

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2020.0009

姜秋香,张舜凯,张旭,等. 三江平原水资源开发利用程度变化与驱动因素[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(1): 74-81. JIANG Q X, ZHANG S K, ZHANG X, et al. Assessment of variations and driving factors of water resources development and utilization in the Sanjiang plain[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 74-81. (in Chinese)

三江平原水资源开发利用程度变化与驱动因素

姜秋香,张舜凯,张旭,王子龙

(东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要:水资源开发利用程度评估与分析研究对于区域水利规划和水资源管理具有实践指导意义。三江平原作为国家商品粮生产基地,具有保障国家粮食安全的重要作用,同时,水资源开发利用问题与供需矛盾也日益凸显。为了定量研究三江平原水资源开发利用状况与态势,运用基于变异系数和相对熵改进的TOPSIS方法,对研究区水资源开发利用程度进行了综合评价,并对1984—2011年研究区水资源开发利用程度变化特征及驱动因素进行了分析。结果表明:2011年三江平原水资源开发利用程度处于中等水平,东北部地区较高,西南部地区较低;2001年是三江平原水资源开发利用程度变化的时间节点,2001—2011年十年间三江平原一半以上分区的水资源开发利用程度发展至中等水平;地下水资源开发利用和农业灌溉是三江平原及其大部分分区水资源开发利用程度变化的核心驱动因素,鹤岗市、双鸭山市和佳木斯市是推动研究区水资源开发利用程度演变的主要分区;相比2011年,2017年三江平原水资源开发利用程度和关键驱动因素无明显变化。研究结果可为三江平原水资源可持续利用提供参考和借鉴。

关键词:水资源开发利用;TOPSIS;变异系数;相对熵;三江平原

中图分类号:TV211 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Assessment of variations and driving factors of water resources development and utilization in the Sanjiang plain

JIANG Qiuxiang, ZHANG Shunkai, ZHANG Xu, WANG Zilong

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Assessment and analysis of water resources development and utilization level provide practical and significance guidance for regional water resources planning and management. Sanjiang plain which is a national grain production base plays an important role in ensuring national food security. On the other hand, water resources development and utilization issues, and contradiction between supply and demand are prominent. To quantitatively study the status and situation of water resources development and utilization, the improved TOPSIS method based on variance coefficient and relative entropy was used to comprehensively evaluate the development and utilization of water resources in the study area. The change characteristics and driving factors of water resources development and utilization level in the study area from 1984 to 2011 were also analyzed. The results showed that the level of water resources development and utilization in the Sanjiang plain was moderate while higher levels in the northeast area compared to southwest area. The change time point of water resources development and utilization level was found in the year of 2001 in the Sanjiang plain. From 2001 to 2011, more than half subareas in the Sanjiang plain developed to moderate level. The groundwater resource utilization and agricultural irrigation were the core driving factors for the development and utilization of water resources in Sanjiang plain. Hegang City, Shuangyashan City, and Jiamusi City were the main subareas

收稿日期:2019-06-03 修回日期:2019-09-02 网络出版时间:2019-09-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190912.1634.005.html>

基金项目:黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2017022)

作者简介:姜秋香(1982—),女,黑龙江佳木斯人,副教授,主要从事水土资源高效利用和管理研究。E-mail:jiangqiuxiang@neau.edu.cn

通信作者:王子龙(1982—),男,山东胶州人,教授,主要从事寒区农业水土资源高效利用研究。E-mail:wangzilong@neau.edu.cn

that promoted the utilization and development of water resources in the study area. Compared to 2011, the water resources development and utilization level and the key driving factors of the region had no fundamental changes in 2017. The research results can provide references for sustainable water resources utilization in the Sanjiang plain.

Key words: water resources development and utilization; TOPSIS; variance coefficient; relative entropy; Sanjiang plain

水资源是不可替代的自然资源和国家的经济资源,其开发利用对于区域社会经济发展及生态环境保护既有资源支撑的推动作用,又有阈值约束的反制作用^[1]。三江平原是我国重要商品粮生产基地,随着黑龙江省千亿斤粮食产能巩固提高工程和“两大平原”现代农业综合配套改革试验等国家战略的稳步实施,三江平原保障国家粮食安全的地位和作用更加凸显^[2]。同时,三江连通工程等重大工程的持续推进,使三江平原水资源综合利用面临新问题、迎来新挑战。因此,综合评价三江平原水资源开发利用程度、分析其驱动因素,可为制定区域水资源开发利用策略、进而保障粮食安全提供科学支撑。

三江平原水资源开发利用程度综合评价属于多属性决策问题,目前常用方法主要有:AHP法^[3]、TOPSIS方法^[4]、VIKOR方法^[5]、ELECTRE方法^[6]、PROMETHEE方法^[7]等。其中,TOPSIS方法基于理想解原理,几何意义直观、数据利用充分、简便合理灵活,近年来被广泛应用于多属性决策研究。但是,典型TOPSIS方法在赋权和排序方面存在局限性,导致排序不合理或无结果现象^[8],学者们开展了诸多改进工作^[9-12],取得一定成效。根据三江平原数据类型和问题特点,采用变异系数和相对熵改进TOPSIS方法,将其运用在本文综合评价之中,基于此开展了动态变化和驱动因素分析,以期揭示三江平原水资源开发利用的状况和发展态势。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

三江平原位于中国东北地区、黑龙江省东部,是黑龙江、松花江和乌苏里江汇流冲积形成的低平原,见图1,总面积达10.9万km²。

三江平原属于中温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温为2.5~3.6℃,年降水量为500~600mm^[13]。三江平原多年平均水资源总量为197.7亿m³,其中多年平均地表水资源量为151.0亿m³,多年平均地下水资源量为92.3亿m³,区域水资源总体特征是时空分布不均、地下水资源比较丰富。历年以来三江平原供水量的60%以上来自地下水,用水量与供水量相当,其中农业灌溉用水量

最大,占90%以上。以2017年为现状年,三江平原地区年平均气温为4.7℃,年降水量为570.5mm^[14],区域气温升高、降雨量减少的趋势明显^[15]。三江平原各类供水工程实际供水总量为168.3亿m³,其中地表水供水量为66.8亿m³,地下水供水量为101.5亿m³。实际用水量为168.3亿m³,其中,农业灌溉用水量最大,为158.0亿m³,占三江平原总用水量的93.9%。三江平原共有水库280座,其中大型水库6座、中型水库27座、小型水库247座;总库容32.0亿m³,其中兴利库容16.4亿m³。相比研究时段末期2011年,现状年三江平原水资源开发利用状况无明显变化。

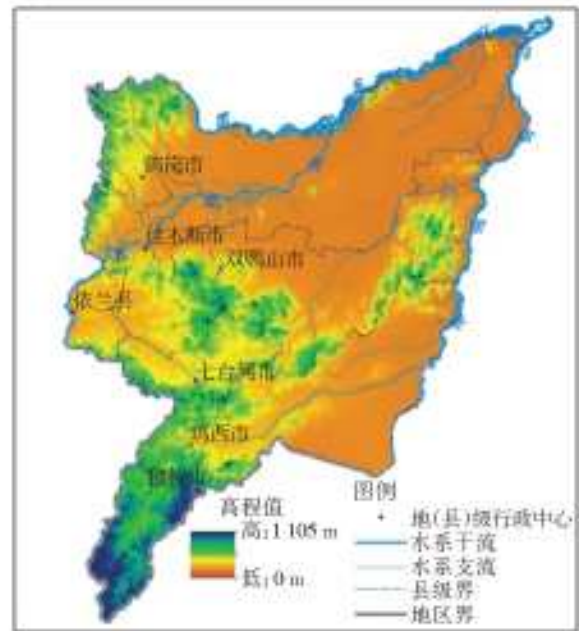


图1 三江平原概况

Fig. 1 Location map of the Sanjiang plain

1.2 研究方法

1.2.1 改进的TOPSIS方法

TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution)作为一种常用的多属性决策分析方法,由Hwang和Yoon于1981年首次提出^[4],该方法基于理想解原理,根据备选方案距离理想解的远近,对备选方案的优劣进行排序,即与理想解最近的方案为最优方案。由于典型TOPSIS方法在指标赋权和优劣排序方面存在明显不足,导致

主观因素干扰较大、贴近度计算不合理、优劣排序脱离实际等现象。本文运用变异系数法^[10]对评价指标进行赋权,采用相对熵^[8]计算贴近度,综合两种方法的优势解决典型 TOPSIS 方法的不足。改进的 TOPSIS 方法的计算步骤如下。

步骤 1:建立初始决策矩阵。设有 m 个待评价方案, n 个评价指标,则可以建立初始决策矩阵 \mathbf{X}_{ij} ,即

$$\mathbf{X}_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (i=1,2,3,\dots,m;j=1,2,3,\dots,n) \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个评价方案的第 j 个评价指标值。

步骤 2:构建标准化决策矩阵。为消除初始决策矩阵 \mathbf{X}_{ij} 中指标数量级及量纲的影响,采用线性变换法对 \mathbf{X}_{ij} 进行标准化处理,即

$$\text{对于越大越优的指标: } x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{x_{\max(j)}} \quad (2)$$

$$\text{对于越小越优的指标: } x_{ij}^* = \frac{x_{\min(j)}}{x_{ij}} \quad (3)$$

式中: $x_{\max(j)}$ 、 $x_{\min(j)}$ 分别为第 j 个指标值的最大值和最小值;标准化决策矩阵记为 \mathbf{X}_{ij}^* 。

步骤 3:构造加权标准化决策矩阵。将标准化决策矩阵 $\mathbf{X}_{ij}^* = x^*(i,j)_{m \times n}$ 与权重 $\mathbf{W}^* = W^*(j)_{1 \times n}$ ($j=1,2,3,\dots,n$) 相乘,构造加权标准化决策矩阵 $\mathbf{R} = r(i,j)_{m \times n}$,即 $r(i,j) = W^*(j) \times x^*(i,j)$ ($i=1,2,3,\dots,m;j=1,2,3,\dots,n$)。权重采用变异系数法确定,首先按照下式计算各指标的平均值 \bar{x}_j 和标准差 S_j ,即

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}^* \quad (j=1,2,3,\dots,n) \quad (4)$$

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij}^* - \bar{x}_j)^2} \quad (j=1,2,3,\dots,n) \quad (5)$$

然后,根据下式计算各指标的变异系数 V_j 和权重 W_j ,即

$$V_j = \frac{S_j}{\bar{x}_j} \quad (j=1,2,3,\dots,n) \quad (6)$$

$$W_j^* = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (j=1,2,3,\dots,n) \quad (7)$$

步骤 4:确定理想方案 R^+ 和负理想方案 R^- ,即

$$R^+ = [r(\max,1) \ r(\max,2) \ \cdots \ r(\max,n)] \quad (8)$$

$$R^- = [r(\min,1) \ r(\min,2) \ \cdots \ r(\min,n)] \quad (9)$$

步骤 5:计算各评价方案与理想方案的相对熵 D_i^+ 和负理想方案的相对熵 D_i^- ,即

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^n \left\{ r_j^+ \lg \frac{r_j^+}{r_{(i,j)}} + (1-r_j^+) \lg \frac{1-r_j^+}{1-r_{(i,j)}} \right\} \quad (10)$$

$$D_i^- = \sum_{j=1}^n \left\{ r_j^- \lg \frac{r_j^-}{r_{(i,j)}} + (1-r_j^-) \lg \frac{1-r_j^-}{1-r_{(i,j)}} \right\} \quad (11)$$

步骤 6:计算各方案与理想方案的贴近度 C_i ,根据贴近度 C_i 的大小进行排序, C_i 越大该方案越优,即

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (12)$$

1.2.2 水资源开发利用程度评价指标体系

水资源对于某一区域而言,受到其总量和类型相对固定的制约,根据开发过程可以大体划分为三个阶段:开发规模小、利用率低、耗水型为主、潜力巨大的初始阶段;开发规模中等、利用率较高、耗水向节水过渡、潜力较大的过渡阶段;开发接近阈值、利用率高、节水型为主、潜力很小的饱和阶段^[16]。

通过分析三江平原水资源系统特征、供需关系、工程情况及现有文献中的指标体系^[17-23],在充分考虑三江平原水资源自然禀赋及开发利用方式的基础上,选取了灌溉率(灌溉面积与土地面积之比)、水资源利用率(用水量与水资源总量之比)、水资源开发程度(供水量与水资源总量之比)、供水模数(供水量与土地面积之比)、人均供水量(供水量与总人口之比)、生态用水率(生态环境用水量与总用水量之比)、渠系水利用系数(末级渠系流出的总水量与渠首引水量之比)、地表水控制率(地表水蓄水工程年入库水量与地表水资源量之比)、地下水开发程度(机电井供水量与地下水资源量之比)、地表水开发程度(地表水供水量与地表水资源量之比)共计 10 个指标构建三江平原水资源开发利用程度评价指标体系。

前述水资源开发利用的初始、过渡、饱和三个阶段分别记为 V_1 、 V_2 、 V_3 ,其对应开发利用程度等级分别记为 I、II、III^[16],将 V_1 、 V_2 、 V_3 纳入待评价方案中,作为三江平原水资源开发利用程度等级划分的参考依据,三个等级各评价指标的分级值见表 1。

表 1 综合评价指标的分级值

评价指标	V_1	V_2	V_3
灌溉率 $I_1/\%$	<20	20~60	>60
水资源利用率 $I_2/\%$	<20	20~60	>60
水资源开发程度 $I_3/\%$	<30	30~70	>70
供水模数 $I_4/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^2)$	<40	40~100	>100
人均供水量 I_5/m^3	<1 000	1 000~3 000	>3 000
生态环境用水率 $I_6/\%$	>5	2~5	<2
渠系水利用系数 $I_7/\%$	<0.55	0.55~0.73	>0.73
地表水控制率 $I_8/\%$	<5	5~25	>25
地下水开发程度 $I_9/\%$	<30	30~70	>70
地表水开发程度 $I_{10}/\%$	<30	30~70	>70

2 结果与分析

2.1 三江平原水资源开发利用程度综合评价

根据三江平原的农业开发历史和水资源开发利用发展历程^[24],研究区在 20 世纪 80 年代初期的第一次农业开发高潮,加强了水利基本建设;在 20 世纪 90 年代初期的第二次农业开发高潮,成为全国重点农业综合开发区,对农业水问题进行了综合治理;在 21 世纪之初,现代化大农业建设初具雏形,水资源开发利用量大幅提升。2010 年黑龙江省粮食总产量首次突破千亿斤大关^[25],水资源支撑能力进一步提升。综合考虑以上情况,选择 1984、1991、2001、2011 年作为不同时期的代表年份。现以 2011 年为例,采用改进的 TOPSIS 方法对三江平原水资

源开发利用程度进行综合评价。其中,人口和土地面积数据来源于《黑龙江统计年鉴》^[26]、《哈尔滨统计年鉴》^[27]、《黑龙江垦区统计年鉴》^[28]等资料,其他水利类相关数据均来源于地方水利行政部门的统计资料,评价指标按行政区分别计算,三江平原总体数据为各分区的求和。

按照前文所述改进的 TOPSIS 方法计算步骤,对研究区数据分别建立了初始决策矩阵、标准化决策矩阵、加权标准化决策矩阵,其中由变异系数法确定的各指标权重见表 2,根据相对熵公式计算的 D_i^+ 和 D_i^- 以及贴近度 C_i 计算结果和排序见表 3。

根据表 2 各评价指标权重可知,权重大的四个评价指标依次为供需水模数、人均供水量、灌溉率、地表水控制率,权重最小的评价指标为渠系水利用系数。

表 2 评价指标权重

Tab. 2 The weights of evaluation indexes

指标	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}
权重	0.125 4	0.081 2	0.076 3	0.167 7	0.138 1	0.085 7	0.029 6	0.155 6	0.089 7	0.092 9

表 3 相对熵与贴近度

Tab. 3 Relative entropy and closeness

样本	V_1	V_2	V_3	三江平原	佳木斯	鹤岗	双鸭山	七台河	鸡西	穆棱	依兰
D_i^+	0.693	0.208	0.031	0.301	0.283	0.308	0.376	0.417	0.288	0.812	0.373
D_i^-	0.018	0.129	0.313	0.096	0.143	0.093	0.084	0.073	0.098	0.060	0.129
C_i	0.025	0.384	0.909	0.243	0.335	0.233	0.183	0.149	0.253	0.069	0.129
排序	11	2	1	5	3	6	7	8	4	10	9

由表 3 可知,2011 年三江平原及各分区贴近度介于 0.069~0.335,处于 I 级和 II 级之间,属于低中级水资源开发利用程度,利用率达一定水平,开发具有相当规模,方式走向深度开发,类型由耗水型向节水型过渡,但仍具有较大开发潜力。为了确定 2011 年三江平原及各分区的水资源开发利用程度所属等级,按以下准则进一步判断。

将待判断区域的贴近度分别单独与 V_1 、 V_2 、 V_3 的贴近度按从大到小顺序进行排序,设其排在第位,则判断准则如下。

- (1) 当 $n=1$ 时,待判断区域为等级 I。
- (2) 当 $n=4$ 时,待判断区域为等级 III。

(3) 当 $1 < n < 4$ 时,通过计算待判断区域 C_n 与相邻等级 C_{n-1} 、 C_{n+1} 的趋近度 α 确定,即

$$\alpha = \left| \frac{C_n - C_{n-1}}{C_n - C_{n+1}} \right| \quad (13)$$

- ① 若 $\alpha > 1$,待判断区域为等级 n 。
- ② 若 $\alpha < 1$,待判断区域为等级 $n-1$ 。

③ 若 $\alpha = 1$,设效益型指标权重和为 w ,成本型指标权重和为 w^* ,则有:当 $w > w^*$,待判断区域为等级 n ;当 $w < w^*$,待判断区域为等级 $n-1$ 。

根据以上判断准则得到 2011 年三江平原及各分区水资源开发利用程度所属等级结果,见表 4。

表 4 2011 年三江平原水资源开发利用程度评价结果

Tab. 4 Evaluation results of water resources development and utilization level in the Sanjiang plain (2011)

评价区域	三江平原	佳木斯	鹤岗	双鸭山	七台河	鸡西	穆棱	依兰
所属等级	II	II	II	I	I	II	I	I

2.2 三江平原水资源开发利用程度动态变化

采用改进的 TOPSIS 方法,对 2011、2001、1991、1984 年共计 4 年的三江平原水资源开发利用

程度进行了综合评价,并绘制了其等级分布与变化,见图 2。

由图 2 可知,随着三江平原粮食生产能力的提



图 2 三江平原水资源开发利用程度等级分布与动态变化
Fig. 2 Grade distribution and dynamic changes of water resources development and utilization level in the Sanjiang plain

升、农业用水需求量的增大和水利工程建设推进,区域水资源开发利用程度等级整体提高。从空间分布上来看,2011 年三江平原各分区水资源开发利用程度空间分布不均匀,东北部地区相对较高,鹤岗市、佳木斯市、双鸭山市三个分区均属于 II 级,开发规模为中等,节水型管理已经发挥作用,利用率较高、开发潜力较大;而西南部地区较低,除七台河市属于 II 级外,依兰县、鸡西市和穆棱市三个分区均属于 I 级,开发规模较小,耗水型管理占主导地位,开发利用处于初级阶段、利用率低、开发潜力巨大。从时间变化上来看,2001 年以前三江平原各分区水资源开发利用程度等级均属于 I 级,开发规模、利用率维持在较低水平,而自 2001 年至 2011 年的十年之间,三江平原 50% 以上地区等级有了跨越式提升,表明这些地区随着量的累积,在开发阶段与利用状态方面发生了质的变化。从地形分布上来看,2011 年位于三江平原东北部低平原地区的水资源开发利用程度较高,而位于三江平原西南部丘陵地带地区较低,表明对于三江平原而言,取水、引水、用水的难度和成本是影响区域水资源开发利用的关键因素之一。从城市类型上来看,鹤岗市、双鸭山市、七台河市三个等级为 II 级的地区均属于资源型城市,2011 年第二产业占地区国民生产总值的比例均超过 45%;佳木斯市也为 II 级,该地区为典型农业大市,旱田作物播种面积和水稻种植面积均在三江平原地区占有较大比重。

综上所述,2011 年三江平原水资源开发利用程度总体上已发展至第二阶段,仍有较大开发潜力,但是各地区发展不平衡,水资源开发利用受区域地形、

城市类型等因素的影响。与 2011 年相比,2017 年三江平原供水量、用水量、水资源利用率、水利工程数量均有所提高,但是提高幅度不大,区域水资源开发利用程度发展相对较慢。

2.3 水资源开发利用程度变化驱动因素分析

2011 年三江平原水资源开发利用程度总体上呈现出不均衡和不协调的特征,一方面各分区之间发展极不均衡,穆棱市水资源开发利用程度贴近度为 0.069,非常接近 I 级,而佳木斯市为 0.335,非常接近 II 级,表明三江平原各分区差异性显著;另一方面,各分区地表、地下水资源开发利用不协调,佳木斯市、鹤岗市、双鸭山市地下水开发程度均超过了 100%,其中佳木斯市最高超过 130%,而各分区地表水开发程度大部分低于 35%,地表水控制率均低于 16%,其中佳木斯市地表水控制率最低仅为 8%。

为了对比分析三江平原水资源开发利用程度演进的关键指标,揭示其驱动因素和限制条件,为未来研究区水资源开发利用提供参考,根据 1984、1991、2001 和 2011 年三江平原各分区水资源开发利用数据资料,绘制了其评价指标动态变化图,见图 3。

为了解析驱动因素,采用评价指标变化率和相对变化率^[29]进行分析,其中,评价指标变化率是指某一区域某一指标在研究末期相对于研究初期的变化率;相对变化率是指某一区域某一指标的变化率相对于整个区域该指标变化率的比例。

由图 3 和数据分析结果可知,1984—2011 年的 28 年间,评价指标变化率居前 3 位的依次是地下水开发程度、灌溉率和供水模数,其中地下水开发程度 28 年间增加近 40 倍,变化率最小是地表水开发程度;对于各分区而言,佳木斯市、双鸭山市、七台河市和鸡西市居前 3 位的评价指标与三江平原整体情况相同,鹤岗市、穆棱市和依兰县居前 3 位的评价指标均包括地下水开发程度、地表水控制率和灌溉率,但是排序不一致,鹤岗市排名第一的是地下水开发程度,穆棱市和依兰县排名第一的是地表水控制率。三江平原各分区评价指标相对变化率大小排序呈多样化,对于各评价指标而言,地下水开发程度相对变化率居前 3 位的分区依次为鹤岗市、双鸭山市和佳木斯市,灌溉率相对变化率居前 3 位的分区依次为佳木斯市、鹤岗市和双鸭山市,供水模数相对变化率居前 3 位的分区依次为鹤岗市、双鸭山市和佳木斯市,以上三个评价指标相对变化率最小的分区均为七台河市、依兰县和穆棱市;对于各分区而言,居前 3 位的指标涵盖了评价指标体系中全部 10 个指标

中的6个,鹤岗市、穆棱市和依兰县排名第一的评价指标均为地表水控制率,七台河市和鸡西市排名第

一的评价指标均为地表水开发程度,佳木斯市为灌溉率,双鸭山市为供水模数。

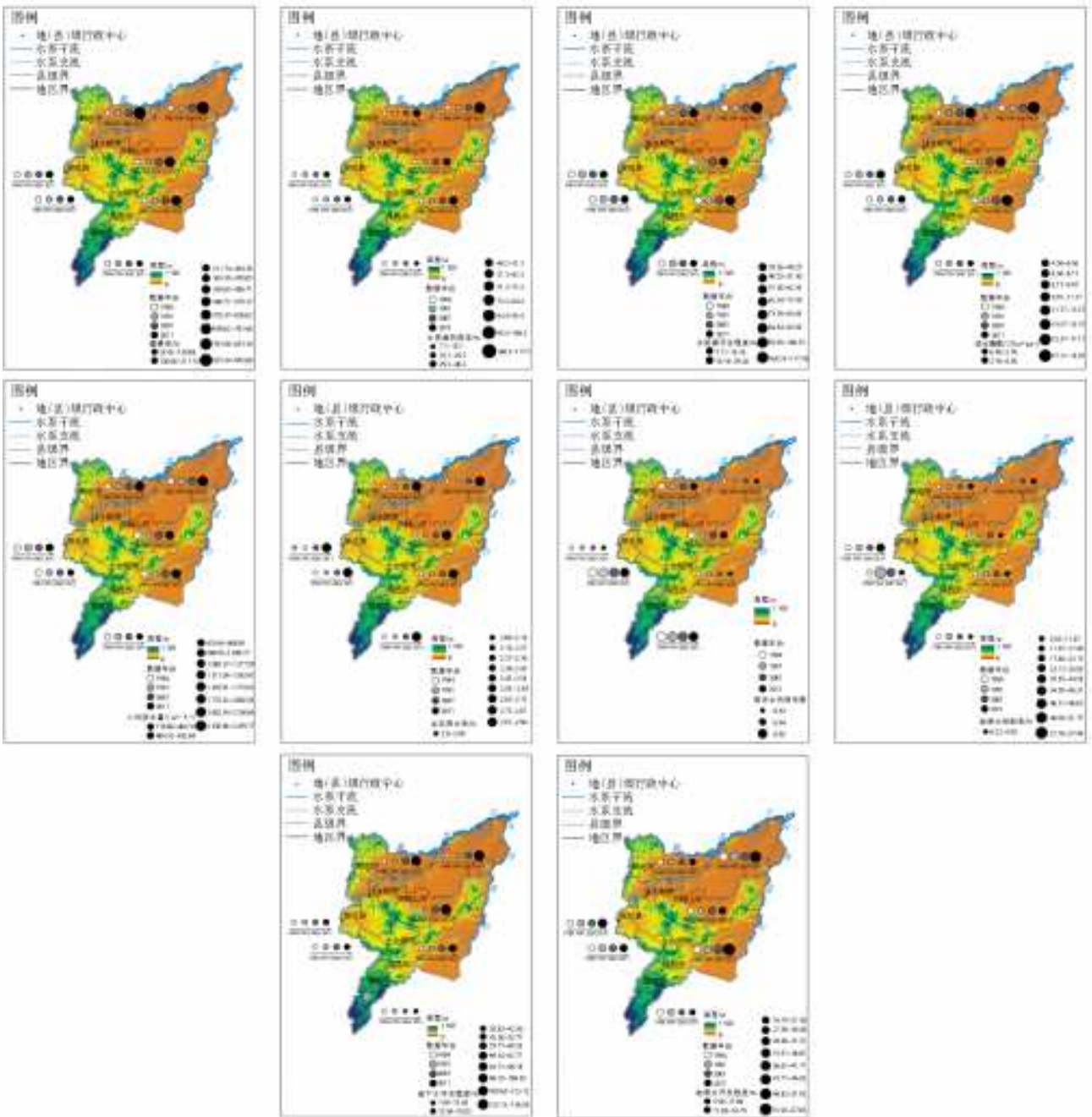


图3 三江平原水资源开发利用程度评价指标动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of indexes for water resources development and utilization level evaluation in the Sanjiang plain

对于研究区整体而言,地下水资源开发利用和农业灌溉用水量增加是区域水资源开发利用程度变化的主要驱动因素,地表水开发利用则是限制条件;对于各分区而言,大部分分区水资源开发利用程度变化的核心驱动因素是地下水资源开发利用,只有穆棱市和依兰县的核心驱动因素是地表水控制率,同时农业灌溉用水量增加在推动所有分区变化中起到了重要作用;就各分区对研究区水资源开发利用程度变化的贡献而言,鹤岗市、双鸭山市和佳木

斯市贡献最大,而七台河市、依兰县和穆棱市贡献最小。相比2011年,现状年三江平原地表水开发利用程度有所提升,地下水开发利用程度有所下降,农业灌溉用水量虽然小幅增加,但是其占总用水量的比例有所下降,总体而言,主要驱动因素没有发生明显变化。

3 结论

(1) 采用变异系数和相对熵组合改进典型

TOPSIS 方法,对三江平原水资源开发利用程度进行综合评价,既避免了主观赋权的人为干扰,又弥补了欧氏距离计算贴近度的不足,评价结果符合实际,评价方法合理有效。

(2)三江平原水资源开发利用程度整体上显著提升,已属于中等水平,但是研究区各分区等级东北部高、西南部低,平原地区高、丘陵地区低,资源性和农业发达城市高,一半以上分区等级阶梯式提高。

(3)三江平原水资源开发利用程度变化的主要驱动因素为地下水资源开发利用和农业灌溉用水量增加,二者同时也是驱动大部分分区变化的核心因素,研究区北部的鹤岗市、双鸭山市和佳木斯市水资源开发利用程度演进是改变整体情况的关键所在。

参考文献(References):

- [1] 夏军,张翔,韦芳良,等. 流域水系统理论及其在我国的实践[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 1-7, 13. (XIA J, ZHANG X, WEI F L, et al. Water system theory and its practices in China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 1-7, 13. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 20180001.
- [2] 付强,李佳鸿,刘东,等. 考虑风险价值的不确定性水资源优化配置[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 136-144. (FU Q, LI J H, LIU D, et al. Allocation optimization of water resources based on uncertainty stochastic programming model considering risk value[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 136-144. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2016. 07. 019.
- [3] 赵焕臣. 层次分析法[M]. 北京: 科学出版社, 1986. (ZHAO H C. Analytic hierarchy process[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese))
- [4] HWANG C L, YOON K. Multiple attributes decision making methods and applications[M]. Berlin: Springer, 1981.
- [5] SAN CRISTÓBAL J R. Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The VIKOR method[J]. Renewable Energy, 2011, 36(2): 498-502.
- [6] ROY B. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods[J]. Theory & Decision, 1991, 31(1): 49-73.
- [7] BRANS J P, MARESCHAL B. The PROMETHEE methods for MCDM; The PROMCALC, GAIA and BANKADVISER software[A]. Readings in Multiple Criteria Decision Aid[C]. Berlin: Springer, 1990: 216-252.
- [8] 赵萌,邱苑华,刘北上. 基于相对熵的多属性决策排序

方法[J]. 控制与决策, 2010(7): 1098-1100, 1104. (ZHAO M, QIU W H, LIU B S. Relative entropy evaluation method for multiple attribute decision making[J]. Control and Decision, 2010(7): 1098-1100, 1104. (in Chinese)) DOI: 10. 13195/j. cd. 2010. 07. 141. zhaom. 029.

- [9] 李晓峰,刘宗鑫,彭清娥. TOPSIS 模型的改进算法及其在河流健康评价中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(2): 14-21. (LI X F, LIU Z X, PENG Q E. Improved algorithm of TOPSIS model and its application in river health assessment[J]. Journal of Sichuan University (Engineering and Science Edition), 2011, 43(2): 14-21. (in Chinese)) DOI: 10. 15961/j. jsuese. 2011. 02. 037.
- [10] 宋成舜,谈兵,韩冰华,等. 基于变异系数 TOPSIS 法的土地利用效益测度研究——以武汉城市圈为例[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 286-291. (SONG C S, TAN B, HAN B H, et al. Comprehensive evaluation of land use benefits based on the variance coefficient-TOPSIS method in Wuhan metropolitan area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1): 286-291. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2015. 01. 052.
- [11] 徐存东,翟东辉,张硕,等. 改进的 TOPSIS 综合评价模型在河道整治方案优选中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 222-228. (XU C D, ZHAI D H, ZHANG S, et al. Application of improved TOPSIS comprehensive evaluation model to optimization of river regulation schemes [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2013, 41(3): 222-228. (in Chinese)) DOI: 1000-1980(2013) 03-0222-07.
- [12] 张峰,谢振华,程江涛,等. 基于主成分的改进马氏距离 TOPSIS 方法[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(3): 92-95. (ZHANG F, XIE Z H, CHENG J T, et al. Method to improved Mahalanobis Distance of TOPSIS based on principal component [J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(3): 92-95. (in Chinese))
- [13] 刘春艳,张科,刘吉平. 1976—2013 年三江平原景观生态风险变化及驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 3729-3740. (LIU C Y, ZHANG K, LIU J P. A long-term site study for the ecological risk migration of landscapes and its driving forces in the Sanjiang Plain from 1976 to 2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(11): 3729-3740. (in Chinese))
- [14] 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. (Heilongjiang Bureau of Statistics. Heilongjiang statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018. (in Chinese))
- [15] WANG Z L, JIANG Q X, FU Q, et al. Eco-environ-

- mental effects of water resources development and utilization in the Sanjiang plain, northeast China[J]. Water Science and Technology-Water Supply, 2018, 18(3):1051-1061.
- [16] 高彦春,刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限分析[J]. 水利学报, 1997(8):73-79. (GAO Y C, LIU C M. Limit analysis on the development and utilization of regional water resources[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(8):73-79. (in Chinese)) DOI:10.13243/j. cnki. slxb. 1997. 08. 013.
- [17] 贾嵘,薛惠锋,薛小杰,等. 区域水资源开发利用程度综合评价[J]. 中国农村水利水电, 1999(11):22-24. (JIA R, XUE H F, XUE X J, et al. Comprehensive evaluation of development level of regional water resources[J]. China Rural Water and Hydropower, 1999(11):22-24,26. (in Chinese))
- [18] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究——以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报, 1993, 8(3):229-237. (XU Y P. A study of comprehensive evaluation of the water resource carrying capacity in the arid area—a case study in the Hetian River basin of Xinjiang[J]. Journal of Natural Resources, 1993, 8(3):229-237. (in Chinese))
- [19] 陈家琦. 可持续的水资源开发与利用[J]. 自然资源学报, 1995, 10(3):252-258. (CHEN J Q. Sustainable development and utilization of water resource[J]. Journal of Natural Resources, 1995, 10(3):252-258. (in Chinese))
- [20] 杨朝晖. 面向生态文明的水资源综合调控研究——以洞庭湖区为例[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013. (YANG Z H. Study on ecological civilization-oriented integrated control and regulation of water resources—a case study of Dongting Lake area[D]. Beijing:China Institute of Water Resources & Hydropower Research, 2013. (in Chinese))
- [21] 傅湘,纪昌明. 区域水资源承载能力综合评价——主成分分析法的应用[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(2):168-173. (FU X, JI C M. A comprehensive evaluation of the regional water resources carrying capacity—application of main component analysis method [J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 1999, 8(2):168-173. (in Chinese))
- [22] 来海亮,汪党献,吴涤非. 水资源及其开发利用综合评价指标体系[J]. 水科学进展, 2006, 17(1):95-101. (LAI H L, WANG D X, WU D F. Comprehensive assessment indicator system for water resources and its development and use [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1):95-101. (in Chinese)) DOI:10.14042/j. cnki. 32. 1309. 2006. 01. 016.
- [23] 朱玉仙,黄义星,王丽杰. 水资源可持续开发利用综合评价方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(1):55-57, 63. (ZHU Y X, HUANG Y X, WANG L J. Synthetical evaluating method of water resources sustainable development and using status, 2002, 32(1):55-57, 63. (in Chinese)) DOI:10.13278/j. cnki. jjuese. 2002. 01. 014.
- [24] 何璉. 中国三江平原[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社, 2000. (HE L. Sanjiang Plain of China [M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [25] 陆兵. 打造千亿斤粮食生产基地为保障粮食安全作贡献[J]. 中国水利, 2011(6):43-44. (LU B. Creating a food production base of fifty million tons and contributing to food security of China [J]. China Water Resources, 2011(6):43-44. (in Chinese))
- [26] 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2012. (Heilongjiang Bureau of Statistics. Heilongjiang statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012. (in Chinese))
- [27] 哈尔滨市统计局. 哈尔滨统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2012. (Harbin Bureau of Statistics. Harbin statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012. (in Chinese))
- [28] 黑龙江省农垦总局统计局. 黑龙江垦区统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2012. (Bureau of Statistics of Heilongjiang Farms & Land Reclamation Administration. statistical yearbook of Heilongjiang state farms [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012. (in Chinese))
- [29] 肖思思,吴春笃,储金宇. 1980—2005年太湖地区土地利用变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(23):1-11. (XIAO S S, WU C D, CU J Y. Land use changes and driving forces in Tai Lake region from 1980 to 2005 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(23):1-11. (in Chinese)) DOI:1002-6819(2012)-23-0001-11.