

里下河地区主要水环境污染物的空间分布特性研究

马小雪, 王腊春

(南京大学 地理科学与海洋学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 水质时空特征分析和污染源识别是里下河地区水资源管理与污染控制的重要内容之一。利用2011年里下河37个监测断面的10个水质指标数据,综合运用单因子污染指数法、综合水质标识指数法、主成分分析法及GIS软件分析了里下河地区水体污染物的时空分异特征及污染源解析。结果表明:汛期的综合水质要差于非汛期的综合水质,非汛期40.5%的断面水质为Ⅲ类水质断面,汛期70.3%的断面水质为Ⅲ类水质标准;无论是汛期还是非汛期,东北部的监测点水质劣于西南部的监测点水质,但是西南部的灌溉总渠沿线由于受洪泽湖的影响水质状况最好;汛期关键污染因子为来源于非点源污染和点源污染的高锰酸盐、总磷、化学需氧量、氨氮、五日生化需氧量,非汛期为来源于生活、生产污水排放的氨氮、总磷、化学需氧量、五日生化需氧量、锰。

关键词: 水质评价; 综合水质标识指数法; 主成分分析; 污染源识别

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)06-0001-06

Spatial distribution feature of main contaminations in aquatic environment of Lixia River

MA Xiaoxue, WANG Lachun

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Temporal and spatial characteristics analysis of water quality and pollution source identification in Li-Xia River watershed are the important aspects for water quality management and pollution control. Ten water quality indexes from 37 monitoring sections in the watershed during 2011 was collected. This paper analyzed the temporal and spatial distribution feature of main contaminations and pollution source by use of the methods of single factor pollution index assessment, comprehensive water quality identification index and principal component analysis and GIS software. The results showed that the comprehensive water quality in non-flood period is better than that in flood, while water quality in 40.5% of the monitoring sites in non-flood period is classified as grade Ⅲ, and that in 70.3% of the sites in flood period is classified as grade Ⅲ; the water quality in northeast is worse than that in southwest, but the water quality in main irrigation canal is the best due to the impact of water quality in Hongze lake; the main pollutants are COD_{Mn} , TP, COD_{Cr} , NH_4^+-N , BOD_5 in flood period, while the main pollutants are TP, COD_{Cr} , NH_4^+-N , BOD_5 , Mn in non-flood period from domestic and industrial wastewater.

Key words: water quality assessment; comprehensive water quality identification index; main component analysis; identifier of pollution source

随着城市化进程的加快和经济的快速发展,工业废水和生活污水使河流环境污染物质含量大大增加,河流生态系统的结构和平衡受到了破坏^[1]。地表水水质恶化不但影响着人体的健康和生态系统,同时也为突发性水污染事故创造了条件,很多突发性水污染事故是污染物长期积累到一定程度之后

爆发的,例如2003年的三门峡水库泄出“一库污水”,2004年的四川青衣江水污染事件。近几年,里下河地区突发性水污染事故常常发生,2007年泰州周山河油污泄漏水污染事故;2009年盐城市蟒蛇河饮用水源地水污染事故;2010年盐邵河浓硫酸泄漏事故,兴化市北部水源地面源污染事故;2013年盐

收稿日期:2014-07-31; 修回日期:2014-09-16

基金项目:江苏省水利科技项目(2014050);江苏省研究生培养创新工程项目(KYZZ-0031)

作者简介:马小雪(1986-),女,山东潍坊人,在读博士研究生,研究方向:生态水文学。

通讯作者:王腊春(1963-),男,江苏南京人,教授,博士生导师,研究方向:水文学水资源。

城市饮用水源地再次出现水污染事故等。这些水污染事故反过来又恶化了里下河地区的水环境。因此,如何切实有效的控制河流水质恶化和消减污染物成为里下河流域管理部门面临的巨大挑战。

从众多的河流水质因子中挖掘出主要的污染因子,并识别出主要的污染源,能够有针对性的建立高效合理的区域水环境治理对策,也是当今水质研究的重点和热点^[2-3]。以主成分分析(PCA)、聚类分析、判别分析、因子分析等多元统计方法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,例如,被广泛应用在内陆河流^[4]、湖泊^[5]、近海海域^[6]和平原河网^[7]、地下水^[8]及城市河网^[9]等研究中。另外,水质评价方法也从定性评价转向了定量评价,最为代表性的是同济大学徐祖信提出的河流综合水质标识指数法^[10]。多元统计方法和水质评价法的不断完善和成熟为里下河地区的水环境质量评价提供了契机。虽然里下河地区的洪涝灾害、水文事件等相关的文献特别多,而关于本地区的水质评价方面的研究却相对比较少。因此,本文根据里下河河网水质监测数据,应用单因子水质评价法和综合水质标识指数法对河网水质进行综合评价。然后应用GIS分析水质空间分布特征。最后应用主成分分析方法对汛期、非汛期关键的污染因子及来源进行分析,以期对里下河流域的水环境评估和管理提供科学依据。

1 研究区概况

里下河地区地理位置介于东经 $119^{\circ}08' \sim 120^{\circ}56'$,北纬 $32^{\circ}12' \sim 34^{\circ}10'$ 之间,位于京杭运河(里运河段)以东,苏北灌溉总渠以南,扬州至南通 328 国道及如泰运河以北,海堤以西(图 1)。根据地形及水系特点,里下河地区以通榆河为界,划分为里下河腹部地区和沿海垦区两个部分^[11-12]。里下河地区总面积 $21\,342\text{ km}^2$,其中腹部地区面积 $11\,722\text{ km}^2$,占 54.9%,沿海垦区 $9\,620\text{ km}^2$,占 45.1%。

里下河地区处于亚热带向温暖带过渡地带,有明显的季风气候特征,年平均气温 $14 \sim 15^{\circ}\text{C}$,多年平均年降雨量为 $1\,000\text{ mm}$,6-9 月降雨量约占全年降雨量的 65%左右,极易造成暴雨、连绵阴雨、洪涝并发、旱涝急转和台风、暴雨、海潮并袭的局面^[11-12]。里下河腹部地区地势四周高、中间低,是典型的平原水网地区。由于碟形洼这一地形特点,决定了降雨后雨水迅速从四周向中间洼地汇集,水势上涨迅猛,水位逼高后再通过入海通道缓慢下泄。

里下河地区河网纵横交错,水系复杂,南北向骨干河道主要有通榆河、串杨河、盐靖河、卤汀河、三阳河等,东西向骨干河道主要有新通扬运河、射阳河、黄沙港、新洋港、斗龙港、蚌蜒河、川东港、兴盐界河、泰东河等。

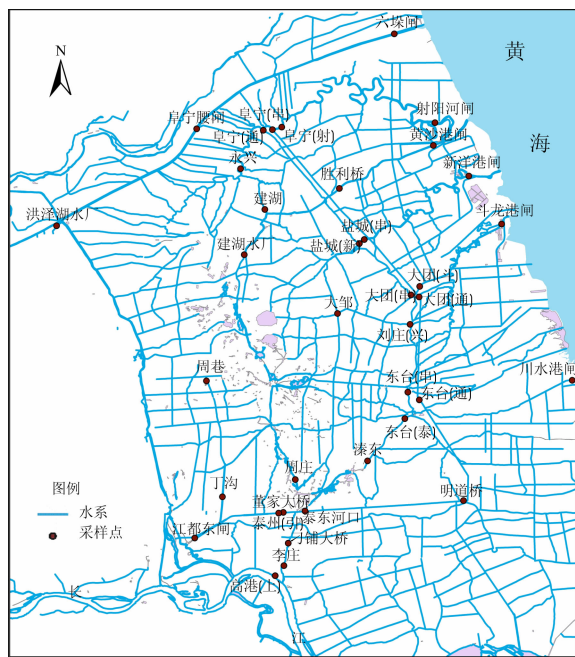


图 1 里下河区域概况及采样点分布

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2011 年的水质监测数据来源于江苏省南京市水文局,监测范围包括主要输水河道、入海河道等 16 条河流的 37 个监测断面。根据区域水环境特点,确定河道水质评价指标溶解氧、高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总磷、铁、锰、挥发酚、氯化物等共 10 项。其中铁、锰、挥发酚等有一部分监测点低于检出限,为了方便计算和分析,本文将低于检出限未检出的部分监测点作为 0 来处理。

2.2 单因子水质评价法

单因子水质评价的基本单元是 $P_i = C_i/S_i$ (P_i 为单项污染指数,即实测浓度超过评价标准的倍数; C_i 为参数浓度, mg/L ; S_i 为相应的标准浓度, mg/L)。 $P_i \leq 1$ 说明水体尚未受到污染; $P_i > 1$ 说明水体已经受到污染^[13-14]。单项污染指数能直观地说明水质是否污染或超标,计算简便,是目前环境监测系统划分水质类别的评价方法之一。但它易屏蔽极大和少数超标污染项目的影响,过分强调最大超标项的作用,不能反映水体的整体状况。

2.3 综合水质标识指数法

综合水质标识指数法是徐祖信提出的能完整表达河流总体的综合水质信息的一种评价方法。单因子水质评价结果只能定性的评价水质类别,不能定量的评定水质类别。

而综合水质标识指数法既可以依据国家标准评价不同级别水质,又可以在同一级别的水质中进行定性评价和定量评价。综合水质标识指数法是由在单因子水质标识指数法的基础上进行运算的,由一位整数和三位小数组成($WQI = X_1.X_2X_3X_4$),其中的整数部分(X_1)代表水质类别,第一位小数(X_2)代表同一水质类别中的排序,第二位小数(X_3)代表劣于水环境功能区的个数,第三位小数(X_4)代表综合水质类别与水体功能区类别的比较结果^[10,15]。

2.4 主成分分析

河流水质因子众多,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^[16]。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。

3 结果与讨论

3.1 水环境质量时空变化特征

对不同时期的区域水质进行极小值、极大值、均值、标准差的分析(表 1),并利用综合水质标识指数法进行不同时期的水质分析(图 2)以及利用单因子水质评价方法对不同时期的水质进行分析,纵观分析结果,汛期水质要差于非汛期的水质。单因子水质评价方法显示,非汛期 78.4% 的断面水质为Ⅲ类水质,Ⅳ类水断面占 10.8%;汛期 18.9% 断面水质为Ⅲ类水质,Ⅳ类水断面占 54.1%;Ⅴ类水断面占 21.6%。综合水质标识指数法的结果表明,非汛期 45.9% 的断面水质为Ⅱ类水质,Ⅲ类水质断面占 40.5%;汛期,Ⅱ类水质断面占 18.9%,Ⅲ类水质断面占 70.3% 断面水质为Ⅲ类水质,Ⅳ类水断面占 8%。

单因子水质评价方法评价的水质等级结果要差于综合水质标识指数法的评价结果,主要是因为单因子水质评价方法是由参加水质评价的水质因子中最差的那个水质因子决定的,而综合水质标识指数法是由所有参加评价的水质因子决定。虽然两者的评价结果存在一定的差异性,但是都显示了汛期的水质要差于非汛期。刘光清等^[17]认为造成这种现象的主要原因是:①汛期内的大到暴雨形成的径流将地面污染物、农田、鱼塘等地的大量面源污染物带入河中,导致水质变差;②大水将农户的猪圈、粪坑淹没,大量有机污染物被带入河中;③里下河地区洼地、沟塘较多,污染严重,汛期内的大到暴雨会将平时存积在沟塘或者洼地中的污水一并冲进河中;

表 1 不同时期的区域水质概况 mg/L

水质指标	极小值		极大值		均值		标准差	
	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期
溶解氧	2.0200	6.2300	8.5400	11.3400	4.9400	8.5500	1.7900	1.1100
高锰酸盐	2.6200	2.1300	11.8200	8.9400	5.0200	4.1400	1.6500	1.3710
氨氮	0.0300	0.0900	1.8500	1.6800	0.6900	0.4200	0.4200	0.3200
总磷	0.0600	0.0400	0.2800	0.2800	0.1600	0.1200	0.0430	0.0510
挥发酚	0	0	0.0025	0.0035	0.0013	0.0015	0.0009	0.0010
化学需氧量	11.3000	0	61.1000	59.3000	24.0300	18.3900	9.4200	10.1900
五日生化需氧量	0.8300	1.6300	5.3700	6.0300	2.4600	3.0030	1.0200	0.9500
氟化物	0.2400	0.3200	1.1700	1.0500	0.5600	0.5770	0.1700	0.1400
铁	0	0	0.5100	1.2300	0.0580	0.1200	0.1200	0.2500
锰	0	0	0.0850	0.1900	0.0085	0.014	0.0190	0.0420
氯化物	0	0	73.0600	101.0000	11.0900	15.2800	21.0600	27.9800

④一些不法企业乘机将平时不敢排放的污水在暴雨时直接排入河中。

另外,从图2中可以发现,空间上东北部的监测点水质劣于西南部的水质,灌溉总渠沿线的水质状况最好,通榆河与串杨河沿线自南向北水质越来越差。这主要是因为西南部受长江水的影响,里下河地区自2006-2007年一直探索从长江抽水到里下河地区的可行性,2008年开始每年都会依据里下河地区的需求状况和长江潮位定期从长江引水至里下河地区,因此西南部这一块水质偏好。但是南官河没有引江水的通过,水质相对较差。灌溉总渠沿线是洪泽湖的水进入里下河腹部区和入海的通道,水质相对较好。东北部受农业、工业等的影响水质较差,同时上游污水通过东北部的四个沿海港闸外排入海。

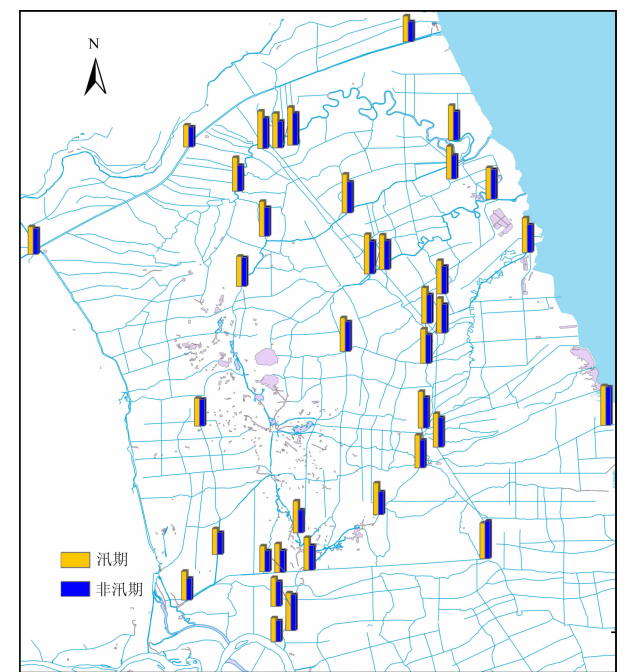


图2 不同时期的综合水质标识指数变化

3.2 污染源解析

利用主成分分析法对不同时期的各断面水质参数进行污染源分析(表2~表3),首先利用 Kaiser - Meyer - Olkin (KMO) 和球状检验模型对数据进行分析,看主成分分析(PCA)是否能起到良好的降维效果。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。KMO 检验结果为0.642(汛期)、0.648(非汛期),由于 KMO 检验 0.6 以上就可以表示良好的结果,由此可知,用 PCA 对该数据组进行分析可得到良好的结果。

由表2可以看出,汛期,①第一主成分解释了为28.219%的水质变异,反映的信息量最大,与其强关

联的主要是高锰酸盐、总磷、化学需氧量,一般关联的是氨氮、五日生化需氧量,Hülya 等^[18]认为磷既来自于污水处理厂、工业废水、家畜废水、生活污水等点源污染,也来自于土壤侵蚀,农业、草坪和花园,城市地区等降雨径流引起的非点源污染,在汛期非点源污染是主要因素,因此,在汛期可认为磷主要来自于非点源污染,少量来自于点源污染;总磷、化学需氧量、高锰酸盐的影响较非汛期时的大,这可以解释为流域内农业生产过程过量使用化肥导致氮、磷等营养盐通过径流进入地表水体等引起的非点源污染。因此,第一主成分可解释为主要来自于非点源污染,少量来自于点源污染^[1]。②第二主成分的贡献率为24.979%,强相关联的主要是铁、锰、氯化物。Simeonov 等^[19]认为 Fe、Mn、氯化物等代表了土壤淋溶作用的过程,而汛期第二主成分中铁、锰、氯化物的贡献率明显高于非汛期第二主成分中的铁、锰、氯化物的贡献率,降雨引起的径流、淋溶作用加剧,使得更多的土壤中的铁、锰、氯化物等进入水体中,因此第二主成分可认为主要来自于土壤淋溶过程。③第三主成分的贡献率为18.4%,与其正关联的是挥发酚和氟化物,负关联的是溶解氧和五日生化需氧量。挥发酚和氟化物可认为是生活污水的排入,而生活污水的排入,消耗了水中的溶解氧,导致水中 DO 降低^[20],因此第三主成分可认为是主要来源于生活污水的影响。

表2 汛期旋转成份矩阵

水质指标	成 份		
	1	2	3
溶解氧	0.184	0.052	-0.060
高锰酸盐	0.865	0.102	0.115
氨氮	0.573	-0.175	0.207
总磷	0.780	0.090	-0.211
挥发酚	0.198	-0.156	0.794
化学需氧量	0.815	-0.084	0.183
五日生化需氧量	0.693	-0.085	-0.562
氟化物	0.259	0.035	0.832
铁	-0.111	0.923	-0.070
锰	0.072	0.940	-0.035
Zscore(氯化物)	-0.036	0.954	-0.053
贡献率/ %	28.219	24.979	18.400
累积贡献率/ %	28.219	53.098	71.505

提取方法:主成份; 旋转法:为具有 Kaiser 标准化的正交旋转法。

选取2011年江苏省水资源中心的污染源普查数据得出里下河地区的入河湖污水污量为41047.6383万t,利用等标污染负荷法选取地表水环境质量标准(GB3838-2002)3类水规定的标准浓度对其进行计

算,经计算得出汛期高锰酸盐指数、氨氮、总磷、挥发酚、氟化物、化学需氧量、五日生化需氧量的污染负荷比为 18.74%、15.46%、17.92%、5.82%、12.55%、15.73%、13.78%。由此可以推算出汛期的主要污染物为高锰酸盐、总磷、化学需氧量,再其次是氨氮、五日生化需氧量,与主成分分析法得出的结论一致。但是,等标污染负荷法是污染物浓度与污染物的评价标准浓度及其污水量综合确定的,所以在指标选取上受到限制。

表 3 非汛期旋转成份矩阵

水质指标	成 份		
	1	2	3
溶解氧	-0.599	0.276	0.071
高锰酸盐	0.395	-0.114	0.837
氨氮	0.776	0.288	0.112
总磷	0.768	0.385	-0.022
挥发酚	-0.099	-0.060	0.732
化学需氧量	0.536	-0.124	0.586
五日生化需氧量	0.851	-0.025	0.314
氟化物	-0.008	0.081	0.698
铁	-0.040	0.873	-0.106
锰	0.637	0.690	-0.069
氯化物	0.066	0.840	0.028
贡献率/ %	34.404	22.600	12.359
累计贡献率/ %	34.404	57.000	69.363

提取方法:主成份; 旋转法:为具有 Kaiser 标准化的正交旋转法。

非汛期期间,第一主成分与氨氮、总磷、化学需氧量、五日生化需氧量、锰呈正相关,与溶解氧呈负相关关系,另外,利用等标污染负荷法计算得出非汛期高锰酸盐指数、氨氮、总磷、挥发酚、氟化物、化学需氧量、五日生化需氧量的污染负荷比为 16.26%、9.94%、13.78%、7.07%、13.59%、21.66%、17.69%;Hülya 等^[18]认为氮主要来自于地质矿藏、天然有机物的分解以及肥料的使用;磷既来自于污水处理厂、工业废水、家畜废水、生活污水等点源污染,也来自于土壤侵蚀,农业、草坪和花园,城市地区等降雨径流引起的非点源污染。方晓波等^[21]认为枯水期农业面源污染较小,磷主要来自于点源污染,少量来源于非点源污染;Mn 的含量并不是很高,很多采样点都没有检测到,可认为来自于自然界;第一主成分与化学需氧量、五日生化需氧量呈正相关,与溶解氧呈负相关,因此这些大量的有机污染参数主要来源于迅速城市化引起的生活、生产污水的排放^[22-23]。第二主成分贡献率是 22.6%,其与铁、锰、氯化物有关,Simeonov 等^[19]认为 Fe、Mn、氯化物等元素本来就存在于

自然界中,代表了土壤淋溶作用的过程,因此认为第二主成分主要来自于土壤。第三主成分的贡献率是 12.4%,其与高锰酸盐、挥发酚、化学需氧量、氟化物呈正相关,解莹等^[24]认为氟化物、高锰酸盐、化学需氧量主要来源于生活污水;刘路等^[25]认为挥发酚主要来源于城市生活污水和含酚废水的影响;因此第三主成分可认为是主要来源于生活污水的影响。

4 结 语

(1)根据综合水质标识指数法和单因子水质评价法的评价结果,汛期里下河的水质要差于非汛期的水质。汛期溶解氧和化学需氧量在个别站点达到Ⅴ类水质标准。综合水质标识指数法的结果表明,非汛期 45.9%的断面水质为Ⅱ类水质标准,Ⅲ类水质断面占 40.5%;汛期,Ⅱ类水质断面占 18.9%,70.3%断面水质为Ⅲ类水质标准,Ⅳ类水断面占 8%。

(2)根据综合水质标识指数法和 GIS 显示,总体上东北部的监测点水质劣于西南部的监测点水质,但是西南部的灌溉总渠沿线由于受洪泽湖的影响水质状况最好。另外,通榆河与串杨河沿线自上游到下游水质越来越差,这可能是污染物不断累积的原因。

(3)综合水质分析及主成分分析结果表明:汛期,高锰酸盐、总磷、化学需氧量,氨氮、五日生化需氧量是里下河流域主要的污染物,主要来自于非点源污染和点源污染;非汛期氨氮、总磷、化学需氧量、五日生化需氧量、锰、溶解氧是主要的污染物,且主要来自于迅速城市化引起的生活、生产污水的排放。

参考文献:

[1] 李文赞,李叙勇,王慧亮,等. 濠阳河主要水环境污染物空间分布特性研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2814-2819.

[2] Huang Fang, Wang Xiaoquan, Lou Liping, et al. Spatial variation and source apportionment of water pollution in Qiantang River (China) using statistical techniques [J]. Water Research, 2010, 44(5): 1562-1572.

[3] Shrestha S, Kazama F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(4): 464-475.

[4] Bu Hongmei, Tan Xiang, Li Siyue, et al. Temporal and spatial variations of water quality in the Jinshui River of the South Qinling Mts., China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010, 73(5): 907-913.

[5] Yang Yonghui, Zhou Feng, Guo Huaicheng, et al. Analysis

- of spatial and temporal water pollution patterns in Lake Dianchi using multivariate statistical methods[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2010, 170(1-4): 407-416.
- [6] 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[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, 216(1-4): 21-37.
- [7] Lu Ping, Mei Kun, Zhang Yujin, et al. Spatial and temporal variations of nitrogen pollution in Wen-Rui Tang River watershed, Zhejiang, China[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2011, 180(1-4): 501-520.
- [8] Singh E J K, Gupta A, Singh N R. Groundwater quality in Imphal West district, Manipur, India, with multivariate statistical analysis of data[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(4): 2421-2434.
- [9] 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[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(4): 1032-1044.
- [10] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(4): 482-488.
- [11] 叶正伟, 许有鹏, 潘光波. 江淮平原水网区汛期雨量与洪涝水位关系——以江苏里下河腹部地区为例[J]. *地理研究*, 2011, 30(6): 1137-1146.
- [12] 叶正伟, 许有鹏, 徐金涛. 江苏里下河地区洪涝灾害演变趋势与成灾机理分析[J]. *地理科学*, 2009, 29(6): 880-885.
- [13] 尹海龙, 徐祖信. 我国单因子水质评价方法改进探讨[J]. *净水技术*, 2008, 27(2): 1-3.
- [14] 陆卫军, 张涛. 几种河流水质评价方法的比较分析[J]. *环境科学与管理*, 2009, 34(6): 174-176.
- [15] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)* 2005, 33(3): 321-325.
- [16] 朱星宇, 陈勇强. SPSS 多元统计分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [17] 刘光清, 刘芳. 里下河“引江冲淤”对区域水环境影响评价[J]. *人民长江*, 2007, 38(8): 46-47.
- [18] Hülya B, Hayal B. Water pollution sources assessment by multivariate statistical methods in the Tahtali Basin, Turkey[J]. *Environmental Geology*, 2008, 54(2): 275-282.
- [19] Simeonov V, Stratis J A, Samara C, et al. Assessment of the surface water quality in Northern Greece[J]. *Water research*, 2003, 37(17): 4119-4124.
- [20] Chang H. Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea[J]. *Water Research*, 2008, 42(13): 3285-3304.
- [21] 方晓波, 骆林平, 李松, 等. 钱塘江兰溪段地表水质季节变化特征及源解析[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(7): 1980-1988.
- [22] Singh K P, Malik A, Sinha S. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques: a case study[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2005, 538(1-2): 355-374.
- [23] Zhou Feng, Huang G H, Guo Huaicheng, et al. Spatio-temporal patterns and source apportionment of coastal water pollution in eastern Hong Kong[J]. *Water Research*, 2007, 41(15): 3429-3439.
- [24] 解莹, 李叙勇, 王慧亮, 等. 滦河流域上游地区主要河流水污染特征及评价[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(3): 645-653.
- [25] 刘路, 高品, 陈刚, 等. 城市河流各水期水质变化分析[J]. *中国环境监测*, 2012, 28(2): 115-118.