

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2019.0118

吕翠美,刘苗苗,李会勤,等.郑州市城区及郊区地下水主要污染组分及成因[J].南水北调与水利科技,2019,17(5):124-130.  
LYU C M, LIU M M, LI H Q, et al. Analysis of pollutant compositions and pollution sources of groundwater in urban area and suburbs of Zhengzhou[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 124-130. (in Chinese)

# 郑州市城区及郊区地下水主要污染组分及成因

吕翠美<sup>1</sup>,刘苗苗<sup>1</sup>,李会勤<sup>1</sup>,顾长宽<sup>2</sup>,李洋<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450001; 2. 河南省开封水文水资源勘测局, 河南 开封 475000)

**摘要:**明确不同地区地下水污染的组分和成因,可为针对性的制定地下水资源管理制度、改善水质提供保障。由于城区和郊区经济发展水平和地下水资源开发利用模式差别较大,水污染程度和污染组分可能存在较大差异。以郑州市的金水区 and 巩义为例,运用主成分分析法对两者地下水污染状况进行评价。结果表明:巩义市地下水主要污染组分以硝酸盐等有机污染物为主,金水区以硫酸盐、氨氮等有机污染物为主。造成这种现象的主要原因是巩义市工矿企业、农田较多,金水区农田、工矿企业较少而生活污水排放比重较大。根据两个地区不同的地下水污染状况和成因,就地下水资源保护和管理提出针对性的建议。

**关键词:**地下水;水质评价;城区县市;主成分分析法;水污染

中图分类号:X824 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Analysis of pollutant compositions and pollution sources of groundwater in urban area and suburbs of Zhengzhou

LYU Cuimei<sup>1</sup>, LIU Miaomiao<sup>1</sup>, LI Huiqin<sup>1</sup>, GU Changkuan<sup>2</sup>, LI Yang<sup>2</sup>

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Kaifeng Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Kaifeng 475000, China)

**Abstract:** Clarification of pollutant compositions and pollution sources of groundwater in different areas can provide solid foundation for formulating specific groundwater resources management system and improving water quality. Because of significant differences in economic development level and groundwater resources development/utilization pattern, degree of water pollution and pollution compositions may vary greatly between urban areas and suburbs. Taking Jinshui District and Gongyi County of Zhengzhou for case study, the status of groundwater pollution in two regions is evaluated by applying principal component analysis. The results show that nitrate is the dominant pollutant in Gongyi, while sulfate and ammonia nitrogen are the dominant pollutants in Jinshui, resulting from more discharges from industrial and mining enterprises and farmlands in Gongyi, and more domestic sewages in Jinshui. In view of the different groundwater pollution statuses and sources in two regions, specific suggestions on protection and management of the groundwater resources are put forward.

**Key words:** groundwater; water quality evaluation; urban area; suburb; principal component analysis; water pollution

收稿日期:2019-01-26 修回日期:2019-05-30 网络出版时间:2019-06-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190606.1614.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(51609216)

作者简介:吕翠美(1982—),女,山东莱芜人,副教授,博士,主要从事水文与水资源方面研究。E-mail:lvcuimei305@163.com

通信作者:刘苗苗(1996—),女,河南周口人,主要从事水文与水资源方面研究。E-mail:2857321299@qq.com

地下水是我国重要的供水资源,是支撑我国经济社会发展的重要战略资源<sup>[1-2]</sup>。但由于人类对地下水的过度开采、化肥农药的过度使用、城市化的加速发展以及生活生产中的用水需求日益增大,地下水水质也日益恶化<sup>[3-4]</sup>。开展地下水水质评价并进行污染组分分析,可为地下水资源的合理开发利用和管理提供科学依据<sup>[5]</sup>。郑州市作为人口超过 500 万的特大城市,地下水污染严重,且城区和县市的地下水主要污染组分存在着较大差别。但以往的研究都是把郑州市作为一个整体进行水质评价和污染成因分析<sup>[6]</sup>,忽略了不同发展模式下水污染组分和成因的不同,无法精准的进行水污染的预防和治理。因此,本文以郑州市金水区和巩义市为例,对两地分别进行地下水水质评价并对主要污染成分进行分析对比,最后根据分析结果对两地分别提出了针对性的建议。

## 1 研究区概况

郑州市位于东经 112°42′~114°13′,北纬 34°16′~34°58′,地处黄河下游,西傍嵩山,北望黄河。郑州整体地势西南高东北低,属温带大陆性季风气候,年平均降雨量 640.9 mm<sup>[7]</sup>。松散岩类孔隙含水层系统是郑州市最主要的、分布范围最广泛的含水层系统<sup>[8]</sup>。郑州是中国中部地区的特大型都会和主要经济中心之一,中原经济区的中心城市,下辖 6 个市辖区、5 个县级市和 1 个县。

金水区是河南全省面积最大、人口最多、经济最发达的城区。全区属于由黄河冲积平原形成平原洼地,境内流经 7 条河流,除黄河堤内区域外,均属于淮河流域。巩义市为“郑州-巩义-洛阳工业走廊”核心城市之一,1992 年以来综合经济实力连续 22 年位居河南省县域首位。其矿产资源丰富,有煤、铝土矿、耐火黏土、硅石等,耕地面积大,粮食产量常年维持在 15 万 t 左右。巩义横跨黄河、淮河两大流域以及伊洛河、汜水河、颍河 3 个水系,大部分地区属于黄河流域<sup>[9]</sup>,因常年降水量偏少且分布不均,水资源短缺严重。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

本文采用郑州市 2001—2016 年 16 年地下水监测数据的平均值作为原始数据,根据监测井分布尽可能均匀的原则,选取监测井个数分别为:巩义市 6 个,金水区 9 个。本次评价共采用酸碱度、总硬度、溶解性总固体等 11 项指标,根据两地区监测数据的

不同,在指标的选取上有微小差异。巩义市氰化物都符合 II 类标准而且各监测井测得平均值全部相同,不做采用,但耗氧量明显高于金水区,可能对结果影响较大因此采用。金水区耗氧量各监测井测得平均值全部相同且符合 I 类标准,采用氰化物指标代替。

### 2.2 评价方法

在水质评价中,选取科学合理的评价方法是关键。目前,国内外进行地下水水质评价的常用方法主要有综合指数法<sup>[10-11]</sup>、模糊综合评价法<sup>[12-14]</sup>、人工神经网络评价法<sup>[15]</sup>和灰色系统理论法<sup>[16-18]</sup>等。每种方法都有各自的优点,但都存在着评价指标筛选的主观性和部分重要信息丢失或弱化等问题<sup>[19]</sup>。而主成分分析法<sup>[20-22]</sup>充分考虑各指标之间的信息重叠,能够最大限度地保留原有信息的基础上,对高维变量进行最佳的综合降维,且更客观地确定各个指标的权重,避免了主观随意性。主成分分析法的水质评价步骤如下:

假定有  $n$  组地下水水质测量结果,每次测得  $p$  个水样指标,那么原始数据即为  $n \times p$  阶矩阵

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}$$

式中: $x_{np}$ 表示第  $n$  组第  $p$  个指标的检测数据。

(1) 标准化处理。为了消除不同指标间的量纲差异,需要先对原始数据进行标准化处理,标准化公式为

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p) \quad (1)$$

式中: $x_{ij}$ 表示第  $i$  行第  $j$  列的数; $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$ ;  $S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$ 。

(2) 求相关系数矩阵。计算标准化数据的相关系数矩阵  $\mathbf{R} = (r_{jk})$ 。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $r_{jk}$  ( $j, k=1, 2, \dots, p$ ) 是标准化后  $x_j$  与  $x_k$  的相关系数,  $r_{jk} = r_{kj}$ , 计算公式可表示为

$$r_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n x'_{ij} x'_{ik}}{n-1} \quad (3)$$

(3) 确定主成分的个数。对相关系数矩阵  $\mathbf{R}$  的

特征方程求解,得到  $p$  个特征值并按大小排序( $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$ ),根据贡献率  $\sum_{j=1}^m \lambda_j / \sum_{j=1}^p \lambda_j \geq 0.80$  确定  $m$  值, $m$  值即为主成分个数。

(4)计算主成分的表达式。求出每个特征值对应的单位特征向量,  $u_a = u_{a1}, u_{a2}, \dots, u_{ap}$  ( $a = 1, 2, \dots, m$ ),将标准化数据转化为主成分得:

$$F_a = u_{a1}X_1 + u_{a2}X_2 + \dots + u_{ap}X_p \quad (4)$$

(5)确定综合评价函数。将各组成成分标准化后的数据代入主成分计算公式  $a_j = \lambda_j / \sum_{j=1}^m \lambda_j$ ,并作为权重求出综合评价函数  $F$ 。

$$F = a_1F_1 + a_2F_2 + \dots + a_mF_m \quad (5)$$

$F$  值的大小为水质综合得分情况, $F$  值越大,得

分越高,说明地下水水质污染越严重;反之,水质越好。

### 3 结果与分析

#### 3.1 标准化处理和相关系数矩阵

本文选取的 11 个指标中,由于不同指标间量纲存在差异,需要先进行标准化处理并得到相关系数矩阵。利用 SPSS 软件,对巩义市和金水区的 11 个指标进行标准化处理后根据式(2)、(3)得出巩义市和金水区的相关系数矩阵见表 1、2。

由相关系数矩阵可以看到两个地区的大部分相关系数绝对值都在 0.3 以上,甚至有部分数据高达 0.9,说明了不同指标间存在较大的相关性,也验证了采用主成分分析法的正确性和必要性。

表 1 巩义市水质指标相关系数矩阵

Tab. 1 Correlation coefficient matrix of water quality indexes in Gongyi

项目	pH $X_1$	总硬度 $X_2$	TDS $X_3$	硫酸盐 $X_4$	氯化物 $X_5$	铁 $X_6$	锰 $X_7$	耗氧量 $X_8$	氨氮 $X_9$	硝酸盐 $X_{10}$	氟化物 $X_{11}$
$X_1$	1	-0.582	-0.579	-0.043	-0.729	0.451	-0.546	0.438	0.435	-0.642	0.562
$X_2$		1	0.987	0.5	0.826	-0.109	0.393	0.019	-0.833	0.653	-0.812
$X_3$			1	0.5	0.819	-0.202	0.333	-0.029	-0.743	0.687	-0.719
$X_4$				1	0	0.301	0.002	0.738	-0.426	-0.274	-0.346
$X_5$					1	-0.204	0.273	-0.349	-0.589	0.897	-0.767
$X_6$						1	-0.505	0.828	-0.062	-0.546	-0.305
$X_7$							1	-0.42	-0.665	0.328	-0.336
$X_8$								1	-0.109	-0.682	-0.186
$X_9$									1	-0.385	0.846
$X_{10}$										1	-0.441
$X_{11}$											1

表 2 金水区水质指标相关系数矩阵

Tab. 2 Correlation coefficient matrix of water quality indexes in Jinshui District

项目	pH $X_1$	总硬度 $X_2$	TDS $X_3$	硫酸盐 $X_4$	氯化物 $X_5$	铁 $X_6$	锰 $X_7$	氨氮 $X_8$	硝酸盐 $X_9$	氟化物 $X_{10}$	氯化物 $X_{11}$
$X_1$	1	-0.42	-0.243	-0.375	-0.026	-0.549	-0.405	-0.558	0.49	0.377	-0.325
$X_2$		1	0.95	0.791	0.834	0.406	0.939	0.656	-0.801	-0.566	0.275
$X_3$			1	0.869	0.941	0.439	0.902	0.558	-0.609	-0.544	0.282
$X_4$				1	0.746	0.582	0.764	0.559	-0.37	-0.585	0.098
$X_5$					1	0.288	0.803	0.31	-0.461	-0.466	0.345
$X_6$						1	0.216	0.677	-0.192	-0.341	0.57
$X_7$							1	0.547	-0.697	-0.51	0.172
$X_8$								1	-0.639	-0.58	0.379
$X_9$									1	0.594	-0.196
$X_{10}$										1	-0.179
$X_{11}$											1

#### 3.2 提取主成分

根据相关系数矩阵求出主成分的特征值、累积贡献率(见表 3),由表 3 知,巩义市前 3 个主成分特征值都大于 1,累积贡献率超过 80%,因此提取 3 个

主成分即可代表研究区全部水质信息;金水区前 3 个主成分特征值大于 1,累积贡献率超过 80%,提取前 3 个主成分作为代表。

从方差贡献率看,巩义第一主成分方差贡献率

表3 特征值与累积贡献率  
Tab.3 Eigenvalue and cumulative contribution rate

巩义市			金水区	
主成分	特征值	累积贡献率/%	特征值	累积贡献率/%
1	5.64	51.24	6.34	57.59
2	3.04	78.90	1.68	72.84
3	1.10	88.88	1.09	82.71
4	0.78	95.99	0.77	89.69
5	0.44	100.00	0.57	94.89
6	3.35E-16	100.00	0.39	98.41
7	1.94E-16	100.00	0.17	99.91
8	9.13E-17	100.00	0.01	100.00
9	-2.74E-17	100.00	3.20E-16	100.00
10	-9.80E-17	100.00	7.80E-17	100.00
11	-3.07E-16	100.00	-1.28E-16	100.00

为51.24%，第二、第三主成分方差贡献率分别为27.662%、9.98%，三个主成分累积贡献率达到88.852%，因此基本包含11个指标的所有信息。同样可得到金水区三个主成分的方差贡献率分别为57.59%、15.246%、9.874%。

### 3.3 计算主成分的表达式

由SPSS软件得到主成分荷载矩阵(表4)即3个主成分中每个指标所对应的系数。

通过对巩义主成分荷载矩阵的分析,与第一主成分密切相关的有总硬度、TDS、氯化物、和硝酸盐,其数值较为平均,说明该地区有机污染比较严重。硫酸盐和耗氧量在第二主成分上的载荷较高,则表明水中的有机污染物主要是耗氧型。锰和铁在第三主成分载荷中占比较大,反映了该地区地下水的金属

表4 主成分载荷矩阵  
Tab.4 Load matrix of principal components

巩义				金水			
监测指标	第一主成分	第二主成分	第三主成分	监测指标	第一主成分	第二主成分	第三主成分
酸碱度	-0.33	0.15	0.06	酸碱度	-0.211	0.464	0.34
总硬度	0.393	0.169	0.041	总硬度	0.381	0.155	-0.049
TDS	0.384	0.131	0.073	TDS	0.369	0.235	0.187
硫酸盐	0.096	0.46	-0.277	硫酸盐	0.337	0.113	0.152
氯化物	0.383	-0.052	0.384	氯化物	0.316	0.341	0.364
铁	-0.129	0.46	0.301	铁	0.233	-0.49	0.343
锰	0.244	-0.15	-0.687	锰	0.352	0.25	-0.1
耗氧量	-0.119	0.548	-0.014	氨氮	0.304	-0.324	-0.17
氨氮	-0.341	-0.216	0.28	硝酸盐	-0.297	-0.015	0.477
硝酸盐	0.337	-0.268	0.324	氟化物	-0.277	0.037	0.265
氟化物	-0.337	-0.256	-0.139	氰化物	0.157	-0.408	0.49

离子对结果影响较大。而金水区,与第一主成分密切相关的有总硬度、TDS、硫酸盐、锰和氯化物,与巩义市污染源类型有所不同,但有机物仍是主要污染源。与第二主成分密切相关的是酸碱度、铁和氰化物,可以得到金水区铁锰金属离子水平比巩义市略高。硝酸盐和氰化物在第三主成分中占比较大,进一步证明了水体受到有机污染物污染。

### 3.4 水质综合评价结果

根据主成分计算公式(4)和综合评价函数(5)得到每个监测井的各个主成分得分和综合得分及其排序,结果如表5所示。采用GB/T14848—2017《地下水质量标准》<sup>[23]</sup>,将相同指标的各个水质等级标准值同样按主成分分析法步骤计算得出各水质等级的综合得分判别标准,从而确定各监测井水质等级情况。

### 3.5 对比分析

由表4主成分载荷矩阵可知,巩义市的耗氧量指标在第二主成分中高达54.8%,第二主成分的贡献率为27.66%,说明耗氧量是巩义市地下水水质的重要影响因子之一,这个指标在金水区较低而并未采用。耗氧量反映水受到有机污染的程度,表明巩义市的有机污染程度更重。

巩义市监测井中S3断面水污染最为严重,经调查该地区位于伊洛河东一化工厂附近,化工厂沿河而建,因此周边地下水遭到化工污染,而S4断面远离化工厂区,水质就相对较好。

巩义市水质比金水区稍差,主要原因有以下几个方面:(1)巩义市作为“郑州-巩义-洛阳工业走廊”核心城市之一,工业产值比重较大,随之而来的化工污染愈加严重,破坏了地下水的平衡,而金水区作为

表 5 水质综合评价结果

Tab. 5 Integrated evaluation results of water quality

巩义市							金水区						
监测断面	第一主成分得分	第二主成分得分	第三主成分得分	综合得分	排名	等级	监测断面	第一主成分得分	第二主成分得分	第三主成分得分	综合得分	排名	等级
S <sub>1</sub>	1.764	-1.228	-1.423	0.473	4	IV	S <sub>1</sub>	-1.730	0.649	-0.733	-1.172	7	III
S <sub>2</sub>	2.077	-0.501	0.152	1.058	2	IV	S <sub>2</sub>	1.375	-1.951	-0.310	0.561	5	IV
S <sub>3</sub>	1.878	-0.499	1.504	1.097	1	IV	S <sub>3</sub>	2.626	-0.976	1.694	1.850	2	IV
S <sub>4</sub>	-3.809	-1.985	-0.063	-2.819	6	I	S <sub>4</sub>	-3.077	-0.631	-0.839	-2.360	8	II
S <sub>5</sub>	-1.628	1.657	0.677	-0.346	5	III	S <sub>5</sub>	1.371	-0.206	-0.002	0.918	4	IV
S <sub>6</sub>	-0.282	2.556	-0.847	0.537	3	IV	S <sub>6</sub>	-0.305	-0.267	-1.167	-0.400	6	III
							S <sub>7</sub>	0.870	2.682	0.446	1.155	3	IV
							S <sub>8</sub>	-4.173	-0.019	1.580	-2.726	9	I
							S <sub>9</sub>	3.043	0.720	-0.671	2.175	1	IV

郑州中心城区,经济发展以服务业为主,主要污染源是生活垃圾等;(2)巩义市矿产资源丰富,但遭到了不合理的开采,TDS含量较高的矿坑水入渗影响地下水水质<sup>[24]</sup>,原本纯净的地下水硬度增大;(3)农业在巩义市国民生产中占据重要地位<sup>[25]</sup>,农药、化肥等的广泛使用增加了地下水中硝酸盐等有机物的含量,污染地下水水质,而金水区属于城区范围,农业对地下水水质的影响较小;(4)生活污水、工业废水、农田水径流等都会造成水中耗氧量增加,发达的化工业,大量的耕地是巩义市地下水中耗氧量明显大于金水区的直接原因;(5)郑州作为省会城市,经济发展的同时环境问题也备受重视,治理整改力度也较大,相对而言周边郊县市的环境治理较为粗放,环境资源保护意识不高,没有摆在合理位置。

值得注意的是,两地区指标中金水区锰的含量相对巩义市较高,在第一主成分中达 35.2%,第二主成分达 25%,原因与淮河流域原生沉积环境中铁锰组分有关<sup>[26]</sup>。

#### 4 结论与建议

(1)本文运用主成分分析法分别对郑州市金水区和巩义市两地进行水质评价,确定了两地水质基本状况和主要污染物。结果显示,巩义市整体水质情况不如金水区,主要表现为巩义市Ⅳ类水比重较大,巩义市 6 个监测井中共有 4 个Ⅳ类水,相比金水区的 9 个监测井 5 个Ⅳ类水。金水区较于巩义市略好,但仍以Ⅳ类为主,应针对两地区水质状况,进行调整改善。

(2)对于巩义市,首先,采取措施控制工矿业发展对地下水的污染,如禁止私自采矿、严格制约合理采矿人员的行为、严格监督工矿企业排污情况,禁止

超标废水排放,加快企业废水处理建设;其次,加快第三产业如旅游业、服务业的发展速度,减少经济发展对工矿业的依赖;再者,改进农业施肥方式并充分利用科技发展来减少化肥农药的使用;最后,提高县市水资源保护意识,在发展经济的同时保证水资源的可持续利用。

(3)对于金水区,主要污染物来自生活垃圾,因此要重视垃圾的回收处理、提高群众环保意识;定期治理河道,重视绿化环保工作。

#### 参考文献(References):

- [1] 孙从建,陈若霞,张子宇,等.山西浅层地下水水化学特性时空变化特征分析[J].干旱区地理,2018,41(2):314-324.(SUN C J, CHEN R X, ZHANG Z Y, et al. Spatial and temporal variations of hydrochemical characteristics of shallow groundwater in Shanxi[J]. Arid Land Geography, 2018, 41 (2): 314-324. (in Chinese)) DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2018.02.012.
- [2] 胡云虎,张付海,钮志远,等.皖北地区集中式深层地下水饮用水源地水化学特征及水质评价[J].中国科学技术大学学报,2014,44(11):913-920,925.(HU Y H, ZHANG F H, NIU Z Y, et al. Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of centralized deep groundwater drinking water sources in northern Anhui [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44 (11): 913-920, 925. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.11.005.
- [3] 刘惊.地下水的合理利用与开发[J].中国煤炭地质,2018,30(S2):48-49.(LIU L. Rational utilization and development of groundwater [J]. Coal Geology of China, 2018, 30 (S2): 48-49. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-1803.2018.S2.13.
- [4] 张智雄,许模,张强,等.绵阳红层地区浅层地下水水化

- 学特征、成因及水质分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3):168-173. (ZHANG Z X, XU M, ZHANG Q, et al. Hydrochemical characteristics, causes and water quality analysis of shallow groundwater in Mianyang red bed area[J]. Science technology and engineering, 2018, 18 (3):168-173. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2018.03.025.
- [5] XING L N, GUO H M, ZHAN Y H, Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 70-71: 250-264. DOI: 10.1016/j.jseaes.2013.03.017.
- [6] 蒋辉, 孙芳, 张秀艳. 郑州地区劣质地下水的形成与防治[J]. 工程勘察, 2010, 38(9):39-44. (JIANG H, SUN F, ZHANG X Y. Formation and prevention of inferior groundwater in Zhengzhou area [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38 (9): 39-44. (in Chinese))
- [7] 朱晓强, 王强恒. 郑州市地质环境适宜性评价及功能区划[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(2): 86-90. (ZHU X Q, WANG Q H. Geological environmental suitability evaluation and functional regionalization of Zhengzhou [J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20 (2):86-90. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-1556.2013.02.018.
- [8] 陈婷, 危超, 储小东, 等. 郑州城区地下水水位动态特征研究[J]. 科技视界, 2014(9):302-304. (CHEN T, WEI C, CHU X D, et al. Study on dynamic characteristics of groundwater level in Zhengzhou urban area[J]. Science & Technology vision, 2014 (9):302-304. (in Chinese)) DOI:10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2014.09.252.
- [9] 张丽, 温斯钧, 田晓龙. 巩义市城区地下水水质评价分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(5):68-71. (ZHANG L, WEN S J, TIAN X L, Gongyi City groundwater quality evaluation and analysis[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric power (Natural Science Edition), 2016, 37 (5):68-71 (in Chinese))
- [10] 夏凡, 胡圣, 龚治娟, 等. 不同水质评价方法的应用比较研究:以丹江口水库入库河流为例[J]. 人民长江, 2017, 48(17):11-15, 24. (XIA F, HU S, GONG Z J, et al. A comparative study on the application of different water quality assessment methods; Taking Danjiangkou Reservoir as an example[J]. Yangtze River, 2017, 48 (17):11-15, 24. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.17.003.
- [11] 张亚丽, 周扬, 程真, 等. 不同水质评价方法在丹江口流域水质评价中应用比较[J]. 中国环境监测, 2015, 31(3):58-61. (ZHANG Y L, ZHOU Y, CHENG Z, et al Comparison of different water quality assessment methods in water quality assessment of Danjiangkou watershed[J]. Environmental Monitoring of China, 2015, 31 (3):58-61. (in Chinese)). DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2015.03.011.
- [12] 艾亚迪, 魏传江, 李丽琴, 等. 地下水水质评价方法对比——以偃师市为例[J]. 节水灌溉, 2018(11):77-80. (AI Y D, WEI C J, LI L Q. et al. Comparison of groundwater quality evaluation methods; Taking Yanshi City as an example[J]. Water saving Irrigation, 2018 (11): 77-80. (in Chinese)). DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2018.11.016.
- [13] 陈洁, 钱会, 吴昊. 基于三角模糊数的地下水饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3):80-85. (CHEN J, QIAN H, WU H. Water environmental health risk assessment of groundwater drinking water sources based on triangular fuzzy numbers [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15 (3):80-85. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.03.014.
- [14] 杨楠, 马丰丰, 吴天乐, 等. 基于模糊综合评价法的东江湖水质评价[J]. 湖南林业科技, 2016, 43(5):81-84. (YANG N, MA F F, WU T L. et al. Water quality evaluation of Dongjiang Lake based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2016, 43 (5):81-84. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1003-5710.2016.05.0016.
- [15] 赵颖, 王建英, 孙燕, 等. 改进人工神经网络在河南部分河流的水质评价中的应用[J]. 环境与发展, 2018, 30(3):216-217. (ZHAO Y, WANG J Y, SUN Y, et al. Application of improved artificial neural network in water quality assessment of some rivers in Henan[J]. Environment and Development, 2018, 30 (3): 216-217. (in Chinese)) DOI:10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2018.03.129.
- [16] 钟金鸣, 张智超, 孙玲玲, 等. 基于灰色关联度的水质评价分析[J]. 水利科技与经济, 2017, 23(12):42-48. (ZHONG J M, ZHANG Z C, SUN L L, et al. Water quality evaluation analysis based on grey relational degree[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2017, 23 (12): 42-48. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1006-7175.2017.12.008.
- [17] 陈颖, 李倩. 灰色关联法在徐州市地下水水质评价中的应用[J]. 地下水, 2017, 39(4):49-50. (CHEN Y, LI Q. Application of grey correlation method in groundwater quality evaluation in Xuzhou[J]. Ground Water, 2017, 39 (4): 49-50. (in Chinese)). DOI: 10.3969/j.issn.1004-1184.2017.04.015.
- [18] 刘波. 基于改进的灰色聚类分析方法的区域浅层地下水水质综合评价研究[J]. 水土保持应用技术, 2017(5):1-3. (LIU B. Comprehensive evaluation of regional

- shallow groundwater quality based on improved grey clustering analysis method[J]. *Technology of soil and water conservation*, 2017(5):1-3. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-5366.2017.05.01.
- [19] 马腾飞, 陈文波, 黄莹波. 主成分分析法在高州水库水质评价中的应用[J]. *四川环境*, 2018, 37(1):65-71. (MA T F, CHEN W B, HUANG Y B. Application of principal component analysis in water quality evaluation of Gaozhou Reservoir[J]. *Sichuan Environment*, 2018, 37(1):65-71. (in Chinese)). DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2018.01.012.
- [20] 刘剑. 主成分分析法在沙河水质评价分析中的应用[J]. *广东水利水电*, 2018(2):31-33. (LIU J. Application of principal component analysis in water quality assessment and analysis of Shahe River [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2018(2):31-33 (in Chinese)). DOI: 10.11905/j.issn.1008-0112.2018.02.006.
- [21] 李晓英, 苏志伟, 周华, 等. 基于主成分分析的 GA-BP 模型在城市需水预测中的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(6):39-44. (LI X Y, SU Z W, ZHOU H, et al. Application of GA-BP model based on principal component analysis in urban water demand prediction [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(6):39-44. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.06.006.
- [22] 崔晓雨. 主成分分析法在乌鲁木齐河水质评价中的应用[J]. *水资源开发与管理*, 2017(10):25-27. (CUI X Y. Application of principal component analysis in water quality assessment of Urumqi River[J]. *Water Resources Development and Management*, 2017(10):25-27. (in Chinese)). DOI: 10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2017.010.008.
- [23] GB/T 14848—2017, 地下水质量标准[S]. (GB/T 14848-2017. *Quality Standard for Groundwater* [S]. (in Chinese)).
- [24] 朱谱成, 耿新新, 马琳娜, 等. 牯牛川上中游区地下水水化学特征及其成因分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(19):162-169. (ZHU P C, GENG X X, MA L N, et al. Analysis of hydrochemical characteristics and causes of groundwater in the upper and middle reaches of Baniuchuan [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(19):162-169. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.19.025.
- [25] 王仕琴, 郑文波, 孔晓乐. 华北农区浅层地下水硝酸盐分布特征及其空间差异性[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(10):1476-1482. (WANG S Q, ZHENG W B, KONG X L. Distribution characteristics and spatial differences of nitrate in shallow groundwater in North China Agricultural Region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10):1476-1482. (in Chinese)) DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180639.
- [26] 周锴镠, 王赫生, 龚建师, 等. 淮河流域平原区浅层地下水铁锰分布特征及成因浅析[J]. *华东地质*, 2014, 35(2):147-151. (ZHOU K E, WANG H S, GONG J S, et al. Distribution characteristics and causes of iron and manganese in shallow groundwater in plain area of Huaihe River Basin [J]. *East China Geology*, 2014, 35(2):147-151. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-4814.2014.02.010.

(上接第 70 页)

- [19] AJMAL M, MOON G, AHN J, et al. Investigation of SCS-CN and its inspired modified models for runoff estimation in South Korean watersheds[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2015, 9(4):592-603. DOI: 10.1016/j.jher.2014.11.003.
- [20] MILIANI F, RAVAZZANI G, MANCINI M. Adaptation of precipitation index for the estimation of antecedent moisture condition in large mountainous basins[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2011, 16(3):218-227.
- [21] 包为民. 水文预报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (BAO W M. *Hydrologic Forecast* [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2009. (in Chinese))
- [22] MISHRA S K, CHAUDHARY A, SHRESTHA R K, et al. Experimental verification of the effect of slope and land use on SCS runoff curve number[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(11):3407-3416. DOI: 10.1007/s11269-014-0582-6.
- [23] ARNOLD J G, ALLEN P M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records [J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 35(2):411-424. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb03599.x.
- [24] 孙璐. 多分类器与知识规则结合的流域下垫面分类及水文参数区域化[D]. 南京: 河海大学, 2015. (SUN L. *Combined multiple classifiers with a rule-based basin underlying surface classification and regionalization* [D]. Nanjing: Hohai University, 2015. (in Chinese))
- [25] USDA-SCS. *National Engineering Handbook. Section 4. Hydrology* [K]. 1985.
- [26] 孙立群, 胡成, 陈刚. TOPMODEL 模型中的 DEM 尺度效应[J]. *水科学进展*, 2008, 19(5):699-706. (SUN L Q, HU C, CHEN G. Effects of DEM resolution on the TOPMODEL [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5):699-706. (in Chinese))