

基于主成分回归的河南省地下水硝酸盐脆弱性评价 *

寇长林^{1**} 郭战玲¹ 马政华¹ 李立东² 王守刚¹ 沈阿林¹ 赵丽君¹

(¹河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; ²郑州大学水利与环境学院, 郑州 450001)

摘要 根据水文与地貌特征将河南省分为山区和平原区,选取富水程度、降水入渗、单位面积施肥量、蔬菜种植面积比例和土壤质地作为共性指标,坡度和地下水埋深作为个性指标,利用主成分回归分析确定指标权重,在ArcGIS 9.2 的支持下对河南省地下水硝酸盐脆弱性进行评价。结果表明,河南省地下水硝酸盐脆弱性程度以中低水平为主,中等脆弱性以下地区占总面积的 68.4%,高脆弱性地区占 19.8%,极高脆弱性地区占 11.8%。影响河南省平原地区地下水脆弱性的主要因素依次为土壤质地、施肥水平和降水入渗,而影响山区地下水脆弱性的主要因素依次为施肥水平、土壤质地和坡度。研究结果为合理施肥和农业环境管理提供了理论依据。

关键词 主成分分析 回归分析 指标权重 地下水脆弱性

文章编号 1001-9332(2013)10-2912-05 **中图分类号** X523 **文献标识码** A

Assessment of groundwater vulnerability to nitrate in He'nan Province of China based on principal component regression. KOU Chang-lin¹, GUO Zhan-ling¹, MA Zheng-hua¹, LI Li-dong², WANG Shou-gang¹, SHEN A-lin¹, ZHAO Li-jun¹ (¹Institute of Plant Nutrition & Resource Environment, He'nan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; ²College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(10): 2912-2916.

Abstract: According to the hydrological and morphological characteristics, He'nan Province was divided into mountainous region and plain region. The level of rich water, infiltration modulus of precipitation, fertilization level per unit area, proportions of vegetable planting area, and soil texture were selected as the common indices, and the slope and groundwater depth were selected as specific indices to assess the groundwater vulnerability to nitrate. Principal component regression analysis was adopted to determine the index weights, and the spatial distribution of groundwater vulnerability to nitrate in He'nan Province was assessed with ArcGIS 9.2. In the Province, the groundwater vulnerability to nitrate was mainly at low and medium level, and the region with this vulnerability level accounted for 68.4% of the total. The high vulnerability region accounted for 19.8%, and the extremely high vulnerability region occupied 11.8%. The main factors affecting the groundwater vulnerability to nitrate in plain region were soil texture, fertilization level, and infiltration modulus of precipitation, while those in mountainous region were fertilization level, soil texture, and slope. This study provided a theoretical basis for reasonable fertilization and agricultural environment management.

Key words: principal component analysis; regression analysis; index weight; groundwater vulnerability.

地下水脆弱性指地下水系统遭到污染的可能性,分为本质脆弱性和特殊脆弱性。前者指不考虑人

类活动和污染源而只考虑水文地质内部因素的脆弱性,后者指地下水对某一特定污染源、污染群体或人类活动的脆弱性^[1]。对地下水脆弱性进行评价,可以反映地下水对某类污染物的易感染性。随着人类不合理耕作和施肥强度的增加,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,进而转

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

** 通讯作者. E-mail: koucl@126.com

2013-01-09 收稿, 2013-07-18 接受.

化为亚硝酸盐,对地下水造成较大污染^[2-3],已成为突出的区域环境问题。河南省作为粮食主产区之一,对其地下水硝酸盐脆弱性进行评价,可以警示人们在农业生产活动中采取有效措施加强对地下水资源保护。

地下水脆弱性评价方法主要有指数评价法、统计或基于过程评价法和综合评价法。指数评价法是应用最早、最普遍的方法,它首先对影响地下水脆弱性的各个指数进行排序、分级评分,然后按照一定的指标权重叠加计算得到综合脆弱性指数,最后按照得分高低划分为不同脆弱性等级。国际上应用最广泛的评价模型是 DRASTIC 方法^[4-5],国内多是在该模型基础上进行改进,如雷静等^[6]的 DRASTIC 模型、张保祥等^[7]的 DRAMTICH 模型、孙爱荣等^[8]的 DPASTIK 模型、张雪刚等^[9]的 GRADIC 和 GRADICL 模型、钟佐燊^[10]的 DRATA 和 DLCT 模型等。

在指数评价过程中指标权重的确定非常关键,因为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,不能再沿用既有权重或者参照他人研究做简单修正^[11],必须探索更有价值的方法。因此,本文以河南省为研究区,运用主成分回归分析方法对其地下水硝酸盐脆弱性进行评价,旨在寻找河南省地下水硝酸盐污染的规律,为农林生产和施肥管理提供科学支持,为控制地下水的硝酸盐污染提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

河南位于中国中东部、黄河中下游($31^{\circ}23' - 36^{\circ}23' N$, $110^{\circ}21' - 116^{\circ}39' E$),总面积 $16.7 \times 10^4 km^2$,其中耕地面积 $7.93 \times 10^4 km^2$ (2008 年统计数据)。属暖温带-亚热带、湿润-半湿润季风气候。全省年均气温 $12 \sim 16^{\circ}C$,年均降水量 $500 \sim 1300 mm$,是我国小麦、棉花、油料、烟叶等农产品的重要生产基地。主要土壤种类有潮土、褐土、黄褐土、砂姜黑土、水稻土、棕壤、黄棕壤和红粘土等。

地势西高东低,北、西、南三面为山区,中、东部为华北平原南部,西南部为南阳盆地。河南省有山地和丘陵区 $7.4 \times 10^4 km^2$,平原 $9.3 \times 10^4 km^2$,山地与平原间水文地貌特征差异比较明显,因此本研究把河南省分为山区和平原区(包括南阳盆地)(图 1),分别建立指标进行评价。

1.2 研究方法

1.2.1 地下水硝态氮测定方法

取地下水样 340 个

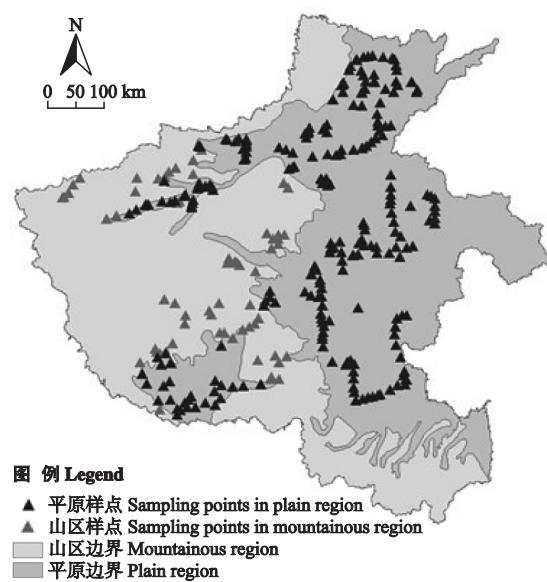


图 1 研究区位置及样点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of sampling points.

(包括山区 66 个、平原 274 个),利用 GPS 记录取样位置(图 1),并进行相关调查。地下水硝酸盐测定指标为硝态氮含量,采用紫外分光光度计法测定。

1.2.2 评价指标的选择 针对平原和山区自然特征相差较大的情况,山区选择的指标为:坡度、富水程度、降水入渗、单位面积施肥量、蔬菜种植面积比例、土壤质地;平原区选择的指标为:富水程度、降水入渗、单位面积施肥量、蔬菜种植面积比例、土壤质地、地下水埋深。

1.2.3 评价方法 利用指数法建立评价模型。通过对选取评价参数的指数进行迭加形成一个反映脆弱程度的综合指数,在此基础上进行评价^[12-13],其表达式如下:

$$I = W_1 F_1 + W_2 F_2 + \cdots + W_n F_n$$

式中: n 为指标数目; W 为权重; F 为评价指标; I 为脆弱性指数,其值越高,脆弱性程度越强。

指标权重 W 利用主成分回归分析方法确定。首先利用主成分分析将原来众多具有一定相关性的指标,通过分析重新组合成一组新的互相关的综合指标来代替原指标,其表达式如下:

$$F_1 = a_{11} X_1 + a_{12} X_2 + \cdots + a_{1p} X_p$$

$$F_2 = a_{21} X_1 + a_{22} X_2 + \cdots + a_{2p} X_p$$

...

$$F_n = a_{n1} X_1 + a_{n2} X_2 + \cdots + a_{np} X_p$$

式中: F_n 为第 n 个主成分; X_p 为第 p 个原始指标; a_{np} 为第 n 个主因子对应的第 p 个原指标的系数^[14-15]。

然后利用回归分析对主因子和因变量间关系进行拟合,获得回归方程,利用各主因子的回归系数和主因子表达式求得各评价指标的系数^[13],利用SPSS 15进行主成分回归分析和指标权重确定,在ArcGIS 9.2支持下实现空间数据分析与制图输出,在此基础上实现对河南省地下水硝酸盐的脆弱性评价。

2 结果与分析

2.1 脆弱性评价指标权重确定

对山区来说,首先利用SPSS软件,对评价指标的原始数据进行标准化处理,然后计算特征值及贡

献率,并进行主成分分析,利用主成分分析的结果与因变量之间进行回归分析,获得各主成分的回归系数(表1),把各主成分分别带入回归模型,得到以各评价指标为自变量的回归模型及权重(表2)。同样,对平原地区的数据进行分析,并计算指标权重,结果如表3和表4。

指标权重在一定程度上代表着各指标对地下水脆弱性的相对重要程度。由表2和表4可以看出,在山区,影响地下水脆弱性的主要因素是施肥水平、土壤质地和坡度,对地下水硝酸盐脆弱性的贡献率分别达到30.5%、24.3%和17.4%,累积达到72.2%;贡献相对较小的分别是富水程度、降水入渗和蔬菜

表1 主成分载荷矩阵、特征值、贡献率、累计贡献率与回归系数

Table 1 Principal component loading matrix, eigenvalue, contribution rate, and accumulative contribution rate and regression coefficient (for the mountainous region)

评价指标 Evaluation index	主成分 Principal component				
	1	2	3	4	5
坡度 Slope	-0.51	-0.34	0.34	0.61	0.17
富水程度 Level of rich water	0.32	0.72	0.27	0.21	-0.39
降水入渗 Infiltration modulus of precipitation	0.63	0.05	0.47	0.35	0.29
施肥水平 Fertilization level	-0.11	-0.31	0.76	-0.52	-0.21
蔬菜比例 Proportion of vegetables	0.72	-0.28	-0.08	-0.21	0.34
土壤质地 Soil texture	-0.41	0.63	0.17	-0.28	0.57
特征值 Eigenvalue	1.45	1.20	1.03	0.92	0.74
贡献率 Contribution rate (%)	24.2	20.0	17.2	15.4	12.4
累积贡献率 Accumulative contribution rate (%)	24.2	44.2	61.3	76.7	89.1
回归系数	-0.10	-0.05	0.11	0.04	-0.17

表2 主成分回归分析结果及权重(山区)

Table 2 Results of principal component and regression analysis and the weights (for the mountainous region)

	坡度 Slope	富水程度 Level of rich water	降水入渗 Infiltration modulus of precipitation	施肥水平 Fertilization level	蔬菜比例 Proportion of vegetables	土壤质地 Soil texture
回归系数 Regression coefficients	-0.06	0.04	-0.04	0.11	-0.03	0.09
权重 Weight factor (%)	17.4	10.1	10.0	30.5	7.7	24.3

表3 主成分载荷矩阵、特征值、贡献率、累计贡献率与回归系数(平原)

Table 3 Principal component loading matrix, eigenvalue, contribution rate, and accumulative contribution rate and regression coefficient (for the plain region)

评价指标 Evaluation index	主成分 Principal component				
	1	2	3	4	5
富水程度 Level of rich water	0.50	0.45	0.16	0.59	0.29
降水入渗 Infiltration modulus of precipitation	0.02	0.87	0.01	0.07	0.37
施肥水平 Fertilization level	0.61	0.07	0.56	0.15	0.39
蔬菜比例 Proportion of vegetables	0.70	0.22	0.28	0.15	0.19
土壤质地 Soil texture	0.50	0.21	0.30	0.71	0.33
地下水埋深 Depth of groundwater	0.44	0.33	0.70	0.11	0.44
特征值 Eigenvalue	1.56	1.16	0.99	0.91	0.71
贡献率 Contribution rate (%)	26.0	19.4	16.6	15.2	11.8
累积贡献率 Accumulative contribution rate (%)	26.0	45.4	61.9	77.2	89.0
回归系数	0.03	0.52	0.38	-0.09	-0.97

表4 主成分回归分析结果及权重(平原)

Table 4 Results of principal component and regression analysis and the weights (for the plain region)

	富水程度 Level of rich water	降水入渗 Infiltration modulus of precipitation	施肥水平 Fertilization level	蔬菜比例 Proportion of vegetables	土壤质地 Soil texture	地下水埋深 Depth of groundwater
回归系数 Regression coefficients	-0.04	0.09	-0.13	0.04	-0.15	0.01
权重 Weight factor (%)	7.8	20.1	28.3	9.3	32.8	1.7

比例,累积27.8%,在平原区,对地下水脆弱性影响较大因素主要是土壤质地、施肥水平和降水入渗,贡献率分别为32.8%、28.3%和20.1%,累积达到81.2%;贡献相对较小的因素为蔬菜比例、富水程度和地下水埋深,累计值为18.8%。表明不同因子对地下水脆弱性影响的程度也不一样,因此可以在区域范围内通过调整种植业结构和优化施肥管理措施,来减轻人为因素对地下水硝酸盐污染的风险。

2.2 河南省地下水硝酸盐脆弱性评价及其分区

根据山区和平原的评价指标及其对应的指标权重,利用ArcGIS 9.2空间分析模块计算各区域地下水硝酸盐脆弱性程度,对山区和平原的地下水硝酸盐脆弱性程度分布图进行合并,获得河南省地下水硝酸盐脆弱性的空间分布(图2)。

由图2可以看出,河南省地下水脆弱性程度在东西方向上大致可分成东、中、西3个区域,其中,中部地区的地下水脆弱性程度较高,东、西部地区则相对较低。从地貌类型上来看,东部地区主要是冲积性平原,西部多山地丘陵,中部为山区和平原的过渡地带,其间雨水携带大量水溶性矿物质养分,汇集到盆地或山前平原,通过雨水下渗作用影响地下水质量,导致地下水脆弱性程度增高。

由表5可以看出,整个研究区地下水脆弱性程度以中低水平为主,中等脆弱性以下地区累计占

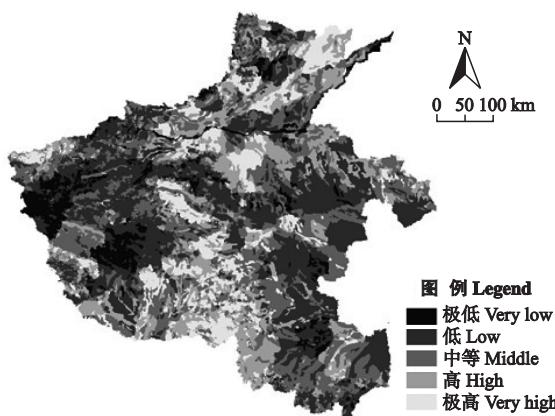


图2 河南省地下水硝酸盐脆弱性等级分布

Fig. 2 Spatial distribution of groundwater vulnerability levels in He'nan Province.

总面积的68.4%,总体上地下水污染水平可控;高脆弱性地区面积占19.8%,而极高脆弱性地区面积占11.8%。从山区和平原统计结果来看,极低脆弱性、高脆弱性和极高脆弱性地区均是山区较多,低脆弱性和中脆弱性地区则是平原地区较多,而其具体分布规律及原因有待于进一步探讨。

指标权重表征在整个研究区或区域范围内各指标对于地下水脆弱性影响的相对重要程度,在一个指定范围内是一个固定值,而对于研究范围内不同点,各指标数值的变化导致该点地下水脆弱性的主要影响因素发生变化,即并不是说整个研究区内任意点地下水脆弱性的首要影响因素都严格遵从于指标权重的大小。

由于地下水脆弱性指数是由多个指标及权重乘积组合而成,因此通过计算各评价指标和指标权重的乘积,表示评价指标对地下水脆弱性指数的贡献程度。计算研究区任意点各指标与指标权重乘积,即该指标对当前位置地下水脆弱性水平的贡献程度,比较乘积最大者,获得研究区地下水脆弱性的首要影响因素。

由图3可以看出,河南省大部分地区地下水脆弱性影响因素以施肥水平或土壤质地为主,部分地区(山区)以坡度为首要影响因素,而蔬菜比例、降水入渗和富水程度只在少数地区成为首要影响因素。根据分析得到地区硝酸盐脆弱性的关键因素,农林部门可以更有针对性地调整生产结构和施肥管理措施,有效预防地下水污染。

表5 河南省地下水硝酸盐脆弱性等级

Table 5 Grades of groundwater vulnerability to nitrate in He'nan Province (%)

区域 Region	极低脆弱性 Very low	低脆弱性 Low	中脆弱性 Middle	高脆弱性 High	极高脆弱性 Very high
山区 Mountainous region	4.4	14.3	12.8	10.2	6.6
平原 Plain region	2.3	18.7	15.9	9.6	5.2
总和 Total	6.7	33.0	28.7	19.8	11.8

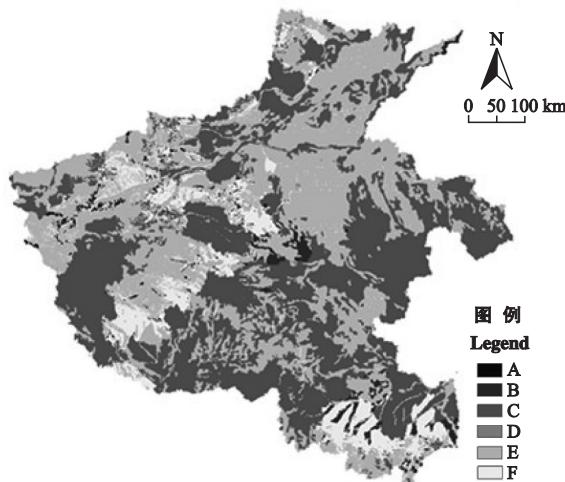


图3 河南省地下水硝酸盐脆弱性关键影响因素分布

Fig.3 Distribution of key factors of groundwater vulnerability in He'nan Province.

A:富水程度 Level of rich water; B:降水入渗 Infiltration modulus of precipitation; C:施肥 Fertilization level; D:蔬菜比例 Proportion of vegetables; E:土壤质地 Soil texture; F:坡度 Slope.

3 结 论

河南省地下水硝酸盐脆弱性等级分布在东西方向上可以分为东、西部区域相对低脆弱性区域,中部相对高脆弱性区域,这与河南省地貌类型东部平原、西部山区、中部过渡带相一致。

从地下水脆弱性等级的统计结果来看,河南省地下水以中低脆弱性为主,占68.4%,总体良好;中部地区的较高脆弱性地区也不容忽视,占31.6%。从指标权重大小来看,影响平原地区地下水脆弱性的主要因素依次为土壤质地、施肥水平和降水入渗,而影响山区地下水脆弱性的主要因素依次为施肥水平、土壤质地和坡度。探明不同地区硝酸盐脆弱性的首要影响因素,相关部门可以通过针对性地调整种植结构或优化施肥管理措施,减少人为因素对地下水硝酸盐脆弱性的影响。

参考文献

- [1] Yao W-F (姚文锋), Zhang S-C (张思聪), Tang L-H (唐莉华), et al. Groundwater vulnerability assessment in plain area of Haihe basin. *Journal of Hydropower Engineering* (水力发电学报), 2009, **28**(1): 113–118 (in Chinese)
- [2] Kou C-L (寇长林), Ju X-T (巨晓棠), Zhang F-S (张福锁). Nitrogen balance and its effects on nitrate N concentration of groundwater in three intensive cropping systems of North China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(4): 660–667 (in Chinese).
- [3] Lin H-T (林海涛), Jiang L-H (江丽华), Song X-Z (宋效宗), et al. Nitrate concentration of groundwater and its affecting factors in Shandong Province, China. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学报), 2011, **30**(2): 352–357 (in Chinese)
- [4] Wu D-D (吴登定), Xie Z-H (谢振华), Lin J (林健), et al. Groundwater contamination vulnerability assessment. *Geological Bulletin of China* (地质通报), 2005, **24**(10): 1043–1047 (in Chinese)
- [5] Dong L (董亮), Zhu Y-M (朱荫湄), Hu Q-H (胡勤海), et al. Evaluating ground water vulnerability in West Lake watershed by using DRASTIC model. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **12**(2): 217–220 (in Chinese)
- [6] Lei J (雷静), Zhang S-C (张思聪). Study on the groundwater vulnerability assessment in Tangshan plain area. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2003, **23**(1): 94–99 (in Chinese)
- [7] Zhang B-X (张保祥), Meng F-H (孟凡海), Zhang X (张欣). Study on groundwater vulnerability assessment in Huangshuihe River catchment based on GIS. *Geotechnical Investigation & Surveying* (工程勘察), 2009(8): 47–50 (in Chinese)
- [8] Sun A-R (孙爱荣), Zhou A-G (周爱国), Liang H-C (梁合诚), et al. Study on assessment index of groundwater vulnerability to pollution in Nanchang. *Yangtze River* (人民长江), 2007, **38**(6): 10–12 (in Chinese)
- [9] Zhang X-G (张雪刚), Mao Y-Y (毛媛媛), Li Z-J (李致家), et al. Assessment of groundwater vulnerability and risk to pollution in Zhangji. *Hydrogeology & Engineering Geology* (水文地质工程地质), 2009(1): 51–55 (in Chinese)
- [10] Zhong Z-S (钟佐燊). A discussion of groundwater vulnerability assessment methods. *Earth Science Frontiers* (地学前缘), 2005, **12**(suppl.1): 3–11 (in Chinese)
- [11] Zuo H-F (左海凤), Wei J-H (魏加华), Wang G-Q (王光谦). Method of determining factor weights for groundwater vulnerability assessment. *Water Resources Protection* (水资源保护), 2008, **24**(2): 22–25 (in Chinese)
- [12] Zhou J-L (周金龙). *Assessment and Its Application of Groundwater Vulnerability of Inland Arid Area*. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2010 (in Chinese)
- [13] Li C-A (李昌爱), Gu Y-P (顾也萍). Application of principal component analysis and regression analysis in the assessment of the quality of the paddy soil: Taking Tongcheng County as an example. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)* (安徽师范大学学报·自然科学版), 2001, **24**(4): 395–399 (in Chinese)
- [14] Zhang H (张辉), Lei W-J (雷文娟), Ma J-Z (马金珠). Assessment of water resources carrying capacity in Huachi County based on principal component analysis. *Yellow River* (人民黄河), 2011, **33**(3): 51–53 (in Chinese)
- [15] Chen X-H (陈小红), Duan Z-H (段争虎), Tan M-L (谭明亮). Analysis on the weight of soil physicochemical factors during reversal of desertification: A case study in Yanchi County, Ningxia Hui Autonomous Region. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2009, **40**(6): 1280–1283 (in Chinese)

作者简介 寇长林,男,1965年生,博士,研究员。长期从事中低产田治理及其农业持续发展、植物营养施肥水平与土壤培肥、农业生态系统中养分循环及生态环境效应、农业面源污染控制以及新型肥料研制等科研工作,发表学术论文50余篇。E-mail: koucl@126.com

责任编辑 肖 红