

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtq.2021.0120

丁小凡,方樟,高晗,等. 基于人为开采响应的小尺度地下水可持续性评价:以吉林省大安市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1175-1183. DING X F, FANG Z, GAO H, et al. A small-scale groundwater sustainability assessment based on the response of artificial mining: A case study of Da'an City, Jilin Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1175-1183. (in Chinese)

# 基于人为开采响应的小尺度地下水可持续性评价

——以吉林省大安市为例

丁小凡<sup>1</sup>, 方樟<sup>1</sup>, 高晗<sup>1</sup>, 刘柱光<sup>1</sup>, 李继森<sup>2</sup>

(1. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130021;

2. 吉林省大安市市政水资源管理中心, 吉林 白城 131300)

**摘要:**为充分利用地表数据、小尺度考虑时空变异性评价地下水的可持续性,提出基于人为开采响应的地下水可持续性指标(artificial mining response-based groundwater sustainability index, AGSI),采用熵权 TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution)法确定地下水人为开采程度,并通过分解系数将人为开采对地下水系统施加的压力分解至各监测井,进而与地下水响应状态关联。以大安市为研究区,使用 Mann-Kendall 检验法和 Sen's slope 变化趋势分析法验证评价结果的准确性。结果表明:2008—2017 年研究区地下水可持续性受到破坏的风险由潜水向承压水转移,而各含水层间、层内的地下水可持续性分布差异表明调控地下水开采布局是大安市未来地下水管理工作的重点;研究区地下水可持续性演变过程可被水位趋势分析结果验证,AGSI 法强调了人工开采的作用效果,有助于更好地理解人类活动与地下水资源的相互作用过程,为评估地下水可持续性提供新思路。

**关键词:**人为开采;地下水响应;小尺度;可持续性评价;大安市

中图分类号:P641 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



地下水作为维持农业、经济和环境发展的重要淡水资源之一,承担了全球取水量的 35%<sup>[1]</sup>。地下水取水量占我国总供水量的 17.5%<sup>[2]</sup>,根据《全国地下水污染控制规划(2011—2020 年)》,中国北方地区 65%的生活用水、50%的工业用水和 33%的农业用水依赖于地下水<sup>[3]</sup>。我国东北地区地下水取水量的 78%用于农业(2016 年)<sup>[4]</sup>,如何保证地下水可持续开采能力成为保障东北地区粮食产量稳步增长、维持生态环境、确保粮食安全的关键,对地下水可持续性进行评估至关重要。目前已有大量学者对地下水可持续性进行了相关研究,但由于地下水状态受水文气象、地形地貌、人类活动等众多因素的影

响,难以直接进行精准评估,所以至今没有形成专门的评估方法。尽管如此,仍有很多间接方法可帮助理解地下水可持续性,这些方法通常是基于水量平衡的理论进行的,主要包括数值模拟法、遥感观测数据、指标评价等方法。其中:数值模拟法可用来指导地下水管理决策,但所建数值模型需依靠大量数据来准确捕捉地下水的复杂关系,并且受限于模型自身的复杂性难以在管理者间交流互动和灵活适应管理要求;此外,通过遥感观测数据,如重力恢复和气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE),可以间接地确定地下水储量变化趋势<sup>[5-7]</sup>,以此来评估地下水可持续性,但是这些基于

收稿日期:2021-04-28 修回日期:2021-08-18 网络出版时间:2021-08-25

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210824.1443.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC1808300)

作者简介:丁小凡(1996—),女,辽宁沈阳人,主要从事地下水资源评价研究。E-mail:dingxf2515@163.com

通信作者:方樟(1981—),男,浙江淳安人,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:azhang9456@126.com

遥感的技术更适用于流域、平原、盆地等大规模地下水研究<sup>[8-9]</sup>,对于城市、场地等小区域地下水信息的获取,遥感技术难以提供足够的分辨率,不当的使用可能会错误地指导小区域地下水管理<sup>[10]</sup>;而根据监测数据和统计资料制定的地下水可持续性评估指标体系可以充分发挥地面资料数据并且适用于小尺度评估。与传统的评价方法相比指标体系可包含多个方面,能够定量描述不同参数对总体的影响。各种指标已被用于地下水和地表水的资源评价及可持续性评价<sup>[11-14]</sup>,这些指标反映了水资源当前状况和未来趋势,可协助理解水资源受人类活动及自然过程影响的时空变化特征。

大安市是全国粮食生产先进县(市)之一,作物灌溉主要依赖地下水。近年来大安市为改善地下水开发利用现状,积极推进土地整治、节水灌溉项目在大安市的落实,但数据表明用于灌溉的地下水取水量仍在增加,在强烈的矛盾下大安市急需一种方便可靠的方法来快速掌握当地地下水可持续性分布情况,指导未来地下水管理。在描述地下水资源动态变化时,地下水位比其他用于计算补排关系的数据信息更易获取。长期的水位变化是自然变

化过程的反映,更能表征人类活动对水平衡的干扰。因此,本次研究的目标是充分利用地下水位数据建立一个适用于小区域的地下水可持续性评估指标体系,将人类活动对地下水施加压力指标和地下水响应状态结合起来量化表征地下水的可持续性,评价大安市不同位置处由于人类活动而导致的地下水资源量可持续性的变化,从而为理解小尺度地下水可持续性时空演变,指导未来开采活动提供了一种评估方法。

## 1 研究区概况

大安市是吉林省西北部白城市的县级市,也是吉林西部水资源最短缺县市之一,总面积 4 879 km<sup>2</sup>,见图 1,多年平均降水量 389.20 mm,多年平均蒸发量 1 702.44 mm。尽管研究区境内有多条河流,但地表水较匮乏,生活、工业、农业用水仍主要依赖地下水。研究区广泛沉积了新近系泥、砂质岩层和第四系松散堆积物,形成了分布稳定、上下叠置的多个含水层。研究区工业农业用地下水主要取自第四系孔隙潜水含水层及第四系孔隙承压水含水层,同样也是本研究的目标含水层。

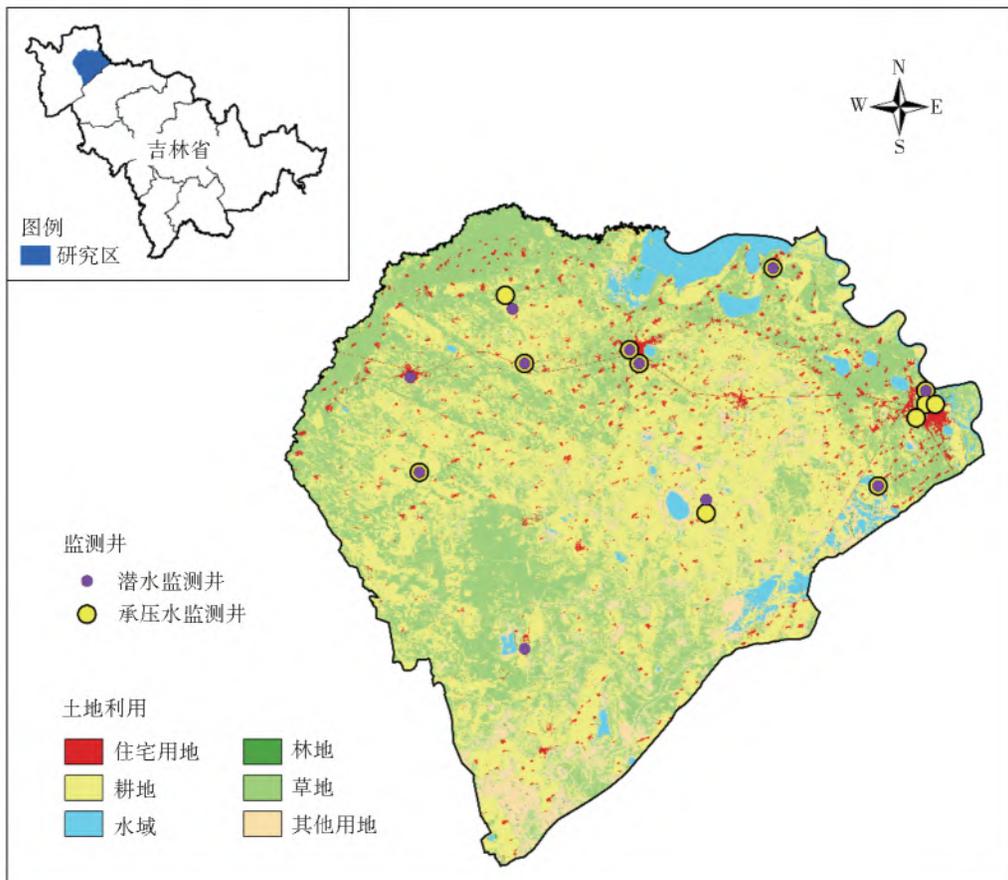


图 1 研究区土地利用及监测井分布

Fig. 1 Land use and monitoring well distribution in the study area

## 2 数据来源

从《地下水动态资料(松原、白城分册)》<sup>[15]</sup>中获取研究区 2000—2017 年 75 眼监测井每 5 日水位埋深数据,监测层位由上至下包括第四系潜水、第四系承压水、新近系承压水。因新近系承压水属于深层承压水,原则上仅可用于特殊行业,开采及监测数据较少,所以本次研究不作分析。

按照各井年内 5 日监测水位埋深数据完整性指数(completeness index, CI,有效数据的数量占完整数据数量的百分比)<sup>[16]</sup>高于 75%进行筛选,得到符合要求的监测井 23 眼(见图 1),包含第四系潜水监测井 11 眼、第四系承压水监测井 12 眼,筛选后各井 2008—2017 年水位埋深数据完整性指数达到 98%。本研究所用的 2000—2017 年地下水开采量数据以及降水数据来自《白城市水资源公报》<sup>[17]</sup>,用于计算开采强度的人口、经济等数据搜集自吉林省统计局《吉林统计年鉴》<sup>[18]</sup>。此外,数据共享服务系统<sup>[19]</sup>提供了研究区 2020 年 30 m 分辨率土地利用图。

## 3 研究方法

### 3.1 基于人为开采响应的地下水可持续性指数

地下水可持续性<sup>[38]</sup>反映了地下水可供长期使用的能力,本研究基于人为开采对地下水维持可持续性产生的压力和地下水对人为开采活动的响应状态提出基于人为开采响应的地下水可持续性指标(artificial mining response-based groundwater sustainability index, AGSI)。在了解地下水响应状态( $G$ )并确定人为开采压力( $A$ )后可完成基于人为开采响应的地下水可持续性指标的计算,即

$$I_{AGS_k} = G_k - A_k \quad (1)$$

式中: $I_{AGS}$ 为基于人为开采响应的地下水可持续性指标值; $i$ 为评价年份; $k$ 为第 $k$ 眼监测井。在 ArcGIS 中应用反距离权重法根据监测层位的不同对研究区地下水开采可持续性进行插值,得到不同含水层 AGSI 值栅格图。据此可以得到整个含水层的 AGSI 平均值和含水层各位置的 AGSI 值。图 2 阐述了这一流程,各监测井处的地下水响应状态( $G$ )可根据其水位埋深数据计算获得,人为开采压力( $A$ )是人为开采活动剧烈程度的反应,通过分解系数将研究区范围的开采程度分解到各监测井,以此表示各处地下水可持续性承受由开采活动带来的压力。在这项研究中,算得 AGSI 值为  $-0.566 \sim -0.148$ ,将其划分为“低”“较低”“中等”“较高”“高”等 5 个等

级描述地下水的可持续性,划分方法见表 1。

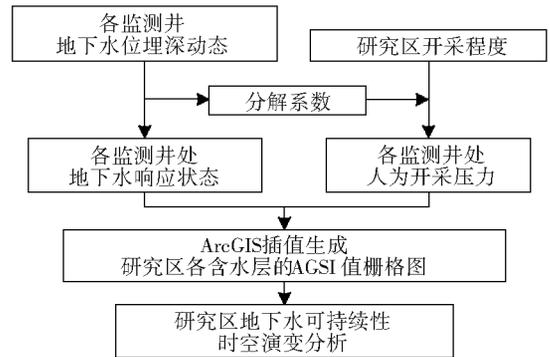


图 2 基于人为开采响应的地下水可持续性评价方法流程

Fig. 2 Methodological flowchart for evaluating groundwater sustainability based on human mining response

表 1 研究区地下水可持续性等级分类

Tab. 1 Classification of groundwater sustainability in the study area

$I_{AGS}$ 值的范围	地下水可持续性等级
$-0.566 < I_{AGS} \leq 0.148$	低
$0.148 < I_{AGS} \leq 0.498$	较低
$0.498 < I_{AGS} \leq 0.776$	中等
$0.776 < I_{AGS} \leq 1.145$	较高
$1.145 < I_{AGS} \leq 1.938$	高

### 3.2 地下水响应状态

地下水响应状态( $G$ )是指地下水受人类活动和自然过程影响的响应,将其定义为地下水开发潜力( $P$ )和地下水可靠性( $R$ )之和。

$$G_k = P_k + R_k \quad (2)$$

地下水开发潜力( $P$ )是指某一年份地下水埋深与历史上最大埋深之间的相对距离,距离越大,意味着该井处的开发潜力越大。计算式为

$$P_k = \frac{\max(h_{1k}, h_{2k}, \dots, h_{mk}) - h_k}{\max(h_{1k}, h_{2k}, \dots, h_{mk}) - \min(h_{1k}, h_{2k}, \dots, h_{mk})} \quad (3)$$

式中: $h_k$ 为第 $k$ 眼监测井在第 $i$ 年的年均水位埋深; $m$ 是水位埋深序列的年数。

地下水可靠性( $R$ )的概念由 Hashimoto 等<sup>[20]</sup>提出,它是指系统处于满意状态的历史可能性,本次研究指水位上升(埋深减小)。如式(4)、(5)所示, $R$ 是各监测井每年水位埋深资料系列中  $\Delta h < 0$  的次数( $N_{\text{满}}$ )与  $m-1$  的比值

$$R_k = \frac{N_{\text{满}}}{m-1} \quad (4)$$

$$\Delta h_k = h_k - h_{i-1,k} \quad (5)$$

### 3.3 人为开采压力

各监测井地下水承受人为开采压力计算式为

$$A_k = D_k \times C_i \quad (6)$$

式中： $A_k$  是第  $i$  年监控井  $k$  地下水承受人为开采压力的无量纲值。另外，这里的  $D_k$  和  $C_i$  分别为分解系数和开采程度，将在下文详细解释。

### 3.3.1 开采程度

熵权 TOPSIS (technique for order preference-by similarity to ideal solution) 法被用于计算地下水开采量和开采强度的综合效应，选取指标见表 2。熵权法可以根据数据中潜在的信息量进行权重分配，而 TOPSIS 法可以根据评价对象与负理想解之间的相对贴近度 ( $C_i$ ) 进行排序。在计算研究区每年

开采程度时，其值由熵权 TOPSIS 法确定的  $C_i$  替代。Ren<sup>[21]</sup> 的研究向希望了解更多详情的读者提供了详细的计算过程。值得指出的是，为了避免零值对计算带来的不便，这里采用了不同于参考文献 [21] 的无量纲化方法，见式 (7)：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (7)$$

式中： $i$  代表 2007—2017 年的 11 个样本年； $j$  代表表 2 中的 7 个指标。另外，根据  $C_i$  的含义，人为开采越频繁， $y_{ij}$  及  $C_i$  的值越大。各指标的权重和  $C_i$  的计算结果分别列于表 2 和表 3。

表 2 开采程度指标框架及计算方法

Tab. 2 Index framework and calculation method of mining degree

目标层	一级计算指标	二级计算指标	数据来源/计算方法	相对目标层的权重
开采程度	地下水开采量	总开采量	《白城市水资源公报》	0.084
		农业开采量	《白城市水资源公报》	0.109
		工业开采量	《白城市水资源公报》	0.122
	地下水开采强度	万元生产总值用水量	总开采量(万 m <sup>3</sup> )/生产总值(万元)	0.207
		人均用水量	总开采量(万 m <sup>3</sup> )/人口总数(万人)	0.099
		农业开采强度	农业开采量(万 m <sup>3</sup> )/农机井总数(眼)	0.228
		万元工业生产值用水量	工业开采量(万 m <sup>3</sup> )/工业生产生产总值(万元)	0.151

表 3 2007—2017 年开采程度计算结果

Tab. 3 Calculation results of mining degree from 2007 to 2017

年份	开采程度	年份	开采程度	年份	开采程度
2007	0.126	2011	0.390	2015	0.487
2008	0.063	2012	0.392	2016	0.971
2009	0.626	2013	0.140	2017	0.966
2010	0.789	2014	0.303		

### 3.3.2 分解系数

开采程度 ( $C$ ) 只能描述全区的人为开采情况，要想进一步反映局部区域和不同含水层的人为开采压力 ( $A$ )，需要对开采程度进行分解。水位埋深动态为了解地下水水平衡提供了一种途径。也就是说，不同监测井的水位埋深变化幅度的差异反映了不同位置承受开采压力的大小。基于此提出分解系数 ( $D$ )，并通过式 (8) 将  $C$  分解到不同空间位置，将人为开采与地下水响应密切相关。

$$D_k = \frac{\Delta h_k - \min(\Delta h_{i1}, \Delta h_{i2}, \dots, \Delta h_{iq})}{\max(\Delta h_{i1}, \Delta h_{i2}, \dots, \Delta h_{iq}) - \min(\Delta h_{i1}, \Delta h_{i2}, \dots, \Delta h_{iq})} \quad (8)$$

式中： $i$  为评价年份， $k$  为第  $k$  眼监测井， $k$  的取值为  $1, 2, \dots, q$ 。

### 3.4 趋势检验

分别采用 Mann-Kendall 趋势检验法<sup>[22-23]</sup> 和

Sen's slope 法<sup>[24]</sup> 检测水位埋深序列趋势和趋势变化强度。这些非参数方法由于不需要测试数据分布且结果可靠，已在水文气象领域广泛应用。结合两种方法对研究区 2007—2017 年 AGSI 均值及各监测井年均水位埋深的变化趋势进行了检验。具体方法可在参考文献 [22-24] 中找到解释。

## 4 结果与分析

### 4.1 大安市地下水可持续性时空变化分析

AGSI 均值是针对特定含水层的 AGSI 值栅格图在含水层面域范围内取平均得到的。承压水的 AGSI 均值与开采量的变化趋势相同，说明承压水的可持续性受其影响明显。但 2015 年之前承压水 AGSI 均值高于潜水的 AGSI 均值，同年承压水的值首次低于潜水的值，但十分轻微。这一现象在 2016—2017 年加剧，说明近年来开采量的快速增加对承压水造成了负担，不利于地下水的保护。大安市应制定合理的开采规划，确保地下水资源的可持续利用。相比之下，潜水 AGSI 均值的变化趋势与降水的变化趋势相似，但也轻微地受开采量影响。例如：2012—2014 年，降水的减少导致了潜水接受补给的减少，但由于这一时期开采量的减少，最终没有造成潜水 AGSI 均值的下降趋势。同样的情况也

发生在2014—2016年,降水增加了对潜水的补给,而开采量的显著增加导致了潜水AGSI平均值的下降,见图3。实际上,大安市地下水状况与本研究的结论是一致的水质差、开采规模小是研究区潜水的特点,故降水成为影响潜水的主要因素。降水变化虽然影响潜水向承压水的越流补给,但承压水是大安市的主要水源,主要受人为因素影响。

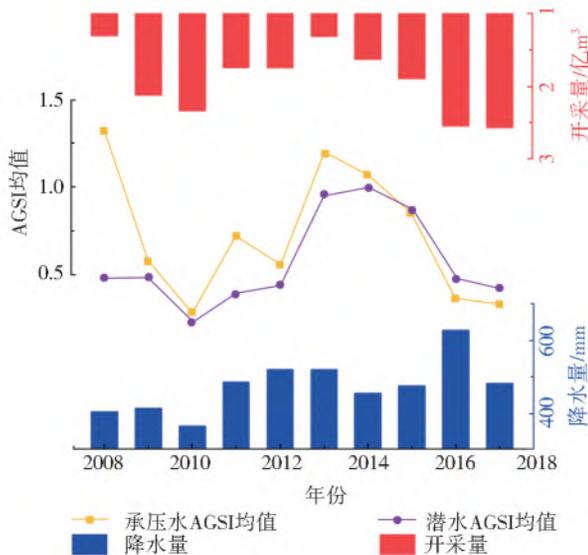


图3 AGSI均值的年变化曲线

Fig. 3 Annual variation curve of AGSI mean value

AGSI均值的最大值出现在2008年的承压含水层中,为1.326。潜水含水层AGSI均值的最大值出现在2014年,为0.999。各含水层AGSI均值的最小值均出现在2010年,潜水含水层为0.230,承压含

水层为0.283。Mann-Kendall趋势检验法和Sen's slope法的计算结果表明,潜水AGSI均值以0.01/a的趋势增加,而承压水则以0.04/a的趋势减少,说明地下水的可持续性受到破坏的风险正由潜水向承压水转移,虽然这种趋势在95%的置信水平上并不显著。

将2008—2017年地下水可持续性等级分区的面积百分比绘制在图4中。两含水层中“低”可持续性区占比的最大值于2010年出现在潜水含水层,为45.2%,其后的几年里再次达到最大是在2017年的承压含水层,为32.5%,这一转变支持了可持续性受到破坏的风险向承压水迁移的论断。此外,观察发现2008年2个含水层的主流可持续性等级完全相反。这一现象可以解释为在计算AGSI时引用了年均水位埋深的变幅,即2007年地下水埋深参与了2008年AGSI的计算,这期间潜水各监测井水位埋深平均以0.52 m/a的速度增加,而承压水平均以0.03 m/a的速度减小,这解释了2008年AGSI的异常。2010年前后(2009—2012年),“较低”可持续性区覆盖了大部分潜水含水层,“中等”可持续性区覆盖大部分的承压含水层。这一时期承压水水位相对稳定,整体可持续性优于潜水。同样,在2014年前后(2013—2015年),2个含水层都显示出大面积的“高”和“较高”可持续性。承压水的“高”和“较高”可持续性分区面积自2013年以来逐渐减少,潜水则是自2014年逐渐减少。2015年后,“低”可持续性分区逐渐扩大,尤其是承压含水层。

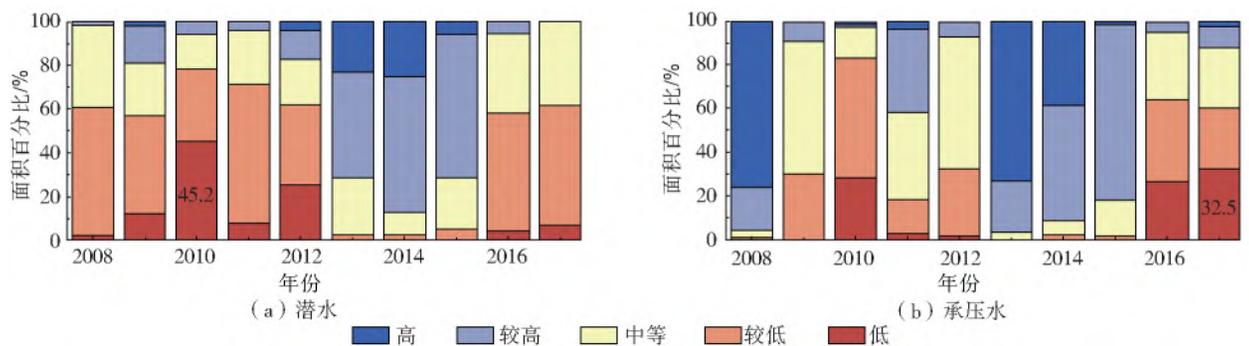


图4 地下水可持续性分区的面积百分比

Fig. 4 Area percentage of groundwater sustainability subzones

为了解各含水层可持续性等级区的分布变化情况,在上述分析中选取具有代表性的年份2008、2010、2014和2017年。图5为分析期内两含水层可持续性等级分区空间变化的空间变化。2008年,“较低”可持续性区占据潜水含水层东部和中部的大片区域(图5(a)),除东北部出现一个局部“低”可持续性区外,几乎代表了当年潜水可持续性的最差状态。到2010年,东部的“中等”可持续性区扩展到中部,在

此范围内甚至出现了“较高”可持续性区(图5(b))。据悉,为确保粮食和水供应安全,2007年吉林省政府提出用嫩江水灌溉研究区东部和中部的大安灌区,也利用部分承压水进行灌溉,该决议还将旱地、盐碱地变为水田<sup>[25]</sup>。水田的扩张将增加向潜水含水层的入渗量,从而提高该地区的水位。2010年的干旱促进了蒸发,高开采增加了地下水的消耗,导致这一时期大面积潜水的可持续性等级为“低”。2014

年前后高降水、低开采有效补充了地下水资源,对潜水和承压水的影响同样明显(图 5(c)和图 5(g))。

至 2017 年,不断增加的开采使得“较低”可持续性区占据了潜水含水层的大部分(图 5(d))。

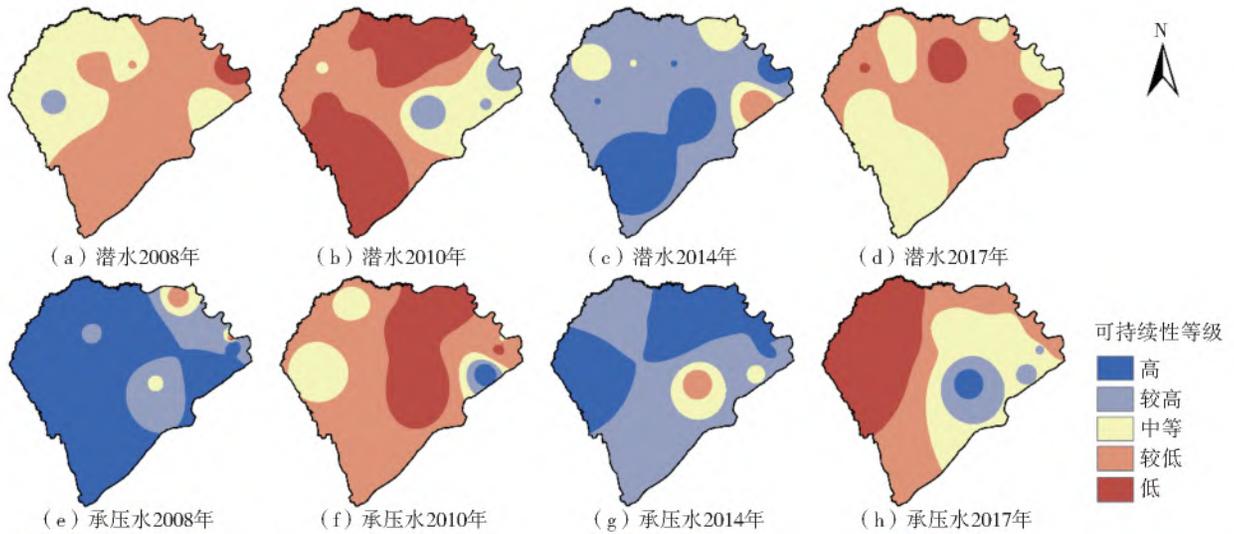


图 5 可持续性等级分区分布

Fig. 5 Distribution of sustainability level subzones

由于 2008 年承压水位相对于前一年有所恢复,因此承压水普遍的可持续性等级为“高”(图 5(e))。到 2010 年,在干旱气候的影响下,几乎全区都被“较低”可持续性覆盖,甚至在研究区中心出现了大面积的“低”可持续性区(图 5(f)),其原因是大安灌区位于此处,大面积的水田正常年份由嫩江灌溉,干旱年份由承压水补充。2010 年的低降水和作物增长需求迫使大量集中开采,从而促成了中部地区的“低”可持续性分区。为了验证上述解释,对 2010 年前后全区用于农业灌溉的地下水开采量进行了调查。数据显示,潜水不用于农业灌溉。2009 年,用于农业灌溉的承压水量为 18 185 万  $\text{m}^3$ 。2011 年降水较为丰沛时,数值减小至 14 637 万  $\text{m}^3$ ,而 2010 年降水较为干燥时,数值高达 20 000 万  $\text{m}^3$ 。2010 年,激增的承压水开采量为中部地区“低”可持续性区的存在提供了支持。随着承压水可持续性的降低,截至 2017 年,“低”可持续性区集中在研究区西部(图 5(h))。大安市工业、农业和生活用水主要依靠地下水,其中承压水占很大比重。因此,加强地下水资源保护对经济发展、粮食安全和水安全都具有非凡的意义。今后,大安市应密切关注西部地区的开采现状,提高整个地区的水资源利用效率,避免不受控制的开采。

#### 4.2 大安市地下水埋深变化趋势分析

地下水埋深变化趋势计算结果表明,2007—2017 年,只有一小部分(27.3%,3 眼)潜水监测井水位埋深呈现减小趋势。潜水深度的增加趋势主要表现在北方,大部分区域的埋深增长速度为 0.036 ~ 0.083  $\text{m/a}$ ,见图 6,水位深度变化的南北差异验证

了图 5 中潜水可持续性等级南部广泛优于北部的分布情况。图 6 的 Sen's slope 值分布显示潜水水位的上升趋势( $-0.077 \sim -0.009 \text{ m/a}$ )在南部和东北部边缘地区与潜水可持续性等级分布的长期规律一致,东北部边缘地区表现最直观,自图 5(a)至图 5(c)年,该地区依次经历了“低”“较高”“高”可持续性等级,至 2017 年虽然可持续性等级降低,但从大安市整体来看,该地区可持续性等级仍优于大部分地区(图 5(d))。可以通过图 6 中 9 号井所处位置的 Sen's slope 值( $0.083 \sim 0.308 \text{ m/a}$ )验证图 5(b)同位置的局部“较高”可持续性至图 5(c)同位置“较低”可持续性,及图 5(d)“低”可持续性的变化过程。另外,对于潜水,有显著趋势的监测井数量非常少(18.2%)。从图 6 可以看出,研究区只有 8 号井和 9 号井的水位埋深显著增加。其中:9 号井埋深增长速度最大,为 0.308  $\text{m/a}$ ;8 号井为 0.145  $\text{m/a}$ 。地下水埋深呈显著增加趋势表明这些区域的潜水在某些年份处于过度消耗状态。为了维持地下水的可持续利用,有必要对这些区域进行长期监测。

分析时段内,承压水监测井的水位埋深有 50% 呈增加趋势,50% 呈减少趋势,见图 7。与潜水不同,承压水埋深的变化趋势在东西方向上存在差异,研究区西部承压水埋深增大,东部则相反。图 7 中 Sen's slope 值为 0.015 ~ 0.328  $\text{m/a}$  的地区证实了大安市西部承压水可持续性降低的过程,即除 2014 年以外,研究区西部同地区站主导地位可持续性等级经历了由“高”向“低”的转变(图 5(e)、图 5(f)、图 5(h))。然而在研究区东部则很难从承压水可持

续性等级分布图(图5)中看出与 Sen's slope 值趋势分布(图7)相符的规律,这与监测井的水位变化趋势有关,以 Sen's slope 值为 0.034~0.115 的区域为界,该区域以西监测井水位埋深均表现出增大趋势,而该区域以东的监测井水位埋深表现出不一致的变化趋势,因此研究区东部承压水可持续性等级的评价结果相对西部更加复杂。

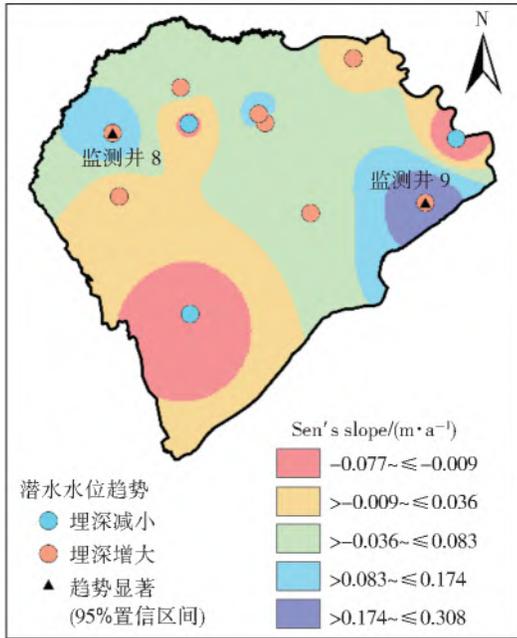


图6 潜水埋深 Sen's slope 值分布及监测井水位埋深趋势  
Fig. 6 Distribution of phreatic water depth Sen's slope value and water depth trend of monitoring wells

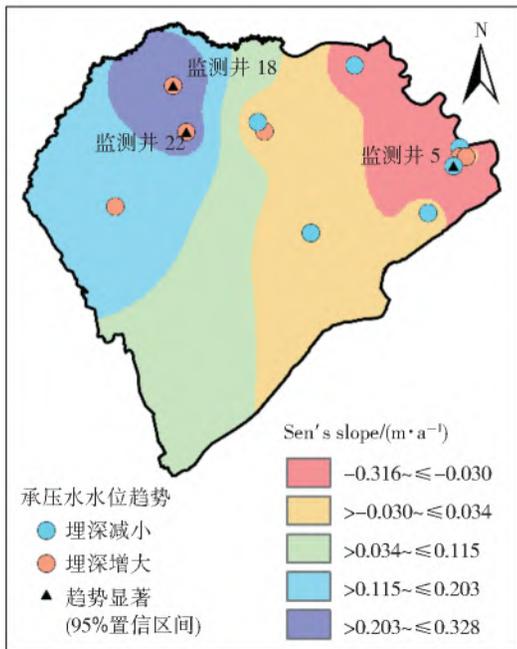


图7 承压水埋深 Sen's slope 值分布及监测井水位埋深趋势(2007—2017年)

Fig. 7 Distribution of confined water depth Sen's slope value and water depth trend of monitoring wells (from 2007 to 2017)

对于承压水埋深的变化趋势,16.7%(2眼)的监测井表现出显著的增大趋势,8.3%(1眼)呈显著减小趋势。图7中5号井水位埋深减小速度为0.322 m/a,18号井是全区水位埋深增大最快的井,为0.330 m/a,22号井水位埋深显著增大,速度为0.242 m/a。5号井水位埋深显著减小表明了该区域承压水有进一步开发的潜力。

## 5 结论

本研究提出了一种根据人为开采和地下水水位响应变化来评估小尺度地下水可持续性的方法,即基于人为开采响应的地下水可持续性指标(AGSI),可以用于水管理部门指导地下水开发利用规划。指标和评估方法的选择是可持续性评价的关键,本研究在构建评估体系时引入及借鉴了一些新的指标:为了将区域开采程度分解成各点开采压力的分解系数;用于描述当年水位埋深与历史最大埋深的相对距离的地下水开发潜力指标;反映地下水处于水位回升状态可能性的指标——地下水可靠性<sup>[20]</sup>。水位埋深长期变化趋势验证了该方法的可靠性。本研究提出的基于人为开采响应的地下水可持续性指标可作为监测地下水可持续性、分析小区域地下水可持续性时空变异的一种手段,有助于识别地下水可持续性潜力区和开采保护区,有计划地执行地下水资源管理。

## 参考文献(References):

- [1] DÖLL P, HOFFMANN-DOBREV H, PORTMANN F T, et al. Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variation[J]. Journal of Geodynamics, 2012, 59-60: 143-156. DOI: 10.1016/j.jog.2011.05.001.
- [2] 中华人民共和国水利部. 2015年中国水资源公报[R/OL]. (2015-12-31)[2021-03-07]. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Resources Bulletin (2015) [R/OL]. (2015-12-31)[2021-03-07]. (in Chinese)) [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201612/t20161229\\_783348.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201612/t20161229_783348.html).
- [3] WANG Y, ZHENG C, MA R. Review: Safe and sustainable groundwater supply in China[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(5): 1301-1324. DOI: 10.1007/s10040-018-1795-1.
- [4] 于丽丽,唐世南,丁元芳,等. 东北地区地下水超采情况及对策建议[J]. 水利规划与设计, 2019, 186(4): 37-40. (YU L L, TANG S N, DING Y F, et al. The situation and countermeasures of groundwater overexploitation in northeast China[J]. Water Resources Planning

- and Design, 2019, 186(4): 37-40. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2019.04.010.
- [5] NANTEZA J, DE LINAGE C R, THOMAS B F, et al. Monitoring groundwater storage changes in complex basement aquifers: An evaluation of the GRACE satellites over East Africa[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(12): 9542-9564. DOI: 10.1002/2016wr018846.
- [6] THOMAS B F, CAINETA J, NANTEZA J. Global assessment of groundwater sustainability based on storage anomalies: global groundwater sustainability [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(22): 11445-11455. DOI: 10.1002/2017gl076005.
- [7] CASTLE S L, THOMAS B F, REAGER J T, et al. Groundwater depletion during drought threatens future water security of the Colorado River basin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 41(16): 5904-5911. DOI: 10.1002/2014gl061055.
- [8] LONG D, PAN Y, ZHOU J, et al. Global analysis of spatiotemporal variability in merged total water storage changes using multiple GRACE products and global hydrological models[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 192: 198-216. DOI: 10.1016/j.rse.2017.02.011.
- [9] CHEN J, FAMIGLIETT J S, SCANLON B R, et al. Groundwater Storage Changes: Present Status from GRACE Observations[M]// *Remote Sensing and Water Resources*. Springer Netherlands, 2016: 397-417. DOI: 10.1007/s10712-015-9332-4.
- [10] THOMAS B F, FAMIGLIETTI J S. Sustainable groundwater management in the Arid Southwestern US: Coachella Valley, California[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(12): 4411-4426. DOI: 10.1007/s11269-015-1067-y.
- [11] WHITE D D. Framing water sustainability in an environmental decision support system [J]. *Society and Natural Resources*, 2013, 26(11): 1365-1373. DOI: 10.1080/08941920.2013.788401.
- [12] GAIN A K, GIUPPONI C, WADA Y. Measuring global water security towards sustainable development goals [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(12): 124015. DOI: 10.1088/1748-9326/11/12/124015.
- [13] JUWANA I, PERERA B J C, MUTTIL N. Conceptual framework for the development of West Java water sustainability index[A]. 18th Biennial Conference on Modelling and Simulation[C]. Australia, 2009.
- [14] LAVAPURO M, LIPPONEN A, ARTIMO A, et al. Groundwater sustainability indicators: testing with Finnish data[J]. *Boreal Environment Research*, 2009, 13(5): 381-402.
- [15] 吉林省水文资源局. 地下水动态资料(松原、白城分册)[M]. 2007—2017. (Jilin Provincial Water Resources Department, Groundwater dynamic data (Songyuan, Baicheng volume) [M]. 2007—2017. (in Chinese))
- [16] LASAGNA M, MANCINI S, DE LUCA D A. Groundwater hydrodynamic behaviours based on water table levels to identify natural and anthropic controlling factors in the Piedmont Plain (Italy) [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 1-20. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137051.
- [17] 白城市水资源管理中心. 白城市水资源公报[M]. 2007—2017. (Baicheng Water Resources Management Center. Baicheng bulletin [M]. 2007—2017. (in Chinese))
- [18] 吉林统计局. 吉林统计年鉴[M/OL]. 长春: 吉林大学音像出版社, 2007—2017. (Statistic Bureau of Jilin. Jilin statistical yearbook [M/OL]. Changchun: Jilin University Audio and Video Press, 2007—2017. (in Chinese)) <http://tjj.jl.gov.cn/tjsj/tjnj/>.
- [19] 刘良云, 张肖. 2020 年全球 30 米精细地表覆盖产品 [DB/OL]. (2020-01-18) [2021-03-07]. LIU L Y, ZHANG X. Global 30 m fine surface coverage products in 2020 [DB/OL]. (2020-01-18) [2021-03-07]. <http://data.casearth.cn/sdo/detail/5fbc7904819aec1ea2dd7061>.
- [20] HASHIMOTO T, STEDINGER J R, LOUCKS D P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation [J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(1): 14-20. DOI: 10.1029/WR018i001p00014.
- [21] REN Z. Evaluation method of port enterprise product quality based on entropy weight TOPSIS [J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 103: 766-769. DOI: 10.2112/si103-158.1.
- [22] MANN H B. Non-parametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259. DOI: 10.2307/1907187.
- [23] KENDALL M G. Rank auto-correlation methods [M]. Charles Griffin, London, England, 1975.
- [24] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(2): 1379-1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
- [25] 张丽姝. 引水灌溉对大安市地下水及表生生态景观的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012. (ZHANG L Z. Study on the groundwater and ecological landscape influenced by water diversion project in Da'an County [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese))

## A small-scale groundwater sustainability assessment based on the response of artificial mining:

### A case study of Da'an City, Jilin Province

DING Xiaofan<sup>1</sup>, FANG Zhang<sup>1</sup>, GAO Han<sup>1</sup>, LIU Zhuguang<sup>1</sup>, LI Jisen<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, China; 2. Da'an Water Administration and Water Resources Management Center, Jilin Province, Baicheng 131300, China)

**Abstract:** Da'an City is located in the northwestern part of Jilin Province, an important grain-producing and also a water-scarce area. 50% of the land surface in Da'an City is covered by arable land, and relies on groundwater irrigation. Under water supply and demand contradiction, Da'an City urgently needs a convenient and reliable method to quickly grasp the distribution of local groundwater sustainability and guidelines for future groundwater management. Considering the complexity of numerical simulation methods a new method is needed to take the advantage of sufficient available groundwater level data which can be competent for small-scale groundwater sustainability.

An artificial mining response-based groundwater sustainability index (AGSI) was proposed to highlight the impact of human mining activities on groundwater dynamics. The entropy TOPSIS method is used to determine the artificial mining degree of groundwater according to the data of groundwater exploitation in the study area. To achieve a spatial difference, it is necessary to decompose the pressure exerted by artificial mining on groundwater sustainability in each monitoring well through the decomposition coefficient, that could be correlated with the groundwater response state. Inverse distance weight interpolation method is used in ArcGIS to complete the conversion of AGSI value from point to surface.

The average AGSI value of the whole aquifer, the Quaternary phreatic water and confined water, and the sustainability level subzones of each aquifer were obtained. Confined water was the main exploitation water source in the study area, and the analysis showed that the changing trend of the average AGSI value was the same as that of the exploited volume, indicating that the sustainability of confined water was significantly affected by it. The average AGSI value of phreatic water was similar to the trend of precipitation and was slightly affected by the amount of exploitation. Confined water's average AGSI value was higher than that of phreatic water until 2015, and it continued to fall below phreatic water subsequent years due to unreasonable exploitation. The value of phreatic water increased with a trend of 0.01/a and the confined water decreased with a trend of 0.04/a indicate that the risk of damage to groundwater sustainability was shifting from phreatic water to confined water. This trend was not significant at 95% confidence level. The coverage rate of "Low" sustainability subzone of phreatic water reached its maximum value of 45.2% in 2010, because dry climate promoted evaporation that year, while the coverage rate of "Low" sustainability subzone of confined water reached its maximum value of 32.5% in 2017, which was related to the increasing mining volume in recent years.

The average AGSI value obtained by the AGSI method can better quantify the overall state of a certain type of water body sustainability. The process of groundwater sustainability changing with time, helps to detect sudden increases and decreases of sustainability in time, and guides managers to implement correct plans to encourage or restrict extraction. This also reflects the multi-year trend and change rate of sustainability to identify the management objects that should be focused on to improve groundwater sustainability. The sustainability level subzones drawn by the AGSI method indicate that the development potential areas and mining protection areas of different types of groundwater consistent with the multi-year dynamic situation of groundwater level. The groundwater sustainability evaluated by this method pays more attention to the effect of human exploitation, and the evaluation results are more suitable for guiding exploitation activities.

**Key words:** artificial mining; groundwater response; small scale; sustainability assessment; Da'an City