

文章编号:1009-3087(2014)02-0020-09

基于集对分析的区域节水灌溉发展水平综合评价模型构建与应用 ——以四川为例

楼豫红^{1,2},康绍忠¹,崔宁博^{3,4*},杨皓翔³,王君勤⁵

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083; 2. 四川省农田水利局,四川 成都 610015;

3. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 水利水电学院,四川 成都 610065;

4. 南方丘区节水农业研究四川省重点实验室,四川 成都 610066;5. 四川省水利科学研究院,四川 成都 610072)

摘 要:详细分析了节水灌溉发展水平的影响因素,选取工程节水、农艺节水和管理节水3项2级指标和灌溉水利利用系数等33项3级指标,构建了节水灌溉发展水平综合评价指标体系。采用主成分分析法,将以上指标体系在保留原始指标信息的前提下简化为14项主成分因子,以互不相关的较少的综合指标来反映原始指标所提供的信息;采用熵权法确定客观权重,层次分析法确定主观权重,进而得到组合权重;采用集对分析计算联系度得到区域节水灌溉发展水平综合评价结果。以四川省各地区节水灌溉发展现状为例进行计算,评价结果表明:只有成都、攀枝花2个地区处于“一般”水平,占整个地区的9%,处于“较差”和“差”水平的分别有7个地区和12个地区,所占比例为33%、58%;四川全省区域节水灌溉发展水平综合评价结果处于“差”水平。研究表明,未来针对不同地区采取合理措施情况下四川省发展节水灌溉的潜力较大。

关键词:节水灌溉发展水平;集对分析;组合权重;四川

中图分类号:TV11

文献标志码:A

Application of Set Pair Analysis in the Comprehensive Water-saving Irrigation Development Level Evaluation

LOU Yuhong^{1,2}, KANG Shaozhong¹, CUI Ningbo^{3,4*}, YANG Haoxiang³, WANG Junqin⁵

(1. College of Water Conservancy and Civil Eng., China Agricultural Univ., Beijing 100083, China; 2. Sichuan Rural Irrigation and Water Conservancy Bureau, Chengdu 610015, China; 3. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resource and Hydropower, Sichuan Univ.,

Chengdu 610065, China; 4. Provincial Key Lab. of Water-saving Agriculture in Hill Areas of Southern China, Chengdu 610066, China;

5. Sichuan Provincial Water Conservancy Research Inst., Chengdu 610072, China)

Abstract: Connotation of water-saving irrigation was elaborated, and the factors of water-efficient irrigation developing were analyzed. Three items of sub-indices of engineering, agriculture and management water-saving were adopted. Firstly, main ingredients with thirty-three indices of the sub-indices were extracted to reduce the number of evaluation indices and establish index system of regional water-saving irrigation developing level evaluation model. Secondly, combination weights were formed from both of objective weight determined by entropy weight method and subjective weight determined by analytic hierarchy process method. Finally, the set pair analysis was selected for analysis. The evaluations showed that two regions are of general, seven regions are of relatively poor, twelve regions are of poor, and the rations of them in all regions are 9%, 33% and 58%, respectively. The results indicated that water-efficient irrigation developing level of every region is still lower, and the overall of Sichuan province is evaluated with level of poor. Therefore, the model has a strong practicality to evaluate the water-saving irrigation development in different regions.

Key words: water-saving irrigation developing level; evaluation model set pair analysis; combination weights; Sichuan province

节水灌溉(water-saving irrigation)是指以较少的

灌溉水量取得最大的生产效益和经济效益。节水灌溉技术体系一般包括水资源开发利用技术、节水灌溉工程技术、节水高效农艺技术和节水管理技术等部分^[1]。2010年中国灌溉水利用系数仅为0.5^[2],因此科学有效地对区域节水灌溉发展水平进行评价,制定有区域特色的发展规划,对于提升节水灌溉发展水平意义重大。

收稿日期:2013-09-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51009101);水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201101039);南方丘区节水农业研究四川省重点实验室开放基金项目(JSSYS2014-C)

作者简介:楼豫红(1964-),女,博士生,高级工程师。研究方向:农业节水灌溉技术与管理。E-mail: yuhonglou@sina.com

* 通讯联系人 E-mail: cuiningbo@126.com

近年来,节水灌溉发展综合评价日趋复杂化、数学化、多学科化^[3]。崔远来等^[4]分析了传统灌溉效率指标在节水效果评估及水资源调配决策中的局限性,并对不同尺度下评价指标进行评述。侯鲁川^[5]将模糊综合评判法应用到区域农业节水综合评价中,取得了较为客观的结果,但该方法需要构造复杂的评价指标的隶属函数。郑睿^[6]采用层次分析法对灌区节水改造建设进行综合评价,并选择了不同灌区进行了验证,但层次分析法判断矩阵主要受评判标准的支配,评判标准的客观性决定评价结果准确度。吴景社^[7]采用小波神经网络方法对区域节水灌溉效应进行综合评价,证明了基于小波神经网络的评价方法是一种有效可行的方法,但神经网络需要建立更简洁、更完善和更有效的非线性系统表达与分析方法,计算的基础理论框架仍需深入研究^[8]。

集对分析(set pair analysis,SPA)是赵克勤为解决不确定性系统问题而提出的一种数学分析方法;它从整体和局部研究对象间内在的关系,以集对联系度分析集对间的对立与统一特征、确定与不确定性^[9]。区域节水灌溉发展水平的影响因素之间可能存在着线性关系和非线性关系、动态规律和静态特征;评价体系可能是随机的,也可能是模糊的、灰色的,可能是简单,也可能是复杂耦合系统,运用其他方法很难对其进行量化评价。SPA能够实现定性与定量结合,确定性与不确定性兼顾,因此SPA这一多指标复杂体系评价方法愈来愈受到人们重视。郭小东等^[10]应用SPA理论和方法建立了灾情评估的SPA模型,并将评价结果同PC-NN网络模型等方法的评价结果进行比较,表明其用于洪水灾情综合评价具有科学性和有效性。马细霞等^[11]将SPA应用在旱情评价中并建立了基于SPA的旱情评价综合模型。此外SPA还广泛应用于城市生态系统评价^[12]、水体富营养化程度评价等领域^[13]。

作者拟构建科学的区域节水灌溉发展水平综合评价指标体系,同时,通过主成分分析法对其进行简化,利用集对分析法构建区域节水灌溉发展水平综合评价模型,并以四川省为例对模型进行应用,为区域节水灌溉发展水平综合评价提供理论依据。

1 区域节水灌溉发展水平综合评价指标体系的建立

1.1 评价指标的选取

节水灌溉发展指标选取及指标之间结构关系的确定,是区域节水灌溉发展水平综合评价指标体系构建的基础。影响区域节水灌溉发展水平的因素很

多,本研究依据科学、全面、可比的原则构建评价指标体系。

1.1.1 工程节水

目前中国灌溉用水损失的80%以上发生在从水源到田间的输水过程(即水源囤蓄过程、灌溉输水过程和田间用水过程)最大限度降低这一过程中的水量损失是节水灌溉工作的核心内容。本研究选取的工程节水技术指标有:节水灌溉面积占有效灌溉面积比例、已建高效节水灌溉面积占节水灌溉面积比例、节水灌溉面积占耕地面积比例、灌溉水利利用系数、每亩节水灌溉平均效益、每亩灌面灌溉用水量、主要农作物单位面积产量、人均地区生产总值、已建渠道防渗率、防渗渠道完好率、农业灌溉用水量、近3年农田水利建设年均投资,共12个指标。

1.1.2 农艺节水

作物品种、栽培技术、耕作措施都会明显影响作物灌溉用水量,目前中国农业用水存在缺水地区高耗水作物种植面积大、节水技术和节水型作物品种推广率低等问题。本研究选取的农艺节水技术指标有:水稻“早育秧”面积与栽插面积百分比、水稻薄浅湿晒灌面占栽秧面积百分比、农业人口年人均收入、耐旱作物推广面积比、大田作物水分生产率,共5个指标。

1.1.3 管理节水

国际上普遍认为通过有效的水资源管理可节水约50%^[14],近年来,国家对灌溉基础设施建设的投入不断加大,灌溉管理节水发展水平滞后成为制约节水灌溉发展的最显著因素。本研究选取的管理节水技术指标有:政策法规配套情况、产权制度改革完成情况、节水技术推广体系建设水平、政府支持水平、宣传教育水平、用水户参与水平、节水灌溉工程设计质量、工程配套完善率、节水灌溉工程管护水平、灌溉制度制定完善率、土壤墒情监测普及率、计量用水技术推广率、计划用水水平、节水灌溉激励机制健全水平、计量收费完善率、水价合理性,共16个指标。

综上所述,本研究在节水灌溉发展水平一级指标下共选取工程节水、农艺节水和管理节水3个2级指标、33个3级指标。指标体系见表1。

1.2 主成分提取

利用主成分分析提取区域节水灌溉发展水平综合评价指标体系的主成分可在保留原始指标信息的前提下,以互不相关的较少个数的综合指标(主成分)来反映原始指标所提供的信息^[9]。

表 1 区域节水灌溉发展水平综合评价指标体系

Tab. 1 Index system of comprehensive evaluation model of regional water-saving irrigation development level

目标层	系统层	指标层
工程 节水		节水灌溉面积占有效灌溉面积比例
		已建高效节水灌溉面积占节水灌溉面积比例
		节水灌溉面积占耕地面积比例
		灌溉水利用系数
		每亩节水灌溉平均效益
		每亩灌面灌溉用水量
		主要农作物单位面积产量
		人均地区生产总值
		已建渠道防渗漏率
		防淤渠道完好率
		农业灌溉用水量
		近 3 年农田水利建设年均投资
		水稻“早育秧”面积与栽插面积百分比
		水稻薄浅晒灌面占栽秧面积百分比
	区域节水 灌溉发展 水平综合 评价体系	农业人口年人均收入
		耐旱作物推广面积比
		大田作物水分生产率
	管理 节水	政策法规配套情况
		产权制度改革完成情况
		节水技术推广体系建设水平
		政府支持水平
		宣传教育水平
		用水户参与水平
		节水灌溉工程设计质量
		工程配套完善率
		节水灌溉工程管护水平
		灌溉制度制定完善率
		土壤墒情监测普及率
		计量用水技术推广率
		计划用水水平
		节水灌溉激励机制健全水平
		计量收费完善率
		水价合理性

主成分分析主要是确定原变量各主成分的系数。设随机向量 $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_p]$ 的协方差矩阵为 Σ , 即:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} Var(X_1) & Cov(X_1, X_2) & \cdots & Cov(X_1, X_p) \\ Cov(X_2, X_1) & Var(X_2) & \cdots & Cov(X_2, X_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Cov(X_p, X_1) & Cov(X_p, X_2) & \cdots & Var(X_p) \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据矩阵的性质可知 Σ 的 p 个特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0)$, 对应 p 个单位特征向量。求主成分的方法与步骤如下:

1) 根据协方差矩阵 Σ , 求出 Σ 的非零特征根, 并依大小顺序排列为:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0 \quad (2)$$

2) 求出每个特征根所对应的特征向量, 然后将其单位化, 得到单位特征向量:

$$\alpha_1 = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{p1} \end{bmatrix}, \alpha_2 = \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ \vdots \\ a_{p2} \end{bmatrix}, \dots, \alpha_p = \begin{bmatrix} a_{1p} \\ a_{2p} \\ \vdots \\ a_{pp} \end{bmatrix} \quad (3)$$

3) 写出主成分。根据计算得到的特征值计算出累计贡献率:

$$\sum_{k=1}^i \lambda_k / \sum_{k=1}^p \lambda_k \quad (4)$$

通常选取的 $m (m \leq p)$ 个主成分的累计贡献率 $\geq 85\%$, 这样表明选取前 m 个主成分基本包含了全部评价指标所具有的信息。写出主成分:

$$F_i = a_{1i}X_1 + a_{2i}X_2 + \dots + a_{pi}X_p, \quad i = 1, \dots, m \quad (5)$$

1.3 权重确定

评价指标权重的确定直接关系到最终评判结果的准确性。作者采用层次分析法(AHP)主观赋权和熵权法客观赋权相结合的组合赋权法, 确定评价指标综合权重^[15]。

1.3.1 熵权法

熵权法的基本思想是, 根据各数据序列本身对系统评价产生影响的变异, 来量化指标变化引起的综合效应, 变异性大的指标一般带来对评价结果更大的影响^[16]。

将多目标决策矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n}$ 归一化, 形成新的判断矩阵 $\Sigma = (b_{ij})_{m \times n}$, 其中,

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)}, \quad 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n \quad (6)$$

式中, $x_{\max}(i), x_{\min}(j)$ 分别为第 j 个指标在各方案中最大、最小值。

定义第 j 个评价指标的熵值, 则有:

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \left[\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right], 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n \quad (7)$$

式中, $f_{ij} = (1 + b_{ij}) / \sum_{j=1}^n (1 + b_{ij})$ 。则第 j 个评价指标的熵权为 β_j , 得客观权重向量 $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$, 即:

$$\beta_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j}, 1 \leq j \leq n \quad (8)$$

1.3.2 层次分析法

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是由运筹学家萨迪(Saaty T L)于1977年建立的一种非结构决策理论,特别适用于难于完全用定量进行分析的复杂问题。运用AHP分析问题,可分为建立层次结构模型、构造判断矩阵并赋值、层次单排序(计算权向量)与检验、层次总排序与检验等步骤^[17]。

将上述2种方法计算的权重结果对应第 j 个指标权重相乘,并归一化处理得到组合权重 w_j , 归一化公式为^[18]:

$$w_j = \frac{\alpha_j \times \beta_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j \times \beta_j}, 1 \leq j \leq n \quad (9)$$

其中, α_j 和 β_j 分别为利用AHP层次分析法和熵权法确定的第 j 个指标的权重。

2 基于集对分析的区域节水灌溉发展水平综合评价模型构建

2.1 集对分析原理

集对分析法是对构成集对因子之间的背景联系进行分析,假设有集合 A 和 B 组成的集对关系,对两者联系进行分解,共得 N 个特性联系。其中,2个集合所共有的特性有 S 个,存在 P 个对立的确定特性,而剩下的 $N - S - P$ 个特性记为 F ,2个集合间的关系尚不明确,则2个集合的综合联系度可定义为:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N_i} + \frac{P}{N_j} = a + b_i + c_j \quad (10)$$

式中: μ 为联系度; $\frac{S}{N}$ 、 $\frac{F}{N}$ 、 $\frac{P}{N}$ 分别表示2集合的同一度、差异度和对立度,可简记为 a 、 b 、 c ,三者满足 $a + b + c = 1$; i 为差异标记,取值在 $[-1, 1]$ 区间,也可仅作标记; j 为对立度系数,其值为 -1 ,同样也可仅作标记。

2.2 计算联系度

联系度体现了集合间的同一、差异、对立3种联系。当 $i = 1$,差异度即可转化为同一度;当 $i = -1$ 时则转化为对立度;当 i 介于 $[-1, 1]$ 时,差异度中同时存在同一与对立的成分。联系度 μ 的形式与不确定系数 i 的变化决定了最终集合间关系判断的结果。

当评价标准大于2级或更多时, k 元联系度表示为:

$$\mu = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + \dots + b_{k-2} i_{k-2} + c_j \quad (11)$$

在具体的区域节水灌溉发展水平评价中,设某区域节水灌溉发展指标 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 与标准 S 构成集对,共有 N 个评价指标,其中, S 个指标好于标准, P 个指标差于标准, F 个评价指标与标准的关系尚不明确(可能无相关统计数据或缺乏比较)。通过比较 a 、 b 、 c 数值大小即可判断单个指标所属类别。

某指标 x_k 对应的各级标准值为 $s_{k1}, s_{k2}, \dots, s_{k5}$, 其联系度分2种情况:

1) 越小越优型指标,其联系度计算如下:

$$\mu_k = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j, x_k \leq s_{k1}; \\ \frac{s_{k2} - x_k}{s_{k2} - s_{k1}} + \frac{x_k - s_{k1}}{s_{k2} - s_{k1}} i_1 + i_2 + 0i_3 + 0j, s_{k1} < x_k \leq s_{k2}; \\ 0 + \frac{s_{k2} - x_k}{s_{k2} - s_{k1}} i_1 + \frac{x_k - s_{k1}}{s_{k2} - s_{k1}} i_2 + 0i_3 + 0j, s_{k2} < x_k \leq s_{k3}; \\ 0 + 0i_1 + \frac{s_{k3} - x_k}{s_{k3} - s_{k2}} i_2 + \frac{x_k - s_{k2}}{s_{k3} - s_{k2}} i_3 + 0j, s_{k3} < x_k \leq s_{k4}; \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{s_{k4} - x_k}{s_{k4} - s_{k3}} i_3 + \frac{x_k - s_{k3}}{s_{k4} - s_{k3}} j, s_{k4} < x_k \leq s_{k5}; \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j, x_k > s_{k5} \end{cases} \quad (12)$$

2) 越大越优型指标,其联系度计算如下:

$$\mu_k = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j, x_k \geq s_{k1}; \\ \frac{s_{k2} - x_k}{s_{k2} - s_{k1}} + \frac{x_k - s_{k1}}{s_{k2} - s_{k1}} i_1 + i_2 + 0i_3 + 0j, s_{k1} > x_k \geq s_{k2}; \\ 0 + \frac{s_{k2} - x_k}{s_{k2} - s_{k1}} i_1 + \frac{x_k - s_{k1}}{s_{k2} - s_{k1}} i_2 + 0i_3 + 0j, s_{k2} > x_k \geq s_{k3}; \\ 0 + 0i_1 + \frac{s_{k3} - x_k}{s_{k3} - s_{k2}} i_2 + \frac{x_k - s_{k2}}{s_{k3} - s_{k2}} i_3 + 0j, s_{k3} > x_k \geq s_{k4}; \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{s_{k4} - x_k}{s_{k4} - s_{k3}} i_3 + \frac{x_k - s_{k3}}{s_{k4} - s_{k3}} j, s_{k4} > x_k \geq s_{k5}; \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0i_4 + 1j, x_k < s_{k5} \end{cases} \quad (13)$$

计算出各单指标对各标准的联系度后,综合联系度可用下式表示:

$$\mu = \sum_{k=1}^n w_j \cdot \mu_j \tag{14}$$

式中, w_j 为每个指标权重,根据式(9) 计算。最后对 μ 中同一、差异、对立各分量进行归一化处理可得综合联系度 $\bar{\mu}$ 。

3 应用实例

3.1 四川省节水灌溉发展现状

四川省下辖 21 个市(州),目前已建成大、中、小型灌区近50万处。截至2010年底,四川省节水灌溉工程面积 $1\,125.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占总耕地面积 31.2%, 占有效灌溉面积 49%; 其中渠道防渗面积占 88%, 达到 $110.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 高效节水灌溉面积 $9.74 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 仅占节水灌溉工程面积的 8%, 其他工程节水面积 $5.26 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。建立用水户协会 3 540 个, 管理灌溉面积 $71.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 38 万处的小型水利工程实施了产权制度改革; 农艺节水技术推广面积 $66.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。目前, 四川省农业灌溉还存在骨干工程配套不完备、田间工程防渗率低的问题,

全省灌溉水利用率仅 0.40; 节水耐旱型农作物主导品种尚未形成; 灌溉管理法规不健全, 管护主体不明确, 管护经费缺乏, 管理水平落后。因为历史、自然因素及经济社会发展水平的差异, 四川省 21 个地区间节水灌溉发展水平差距较大^[19]。

3.2 区域节水灌溉发展水平综合评价指标体系主成分提取

通过 DPS 软件对四川省 21 个地区 12 项工程节水发展水平的评价指标进行主成分分析^[14], 得到评价指标的方差分解图和主成分与各评价指标的相关系数矩阵, 分别见表 2 和 3。

表 2 工程节水评价指标的方差分解图
Tab. 2 Variance decomposition diagram of engineering water saving evaluation index

No.	特征值	百分率/%	累计百分率/%
1	6.046 2	50.385 2	50.385 2
2	1.751 8	14.598 4	64.983 6
3	1.4240	11.866 7	76.850 4
4	0.788 1	6.567 9	83.418 2
5	0.746 7	6.222 4	89.640 6

表 3 工程节水评价指标的主成分相关系数
Tab. 3 Principal component correlation coefficients of engineering water saving evaluation index

评价指标	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
节水灌溉面积占有效灌溉面积的比例/%	0.35	0.15	-0.04	0.15	-0.34
已建高效节水工程面积占节水灌溉面积比例/%	0.08	-0.55	-0.11	-0.13	0.71
节水灌溉面积占耕地面积比/%	0.38	0.05	-0.07	-0.01	-0.04
灌溉水利用系数	0.37	0.09	-0.01	0.23	0.18
每亩节水灌溉平均效益/元	0.37	0.05	0.02	0.27	0.16
每亩灌面灌溉用水量/ m^3	0.27	-0.33	0.29	-0.41	-0.33
主要农作物单位面积产量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	0.25	0.36	-0.32	-0.21	0.24
人均地区生产总值/元	0.35	-0.07	0.14	0.28	0.01
已建成渠道防渗率/%	-0.03	0.57	0.24	-0.52	0.27
防渗渠道完好率/%	0.25	0.06	-0.56	-0.18	-0.03
农业灌溉用水量/ $(\text{khm}^2 \cdot (10^8 \text{ t})^{-1})$	0.17	0.14	0.63	0.13	0.27
近 3 年农田水利建设年均投资/ $(\text{万元} \cdot (\text{khm}^2)^{-1})$	-0.32	0.26	-0.12	0.47	0.15

从表 2 可以看出, 前 5 个主成分的累计贡献率达 89.64% > 85%, 表明四川省各地区的工程节水发展情况可以通过这 5 个主成分得到全面的反映^[20]。

由表 3 选取每个主成分中与各主成分相关系数最大的指标代表每个主成分, F_1 最大为 0.38, 对应指标为节水灌溉面积占耕地面积比例。因此, 工程

节水的评价指标可以简化为: 节水灌溉面积占耕地面积比、已建高效节水灌溉面积占节水灌溉面积比例、已建渠道防渗率、每亩灌面灌溉用水量和近 3 年农田水利建设年均投资共 5 项指标。

同理, 可以得到农艺节水的评价指标简化为以下 3 项指标: 农业人口年人均收入、大田作物水分生产率、水稻薄浅湿晒灌面占栽秧面积百分比。管理

节水的评价指标可以简化为以下6项:节水技术推广体系建设水平、政府支持水平、计量用水技术推广率、节水激励机制健全水平、土壤墒情监测普及率和节水灌溉工程设计质量。

本研究根据节水灌溉的有关技术规范、标准和灌区实地调查的专家打分结果对定量指标和定性指标分别建立了5级评价标准,见表4。

表4 区域节水灌溉发展水平综合评价指标分级标准

Tab.4 Classification standard of regional water saving development level evaluation indexes

评价指标	I	II	III	IV	V
节水灌溉面积占有效灌溉面积比例/%	>55	40~55	25~40	10~25	≤10
已建高效节水水灌溉面积占节水灌溉面积比例/%	>20	13~20	5~13	1~5	≤1
已建渠道防渗率/%	>75	60~75	50~60	35~50	≤35
农业灌溉用水量/($\text{km}^2 \cdot (10^8 \text{ t})^{-1}$)	>75	50~75	30~50	10~30	<10
近3年农田水利建设年均投资/(万元·(km^2) $^{-1}$)	≥1 500	1 200~1 500	600~1 200	300~600	<300
大田作物水分生产率/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	>1.75	1.35~1.75	1.0~1.35	0.8~1.0	≤0.8
水稻薄浅湿晒灌面占栽秧面积百分比/%	>50	35~50	15~35	5~15	≤5
农业人口年平均收入/(人·元 $^{-1}$)	>8 000	8 000~6 000	6 000~4 000	4 000~2 000	≤2 000
节水技术推广体系建设水平	>0.86	0.86~0.71	0.71~0.56	0.56~0.40	<0.40
政府支持水平	>7.85	7.85~7.05	7.05~6.24	6.24~5.44	<5.44
节水工程设计质量	>7.94	7.94~7.02	7.02~6.10	6.10~5.18	<5.18
土壤墒情监测普及率	>0.50	0.50~0.40	0.40~0.30	0.30~0.20	<0.20
计量用水技术推广率	>0.12	0.12~0.10	0.10~0.07	0.07~0.04	<0.04
节水灌溉激励机制健全水平	>5.41	5.41~4.78	4.78~4.15	4.15~3.52	<3.52

3.3 权重计算

采用专家问卷调查法对提取出来的主成分进行打分,得到决策指标判断矩阵。由AHP求主观权重

向量 α 。由熵权法(6)~(8)确定客观权重向量 β 。通过式(9)最终计算得到组合权 w_j 。见表5。

表5 区域节水灌溉发展水平综合评价指标权重

Tab.5 Weights of regional water saving development level comprehensive evaluation index

目标层	系统层	1级权重	指标层	2级权重	最终权重
区域节水灌溉发展水平综合评价	工程节水	0.383	节水灌溉面积占耕地面积比例	0.199	0.076
			已建高效节水工程面积占节水灌溉面积比例	0.268	0.103
			已建渠道防渗率	0.136	0.052
			农业灌溉用水量	0.352	0.135
			近3年农田水利建设年均投资	0.045	0.017
	农艺节水	0.283	农业人口年人均收入	0.473	0.134
			大田作物水分生产率	0.165	0.047
			水稻薄浅湿晒灌面占栽秧面积百分比	0.362	0.102
			节水技术推广体系建设水平	0.108	0.036
			政府支持水平	0.181	0.061
	管理节水	0.334	计量用水技术推广率	0.271	0.091
			节水灌溉激励机制健全水平	0.129	0.043
			土壤墒情监测普及率	0.118	0.039
			节水灌溉工程设计质量	0.193	0.064

3.4 联系度计算及评价结果

首先根据式(10)~(14)计算各指标联系度,再针对评价对象,比较 u_i 中 a 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 c 的相对大小,由以下准则判断出该指标所属等级^[21]。

- 1) 若 $\max(a, b_1, b_2, b_3, c) = b_i, i = 1, 2, 3$, 则判为Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级。
 - 2) 若 $\max(a, b_1, b_2, b_3, c) = a$, 且 $a + b_1 \geq 0.7$, 则判为Ⅰ级, 否则判为Ⅱ级。
 - 3) 若 $\max(a, b_1, b_2, b_3, c) = c$, 且 $b_3 + c \geq 0.7$, 则判为Ⅴ级, 否则判为Ⅳ级。
- 由置信度准则 $\lambda = 0.7^{[22]}$, 并根据 2010 年四川

各区域节水指标的实际统计数据、分级标准(表3)对各级进行联系数计算。

以四川省和成都市为例,成都地区指标联系度 a 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 c 分别为0.076 4、0.118 1、0.345 3、0.246 5、0.213 8。最大值为 $a = 0.345 3$,因此成都地区节水灌溉发展水平集对评价结果为“一般”;四川省联系度最大值为 $c = 0.457 8$,且 $b_3 + c \geq 0.7$,因此集对评价结果为“差”。

四川省及省内 21 个地区节水和指标联系度的计算结果见表 6。

表 6 四川省各区域节水灌溉发展水平综合评价结果

Tab.6 Comprehensive evaluation of water saving irrigation development level in various areas of Sichuan province

序号	地区	a	b_1	b_2	b_3	c	等级
1	四川	0.000 0	0.058 4	0.102 1	0.381 7	0.457 8	差
2	成都	0.076 4	0.118 1	0.345 3	0.246 5	0.213 8	一般
3	自贡	0.017 1	0.000 0	0.096 3	0.308 6	0.578 1	差
4	攀枝花	0.297 6	0.030 5	0.323 5	0.223 8	0.124 5	一般
5	泸州	0.064 4	0.038 3	0.100 8	0.250 5	0.546 0	差
6	德阳	0.124 9	0.121 3	0.219 9	0.397 2	0.136 7	较差
7	绵阳	0.000 0	0.064 1	0.184 1	0.287 4	0.464 5	差
8	广元	0.237 1	0.040 3	0.188 2	0.483 1	0.051 2	较差
9	遂宁	0.000 0	0.005 6	0.128 3	0.428 3	0.437 8	差
10	内江	0.000 0	0.013 4	0.135 9	0.490 8	0.359 9	较差
11	乐山	0.000 0	0.000 0	0.156 2	0.463 6	0.380 1	较差
12	南充	0.064 4	0.027 3	0.151 5	0.232 9	0.523 9	差
13	眉山	0.000 0	0.049 0	0.267 5	0.424 7	0.258 8	较差
14	宜宾	0.000 0	0.016 2	0.020 0	0.267 2	0.696 6	差
15	广安	0.064 4	0.019 5	0.143 4	0.217 2	0.555 4	差
16	达州	0.017 1	0.068 7	0.305 5	0.307 8	0.301 0	较差
17	雅安	0.064 4	0.000 0	0.100 4	0.419 0	0.416 2	较差
18	巴中	0.178 1	0.010 4	0.106 2	0.088 8	0.616 4	差
19	资阳	0.064 4	0.000 0	0.073 9	0.267 9	0.593 7	差
20	阿坝	0.017 1	0.000 0	0.000 7	0.173 2	0.809 0	差
21	甘孜	0.077 6	0.000 0	0.077 7	0.111 9	0.732 8	差
22	凉山	0.060 5	0.057 9	0.079 5	0.167 7	0.634 4	差

表 6 为四川省各区域节水灌溉发展水平综合评价结果。表 6 显示:四川省节水灌溉发展水平综合评价结果处于“差”水平;21 个地区中,没有处于“好”与“较好”水平的地区;2 个地区处于“一般”水平,占地区总数 9%;7 个地区处于“较差”水平,占地区总数 33%;12 个地区处于“差”水平,占地区总数 58%。

成都和攀枝花处于“一般”水平。攀枝花、成都 2010 年人均 GDP 均超过了 4 万元,远远高于全省 2.08 万元的平均水平;2 个地区 2010 年人均年农林水基础建设投入分别是 1 276 元和 768 元,明显高于四川省 473 元的平均水平;节水灌溉面积占耕地面积的比例超过 50%,高于四川省 38% 的平均水平;2 个地区的亩均节水综合效益接近 100 元,高于

四川省 65 元的平均水平,因此,推进节水灌溉工作有较好的经济基础。成都水稻“早育秧”面积在四川省最大,攀枝花水稻控制灌溉面积在四川省也最大;2008 年,成都建立了村级公共服务和公共管理专项资金,用于水利等基础设施的建设和管理。2000 年初,攀枝花在生产结构整体转型的关键时期,把发展节水高效农业作为实现攀枝花经济转型的重要内容,设立了市级节水灌溉专项建设资金。此外,2 个地区在 2005 年完成了市级《节水灌溉发展规划》的编制和审批,有力地促进了节水灌溉的有序发展。

区域节水灌溉发展综合水平“差”的地区有 12 个。其中,甘孜、阿坝、凉山是四川省藏族、彝族等少数民族聚居区,地处高寒高海拔和干热河谷地带,经济发展落后,多年来国家对该区域的亩均建设资金投入不足内地的 1/3,2010 年人均 GDP 仅 1 万元左右,远低于四川省的平均水平。其他 9 个地区经济发展也相对落后,人均 GDP 没有达到全省的平均水平,2010 年农业人均农林水投入不足 400 元,低于四川省 473 元的平均水平。甘孜、阿坝节水灌溉面积占耕地面积的比例仅 10% 左右,在四川省最低;甘孜、阿坝迄今没有一个交付使用的水库和中型灌区。甘孜、凉山、自贡、资阳、泸州、宜宾的田间渠道衬砌率都未达到 20%,低于四川省 26% 的平均水平,工程建设落后、管理水平低下。因此制约了区域节水灌溉综合水平的提高。

德阳、广元、内江、乐山、眉山、达州、雅安处于“较差”水平,这 7 个地区 2010 年人均 GDP 处在 2 万元左右,农业人均年农林水基础设施建设投入 400 ~ 500 元,接近或略高于四川省平均水平。通过分析对比可知,区域社会经济发展水平、城乡改革和发展水平很大程度上决定了这一地区的综合发展水平。这也说明了区域节水灌溉发展综合水平与区域经济发展水平、投入水平、政府重视程度密切相关。

4 结 论

1) 分析了区域节水灌溉发展水平的影响因素,构建了区域节水灌溉发展水平综合评价指标体系;采用主成分分析法对综合评价所涉及的工程节水、农艺节水和管水节水评价指标体系进行简化,将 3 个层次的 33 项指标简化为 14 项主成分因子,达到了在保留原始指标信息的前提下,以互不相关的较少的综合指标(主成分)来反映原始指标所提供信息的目的。

2) 利用 AHP 法和熵权法对决策指标进行组合赋权,形成综合权重,实现了评价过程主观与客观、定性与定量有机结合,既能充分利用客观信息,又能满足决策者的主观愿望,最大程度地反映了评价决策要求,使评价结果更符合实际,有助于提升评价决策的科学性与准确性。

3) 评价结果客观反映了四川省不同地区的区域节水灌溉发展水平。成都、攀枝花等经济发展水平相对较高的地区节水灌溉发展水平相对较好,甘孜、阿坝等经济较为落后的少数民族地区节水灌溉发展水平相对较低。

4) 根据评价结果,四川省应该加快节水发展,以加强节水灌溉工程建设为核心,以节水灌溉技术推广为主线,推广节水品种培育和农艺农艺节水技术,建立农业用水总量控制和定额管理 2 项指标,提高灌溉水有效利用率和水分生产率;健全工程节水、农艺节水和管水节水相协调的农业综合节水技术体系,促进区域水资源的可持续利用和经济社会可持续发展。

参考文献:

- [1] 水利部农村水利司中国灌溉排水发展中心. 节水灌溉工程实用手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [2] Peng Shizhang, Ai Likun. Improving irrigation water use co-efficient and ensuring national food and water safety[J]. Water Resource Protection, 2012, 28(3): 79 - 82. [彭世彰,艾丽坤. 提高灌溉水利用系数,保障国家粮食安全与水安全[J]. 水资源保护,2012,28(3):79 - 82.]
- [3] Wu Qianming, Yang Luhua, Zhai Ning, et al. The research progress on the assessment of development level of water-saving irrigation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(6): 2795 - 2797. [武前明,杨路华,翟宁,等. 节水灌溉发展水平评价研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(6): 2795 - 2797.]
- [4] Cui Yuanlai, Dong Bin, Li Yuanhua, et al. Assessment indicators and scales of water saving in agricultural irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(7): 1 - 7. [崔远来,董斌,李远华,等. 农业灌溉节水评价指标与尺度问题[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 1 - 7.]
- [5] Hou Luchuan. Study on the evaluation to the multi-effect and dividing areas of the water-saving agriculture in sichuan province[D]. Yaan: Sichuan Gricultural University, 2006. [侯鲁川. 四川省节水农业综合效益评价及分区研究

- [D]. 雅安:四川农业大学,2006.]
- [6] Zheng Rui. Study on methods and application for evaluation standards system of water saving improvement project in irrigation district [D]. Beijing: Beijing University of Echnology, 2012. [郑睿. 灌区节水改造标准体系评价方法与应用研究 [D]. 北京:北京工业大学,2012.]
- [7] Wu Jingshe. Evaluation of comprehensive effects of water-saving irrigation on a regional scale: Methods and applications [D]. Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2003. [吴景社. 区域节水灌溉综合效应评价方法与应用研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2003.]
- [8] Huang Mingzhi, Ma Yongwen, Wan Jinqian, et al. An approach to artificial neural network and its application to wastewater treatment [J]. Environment Science & Technology, 2008, 23(3): 131 – 135. [黄明智, 马邕文, 万金泉, 等. 污水处理中人工神经网络应用研究的探讨 [J]. 环境科学与技术, 2008, 23(3): 131 – 135.]
- [9] 徐建华. 现代地理学中的数学方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [10] Guo Xiaodong, Li Ning, Su Jingyu. A comprehensive method for evaluation of flood disasters based on set-pair analysis theory [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(10): 51 – 55. [郭小东, 李宁, 苏经宇. 基于集对分析理论的洪水灾情综合评估方法 [J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(10): 51 – 55.]
- [11] Ma Xixia, Li Yan, Wang Jiaquan, et al. Study on drought integrated evaluation model based on set pair analysis [J]. Yellow River, 2011, 33(6): 38 – 39. [马细霞, 李艳, 王加全, 等. 基于集对分析的旱情综合评价模型研究 [J]. 人民黄河, 2011, 33(6): 38 – 39.]
- [12] Su M R, Yang Z F, Chen B. Set pair analysis for urban ecosystem health assessment [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 14(1): 1773 – 1780.
- [13] Wu F F, Wang X. Eutrophication evaluation based on set pair analysis of baiyangdian lake, North China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 1030 – 1036.
- [14] 曾红颖. 发展的刻度——中国发展水平评价指标体系 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [15] Yan Wenzhou, Gu Liansheng. Application of the method of entropy proportion in the engineering mark [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2004, 36(1): 98 – 100. [闫文周, 顾连胜. 熵权决策法在工程评标中的应用 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2004, 36(1): 98 – 100.]
- [16] Zou Zhihong, Sun Jingnan, Ren Guangping. Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(4): 552 – 556. [邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 552 – 556.]
- [17] 郭齐胜, 董志明, 单家元. 系统建模 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 292 – 297.
- [18] Gao Junsheng, Feng Lili, Cui Kai. A matter-element model of irrigation water quality evaluation based on combined weights [J]. Yellow River, 2011, 33(11): 97 – 99. [高军省, 冯莉莉, 崔凯. 基于综合权重的灌溉水质评价物元模型 [J]. 人民黄河, 2011, 33(11): 97 – 99.]
- [19] Lou Yuhong. Several issues related to reform of management system of small on farm water infrastructures in Sichuan province [J]. China Water Resources, 2008(1): 43 – 44. [楼豫红. 四川省小型农田水利工程管理体制改革的思考 [J]. 中国水利, 2008(1): 43 – 44.]
- [20] Chang Yahui. Preliminary study on the comprehensive assessment problem of development level of society [J]. Journal of Jilin Business and Technology College, 2013, 29(3): 18 – 22. [常雅慧. 西部地区社会发展水平综合评价问题初探 [J]. 吉林工商学院学报, 2013, 29(3): 18 – 22.]
- [21] Hou Baodeng, Zhao Qingxu, Wang Yan, et al. Water quality evaluation in the upper reaches of Minjiang River after Wenchuan Earthquake based on set pair analysis model [J]. Water Power, 2010, 36(1): 29 – 31. [侯保灯, 赵庆绪, 王焱, 等. 基于集对分析模型的岷江上游流域震后水质综合评价 [J]. 水力发电, 2010, 36(1): 29 – 31.]
- [22] Wang Wensheng, Jin Juliang, Jin Jing, et al. A new approach to water resources system assessment-set pair analysis method [J]. Science in China, Series E: Technological Sciences, 2009, 39(9): 1529 – 1534. [王文圣, 金菊良, 丁晶, 等. 水资源系统评价新方法 – 集对评价法 [J]. 中国科学: E 辑, 2009, 39(9): 1529 – 1534.]

(编辑 张 琼)