

周炼,安达,王月,等. 武烈河流域水质污染特征及污染源解析[J]. 环境工程技术学报,2016,6(6):579-584.

ZHOU L, AN D, WANG Y, et al. Water quality pollution characteristics and pollution source analysis of Wulie River basin[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2016,6(6):579-584.

武烈河流域水质污染特征及污染源解析

周炼^{1,2}, 安达^{2*}, 王月², 杨廷梅¹, 唐军², 安志民³, 陈晓志³

1. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074

2. 中国环境科学研究院, 国家环境保护地下水污染过程模拟与控制重点实验室, 北京 100012

3. 承德市环境保护局, 河北 承德 067000

摘要 以武烈河流域 2014 年 1—12 月 23 项指标的监测数据为基础, 采用单因子评价法和水质综合指数评价法, 对水质污染特征进行综合评价; 运用主成分分析法, 确定流域主要污染因子及区域水质空间变化特征, 并进一步对流域污染来源进行解析。结果表明: 武烈河流域上游支流水质为 II 类, 干流段监测断面 S1 与 S3 水质为 III 类, S2 与 S4 水质为 IV 类, 主要污染指标为 BOD₅ 与 TP; 流域水质由 2 个主成分组成, COD_{Cr}、COD_{Mn} 为第一主成分, NH₃-N、DO 与 BOD₅ 为第二主成分; 流域主要污染源包括生活污水、工业废水、农业化肥和农药的投入及畜禽养殖废水等。

关键词 武烈河流域; 水质评价; 污染特征; 污染源解析

中图分类号: X52 文章编号: 1674-991X(2016)06-0579-06 doi:10.3969/j.issn.1674-991X.2016.06.083

Water Quality Pollution Characteristics and Pollution Source Analysis of Wulie River Basin

ZHOU Lian^{1,2}, AN Da², WANG Yue², YANG Yanmei¹, TANG Jun², AN Zhimin³, CHEN Xiaozhi³

1. College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3. Chengde Environmental Protection Agency, Chengde 067000, China

Abstract Based on the monthly monitoring data of 23 water quality indexes of Wulie River basin in 2014, a comprehensive water quality evaluation was performed using single-factor assessment and comprehensive evaluation index method. Utilizing principle component analysis (PCA), the main pollution indicators in the river basin and the regional spatial variation characteristics of the water quality were determined. Furthermore, the pollution sources in the basin were analyzed. According to the results, the water quality of upper tributaries was in Class II, the water quality of monitoring sections S1 and S3 in main stream was in Class III, and that of monitoring sections S2 and S4 in main stream was in Class IV. The main pollution indicators were BOD₅ and TP. The PCA results showed that PC1 included COD_{Cr} and COD_{Mn}, the PC2 included NH₃-N, DO and BOD₅. There were four main pollution sources including domestic sewage, industrial wastewater, agricultural fertilizer and pesticide inputs, and livestock and poultry raising waste.

Key words Wulie River basin; water quality evaluation; pollution characteristics; pollution source analysis

收稿日期: 2016-03-25

基金项目: 河北省承德武烈河流域水污染控制与水质改善技术研究(15273606D)

作者简介: 周炼(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事地下水污染风险评估, zhoulian_work@outlook.com

* 责任作者: 安达(1979—), 女, 副研究员, 博士, 主要从事地下水污染风险评估, anda@craes.org.cn

承德市武烈河流域位于滦河流域上游,地处国家《重点流域水污染防治“十二五”规划》中海河流域于桥水库上游的承德、唐山控制单元,属水质维护型单元,其水质目标完成情况直接关系到海河流域和河北省水污染防治总体目标的实现^[1]。武烈河流域范围内涵盖上游多个用水和排污重镇,承接了承德市城区近 70% 的废水排放,对流域水质、水量影响较大。据 2014 年承德市水环境状况评价结果^[2],武烈河流域的雹神庙断面水质已降至Ⅳ类,低于区域水质目标,水环境形势不容乐观。针对武烈河流域的水污染防治与水质改善工作势在必行。

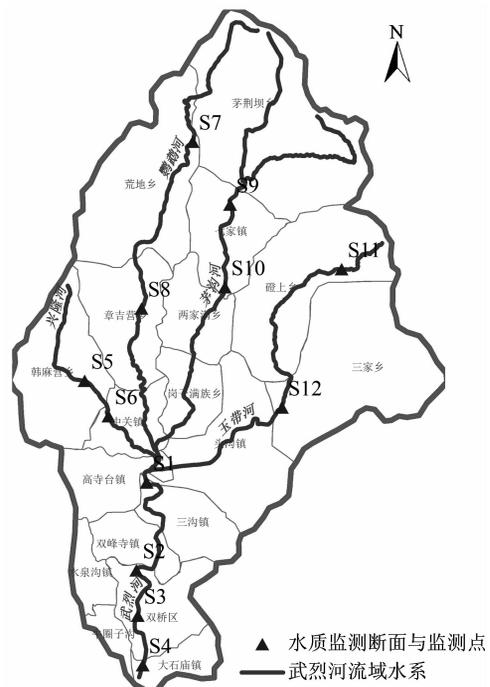
为此,笔者采用单因子评价法和水质综合指数评价法,对水质污染特征进行综合评价,运用主成分分析法,确定流域主要污染因子及区域水质空间变化特征,并对流域污染源进行解析,以期为进一步武烈河流域水污染防治与水质改善工作提供参考依据。

1 研究区域与方法

1.1 区域概况与数据来源

武烈河是滦河的一级支流,发源于围场县道至沟,流经双峰寺镇后纵贯承德市双桥区,至雹神庙村汇入滦河,干流全长 114 km,流域面积 2 580 km²,平均年径流量 2.172 4 亿 m³^[3]。流域上游主要有兴隆河、鸚鵡河、茅沟河、玉带河 4 条支流,呈扇形分布。研究区流域上共设有 4 个常规监测断面及 8 个监测点(图 1),其中流域支流设有 8 个监测点(S5 ~ S12),武烈河干流设有 4 个常规监测断面,分别为 S1(磷矿上游断面)、S2(上二道河子断面)、S3(旅游桥断面)和 S4(雹神庙断面)。研究区降水年内分布不均匀,枯水期为 3—5 月,以 5 月为最枯月,丰水期为 6—9 月,降水主要集中在 7、8 月,其余 5 个月为平水期^[4]。

研究区水质监测断面及监测点均为人工采样,检测 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》^[5]中的 23 项常规指标,监测频率为 1 次/月。水样分析方法参照 GB 3838—2002 和《水和废水监测分析方法》^[6]。其中 DO、COD_{Cr}、BOD₅,营养元素 N、P,有毒化合物挥发酚、氰化物、砷化物,重金属离子,石油类及细菌等指标受人类日常生活行为、农业及工业、经济行为等直接或间接影响^[7]。2014 年采集 12 次水样,其分析检测数据显示:武烈河流域内 Cr⁶⁺、Hg、Se、Cu、Pb、Cd、As、Zn、氰化物、硫化物、石油类、阴离



S1—磷矿上游;S2—上二道河子;S3—旅游桥;S4—雹神庙;
S5—兴隆河上游;S6—兴隆河中游;S7—鸚鵡河上游;
S8—鸚鵡河中游;S9—茅沟河上游;S10—茅沟河中游;
S11—玉带河上游;S12—玉带河中游。

图 1 武烈河流域水系及水质监测断面与监测点分布
Fig. 1 Distribution of water quality monitoring sections and points in Wulie River basin

子表面活性剂等 12 项指标低于 GB 3838—2002 的Ⅰ类标准限值,对水质评价及主成分分析结果无影响。根据流域实际情况,选取 S1 ~ S12 中 2014 年 3 月、4 月和 5 月的 COD_{Cr}、NH₃-N、BOD₅、TP、DO、氟化物和挥发酚等 7 项水质指标的平均值作为 2014 年流域枯水期地表水质数据。根据流域枯水期水质评价结果,进一步选取 S1 ~ S4 中 DO、COD_{Cr}、COD_{Mn}、BOD₅、NH₃-N 和 TP 等 6 项水质指标,取各水质指标 2014 年 1—12 月水质浓度的平均值作为流域干流 2014 年地表水质数据。

1.2 评价方法

1.2.1 水质评价方法

依据 2014 年武烈河流域枯水期地表水质数据,采用单因子评价法^[8]和水质综合指数评价法^[9]评价其水质等级。以单因子评价指数作为各指标的污染指数,采用加权平均法求得其水质综合指数。其中单因子评价指数的评价标准执行《地表水环境质量标准》^[5]中的Ⅲ类标准。

1.2.2 主成分分析

主成分分析是将多个指标化为少数几个不相关的综合指标(主成分)的统计分析方法,综合指标能反映出原指标所提供的绝大部分信息,达到降维和源识别的目的^[10-13]。依据武烈河流域干流2014年地表水质数据,借助SPSS22软件,进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 流域干流水质评价

根据《河北省水环境功能区划》,武烈河划分为武烈河河北承德保留区、武烈河承德饮用水源区和

武烈河承德工业用水区3个水功能区。武烈河河北承德保留区(监测点S5~S12)水质目标为Ⅱ类,饮用水源区和工业用水区(监测断面S1~S4)水质目标为Ⅲ类。

根据2014年武烈河流域枯水期水质监测及评价结果(表1):流域支流中,监测点S5水质为Ⅲ类,监测点S6~S12水质为Ⅱ类;武烈河干流监测断面中,监测断面S1、S3水质为Ⅲ类,监测断面S2与S4水质为Ⅳ类;主要污染指标为BOD₅与TP。水质为Ⅳ类的监测断面中,监测断面S4综合污染指数为0.57,污染最严重。

表1 2014年武烈河流域枯水期水质监测数据统计及评价结果

Table 1 Water quality monitoring results of Wulie River basin in 2014 low water period

指标	监测点							
	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
COD _{Cr} /(mg/L)	12.46	7.22	7.39	7.00	6.60	6.20	14.15	7.14
NH ₃ -N浓度/(mg/L)	0.130	0.100	0.105	0.100	0.061	0.063	0.071	0.094
BOD ₅ /(mg/L)	1.525	1.545	1.430	1.430	1.533	1.467	2.060	2.200
TP浓度/(mg/L)	0.105	0.096	0.095	0.065	0.030	0.033	0.075	0.090
DO浓度(mg/L)	8.960	8.850	8.270	8.540	10.080	10.370	8.950	9.105
氟化物浓度/(mg/L)	0.425	0.319	0.334	0.400	0.989	0.820	0.425	0.332
挥发酚浓度/(mg/L)	0.00030	0.00045	0.00050	0.00030	0.0005	0.0005	0.00030	0.00045
水质类别	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
综合污染指数	0.39	0.33	0.33	0.31	0.36	0.33	0.39	0.35

指标	监测断面				标准限值		
	S1	S2	S3	S4	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类
COD _{Cr} /(mg/L)	7.14	7.39	7.00	14.95	15.00	20.00	30.00
NH ₃ -N浓度/(mg/L)	0.218	0.480	0.311	0.377	0.500	1.000	1.500
BOD ₅ /(mg/L)	3.985	4.675	3.840	5.780	3.000	4.000	6.000
TP浓度/(mg/L)	0.090	0.095	0.065	0.075	0.100	0.200	0.300
DO浓度/(mg/L)	9.105	8.270	8.540	8.950	6.000	5.000	3.000
氟化物浓度/(mg/L)	0.332	0.334	0.400	0.425	1.000	1.000	1.500
挥发酚浓度/(mg/L)	0.00045	0.00050	0.00030	0.00030	0.002	5.000	0.010
水质类别	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ			
综合污染指数	0.43	0.50	0.43	0.57			

2.2 水质主成分分析

2.2.1 主成分确定

依据流域干流2014年地表水质数据,对监测断面S1~S4中DO、COD_{Cr}、COD_{Mn}、BOD₅、NH₃-N、TP6

项指标进行主成分分析。表2为主成分分析中各指标的相关系数矩阵;表3为特征值、主成分贡献率及累积贡献率;表4为主成分载荷矩阵。

特征值表示主成分对指标变量影响力度的大

表 2 相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix

指标	COD _{Cr}	COD _{Mn}	BOD ₅	NH ₃ -N	TP	DO
COD _{Cr}	1.000	0.997	0.790	-0.089	-0.798	-0.221
COD _{Mn}	0.997	1.000	0.747	-0.170	-0.843	-0.258
BOD ₅	0.790	0.747	1.000	0.456	-0.387	0.363
NH ₃ -N	-0.089	-0.170	0.456	1.000	0.641	0.556
TP	-0.798	-0.843	-0.387	0.641	1.000	0.330
DO	-0.221	-0.258	0.363	0.556	0.330	1.000

表 3 特征值、主成分贡献率及累积贡献率

Table 3 Eigen value, principal component contribution and cumulative

主成分	初始特征值		
	主成分贡献率	方差占比/%	累积贡献率/%
一	3.389	56.476	56.476
二	2.045	34.089	90.565
三	0.566	9.435	100.000
四	1.665×10^{-17}	2.776×10^{-15}	100.000
五	9.272×10^{-17}	1.545×10^{-15}	100.000
六	-2.776×10^{-16}	-4.626×10^{-15}	100.000

表 4 主成分荷载矩阵

Table 4 Principal component loading matrix

指标	主成分	
	一	二
COD _{Cr}	0.979	0.166
COD _{Mn}	0.992	0.094
BOD ₅	0.683	0.731
NH ₃ -N	-0.285	0.889
TP	-0.904	0.313
DO	-0.286	0.766

小,若特征值小于 1,则说明该主成分的解释力度不够^[14]。根据表 3 的结果,第一主成分的特征值为 3.389,第二主成分的特征值为 2.045,均大于 1,而从第三主成分开始,特征值均小于 1,这说明前 2 个主成分对解释原有变量的贡献最大,符合主成分挑选条件,第三主成分已经不能满足要求。由于第一和第二主成分已经包含了 6 个指标的全部信息,且这二者的累积贡献率已达 90.565%,其对水质变化的影响最大。因此,确定主成分个数为 2 个:第一主成分(PC1)在 COD_{Cr}、COD_{Mn}上有较大载荷,其载荷值分别为 0.979、0.992,可以表征有机物污染的程度;

第二主成分(PC2)主要在 NH₃-N、DO 与 BOD₅ 上有较大载荷,其载荷值分别为 0.889、0.766、0.731,表征污染类型为营养物以及耗氧型有机物污染。

2.2.2 不同水质指标的空间变化

根据各主成分在单因子上的载荷,确定各主成分综合函数,计算监测断面 S1~S4 的水质污染综合分值(表 5)。从水质空间变化分析,监测断面 S1~S4 水质污染程度呈恶化趋势:S1 水质污染程度较低,PC1 造成的污染略高于 PC2;S2 水质污染以 PC2 为主,PC2 污染分值达 2.488,为 4 个监测断面中最高;S3~S4 的 PC1 污染呈上升趋势并于 S4 达到最大,PC2 污染逐步趋于稳定(图 2)。

表 5 主成分和综合主成分分值

Table 5 Principal component score and comprehensive score

监测断面	PC1 分值	PC2 分值	综合分值	排名
S1	-1.945	-2.423	-2.125	4
S2	-2.795	2.488	-0.807	3
S3	-0.041	-0.527	-0.224	2
S4	4.781	0.463	3.156	1

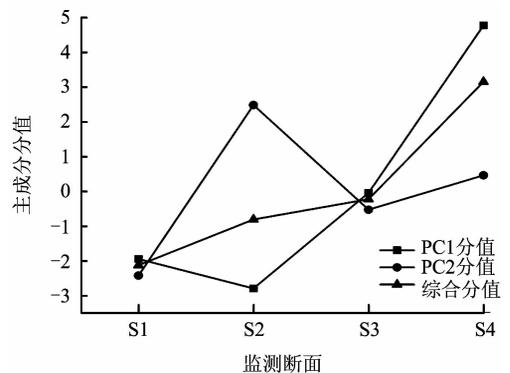


图 2 2014 年武烈河水质监测断面主成分分值变化
Fig. 2 Variation of principal component scores of monitoring sections in 2014

3 流域污染源分析

武烈河流域主要以 COD_{Cr} 、TN 和 TP 污染为主,污染主要来自生活、农业活动和工业等方面,主要污染源包括生活污水、工业废水、农业化肥和农药的投入以及畜禽养殖等。流域上游兴隆河、鸚鹄河、茅沟河、玉带河 4 条支流主要接纳流域农村污染,包含农田排水产生的面源污染、畜禽养殖产生的污染与农村生活污水污染。武烈河干流流经双峰寺镇后纵贯承德市城区,主要接纳城镇生活污水和工业废水。

流域内现有城镇污水处理厂 1 座,位于武烈河城区段下游,经污水管网收集接纳了近 80% 的城镇生活污水^[1]。2014 年,污水处理厂实际日处理量为 7.33 万 t,负荷率为 91%, COD_{Cr} 去除率基本在 90% 以上,TN、TP 去除率为 60% ~ 70%^[2]。监测断面 S2 ~ S4,耗氧型有机物与营养物呈下降并趋于稳定的现象与该污水厂的正常运行有直接关系。但目前城区污水管网仍存在覆盖不全面、部分管网老化等问题,造成城区生活污水未能全部收集。其中双峰寺镇至承德医学院和环城北路狮子沟桥以西区域污水管网尚未建设,污水直排入附近的河道,导致监测断面 S1 ~ S2 耗氧型有机物与营养物污染严重。根据武烈河流域污染源调查结果(图 3),流域城镇生活污水所排放的 COD_{Cr} 、TN 及 TP 为 1 337.9、336.4 及 25.8 t/a,分别占总排放量的 67.9%、87.2% 及 70.9%。流域农村污水处理设施不够完善,农村居民生活污水绝大部分就地排放到户外。考虑蒸发及地下渗入等损失,农村生活污水所排放的 COD_{Cr} 、TN 及 TP 达 221.9、28.4 及 5.8 t/a。

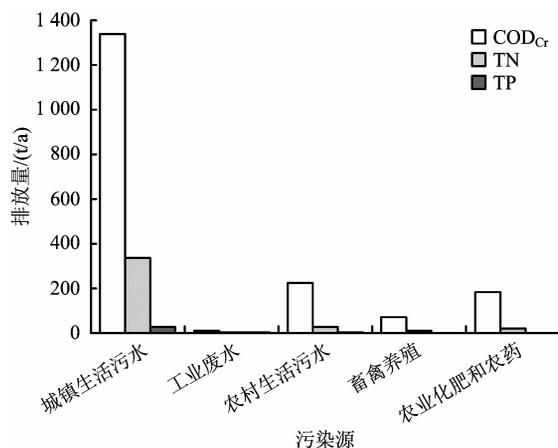


图 3 武烈河流域主要污染源污染物排放量

Fig. 3 Pollutant emission of Wulie River basin

流域内工业污染源也影响了各监测点水质质量。据调查,流域内有各类企业 116 家,涉及食品加工业、制药、采选冶炼、建材材料制造、装备制造、其他制造业、供热等其他服务行业等多种行业。涉及污水排放企业共有 7 家,其中制药厂 2 家,食品加工厂 3 家,酿酒厂和采选冶炼厂各 1 家,其 COD_{Cr} 、TN 和 TP 排放量分别达 9.88、4.88 和 2.74 t/a^[2]。这些企业主要位于旅游桥—雹神庙段的武烈河承德工业用水区,其排放的工业废水直接影响武烈河 S3 ~ S4 断面间的水质质量。农业化肥和农药的投入是流域面源污染的主要来源^[15]。由于农田用地对投入的化肥农药利用率很低,其余的化肥农药通过分解、挥发、渗漏、淋溶等途径将部分氮、磷和有毒有害物质汇入河流形成污染^[16]。通过研究区各乡镇 2014 年统计年鉴数据分析,2014 年武烈河流域内总耕地面积 1.974 万 hm^2 ,共施用氮肥 0.365 万 t(以 N 计),磷肥 0.357 万 t(以 P_2O_5 计),农药 55 t。根据《承德市第一次全国污染源普查技术报告》对种植业污染情况的普查结果:流域内 TN 随农田排水流失系数为 0.005;TP 随农田排水流失系数为 0.002。农田施用农药有效成分有机磷以 40% 计算,随农田排水流失系数取 0.002。据此推算,化肥和农药施入污染物排放量: COD_{Cr} 为 181.87 t/a;TN 为 18.27 t/a;TP 为 0.76 t/a。

农村畜禽养殖也是流域内 TN 和 TP 等污染的重要来源。流域内畜禽养殖主要以蛋鸡、肉鸡、猪、牛、羊为主。据统计,2014 年流域内共有规模化养殖场(小区)27 家,养殖专业户 166 家,蛋鸡 18.75 万只、肉鸡 59.84 万只、牛 5 283 头、猪 1.74 万头和羊 0.074 万只。畜禽污染物排放量: COD_{Cr} 为 70.17 t/a;TN 为 8.58 t/a;TP 为 1.09 t/a^[2]。流域内养殖业规模化程度不高,以专业户分散养殖为主,分散养殖虽然排污强度较小,但污染治理水平低,畜禽粪尿大部分未经无害化处理而直接随意排放。

4 结论

(1) 武烈河流域上游支流水质情况较好,为 II 类水,污染主要集中在武烈河干流段。其中上二道河子断面(S2)与雹神庙断面(S4)水质为 IV 类,低于 III 类水的水质目标,主要污染指标为 BOD_5 与 TP。

(2) COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 为第一主成分,主要反映有机物的污染,贡献率占 56.47%; $\text{NH}_3\text{-N}$ 、DO 与 BOD_5 为第二主成分,主要反映营养物以及耗氧型有机物污染,贡献率占 34.09%。

(3)流域污染主要来自生活、农业活动和工业等方面,主要污染源包括生活污水、工业废水、农业化肥和农药的投入及畜禽养殖等。建议流域完善城市污水管网系统,以控制生活污水污染;加强对工业废水排放监管;加快建设农村污水处理设施,控制农村生活污水污染以及畜禽养殖污染。

参考文献

- [1] 环境保护部环境规划院. 承德市武烈河流域水污染防治规划: 2012—2020[R]. 北京: 环境保护部环境规划院, 2014.
- [2] 承德市环境工程评估中心. 河北承德武烈河流域水污染控制与水质改善技术研究[R]. 承德: 承德市环境工程评估中心, 2015.
- [3] 白辉, 赵翠平, 陈岩, 等. 承德市武烈河水环境容量核算与减排效益评估研究[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(3): 31-34.
BAI H, ZHAO C P, CHEN Y, et al. Study on water environmental capacity calculation emission reduction benefit assessment of Wulie River in Chengde[J]. Environmental Pollution & Control, 2015, 37(3): 31-34.
- [4] 河北省水利水电勘察设计院. 武烈河承德市区段防洪及水环境整治工程第七道橡胶坝工程初步设计报告[R]. 石家庄: 河北省水利水电勘察设计院, 2007.
- [5] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [6] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [7] 高学民. 长江沿程河湖及城市内河水水质评价与模拟研究[D]. 北京: 北京大学, 2000.
- [8] HUANG H, LU J. Identification of river water pollution characteristics based on projection pursuit and factor analysis[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(9): 3409-3417.
- [9] 刘超, 成定北, 李寒松, 等. 标识污染功能指数的创建及在汉江水水质测评中的应用[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(1): 57-64.
LIU C, CHENG D B, LI H S, et al. Establishment of identification pollution function index and its application in water quality assessment of Hanjiang River [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(1): 57-64.
- [10] JI X L, DAHLGREN R, ZHANG M H. Comparison of seven water quality assessment methods for the characterization and management of highly impaired river systems [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188: 15.
- [11] 荆红卫, 张志刚, 郭婧. 北京北运河水系水质污染特征及污染源分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(2): 319-327.
JING H W, ZHANG Z G, GUO J. Water pollution characteristics and pollution sources of Bei Canal river system in Beijing [J]. China Environmental Science, 2013, 33(2): 319-327.
- [12] UDDAMERI V, HONNUNGAR V, HERNANDEZ E A. Assessment of groundwater water quality in central and southern Gulf Coast aquifer, TX using principal component analysis [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(6): 2653-2671.
- [13] MUANGTHONG S, SHRESTHA S. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: case study of the Nampong River and Songkhram River, Thailand [J/OL]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015(9): 187: 548. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10661-015-4774-1>.
- [14] 尹炜, 辛小康, 梁建奎, 等. 基于主成分分析的丹江口水库支流水质评价[J]. 水电能源科学, 2015, 33(1): 34-38.
YIN W, XIN X K, LIANG J K, et al. Evaluation of water quality for tributaries of danjiangkou reservoir with principal component analysis [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(1): 34-38.
- [15] SUN B, ZHANG L X, YANG L Z, et al. Agricultural non-point source pollution in China: causes and mitigation measures [J]. AMBIO, 2012, 41(4): 370-379.
- [16] 黄生斌, 叶芝菡, 刘宝元. 密云水库流域非点源污染研究概述[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1311-1316.
HUANG S B, YE Z H, LIU B Y. Review on non-point source pollution in Miyun Reservoir [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2008, 16(5): 1311-1316. ○