

地下水硝酸盐脆弱性评价指标权重 确定方法的比较研究

李立东¹, 寇长林^{1*}, 郭战玲¹, 马政华¹, 王守刚¹, 沈阿林^{1,2}, 王兰天³

(1. 河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002; 2. 浙江省农业科学院
环境资源与土壤肥料研究所, 浙江 杭州 310021; 3. 河南省科学院 化学研究所, 河南 郑州 450002)

摘要: 基于地下水硝酸盐污染脆弱性评价过程中确定指标权重的 3 种不同方法, 获得评价指标的 3 种不同权重, 对河南省黄淮海平原地下水硝酸盐污染脆弱性进行了评价, 比较 3 种不同方法和评价结果的优劣。结果表明, 专家经验法简单易操作, 但人为主观因素容易导致过度强调部分指标重要性; 主成分因子分析法消除了人为因素干扰, 但对指标的遴选要求严格, 可控性较差; 相关分析法对评价指标和地下水硝态氮含量之间关系进行探讨, 并消除人为因素干扰, 对本研究区评价结果较为合理。

关键词: 地下水脆弱性; 评价指标; 权重; 主成分因子分析; 相关分析

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1004-3268(2013)07-0046-06

Comparison of Different Methods to Achieve the Weight for Groundwater Vulnerability Assessment of Nitrate Pollution

LI Li-dong¹, KOU Chang-lin^{1*}, GUO Zhan-ling¹, MA Zheng-hua¹,
WANG Shou-gang¹, SHEN A-lin^{1,2}, WANG Lan-tian³

(1. Institute of Plant Nutrition, Agricultural Resources and Environmental Science,
Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China;

2. Environmental Resources and Soil Fertilizer Institute, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences,
Hangzhou 310021, China; 3. Institute of Chemistry, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Based on three different methods to ascertain the weights of some groundwater vulnerability assessment of nitrate pollution, three different weights were acquired and the groundwater vulnerability of nitrate pollution in Huanghuaihai plain in Henan province was evaluated, and the three different methods and results were compared with each other. The results showed that the method of expert experience was easy to manipulate, but subjective factor always resulted in overemphasis of some factors. Subjective factors could be avoided by the principal component analysis, but it was hard to select some factors so that the result could not be controlled. Correlation analysis was used to evaluate the relationship between the selected factors and the content of the groundwater nitrate, able to eliminate subjective factors, so the result was reasonable for the studied area.

Key words: groundwater vulnerability; evaluating indicator; weight; principal component analysis; correlation analysis

地下水脆弱性的概念首先由法国的 Marget 于 1968 年提出, 美国环保局(USEPA)和国际水文地质协

会(IAH) 于 1993 年将地下水脆弱性分为 2 类: 一类是本质脆弱性, 即不考虑人类活动和污染源而只考虑水

收稿日期: 2013-01-19

基金项目: 农业部农业生态环境保护项目(2110402-1170); 国家科技支撑计划项目(2012BAD15B02); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03)

作者简介: 李立东(1986-), 男, 河南睢县人, 助理研究员, 硕士, 主要从事农业环境评价方面的研究。

E-mail: lilidong476900@163.com

* 通讯作者: 寇长林(1965-), 男, 河南宝丰人, 研究员, 博士, 主要从事农业资源环境方面的研究。E-mail: koucl@126.com

文地质内部因素的脆弱性;另一类是特殊脆弱性,即地下水对某一特定污染源或污染群体或人类活动的脆弱性^[1]。人类耕作和施肥管理导致大量氮素进入土壤和水体,部分氮素经硝化作用转化为硝态氮,成为地下水硝酸盐污染的主要来源,即地下水硝酸盐污染脆弱性的主要动因^[2-3]。地下水脆弱性的研究和评价有助于了解区域地下水污染风险及风险因素,对于指导农林生产和确定合理管理措施具有重要意义。目前评价地下水脆弱性的方法主要有3种,分别为指数评价法、统计或基于过程的评价法和综合评价法。指数评价法是应用最早也最普遍的方法,其评价过程是首先对影响地下水脆弱性的各个指数进行排序、分级并评分,然后按照一定的指标权重叠加计算得到综合脆弱性指数,最后按照数值的高低划分为不同的脆弱性等级,目前最具代表性的是DRASTIC方法^[4-5]。在国内地下水脆弱性评价研究中,研究重点大多在评价,包括利用DRASTIC模型或者其改进型或者其他指数评价模型,如张保祥等^[6]的DRAMTICH模型、孙爱荣等^[7]的DPASTIK模型、张雪刚等^[8]的GRADIC和GRADICL模型、钟佐燊^[9]的DRATA和DLCT模型等,都是根据我国具体情况,分别提出了不同的评价模型。而利用指数评价法过程中关于指标权重的具体确定方法和确定过程的研究还很少见到。指标权重代表着各个指标在地下水脆弱性评价中的相对重要程度,客观、合理、正确地确定指标权重对评价结果有着重要意义。指标权重作为一个相对量,在评价指标或者指标评分标准发生变化的情况下,不能再沿用既有权重或者参照他人研究做简单修正^[10-11]。采用合适的方法确定指标权重是地下水脆弱性评价过程中的关键步骤,目前经常使用的方法包括专家经验法、主成分因子分析法、相关分析法、层次分析法、熵权法等,其中前3种方法是研究中切实可行并且经常使用的方法。本研究以河南省黄淮海平原区为例,通过对比分析,探讨专家经验法、主成分因子分析法、相关分析法在确定指标权重中的优劣,确定适合于本研究区的指标权重确定方法,并确定指标权重,完成研究区地下水脆弱性评价,为地下水脆弱性评价提供理论和技术支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况与数据采集

研究区位于黄淮海大平原的西南部,河南省的东半部,北纬 $30^{\circ}45' \sim 36^{\circ}21'$,东经 $112^{\circ}50' \sim 116^{\circ}35'$,包括14个地市的84个县(区),土地总面积 $8.58 \times 10^4 \text{ km}^2$,占河南省总面积的51.37%,处于北亚热带暖温带过渡地带,年平均温度 $13 \sim 15^{\circ}\text{C}$,年降水量 $600 \sim 1\,100 \text{ mm}$ (豫北 $600 \sim 700 \text{ mm}$,豫

中 $700 \sim 800 \text{ mm}$,豫南 $800 \sim 1\,100 \text{ mm}$),无霜期 $210 \sim 240 \text{ d}$ 。农作物主要是小麦、玉米、花生、棉花及部分花卉、蔬菜等,是河南省粮食主产区和全国主要商品粮基地。主要土壤质地类型为砂土、壤土、黏壤土、壤黏土、砂壤土,地下水富水介质主要为富水程度不同的松散岩类空隙含水岩组,地下水污染物的主要来源是农业施肥管理^[12]。

本研究以均匀布点方式为主进行布点,并结合河南省的土壤分布、种植模式差异及采样的方便性和可连续性,共布置290个样点,采样分雨前和雨后,每年采样2次。按照要求,采集的水样需在保温箱内加冰块保存,经过5 a,连续采集到的样点共275个。室内分析采用紫外分光光度计法测定地下水样硝态氮的含量,研究中采用的硝态氮含量为多次采样的算术平均值。

研究选取的指标包括地下水埋深、土壤质地、储水介质的富水程度、降水入渗、单位面积施肥量及蔬菜面积比例等6个指标,地下水污染监测物质为硝态氮。

1.2 研究方法

研究对比分析的3种方法分别是专家经验法、主成分因子分析法和相关分析法。专家经验法是根据专家的经验知识,判断各指标对于地下水脆弱性的相对影响程度,确定指标权重。专家经验法确定指标权重是一个借鉴、吸收、消化及再创新优化的过程。主成分因子分析法是利用主成分因子分析思想,构造各指标线性组合,即主成分,根据各指标对主成分的综合贡献率和主成分对评价因子的权系数确定指标权重^[13-14],其中评价指标权系数的计算公式为 $\beta_j = A_{1j}F_1 + A_{2j}F_2 + \dots + A_{ij}F_i$,权重的计算公式为 $W_i = \frac{\beta_j}{\sum_{j=1}^n \beta_j} \times W$,其中 A_{ij} 表示第 i 个主因子对第 j 个评价指标的权系数,取其绝对值; F_i 为第 i 个主因子的贡献率, W 为拟分配的总权重^[15-16]。相关分析法是利用表征地下水污染程度指标(如地下水硝态氮含量)与各评价指标之间的相关程度来代表各指标对地下水脆弱性的影响程度,并以此确定各个指标的权重。

主成分因子分析和相关分析在SPSS 15软件中完成,空间数据处理和制图工作在ArcGIS 9.2中完成。为了便于对比,3种方法的权重分配额度都设定为10。

2 结果与分析

2.1 专家经验法

根据专家经验知识和相关研究成果,结合研究

区特点,综合评判各个指标对研究区地下水脆弱性的相对重要程度,并确定各指标权重,结果如表 1。根据确定的权重计算研究区地下水脆弱性程度,其空间分布如图 1。

表 1 用于评价脆弱性的 6 个评价指标的权重

项目	地下水埋深	土壤质地	富水程度	降水入渗	单位面积施肥量	蔬菜面积比例
权重	1.18	0.59	1.18	1.76	2.94	2.35

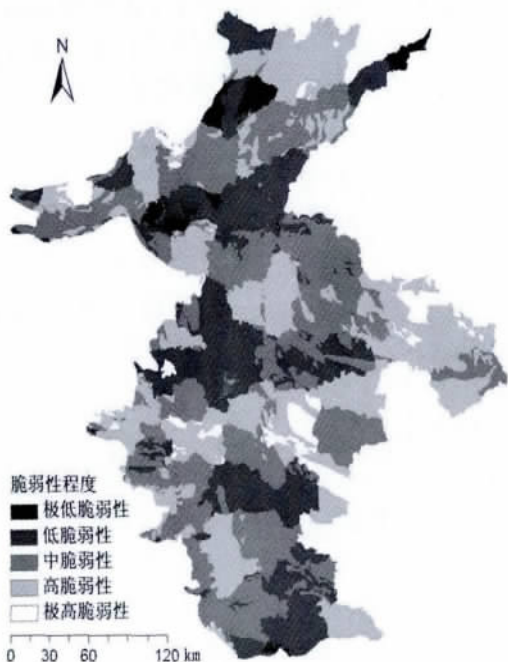


图 1 研究区地下水脆弱性程度分布(专家经验法)

由图 1 可以看出,整个研究区地下水脆弱性程度在空间上具有明显的块状分布特点,即多以县域行政边界为分界线。这主要是因为单位面积施肥量和蔬菜面积比例分配的权重比较大,并且这 2 个指标均是以县为最小统计单位,导致评价结果具有与这 2 个指标更多相似的空间分布特点,这与地下水脆弱性程度的自然连续分布状态不相符。

2.2 主成分因子分析法

利用 SPSS 15 软件对原始数据进行标准化处理并进行主成分因子分析,其计算过程和结果分别见表 2—5。其中表 2 为各评价指标间的相关系数矩阵,表 3 为各主因子的特征值、贡献率和累积贡献率大于 80%的主因子,表 4 为各个主因子对应于各评价指标的权系数即载荷,表 5 为最终的计算结果,即权系数和分配的权重值。根据确定的权重计算研究区地下水脆弱性程度,其空间分布如图 2。

由表 5 可以看出,通过主成分因子分析获得的指标权重在 1.51~1.85,表明各指标的重要程度相当,主次指标不明确。从地下水脆弱性程度分布(图 2)也可以看出,整个研究区脆弱性程度分布凌乱无序,尤其研究区东部地区的脆弱性明显偏高,无法从指标及权重的角度得到合理解释。结合研究区地下水硝态氮含量分布(图 3 左)也能发现,研究区东部的脆弱性等级和地下水硝态氮含量呈负相关状态,这不符合脆弱性等级和地下水硝态氮含量之间的一般规律。

表 2 评价指标的相关系数矩阵

指标	地下水埋深	土壤质地	富水程度	降水入渗	单位面积施肥量	蔬菜面积比例
地下水埋深	1					
土壤质地	0.280 3	1				
富水程度	-0.112 9	-0.134 2	1			
降水入渗	-0.087 0	-0.185 3	-0.055 3	1		
单位面积施肥量	0.197 0	0.122 3	-0.088 8	-0.167 6	1	
蔬菜面积比例	0.027 3	0.041 7	0.013 7	-0.133 2	0.133 9	1

表 3 因子分析的贡献率及累积贡献率大于 80%的主因子

项目	主因子				
	F1	F2	F3	F4	F5
特征值	1.620 0	1.120 7	0.923 4	0.839 6	0.808 5
贡献率	26.999 7	18.678 8	15.389 9	13.992 8	13.475 1
累积贡献率	26.999 7	45.678 5	61.068 4	75.061 2	88.536 3

表 4 主因子的权系数

主因子	地下水埋深	土壤质地	富水程度	降水入渗	单位面积施肥量	蔬菜面积比例
F1	0.614 0	0.648 8	-0.512 9	-0.501 1	0.448 4	0.326 8
F2	0.425 5	0.221 9	0.379 5	0.339 5	0.407 1	-0.682 3
F3	0.002 6	-0.396 2	-0.334 6	0.514 2	0.559 9	0.276 6
F4	0.260 0	0.231 0	-0.400 5	0.521 1	-0.533 6	-0.044 6
F5	0.296 4	0.091 4	0.564 6	0.211 4	-0.082 3	0.584 8

表 5 各评价指标的权系数及权重

项目	地下水埋深	土壤质地	富水程度	降水入渗	单位面积施肥量	蔬菜面积比例
权系数	0.322 0	0.322 2	0.393 0	0.379 2	0.369 0	0.343 3
权重	1.51	1.51	1.85	1.78	1.73	1.61

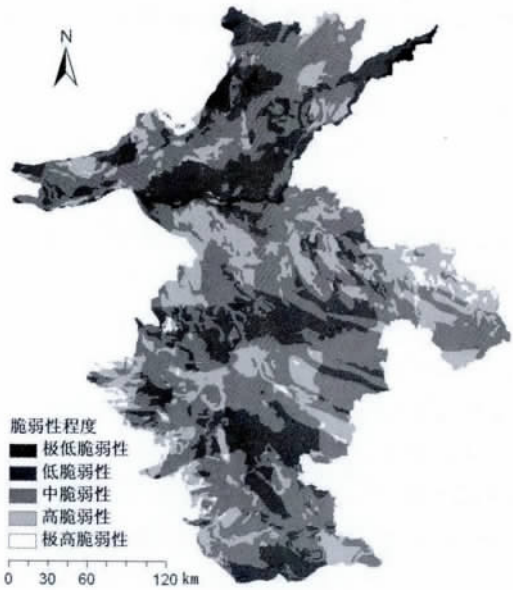


图 2 研究区地下水脆弱性程度分布(主成分因子分析法)

2.3 相关分析法

利用 SPSS 15 软件对地下水硝态氮含量和各指标间的相关性进行统计分析,并以相关系数为基础计算指标权重,其结果如表 6。

由表 6 可以看出,影响研究区地下水脆弱性程度的主要因素是降水入渗,影响程度超过 50%,其次是土壤质地、蔬菜面积比例和单位面积施肥量,影响程度分别达到 18.7%、17.2%和 9.6%,地下水埋深和富水程度对其影响较弱,影响程度不足 4%。由地下水脆弱性程度分布(图 4)统计发现,研究区 2.9%的地区为极低脆弱性,55.8%的地区为低脆弱性,33.5%的地区为中等脆弱性,即中等以下脆弱性地区占到 92.2%;6.9%的地区为高脆弱性,0.9%的地区为极高脆弱性,即 7.8%的地区脆弱性程度较高。观察脆弱性等级的空间分布情况可以发现,其基本具有连续渐变的分布特点。综合以上,整个

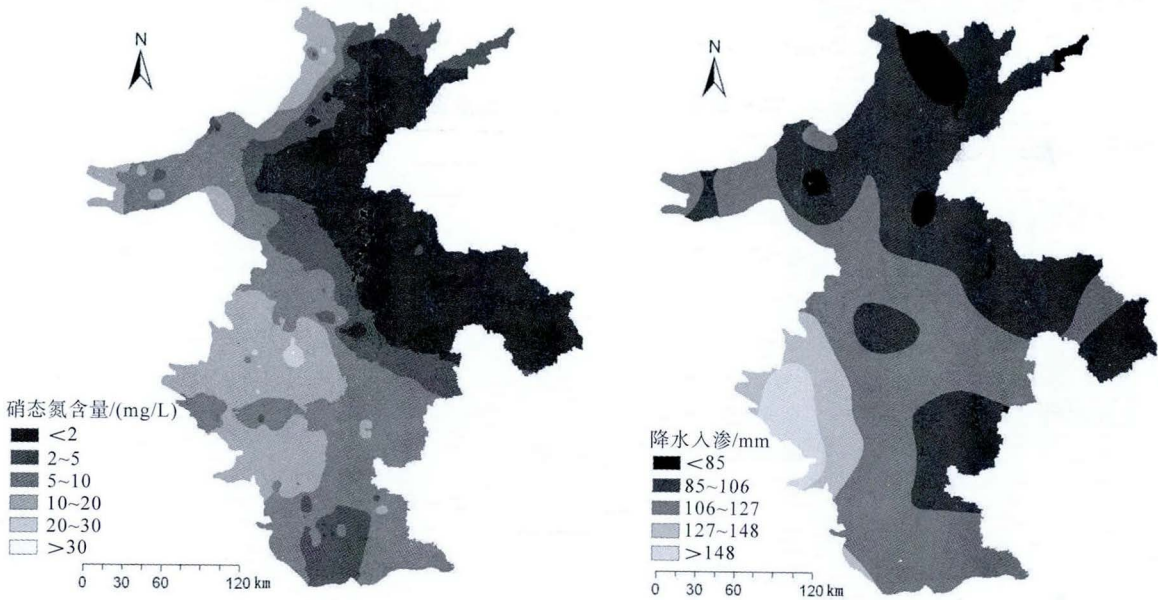


图 3 地下水硝态氮含量分布(左)及降水入渗(右)

研究区地下水脆弱性程度总体良好,地下水受到污染的风险较低,说明研究区农业管理措施和农业技术水平较好,同时说明利用该方法确定的指标权重得出的评价结果合理、客观、可信度高。

表 6 各评价因子的权系数及权重

项目	地下水埋深	土壤质地	富水程度	降水入渗	单位面积施肥量	蔬菜面积比例
相关系数	-0.023 7	-0.178 1	0.012 6	0.482 5	-0.091 4	-0.163 2
权系数	0.023 7	0.178 1	0.012 6	0.482 5	0.091 4	0.163 2
权重	0.25	1.87	0.13	5.07	0.96	1.72



图 4 研究区地下水脆弱性程度分布(相关分析法)

结合河南省平原区地下水埋深、土壤质地、地下水富水程度、降水入渗(图 3 右)、单位面积施肥量、蔬菜面积比例等的空间分布情况,发现研究区脆弱性程度较高的地区主要集中在降水入渗量比较大,如研究区西南部,或者是蔬菜面积比例较高,如中牟地区,或者是土壤砂粒含量较高的地区,如研究区北部和中部地区,土壤多为壤土、砂壤土,甚至是砂土。

降水入渗量越高,将污染物带入地下水的可能性就越大,脆弱性程度就越高;而蔬菜对水肥要求的频率和数量都较高,因此蔬菜比例越高,施肥量就会越高,对地下水的污染压力就越大;土壤对污染物的下渗起到过滤阻挡的作用,砂粒含量越高,保水保肥能力越低,污染物透过土壤运移到地下水的可能性越大,地下水的脆弱性程度就越高。

2.4 不同方法评价结果对比分析

地下水硝态氮含量与地下水脆弱性程度具有一定的正相关性,基于这一点,随机选取研究区 275 个调查点,分别统计不同脆弱性程度调查点地下水的硝态氮含量分布情况,发现只有相关分析法得出的脆弱性程度分布与地下水硝态氮含量的分布规律一致,其他 2 种方法得出的评价结果与地下水硝态氮含量分布规律均不一致。即相关分析法得出的脆弱性程度分布图中,高脆弱性程度区域的调查点地下水硝态氮含量 5~10 mg/L 占 62%(表 7);中等脆弱性程度区域的调查点地下水硝态氮含量 5~10 mg/L 占 47%;低脆弱性程度区域的调查点地下水硝态氮低含量者占多数,硝态氮含量<2 mg/L 占 51%。从这一角度来说,针对本研究区,根据相关分析法获得的指标权重进行地下水脆弱性评价相对更恰当。

表 7 不同脆弱性程度地下水硝态氮含量分布状况统计

%

确定指标权重方法	脆弱性程度及指数	硝态氮含量/(mg/L)				
		<2	2~5	5~10	10~20	20~30
专家经验法	极高>70	42	5	37	16	
	高 60~70	40	18	22	20	
	中 50~60	27	18	40	15	
	低 35~50	30	13	33	23	1
	极低<35	30	33	37		
主成分因子分析法	极高>70	75		12	13	
	高 60~70	35	9	35	21	
	中 50~60	32	18	34	16	
	低 35~50	29	18	31	21	1
	极低<35		33		67	
相关分析法	极高>70		100			
	高 60~70		38	62		
	中 50~60	8	12	47	32	1
	低 35~50	51	16	22	11	
	极低<35				100	

3 结论与讨论

指标权重是利用指数评价法评价地下水脆弱性

的关键,指标权重的大小直接关系到评价结果的合理性、客观性及可信度,不同的指标权重确定方法在本研究区表现各有优劣。利用专家经验法确定指标

权重是专家的经验知识和个人主观意识起关键作用,该方法在具体操作过程中简单方便,适用范围广泛,但是其结果往往会受到人为主观因素的影响,不同专业背景得出的结果会有所不同,导致评价结果差异巨大,具有不可重复性。主成分因子分析法能够有效地消除人为主观因素对结果的影响,使评价过程和结果更加客观,可信度和可重复性较高,但是该方法对评价指标综合信息指示方向的准确性要求较高,必须确保所有指标的综合信息表征方向为目标方向即地下水脆弱性,这就需要更准确的评价指标或在指标权重计算出来以后根据其他辅助方法,如专家经验法或其他,对权重进行微调,以获得更加合理的结果。相关分析法同样可以消除人为主观因素对结果的影响,并且合理利用评价指标和地下水硝态氮含量这2类数据之间的关系,通过确定指标权重确保了评价指标综合信息的表征方向,使评价过程和结果更加客观、合理。根据评价结果和地下水硝态氮含量的调查统计分析发现,根据相关分析法获得的地下水脆弱性程度分布与地下水硝态氮含量的分布更加一致。综合以上可以发现,针对于河南省黄淮海平原这一研究区,相关分析法是进行地下水脆弱性评价较为合适的方法。另外在研究过程中如果能够结合这3种方法,充分利用其各自优势,如主成分与相关分析或回归分析结合,并用专家经验法对结果进行经验修正,将会得到更加理想的评价结果。

参考文献:

- [1] 姚文锋,张思聪,唐莉华,等. 海河流域平原区地下水脆弱性评价[J]. 水利发电学报,2009,28(1):113-118.
- [2] 陈克亮,朱晓东,朱波,等. 川中小流域地下水硝态氮的时空变化特征[J]. 农业环境科学学报,2006,25(4):1060-1064.
- [3] 林海涛,江丽华,宋效宗,等. 山东省地下水硝酸盐含量状况及影响因素分析[J]. 农业环境科学学报,2011,30(2):353-357.
- [4] 吴登定,谢振华,林健,等. 地下水污染脆弱性评价方法[J]. 地质通报,2005,24(10/11):1043-1047.
- [5] 贺新春,邵东国,陈南祥,等. 几种评价地下水环境脆弱性方法之比较[J]. 长江科学院院报,2005,22(3):17-20.
- [6] 张保祥,孟凡海,张欣. 基于GIS的黄河河流域地下水脆弱性评价研究[J]. 工程勘察,2009(8):47-50.
- [7] 孙爱荣,周爱国,梁合诚,等. 南昌市地下水易污染性评价指标体系探讨[J]. 人民长江,2007,38(6):10-12.
- [8] 张雪刚,毛媛媛,李致家,等. 张集地区地下水易污性及污染风险评价[J]. 水文地质工程地质,2009(1):51-55.
- [9] 钟佐燊. 地下水防污性能评价方法探讨[J]. 地学前缘,2005,12(特刊):3-11.
- [10] 左海凤,魏加华,王光谦. DRASTIC地下水防污性能评价因子赋权[J]. 水资源保护,2008,24(2):22-25.
- [11] 周金龙. 内陆干旱区地下水脆弱性评价方法及其应用研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2010:22-48.
- [12] 李素萍,安玉麟,李巧枝,等. 主成分分析在油用向日葵杂交种选育中的应用[J]. 华北农学报,2004,19(S1):1-5.
- [13] 汤梦玲,王占龙,李志建. 因子分析法求权重评价水质的实例[J]. 邢台职业技术学院学报,2005,22(5):14-16.
- [14] 王焰新. 地下水污染与防治[M]. 北京:高等教育出版社,2007:266-275.
- [15] 张水清,黄绍敏,郭斗斗. 主成分分析在潮土土壤肥力评价中的应用[J]. 河南农业科学,2011,40(4):82-86.
- [16] 高伟,朱静华,高宝岩,等. 天津市设施蔬菜不同种植年限土壤及地下水养分特征[J]. 华北农学报,2010,25(2):206-211.