

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.003

基于减法集对势的大兴区地下水开采强度评价与诊断

门宝辉,李晨,尹世洋

(华北电力大学水利与水电工程学院,北京 102206)

摘要:为定量评价大兴区地下水开采强度,识别引起地下水开采强度增加的主要因素,基于集对分析构建了地下水开采强度评价模型,对研究区2006—2016年地下水开采强度进行了动态评价,并利用减法集对势识别了影响地下水开采强度的主要因子。结果表明:研究区2006—2016年地下水平均开采强度为中等强度,且有逐步恶化的趋势;2010年、2013年地下水开采强度平均联系数的减法集对势分别处于偏反势、反势,是地下水开采强度重点调控的年份;2010年有3个指标联系数的减法集对势处于偏反势或反势,分别为工业产值、第三产业产值和水浇地面积,涉及乡镇分别为3个、3个、5个,2013年有5个指标联系数的减法集对势处于偏反势或反势,分别为水浇地面积、菜田面积、设施农业面积、果园面积、机井数,涉及乡镇分别为5个、3个、7个、1个、4个。

关键词:地下水开采强度;地下水保护;减法集对势;联系数;大兴区

中图分类号:P641.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0017-09

Evaluation and diagnosis of groundwater exploitation intensity in Daxing District based on subtraction set pair potential//MEN Baohui, LI Chen, YIN Shiyang (College of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming to quantitatively evaluate the groundwater exploitation intensity in Daxing District and identify the main factors, a diagnostic evaluation model based on set pair analysis was established. A dynamic evaluation was performed on the groundwater exploitation intensity in the study area from 2006 to 2016, and key factors were identified. The results show that the average groundwater exploitation intensity in the study area from 2006 to 2016 was at a medium level and appeared a trend of gradual deterioration. The subtraction set pair potential of the average connection numbers of groundwater exploitation intensity in 2010 and 2013 were in partially inverse potential and inverse potential, respectively, which should be the key control years of groundwater exploitation intensity. In 2010, three indices, including the industrial GDP, tertiary industry GDP, and irrigated land area, had subtraction set pair potentials of their connection numbers being in partially inverse potential or inverse potential, involving three, three, and five towns, respectively. In 2013, five indices, including the irrigated land area, vegetable field area, facility agriculture area, fruit field area, and number of motor-pumped wells, had subtraction set pair potentials of their connection numbers being in partially inverse potential or inverse potential, involving five, three, seven, one, and four towns, respectively.

Key words: groundwater exploitation intensity; groundwater protection; subtraction set pair potential; connection number; Daxing District

地下水作为一种重要的淡水资源,约占我国水资源总量的1/3。20世纪80年代以来,伴随着经济社会的快速发展,地下水的开发强度不断增加,尤其在华北、西北地区,地下水利用率已超过60%^[1]。北京市1999—2014年地下水位埋深从

14.21 m下降至25.66 m,年均下降约0.72 m,即使南水北调入京后,地下水在北京市的用水结构中依然占很大的比例。因此,如何兼顾地下水的开发、利用与保护成为亟待解决的社会问题。目前用于水资源评价的方法主要包括:投影寻踪

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401406)

作者简介:门宝辉(1973—),男,教授,博士,主要从事水文与水资源研究。E-mail:menbh@ncepu.edu.cn

通信作者:李晨(1989—),男,博士研究生,主要从事水资源综合评价研究。E-mail:lichen5969@sina.com

法^[2-3]、多目标决策分析法^[4]、模糊综合评价法^[5-8]、综合指标法^[9-11]、系统动力学方法^[12]、主成分分析法^[13],这些方法均从宏观层面对水资源进行整体评价,缺乏从微观层面分析主要驱动因素对整体评价的影响,在处理评价指标与评价标准之间不确定的问题时,存在一定的局限性。集对分析相对于上述传统方法,能从同异反3个方面反映评价指标与评价标准之间的关系,评价维度更加丰满,能够更全面地显示评价指标对样本的影响;针对集对分析的联系数发展出了丰富的伴随函数,可从微观层面诊断识别影响整体评价的主要驱动指标^[14-18]。目前针对集对分析联系数的伴随函数主要包括:邻联系数^[19]、偏联系数^[20-21]、减法集对势^[22-24]、效应全偏联系数^[25]。金菊良等^[26-27]利用半偏法集对势建立了区域旱灾动态评估方法,应用于苏州市2007—2017年旱灾风险动态评估和风险脆弱性因子识别,并构造减法全邻数,通过实例验证,证明了减法全邻数可用于判断水资源承载力的发展趋势。孙爱峰等^[28]采用联系数分析不同地区公共场所卫生监督质量的发展趋势;王颖等^[29]通过改进的集对分析构建了地表水水质评价模型,经验证,评价结果更加符合实际情况;金菊良等^[30]基于集对分析构建了水资源相似预测模型,预测精度较高,且计算直观简便。

本文收集了北京市大兴区多年的统计资料,通过联系数的减法集对势评价人类活动对地下水开采强度的影响,为地下水的管理和保护提供技术支持。

1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区概况

大兴区位于北京市南郊平原区,地处东经 $116^{\circ}13' \sim 116^{\circ}43'$ 、北纬 $39^{\circ}26' \sim 39^{\circ}51'$,其行政区包括14个乡镇(图1),面积约为 1036 km^2 。区域属于暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候,四季分明,冬春寒冷少雨,夏季炎热多雨,秋季天高气爽。多年平均降水量为 510.1 mm ,降水量年内分配不均,年际变化较大。多年平均气温为 11.7°C ,最大冻土深度为 69 cm 。区域属永定河冲洪积平原,地势平坦,海拔 $9 \sim 73\text{ m}$,地形坡度为 $0.05\% \sim 0.20\%$ 。

1.2 研究数据

本文所用数据主要来自《北京市水务统计年鉴(2012—2017)》《大兴区统计年鉴(2005—2017)》、2013年北京市水务普查《地下水取水井普查成果》和2016年《北京市大兴区第三次农业普查资料汇编》等统计资料。

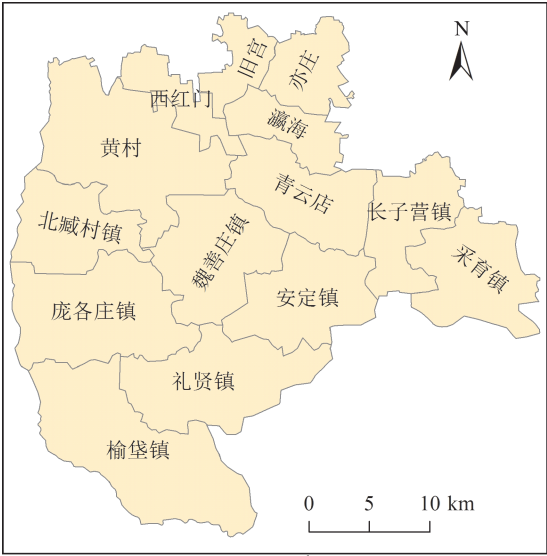


图1 研究区区划

Fig.1 Zoning of study area

2 研究方法

2.1 基于集对分析对地下水开采强度的评价

为建立地下水开采强度联系数的减法集对势,首先基于集对分析计算联系数并确定开采强度等级,主要分为以下5个步骤:

步骤1 确定区域地下水开采强度评价指标及评价标准。区域供水主要来源于地下水和再生水,其中,地下水约占总供水70%;再生水约占总供水30%,主要用于河道生态用水。研究区用水类型主要包括农业用水、工业用水、第三产业用水、生活用水和生态用水。农业用水主要为粮田、菜田、设施农业、果树灌溉,因此取各类农业用水的灌溉面积作为评价指标;工业用水、第三产业用水分别采用工业产值、第三产业产值作为评价指标;生活用水采用人口数作为评价指标;收集研究区的机井数作为地下水开采强度的直观评价指标。因此,本文依据实用性、层次性、可操作性的原则^[31-32],选取大兴区及辖区内各乡镇区域2006—2016年的人口数、工业产值、第三产业产值、水浇地面积、菜田面积、设施农业面积、果园面积、机井数作为评价指标,并采用熵权-层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)^[33]确定了各指标的权重,如图2所示(括号中数据为指标权重)。参考已有研究成果^[34],并综合考虑经济、社会、生态等因素和专家意见,将涉及的指标分为3个等级,分别代表地下水开采强度的弱(1级)、中(2级)、强(3级)等级,如表1所示。

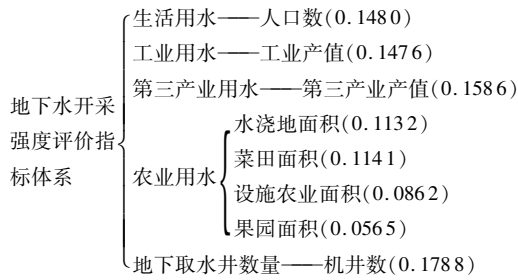


图2 大兴区地下水开采强度评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of groundwater exploitation intensity in Daxing District

步骤2 计算样本联系数。采用集对分析计算样本联系数,公式为

$$u_{di} = \sum_{j=1}^{n_1} w_j + \sum_{j=n_1+1}^{n_1+n_2} w_j I + \sum_{j=n_1+n_2+1}^{n_1+n_2+n_3} w_j J = v_{di1} + v_{di2}I + v_{di3}J \quad (1)$$

式中: u_{di} 为样本 i 的三元联系数; n_1 、 n_2 、 n_3 分别为样本 i 的指标落在 1 级、2 级、3 级的个数; w_j 为第 j 个指标的权重值; v_{di1} 、 v_{di2} 、 v_{di3} 为样本 i 的联系数分量, 分别称为样本集对的同一度、差异度和对立度; I 、 J 分别为差异度系数和对立度系数。

步骤3 计算评价指标联系数。为获得评价指标 x_{ij} 与评价标准 S_{lj} 之间的隶属度, 需计算评价指标联系数 u_{ijk} , 其中 i 、 j 分别为样本和指标序号, k 为等级数。

a. 若评价指标为正向指标且 $S_{0j} \leq x_{ij} \leq S_{1j}$, 或指标为反向指标且 $S_{0j} \geq x_{ij} \geq S_{1j}$ 时, 评价指标联系数为

$$\begin{cases} u_{ij1} = 1 \\ u_{ij2} = 1 - \frac{2(x_{ij} - S_{1j})}{S_{2j} - S_{1j}} \\ u_{ij3} = -1 \end{cases} \quad (2)$$

b. 若评价指标为正向指标且 $S_{1j} < x_{ij} \leq S_{2j}$, 或指标为反向指标且 $S_{1j} > x_{ij} \geq S_{2j}$ 时, 评价指标联系数为

$$\begin{cases} u_{ij1} = 1 - \frac{2(S_{1j} - x_{ij})}{S_{1j} - S_{0j}} \\ u_{ij2} = 1 \\ u_{ij3} = 1 - \frac{2(x_{ij} - S_{2j})}{S_{3j} - S_{2j}} \end{cases} \quad (3)$$

c. 若评价指标为正向指标且 $S_{2j} < x_{ij} \leq S_{3j}$, 或指标为反向指标且 $S_{2j} > x_{ij} \geq S_{3j}$ 时, 评价指标联系数为

$$\begin{cases} u_{ij1} = -1 \\ u_{ij2} = 1 - \frac{2(S_{2j} - x_{ij})}{S_{2j} - S_{1j}} \\ u_{ij3} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 S_{0j} 、 S_{1j} 、 S_{2j} 、 S_{3j} 分别为第 j 个指标的最小值、1 级与 2 级临界值、2 级与 3 级临界值和最大值。正向指标等级值随着指标值的增大而增大; 反向指标则相反。

样本指标联系数与评价标准之间的隶属度为

$$v_{ijk}^* = 0.5 + 0.5u_{ijk} \quad (5)$$

对式(5)进行归一化处理, 计算样本 i 的指标联系数 u_{ei} :

$$v_{ijk} = \frac{v_{ijk}^*}{\sum_{k=1}^3 v_{ijk}^*} \quad (6)$$

$$u_{ei} = \sum_{j=1}^{n_1} w_j v_{ij1} + \sum_{j=n_1+1}^{n_1+n_2} w_j v_{ij2} I + \sum_{j=n_1+n_2+1}^{n_1+n_2+n_3} w_j v_{ij3} J = v_{ei1} + v_{ei2}I + v_{ei3}J \quad (7)$$

式中: v_{ijk} 为样本 i 中第 j 个指标的联系数分量; v_{ei1} 、 v_{ei2} 、 v_{ei3} 为样本 i 的指标联系数分量, 分别称为样本指标集对的同一度、差异度和对立度。

步骤4 计算平均联系数。为充分提取样本信息, 将样本联系数与指标联系数取几何平均数得到平均联系数^[22]:

$$v'_{ik} = \frac{(v_{dik} v_{eik})^{0.5}}{\sum_{k=1}^3 (v_{dik} v_{eik})^{0.5}} \quad (8)$$

$$u'_i = v'_{i1} + v'_{i2}I + v'_{i3}J \quad (9)$$

式中: v'_{ik} 为样本 i 的平均联系数分量; u'_i 为样本 i 的平均联系数。

步骤5 确定地下水开采强度评价等级值。采用级别特征值法分别计算样本 i 与第 j 个指标的地下水开采强度评价等级值^[35], 计算公式为

$$h_i = \sum_{k=1}^3 v'_{ik} k \quad (10)$$

$$h_j = \sum_{k=1}^3 v_{ijk} k \quad (11)$$

式中: h_i 为样本 i 对应的地下水开采强度评价等级值; h_j 为第 j 个指标对应的地下水开采强度评价等级值。将地下水开采强度评价等级值 h 划分为 3 个

表1 地下水开采强度评价指标标准等级

Table 1 Standard grade of groundwater exploitation intensity evaluation indices

等级	人口数/ 万人	工业产值/ 亿元	第三产业产值/ 亿元	水浇地面积/ 万 hm ²	菜田面积/ 万 hm ²	设施农业面积/ 万 hm ²	果园面积/ 万 hm ²
弱	<115.90	<109.28	<189.81	<1.23	<0.20	<0.52	<0.46
中	[115.90, 150.70]	[109.28, 202.48]	[189.81, 338.37]	[1.23, 1.29]	[0.20, 0.21]	[0.52, 0.53]	[0.46, 2.09]
强	>150.70	>202.48	>338.37	>1.29	>0.21	>0.53	>2.09

等级, $h \in [1, 1.5)$ 为地下水开采弱等强度; $h \in [1.5, 2.5)$ 为中等强度, $h \in [2.5, 3]$ 为高等强度。

2.2 基于联系数对地下水开采强度的诊断

本文采用联系数的减法集对势识别、诊断影响地下水开采强度的关键指标和发展态势^[22]。减法集对势 s_f 定义为

$$s_f = (a - c)(1 + b) \quad (12)$$

式中 a, b, c 分别为样本 i 或样本指标 j 集对的同一度、差异度和对立度。 $s_f \in [-1, 1]$, 依据“均分原则”, 减法集对势可分为 5 个等级: 反势 $s_f \in [-1, -0.6)$, 偏反势 $s_f \in [-0.6, -0.2)$, 均势 $s_f \in [-0.2, 0.2]$, 偏同势 $s_f \in (0.2, 0.6)$, 同势 $s_f \in (0.6, 1]$ 。同势、偏同势说明研究对象向有利的方向发展; 反势与偏反势说明研究对象向不利的方向发展, 需要对处于该状态的指标进行重点关注和调控; 均势为不确定状态。

减法全邻数通过计算 a, b, c 之间的差值反映事物的发展变化^[27], 计算公式为

$$q = (a - c) + (b - c)(a - b) + (b - a)(c - b) \quad (13)$$

式中 q 为减法全邻数, $q \in [-2, 1.0625]$ 。当 $a = 0, b = 1, c = 0$ 时, $q = -2$; 当 $a = b = 0, c = 1$ 时, $q = -1$; 当 $a = 0.875, b = 0.125, c = 0$ 时, $q = 1.0625$ 。 q 从 -2 变化到 1.0625 , 研究对象的态势从反势逐渐变化到同势, 但是临界状态无法确定。

势函数 S 也可判断集对事件发展的趋势^[19], 其值越大, 说明研究对象越偏向同势, 计算公式为

$$S = ac/b^2 \quad (14)$$

3 结果与分析

3.1 对地下水开采强度的诊断

由图 3 可知, 采用减法集对势 s_f 、开采强度评价等级值 h 、势函数 S 、减法全邻数 q 4 种方法的评价结果基本一致。地下水开采强度评价等级值与其他 3 种方法的走势相反, 地下水开采强度评价等级值越大, 其他 3 种方法评价价值越小。大兴区 2013 年的地下水开采强度评价等级值最大, 2008 年的开采强度评价等级值最小; 2006—2013 年地下水开采强度评价等级值处于增加的趋势; 2014—2016 年地下水开采强度评价等级值略有缓和。全区 2010 年、2013 年地下水开采强度平均联系数的减法集对势分别处于偏反势、反势; 2006 年、2011—2012 年、2014—2016 年处于均势; 2007—2009 年处于偏同势, 这与地下水开采强度评价等级值的计算结果一致。根据评价结果, 大兴区 2006—2016 年地水平均开采强度评价等

级值在 $1.5 \sim 2.5$ 之间, 地水平均开采强度为中等强度, 且有逐步恶化的趋势, 不容乐观; 2010 年和 2013 年地下水开采强度评价等级值分别为 2.31 和 2.45, 是地下水开采重点调控的年份。下文将重点对这两个年份的地下水开采强度和影响因素进行研究。

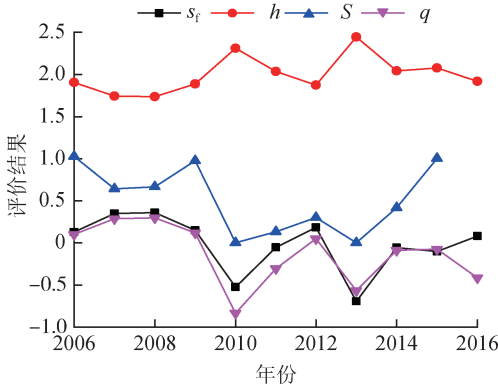


图 3 2006—2016 年大兴区地下水开采强度评价结果

Fig. 3 Evaluation results of groundwater exploitation intensity in Daxing District from 2006 to 2016

3.2 对减法集对势处于不良态势指标的诊断

用评价指标联系数的减法集对势可诊断识别出大兴区 2006—2016 年引起地下水开采量增加的主要指标。人口数联系数的减法集对势在 2010 年和 2013 年分别为 -0.0117 和 0.3991 , 分别处于均势和偏同势, 处于良好态势, 因此本文不对人口数进行分析评价。

由图 4 可知, 2010 年大兴区有 3 个指标联系数的减法集对势处于偏反势或反势, 分别为工业产值 (-0.3284)、第三产业产值 (-0.2510)、水浇地面积 (-0.6815)。2006—2016 年工业产值、第三产业产值联系数的减法集对势趋势基本一致, 2010 年这 2 个指标联系数的减法集对势均出现明显的减小, 原因可能与大兴区产业结构调整有关。大兴区 2009—2010 年大力发展工业和第三产业, 2010 年工业产值、第三产业产值与 2009 年同比分别增长 16.12% 和 17.54%, 发展较快, 造成工业用水和第三产业用水量的快速增加。2009—2013 年水浇地面积联系数的减法集对势持续处于偏反势, 与 2007—2008 年相比减法集对势有明显减小的趋势, 说明水浇地面积有所增加; 而 2014—2016 年水浇地面积联系数的减法集对势出现波动, 说明 2014—2016 年水浇地面积也受到相关政策的影响。

2013 年大兴区有 5 个指标联系数的减法集对势处于偏反势或反势, 分别为水浇地面积 (-0.4925)、

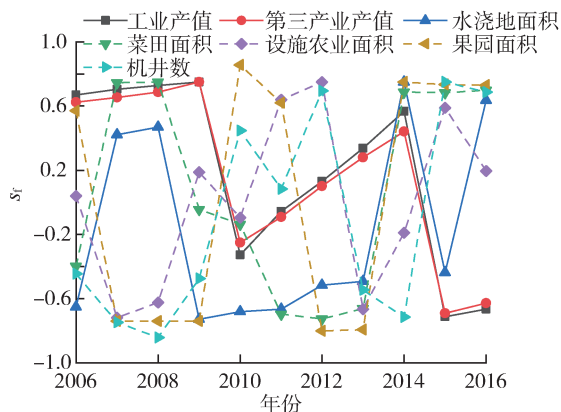


图4 2006—2016年评价指标系数的减法集对势

Fig.4 Subtraction set pair potential of evaluation index connection numbers from 2006 to 2016

菜田面积(−0.6609)、设施农业面积(−0.6657)、果园面积(−0.7926)、机井数(−0.5458)。2008—2013年菜田面积系数的减法集对势有持续减小的趋势,说明菜田面积在该阶段有不断增加的趋势,导致用水量增加;2008—2012年设施农业面积系数的减法集对势有增加的趋势,说明设施农业面积在该阶段有不断减少的趋势,2013年其减法集对势减小,说明设施农业面积相比2012年有所增加;2008—2011年果园面积系数的减法集对势有增加的趋势,2011—2013年有减少的趋势,说明2011—2013年果园面积相比前一阶段有增加的趋势。从图4还可以看出,2014年后,菜田面积、设施农业面积、果园面积系数的减法集对势均处于同势或偏同势,表明农业用水不断减少,这与北京市实行的“农业用水负增长”政策有很大的关系,说明大兴区在践行节水型社会建设方面,有较好的成效。2008—2012年机井数系数的减法集对势出现不断增加的趋势,2012—2014年出现不断减少的趋势,说明2008—2012年机井数有减少的趋势,2012—2014年有增加的趋势,2014年后有减少的趋势。机井数在2008—2014年出现先减少后增加的趋势,说明随着人口数的增长和三大产业的快速发展,对地下水的需求不断增加;2014年后机井数趋于减少,一方面可能与北京市实行的水影响评价审批制度,防止水资源用量无序增长有关;另一方面可能与南水北调进京后,取代部分地下水源有关。

从图5可以看出,各评价指标的地下水开采强度评价等级值与图4中相应各指标系数的减法集对势呈现相反的变化趋势,表明利用减法集对势和地下水开采强度等级值对不良态势指标诊断结果基本一致。

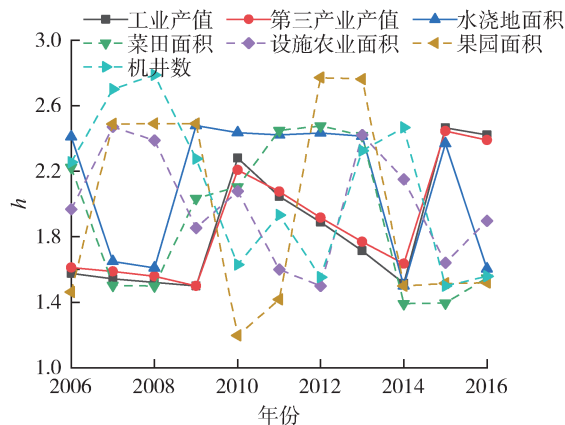


图5 2006—2016年评价指标的地下水开采强度评价等级值

Fig.5 Groundwater exploitation intensity of evaluation indices from 2006 to 2016

3.3 对指标系数减法集对势处于不良态势乡镇的诊断

为进一步识别造成相关指标系数的减法集对势形成不良态势的原因,基于大兴区2010年和2013年系数减法集对势处于不良态势的评价指标,进一步分析各乡镇不同指标系数的减法集对势,为下一步调整产业结构提供依据。

由表2可知,2010年工业产值系数的减法集对势处于不良态势的乡镇有3个,分别为西红门(偏反势)、采育镇(反势)、庞各庄镇(反势);第三产业产值系数的减法集对势处于不良态势的乡镇有3个,分别为旧宫(偏反势)、西红门(偏反势)、北臧村镇(反势);水浇地面积系数的减法集对势处于不良态势的乡镇有5个,分别为青云店(反势)、采育镇(反势)、礼贤镇(反势)、榆垓镇(偏反势)、长子营镇(反势)。由图6(a)可知,2010年以后,西红门、采育镇(除2012年外)、庞各庄镇工业产值系数的减法集对势基本处于偏反势或反势,说明2010年以后这3个乡镇的工业产值有不断增长的趋势,工业用水量不断增加;由图6(b)可知,2006—2010年北臧村镇第三产业产值系数的减法集对势快速减小,2010年以后,第三产业产值系数的减法集对势持续小于−0.6,说明2006年以后北臧村镇的第三产业得到快速发展;2008年起,西红门、旧宫第三产业产值系数的减法集对势持续处于偏反势,2010年减小至−0.3左右,2010—2016年始终小于−0.2,说明西红门、旧宫的第三产业持续有较快的发展;由图6(c)可知,2007—2011年青云店、采育镇、长子营镇水浇地面积系数的减法集对势均处于反势,2011年以后减法集对势迅速增加,变为偏同势,说明水浇地面积在这3个乡镇有减少的趋势;礼贤镇与榆垓镇水浇地面积系数的减法集对势持续维持在−0.6左右,说明礼贤镇与榆垓镇存在大量农业灌溉用水。

表 2 2010 年各乡镇 3 个指标联系数的减法集对势

Table 2 Subtraction set pair potential of connection numbers of three evaluation indices for different towns in 2010

乡镇	工业产值		第三产业产值		水浇地面积	
	s_f	态势	s_f	态势	s_f	态势
亦庄	0.2627	偏同势	0.0090	均势	0.6619	同势
黄村	-0.1646	均势	-0.1035	均势	0.4472	偏同势
旧宫	0.4803	偏同势	-0.3196	偏反势	0.6619	同势
西红门	-0.4916	偏反势	-0.4101	偏反势	0.6680	同势
瀛海	0.3005	偏同势	0.0439	均势	0.7469	同势
青云店	0.4461	偏同势	0.6830	同势	-0.7108	反势
采育镇	-0.7158	反势	0.7058	同势	-0.6830	反势
安定镇	0.0791	均势	0.0194	均势	0.4615	偏同势
礼贤镇	0.6548	同势	0.6770	同势	-0.6347	反势
榆垓镇	0.6667	同势	0.7030	同势	-0.5758	偏反势
庞各庄镇	-0.6950	反势	0.1385	均势	0.1973	均势
北臧村镇	0.6975	同势	-0.6598	反势	-0.1857	均势
魏善庄镇	0.1214	均势	0.1356	均势	0.2638	偏同势
长子营镇	0.6823	同势	0.6925	同势	-0.7014	反势

由表 3 可知,2013 年安定镇(反势)、礼贤镇(偏反势)、榆垓镇(偏反势)、庞各庄镇(反势)、魏善庄镇(反势)是水浇地面积联系数的减法集对势处于不良态势的 5 个乡镇;黄村(反势)、青云店(偏反势)、采育镇(反势)、礼贤镇(反势)、榆垓镇(反势)、庞各庄镇(反势)、长子营镇(反势)是设施农业面积联系数的减法集对势处于不良态势的 7 个乡镇;礼贤镇(偏反势)、榆垓镇(反势)、庞各庄镇(偏反势)是菜田面积联系数的减法集对势处于不良态势的 3 个乡镇;榆垓镇(反势)是果园面积联系数的减法集对势处于不良态势的乡镇;安定镇(反势)、礼贤镇(偏反势)、榆垓镇(反势)、庞各庄镇(反势)是机井数联系数的减法集对势处于不良态势的 4 个乡镇。

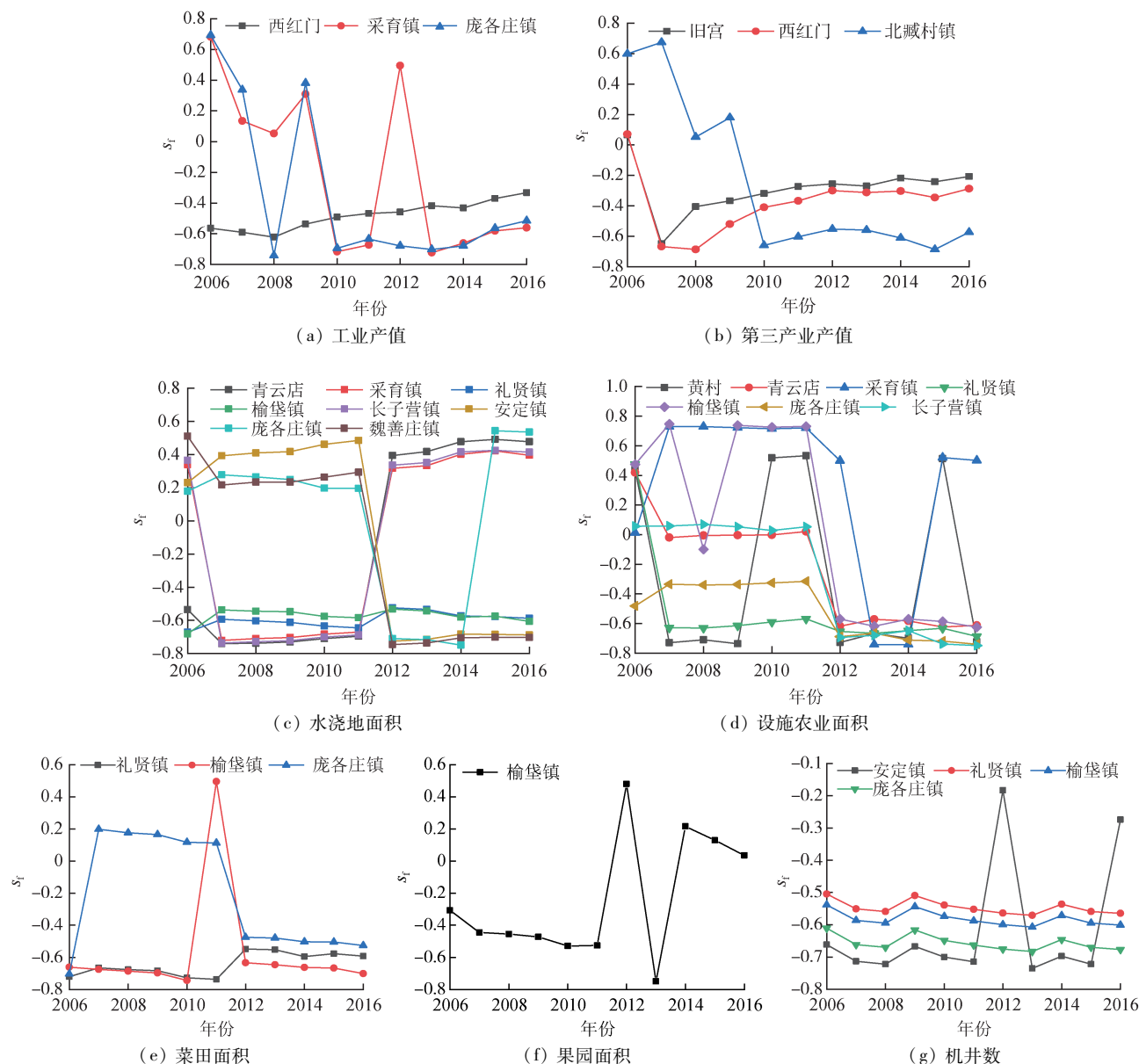


图 6 各乡镇不良态势指标联系数的减法集对势

Fig.6 Subtraction set pair potential of connection numbers of evaluation indices with bad trends for different towns

表3 2013年各乡镇5个指标联系数的减法集对势

Table 3 Subtraction set pair potential of connection numbers of five evaluation indices for different towns in 2013

乡镇	水浇地面积		设施农业面积		菜田面积		果园面积		机井数	
	s_f	态势	s_f	态势	s_f	态势	s_f	态势	s_f	态势
亦庄	0.6619	同势	0.6587	同势	0.6474	同势	0.6405	同势	0.5855	偏同势
黄村	0.7438	同势	-0.6678	反势	0.1481	均势	0.7229	同势	0.2819	偏同势
旧宫	0.6619	同势	0.6587	同势	0.6474	同势	0.6405	同势	0.6234	同势
西红门	0.6619	同势	0.6587	同势	0.6474	同势	0.6405	同势	0.6267	同势
瀛海	0.6679	同势	0.6957	同势	0.7401	同势	0.6574	同势	0.6542	同势
青云店	0.4179	偏同势	-0.5725	偏反势	0.7357	同势	0.2482	偏同势	0.2872	偏同势
采育镇	0.3326	偏同势	-0.7409	反势	0.4806	偏同势	0.4537	偏同势	0.2365	偏同势
安定镇	-0.7158	反势	0.7105	同势	0.4653	偏同势	-0.0208	均势	-0.7355	反势
礼贤镇	-0.5335	偏反势	-0.6661	反势	-0.5516	偏反势	0.2896	偏同势	-0.5709	偏反势
榆垓镇	-0.5433	偏反势	-0.6171	反势	-0.6457	反势	-0.7492	反势	-0.6074	反势
庞各庄镇	-0.7173	反势	-0.6662	反势	-0.4797	偏反势	0.4791	偏同势	-0.6832	反势
北臧村镇	-0.1857	均势	0.1246	均势	0.4270	偏同势	-0.0213	均势	0.7365	同势
魏善庄镇	-0.7366	反势	0.6988	同势	0.1773	均势	0.6935	同势	0.1240	均势
长子营镇	0.3524	偏同势	-0.6788	反势	0.2379	偏同势	0.0835	均势	0.0946	均势

由图6(c)可知,安定镇、庞各庄镇、魏善庄2006—2011年水浇地面积联系数的减法集对势持续处于偏同势,2012年以后,安定镇、魏善庄镇水浇地面积联系数的减法集对势小于-0.6,处于反势,说明安定镇、魏善庄水浇地面积有增加的趋势;而庞各庄镇水浇地面积联系数的减法集对势在2012—2016年出现从反势向偏同势的转变,说明庞各庄镇的水浇地面积有减少的趋势。由图6(d)可知,2011—2014年7个乡镇的设施农业面积联系数的减法集对势均呈现减小的趋势,说明设施农业面积增加。由图6(e)可知,2012年以后,礼贤镇、榆垓镇、庞各庄镇菜田面积联系数的减法集对势呈现减小的趋势,说明这3个乡镇的菜田面积不断增加。由图6(f)可知,2006—2011年榆垓镇果园面积联系数的减法集对势呈现减小的趋势,2012—2016年处于波动状态,2013年减法集对势为最小值-0.75,处于反势,说明与其他年份相比,2013年榆垓镇果园面积达到最大;由图6(g)可知,安定镇、礼贤镇、榆垓镇、庞各庄镇除个别年份外,机井数联系数的减法集对势均处于偏反势或反势,说明这4个乡镇是机井数增加的主要乡镇。

4 结 论

a. 减法集对势法相对于势函数法和减法全邻数具有独特的优势,既可处理差异度系数为0的情况,又可确定事件发生态势转变的临界值,可以较好地微观层面上识别、诊断主要驱动因素对整体评价结果的影响;相对于传统水资源评价方法,减法集对势法在处理评价指标与评价标准之间不确定性问

题方面,具有明显的优势,可为地下水开采利用提供技术参考。

b. 2006—2016年大兴区地下水平均开采强度为中等强度,且有逐步恶化的趋势。为实现地下水的可持续利用,需采取相应的产业调控措施。工业用水方面需要重点调控的乡镇为西红门、采育镇、庞各庄镇;第三产业用水方面需要重点调控的乡镇为旧宫、西红门、北臧村镇;农业用水方面需重点调控的乡镇为青云店、采育镇、礼贤镇、榆垓镇、长子营镇、安定镇、庞各庄镇、魏善庄镇;机井数需重点调控的乡镇为安定镇、礼贤镇、榆垓镇、庞各庄镇。评价结果与大兴区产业分布情况具有很强的相关性,说明本次评价结果的可靠性。

c. 本文主要诊断、评价了各用水类型对地下水开采强度的影响程度,可为区域地下水的开采和保护提供一定的借鉴。但地下水作为一个复杂的开放系统,可开采量不仅受到人类开采活动的影响,还受到降水量、侧向补给量、地下水埋深、地表水入渗量等因素的影响,综合考虑人工-自然耦合条件下地下水开采强度的时空变化规律,还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 陈飞,徐翔宇,羊艳,等. 中国地下水资源演变趋势及影响因素分析[J]. 水科学进展,2020,31(6):811-819. (CHEN Fei, XU Xiangyu, YANG Yan, et al. Investigation on the evolution trends and influencing factors of groundwater resources in China[J]. Advances in Water Science,2020,31(6):811-819. (in Chinese))

[2] 金菊良,刘东平,周戎星,等. 基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型[J]. 水资源保护,2021,37

- (3):1-6. (JIN Juliang, LIU Dongping, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on projection pursuit weight optimization [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3):1-6. (in Chinese))
- [3] YUE Chunfang, WANG Qingjie, LI Yizhen. Evaluating water resources allocation in arid areas of northwest China using a projection pursuit dynamic cluster model [J]. Water Supply, 2019, 19(3):762-770.
- [4] 庞清江, 亓剑, 张钰镭, 等. 大汶河流域水资源承载能力多目标决策分析[J]. 水资源保护, 2007, 23(5):21-24. (PANG Qingjiang, QI Jian, ZHANG Yulei, et al. Multi-objective decision-making analysis of water resources carrying capacity in Dawenhe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2007, 23(5):21-24. (in Chinese))
- [5] 徐翔宇, 酆建强, 金菊良, 等. 基于风险矩阵的多要素水资源承载力综合评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(1):1-9. (XU Xiangyu, LI Jianqiang, JIN Juliang, et al. Comprehensive evaluation method of multi-factor water resources carrying capacity based on risk matrix [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1):1-9. (in Chinese))
- [6] 时佳, 薛联青, 陈新芳, 等. 基于综合赋权法的叶尔羌河流域水资源承载力可变模糊综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5):32-36. (SHI Jia, XUE Lianqing, CHEN Xinfang, et al. Variable fuzzy comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Yarkant River Watershed based on comprehensive empowerment [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28(5):32-36. (in Chinese))
- [7] KARUNANIDHI D, ARAVINTHASAMY P, DEEPALI M, et al. Appraisal of subsurface hydrogeochemical processes in a geologically heterogeneous semi-arid region of south India based on mass transfer and fuzzy comprehensive modeling [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, 43(2):1009-1028.
- [8] 张志君, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2):53-58. (ZHANG Zhijun, CHEN Fulong, LONG Aihua, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2):53-58. (in Chinese))
- [9] 马睿, 李云玲, 贾冬冬, 等. 基于多指标的黄河流域空间均衡状态评价[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(2):217-225. (MA Rui, LI Yunling, JIA Dongdong, et al. Evaluation of spatial equilibrium status for the Yellow River Basin based on comprehensive multi-index method [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(2):217-225. (in Chinese))
- [10] YANG Zhaoyang, SONG Jinxi, CHENG Dandong, et al. Comprehensive evaluation and scenario simulation for the water resources carrying capacity in Xi'an City, China [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 230:221-233.
- [11] 左其亭, 张志卓, 吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2):1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2):1-7. (in Chinese))
- [12] 徐凯莉, 吕海深, 朱永华. 水资源承载力系统动力学模拟及研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(6):67-72. (XU Kaili, LYU Haishen, ZHU Yonghua. Simulation of water resources carrying capacity based on system dynamics [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(6):67-72. (in Chinese))
- [13] 李如意, 束龙仓, 鲁程鹏, 等. 济宁市水资源承载能力评价方法的应用与对比[J]. 水资源保护, 2018, 34(6):65-70. (LI Ruyi, SHU Longcang, LU Chengpeng, et al. Application and comparison of water resources carrying capacity evaluation methods in Dining City [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6):65-70. (in Chinese))
- [14] 李辉, 金菊良, 吴成国, 等. 基于联系数的安徽省水资源承载力动态诊断评价研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1):42-49. (LI Hui, JIN Juliang, WU Chengguo, et al. Dynamic evaluation and diagnostic analysis for water resources carrying capacity in Anhui Province based on connection number [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1):42-49. (in Chinese))
- [15] 金菊良, 徐新光, 崔毅, 等. 基于联系数和洛伦兹曲线的水资源空间均衡评价方法[J]. 水科学进展, 2021, 32(3):387-395. (JIN Juliang, XU Xinguang, CUI Yi, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation method based on connection number and Lorenz curve [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3):387-395. (in Chinese))
- [16] CUI Yi, FENG Ping, JIN Juliang, et al. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method [J]. Entropy, 2018, 20(5):359-379.
- [17] 金菊良, 徐新光, 周戎星, 等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(1):1-6. (JIN Juliang, XU Xinguang, ZHOU Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):1-6. (in Chinese))
- [18] 胡启玲, 董增川, 杨雁飞, 等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5):425-432. (HU Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water

- resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019,47(5):425-432. (in Chinese))
- [19] 哈丽阳,杨晓燕,卜让吉. 基于联系数伴随函数的医疗质量发展趋势分析[J]. 中国卫生统计,2011,28(1): 68-69. (HA Liyang, YANG Xiaoyan, BU Rangji. Analysis of development trend of medical quality based on adjoint function of connection number [J]. Chinese Journal of Health Statistics,2011,28(1): 68-69. (in Chinese))
- [20] 陆广地,吴宝明,赵克勤. 用偏联系数与态势函数对高校评价的聚类分析[J]. 数学的实践与认识,2015,45(19):50-59. (LU Guangdi, WU Baoming, ZHAO Keqing. With partial connection number and function of university evaluation of clustering analysis [J]. Mathematics in Practice and Theory,2015,45(19):50-59. (in Chinese))
- [21] 杨亚锋,王红瑞,赵伟静,等. 水资源承载力的集对势: 偏联系数评价模型[J]. 工程科学与技术,2021,53(3): 1-7. (YANG Yafeng, WANG Hongrui, ZHAO Weijing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on set pair potential and partial connection number [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021,53(3):1-7. (in Chinese))
- [22] 金菊良,沈时兴,酆建强,等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(1):1-9. (JIN Juliang, SHEN Shixing, LI Jianqiang, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018,39(1):1-9. (in Chinese))
- [23] 金菊良,沈时兴,崔毅,等. 半偏减法集对势在引黄灌区水资源承载力动态评价中的应用[J]. 水利学报,2021,52(5):507-520. (JIN Juliang, SHEN Shixing, CUI Yi, et al. Dynamic evaluation of water resources carrying capacity in the Yellow River diversion irrigation district based on semipartial subtraction set pair potential [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (5): 507-520. (in Chinese))
- [24] 金菊良,刘鑫,周戎星,等. 引力减法集对势方法在旱灾风险动态分析评价中的应用[J]. 人民黄河,2020,42(12):7-11. (JIN Juliang, LIU Xin, ZHOU Rongxing, et al. Application of gravitational subtraction based on set pair situation method to dynamic analysis and evaluation of drought risk [J]. Yellow River,2020,42(12):7-11. (in Chinese))
- [25] 金菊良,张浩宇,宁少尉,等. 效应全偏联系数及其在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(1):1-8. (JIN Juliang, ZHANG Haoyu, NING Shaowei, et al. Effect full partial connection number and its application in evaluation of regional water resources carrying capacity [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019,40(1):1-8. (in Chinese))
- [26] 金菊良,赵行玥,崔毅,等. 半偏减法集对势在区域旱灾风险评估中的应用[J]. 水利水运工程学报,2021(1): 36-44. (JIN Juliang, ZHAO Xingyue, CUI Yi, et al. Application of semipartial subtraction set pair potential method to the dynamic assessment of regional drought risk [J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(1):36-44. (in Chinese))
- [27] 金菊良,何飘,张浩宇,等. 减法全邻联系数及其在区域水资源承载力趋势分析中的应用[J]. 西北大学学报(自然科学版),2020,50(3):438-446. (JIN Juliang, HE Piao, ZHANG Haoyu, et al. Subtractive full neighbor connection number and its application in trend analysis of regional water resources carrying capacity [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020,50(3):438-446. (in Chinese))
- [28] 孙爱峰,孙齐蕊. 基于联系数伴随函数的公共场所卫生质量态势和趋势分析[J]. 中国卫生产业,2015,12(25):24-26. (SUN Aifeng, SUN Qirui. The situation and trend analysis of public health quality in different areas based on the connection number and associate function [J]. China Health Industry, 2015,12(25):24-26. (in Chinese))
- [29] 王颖,邵磊,杨方廷,等. 改进的集对分析水质综合评价方法[J]. 水力发电学报,2012,31(3):99-106. (WANG Ying, SHAO Lei, YANG Fangting, et al. Comprehensive evaluation method of water quality based on improved set pair analysis [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012,31(3):99-106. (in Chinese))
- [30] 金菊良,魏一鸣,王文圣. 基于集对分析的水资源相似预测模型[J]. 水力发电学报,2009,28(1):72-77. (JIN Juliang, WEI Yiming, WANG Wensheng. Set pair analysis based on similarity forecast model of water resources [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009,28(1):72-77. (in Chinese))
- [31] 高飞,王会肖,刘昌明. 2001—2015 年北京市地下水资源承载力变化特征分析[J]. 中国生态农业学报,2019,27(7):1088-1096. (GAO Fei, WANG Huixiao, LIU Changming. Variation in groundwater resources carrying capacity in Beijing between 2001 and 2015 [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019,27(7):1088-1096. (in Chinese))
- [32] 刘琼,李瑞敏,王轶,等. 区域地下水资源承载能力评价理论与方法研究[J]. 水文地质工程地质,2020,47(6):173-183. (LIU Qiong, LI Ruimin, WANG Yi, et al. Theory and methodology for evaluation of carrying capacity of regional groundwater resources in China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020,47(6):173-183. (in Chinese))

(下转第 57 页)

- [14] 丁继勇,王卓甫,郭光祥. 基于贝叶斯和动态博弈分析的城市暴雨内涝应急决策[J]. 统计与决策,2012(23):26-29. (DING Jiyong, WANG Zhuofu, GUO Guangxiang. Emergency decision of urban rainstorm waterlogging based on Bayesian and dynamic game analysis[J]. Statistics & Decision,2012(23):26-29. (in Chinese))
- [15] 马文笑,王德鲁. 基于案例推理的突发环境事件应急决策模型[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(12):85-90. (MA Wenxiao, WANG Delu. Emergency decision-making model of emergency environmental accidents based on case-based reasoning[J]. Journal of Safety Science and Technology,2017,13(12):85-90. (in Chinese))
- [16] 徐祖信,汪玲玲,尹海龙,等. 基于特征因子的排水管网地下水入渗分析方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(4):593-599. (XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong, et al. Quantification of groundwater infiltration urban drainage networks based on species approach[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2016,44(4):593-599. (in Chinese))
- [17] 陈义,王建辉,张蒙. 利用有向图进行排水管网自动化流向分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(1):62-67. (CHEN Yi, WANG Jianhui, ZHANG Meng. Automatic flow analysis of drainage pipe network based on directed graph[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2019,44(1):62-67. (in Chinese))
- [18] 李春林,刘森,胡远满,等. 基于暴雨径流管理模型(SWMM)的海绵城市低影响开发措施控制效果模拟[J]. 应用生态学报,2017,28(8):2405-2412. (LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al. Simulation on the control effect of low impact development measures of sponge city based on storm water management model (SWMM)[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(8):2405-2412. (in Chinese))
- [19] 黄绵松,杨少雄,齐文超,等. 固原海绵城市内涝削减效果数值模拟[J]. 水资源保护,2019,35(5):13-18. (HUANG Miansong, YANG Shaoxiong, QI Wenchao, et al. Numerical simulation of urban waterlogging reduction effect in Guyuan sponge city[J]. Water Resources Protection,2019,35(5):13-18. (in Chinese))
- [20] 徐宗学,程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础:城市水文学研究进展[J]. 水利学报,2019,50(1):53-61. (XU Zongxue, CHENG Tao. Basic theory for urban water management and sponge city: review on urban hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(1):53-61. (in Chinese))
- [21] 姜仁贵,韩浩,解建仓,等. 变化环境下城市暴雨洪涝应对新模式研究[J]. 灾害学,2017,32(3):12-17. (JIANG Rengui, HAN Hao, XIE Jiancang, et al. The new response mode of urban storm flood under changing environment[J]. Journal of Catastrophology,2017,32(3):12-17. (in Chinese))
- [22] QU T, THURER M, WANG J H, et al. System dynamics analysis for an internet-of-things-enabled production logistics system[J]. International Journal of Production Research,2017,55(9):2622-2649.
- [23] LEE S, HAN W, PARK Y. Measuring the functional dynamics of product-service system: a system dynamics approach[J]. Computers & Industrial Engineering,2015,80:159-170.
- [24] TENG J, WANG P, WU X, et al. Decision-making tools for evaluation the impact on the eco-footprint and eco-environmental quality of green building development policy[J]. Sustainable Cities & Society,2016,23:50-58.
- [25] SAHOO M, SAHOO S, DHAR A, et al. Effectiveness evaluation of objective and subjective weighting methods for aquifer vulnerability assessment in urban context[J]. Journal of Hydrology,2016,541:1303-1315.
- [26] 昌伟伟. 基于系统动力学的六层次事故分析模型构建研究[D]. 北京:中国矿业大学,2019.

(收稿日期:2021-08-18 编辑:王芳)

(上接第25页)

- [33] 艾亚迪,魏传江,马真臻. 基于AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2):11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(2):11-16. (in Chinese))
- [34] 张有贤,李二强,罗东霞,等. 基于AHP-熵权法的兰州市水环境安全模糊综合评价[J]. 安全与环境学报,2020,20(2):709-718. (ZHANG Youxian, LI Erqiang, LUO Dongxia, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water environment safety of Lanzhou based on AHP-entropy weight method[J]. Journal of Safety and Environment,2020,20(2):709-718. (in Chinese))
- [35] 余灏哲,李丽娟,李九一. 基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价[J]. 资源科学,2020,42(2):358-371. (YU Haozhe, LI Lijuan, LI Jiuyi. Evaluation of water resources carrying capacity in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on quantity-quality-water bodies-flow[J]. Resources Science,2020,42(2):358-371. (in Chinese))

(收稿日期:2021-05-11 编辑:施业)