重,这与弥艳等^[36,39]在2008年的研究结果一致.弥艳等研究还发现2008年艾比湖丰水期的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN浓度均较高,而且TN属于V类水质标准,整个艾比湖TP、TN浓度达到了富营养化水平;但本文的研究发现:虽然丰水期的TN仍然达到V类水质标准,但 $\text{NH}_3\text{-N}$ 属于Ⅲ类水质标准,TP属于Ⅱ类水质标准.与2008年相比,2015年艾比湖流域的水质明显得到改善,这与国家的水质改善和环保政策密不可分,也说明两个保护区的设立以及国家和地区的相关保护措施效果显著.

针对本文的研究内容和结果,从自然因素和人文因素两方面对艾比湖流域的地表水水质污染原因进行讨论.

1) 自然因素:艾比湖是新疆最大的盐水湖,根据张飞等^[26]、吴超存^[47]、董煜等^[48]和王娟等^[49]的研究可知:近20年来,温度、降水量和蒸发量逐年增长,冰川融水导致上游径流量增加,需水量的增加导致下游径流量减少,流域径流量总体上变化不明显,但水资源总量在减少.流域内耕地面积增加,水体、林草地面积减少,水资源需求量增加,致使流入艾比湖的主要河流水量减少甚至奎屯河出现断流的现象,艾比湖湖面萎缩、湖底裸露,湖内水流较缓,湖周盐渍化现象严重,周边沙漠化面积增加.这些自然生态因素导致艾比湖湖区及周边地表水体复氧能力较差,水体中耗氧有机物和营养物质过剩,使该区域污染较为严重.

2) 人为因素:根据吉仁塔^[50]的研究可知:由于社会经济的发展,博尔塔拉河和精河流域内人口增加,耕地面积增加,作物施肥量和灌溉增加,流域内大量兴建水库,城市供水量和排水量增加,博尔塔拉河和精河两大支流流经的博乐市、温泉县和精河县3个地区陆续出现废水和排污的高污染企业,使得该区域比流域的其他区域污染更严重.根据博州、伊犁州和塔城地区环境保护局官网公布的废水排污超标企业可知,丰水期和枯水期的B组(主要是博尔塔拉河和精河)区域内的博乐市自来水公司污水处理厂、中粮屯河博州糖业有限公司和新疆腾博热力有限公司等企业的排污和废水排放导致该区域地表水体中生物污染、有机物污染和营养物质过剩;本区域的博尔塔拉蒙古自治州西部矿业有限公司、博尔塔拉蒙古自治州西域福乐矿业有限责任公司和精河县新石石灰有限公司等企业的废水废料排放导致了水体中金属物质和悬浮物超标,引起污染.丰水期和枯水期A组(主要是奎屯河、古尔图河和四棵树河)区域内的乌苏市天然番茄制品有限公司和新疆天玉生物科技有限公司等企业的废水、废料排放导致本区域的地表水体中生物、化学污染严重.丰水期的5月正是农耕时期,农民大量的施肥喷药、灌溉和排水等农业活动造成水体中N、P浓度增高,COD、 BOD_5 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度等水质指标较高,使得丰水期较枯水期污染严重.

总之,本文利用地统计学方法及多元统计技术对艾比湖流域地表水水质污染进行时空分异特征研究和污染源解析,该方法虽然可以最大程度地避免信息丢失,提高分析结果的可靠性,但它是一种经验识别,与SWAT、GWLF和HSPF等水质模型方法^[51]相比,缺少对水质污染的量化预测,在污染源解析方面有一定局限性,所以今后考虑使用专门模型(如SPARROW模型)对水质污染进行量化分析和预测.

4 参考文献

- [1] Zhang Yitao, Liu Hongbin, Wang Hongyuan *et al.* A bibliometric analysis of status and trend of international research on field nitrogen application effects on nitrogen losses and water quality. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(20): 1-13. [张亦涛, 刘宏斌, 王洪媛等. 农田施氮对水质和氮素流失的影响. *生态学报*, 2016, **36**(20): 1-13.]
- [2] Li Yilu, Zhang Yuhu, Jia Haifeng *et al.* Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in ancient town of Suzhou. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, (4): 1032-1044. [李义禄, 张玉虎, 贾海峰等. 苏州古城区水体污染时空分异特征及污染源解析. *环境科学学报*, 2014, (4): 1032-1044.]
- [3] Zhang Yuezhen, Dong Pingguo, Li Yanrong *et al.* Spatial variation regulation of water quality for centralized drinking water

- source in Wuwei City. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME)*, 2015, (12): 1078-1084, 1104. [张月珍, 董平国, 李彦荣等. 武威市集中式饮用水源地水质空间分异规律. 排灌机械工程学报, 2015, (12): 1078-1084, 1104.]
- [4] Su S, Zhi J, Lou L *et al.* Spatio-temporal patterns and source apportionment of pollution in Qiantang River (China) using neural-based modeling and multivariate statistical techniques. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2011, **36** (9): 379-386.
- [5] Xu HS, Xu ZX, Wu W *et al.* Assessment and spatiotemporal variation analysis of water quality in the Zhangweinan River Basin, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, **13**(3): 1641-1652.
- [6] Wang X, Cai Q, Ye L *et al.* Evaluation of spatial and temporal variation in stream water quality by multivariate statistical techniques: A case study of the Xiangxi River basin, China. *Quaternary International*, 2012, **282**: 137-144.
- [7] Terrado M, Barceló D, Tauler R *et al.* Surface-water-quality indices for the analysis of data generated by automated sampling networks. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2010, **29**(1): 40-52.
- [8] Akkoyunlu A, Akiner ME. Pollution evaluation in streams using water quality indices: A case study from Turkey's Sapanca Lake Basin. *Ecological Indicators*, 2012, **18**: 501-511.
- [9] Espejo L, Kretschmer N, Oyarzún J *et al.* Application of water quality indices and analysis of the surface water quality monitoring network in semiarid North-Central Chile. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(9): 5571-5588.
- [10] Hu Kaiming, Li Bing, Wang Shui *et al.* Spatial distribution characteristics of water quality pollution in the Lake Taihu basin, Jiangsu Province. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 200-206. DOI: 10.18307/2014.0205. [胡开明, 李冰, 王水等. 太湖流域(江苏省)水质污染空间特征. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 200-206.]
- [11] Li Yayao, Guo Wenjing, Dong Wen *et al.* Water environmental characteristics and pollution constitution for the Fenghe River in Shaanxi Province. *China Rural Water and Hydropower*, 2014, (6): 70-76. [李亚娇, 郭雯婧, 董雯等. 陕西洋河水环境特征及污染构成解析. 中国农村水利水电, 2014, (6): 70-76.]
- [12] Wang Cuiyu, Yang Yonghui, Zhou Feng *et al.* Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in River Qinhe Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, (9): 2267-2278. [王翠榆, 杨永辉, 周丰等. 沁河流域水体污染物时空分异特征及潜在污染源识别. 环境科学学报, 2012, (9): 2267-2278.]
- [13] Wang Lijing, Wang Xing, Liu Lusan *et al.* Multivariate analysis of water factors in Dongting Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2013, (1): 1-7. [王丽婧, 汪星, 刘录三等. 洞庭湖水质因子的多元分析. 环境科学研究, 2013, (1): 1-7.]
- [14] Kowalkowski T, Zbytniewski R, Szpejna J *et al.* Application of chemometrics in river water classification. *Water Research*, 2006, **40**(4): 744-752.
- [15] Ma Xiaoxue, Wang Lachun, Liao Lingling. Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in Wenruiang River Watershed. *Environmental Science*, 2015, (1): 64-71. [马小雪, 王腊春, 廖玲玲. 温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别. 环境科学, 2015, (1): 64-71.]
- [16] Lam QD, Schmalz B, Fohrer N. Assessing the spatial and temporal variations of water quality in lowland areas, Northern Germany. *Journal of Hydrology*, 2012, **438**: 137-147.
- [17] Bu H, Tan X, Li S *et al.* Temporal and spatial variations of water quality in the Jinshui River of the South Qinling Mts., China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, **73**(5): 907-913.
- [18] Yang YH, Zhou F, Guo HC *et al.* Analysis of spatial and temporal water pollution patterns in Lake Dianchi using multivariate statistical methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **170**(1/2/3/4): 407-416.
- [19] Zhang Wangchou, Li Xiaoxiu, Wang Xiaoyan *et al.* Temporal and spatial variations of water pollution in Wuqing section of Beiyunhe River. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, (4): 836-846. [张汪寿, 李晓秀, 王晓燕等. 北运河武清段水污染时空变异特征. 环境科学学报, 2012, (4): 836-846.]
- [20] Li Wenzan, Li Xuyong, Wang Huiliang *et al.* Spatial distribution of the main contaminations in aquatic environment in Fuyang River. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **11**: 2814-2819. [李文赞, 李叙勇, 王慧亮等. 汾阳河主要水环境污染物质空间分布特性研究. 环境科学学报, 2012, **11**: 2814-2819.]
- [21] Xie Sen, He Liansheng, Tian Xueda *et al.* Study on temporal and spatial distribution patterns of water quality in Chaohu Lake. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, (3): 531-539. [谢森, 何连生, 田学达等. 巢湖水质时空分布模式研究. 环境工程学报, 2010, (3): 531-539.]

- [22] Akbal F, Gürel L, Bahadır T *et al.* Multivariate statistical techniques for the assessment of surface water quality at the mid-Black Sea coast of Turkey. *Water, Air & Soil Pollution*, 2011, **216**(1/2/3/4): 21-37.
- [23] Singh EJK, Gupta A, Singh NR. Groundwater quality in Imphal West district, Manipur, India, with multivariate statistical analysis of data. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(4): 2421-2434.
- [24] Mohammadpour R, Shaharuddin S, Zakaria NA *et al.* Prediction of water quality index in free surface constructed wetlands. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(2): 1-12.
- [25] Zhou Mei, Zhang Fei, Tashpolat Tiyp *et al.* Spatial distribution of hydro-chemistry characteristics and water quality in Ebinur Lake Basin. *Environmental Chemistry*, 2015, (9): 1694-1702. [周梅, 张飞, 塔西甫拉提·特依拜等. 艾比湖流域水化学指标平面分布特征. 环境化学, 2015, (9): 1694-1702.]
- [26] Zhang Fei, Wang Juan, Tashpolat Tiyp *et al.* The spatial and temporal dynamic changes and driving forces in the surface area of Ebinur Lake from 1998-2013. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, (9): 2848-2859. [张飞, 王娟, 塔西甫拉提·特依拜等. 1998-2013 年新疆艾比湖湖面时空动态变化及其驱动机制. 生态学报, 2015, (9): 2848-2859.]
- [27] Mi Yan, Chang Shunli, Shi Qingdong *et al.* Study on the effect of agricultural non-point source pollution to water environment of the Ebinur Lake Basin during high flow period. *Arid Zone Research*, 2010, (2): 278-283. [弥艳, 常顺利, 师庆东等. 农业面源污染对丰水期艾比湖流域水环境的影响. 干旱区研究, 2010, (2): 278-283.]
- [28] Yang Liu, Song Jianfei, Song Bo *et al.* Primary pollutant water quality identification index method and its application to comprehensive evaluation of river water quality. *Environmental Science & Technology*, 2015, (11): 239-245. [杨柳, 宋健飞, 宋波等. 主要污染物水质标识指数法在河流水质评价的应用. 环境科学与技术, 2015, (11): 239-245.]
- [29] Latin J, Carroll D, Green P eds. Analyzing multivariate data. New York: Duxbury, 2003: 1-200.
- [30] Chen Yanguang ed. Geography mathematical methods: Fundamentals and applications. Beijing: Science Press, 2011: 1-484. [陈彦光. 地理数学方法: 基础和应用. 北京: 科学出版社, 2011: 1-484.]
- [31] Shrestha S, Kazama F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques; A case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental Modelling & Software*, 2007, **22**(4): 464-475.
- [32] Davis JC ed. Statistics data analysis in geology. New York: Wiley, 1973: 1-656.
- [33] Huang Jinliang, Huang Yaling, Li Qingsheng *et al.* Preliminary analysis of spatiotemporal variation of water quality and its influencing factors in the Jiulong River Watershed. *Environmental Science*, 2012, (4): 1098-1107. [黄金良, 黄亚玲, 李青生等. 流域水质时空分布特征及其影响因素初析. 环境科学, 2012, (4): 1098-1107.]
- [34] Zhou F, Guo H, Liu L. Quantitative identification and source apportionment of anthropogenic heavy metals in marine sediment of Hong Kong. *Environmental Geology*, 2007, **53**(2): 295-305.
- [35] Qu Mingkai, Li Weidong, Zhang Chuanrong *et al.* Source apportionment of soil heavy metal Cd based on the combination of receptor model and geostatistics. *China Environmental Science*, 2013, (5): 854-860. [瞿明凯, 李卫东, 张传荣等. 基于受体模型和地统计学相结合的土壤镉污染源解析. 中国环境科学, 2013, (5): 854-860.]
- [36] Mi Yan, Chang Shunli, Shi Qingdong *et al.* Aquatic environmental quality assessment in Ebinur Lake Catchment during high flow period, 2008. *J Lake Sci*, 2009, **21**(6): 891-894. DOI: 10.18307/2009.0621. [弥艳, 常顺利, 师庆东等. 艾比湖流域 2008 年丰水期水环境质量现状评价. 湖泊科学, 2009, **21**(6): 891-894.]
- [37] Dai Guofei, Zhang Wei, Peng Ningyan *et al.* Study on distribution of N and P pollutants and risk of cyanobacteria bloom in Poyang Lake and waters around the lake during drought periods. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(5): 838-844. [戴国飞, 张伟, 彭宁彦等. 枯水期鄱阳湖及其滨湖水体氮磷等污染物分布与藻华风险研究. 生态环境学报, 2015, **24**(5): 838-844.]
- [38] Dong Yu, Haimiti Yimiti, Bayin Chahan *et al.* Analysis on concentration and correlation of runoff and precipitation in BoErtala River basin. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2014, (4): 28-34. [董煜, 海米提·依米提, 巴音查汗等. 博尔塔拉河径流与降水的集中性及关联性分析. 水资源与水工程学报, 2014, (4): 28-34.]
- [39] Mi Yan. Investigation and assessment of agricultural non-point source pollution in Ebinur Lake Basin based on 3S [Dissertation]. Urumqi: Xinjiang University, 2010. [弥艳. 基于 3S 技术的艾比湖流域农业非点源污染对水环境的影响研究[学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010.]
- [40] Yan Yixin, Jiang Xiaoxin, Ruan Xiaohua *et al.* Water pollution characteristics and control measures in cities of plain river network area. *Water Resources Protection*, 2008, (5): 1-3, 29. [严以新, 蒋小欣, 阮晓红等. 平原河网区城市水污染特征及控制对策研究. 水资源保护, 2008, (5): 1-3, 29.]

- [41] Fu Qing, Zheng Yan, Wang Shanjun. Water quality and spatial and temporal distribution characteristics of surface drinking water sources in China. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, (5): 886-894. [付青, 郑彦, 王山军. 全国地表饮用水源水质状况及时空分布特征. 应用基础与工程科学学报, 2015, (5): 886-894.]
- [42] Bassam BFA, Fadhil AM. An analysis of groundwater in Sinjar Plain (Northwest of Iraq) using WQI model. *Journal of China University of Geosciences*, 2001, 26(4): 291-295.
- [43] Zhao Jie, Xu Zongxue, Liu Xingcai *et al.* Source apportionment in the Liao River Basin. *China Environmental Science*, 2013, (5): 838-842. [赵洁, 徐宗学, 刘星才等. 辽河河流水体污染源解析. 中国环境科学, 2013, (5): 838-842.]
- [44] Chen Haiyang, Teng Yanguo, Wang Jinsheng *et al.* Pollution load and source apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus in Jinjiang River watershed. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, (5): 213-219. [陈海洋, 滕彦国, 王金生等. 晋江流域非点源氮磷负荷及污染源解析. 农业工程学报, 2012, (5): 213-219.]
- [45] Ran Guihua, Ge Jiwen, Miao Wenjie *et al.* Spatial-temporal differentiation of water quality in Gufu River of Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, (17): 5385-5396. [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. 生态学报, 2013, (17): 5385-5396.]
- [46] Zeng Qingjing. Recent water volume flowing into Ebinur Lake and its change. *Arid Land Geography*, 1995, (2): 17-23. [曾庆江. 艾比湖近期入湖水量及其变化. 干旱区地理, 1995, (2): 17-23.]
- [47] Wu Chaocun. On the change law of hydrological characteristics of Aibi Lake Basin. *Energy and Energy Conservation*, 2015, (5): 101-102, 115. [吴超存. 艾比湖流域的水文特征变化规律. 能源与节能, 2015, (5): 101-102, 115.]
- [48] Dong Yu, Haimiti Yimiti. Runoff characteristics and responses to precipitation in the Ebinur Lake Basin; A case study of Boertala River. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, (2): 94-99. [董煜, 海米提·依米提. 艾比湖流域径流水文特征及其对降水变化响应——以博尔塔拉河为例. 水土保持研究, 2014, (2): 94-99.]
- [49] Wang Juan, Zhang Fei, Zhang Yue *et al.* Correlation between the spatial water quality and land use/cover in the Ebinur Lake area. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24): 7971-7980. DOI: 10.5846/stxb201505271059. [王娟, 张飞, 张月等. 艾比湖区域水质空间分布特征及其与土地利用/覆被类型的关系. 生态学报, 2016, 36(24): 7971-7980.]
- [50] Ji Renta. The Ebinur Lake basin ecological environment problems and Countermeasures. *Forestry of Xinjiang*, 2016, (1): 22-24. [吉仁塔. 艾比湖流域生态环境问题与治理措施. 新疆林业, 2016, (1): 22-24.]
- [51] Wu Zaixing, Wang Xiaoyan. SPARROW-Watershed model and research progress. *Environmental Science & Technology*, 2010, (9): 87-90, 139. [吴在兴, 王晓燕. 流域空间统计模型 SPARROW 及其研究进展. 环境科学与技术, 2010, (9): 87-90, 139.]