

基于主成分分析及水质标识指数法的 黄河托克托段水质评价

李国华, 李畅游, 史小红, 赵胜男, 全栋

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 分析黄河托克托河段水污染特征, 合理选择水质评价指标, 从而实现黄河托克托段水质评价。[方法] 以黄河托克托段干流 2017 年 4—8 月 9 个水质采样断面逐月连续水质监测数据为基础, 利用多元统计法对水质样本进行主成分因子分析, 构建水质评价指标体系, 应用综合水质指数法对该河段水质进行评价。[结果] ①黄河托克托段水质状况整体为Ⅳ类水, 该河段段主要污染因子为 TN, TP, COD, 属于有机型及富营养化污染; ②时空分布上从上游到下游水质逐渐变好, 支流汇入口大黑河断面由于受汛期大黑河超标污染物排入水质变差, 采样期间 8 月水质状况最差, 其次是 4 月, 5—7 月水质相对较好。[结论] 基于主成分因子分析和综合水质标识指数法的水质评价方法不仅可以准确客观地反映水质特征, 同时可对不同断面水质进行比较。黄河托克托段水质状况较差(整体Ⅳ类), 属于有机型及富营养化污染。

关键词: 水质评价; 主成分分析; 水质标识指数法; 黄河托克托段

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)06-0310-05

中图分类号: X824, X522

文献参数: 李国华, 李畅游, 史小红, 等. 基于主成分分析及水质标识指数法的黄河托克托段水质评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 310-314. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2018. 06. 047. Li Guohua, Li Changyou, Shi Xiaohong, et al. Evaluation of water quality of Tokto section in Yellow River based on principal component analysis and water quality identification index[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 310-314.

Evaluation of Water Quality of Tokto Section in Yellow River Based on Principal Component Analysis and Water Quality Identification Index

LI Guohua, LI Changyou, SHI Xiaohong, ZHAO Shengnan, QUAN Dong

(Water Conservancy and Civil Engineering College,

Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] Characteristics of water pollution in the Tokto section of the Yellow River and selection of water quality evaluation index is of great importance for assessing the the water quality in the Tokto section. [Methods] Based on the data of 9 sampling sections in the Tokto section from April to August in 2017, we comprehensively evaluated the water quality by establishing the evaluation index system using principal components analysis. [Results] ① The water quality in the Tokto section could be classified into class Ⅳ, and the main pollution factors are total nitrogen, total phosphors, chemical oxygen demand, belonging to organic type and eutrophication pollution. ② The water quality from upstream to downstream was becoming better The water quality of the Heihe River at the entrance of tributary became worse due to the excessive pollutant discharge into Heihe River during flood season. The water quality was the worst in August and April, and was better from May to July. [Conclusion] The water quality evaluation method based on the principal component analysis and the synthetic water quality index can not only accurately reflect the water quality, but also compare the water quality of different sections. The water quality in Tokto section of the Yellow River is poor(the whole class Ⅳ), which belongs to organic pollution and eutrophication.

收稿日期: 2018-02-07

修回日期: 2018-03-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“冻融过程中湖泊污染物多介质迁移转化规律及机制研究”(51339002), “冻融过程中污染物在湖泊冰水双介质迁移作用及机理研究”(51669022), “寒区湖泊沉积物中重金属赋存形态特征及机制研究”(51509133)

第一作者: 李国华(1992—), 女(汉族), 内蒙古自治区凉城县人, 硕士研究生, 研究方向为河湖水环境修复与保护。E-mail: lgh18247166909@163.com.

通讯作者: 李畅游(1955—), 男(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 教授, 主要从事水环境修复与保护研究。E-mail: nndlichangyou@163.com.

Keywords: water quality evaluation; principal component analysis; water quality index method; Tokto section of the Yellow Rive

黄河内蒙古段不仅承担着内蒙古自治区河套灌区、磴口扬水灌区和麻地壕灌区等引黄灌区的农业灌溉,同时是周边包头、呼和浩特市等城镇工业和生活用水的取水水源地,而且接纳了其支流及周边城市的生活和工业污水。呼和浩特市大型民生工程“引黄入呼”取水口位于托克托县黄河湿地蒲滩拐村,该河段水质的优劣直接着沿岸影响用水安全。诸多学者^[1-4]开展了黄河内蒙古段水质监测分析和评价工作。在河流水质评价方法中,应用较为典型的有单因子评价法^[5]、污染指数法^[6-7]、模糊数学评价法^[8-12]、灰色系统评价法^[13]、人工神经网络评价法^[14]、物元分析法^[15-16]、水质标识指数法^[17-19]等,其中污染指数法计算原理简单,但没有完善的统一分级标准;模糊数学评价法用隶属函数合理体现了水体污染程度不确定的特点;人工神经网络能够很好地表现评价因子和水质类别间复杂的非线性关系,但评价指标选择不确定,定性评价结果不直观。鉴于黄河内蒙古段的水质评价处于以单指标和多指标分析简单综合的阶段。因此有必要寻找全面准确和便捷的评价方法,了解黄河托克托段水环境质量和污染现状。本研究将主成分分析法与水质标识指数法相结合,基于 2017 年黄河托克托段 4—8 月逐月水质监测数据通过主成分分析选取水质主导因子构成评价指标体系,采用综合水质标识指数法分析黄河内蒙古托县段河流主要污染特征,以期在合理选择水质指标的基础上,实现对黄河托克托段水质的客观评价。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况及样品采集

黄河托克托段位于黄河上游二级阶地,河道弯多流缓,比降较小。属中温带大陆性干旱半干旱季风气候,年平均气温 4~8℃,降水量在 150~450 mm 之间,降水年际变化较大,年内分配不均,而年蒸发量 1 200~2 000 mm。该河段上游与重工业城市包头市衔接,下游与万家寨库区相连,黄河一级支流大黑河由此间汇入黄河干流,大黑河及其支流(哈拉沁沟、水磨沟和什拉乌素河)为季节性河流,非雨季是呼和浩特及周边工业、农业、生活污水的纳污河流。在研究河段上游到下游依次布设 9 个水质采样断面(头道拐、柳林滩、付家河头、大黑河、河口镇、巨河滩、黑圪涝湾、神泉、蒲滩拐),分别于 2017 年 4 月—8 月的中下旬逐月连续取样对水质进行监测分析,现场监测及实验室测定指标包括水温(T)、盐度(Sal)、pH 值、电

导率(EC)、溶解氧(DO)、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_3-N)、化学需氧量(COD)。其中总氮(TN)浓度采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定,总磷(TP)浓度采用钼酸铵分光光度法测定,化学需氧量(COD)采用重铬酸盐—硫酸亚铁铵滴定法测定,氨氮(NH_3-N)采用纳氏试剂比色法,其余指标均采用便携式多参数水质检测仪测定。

1.2 研究方法

1.2.1 水质评价指标体系建立 水环境系统是由多个水质因子共同作用的复杂系统,且不同的水质因子之间存在相关性,若对水质监测数据直接进行评价,会使评价结果反映出的水质信息出现一定程度的重叠和掩盖。因此,首先要通过主成分因子分析确定各水质变量对入选主成分的贡献率大小,保留主导水质因子,并以选取的主导因子作为综合水质标识指数法的评价指标,进而对黄河托克托段水质进行定量评价。

主成分分析广泛应用于水质评价指标的选取及水环境质量评价当中^[20-25]。该方法基于原始数据的正态分布,在保证原始数据信息丢失最少的前提下,运用数学方法,把具有相关性的多个变量变成少数的独立综合变量(主成分),达到特征提取的效果。利用 SPSS Statistic 主成分因子分析功能对水质的基本指标进行主因子提取,计算主因子对水环境质量污染的方差贡献率^[26-27]。表 1 给出了对 2017 年水质指标监测数据的平均值进行主成分因子分析后的结果,特征值大于 1 的主成分因子有 2 个,两者的累积贡献率达到 97.094%,其中,第 1 主成分表征氮磷营养盐指标和有机污染指标,第 2 主成分表征盐分指标。由于第 1 主成分是最重要的水质评价因子,包含的信息最多,且能够直接影响水质的好坏,因此选取第 1 主成分所在的旋转因子荷载矩阵中荷载值最大的 4 个指标作为本次研究的水质评价指标,分别为化学需氧量(COD)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH_3-N),对这 4 个水质指标进行水环境质量评价基本可以全面反映水质特征信息。

1.2.2 单因子水质标识指数法 单因子水质标识指数可以完整标识水质评价指标的类别、水质数据、功能区目标值等重要信息,既能定量地判别水体属于哪一类水质,又能定性地分析不同水质指标在属于同一类别水质中的优劣^[28]。单因子水质标识指数(P_i)由一位整数和小数点后 2~3 位有效数字组成,其形式为:

$$P_i = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (1)$$

$$X_2 = \frac{\rho_i - \rho_{ik下}}{\rho_{ik上} - \rho_{ik下}} \quad (2)$$

式中: X_1 ——第 i 项水质指标的水质类别; X_2 ——水质指标的监测数据在 X_1 类水质变化区间中所处的位置,即水质趋于 $X_1 + 1$ 类水质的程度,按四舍五入的原则计算确定; ρ_i ——第 i 项水质指标的实测浓度值; $\rho_{ik上}$ ——第 k 类水区间浓度的上限值; $\rho_{ik下}$ ——第 k 类水区间浓度的下限值,其中 $k = X_1$; X_3 ——水质类别与功能区设定类别的比较结果,反映水质评价指标的污染程度, X_3 ——1~2 位有效数字。

表 1 黄河托克托县段水质旋转因子荷载矩阵及其主因子贡献率

指标	主因子成分	
	1	2
pH 值	0.810	0.472
DO	0.486	-0.840
COD	0.998	0.014
NH ₃ -N	0.972	-0.178
TN	0.929	0.340
TP	0.998	0.014
盐度	0.109	0.994
EC	0.113	0.994
特征值	4.807	2.961
贡献率/%	60.084	37.01
累计贡献率/%	60.084	97.094

注:因子荷载值 > 0.7 表示显著相关,因子荷载值 > 0.5 表示中等相关,因子荷载值 > 0.3 为弱相关。

当水质类别介于 I—V 类水之间时,可直接根据水质监测数据和国家水质标准对比确定 X_1 。当水质指标监测值劣于或等于 V 类水标准上限值时, $X_1 \cdot X_2$ 的确定公式为:

$$X_1 \cdot X_2 = 6 + \frac{\rho_i - \rho_{i5上}}{\rho_{i5上}} \quad (3)$$

式中: $\rho_{i5上}$ ——第 i 项水质指标 V 类水标准浓度值的上限。从式中可以看出,当水质指标监测值正好等于 V 类水上限值时, $X_1 \cdot X_2$ 的数值为 6.0,当 $\rho_i > 6$ 时,说明水质处于劣 V 类水,数值越大,水质越差,污染越严重。

1.2.3 综合水质标识指数 综合水质标识指数 (I_{wq}) 是以单因子水质指标 P_i 为基础的河流水质综合分析评价指数^[29],其形式为:

$$I_{wq} = C_1 \cdot C_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (4)$$

$$C_1 \cdot C_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (5)$$

式中: $C_1 \cdot C_2$ ——综合水质标识指数的核心; C_1 ——河流综合水质的类别; C_2 ——综合水质在 C_1 类水质

变化区间内所处的位置; X_3 ——参与综合水质评价的水质指标中,劣于水环境功能区目标的单项指标个数; X_4 ——综合水质类别与水体功能区类别的比较结果,可作为判别水质类别是否劣于水环境功能区类别的依据; P_i —— n 个水质指标对应的单因子水质标识指数(即单因子水质标识指数中的 $X_1 \cdot X_2$)。

1.2.4 水质级别的判定 基于综合水质标识指数法的综合水质级别的判定标准详见表 2,通过 I_{wq} 值的整数位和小数点后第 1 位即 $C_1 \cdot C_2$,可判定综合水质级别, $C_1 \cdot C_2$ 数值越大,说明水质越差。

表 2 基于综合水质标识指数的综合水质级别判定

范围	综合水质级别
$1.0 \leq C_1 \cdot C_2 \leq 2.0$	I
$2.0 < C_1 \cdot C_2 \leq 3.0$	II
$3.0 < C_1 \cdot C_2 \leq 4.0$	III
$4.0 < C_1 \cdot C_2 \leq 5.0$	IV
$5.0 < C_1 \cdot C_2 \leq 6.0$	V
$6.0 < C_1 \cdot C_2 \leq 7.0$	劣 V 类不黑臭
$C_1 \cdot C_2 > 7.0$	劣 V 类黑臭

2 结果与分析

2.1 水质标识指数计算结果

根据 2017 年 4—8 月不同采样断面的水质监测数据,应用主成分分析法得到的水质评价指标计算单因子 (p_i) 综合水质标识指数 (I_{wq}) 结果详见表 3。

2.2 黄河托克托段干流主要污染物分析评价

黄河托克托段 2017 年畅流期 4—8 月水质采样求得的单因子水质标识指数平均值如图 1 所示。由图 1 可知,总氮的单因子水质标识指数最高,表明河段总氮的污染最为严重,其次是总磷(TP)、化学需氧量(COD),说明该河段属于有机型及富营养化污染。黄河托克托段属于集中饮用水地表水源地二级保护区,因此以《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》III 类要求作为黄河托克托段的目标水质。而整个监测河段总氮(TN)的单因子水质标识指数在 4.31~8.25 间,平均值为 5.766,劣于目标水质 2 个等级。45 次水质采样测定总氮(TN)的浓度值最高出现在 8 月份大黑河断面,高出《地表水环境质量标准》中 V 类标准上限(2 mg/L)约 10 倍。总磷(TP)的单因子水质标识指数范围介于 2.00~8.35,平均值为 5.44,劣于目标水质 2 个等级。化学需氧量(COD)的单因子水质标识指数范围介于 3.10~6.83,化学需氧量(COD)浓度均值 32.84 mg/L 已接近 V 类标准值的上限(40 mg/L),最高浓度值高出 III 类标准值近 7

倍。氨氮(NH₃-N)的水质标识指数范围 1.20~5.23,单因子水质标识指数 平均值为 2.55,符合水质目标要求。

表 3 黄河托克托县段单因子(P_i)及综合水质标识指数(I_{wq})评价结果

时间	断面	P_i				I_{wq}
		COD	TP	TN	NH ₃ -N	
201704	头道拐	6.13	6.73	6.13	1.70	5.232
	柳林滩	6.13	5.12	6.33	1.90	4.831
	付家河头	6.23	6.13	6.33	2.00	5.232
	大黑河	6.13	6.93	6.73	3.30	5.842
	河口镇	6.03	6.33	6.63	2.10	5.332
	巨河滩	4.31	5.32	6.63	2.40	4.731
	黑圪楞湾	6.03	3.80	6.83	2.50	4.831
	神泉	4.51	6.23	6.73	2.50	5.032
	蒲滩拐	4.52	5.23	6.84	2.50	4.832
201705	头道拐	5.12	6.43	4.31	2.00	4.531
	柳林滩	4.21	6.63	5.12	1.90	4.531
	付家河头	4.31	6.73	4.31	2.20	4.431
	大黑河	5.12	6.13	5.32	2.30	4.712
	河口镇	4.21	6.33	4.31	2.60	4.325
	巨河滩	3.20	6.43	4.21	2.50	4.131
	黑圪楞湾	3.20	6.63	5.12	2.20	4.331
	神泉	5.12	6.63	5.02	2.10	4.731
	蒲滩拐	3.11	5.13	5.13	2.20	3.931
201706	头道拐	6.23	6.33	6.03	2.80	5.332
	柳林滩	5.22	6.13	6.33	3.30	5.242
	付家河头	5.02	4.51	6.13	2.20	4.531
	大黑河	6.03	6.23	6.13	3.6	5.475
	河口镇	4.41	4.31	6.53	2.03	4.431
	巨河滩	6.13	3.40	6.03	2.40	4.531
	黑圪楞湾	4.11	2.00	6.33	2.30	3.720
	神泉	3.30	2.00	6.33	2.30	3.520
	蒲滩拐	3.11	2.90	6.34	2.30	3.620
201707	头道拐	6.33	5.12	4.31	2.50	4.631
	柳林滩	5.12	4.21	5.02	1.90	4.131
	付家河头	4.31	4.41	5.22	2.60	4.131
	大黑河	5.22	6.73	7.04	4.10	5.742
	河口镇	3.10	5.32	4.31	2.40	3.830
	巨河滩	4.21	4.31	5.02	2.50	4.031
	黑圪楞湾	4.31	4.11	5.02	3.10	4.141
	神泉	4.11	3.90	5.12	3.00	4.041
	蒲滩拐	4.32	3.91	4.22	3.10	3.941
201708	头道拐	3.10	6.03	6.23	2.40	4.431
	柳林滩	6.23	6.03	6.13	2.00	5.132
	付家河头	6.33	5.12	6.33	2.50	5.032
	大黑河	6.83	8.35	8.25	5.23	7.125
	河口	6.03	5.13	6.43	4.41	5.543
	巨河滩	6.03	6.43	6.13	2.80	5.333
	黑圪楞湾	5.22	6.43	5.22	2.80	4.931
	神泉	5.12	6.24	6.03	1.70	4.831
	蒲滩拐	5.13	6.24	5.23	1.20	4.432

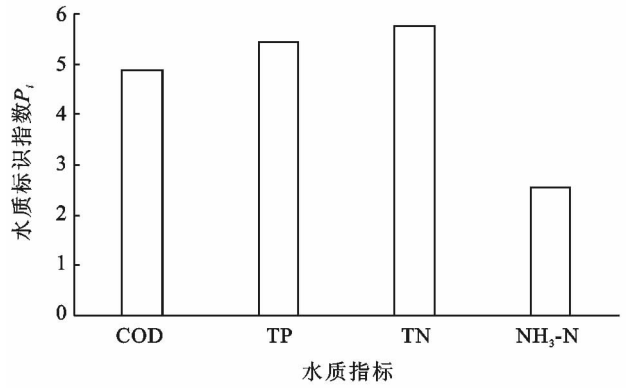


图 1 黄河托克托段水质指标单因子水质标识指数(P_i)平均值

2.3 水质状况时空分布特征

依据表 4 中 I_{wq} 值的分级标准,判别内蒙古托克托河段的水质类别。由表 4 可知,不同时间不同采样断面所有的水质级别中达到 III 目标水质的比例仅占 13%,水质整体处于 IV 类水,大黑河采样断面的综合水质标识指数 I_{wq} 值达到 5.74,属于劣 V 类水体。对同一采样时间不同断面的 I_{wq} 值取平均值,大小顺序依次为 8 月(5.19)>4 月(5.09)>6 月(4.49)>5 月(4.42)>7 月(4.29),说明托克托河段的水质总体上是 8 月的水质最差,4 月次之,5,6 和 7 月水质稍好。

表 4 黄河托克托县段综合水质级别

断面	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	平均
头道拐	V	IV	V	IV	IV	IV
柳林滩	IV	IV	V	IV	V	IV
付家河头	V	IV	IV	IV	V	IV
大黑河	V	IV	V	V	劣 V 类(黑臭)	V
河口	V	IV	IV	III	V	IV
巨河滩	IV	IV	IV	IV	V	IV
黑圪楞湾	IV	IV	III	IV	IV	IV
神泉	V	IV	III	IV	IV	IV
蒲滩拐	IV	III	III	III	IV	IV

从空间分布上看,水质最差的 8 月河段各断面水质级别 I_{wq} 值均在 4.4 以上,其中大黑河断面的综合水质标识指数达到 7.12,为劣 V 类(黑臭)如图 2 所示。野外采样观测大黑河断面的水体成黑色并伴有恶臭味,该计算结果与实际情况相吻合,水体呈黑色并伴有恶臭味。其原因为大黑河支流是黄河托克托河段干流唯一的季节性汇入河流,大黑河接纳的水体主要来源于降水地表径流、城区的工业和生活污水,进入 8 月份雨季后,携带污染物的雨污水经大黑河排入黄河干流,对下游蒲滩拐断面处“引黄入呼”取水口取用水产生影响。对采集水样进行水质指标测定分

析可知大黑河断面对该河段有机型及富营养化污染的主要贡献因子为 TN 和 COD。根据各水质断面 I_{wq} 值的平均值可知,河段各断面的污染程度从大到小依次为:大黑河、头道拐、柳林滩、付家河头、河口镇、巨合滩大桥、黑圪涝湾、神泉、蒲滩拐,下游的水质整体上好于上游段水质。从 4 月份值来看,河段各断面的综合水质标识指数介于 4.7~5.8,水质属于Ⅳ—Ⅴ类水。黄河干流 4 月上游来水量较少,河道流量小,加之水位温度低自净能力比较弱,水质较差。其他月份各断面的值,大黑河河口断面处的 I_{wq} 值均最大,该断面处的综合水质标识指数介于 4.5~7.1,属于Ⅳ—Ⅴ类水。以大黑河断面为界,下游水质受水体自净作用影响而逐渐变好,上游各断面水质基本上为Ⅳ—Ⅴ类水,下游各断面水质基本上为Ⅲ—Ⅳ类水。

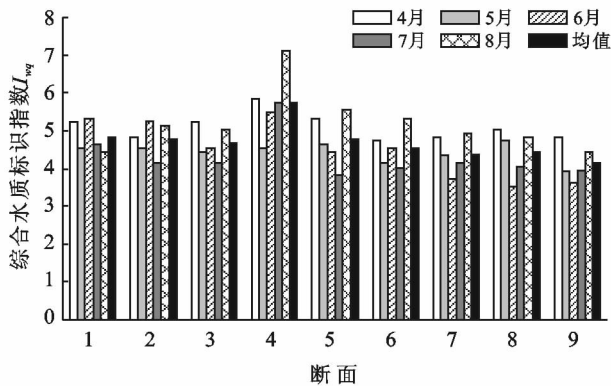


图 2 黄河托克托段沿程综合水质标识指数的比较

注:1 头道拐; 2 柳林滩; 3 付家河头; 4 大黑河;
5 河口; 6 巨河滩; 7 黑圪涝湾; 8 神泉; 9 蒲滩拐。

3 结论

(1) 黄河托克托段水质状况整体是Ⅳ类水,8月份水质最差,4月份次之,5—7月略好;水体的主要污染因子为 TN, TP, COD,说明黄河托克托段属于有机型及富营养化污染。

(2) 由于大黑河接纳了周边城镇工业和生活污水,导致该断面在各月份值最大,水质最差,达到劣五类水,其上、下游各断面水质好于该断面,为Ⅳ—Ⅴ类水。

(3) 基于主成分因子分析和综合水质标识指数法的水质评价方法可以筛选出主要的污染指标并建立评价体系,准确客观反映水质特征的同时可对不同断面水质进行比较。

[参 考 文 献]

[1] 叶振维,路达,白妙馨. 内蒙古黄河流域水污染形势分析[J]. 环境与发展,2014,26(4):100-103.

[2] 李秉荣,张德英,董锦兰,等. 黄河包头段主要污染物混合扩散模型研究[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(6):186-192.

[3] 王俊,吕忠义,安晓萍,等. 黄河内蒙古段水质动态变化分析[J]. 人民黄河,2009,31(12):73-74.

[4] 王哲,戴宝成. 黄河内蒙古包头段水体氨氮污染状况分析[J]. 安徽农业科学,2011,39(13):8044-8045.

[5] 朱灵峰,王燕,王阳阳,等. 基于单因子指数法的海浪河水水质评价[J]. 江苏农业科学,2012,40(3):326-327.

[6] 刘征,刘洋. 水污染指数评价方法与应用分析[J]. 南水北调与水利科技,2005,3(4):35-37.

[7] 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.

[8] 田野,李畅游,赵胜男,等. 基于模糊数学的黄河内蒙古段水环境质量评价[J]. 水土保持通报,2016,36(5):162-166.

[9] 黄海英,王冬梅. 模糊数学在水质评价中的应用[J]. 环境科学与管理,2010,35(8):173-175.

[10] 赵有益,刘彤彤. 黄河兰州段水质模糊综合评价[J]. 人民黄河,2010,32(6):48-49.

[11] 李海华,邢静,孙杨帅,等. 基于组合赋权模糊综合评价的黄河干流水源地水质评价[J]. 水生态学杂志,2015,36(5):44-50.

[12] 吴运敏,陈求稳,李静. 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,2011,31(6):1198-1205.

[13] 程万里,李亦芳,郝伏勤,等. GM(1,1)模型群在黄河水质预测中的应用研究[J]. 工业安全与环保,2007,33(11):33-35.

[14] 陈丽华,常沁春,陈兴国,等. BP 网络应用于黄河水质的预测研究[J]. 兰州大学学报:自科版,2003,39(2):53-56.

[15] 樊引琴,刘婷婷,李姘,等. 物元分析法在黄河水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):166-169.

[16] 何敏,张建强. 基于物元分析法的河流水环境质量评价[J]. 环境科学与管理,2013,38(3):172-175.

[17] 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[J]. 环境科学与技术,2015(11):239-245.

[18] 李国锋,刘宪斌,刘占广,等. 基于主成分分析和水质标识指数的天津地区主要河流水质评价[J]. 生态与农村环境学报,2011,27(4):27-31.

[19] 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水质评价研究[J]. 环境科学学报,2014,34(2):473-480.

[20] Ouyang Ying. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis [J]. Water Research, 2005,39(12):2621-2635.

- [15] 王鹏,况福民,邓育武,等.基于主成分分析的衡阳市土地生态安全评价[J].经济地理,2015,35(1):168-172.
- [16] 吕添贵,吴次芳,李冠,等.基于生态足迹的港口型城镇土地生态安全研究:以宁波市镇海区为例[J].水土保持通报,2014,34(6):250-255.
- [17] 徐美,朱翔,刘春腊.基于 RBF 的湖南省土地生态安全动态预警[J].地理学报,2012,67(10):1411-1422.
- [18] 侯洪升.山东省农用地数量变化及生态安全评价[J].中国农业资源与区划,2018,39(2):183-188.
- [19] 马轩凯,高敏华.西北干旱地区绿洲城市土地生态安全动态评价:以新疆库尔勒市为例[J].干旱区地理,2017,40(1):172-180.
- [20] 李洁,赵锐锋,梁丹,等.兰州市城市土地生态安全评价与时空动态研究[J].地域研究与开发,2018,37(2):151-157.
- [21] 于海洋,张飞,曹雷,等.基于乡镇尺度的土地生态安全时空格局评价研究:以博尔塔拉蒙古自治州为例[J].生态学报,2017,37(19):6355-6369.
- [22] 刘明远,张合兵,孙江锋,等.典型区域土地生态状况精细评估[J].中国农学通报,2014,30(33):206-211.
- [23] 刘志有,蒲春玲,闫志明,等.基于生态文明视角新疆绿洲土地生态安全影响因素及管控机制研究:以塔城市为例[J].中国农业资源与区划,2018,39(3):155-160.
- [24] 马世五,谢德体,张孝成,等.三峡库区生态敏感区土地生态安全预警测度与时空演变:以重庆市万州区为例[J].生态学报,2017,37(24):8227-8240.
- [25] 于淑会,周向莉,卿冀川,等.河北滨海盐碱土地生态安全评价[J].中国生态农业学报,2017,25(5):778-786.
- [26] 张茹,戴文婷,刘兆顺,等.我国北方农牧交错区土地生态安全评价:以白城市为例[J].水土保持研究,2017,24(2):259-266.
- [27] 高凤杰,侯大伟,马泉来,等.退耕还林背景下寒地山区土地生态安全演变研究[J].干旱区地理,2016,39(4):800-808.
- [28] 荣联伟,师学义,高奇,等.黄土高原山丘区土地生态安全动态评价及预测[J].水土保持研究,2015,22(3):210-216.
- [29] 王鹏,王亚娟,刘小鹏,等.基于 PSR 模型的青铜峡市土地生态安全评价与预测[J].水土保持通报,2018,38(2):148-153.
- [30] 孙奇奇,宋戈,齐美玲.基于主成分分析的哈尔滨市土地生态安全评价[J].水土保持研究,2012,19(1):234-238.

(上接第 314 页)

- [21] Bengraïne K, Marhaba T F. Using principal component analysis to monitor spatial and temporal changes in water quality[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003,100(1/2/3):179-195.
- [22] 吉祝美,方里,张俊,等.主成分分析法在 SPSS 软件中的操作及在河流水质评价中的应用[J].环境研究与监测,2012,18(4):68-73.
- [23] 伊元荣,海米提·依米提,王涛,等.主成分分析法在城市河流水质评价中的应用[J].干旱区研究,2008,25(4):497-501.
- [24] 吕欣格,田剑南,王超,等.基于主成分分析法的黄河呼和浩特段水环境质量评价[J].环境与发展,2016,28(5):15-20.
- [25] 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.
- [26] 李小红,陈珍珍.如何正确应用 SPSS 软件做主成分分析[J].统计研究,2010,27(8):105-108.
- [27] 杨学福,王蕾,关建玲,等.基于多元统计分析的渭河西咸段水质评价[J].环境工程学报,2016,10(3):1560-1565.
- [28] 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.
- [29] 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.