

张汪寿, 李晓秀, 王晓燕, 等. 2012. 北运河武清段水污染时空变异特征[J]. 环境科学学报, 32(4): 836-846

Zhang W S, Li X X, Wang X Y, et al. 2012. Temporal and spatial variations of water pollution in Wuqing section of Beiyunhe River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(4): 836-846

北运河武清段水污染时空变异特征

张汪寿, 李晓秀, 王晓燕*, 于洋, 任万平, 李建辉

首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048

收稿日期: 2011-06-20 修回日期: 2011-07-26 录用日期: 2011-08-31

摘要:通过对北运河武清段水系(主河道——北运河和龙凤河, 北运河支流——柳河、灌溉沟渠)的水质进行监测, 采用灰色关联法对水质状况进行评价, 并利用多元统计法对污染的时空变异特征进行了分析. 结果表明, 北运河武清段水系 17 个观测点中有 23.8% 的观测点的水质为 III 类水, 12.7% 为 IV 类水, 63.5% 为 V 类水. 水质存在时空变异, 夏、冬季节各河道水质差异不显著, 春、秋季节差异显著. 沟渠水质最差, 其总磷(TP)含量和 BOD₅ 值明显高于其他河道; TP、硝态氮(NO₃⁻-N)、COD、总有机碳(TOC)、温度(T)、溶解氧(DO)和总氮(TN)解释了全部的季节性变异, BOD₅、pH、溶解性总固体(TDS)和叶绿素 a(Chl-a)的季节变异主要受人为因素影响, 氧化还原电位(ORP)、氨氮(NH₄⁺-N)和亚硝态氮(NO₂⁻-N)次之. NH₄⁺-N 和 TN 解释了 51% 的空间变异, 主河道的氮污染是由上游工厂和企业排放污水造成的; 北运河武清段的主要污染物依次为: 有机污染物、氨氮、硝态氮、酸碱废水和磷, 污染表现为复合污染, 点源仍是最主要的污染源.

关键词:北运河; 水污染; 多元统计分析; 时空变异

文章编号: 0253-2468(2012)04-836-11 中图分类号: X522 文献标识码: A

Temporal and spatial variations of water pollution in Wuqing section of Beiyunhe River

ZHANG Wangshou, LI Xiaoxiu, WANG Xiaoyan*, YU Yang, REN Wanping, LI Jianhui

College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048

Received 20 June 2011; received in revised form 26 July 2011; accepted 31 August 2011

Abstract: Understanding the temporal and spatial variations and major sources of water pollution are important in the water resource management. In this work, we collected water samples at 17 monitoring sites along the Wuqing section of Beiyunhe River (Tianjin, China) during the four seasons of 2010. Grey relational analysis categorized the data of 14 water quality variables based on national quality standards for surface waters, China. There were 23.8% of monitoring sites at III class of water quality level, 12.7% of IV class, and 63.5% of V class. There was no significant difference between the water quality in summer and winter, but a significant difference between the water quality in spring and autumn. The water quality of irrigation canals were the worst, with the total phosphorus (TP) and biochemical oxygen demand (BOD₅) significantly higher than those in other channels. Temporal and spatial variations of water indices were analyzed by multivariate statistical techniques. Total phosphorus (TP), nitrate (NO₃⁻-N), chemical oxygen demand (COD), total organic carbon (TOC), temperature (T), dissolved oxygen (DO) and total nitrogen (TN) accounted for 100% of seasonal variance. Seasonal variations of BOD₅, pH, total dissolved solids (TDS) and chlorophyll-a (Chl-a) were mainly affected by anthropogenic pollution, while the impacts of anthropic pollution on oxidation reduction potential (ORP), ammonium (NH₄⁺-N) and nitrite (NO₂⁻-N) were less significant. NH₄⁺-N and TN accounted for 51% of spatial variance for small tributaries, main channel and sub-main channel in the basin. Due to discharge of sewage by factories, the nitrogen pollution in main channel was the heaviest. The major pollutants in Wuqing section of Beiyunhe River were organic pollutants, ammonia, nitrate, pH and phosphorus. In short, point source was still the major source of pollution in the Wuqing section of Beiyunhe River.

Keywords: Beiyunhe River; water pollution; multivariate statistical techniques; temporal and spatial variation

1 引言 (Introduction)

随着社会经济的迅速发展, 人口急剧膨胀和生

活水平的提高, 河流、湖泊、水库、港湾等水体污染日趋严重, 严重威胁着人类的生存和发展 (Simeonov et al., 2003). 由于影响河流水质的因子众多, 污染

基金项目: 国家重大水专项 (No. 2008ZX07209, 2009ZX07212-002); 国家自然科学基金项目 (No. 40971258)

Supported by the National Key Research Program on Water Pollution Control and Remediation (No. 2008ZX07209, 2009ZX07212-002) and the National Natural Science Foundation of China (No. 40971258)

作者简介: 张汪寿 (1987—), 男, E-mail: zhangwangshou@126.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: enuwx@sohu.com

Biography: ZHANG Wangshou (1987—), male, E-mail: zhangwangshou@126.com; * Corresponding author, E-mail: enuwx@sohu.com

机制较为复杂,这为水质管理带来了很大的困难 (Elhatip *et al.*, 2007). 而研究河流水质污染特征对于水质管理具有重要的参考意义 (Kolovos *et al.*, 2002).

海河水系在全国七大水系中污染状况最为严重,总体为重度污染(中国环境状况公报,2009),若未能得到及时有效的控制,将严重制约华北地区的可持续发展,造成重大及难以逆转的后果. 北运河和龙凤河是华北平原重要的水体,是北京重要的排水河道,也是天津段主要的灌溉水源,水系污染极为突出. 但有关北运河、龙凤河等水质现状的研究鲜有报道,其水质状况迫切需要明确.

近年来,各类数学方法及统计评价方法被广泛用于水质评价及时空变异分析中 (Lu *et al.*, 2002; 周丰等, 2007; 吴运敏等, 2011). 如灰色关联评价法 (GBA) 因其所需参数少,评价简洁实用,被广泛用于水质状况评价分析中 (Wang *et al.*, 2002; Wong *et al.*, 2006; Huang *et al.*, 2010); 判别分析法 (DA) 在分类信息已知的条件下,采用相关指标能够筛选出类间差异显著因子和差异不显著因子,能为类间对比研究提供很大的便利,在水质的时空变异研究中得到了广泛应用 (Singh *et al.*, 2004; Singh *et al.*, 2005; Shresth *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2009); 主成分分析 (PCA) 是利用对高维变量空间进行降维处理的思想,把多个指标转化为少数几个综合指标,在水环境研究中,用于提取影响水质的主要因子和进行水质评价等 (Vega *et al.*, 1998; Kazi *et al.*, 2009; Ouyang, 2005; Da Silva *et al.*, 2001).

基于此,本文采用灰色关联分析法对北运河下游水系进行评价,以掌握水质总体状况,并采用判别分析法提取影响污染时空变异的主要因子,分析其时空变异特征. 同时,采用主成分分析法解析水质变异的主要原因,并结合污染调查,分析污染特征和变异机制. 研究结果可为整个北运河乃至海河流域的污染物削减研究提供科学依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区概况

北运河隶属于海河水系,其上游为温榆河,源于军都山南麓,流向自西北向东南,至通州区与通惠河相汇合后始称北运河,流经河北廊坊,最后于天津汇入渤海 (图 1). 北运河是一条常年有水的河流,承担着北京中心城区 90% 的排水任务. 流域总

面积 6166 m^2 ,其中,山区面积 952 m^2 (占 16%),平原面积 5214 m^2 . 流域多年平均降雨量为 643 mm,降雨主要集中在 6—9 月,约占全年降雨量的 84%,多年平均径流量为 4.81 亿 m^3 ,平原地区径流量为 3.52 亿 m^3 . 2005 年北运河武清段水质控制断面分析结果表明,入境水量为 1.617 亿 m^3 (毛战坡等, 2009). 北运河武清段主要分布的水体有北运河、永定河和龙凤河,最终都汇入渤海.

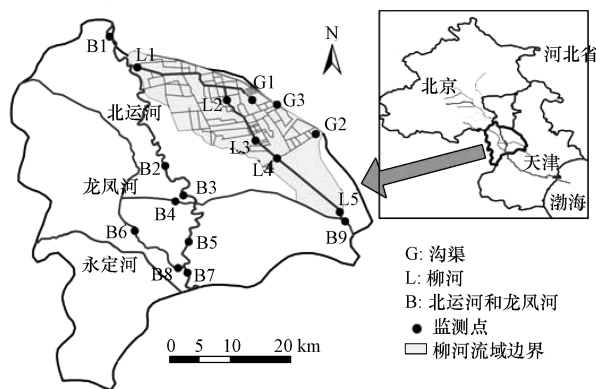


图 1 采样点分布图

Fig. 1 The distribution of sampling sites

2.2 样品采集与分析

分别于 2010 年 5 月 20 日 (春季)、7 月 4 日 (夏季)、10 月 23 日 (秋季)、12 月 9 日 (冬季) 对北运河 17 个监测点进行了取样监测 (图 1),其中,9 个监测点 (B1 ~ B9) 位于北运河和龙凤河主河道,5 个监测点 (L1 ~ L5) 位于北运河支流——柳河,3 个监测点 (G1 ~ G3) 位于柳河流域内农田灌溉沟渠. 监测指标包括温度 (T)、pH、溶解氧 (DO)、叶绿素 a (Chl-a)、总溶解固体 (TDS)、氧化还原电位 (ORP)、总氮 (TN)、氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、亚硝态氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、总有机碳 (TOC)、生化需氧量 (BOD_5)、化学需氧量 (COD)、总磷 (TP),共 14 项指标. 其中,DO、Chl-a、 T 、TDS、ORP 采用哈希水质仪现场测定,TOC 和 TN 采用耶拿 MultiN/C UV 分析仪测定,其他指标的测定采用地表水环境质量标准 (GB 3838—2002) 中指定的分析方法.

2.3 数据分析与处理

2.3.1 灰色关联分析 灰色关联分析法是采用关联度来量化研究系统内各因素的相互关系、相互影响及相互作用的一种方法. 若两主体各子参数序列构成的空间几何曲线越接近,则关联度越大 (Wong *et al.*, 2006). 进行水质评价时,选择评价对象的实测值为待比序列,地表水环境质量标准作为参照序

列,求出多个关联度,与待比序列关联度最大的参照序列所对应的级别,即为水质所属等级.采用灰色关联分析法评价的具体步骤如下.

1) 确定参照序列和待比序列

设水环境质量标准共分 m 级,参评因子为 n 个,水样总数为 l ,得到待比序列和参照序列如下:

$$X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k), \dots, x_i(n)\} \quad (i = 1, 2, \dots, l) \quad (1)$$

$$Y_j = \{y_j(1), y_j(2), \dots, y_j(k), \dots, y_j(n)\} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中, X_i 表示待比序列, $x_i(k)$ 表示第 i 个水样中第 k 项待评因子的实测值, Y_j 表示参照序列, $y_j(k)$ 表示第 j 级标准中第 k 项因子标准值.

2) 计算灰色关联度

计算灰色关联度有很多方法,常见灰色评价方法多采用邓聚龙(1986)提出的关联系数计算方法,该计算方法具体介绍及应用见文献(Deng *et al.*, 1989; Huang *et al.*, 1996; Wong *et al.*, 2000; Pai *et al.*, 2007).

Ip 等(2009)指出,邓聚龙的灰色关联系数在进行水环境质量评价时存在明显的缺陷,往往致使结果不客观,因此,提出采用正弦函数来计算灰色关联系数,具有很高的精度,可满足水质评价要求.具体计算公式如下:

$$r(k) = \begin{cases} 1, & x(k) = y(k) = 0 \\ \frac{2x(k)y(k)}{x(k)^2 + y(k)^2}, & x(k)^2 + y(k)^2 \neq 0 \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$r_{ij} = r(X_i, Y_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r(k) \quad (4)$$

式中, $r(k)$ 表示第 k 项待评因子 $x(k)$ 与对应水质标准因子 $y(k)$ 的关联系数, r_{ij} 表示第 i 个水样与第 j 级水质标准的关联系数.

3) 确定水质等级

定义 $r_{i, j_0} = \max\{r_{ij}\}$, 此时得出第 i 个水样属于水环境质量标准中第 j_0 级(Xia *et al.*, 1997).

4) 综合评价结果量化

在实际研究时,往往得出属于哪个级别并不满足实际要求,还需计算出综合分值,从而便于横向或者纵向对比,本文采用 Ip 等(2009)的方法进行计算,公式如下:

$$\bar{r}_{ij} = \frac{r_{ij} - \min_j r_{ij}}{\max_j r_{ij} - \min_j r_{ij}} \quad (5)$$

$$J^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \cdot \bar{r}_{ij}}{\sum_{j=1}^m \bar{r}_{ij}} \quad (6)$$

灰色关联评价, j_0 给出了水样大致所属级别, J^* 为综合的分值,用来对比水样水质的相对优劣, \bar{r}_{ij} 为中间变量.例如, $j_0 = 2, J^* = 2.8$, 说明该水样为 II 级标准,综合分值为 2.8.

2.3.2 判别分析 判别分析是根据观察或测量的若干变量值,判断研究对象属于哪一类的方法.线性判别函数表述为(Singh *et al.*, 2005):

$$f(G_i) = \sum_{j=1}^n w_{ij} p_{ij} + k_i \quad (7)$$

式中, $f(G_i)$ 表示第 i 类的判别函数, 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, k_i 表示残差.对于任一组未知类别的数据,将其分别代入各类别判别函数 $f(G_i)$ 中,若 $f(G_x) = \max\{f(G_i)\}$, 则认为该组数据属于第 x 类,可对未知数据进行判别;若事先已知该组数据所属类别,进行回代分析,分类结果可用来评价判别函数精度.

本研究中,采用 3 种方法(全模型法、向前选择法、向后选择法)计算判别函数,来研究水质变异特征.全模型法选择所有指标建立判别函数,当对变量认识较为全面时选择此种方法;向前选择法是从模型中没有变量开始,每一步把一个对判别能力贡献最大的变量引入模型,当希望较多的变量留在判别函数中时多采用该方法;向后选择法与向前选择法完全相反,它是从所有指定变量建立一个全模型,每一步把一个对模型判别能力贡献最小的变量剔除,直到所有变量都符合留在模型的判据时,剔除变量工作结束,在希望较少的变量留在判别函数中时使用向后选择法.3 种方法的具体介绍及应用可参见文献(Alberto *et al.*, 2001; Singh *et al.*, 2005; Shresth *et al.*, 2007).整个判别分析过程在 SPSS V16.0 软件中实现.

2.3.3 主成分分析/因子分析 在水环境研究中,经常会遇到环境因素复杂、因子众多数据的处理和分析.主成分分析法就是在保证信息损失量最小的前提下,尽可能提取问题的主要方面,从而对多变量数据进行最佳综合简化,以便对实际问题进行系统分析和评价(Kazi *et al.*, 2009).主成分分析/因

子分析主要分为以下几个步骤:①变量数据标准化;②计算相关系数矩阵;③求解特征值和特征向量;④提取主成分,进行数据压缩;⑤计算因子载荷矩阵,并进行因子旋转,对主成分进行分析(Ouyang, 2005; Noori *et al.*, 2010).

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 水质评价

3.1.1 水质参数的统计特征 水质参数的统计结

表 1 水质参数的统计特征及环境标准

Table 1 Summary statistics of measured variables and the environmental guideline of national quality standards for surface waters

参数	简称	单位	平均值	标准差	变异系数	水环境质量标准				
						I	II	III	IV	V
五日生化需氧量	BOD ₅	mg·L ⁻¹	9.56	10.15	106.08%	2	3	4	6	10
化学需氧量	COD	mg·L ⁻¹	46.55	30.51	65.55%	10	15	20	30	40
溶解氧	DO	mg·L ⁻¹	6.07	4.15	68.35%	7.5	6	5	3	2
pH	pH		8.07	0.85	10.50%					
溶解性总固体	TDS	g·L ⁻¹	0.97	0.38	39.40%					
氨氮	NH ₄ ⁺ -N	mg·L ⁻¹	7.74	5.51	71.23%	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0
温度	T	℃	16.19	11.18	69.09%					
硝态氮	NO ₃ ⁻ -N	mg·L ⁻¹	1.24	1.37	111.26%	5	10	20	23	25
亚硝态氮	NO ₂ ⁻ -N	mg·L ⁻¹	0.41	0.52	128.99%	0.06	0.10	0.15	1.0	1.0
氧化还原电位	ORP	mV	394.12	49.21	12.49%					
叶绿素 a	Chl-a	mg·m ⁻³	44.04	39.42	89.50%					
总氮	TN	mg·L ⁻¹	12.83	7.03	54.75%	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0
总磷	TP	mg·L ⁻¹	0.36	0.22	61.17%	0.02	0.1	0.2	0.3	0.4
总有机碳	TOC	mg·L ⁻¹	37.14	29.13	78.43%					

3.1.2 水质评价结果 选用 BOD₅、COD、DO、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TN、TP 8 项指标,参照水环境质量标准(表 1),采用灰色关联评价法进行评价,结果见表 2。由表 2 可知,除部分调查点干枯未采样

果见表 1。由表 1 可知,整体上各污染物含量均较高,大部分参数超过或接近 V 类标准。从平均值上看,以氮污染最为显著,TN 均值超出 V 类标准 6 倍以上,达到 12.83 mg·L⁻¹;其次为有机污染,COD 平均值超过 V 类标准,BOD₅ 值达到 9.56 mg·L⁻¹,TP 含量为 0.36 mg·L⁻¹,接近 V 类标准。从变异性上看,NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 变异性最大,其次是 BOD₅,pH 和氧化还原电位变异性最小。

外,其他所有样点的水质都在 III 类标准以上(即 $j_0 \geq 3$),其中,23.8% 的观测点水质为 III 类水,12.7% 为 IV 类水,63.5% 为 V 类水及以上,说明北运河下游水质总体质量差,污染严重。

表 2 灰色评价结果

Table 2 The results of grey relational assessment

季	样	灰色关联系数					j_0	J^*	季	样	灰色关联系数					j_0	J^*
		I	II	III	IV	V					I	II	III	IV	V		
春季	G1								夏季	G1	0.075	0.139	0.210	0.299	0.388	5	4.069
	G2	0.350	0.368	0.388	0.420	0.426	5	3.981		G2	0.208	0.346	0.496	0.537	0.636	5	3.885
	G3	0.204	0.385	0.521	0.544	0.610	5	3.781		G3	0.128	0.259	0.393	0.601	0.685	5	4.02
	L1	0.289	0.384	0.425	0.489	0.511	5	3.776		L1	0.151	0.301	0.422	0.488	0.552	5	3.861
	L2									L2	0.187	0.338	0.467	0.497	0.554	5	3.806
	L3	0.319	0.450	0.458	0.485	0.517	5	3.678		L3	0.249	0.367	0.397	0.408	0.472	5	3.752
	L4									L4	0.358	0.515	0.636	0.654	0.646	4	3.702
	L5	0.316	0.383	0.353	0.368	0.397	5	3.622		L5	0.137	0.228	0.346	0.568	0.672	5	4.113
	B1	0.287	0.385	0.445	0.479	0.501	5	3.756		B1	0.157	0.311	0.412	0.498	0.542	5	3.843
	B2									B2	0.144	0.269	0.354	0.484	0.539	5	3.940
	B3	0.266	0.417	0.535	0.646	0.680	5	3.871		B3	0.198	0.337	0.450	0.604	0.625	5	3.916
	B4	0.300	0.446	0.558	0.624	0.622	4	3.783		B4	0.185	0.254	0.349	0.564	0.656	5	4.155

续表 2

季 节	样 点	灰色关联系数					j_0	J^*	季 节	样 点	灰色关联系数					j_0	J^*
		I	II	III	IV	V					I	II	III	IV	V		
	B5	0.317	0.484	0.543	0.482	0.495	3	3.481	B5	0.288	0.357	0.439	0.479	0.560	5	3.973	
	B6	0.224	0.366	0.486	0.537	0.574	5	3.817	B6	0.155	0.271	0.392	0.588	0.656	5	4.026	
	B7	0.194	0.410	0.507	0.554	0.585	5	3.723	B7	0.243	0.380	0.482	0.478	0.557	5	3.784	
	B8								B8	0.153	0.267	0.406	0.519	0.619	5	3.988	
	B9	0.251	0.392	0.445	0.510	0.555	5	3.809	B9	0.130	0.222	0.333	0.517	0.617	5	4.086	
秋季	G1	0.295	0.406	0.516	0.552	0.553	5	3.782	冬季	G1	0.388	0.534	0.637	0.622	0.635	5	3.665
	G2	0.197	0.281	0.384	0.446	0.493	5	3.929	G2	0.325	0.489	0.587	0.601	0.688	5	3.87	
	G3	0.295	0.406	0.498	0.555	0.564	5	3.782	G3	0.414	0.552	0.527	0.537	0.620	5	3.92	
	L1	0.296	0.335	0.353	0.274	0.294	3	2.650	L1	0.383	0.462	0.517	0.614	0.627	5	3.911	
	L2	0.466	0.585	0.670	0.600	0.587	3	3.444	L2	0.334	0.348	0.387	0.493	0.524	5	4.263	
	L3	0.255	0.396	0.491	0.525	0.492	4	3.718	L3	0.325	0.489	0.587	0.621	0.676	5	3.777	
	L4	0.270	0.503	0.641	0.575	0.560	3	3.544	L4	0.414	0.552	0.620	0.537	0.508	3	3.309	
	L5	0.281	0.444	0.519	0.495	0.490	3	3.569	L5	0.359	0.528	0.596	0.554	0.600	5	3.604	
	B1	0.273	0.345	0.406	0.332	0.342	3	3.374	B1	0.389	0.468	0.517	0.632	0.616	4	3.913	
	B2	0.257	0.345	0.406	0.331	0.345	3	3.407	B2	0.367	0.443	0.504	0.621	0.618	4	3.947	
	B3	0.282	0.385	0.458	0.380	0.386	3	3.422	B3	0.342	0.425	0.497	0.631	0.644	5	3.975	
	B4	0.392	0.455	0.513	0.422	0.416	3	3.067	B4	0.396	0.470	0.529	0.595	0.583	4	3.843	
	B5	0.385	0.489	0.589	0.640	0.655	5	3.829	B5	0.375	0.496	0.580	0.630	0.620	4	3.756	
	B6	0.212	0.300	0.389	0.339	0.369	3	3.645	B6	0.407	0.475	0.526	0.596	0.575	4	3.840	
	B7	0.409	0.500	0.575	0.488	0.483	3	3.334	B7	0.271	0.314	0.372	0.450	0.482	5	4.044	
	B8	0.391	0.583	0.714	0.660	0.619	3	3.526	B8	0.353	0.449	0.453	0.525	0.543	5	3.819	
	B9	0.423	0.560	0.644	0.543	0.523	3	3.315	B9	0.457	0.539	0.593	0.522	0.489	3	3.150	

采用综合评价结果(J^*)评估各河段和各监测时期综合水质相对变化,结果见表 3. 从表 3 中可以看出,三者污染指数 J^* 较为接近,但灌溉沟渠水质明显劣于其他河段,且在春、秋季节与子河道(柳河)、主河道(北运河和龙凤河)差异显著,而在夏、冬季节水质差异不显著. 从时间变化上看,10 月份水质最优,7 月份水质最差,说明北运河武清段水质在空间和时间上都存在一定的变异.

表 3 综合评价(J^*)结果统计特征

Table 3 The statistical characteristics of comprehensive evaluation results

季节	J^*		
	沟渠(G)	柳河(L)	北运河和龙凤河(B)
春季	3.94 ± 0.05 ^a	3.65 ± 0.04 ^b	3.75 ± 0.13 ^b
夏季	3.99 ± 0.09 ^a	3.84 ± 0.18 ^a	3.97 ± 0.11 ^a
秋季	3.84 ± 0.08 ^a	3.39 ± 0.42 ^b	3.43 ± 0.22 ^b
冬季	3.87 ± 0.12 ^a	3.77 ± 0.35 ^a	3.81 ± 0.26 ^a
全年	3.88 ± 0.12 ^a	3.67 ± 0.34 ^b	3.74 ± 0.27 ^{ab}

注:不同字母表示不同河段间差异显著(LSD),置信水平为 95%.

灰色关联评价结果表明,沟渠水质劣于主河道和其子河道,可能的原因是沟渠的水源由主河道和其子河道灌入,沟渠水不流通或者流动量小,污染

物降解慢;此外,其水体还直接受生活污染和农业污染的影响,污染更为明显. 相对于主河道,灌溉沟渠的水质直接受面源污染影响,采用单因子方差分析(One-way ANOVA)对主要污染物进行对比,发现 TP 含量和 BOD₅ 值明显高于其他河道,且差异显著($p < 0.05$). 表明沟渠水质评价结果明显劣于主河道可能主要是高含量的 TP 和 BOD₅ 造成的.

3.2 水质时空变异特征

相关分析法能筛选出与时空变异相关的指标,判别分析法能筛选出对时空判别有贡献的指标,即使变异只发生在某一两个时空也能被判别出. 将两者方法结合并对比,可筛选出哪些元素存在时空变异,哪些元素的变异只发生在特定的时空,从而可将河道污染的人为因素和自然因素区分开.

3.2.1 季节变化特征 由于季节为非数值参数,因此,在进行 Spearman 相关分析前首先对季节指标量化. 量化方法采用赋值的手段,即按照各指标的各季节均值进行排序,平均值最大的季节赋值为 4,其次分别为 3 和 2,最小的为 1. 对各指标与季节性 Spearman 相关性分析得出,除 TP、TN、NO₂⁻-N、ORP、TDS 外,其余指标与季节相关性显著,其中, T

(Spearman 相关系数为 0.836)、TOC (0.843)、DO (0.536)、 NO_3^- -N (0.510)、COD (0.496)、 BOD_5 (0.482) 和 pH (0.353) 与季节相关性显著 ($p < 0.01$); Chl-a (0.322) 和 NH_4^+ -N (0.284) 与季节相关性显著 ($p < 0.05$). 这些与季节性相关的指标可说明其变异受季节性因子影响(水位、水量等),而相关性不显著的污染物,如 TP、TN、 NO_2^- -N、ORP 和 TDS 可能受人为影响较大,也可能受季节性影响,但影响只发生在特定的某一两个季节,可采用判别分析法作进一步探讨.

采用判别分析法对季节性变异进行分析,使用全模型法、向前选择法和向后选择法建立判别函

数,判别系数见表 4. 全模型法选择所有指标建立判别函数,判别回代正确率为 100% (表 5),因此,这些元素能很好地解释了季节性水质变异. 向前选择法希望较多的变量留在判别函数中,剔除了对判别季节性变异无贡献的 4 个变量(表 4),判别回代正确率为 100% (表 5); 向后选择法希望较少的变量留在判别函数中,只选用对判别能力贡献较大的变量(Singh *et al.*, 2004),筛选出了 TP、 NO_3^- -N、COD、TOC、T、DO、TN 7 个指标,说明这 7 个指标就能很好地解释了水质的季节性变异,判别回代正确率为 100%.

表 4 季节性判别函数(公式(7))系数

Table 4 Classification functions (Eq. (7)) for discriminant analysis of temporal variations of water quality

指标	判别系数(全模型法)				判别系数(向前选择法)				判别系数(向后选择法)			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
TP	-33.47	-26.49	-10.58	-1.15	-21.77	-13.89	-0.74	7.61	-28.85	-24.843	-8.087	0.514
NO_3^- -N	-10.89	-12.38	-14.16	-8.69	-0.84	-2.77	-1.79	3.02	0.978	0.135	0.251	4.961
COD	-0.02	0.10	-0.09	0.02	0.25	0.40	0.24	0.32	0.20	0.258	0.088	0.188
TOC	0.96	1.08	0.29	0.05	0.94	1.01	0.31	0.07	0.978	1.105	0.397	0.148
T	25.00	31.52	14.03	4.12	23.16	29.27	12.91	3.09	22.555	28.50	12.27	2.435
DO	-5.14	-6.01	-4.79	-2.36	-1.16	-1.53	-0.47	1.61	-0.994	-1.361	-0.369	1.732
TN	2.62	2.09	1.74	1.68	2.76	3.22	1.52	1.25	2.564	3.053	1.377	1.088
NO_2^- -N	-0.31	4.72	0.72	-0.10	2.60	7.58	3.78	2.85				
NH_4^+ -N	0.32	1.52	0.02	-0.26	0.15	-0.05	-0.23	-0.15				
BOD_5	0.47	0.41	0.02	0.06								
pH	56.43	62.59	58.65	54.47								
ORP	1.04	1.18	1.04	0.99	0.26	0.31	0.25	0.26				
TDS	-23.66	-28.22	-15.27	-13.84								
Chl-a	0	0	0.03	0.02								
残差	-727.53	-1021.03	-511.51	-411.36	-376.06	-582.69	-144.18	-93.95	-318.527	-498.714	-93.036	-38.108

表 5 季节判别回代验证

Table 5 Verification of classification functions for discriminant analysis of season variations

判别方法	季节	正确率	判别回代结果			
			春季	夏季	秋季	冬季
全模型法	春季	100%	12 ^a	0	0	0
	夏季	100%	0	16	0	0
	秋季	100%	0	0	16	0
	冬季	100%	0	0	0	16
向前选择法	春季	100%	12	0	0	0
	夏季	100%	0	16	0	0
	秋季	100%	0	0	16	0
	冬季	100%	0	0	0	16
向后选择法	春季	100%	12	0	0	0
	夏季	100%	0	16	0	0
	秋季	100%	0	0	16	0
	冬季	100%	0	0	0	16

注: a 表示春季共有水样 12 个,采用全模型法(系数见表 4)回代进行数学判别,得出 12 个水样为春季采集,因此,数值为 12. 相应的,水样判别为夏季、秋季、冬季的数值都为 0,下同.

与相关性分析结果对比可发现, TN、TP 与季节相关性不显著, 但判别分析却得出其对季节性判别有贡献, 说明 TN 和 TP 的变异可能只发生在某一两个季节, 其他季节变化不明显; BOD₅ 和 pH 与季节相关性显著, 但并不能解释季节性变异, 一方面可能与季节性因素相关, 如水温、污染物类型等, 另一方面可能是由于北运河是多闸坝型河道, 闸坝开关时间不固定, 加上点源不固定排放, 使局部水域生物难降解, BOD₅ 和 pH 的波动大, 丧失季节性判别能力. 通常来说, COD 与 BOD₅ 的变异规律较为类似 (Chang, 2008), 但北运河沿线化工厂较多, 局部水域排放偏酸或偏碱废水, 致使 pH 异常 (pH 变化范围为 3.77 ~ 9.53), 直接影响微生物的分解活动, 但对 COD 影响并不大, 所以出现了 BOD₅ 和 pH 与季节相关, 但并不能解释水质季节性变异的. 由于人为废水排放不受季节性影响, 全年不间断, 对季节性判别分析无贡献, 因此说明 BOD₅、pH、TDS、Chl-a 主要受人为污染影响, ORP、NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 影响次之.

对影响季节性变异的指标进行分析, 结果见图 2. 由图 2 可知, 温度很好地体现了季节性特征, 夏季水温达到 30.97 °C, 冬季水温最低, 为 2.58 °C; 春、

夏、秋季的 DO 值较为接近, 差异不明显, 而冬季 DO 值较高, 主要是因为低温会使水中的溶解氧含量上升 (Shresth *et al.*, 2007); 春季 TP 含量较低, 可能是春季藻类生长, 水生生物对其吸收作用较为明显, 夏季 TP 含量高一方面主要是由农业非点源污染造成, 另一方面与水温有关, 据隋少峰等 (2001) 在武汉东湖的研究结果, 水温升高能加速底泥释放磷; NO₃⁻-N 和 TN 都表现为冬季含量较高, 这可能是由于冬季低温, 微生物活性降低, 造成了氮的积累, Shresth 等 (2007) 也得出了类似的结论. 夏季 TN 反而与春季持平, 可能是因为农业非点源污染总氮事件平均浓度 (EMC) 基本上在 3 ~ 20 mg·L⁻¹ 之间 (王晓燕等, 2001; 2004; 曹杰君等, 2010), 在该研究区进行的非点源污染研究表明, EMC 平均浓度为 12 mg·L⁻¹ 左右 (张汪寿等, 2011), 与北运河武清段水质总氮含量持平, 因此可能对水体的影响并不明显, 秋季 TN 下降, 与河流上游水库放水有一定的关系; COD 和 TOC 季节性特征较为类似, 夏季都较高, 春季次之, 秋冬季节低, 夏季非点源污染带入大量需氧有机物, 春季藻类、水生植物等生长旺盛, 残体较多, 而秋冬季节变异不大.

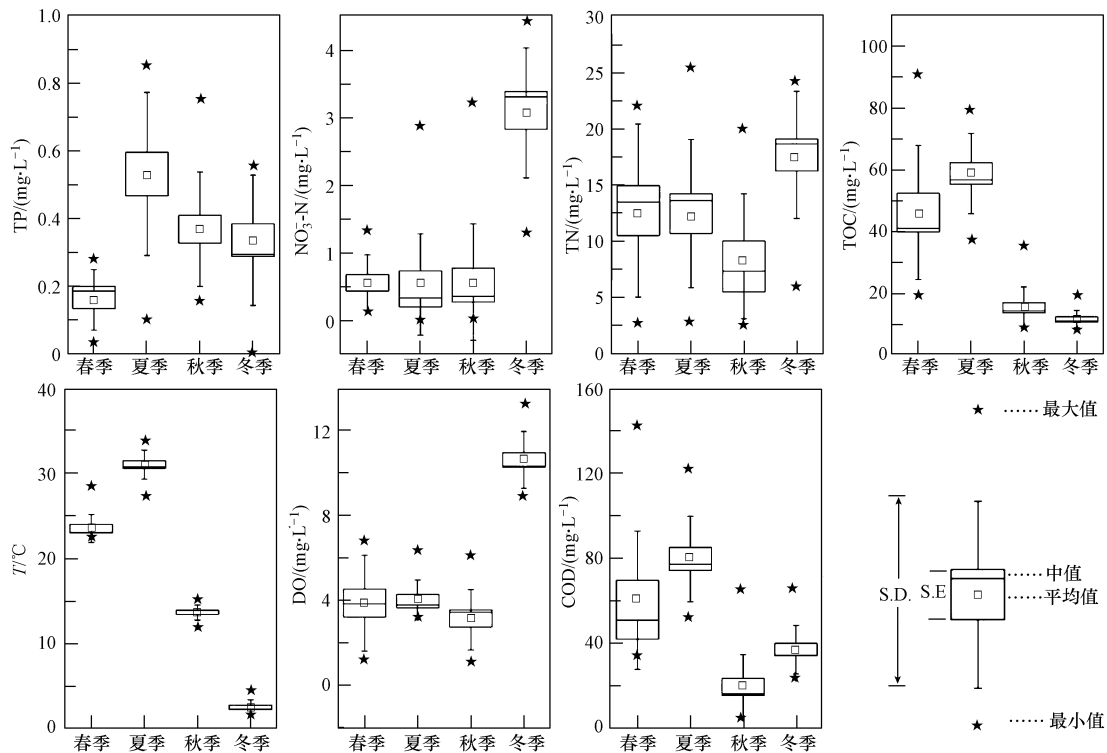


图 2 指标季节性变异性特征

Fig. 2 Temporal variations of indicators in surface water quality

3.2.2 空间变异特征 采用 Spearman 相关分析法对各参数空间相关性进行了研究,结果表明,除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (相关系数为 0.324) 和 TN (0.369) 外,其余指标与空间位置不相关(空间位置指标量化方法同 3.2.1 节),说明主河道、子河道及沟渠间各污染物空间相关性不明显。

采用判别分析法对季节性变异深入分析,使用了全模型法、向前选择法和向后选择法建立判别函数。对北运河武清段水系进行空间判别分析,得出 3 种方法的判别系数(表 6)。全模型法判别回代正确率分别为 85.7% (沟渠)、73.3% (柳河) 和 71.1% (主河道),判别回代正确率低可能是由于沟渠、柳河和北运河水质空间差异性不明显造成的。采用向前选择法选出了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、Orp、Chl-a 和 TN 4 个指标,判别回代结果(表 7)为 71.4% (沟渠)、53.3%

(柳河)和 60.5% (北运河),也说明这 4 个指标存在一定程度的空间变异;向后选择法选择进一步筛选出了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 两项指标,判别回代结果为 57.1% (沟渠)、26.7% (柳河) 和 71.1% (北运河),判别精度不高,尤其是沟渠和柳河的误判率较高,可能是其 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度较为接近的缘故。从图 3 的氨氮和总氮含量空间分布图中可直观地看出,北运河和龙凤河的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 含量均最高,而柳河和沟渠差异不明显,季节判别分析也表明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 受人为影响大,上游含量均最高,下游含量均明显低于上游,因此,北运河和龙凤河直接受上游工业排放的氨氮和总氮影响。相应地,柳河及其沟渠的变异可能多是由自然因素导致的。

表 6 空间判别函数(公式(7))系数

Table 6 Classification functions (Eq. (7)) for discriminant analysis of spatial variations of water quality

指标	判别系数(全模型法)			判别系数(向前选择法)			判别系数(向后选择法)		
	沟渠	柳河	主河道	沟渠	柳河	主河道	沟渠	柳河	主河道
TP	-33.17	-36.71	-37.60						
$\text{NO}_2^-\text{-N}$	-13.98	-12.65	-12.50						
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	-12.21	-14.66	-12.96						
COD	-0.30	-0.19	-0.23						
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	-3.19	-3.59	-3.55	-0.22	-0.23	-0.31	-0.35	-0.38	-0.45
BOD_5	0.42	0.21	0.19						
TOC	0.21	0.18	0.17						
T	-1.56	-1.80	-1.48						
pH	44.42	45.61	44.35						
ORP	0.74	0.78	0.74	0.16	0.18	0.16			
TDS	-4.86	-3.40	-3.76						
DO	-2.62	-2.60	-2.52						
Chl-a	0.04	0.06	0.05	-0.01	0.01	0.04			
TN	3.30	3.78	3.83	0.09	0.09	0.30	0.47	0.49	0.67
残差	-290.14	-313.32	-294.23	-31.28	-38.02	-33.84	-2.33	-2.40	-4.00

表 7 空间判别回代验证

Table 7 Verification of classification functions for discriminant analysis of spatial variations

判别方法	河段	正确率	判别回代结果		
			沟渠	柳河	主河道
全模型法	沟渠	85.7%	6	0	1
	柳河	73.3%	2	11	2
	主河道	71.1%	5	6	27
向前选择法	沟渠	71.4%	5	0	2
	柳河	53.3%	5	8	2
	主河道	60.5%	7	8	23
向后选择法	沟渠	57.1%	4	1	2
	柳河	26.7%	7	4	4
	主河道	71.1%	8	3	27

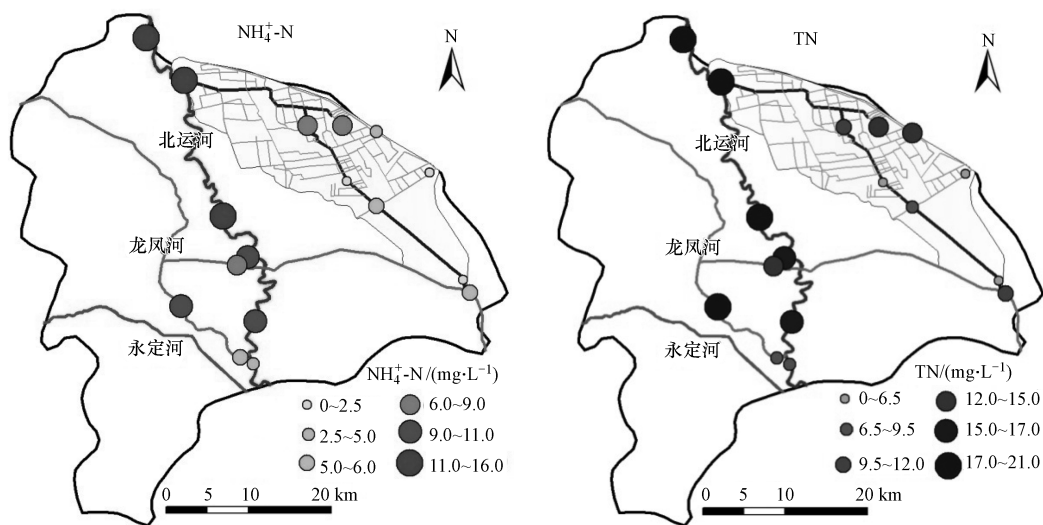


图3 氨氮和总氮含量的空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of ammonia and total nitrogen

3.3 污染源解析

由于水质指标众多,为识别主要污染源,将所有数据标准化后进行主成分分析,提取影响水质的主要因子. 采用特征值是否大于1作为判别依据

(Simeonov *et al.*, 2003; Pekey *et al.*, 2004),提取出了5个主成分,共解释了76.64%的水质变异,具体结果见表8.

表8 因子载荷矩阵和方差最大正交旋转因子载荷矩阵

Table 8 Factor matrix and varimax rotated factor matrix for the whole data set

指标	旋转前因子载荷					旋转后因子载荷				
	FC1	FC2	FC3	FC4	FC5	VF1	VF2	VF3	VF4	VF5
TP	-0.045	0.363	-0.022	0.466	0.666	0.056	0.329	-0.128	0.168	<u>0.800</u>
NO ₂ ⁻ -N	0.070	0.565	0.165	0.146	0.000	0.416	0.417	0.072	0.064	0.130
NO ₃ ⁻ -N	-0.723	0.207	0.469	0.113	-0.023	-0.164	0.373	<u>0.778</u>	-0.051	0.162
COD	0.724	0.355	0.440	-0.012	-0.101	<u>0.912</u>	-0.132	-0.051	0.042	-0.009
NH ₄ ⁺ -N	-0.571	0.682	-0.186	0.096	-0.043	-0.135	<u>0.891</u>	0.149	-0.040	0.042
BOD ₅	0.722	0.284	0.443	-0.030	-0.103	<u>0.877</u>	-0.193	-0.045	0.034	-0.023
TOC	0.748	0.442	-0.093	-0.208	-0.079	0.716	0.056	-0.512	-0.108	-0.158
TN	-0.564	0.746	-0.108	0.062	-0.077	-0.054	<u>0.919</u>	0.210	-0.073	0.020
<i>T</i>	<u>0.877</u>	0.310	-0.188	-0.001	0.156	0.657	-0.080	-0.689	0.049	0.092
pH	0.209	-0.040	0.198	<u>0.882</u>	-0.203	0.216	-0.061	0.151	<u>0.898</u>	0.155
ORP	-0.210	0.301	0.492	-0.607	0.292	0.238	0.112	0.384	<u>-0.763</u>	0.184
TDS	0.327	0.310	0.481	0.158	0.008	0.298	0.521	0.226	0.184	0.118
DO	-0.482	-0.077	0.687	-0.014	-0.277	-0.305	-0.026	<u>0.880</u>	-0.040	-0.105
Chl-a	-0.026	-0.319	0.304	0.048	0.669	-0.109	-0.394	0.127	-0.165	0.659
特征值	3.98	2.31	1.81	1.48	1.16	2.973	2.57	2.44	1.51	1.24
贡献率	28.41%	16.50%	12.89%	10.59%	8.25%	21.24%	18.33%	17.47%	10.77%	8.83%
累积贡献率	28.41%	44.91%	57.80%	68.39%	76.64%	21.24%	39.57%	57.04%	67.81%	76.64%

注: |因子载荷| > 0.75, ∈ [0.5, 0.75], ∈ [0.3, 0.5] 分别作为强烈、中等和弱相关的判别依据 (Liu *et al.*, 2003). 表中加下划线表示强烈相关, 黑体表示中等相关.

如第一主成分 FC1, 解释了 28.41% 的水质变异, 与 COD、BOD₅、TOC、*T* 正相关, 但与 NO₃⁻-N、

NH₄⁺-N、DO 等负相关, 解析起来难度较大, 因此, 有必要进行因子旋转. 采用的因子旋转方法为方差最

大正交旋转法,即保证原共性因子之间的正交性和共性方差总和不变的前提下,因子载荷将得到重新分配,使公因子负荷系数向更大或更小的方向变化,因此,可能对潜在因子做专业性解释(Vega *et al.*, 1998; Bouza *et al.*, 2008)。

对旋转后因子载荷矩阵进行分析,第一主成分 VF1 与 COD、BOD₅、TOC、T 正相关,与 DO 负相关, VF1 可解析为有机污染,一方面与温度正相关,暗含季节性特征,如夏季时温度较高,非点源污染加剧;另一方面由于季节性分析结果表明, BOD₅ 可能受人为影响较大(见 3.1.1 节),因此, VF1 可解析为点源和非点源排放的有机污染;第二主成分 VF2 与氨氮、总氮和 TDS 正相关,季节性分析结果表明, TDS 主要来源于人为排放,因此, VF2 可解析为工厂和污水处理厂等排放的氨氮污染; VF3 与硝态氮和 DO 正相关,与温度和 TOC 负相关,一方面硝态氮在低温时(冬季)浓度最高,另一方面 TOC 含量高会消耗水中的 DO,因此与 TOC 负相关,可认为 VF3 主要是硝态氮污染; VF4 与 pH 正相关,与 ORP 负相关,说明 VF4 主要为工厂或污水处理厂的酸性及碱性废水造成的污染; VF5 与磷和 Chl-a 相关,可解析为磷污染。

综上所述,影响北运河武清段水质的主要因素依次为:有机污染物、氨氮、硝态氮、酸碱废水排放和磷。整体上,北运河武清段水系污染表现为污染成分复杂、浓度高、人为干扰明显的特征,表明点源仍是导致水体恶化的主导因子。

4 结论(Conclusions)

1)北运河武清段水系污染严重,总氮均值含量为 V 类标准 6 倍以上, COD 和 BOD₅ 平均值超过或接近 V 类标准。水质评价结果发现, 23.8% 观测点的水质为 III 类, 12.7% 的观测点为 IV 类, 63.5% 的观测点为 V 类。

2)武清段水系存在明显的时空变异:夏、冬季节各河道差异不显著,春、秋季节差异显著。沟渠水质最差,其 TP 含量和 BOD₅ 值明显高于其他河道。T、TOC、DO、NO₃⁻-N、COD、BOD₅、pH、Chl-a 和 NH₄⁺-N 与季节存在显著相关性,而 NH₄⁺-N 和 TN 与空间位置存在显著相关性。TP、NO₃⁻-N、COD、TOC、T、DO 和 TN 存在季节性变异,其主要受季节性因素影响(水位、水量等)或来源于季节性波动大的污染源,而 BOD₅、pH、TDS、Chl-a 受人为污染影响最大,

ORP、NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 影响次之。NH₄⁺-N 和 TN 存在空间变异,在北运河和龙凤河河段含量最高,其主要来自上游工业排放。

3)影响北运河武清段水质的主导因素依次为:有机污染物、氨氮、硝态氮、酸碱废水排放和磷,污染表现为复合污染。

责任作者简介:王晓燕(1967—),女,博士,教授,博士生导师,从事非点源污染及流域水质管理等方面的研究。出版专著 2 部,在国内外学术刊物上发表论文 120 余篇。E-mail: cnuwxy@sohu.com。

参考文献(References):

- Alberto W D, Pilar D M, Valeria A M, *et al.* 2001. Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquia River Basin (Córdoba-Argentina) [J]. *Water Research*, 35(12):2881-2894
- Bouza D R, Ternero R M, Fernandez E A. 2008. Trend study and assessment of surface water quality in the Ebro River (Spain) [J]. *Journal of Hydrology*, 361(3/4):227-239
- Chang H. 2008. Spatial analysis of water quality trends in the Han Riverbasin, South Korea [J]. *Water Research*, 42: 3285-3304
- 曹杰君,高扬,黄海波,等. 2010. 长三角典型村域次降雨条件下氮素非点源输出特征[J]. *环境科学*, 31(11):2587-2593
- Cao J J, Gao Y, Huang H B, *et al.* 2010. Output characteristics of non-point nitrogen from a typical region in Yangtze Delta under an individual rainfall event [J]. *Environment Science*, 31(11):2587-2593 (in Chinese)
- Da S A, Sacomani L B. 2001. Using chemical and physical parameters to define the quality of Pardo River water (Botucatu-SP-Brazil) [J]. *Water Research*, 35(6):1609-1616
- Deng J. 1989. Introduction to grey system theory [J]. *Journal of Grey Systems*, 1:1-24
- Elhatip H, Hınıs M A, Gulgahar N. 2007. Evaluation of the water quality at Tahtali dam watershed in Izmir, Turkey by means of statistical methodology [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22(3):391-400
- Huang F, Wang X Q, Lou L P, *et al.* 2010. Spatial variation and source apportionment of water pollution in Qiantang River (China) using statistical techniques [J]. *Water Research*, 44:1562-1572
- Huang Y P, Huang C C. 1996. The integration and application of fuzzy and grey modeling methods [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 78: 107-119
- Ip W C, Hu B Q, Wong H, *et al.* 2009. Applications of grey relational method to river environment quality evaluation in China [J]. *Journal of Hydrology*, 379:284-290
- Kolovos A, Christakos G, Serre M L, *et al.* 2002. Computational BME solution of a stochastic advection-reaction equation in the light of site-specific information [J]. *Water Resources Research*, 38(12): 1318-1334

- Kazi T G, Arain M B, Jamali M K, *et al.* 2009. Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72: 301-309
- Liu C W, Lin K H, Kuo Y M. 2003. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a Blackfoot disease area in Taiwan[J]. *Science in the Total Environment*, 313:77-89
- 毛战坡, 彭文启, 刘畅, 等. 2009. 北运河水质改善的非传统水源调控关键技术研究[J]. *给水排水动态*, 4:10-11
- Mao Z P, Peng W Q, Liu C, *et al.* 2009. Key research program on non-traditional water resource control and remediation of Beiyunhe River [J]. *Water and Wastewater Information*, 4:10-11 (in Chinese)
- Noori R, Karbassi A R, Sabahi M S. 2010. Evaluation of PCA and Gamma test techniques on ANN operation for weekly solid waste predicting[J]. *Journal of Environmental Management*, 91:767-771
- Ouyang Y. 2005. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis[J]. *Water Research*, 39:2621-2635
- Pekey H, Karakas D, Bakoglu M. 2004. Source apportionment of trace metals in surface waters of a polluted stream using multivariate statistical analyses[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 49(9):809-818
- Pai T Y, Hanaki K, Ho H H, *et al.* 2007. Using grey system theory to evaluate transportation effects on air quality trends in Japan [J]. *Transportation Research Part D*, 12:158-166
- Singh K P, Malik A, Mohan D, *et al.* 2004. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India) — a case study [J]. *Water Research*, 38:3980-3992
- Singh K P, Malik A, Sinha S. 2005. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques — a case study [J]. *Analytica Chimica Acta*, 538:355-374
- Shreshth S, Kazama F. 2007. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques; A case study of the Fuji river basin, Japan [J]. *Environmental Modelling & Software*, 22:464-475
- 隋少峰, 罗启芳. 2001. 武汉东湖底泥释磷特点 [J]. *环境科学*, 22(1):102-105
- Sui S F, Luo Q F. 2001. Release character of phosphorus from the sediments of East Lake, Wuhan [J]. *Environment Science*, 22(1): 102-105 (in Chinese)
- Simeonov V, Stratis J A, Samara C, *et al.* 2003. Assessment of the surface water quality in Northern Greece [J]. *Water Research*, 37: 4119-4124
- Vega M, Pardo R, Barrado E, *et al.* 1998. Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river waters by exploratory data analysis [J]. *Water Research*, 32(12):3581-3592
- 王晓燕, 王晓峰, 汪清平, 等. 2004. 北京密云水库小流域非点源污染负荷估算 [J]. *地理科学*, 24(2):227-231
- Wang X Y, Wang X F, Wang Q P, *et al.* 2004. Loss of non-point source pollutants from Shixia small watershed, Miyun reservoir, Beijing [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 24(2): 227-231 (in Chinese)
- 王晓燕, 胡秋菊, 朱风云, 等. 2001. 密云水库流域降雨径流土壤中氮磷流失规律——以石匣试验区为例 [J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 22(2):79-85
- Wang X Y, Hu Q J, Zhu F Y, *et al.* 2001. Loss of nutrients in runoff and soil in the watershed of Miyun reservoir-as a example of Shixia experimental area [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 22(2):79-85 (in Chinese)
- Wang H Y. 2002. Assessment and prediction of overall environmental quality of Zhuzhou City, Hunan Province, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 66(3):329-340
- Wong C C, Lai H R. 2000. A new grey relational measurement [J]. *Journal of Grey Systems*, 12:341-346
- Wu M L, Wang Y S, Sun C C, *et al.* 2009. Identification of anthropogenic effects and seasonality on water quality in Daya Bay, South China Sea [J]. *Journal of Environmental Management*, 90: 3082-3090
- 吴运敏, 陈求稳, 李静. 2011. 模糊综合评价在小流域河道水质时空变化研究中的应用 [J]. *环境科学学报*, 31(6):1198-1205
- Wu Y M, Chen Q W, Li J. 2011. Fuzzy comprehensive assessment on spatio-temporal variations of water quality of a small catchment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 31(6):1198-1205 (in Chinese)
- Wong H, Hu B Q, Ip W C, *et al.* 2006. Change-point analysis of hydrological time series using grey relational method [J]. *Journal of Hydrology*, 24:323-338
- Xia J, Hu B Q. 1997. A grey system model for predicting trend change of urban waste water load [J]. *Journal of Environmental Hydrology*, 5:1-10
- 周丰, 郭怀成, 刘永, 等. 2007. 基于多元统计分析和RBFNNs的水质评价方法 [J]. *环境科学学报*, 27(5):846-853
- Zhou F, Guo H C, Liu Y, *et al.* 2007. A new approach for water quality assessment based on multivariate statistical analysis and radial basis function neural networks [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 27(5):846-853 (in Chinese)
- 张汪寿, 李晓秀, 王晓燕, 等. 2011. 北运河下游灌区不同土地利用方式非点源氮素输出规律 [J]. *环境科学学报*, 31(12): 2698-2706
- Zhang W S, Li X X, Wang X X, *et al.* 2011. Dissolved nitrogen runoff from different land use types in the downstream irrigation area of the Beiyunhe River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 31(12): 2698-2706 (in Chinese)