

淮河上游水质污染特征及其综合评价

党伟¹, 焦利民²

(1. 河南城建学院, 河南 平顶山 467000; 2. 武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 430083)

摘要:为明确淮河上游水质污染特征及其综合评价,取淮河上游流域4个监测断面(南阳、信阳、阜阳、六安)开展了2006—2016年丰水期(7月份)、平水期(10月份)、枯水期(1月份)的水质时空分析,并借助单因子水质标识指数法和多元统计分析方法识别水质污染特征,并对其进行了综合评价,为淮河上游流域管理提供一定的理论依据。结果表明:(1)淮河上游六安污染最严重,其枯水期的氨氮(NH_4^+-N)值和丰水期、平水期的粪大肠菌群均超出水环境功能区要求。其余各监测断面水质指标值均达到水环境功能区目标,化学耗氧量(CODCr)、生物耗氧量(BOD₅)、硫化物和挥发酚污染最轻且水质指标优于水环境功能区的要求。(2)淮河上游流域水质状况在不同水期表现结果相差不明显,说明水期变化对水质指标影响较小。针对丰水期进行了污染源解析,发现主要污染物有高锰酸盐指数、粪大肠菌群、BOD₅和CODCr。(3)针对不同的污染源,建议对淮河上游流域实行不同的监督管理制度,全面发展高效生态农业,调整农业产业结构,降低农业化肥、农药的使用量,有效降低农业面源对淮河水环境恶化的风险,制定严格的排污标准。

关键词:淮河; 水质; 多元统计分析; 综合评价

中图分类号:X524

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0358-06

Water Pollution Characteristics and Their Comprehensive Assessment in the Upper Reaches of the Huai River

DANG Wei¹, JIAO Limin²

(1. College of Urban Construction, Henan University, Pingdingshan, Henan 467001, China;

2. School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Spatiotemporal patterns of Water quality at four monitoring stations in the upper reaches of the Huai River in the flood season (July), dry season (January) and average season (October) during the period from 2006 to 2016 were analyzed. Variations in water quality were analyzed; pollution sources were identified coupling utilization of single factor water quality identification index and multivariate analysis in order to provide some theoretical basis for water management in the upper reaches of the Huai River. It was found that the water quality in flood, dry and average seasons were rather similar. Water quality at Liuan station was the most polluted, NH_4^+-N and fecal coliforms all exceeded standard for water environment function area. Water quality at other monitoring stations met the standard of water environment function area, indicating that pollution mainly resulted from agricultural runoff of non-point source coal and liquor in flood seasons. The primary pollutants were potassium permanganate index, fecal coli forms, BOD₅, CODCr. Corresponding measures should be taken according to pollution sources. Renovation of water environment, development of ecological agriculture improvement of the waste water treatment efficiency, and increase of recognition of discharge of factory were highlighted from watershed management perspectives.

Keywords: Huai River; water quality; multivariate analysis; comprehensive assessment

人类活动和全球气候变化引起了水质恶化、湖泊富营养化、水生态环境破坏等一系列的水环境问题,如何改善水污染现状已成为区域水环境研究中迫切

需要解决的问题^[1-3]。另外,河流水质因子众多,而且受地理环境、气候因素、土地利用方式、及人类活动的影响使得流域水质在时空上呈现较大的异质性^[4-5]。

明晰水质的时空变化规律是评价水环境质量、分析污染源和改善水环境质量的前提,也是当今水质监测与评价的重点和难点。河流、特别是流经人类活动对自然环境影响相对强烈区域的内陆河,是区域生态环境可持续发展的重要因素^[6-7]。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,内陆河最易遭受到污染和破坏。近几十年来,政府已经逐步建立了环境监测体系并且开展了大量水质监测项目,获得大量的水质监测数据,包括物理化学、有机物、重金属及生物指标等各种数据^[8-9]。由于各个监测指标及监测点之间存在复杂的相互影响,导致大量的监测数据并不能充分的利用与分析,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一个挑战^[10-11]。因此,从大量的环境监测数据中挖掘出有用的信息,探索水质的时空分布模式,识别潜在污染源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。

水质评价是环境治理与监控的一项基础工作,通过水质监测,可对水质做出合理评价,并制定有针对性的水环境治理规划和方案,水质评价的合理性将直接影响水环境整治决策的准确性^[12-14]。自1956年起,我国水利部相继在全国500多条河流上建立了900多个水化学监测站,对河水的理化性质进行监测,进而关注河流水质问题。然而,许多检测程序会输出大量复杂的数据,包括物理、化学、生态及微生物的。由于参数和监测点之间的潜在关系,这些数据很难分析、解译和梳理^[15-16]。因此,有必要从数据集中提取有用信息,通过识别代表性参数从而优化监测网络,解析潜在污染源。近几十年来,地方政府部门开展了大量河流水质监测项目,鉴于各个监测指标及监测点之间存在复杂的相互影响,无法直观地提供给地方决策者管理和改善水环境的依据;因此,有必要以大量的环境监测数据为基础,综合评价河流水质,识别潜在污染源,帮助决策者建立高效合理的水环境管理和综合治理方案。

近年来,各类评价方法和多元统计方法被广泛应用于水质综合评价。单因子水质标识指数法既能直观表达水质类别,反映水体达标情况,做出定性评价,也能进行定量评估^[17-18];多元统计分析法能够将复杂的数据矩阵转化成更易理解的水质生态问题,对影响水系统的因子或污染源做出判断,并对水源和污染物的迁移转化规律提供有价值的信息^[19]。数据的多元处理广泛适用于描述和评估地表水质,并且有效论证了水质时空变异会受到与季节相关的自然和人为因素的影响^[20-21]。因此,本研究结合单因子水质标识指

数法和多元统计分析法对水质时空分布特征进行分析,以期得到准确且全面的水质信息。水质标识指数法(WQI)是一种基于代数运算的水质连续性刻画评价方法,对水质进行定性与定量评价,并考虑多个水质因子之间的相互作用,能够较好地评价污染严重的河流水质。多元统计技术能够对复杂的多元数据进行降维简化,且可以保证主要信息不会丢失^[22-24]。方差分析、因子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上得到普遍的应用。此外,以往的研究割裂开了时间与空间相互作用的机制,只是单独探讨了时间与空间上的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。本研究基于淮河流域的水质监测数据,应用综合水质标识指数法和方差分析法对水质进行综合评价,揭示河道水质污染特征和时空变化规律;结合单因子标识指数识别不同时间段不同区域水环境的主要污染源,识别流域水质时空分布特征及污染源解析,为河流管理提供理论依据及决策支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来自淮河上游2006年1月—2016年12月的流域监测站(南阳、信阳、阜阳、六安监测站)。为了分析方便,各水期的水质按照相应月份取平均值,本文选取丰水期(7月份)、枯水期(1月份)和平水期(10月份)进行水质时空分析(以下简称丰、平、枯)。每个监测站对该地区不同时期水质各指标均测定,其中南阳和信阳监测站野外监测点为15个,测量重复数为3,不同水期均采样测定,每年测量样品数为105;阜阳和六安监测站野外监测点为21个,一年测量样品数为189。

实际监测水质指标共计28项,由于所监测断面水质良好,故从中选取9个变化差异较大的水质指标进行分析。分别为溶解氧(DO)、化学需氧量(CODCr)、氨氮(NH_4^+-N)、总磷(TP)、生化需氧量(BOD_5)、高锰酸盐指数、粪大肠菌群、硫化物和挥发酚。

其中溶解氧(DO)采用碘量法测定;化学需氧量(CODCr)采用氧化—还原滴定法(重铬酸钾作氧化剂)测定;氨氮(NH_4^+-N)采用纳氏试剂法测定;生化需氧量(BOD_5)采用稀释与接种法测定;高锰酸盐指数采用碱性高锰酸钾氧化法测定;粪大肠菌群采用多管发酵法测定;硫化物采用碘量法测定;挥发酚采用4-氨基安替比林光度法测定。

1.2 分析方法

水质标识指数单因子水质标识指数PI可表示为:

$$PI=W_1 \cdot W_2 \cdot W_3$$

式中: W_1 为第 I 项水质指标的水质类别; W_2 为监测数据在 W_1 类水质变化区间中所处的位置; W_3 表示水质类别与功能区划设定类别的比较结果, 视评价指标的污染程度而定。

综合水质标识指数(IWQ)由整数位和 3 位小数位组成。表示为:

$$IWQ=X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$$

式中: X_1 为综合水质类别; X_2 为综合水质在 X_1 类水浓度区间中距下限值的位置; X_3 为参与评价的指标中劣于水环境功能区水质类别的指标个数; X_4 为综合水质劣于水环境功能区目标的类别数。上述两式中: 的 $W_1 \cdot W_2$ 和 $X_1 \cdot X_2$ 由计算获得; W_3 ; X_3 和 X_4 根据比较结果得到。通过综合水质标识指数可以判断河流是否黑臭, 判断标准为: $6.0 < X_1 \cdot X_2 \leq 7.0$, 水质劣于 V 类, 但不黑臭; $X_1 \cdot X_2 > 7.0$, 水体黑臭。

因子分析是一种数据简化技术, 通过研究众多变量之间的内部依赖关系, 探求观测数据之间的基本结构, 并用少数几个独立的不可观测变量(因子)来表示其基本的数据结构。各公因子对应的最高因子载荷变量对其有最强的解释能力。根据负荷值的大小将变量的相关性水平分为 3 类: 负荷值 > 0.75 , 为显著相关; 负荷值 $\in (0.50, 0.75]$, 中等相关; 负荷值 $\in [0.30, 0.50]$, 为弱相关。水质分析中常用因子分析提取污染因子对污染源定性。

水质因子众多, 利用所有的因子对水质进行评价有一定的难度, 而主成分分析是利用降维的思想, 把原来具有错综复杂的变量归纳为少数几个综合变量, 其中每个主成分都是原始变量的线性组合, 各主成分之间互不相关, 从而实现以少数几个综合变量反映原始变量的绝大部分信息, 且所含的信息互不重叠。主成分分析法能够全面反映水体的污染程度、主要污染物的类别、来源、成因、时空分布规律以及变化趋势, 找到优先控制的监测断面和水质指标。其计算步骤主要有: 对原始数据进行标准化处理; 计算相关系数矩阵; 计算特征值和特征向量; 计算对应于特征值的特征向量; 计算主成分贡献率和累计贡献率; 计算主成分载荷; 各主成分得分。

针对定点采样的原始数据, 进行主成分分析之前, 用 Kurtosis 和 Skewness 检验污染指标的分布特征, 其结果分别为: $-0.685 \sim 5.6$ 和 $-0.802 \sim 32.18$ (置信度为 95%), 说明过于偏离正态分布, 进行 BOX-COX 转化之后, 所有污染指标呈正态或接近正态分布。同时, 为了消除单位的影响, 对数据进行标准化, 即均值为 0, 方差为 1。

2 结果与分析

2.1 水质特征

图 1 显示了淮河上游流域 2006—2016 年枯水期、丰水期和平水期的平均水质状况。从图 1 可知, DO 的平均质量浓度枯水期 $>$ 平水期 $>$ 丰水期, 不同时期 DO 的平均质量浓度差异均显著 ($p < 0.05$); CODCr 的平均质量浓度丰水期 $>$ 枯水期 $>$ 平水期, 最大值出现在丰水期, 最小值出现在枯水期, 枯水期和平水期差异不显著 ($p > 0.05$); BOD₅ 的平均质量浓度丰水期 $>$ 枯水期 $>$ 平水期, 枯水期和平水期差异不显著 ($p > 0.05$); NH₄⁺-N 的平均质量浓度平水期 $>$ 丰水期 $>$ 枯水期, 且最大值最小值均出现在枯水期, 不同时期 NH₄⁺-N 的平均质量浓度差异均显著 ($p < 0.05$); TP 的平均质量浓度枯水期 $>$ 平水期 $>$ 丰水期, 枯水期和平水期差异不显著 ($p > 0.05$), 平水期和丰水期差异不显著 ($p > 0.05$); 高锰酸盐指数表现为丰水期 $>$ 平水期 $>$ 枯水期, 不同时期高锰酸盐指数的平均质量浓度差异均显著 ($p < 0.05$); 硫化物平均质量浓度表现为丰水期 $>$ 枯水期 $>$ 平水期, 不同时期硫化物平均质量浓度差异均不显著 ($p > 0.05$); 挥发酚的平均质量浓度表现为丰水期 $>$ 平水期 $>$ 枯水期, 不同时期挥发酚的平均质量浓度差异均显著 ($p < 0.05$)。监测的 9 个指标中(除去 BOD₅ 和挥发酚平均质量浓度相同), 4 个指标(CODCr, BOD₅, 高锰酸盐指数和硫化物)的平均质量浓度最大值出现在丰水期, 3 个指标的平均质量浓度最大值出现在枯水期(DO, TP、挥发酚), 2 个指标的平均质量浓度最大值出现在平水期(NH₄⁺-N 和粪大肠菌群)。

2.2 水质指标单因子评价

由表 1 可知, 六安 DO、NH₄⁺-N、TP、高锰酸盐指数和粪大肠菌群的计算结果较其他监测站点计算值偏高。其 NH₄⁺-N 和粪大肠菌群水质指标均超出水环境功能区要求(NH₄⁺-N 枯水期为 2.5, 粪大肠菌群平水期为 3.9, 平水期是 3.5)。南阳、信阳、阜阳、六安水质指标计算结果满足水环境功能区目标。通过分析, DO 污染最大值出现在六安; CODCr 污染最大值出现在阜阳和六安; BOD₅ 污染最大值出现在阜阳; TP 污染最大值出现在阜阳和六安; 高锰酸盐指数污染最大值出现在六安; 粪大肠菌群污染最大值出现在六安。总体来看六安污染最严重。南阳、信阳、阜阳、六安的 DO 水质指标结果显示污染最大值出现在丰水期; 南阳、信阳、阜阳、六安的 CODCr 水质指标结果显示污染最大值出现在丰水期; 南阳和阜阳 BOD₅ 水质指标结果显示污染最大值出现在丰水期和平水期, 信阳、阜阳、六安 NH₄⁺-N 水

质指标结果显示污染最大值出现在丰水期,南阳 NH_4^+-N 水质指标结果显示污染最大值出现在平水期;信阳、阜阳、六安 TP 水质指标结果显示污染最大值出现在丰水期,南阳 TP 水质指标结果显示污染最大值出现在平

水期;南阳、信阳、阜阳、六安高锰酸盐指数、大肠杆菌群、硫化物、挥发物水质指标结果显示污染最大值出现在丰水期。总体来看 3 个水期水质结果相差不大,故判断淮河上游水质时空特征相似,污染指标接近。

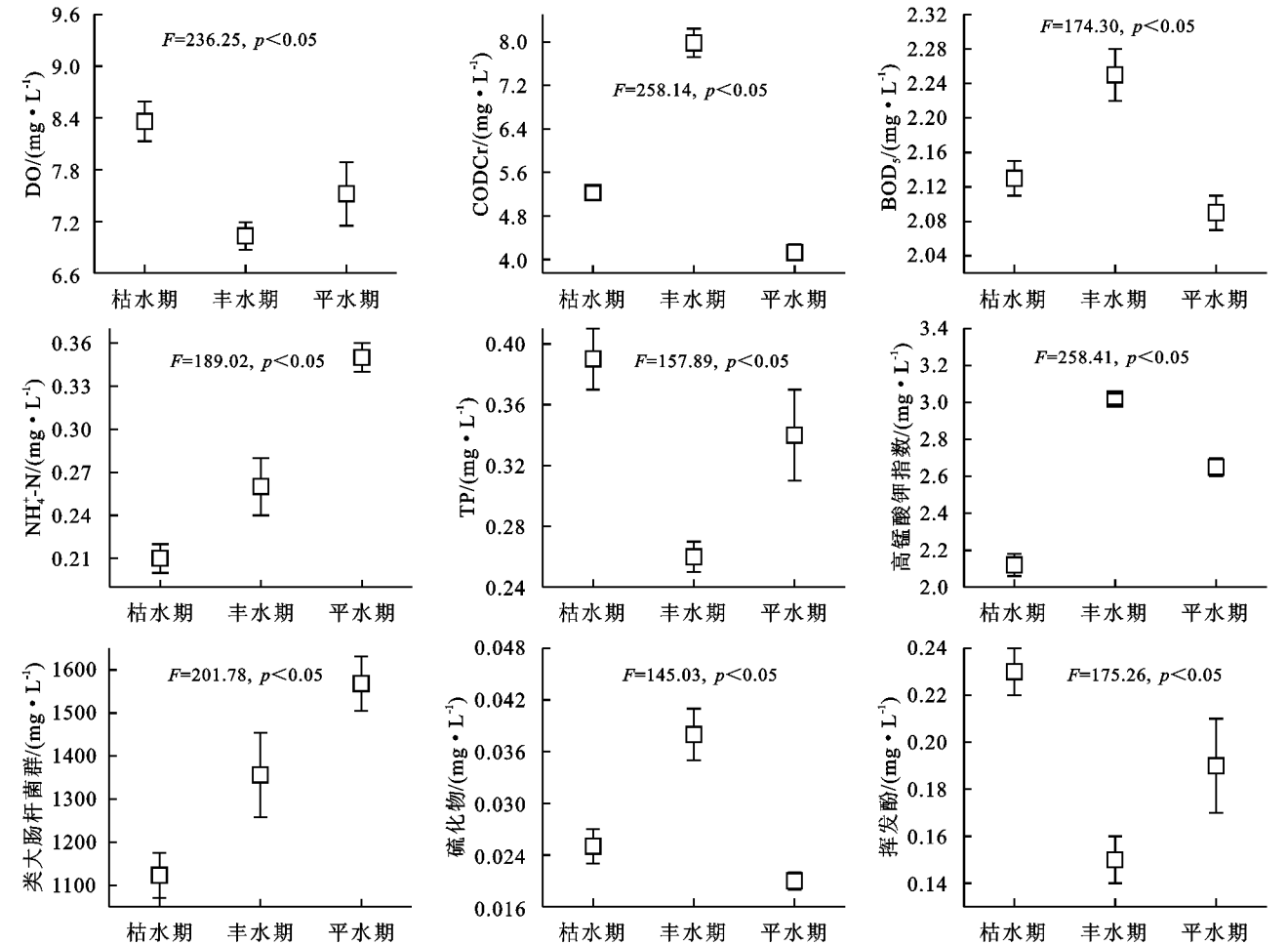


图 1 淮河上游水质特征

表 1 单因子水质标识指数法对单项水质的评价结果

项目	DO	CODCr	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	TP	高锰酸钾指数	大肠杆菌群	硫化物	挥发物
南阳	枯 1.6	1.2	1.6	1.5	2.2	1.4	2.3	0.6	0.8
	丰 1.9	1.5	1.7	1.5	2.5	1.6	2.6	0.8	1.2
	平 1.7	1.4	1.7	1.6	1.9	1.5	2.4	0.5	0.9
信阳	枯 1.7	1.3	1.5	1.3	2.3	1.3	2.6	0.5	0.9
	丰 1.9	1.5	1.6	1.5	2.5	1.9	3.2	0.8	1.2
	平 1.8	1.4	1.5	1.4	2.4	1.5	3.1	0.7	1.1
阜阳	枯 2.1	2.0	1.7	2.5	2.6	1.9	2.7	0.9	1.5
	丰 2.6	2.4	1.8	2.9	2.8	2.3	3.6	1.2	1.9
	平 1.9	2.1	1.8	2.3	2.4	2.1	3.5	1.1	1.6
六安	枯 2.3	1.5	1.7	2.1	2.2	2.3	3.2	1.2	1.2
	丰 2.9	1.9	1.8	2.5	2.5	2.6	3.9	1.5	1.5
	平 2.7	1.8	1.7	2.4	2.8	2.4	3.5	1.3	1.3

2.3 水质时空变化综合评价

2006—2016 年南阳、信阳、阜阳、六安 4 个断面综合水质标识指数的评价结果见图 2。由图可知, 2006—2016 年, 南阳整体污染程度呈增加趋势, 不同

时期 WQI 值基本表现为丰水期>平水期>枯水期, 其中枯水期 WQI 值范围在 6.23~7.25, 丰水期 WQI 值范围在 6.85~8.36, 平水期 WQI 值范围在 6.85~8.12; 信阳整体污染程度呈增加趋势, 不同时期 WQI 值基本表

现为丰水期>平水期>枯水期,其中枯水期 WQI 值范围在 6.42~7.36,丰水期 WQI 值范围在 7.56~8.45,平水期 WQI 值范围在 6.98~7.64;阜阳整体污染程度呈增加趋势,不同时期 WQI 值基本表现为丰水期>平水期>枯水期,其中枯水期 WQI 值范围在 6.85~7.69,丰

水期 WQI 值范围在 7.98~8.71,平水期 WQI 值范围在 7.23~8.23;六安整体污染程度呈增加趋势,不同时期 WQI 值基本表现为丰水期>平水期>枯水期,其中枯水期 WQI 值范围在 7.02~7.72,丰水期 WQI 值范围在 8.26~8.95,平水期 WQI 值范围在 7.85~8.46。

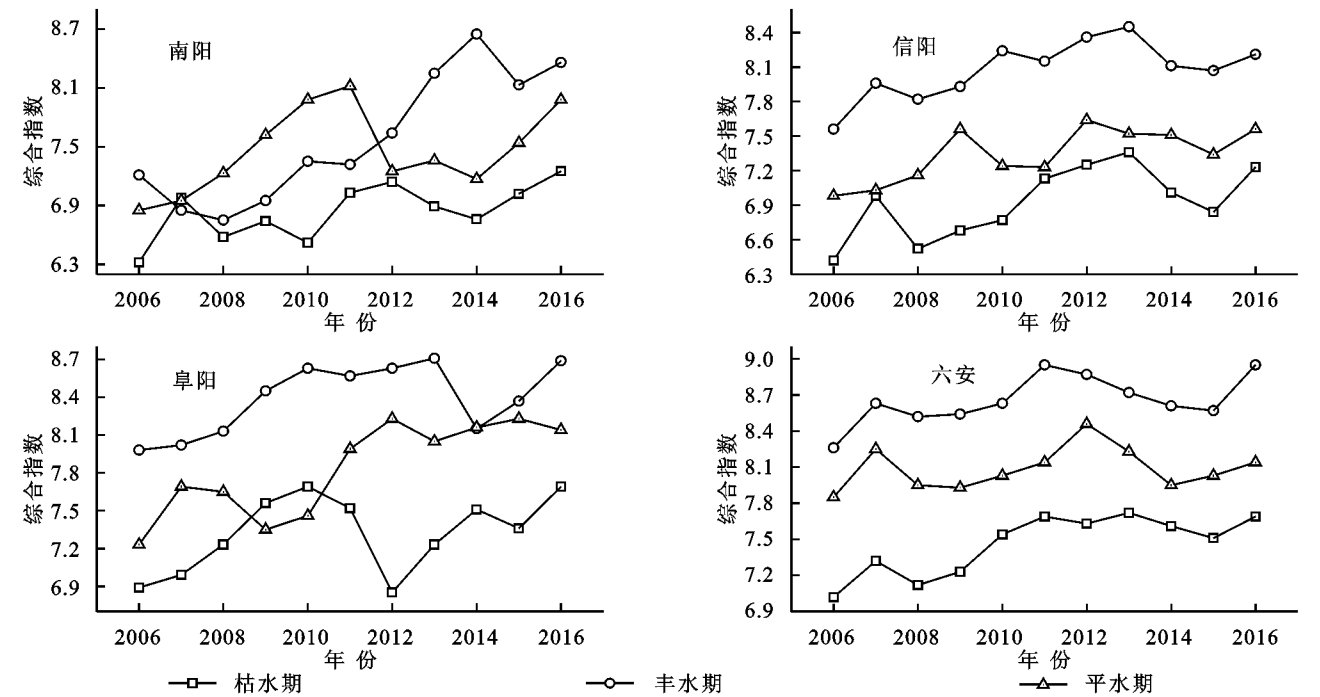


图 2 单因子水质标识指数法对单项水质的评价结果

2.4 水质指标的因子分析

为了验证数据对于因子分析的适用性,首先用 Bartlett 球度检验和 KMO 标准对数据进行检验, KMO 标准一般认为 $KMO>0.6$ (其值域在 0~1) 的适合因子分析。对于确定用几个因子代表污染源,目前常借助 Kaiser 标准,即提取的因子数量是因子特征值大于 1 的因子的数量,特征值是一个因子关于所有变量的因子载荷平方总和,它是各个因子解释观察值方差的测量尺度。因子的指标负荷情况如表 2 所示,现分别解析每个因子所代表的含义。

F_1 (第 1 个主因子):其中高锰酸盐指数、粪大肠菌群和 NH_4^+-N 的负载较高。 F_2 (第 2 个主因子):其中 BOD_5 的负载较高,挥发酚的负载也比较高。 F_3 (第 3 个主因子):其中 CODCr 的负载较高。由成分得分系数矩阵计算出因子得分矩阵,见表 3。通过对表 3 的分析,可以清晰的得出对于各个因子来说每个监测点不同年份的污染状况。对各因子特征值进行加权求和,得到各监测点不同年间污染的综合得分,再依据这个综合得分进行排序就可以得到污染指标污染程度的监测点排序,对淮河流域相应的控制污染政策有重要的作用。

表 2 因子特征值和方差贡献率

项目	枯水期			丰水期			平水期		
	特征值	方差贡献率	累积贡献率	特征值	方差贡献率	累积贡献率	特征值	方差贡献率	累积贡献率
DO	5.236	56.987	56.987	5.986	57.236	57.236	6.231	59.230	59.230
CODCr	1.598	16.785	73.772	2.045	15.987	93.223	2.145	14.257	73.487
BOD ₅	1.402	8.563	82.335	1.523	9.247	82.470	1.369	8.745	82.232
NH ₄ ⁺ -N	1.125	4.023	86.358	1.237	4.562	87.032	1.045	4.023	86.255
TP	0.689	3.456	89.814	0.874	2.147	89.179	0.988	2.689	88.944
高锰酸钾指数	0.523	1.487	91.301	0.546	1.988	91.167	0.621	1.523	90.467
大肠杆菌群	0.189	0.985	92.286	0.231	1.523	92.690	0.324	1.234	91.701
硫化物	0.087	0.632	92.918	0.097	0.987	93.677	0.062	0.567	92.268
挥发物	0.025	0.201	93.119	0.014	0.537	94.214	0.034	0.424	92.692

表 3 因子载荷矩阵

项目	枯水期			丰水期			平水期		
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3
DO	-0.338	0.254	-0.056	0.365	0.123	0.365	0.614	0.366	0.052
CODCr	0.159	0.325	0.895	0.902	-0.863	0.412	0.025	0.125	0.521
BOD ₅	0.098	-0.547	0.523	0.867	0.914	-0.877	0.895	0.412	-0.423
NH ₄ ⁺ -N	0.852	0.921	0.877	-0.541	0.236	0.102	0.902	-0.857	0.855
TP	-0.421	-0.231	0.712	0.623	0.541	0.652	-0.521	0.555	0.914
高锰酸钾指数	0.897	0.568	0.302	-0.411	-0.423	0.899	0.771	0.230	0.603
大肠杆菌群	0.869	0.867	-0.541	0.203	0.235	-0.324	0.320	-0.421	0.417
硫化物	0.423	-0.147	0.102	0.612	0.612	0.056	0.147	0.698	0.385
挥发物	-0.425	0.369	0.354	-0.501	0.357	0.123	-0.234	0.904	-0.204

2.5 水质污染的冗余分析

水质指标受外界环境的影响较大,环境因子的变化是引起植物分布差异的主要原因。为了尽可能多的把水质指标与环境因子结合在一起,更好地揭示水质指标与环境之间的相互关系,将不同地区水质指标作为物种指标进行 RDA 分析(图 3)。结果显示前 2 个排序轴特征值分别为 0.652,0.167,第一排序轴可反映不同生境下环境因子的梯度变化特征,湿地植物多样性与环境因子 2 个排序轴的相关性均为 1.000,前 2 个排序轴特征值占总特征值的 96.73%,蒙特卡罗检验分析环境因子对植物的影响达到显著性(第一轴 $p=0.01,F=5.639$;第二轴 $p=0.01,F=3.021$),能够很好的解释水质指标之间的关系。RDA 排序图(图 3)显示 DO,CODCr,BOD₅,NH₄⁺-N 呈显著的相关性($p<0.05$),高锰酸钾指数、大肠杆菌群、硫化物与挥发物呈显著的相关系($p<0.05$),此结果与主成分分析的结果相吻合。

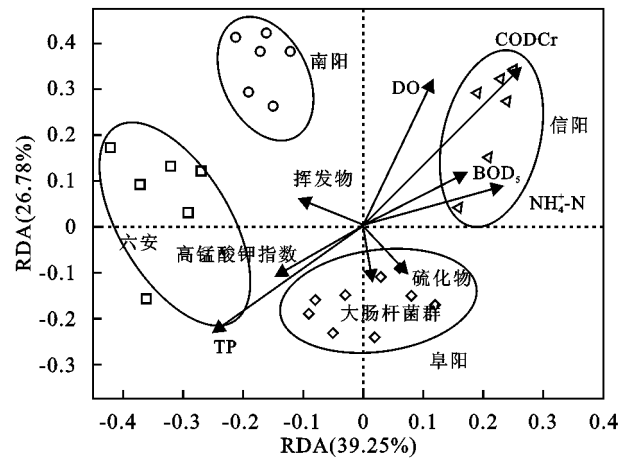


图 3 水质污染 RDA 排序

3 结论

(1) 淮河上游六安污染最严重,其枯水期的 NH₄⁺-N 值和丰水期、平水期的粪大肠菌群均超出水环境功能区要求。其余各监测断面水质指标值均达

到水环境功能区目标,CODCr,BOD₅,硫化物和挥发酚污染最轻且水质指标优于水环境功能区的要求。

(2) 淮河上游流域水质状况在不同水期表现结果相差不明显,说明水期变化对水质指标影响较小。针对丰水期进行污染源解析,主要污染物有高锰酸盐指数、粪大肠菌群、BOD₅ 和 CODCr。

(3) 针对不同的污染源,建议对淮河上游流域实行不同的监督管理制度,全面发展高效生态农业,调整农业产业结构,降低农业化肥、农药的使用量,有效降低农业面源对淮河水环境恶化的风险,同时制定严格的排污标准。

参考文献:

[1] 汪嘉杨,郭倩,王卓. 岷沱江流域社会经济的水环境效应评估研究[J]. 环境科学学报,2017,37(4):1564-1572.

[2] 周侃,樊杰,刘汉初. 环渤海地区水污染物排放的时空格局及其驱动因素[J]. 地理科学进展,2017,36(2):171-181.

[3] 杨清可,段学军,王磊. 基于水环境约束分区的产业优化调整:以江苏省太湖流域为例[J]. 地理科学,2016,36(10):1539-1545.

[4] 彭建,赵会娟,刘焱序,等. 区域水安全格局构建:研究进展及概念框架[J]. 生态学报,2016,36(11):3137-3145.

[5] 欧维新,连鹏,逢谦. 基于水污染总量控制的土地利用管控分区:以无锡市为例[J]. 自然资源学报,2014,29(1):1-12.

[6] 刘鸿志,单保庆,张文强,等. 一个水污染严重省的成功治水战略探析[J]. 环境保护科学,2015,41(3):47-52.

[7] 买亚宗,孙福丽,黄泉泉,等. 中国水资源利用效率评估及区域差异研究[J]. 环境保护科学,2014(5):1-7.

[8] 于森,蒋洪强,常杪,等. 松花江流域水资源、水污染联合调控方案动态模拟研究[J]. 环境科学学报,2015,35(6):15-19.

[9] 张璐璐,刘静玲,何建宗,等. 中国典型城市水环境中邻苯二甲酸酯类污染水平与生态风险评价[J]. 生态毒理学报,2016,11(2):421-435.

- 2016,22(1):137-150.
- [21] 张莉,温仲明,苗连朋. 延河流域植物功能性状变异来源分析[J]. 生态学报,2013,33(20):6543-6552.
- [22] Castro-Díez P, Villar-Salvador P, Pérez-Rontomé C, et al. Leaf morphology and leaf chemical composition in three *Quercus*(Fagaceae)species along a rainfall gradient in NE Spain[J]. *Trees-Structure and Function* 1997,11(3):127-134.
- [23] 尧婷婷,孟婷婷,倪健,等. 新疆准噶尔荒漠植物叶片功能性状的进化和环境驱动机制初探[J]. 生物多样性,2010,18(2):188-198.
- [24] Shipley B, Vile D, Garnier E. From plant traits to plant communities: A statistical mechanistic approach to biodiversity[J]. *Science*, 2006,314(5800):812-814.
- [25] Tanaka Y. Trait response in communities to environmental change: effect of interspecific competition and trait covariance structure [J]. *Theoretical Ecology*, 2012,5(1):83-98.
- [26] Hoiss B, Krauss J, Potts S G, et al. Altitude acts as an environmental filter on phylogenetic composition, traits and diversity in bee communities[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2012,279(1746):4447-4456.
- [27] Reich P B. The evolution of plant functional variation: traits, spectra, and strategies[J]. *International Journal of Plant Sciences*, 2003,164(S3):S143-S164.
- [28] 朱璧如,徐冰,张大勇. 草地植物功能性状变异的程度和来源[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2011,47(5):485-489.
- [29] He J S, Wang X, Schmid B, et al. Taxonomic identity, phylogeny, climate and soil fertility as drivers of leaf traits across Chinese grassland biomes[J]. *Journal of Plant Research*, 2010,123(4):551-561.
- [30] 樊艳文. 东北主要木本植物叶和茎的功能性状及其影响因子的研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.

~~~~~

(上接第 363 页)

- [10] 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[J]. 环境科学,2015,36(1):64-71.
- [11] 何慧爽. 河南省水污染物总量区域分配公平性研究[J]. 人民黄河,2015,37(8):73-77.
- [12] 孙涛,张妙仙,李苗苗,等. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价[J]. 环境科学与技术,2014,37(4):185-190.
- [13] 刘琰,郑丙辉,付青,等. 水污染指数法在河流水质评价中的应用研究[J]. 中国环境监测,2013,29(3):49-55.
- [14] 谭渝峰,张琪,朱莎,等. 基于简单建模与因子分析的湖泊水质评价[J]. 生态与农村环境学报,2015,31(3):432-439.
- [15] 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.
- [16] 徐彬,林灿尧,毛新伟. 内梅罗水污染指数法在太湖水水质评价中的适用性分析[J]. 水资源保护,2014,30(2):38-40.
- [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.
- [18] 王倩,邹志红. BP神经网络在再生水补给密云水库水质评价中的应用[J]. 环境科学学报,2014,34(9):2413-2416.
- [19] 高学平,孙博闻,訾天亮,等. 基于时域权重矩阵的模糊综合水质评价法及其应用[J]. 环境工程学报,2017,11(2):970-976.
- [20] 韩晓刚,黄廷林,陈秀珍. 改进的模糊综合评价法及在给水厂原水水质评价中的应用[J]. 环境科学学报,2013,33(5):1513-1518.
- [21] 杜明亮,吴彬,张宏,等. 改进权重集对分析法在淮东水质评价中的应用[J]. 人民黄河,2014,36(4):62-64.
- [22] 李学军,鲍战猛,高彩凤,等. 北运河浮游动物调查及水质评价[J]. 生态学杂志,2014,33(6):1559-1564.
- [23] 李祚泳,张正健. 基于回归支持向量机的指标规范值的水质评价模型[J]. 中国环境科学,2013,33(8):1502-1508.
- [24] 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.