

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.004

呼伦贝尔高平原地区浅层地下水脆弱性评价

张 川^{1,2}, 唐 蕴¹, 唐克旺¹

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要:在充分考虑呼伦贝尔高平原地区水文地质条件的情况下,提出了基于 DRASTIC 模型的 DRASL 评价方法,利用层次分析法确定各指标权重,结合 ArcGIS 平台对呼伦贝尔高平原地区浅层地下水进行脆弱性分区,并对评价指标的合理性做了相关的敏感性分析。结果表明,高脆弱性地区主要分布在海拉尔区周边和满洲里市东郊,土地利用和地下水位埋深是影响呼伦贝尔高平原地区地下水脆弱性的关键因素。

关键词:呼伦贝尔高平原;地下水脆弱性;层次分析法;DRASTIC 模型;敏感性分析;ArcGIS 平台

中图分类号:P641.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)03-0019-05

Assessment of shallow groundwater vulnerability in Hulunbeir high plain

ZHANG Chuan^{1,2}, TANG Yun¹, TANG Kewang¹

(1. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: After fully considering the hydrogeology condition of the Hulunbeir high plain, the DRASL assessment method based on the DRASTIC model was established. The index weight was determined using the analytic hierarchy process (AHP), the partition based on the vulnerability of shallow groundwater in the Hulunbeir high plain was conducted combining with the ArcGIS platform, and the sensitivity analysis of the assessment index rationality was performed. Results show that the regions with high vulnerability mainly distribute in the Hailar District and the east part of Manzhouli City. The land use and groundwater depth are key factors affecting the vulnerability of groundwater in the Hulunbeir high plain.

Key words: Hulunbeir high plain; vulnerability of groundwater; analytic hierarchy process; DRASTIC model; sensitivity analysis; ArcGIS platform

国外地下水脆弱性评价研究工作开始较早,1987 年,Aller 等^[1]提出了地下水脆弱性评价 DRASTIC 模型方法,先后应用于美国 Columbia、Wyoming 等 10 个县区的地下水脆弱性评价工作中,并被加拿大、南非等国采用^[2-4]。1991 年,DRASTIC 模型方法被 Lobo-Ferreira 博士引入欧共体,并先后在多个国家使用,欧盟委员会(EEC)地下水工作组采用了该评价模型方法作为欧盟各国家统一的地下

水脆弱性评价方法。目前该评价方法也是国际应用最为广泛的地下水脆弱性评价方法。

国内地下水脆弱性评价工作约在 1995 年起步^[5-7],自我国跟欧盟 1996 年合作引进了 DRASTIC 模型方法后,杨庆等^[8-9]在大连、广州等地区采用 DRASTIC 模型方法进行了地下水脆弱性评价研究,中国地质调查局在 2004 年把 DRASTIC 方法列入 GWI-D3《地下水脆弱性评价技术要求》,将其作为

基金项目:科技基础性工作专项(2012FY130400);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07201006)

作者简介:张川(1989—),男,硕士研究生,研究方向为水环境遥感。E-mail:zhangchuan0803@163.com

通信作者:唐蕴,教授级高级工程师,博士。E-mail:tangyun@iwhr.com

地下水脆弱性评价的推荐方法^[10]。

呼伦贝尔高平原地区(以下简称研究区)由于工矿企业和农牧业比较发达,且地下水开采布局不合理,分布不均,加之不规范的地下水开发利用,导致区内地下水受到污染的可能性较大,同时对境内自然保护区的生态环境造成潜在威胁。因此,对研究区开展地下水脆弱性评价工作具有重要的现实意义。本文基于 DRASTIC 模型提出了 DRASL 评价方法,利用层次分析法确定各指标权重,结合 ArcGIS 平台对研究区浅层孔隙水脆弱性进行评价分析,为该地区地下水资源的保护和可持续利用提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区境内东北部,北纬 47°38′~49°58′、东经 116°10′~120°11′之间,北以额尔古纳河为界与俄罗斯接壤,南抵蒙古,西邻呼伦湖,东连鄂温克自治旗。面积约 3.72 万 km²,占自治区总土地面积的 3.14%,行政区划包括海拉尔区、鄂温克自治旗、陈巴尔虎旗、新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗及满洲里市。区内大部分地区仍保留着完整的天然草原景观,是东北地区现存最大的草原畜牧业基地。

研究区深居内陆,纬度偏高,远离海洋,属中温带大陆季风和半干旱草原气候。多年平均气温 0~3℃,多年平均降水量 250~400 mm,多年平均蒸发量在 1000~2000 mm 间变化。降水量自东向西递减,同降水量分配相反,蒸发量自东向西逐渐增大。区内主要流经的河流有海拉尔河、额尔古纳河、乌尔逊河、克鲁伦河、辉河和伊敏河等,与研究区毗邻的两大湖泊为呼伦湖和贝尔湖,形成了广袤的冲积平原、沙质波状高平原、湖滨平原、沼泽湿地以及沙地。区内现有辉河和呼伦湖两大国家级自然保护区,在保护珍稀鸟类、湿地、草原和森林生态系统方面有着重要的生态价值。2012 年,呼伦贝尔市水资源总量为 272.94 亿 m³,人均占有量约为 1.07 万 m³,水资源人均占有量比较丰富。

区内第四系地层分布广泛,全新统至下更新统地层均有分布,由于所处的地貌位置、地层结构和沉积厚度的不同,地下水的赋存条件差异也很大,据此将研究区内地下水划分为两个基本类型:松散岩类孔隙水、基岩裂隙水,其中,松散岩类孔隙水含水层是区内的主要含水层,主要分布在河谷平原、波状高平原及沼泽湿地中。含水层主要由砂、砂砾石、含黏土砂砾石组成,因为所处的地貌位置以及含水层结构、岩性、补径排条件的差异,其富水性也有明显的不同。研究区内孔隙潜水的主要补给来源是大气降

水,南部的孔隙水也接受贝尔湖和哈拉哈河地表水的侧向补给。研究区内潜水水化学特征有着一定的水平分带性,与区域内地下水的补给区、径流区和排泄区的分布情况是一致的,在高原大部分区域内,由于地下水受地形起伏的控制,径流情况较差,地下水中各离子含量较高,一般为重碳酸硫酸氯化物或重碳酸氯化物型水,矿化度为 1~3 g/L,且部分离子含量超标,受人为因素影响较大。

2 研究区水资源及开发利用现状

2012 年研究区县级行政区总供水量为 4.75 亿 m³,地表水供水量约为 1.92 亿 m³,地下水供水量约为 2.83 亿 m³,各县级行政区供水量情况见表 1。

表 1 2012 年研究区各县级行政区供水量 万 m³

县级行政区	地表水供水量				地下水 供水量	总供 水量
	蓄水	引水	提水	合计		
满洲里市			948	948	2856	3804
新巴尔虎左旗	190	13300		13490	2092	15582
新巴尔虎右旗		2630		2630	1400	4030
陈巴尔虎旗		252		252	6747	6999
海拉尔区			1	1	9808	9809
鄂温克族自治旗	210	1650		1860	5402	7262

2012 年研究区县级行政区总用水量 of 4.79 亿 m³,地下水用水量约为 2.83 亿 m³,占总用水量的 59.08%。其中,农业灌溉用水 3035 万 m³,林牧渔业用水 7399 万 m³,工业用水 2.03 亿 m³,城镇公共用水 923 万 m³,居民生活用水 2567 万 m³,生态用水 1.36 亿 m³。

3 研究区浅层地下水脆弱性评价

由于研究区内含水层水力传导系数和包气带介质数据难以获取,可采用已有的含水层介质和土壤介质类型数据代替其进行评价;该区地形坡度基本上在 2% 以内,地形起伏不大,对污染物的运移变化影响不大,故不用考虑地形坡度的影响;土地利用类型是反映人类活动行为对地下水以及污染物运移影响比较重要的因子,在评价过程中可以考虑选取该评价因子。据此,结合研究区实际水文地质条件,本文选择了影响地下水脆弱性的地下水位埋深(D)、含水层净补给量(R)、土壤介质(S)、含水层组岩性(A)和土地利用类型(L)5 个评价指标,建立基于 DRASTIC 模型的 DRASL 评价指标体系对研究区浅层地下水脆弱性进行评价。

3.1 指标数据的选取

a. 地下水位埋深。地下水位埋深是地下潜水水面到地表之间的距离,表征了水从地表入渗进入到含水层所经历的路程长短,据此可以确定污染物

与周围介质的接触时间,是评价模型当中最重要的影响因子。一般来说,地下水位埋深越大,污染物在迁移时被稀释或降解的可能性就越大,地下水脆弱性就越低;反之,地下水位埋深越小,地下水脆弱性也就越高。研究区的地下水位埋深多在 0 ~ 50 m 之间,差异较大,本文收集到的地下水位埋深数据来自于当地水利部门调查的研究区 138 眼地下水监测井数据,在 ArcGIS 平台中处理后可得到研究区地下水位埋深分布图,等级评分见表 2。

b. 含水层净补给量。含水层的净补给量是地表水入渗进入地下并最终进入到含水层的水量,可以通过年降水量减去年蒸发量、地表径流量及植物和土壤蓄水量来获取含水层的净补给量数据。一般来说,含水层净补给量越多,污染物随着地表水入渗迁移进入到含水层的量也就越大,地下水脆弱性越高;反之,含水层净补给量越少,地下水脆弱性也就越低。但随着净补给量的增加,污染物被稀释、降解以及发生氧化还原反应的可能性也就越高,反而地下水脆弱性会降低。研究区含水层的补给项主要包括降雨入渗和灌溉入渗,本文收集到的含水层净补给量数据来源于当地水利部门水资源调查评价成果,是 2014 年以县为单位统计的补给量的平均值,包括降雨入渗补给量和灌溉入渗补给量,在 ArcGIS 平台中处理后可得到研究区含水层净补给量分布图,等级评分见表 2。

c. 含水层介质。含水层是能够给出或透过一定水量的岩层和土层。含水层中地下水的流动受含水层介质的制约,相应的污染物随水流迁移也受地下水流和含水层介质的影响。一般来说,含水层介质颗粒越大,渗透系数越大,含水层介质的稀释能力越小,地下水脆弱性越高;反之,含水层介质颗粒越小,渗透系数越小,地下水脆弱性越低。研究区内地下水含水层主要为松散岩类孔隙含水层,本文收集到的含水层介质类型数据来源于中国地质调查局全

国地质资料馆纸质报告,扫描并在 ArcGIS 平台中处理后可得到研究区含水层介质类型分布图,等级评分见表 2。

d. 土壤介质。土壤介质是非饱和带上部具有生物活动的部分,通常为平均厚度 2 m 或小于 2 m 的地表风化层。土壤介质对渗入到含水层的地下水补给量有一定的影响,因而污染物在随水流入渗到含水层的过程中也会受到影响。一般来说,土壤介质颗粒大小、有机质含量、黏土矿物含量、黏土的胀缩性能、含水量等对地下水脆弱性有着很大影响,土壤介质颗粒越小、黏土矿物含量越高、土壤的胀缩性越小、有机质含量越高、含水量越高,地下水脆弱性越低;反之地下水脆弱性越高。研究区的土壤介质大部分为砂土以及砂质壤土,对当地的地下水脆弱性影响较大,本文收集到的土壤介质类型数据来源于“中国土壤科学数据库 2011 版”(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所数字土壤实验室制作),经 ArcGIS 平台处理后可得到研究区土壤介质类型分布图,等级评分见表 2。

e. 土地利用类型。土地利用类型是人类在改造利用土地进行生产和建设的过程中所形成的各种具有不同利用方向和特点的土地利用类别。人类活动的不断加剧是导致地下水环境受到破坏的主要原因之一,而土地利用类型的变化则是人类活动的真实写照,主要表现在不同的地表覆盖物对降水入渗和蒸发的影响,从而影响到地下水的补给和排泄,进而污染物的运移也会受到相应的影响,可以通过对土地利用类型变化的研究来分析其对地下水脆弱性高低的影响。本文收集到的是土地利用类型数据来源于研究区 2014 年 5—9 月的 TM 遥感影像,分辨率 30 m,通过遥感解译并根据研究区实际情况将土地利用类型分为耕地、草地、林地、未利用土地、水域以及城乡、工矿和居民用地等 6 种类型,在 ArcGIS 平台中处理后可得到研究区土地利用类型分布图,

表 2 DRASL 评价指标等级划分和赋值

地下水位埋深		含水层净补给量		含水层介质		土壤介质		土地利用类型	
范围/m	评分	范围/(mm · a ⁻¹)	评分	类型	评分	类型	评分	类型	评分
(0,1.5]	10	(0,50.8]	1	流纹岩、凝灰岩、安山岩	3	砂土	9	未利用土地	1
(1.5,4.6]	9	(50.8,101.6]	3	砂	4	砂质壤土	6	林地	2
(4.6,9.1]	7	(101.6,177.8]	6	粉细砂、含黏土砂砾石、中细砂	5	壤土	5	草地	3
(9.1,15.2]	5	(177.8,182]	8	细砂	6	砂质黏壤土、粉砂质黏壤土	4	水域	5
(15.2,22.9]	3			砂砾岩、细砂(中粗砂)	7	黏质壤土、壤黏土	3	耕地	6
(22.9,30.5]	2			砂砾岩、砂砾石、细砂	8	黏土	2	城乡、工矿和居民用地	9
>30.5	1					重壤土	1		

等级评分见表 2。

3.2 评价指标权重的确定

本文基于层次分析法(AHP)^[11]确定 DRASL 评价方法中各评价指标的权重大小, 尽量避免传统模型中权重赋值过程中人为因素的干扰, 针对目标层, 对准则层的 5 个评价指标采用 1~9 标度法比较; 地下水位埋深不仅影响含水层补给量的大小, 而且也影响污染物进入到含水层的能力, 是 5 个评价指标中最重要的因子; 而土地利用类型决定了含水层净补给量的大小以及地形的起伏, 影响力比地下水位埋深稍弱; 其次是含水层净补给量, 该因子的大小直接决定了进入到含水层污染物的数量, 比之土地利用类型影响力稍弱; 对研究区来说, 其含水层组岩性主要是砂、砂砾石以及砂砾岩等, 土壤介质类型主要为砂土以及砂质壤土, 对地下水脆弱性的影响区别不大, 但污染物迁移最终进入含水层, 两者中含水层介质又稍显重要。

根据以上分析, 在参考研究区实际水文地质条件基础上, 考虑到 5 个指标对地下水脆弱性影响程度不同, 可将土壤介质取标度 2, 含水层介质取标度 3, 含水层净补给量取标度 4, 土地利用类型取标度 5, 地下水位埋深取标度 6。采用层次分析法计算并经一致性检验后获得地下水位埋深、土地利用类型、含水层净补给量、含水层介质、土壤介质这 5 个评价指标的权重依次为 0.30、0.25、0.20、0.15、0.10。

4 评价结果及分析

4.1 评价结果

在 ArcGIS 软件中选取栅格为基本的评价单元, 栅格大小 100 m×100 m, 栅格数 3 027×2 644 个, 将 5 个评价指标按划分的权重进行空间叠加, 可以得到研究区浅层地下水脆弱性分区结果如图 1 所示。

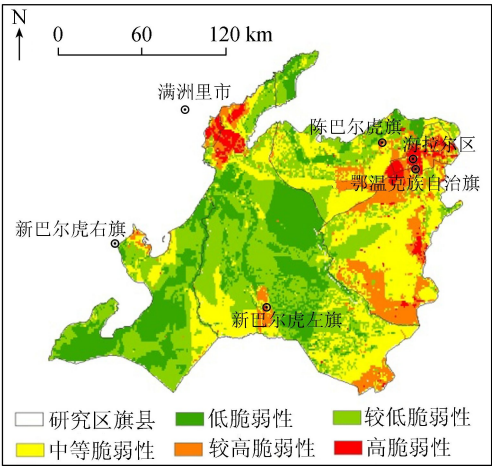


图 1 研究区浅层地下水脆弱性分区

按照自然间断点分级法将研究区脆弱性指数分

为 5 个区间: 低脆弱性 [1.50, 2.79), 较低脆弱性 [2.79, 3.34), 中等脆弱性 [3.34, 3.90), 较高脆弱性 [3.90, 4.63), 高脆弱性 [4.63, 7.48]。

4.2 结果分析

a. 低脆弱性及较低脆弱性区。主要位于高平原区新巴尔虎左旗境内西北部、西南新巴尔虎右旗境内以及海拉尔河以北低山丘陵、额尔古纳河东南冲积平原一带, 分布面积 2.07 万 km², 占高平原区总面积的 55.6%。该区地下水位埋深较大, 多在 23~50 m 范围内, 含水层自净能力较强, 土壤类型以黏土和黏壤土为主, 大部分为牧区, 土地利用方式以草地为主, 除北部海拉尔河一带降水补给较多外, 其他大部分地区降水补给少, 且该地区人口不密集, 耕地、城镇稀少, 对地下水的开发利用很少, 地下水脆弱性相对较低。

b. 中等脆弱性地区。主要位于高平原区南部乌尔逊河以东冲积平原、东部伊敏河以西一带、辉河以南冲积平原一带以及海拉尔河中下游一带, 分布面积 1.10 万 km², 占高平原区总面积的 29.6%。该区地下水位埋深在 10~20 m 之间, 主要接受大气降水入渗补给, 部分地区接受河流侧向补给, 含水层岩性以细砂、砂岩、砂砾岩为主, 含水层具有一定的自净能力, 会有少许污染物随水流进入到含水层, 土壤以砂土、砂质壤土为主, 土地利用以草地为主, 有少部分未利用土地, 含水层净补给量在 100 mm/a 以下, 地下水脆弱性中等。

c. 较高脆弱性及高脆弱性区。主要位于高平原区东北海拉尔区、陈巴尔虎旗和鄂温克族自治旗两旗政府驻地周边、满洲里市东郊、辉河以北冲积平原以及新巴尔虎左旗阿木古郎镇周边, 分布面积 0.55 万 km², 占总面积的 14.8%。该区地下水类型主要为松散岩类孔隙水, 地下水位埋深浅, 多在 0~10 m 之间, 污染物易进入含水层, 含水层自净能力较差, 含水层净补给量在 150~200 mm/a 之间, 土地利用以耕地及城乡、工矿和居民用地为主, 其次为草地。该区人口密集, 人类活动频繁, 农牧业及工矿业较发达, 地下水开采量大, 水位水质易受影响, 地下水脆弱性高。

根据研究区地下水脆弱性评价分区结果, 提出地下水污染预防对策: ①对研究区内地下水脆弱性高的地区, 例如海拉尔区、陈巴尔虎旗和鄂温克族自治旗两旗政府驻地周边、满洲里市东郊以及辉河以北冲积平原, 应颁布相关管理条例, 规范地下水开采行为和农药化肥的使用情况; 对地下水脆弱性低的地区, 例如广大草原牧区, 应加强地下水监测和管理, 防止人为污染; ②对一些地下水脆弱性高且以开

采地下水为主的地区,例如满洲里市铁路水源地一带和城镇人口聚集区,应尽快建立水源地保护区,采取有效保护隔离措施,避免地下水遭到污染而无法保障供水安全;③在已受到污染的含水层地带,应该开展地下水修复及土壤修复工作。

4.3 敏感性分析

由于水文地质条件不同,相同的地下水脆弱性评价指标在不同的研究区影响程度是不一样的,例如在华北平原地下水位埋深是很重要的影响因子,对地下水脆弱性有着很大的影响;而在地下水位埋深差异小的地区,影响则不是那么明显。

对影响研究区地下水脆弱性的评价指标进行敏感性分析,讨论每个指标参与评价的必要性,分析判断对该区地下水脆弱性影响最高和最低的指标,也是对地下水脆弱性评价指标选取合理性的一个验证。敏感性高的评价指标对地下水脆弱性影响较大,在野外调查和室内数据资料收集时应着重考虑,增加采样密度,提高数据精度;敏感性低的评价指标对地下水脆弱性影响较低,可以适当放宽其数据要求;敏感性最低的指标,在需要调整地下水脆弱性评价指标体系时可以考虑去掉。

目前地下水脆弱性评价中有两种敏感性分析方法,分别是由 Napolitano 等^[12]提出的单参数敏感分析法和 Lodwick 等^[13]提出的地图移除参数分析法,本文采用单参数敏感分析法对研究区脆弱性评价参数进行指标敏感性分析。单参数敏感分析法用于评价每个指标对地下水脆弱性的影响,通过计算每个指标的有效权重进行分析。有效权重是每个指标评分和对应权重的乘积占研究区地下水脆弱性指数的百分比,计算公式为

$$W = \frac{P_r W_p}{I} \times 100\%$$
 (1)

式中:W 为单指标有效权重;P_r 为指标评分;W_p 为指标对应权重;I 为地下水脆弱性指数。

计算结果(表 2)表明,有效权重平均值从大到小依次为地下水位埋深(34.50%)、土地利用类型(27.60%)、含水层净补给量(14.41%)、土壤介质(12.65%)和含水层介质(10.84%),其中,地下水位埋深和土地利用类型是影响研究区地下水脆弱性

表 2 研究区评价指标有效权重分布

评价指标	指标有效权重/%			
	最大值	最小值	平均值	标准差
地下水位埋深	70.10	5.30	34.50	6.3
含水层净补给量	51.40	3.03	14.41	3.0
含水层介质	38.10	9.20	10.84	4.4
土壤介质	47.06	1.60	12.65	3.6
土地利用类型	93.70	3.40	27.60	5.0

最重要的两个指标,敏感性较高;含水层净补给量、土壤介质和含水层介质敏感性稍低,三者对研究区地下水脆弱性影响程度基本一致。总体来看,不存在敏感性特别低的评价指标,选取指标较为合理。本文基于层次分析法确定的评价指标的权重值(地下水位埋深 0.30、土地利用类型 0.25、含水层净补给量 0.20、含水层介质 0.15 和土壤介质 0.10),与敏感性分析得到的有效权重相比,差异较小,指标权重确定较为合理。

5 结 论

a. 研究区地下水脆弱性整体上处于较低水平,地下水防污性能良好,较高脆弱性及高脆弱性地区分布面积为 0.55 万 km²,仅占研究区总面积的 14.8%,这些地区人口密集,存在着农业、工业和生活污染源,易随水流迁移进入含水层污染地下水。

b. 通过敏感性分析与层次分析法相互验证,可知选取的 5 个评价指标以及权重分配较为合理,其中,地下水位埋深和土地利用类型是影响研究区地下水脆弱性的最重要因素,如何搜集这两个评价指标更为准确和具有代表性的数据是该地区地下水脆弱性评价工作的关键。

参考文献:

[1] ALLER L, BENNETT T, LEHR J H, et al. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings[R]. Oklahoma: U. S. Environmental Protection Agency, 1987.

[2] ROSEN L. A study of the DRASTIC methodology with emphasis on swedish conditions [J]. Ground Water, 1994, 32(2): 278-285.

[3] GENNARO P. Groundwater vulnerability map explanatory notes-castlereagh catchment [R]. Sydney: Centre for Natural Resources, NSW Department of Land and Water Conservation, 2001.

[4] Water Science and Technology Board, National Research Council. Ground water vulnerability assessment contamination potential under conditions of uncertainty [M]. Washington D C: National Academy Press, 1993.

[5] 孙才志, 潘俊. 地下水脆弱性的概念、评价方法与研究前景[J]. 水科学进展, 1999, 10(4): 444-449. (SUN Caizhi, PAN Jun. Concept and assessment of groundwater vulnerability and its future prospect [J]. Advances in Water Science, 1990, 10(4): 444-449. (in Chinese))

[6] 郭晓静, 周金龙, 靳孟贵, 等. 地下水脆弱性研究综述 [J]. 地下水, 2010, 32(3): 1-5. (GUO Xiaojing, ZHOU Jinlong, JIN Menggui, et al. Overview of the research on groundwater vulnerability [J]. Ground Water, 2010, 32(3): 1-5. (in Chinese)) (下转第 32 页)

学版), 2008, 33 (1): 16-19. (MA Rongyong, ZHENG Erwei, WANG Kui, et al. Application of the main component analysis method in comprehensive evaluation of the water resources sustainable utilization in Guangxi Province [J]. Journal of Guangxi University (Natural Sciences), 2008, 33 (1): 16-19. (in Chinese))

[23] 杜朝阳, 钟华平, 于静洁. 可持续水资源系统机制研究 [J]. 水科学进展, 2013, 24 (4): 581-588. (DU Chaoyang, ZHONG Huaping, YU Jingjie. Mechanism of sustainable water resources system [J]. Advances in Water Science, 2013, 24 (4): 581-588. (in Chinese))

[24] 邓楚雄, 谢炳庚, 吴永兴, 等. 上海都市农业可持续发展的定量综合评价 [J]. 自然资源学报, 2010, 25 (9): 1577-1586. (DENG Chuxiong, XIE Binggeng, WU Yongxing, et al. The quantitative & comprehensive appraisal of urban agricultural sustainable development in Shanghai [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25 (9): 1577-1586. (in Chinese))

[25] NUCSD. Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies [R]. New York: NUCSD Publication, 1995.

[26] 刘兴元, 王玮. 藏北草地生态系统可持续发展能力评价 [J]. 自然资源学报, 2013, 28 (7): 1209-1220. (LIU Xingyuan, WANG Wei. Evaluation of rangeland ecosystem sustainability of the northern Tibetan region, China [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28 (7): 1209-1220. (in Chinese))

[27] 余丹林. 区域可持续发展评价指标体系的构建思路 [J]. 地理科学进展, 1998, 17 (2): 84-89. (YU Danlin. Recognition and thoughts on constructing the index system of regional sustainable development [J]. Progress in Geography, 1998, 17 (2): 84-89. (in Chinese))

[28] 黄初龙, 章光新, 杨建峰. 中国水资源可持续利用评价指标体系研究 [J]. 资源科学, 2006, 28 (2): 34-40. (HUANG Chulong, ZHANG Guangxin, YANG Jianfeng. Indicators system for sustainability assessment of water resources use in China [J]. Resources Science, 2006, 28 (2): 34-40. (in Chinese))

[29] SAATY T L. The analytic hierarchy process, planning, priority setting, resource allocation [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.

[30] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. Mobile Computing and Communications Review, 1948, 5 (1): 3-55.

[31] 刘晓洁, 沈镭. 资源节约型社会综合评价指标体系研究 [J]. 自然资源学报, 2006, 21 (3): 382-391. (LIU Xiaojie, SHEN Lei. Indicators and comprehensive appraisal system for saving society [J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21 (3): 382-391. (in Chinese))

[32] 辽宁省环境保护厅. 2003—2013 年辽宁省环境状况公报 [EB/OL]. [2014-05-26]. <http://www.lnepb.gov.cn/zfxxgk/hjzl/hjzlkgb/>.

[33] 辽宁省水利厅. 2011-2013 年辽宁省水资源公报 [EB/OL]. [2014-05-26]. http://www.dwr.ln.gov.cn/inverse01_121_1.htm.

[34] 辽宁省统计局. 2003-2013 年辽宁省国民经济与社会发展统计公报 [EB/OL]. [2014-05-26]. <http://www.ln.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/>.

(收稿日期: 2015 - 05 - 27 编辑: 彭桃英)

(上接第 23 页)

[7] 刘淑芬, 郭永海. 区域地下水防污性能评价方法及其在河北平原的应用 [J]. 河北地质学院学报, 1996, 19 (1): 41-45. (LIU Shufen, GUO Yonghai. Evaluation method of groundwater vulnerability and its application in Hebei plain [J]. Journal of Hebei College of Geology, 1996, 19 (1): 41-45. (in Chinese))

[8] 杨庆, 栾茂田. 地下水易污性评价方法: DRASTIC 指标体系 [J]. 水文地质工程地质, 1999, 26 (2): 4-9. (YANG Qing, LUAN Maotian. Evaluation method of groundwater vulnerability to pollution: DRASTIC index system [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, 26 (2): 4-9. (in Chinese))

[9] 杨庆, 栾茂田, 周集体, 等. DRASTIC 指标体系法在大连市地下水易污性评价中的应用 [J]. 大连理工大学学报, 1999, 39 (5): 684-688. (YANG Qing, LUAN Maotian, ZHOU Jiti, et al. Study of application of DRASTIC index to assessment of groundwater vulnerability to pollution of Dalian City [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1999, 39 (5): 684-688. (in Chinese))

[10] 鄂建, 孙爱荣, 钟新永. DRASTIC 模型的缺陷与改进方法探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2010, 37 (1): 103-106. (E Jian, SUN Airong, ZHONG Xinyong. Inadequacies of DRASTIC model and discussion of improvement [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37 (1): 103-106. (in Chinese))

[11] SAATY T L, BENNETT J P. A theory of analytical hierarchies applied to political candidacy [J]. Behavioral Science, 1977, 22: 237-245.

[12] NAPOLITANO P, FABBRI A G. Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS [M]. [S. l.]: Lahs Publications, 1996: 559-566.

[13] LODWICK W A, MONSON W, SVOBODA L. Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical informations systems: suitability analysis [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1990, 4 (4): 413-428.

(收稿日期: 2015 - 04 - 01 编辑: 熊水斌)

(上接第 23 页)