

基于改进熵权 TOPSIS 法的吉林省灌区农业灌溉 用水有效利用系数测算

曾雪婷¹, 张俊龙², 康健³, 李铁男⁴

(¹ 首都经济贸易大学, 北京, 100070; ² 青岛大学, 青岛, 266071; ³ 吉林省水利科学研究院, 长春, 130000; ⁴ 黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨, 150800)

摘要: 针对吉林省不同地区、不同水源类型、不同规模灌区农业灌溉用水有效利用系数测试资料少、代表性差、测试方法复杂, 难以提高其适应性、有效性和精确性的问题。本研究借助改进熵权 TOPSIS 法, 开展灌区灌溉用水有效利用测算方法优选研究, 并在此基础上开展多灌区、多方法的农业灌溉用水有效利用综合测算。通过科学测算方法体系, 提高灌溉用水有效利用系数的合理性、操作性和准确性, 摸清全省农业灌溉水利用现状, 以满足目前水资源规划、灌区规划和节水灌溉的要求。

关键词: TOPSIS; 方法优选; 灌溉用水有效利用系数; 灌区

灌区的灌溉水利用系数既能反映灌区的工程质量, 又能反映灌区灌溉技术水平和灌溉用水管理水平, 是衡量农业节水效果的关键指标^[1,2]。近年来, 国内外众多学者在灌溉水利用系数测算方面做了大量研究, 常用的方法包括传统测算方法、首尾测算法、典型渠段测量法和动态测量法等^[2-4]。传统测算方法可以根据各级渠道的输水效率, 判断各级渠道用水情况, 反映灌溉工程质量及灌溉用水管理水平, 然而其测定工作量较大; 首尾测算法测算工作量较少, 简便易行, 然而该方法只是单纯为了确定灌区的水有效利用系数, 不能分别反映渠系输水损失和田间水利用的情况; 典型渠段测量法是通过典型渠道的灌溉水利用系数反映灌区水资源利用情况, 然而该方法对数据要求较高, 且经验指标比重较多, 易造成误差; 动态测量法通过量化渠道损失水量的方法推求渠道水利用系数, 计算机理较简单, 存在局限性。多种灌溉水利用系数测算方法的估算法理、适用范围各有不同, 且利弊各异, 针对特征性灌区开展灌区水有效利用测算方法优选能够提高水资源利用现状评估的科学性和准确性, 然而, 国内外鲜有研究致力于灌溉水利用系数测算方法适用性的综合评估。农业是吉林省经济各用水部门中的用水大户, 全省年

¹ 曾雪婷 (1981), 女, 特聘研究员, 主要从事水资源的高效利用与环境规划研究。zxt1231@sina.com

² 张俊龙 (1988), 男, 讲师, 主要从事水文水资源管理研究。zjunlong0801@163.com

³ 康健 (1972), 男, 高级工程师, 主要从事水资源的高效利用与管理研究。Khx1997@126.com

⁴ 李铁男 (1973), 女, 教授级高级工程师, 主要从事水资源的高效利用与管理研究。Jsgg-xmb@vip.163.com

均农业用水超过 90 亿 m^3 ，而农业用水的利用率较低，节水潜力巨大^[5]，本研究针对吉林省多个样点灌区，借助改进熵权 TOPSIS 方法开展灌区水有效利用测算方法优选研究，并在此基础上开展多灌区、多方法的农业灌溉用水有效利用综合测算，为全省农业节水和提高农业水资源利用效率提供技术支持和科学依据。

1 基于熵权的改进 TOPSIS 方法

TOPSIS 法通过将统计数据转化为多维坐标系中的点，在空间中确定出参考点，即最优样本点和最劣样本点，然后计算各样本点到参考点的距离进行分析评价^[6]。即通过测度被评价对象的指标评价值向量与综合评价问题的理想解和负理想解的相对距离来进行排序。在这里对 TOPSIS 方法的改进，体现在利用熵权法对标准化的原始数据矩阵进行改进加权，即依据决策者考虑的侧重不同，对相应属性的权重进行修正。另一方面体现在对评价对象与正理想解和负理想解的评价值公式进行了改进。具体步骤如下^[7]：

第一步：建立包含 n 个属性和 m 个方案的决策矩阵 D

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

第二步：利用熵权法修正各属性的权重

熵原本是一个热力学概念，它最先由申农(C.E.Shannon)引入信息论，现已在工程技术、社会经济等领域得到十分广泛的应用，利用熵可以解释离散型分布函数 P_l 的不确定性。对于第 k 个属性，其不确定性可用公式表示为：

$$P_{lk} = x_{lk} / \sum_{l=1}^m x_{lk} \quad (2)$$

$$EE_k = -H \sum_{l=1}^m [P_{lk} \times \ln P_{lk}] \quad 0 \leq EE_k \leq 1 \quad (3)$$

其中， m 为方案， $H = (\ln m)^{-1}$ ，计算指标差异系数：

$$dd_k = 1 - EE_k \quad (4)$$

对差异系数做归一化处理：

$$W_k = dd_k / \sum_{k=1}^n dd_k \quad (5)$$

如果决策者侧重属性 λ_k 的重要性，则可用下述公式修正其权重：

$$IW_k = \frac{\lambda_k \times W_k}{\sum_{k=1}^n \lambda_k \times W_k} \quad (6)$$

第三步：标准化 D 矩阵

$$r_{lk} = \frac{x_{lk}}{\sqrt{\sum_{l=1}^m x_{lk}^2}} \quad (7)$$

$$v_{lk} = W_k \times r_{lk} \quad (8)$$

第四步：寻找理想和负理想方案。理想方案 v_k^+ 是指中每一列中最大的正效应指标和最小的负效应指标。类似地，负理想方案 v_k^- 指每一列中最小的正效应指标和最大的负效应指标

$$\begin{aligned} v_k^+ &= (\max v_{lk} | k \in k^+, \min v_{lk} | k \in k^-) \quad l=1, \dots, m \\ v_k^- &= (\min v_{lk} | k \in k^+, \max v_{lk} | k \in k^-) \quad l=1, \dots, m \end{aligned} \quad (9)$$

第五步：计算各方案与理想方案及负理想方案之间的距离 SS_l^+ 和 SS_l^- ，如下所示：

$$SS_l^+ = \sqrt{\sum_{k=1}^n (v_{lk} - v_k^+)^2} \quad \text{和} \quad SS_l^- = \sqrt{\sum_{k=1}^n (v_{lk} - v_k^-)^2} \quad l=1, \dots, m \quad (10)$$

第六步：计算各方案与负理想方案之间的距离的平均值，公式如下：

$$C_l = \frac{SS_l^-}{SS_l^+ + SS_l^-} \quad l=1, \dots, m \quad (11)$$

根据 C_l 值对方案进行分类， C_l 值越大代表方案效率越高。

2 案例分析

本研究针对吉林省的不同类型的灌区特点，开展农业灌溉用水有效利用系数测算方法优选研究。目前，吉林包含 13 个大型灌区（包括饮马河灌区、白沙滩灌区、松沐灌区、前郭灌区、松城灌区等，有效灌溉面积 482.3 万亩，其中提水灌区 5 个，有效灌溉面积 201 万亩，自流灌区 8 个，有效灌溉面积 281.3 万亩）、7 个中型灌区（包括星星哨灌区、松其灌区、沙河灌区等，有效灌溉面积 35.1 万亩）、6 个小型灌区（包括五间房灌区、临江扬水灌区、达户扬水灌区等，有效灌溉面积 2.2 万亩）；主要的井灌地区 12 个，包括坦途镇向阳村、万昌镇韩家村、甄祥灌区等。本研究选择饮马河灌区、白沙滩灌区、星星哨灌区以及五间房灌区四个灌区作为农业灌溉用水有效利用综合测算研究的样点区域如下：

表 1 吉林省四个样点灌区一览表

样点序号	样点灌区名称	灌区类型	灌区面积(万亩)	水源类型	地点
1	饮马河灌区	大型灌区	30.9	自流引水	九台市
2	白沙滩灌区	大型灌区	31.0	提水	镇赉县
3	星星哨灌区	中型灌区	16.5	自流引水	永吉县
4	五间房灌区	小型灌区	0.1	提水	敦化市

2.1 灌区水有效利用测算方法优选指标体系构建

综合考虑灌溉用水有效利用测算候选方法本身特征以及各方法对样点灌区特征的适宜度，确保所优选方法可行性高，对样点灌区适用性强，构建如下指标体系（如图 1 所示）：

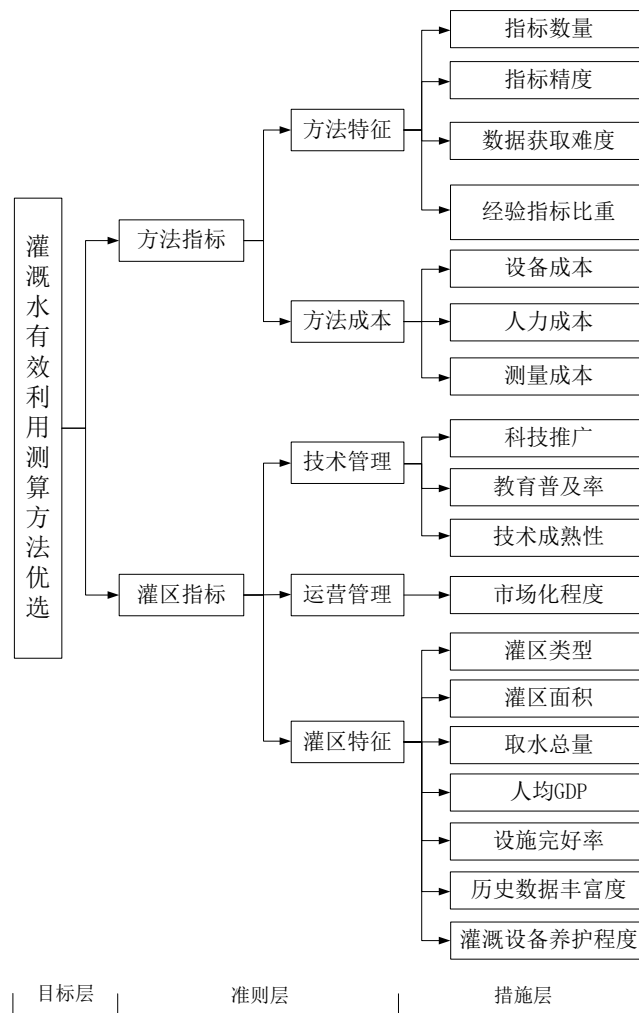


图 1 灌区农业灌溉用水有效利用测算方法优选指标体系

2.2 数据分析、综合评估与系数测算

本研究结合各灌区历史数据及现场观测数据，针对每个灌区按照灌溉用水有效利用测算方

法优选指标体系进行打分，分数取值范围为 0-10，分数越高表明测算方法在所选灌区该指标项适应性越强。打分法能够避免数据归一化处理步骤及其带来的系统误差，样点灌区方法优选综合评估指标取值见表 1。上述指标的取值依据专家评价系统、文献调查和实地观测获得。例如，指标数量、精度等方法特征指标通过查阅文献和方法学习获得；数据获取难度由专家判断决定，该指标评分值越高，表明该方法相关数据的获取较为便捷，有利于方法的实施。设备、人力和测量等方法成本指标值则通过专家评价和实地观测获取，较高的指标值对应着较低的成本和较强的方法可行性，例如，传统测算法方法成本指标值较低，这是因为一个灌区的固定渠道一般都有干、支、斗、农 4 级，大型灌区级数更多，而每一个级别的渠道又有多条，特别是斗、农渠数量更多，计算某级渠道的加权平均渠道水利用系数时，测定工作量很大；首尾测算法不需要对各级渠道的渠道水利用系数进行测定，大大减少了测定工作量，因此方法成本指标评分较高。技术管理、运营管理及灌区特征等灌区指标值则是通过实地调查、文献查阅获取，其含义是灌溉用水有效利用测算方法对灌区该指标现状的适应性。例如饮马河灌区是吉林省大型及重点灌区，历史数据相对于其它中小型及井灌灌区较为丰富，对数据及参数要求较高的典型渠段测量法对于饮马河灌区的适应度较高，而首尾测算法所需数据较少，随之方法准确性较差，因此该方法在饮马河灌区的历史数据丰富度指标值较低。

表 1 典型灌区水有效利用测算方法优选综合评估指标取值

灌区	饮马河灌区				白沙滩灌区				星星哨灌区				五间房灌区			
	CT	SW	DX	DT	CT	SW	DX	DT	CT	SW	DX	DT	CT	SW	DX	DT
指标数量	5.5	3.2	9.1	7.4	5.5	3.2	9.1	7.4	5.5	3.2	9.1	7.4	5.5	3.2	9.1	7.4
指标精度	4.3	1.6	9.4	6.5	4.3	1.6	9.4	6.5	4.3	1.6	9.4	6.5	4.3	1.6	9.4	6.5
指标获取难度	7.4	8.6	2.4	5.3	7.4	8.6	2.4	5.3	7.4	8.6	2.4	5.3	7.4	8.6	2.4	5.3
经验指标比重	3.3	1.4	1.2	1.3	3.3	1.4	1.2	1.3	3.3	1.4	1.2	1.3	3.3	1.4	1.2	1.3
设备成本	2.2	5.6	3.8	4.3	2.2	5.6	3.8	4.3	2.2	5.6	3.8	4.3	2.2	5.6	3.8	4.3
人力成本	2.7	5.8	3.6	3.8	2.7	5.8	3.6	3.8	2.7	5.8	3.6	3.8	2.7	5.8	3.6	3.8
测量成本	2.5	6.2	3.8	4.2	2.5	6.2	3.8	4.2	2.5	6.2	3.8	4.2	2.5	6.2	3.8	4.2
科技推广	1.3	2.8	8.2	6.5	3.7	2.3	6.4	5.5	3.3	2.6	6.7	4.6	4.2	6.1	2.2	3.8
教育普及率	4.2	1.4	8.3	5.2	4.5	1.7	7.2	5.7	4.4	3.6	5.6	5.8	5.3	6.4	2.3	4.5
技术成熟性	5.6	2.2	7.3	6.5	4.4	2.2	6.4	6.7	4.3	2.5	6.7	4.6	5.4	7.5	3.6	4.8
市场化程度	3.3	3.3	7.8	8.3	3.5	2.3	7.8	7.6	3.4	4.5	5.4	6.3	6.3	8.2	2.6	4.2
灌区类型	2.2	5.4	9.5	6.8	2.4	6.4	8.5	7.3	3.6	7.4	5.5	8.7	9.3	5.6	4.1	6
灌区面积	2.3	5.3	8.5	6	2.4	5.2	8.3	6.2	4.5	6.3	5.1	4.2	6.6	5.1	4.2	4.8
取水总量	1.3	8.2	5.7	5.2	2.6	7.3	5.5	4.2	2.6	5.2	3.4	3.5	4.2	5.6	3.2	2.8
人均GDP	3.2	1.6	6.4	5.5	4.3	2.7	7.3	4.5	4.2	3.6	5.2	5.7	5.3	6.4	3.1	4.5
设施完好率	6.8	4.5	8.4	7.1	6.4	4.4	7.5	6.5	6.3	4.2	5.6	6.5	6.4	7.3	3.8	4.6
历史数据丰富度	5.2	3.5	8.4	7	6.6	5.6	8.4	7.2	6.2	4.6	4.2	5.6	3.5	8.2	1.7	2.6
灌溉设备养护程度	6.5	3.2	8.5	7.8	5.2	4.4	7.2	6.7	5.8	4.5	5.2	6.6	6.5	8.7	3.2	5.6

注：传统测算法标示为“CT”、首尾测算法标示为“SW”、典型渠段测量法标示为“DX”、动态测量法标示为“DT”

将上述数据直接作为 TOPSIS 方法的标准矩阵，开展综合评估，并先后得到各样点灌区的熵权值、指标差异系数，最终得到针对四个灌区的指标权重：

$W_{\text{饮马河}}=[0.0395 \quad 0.0926 \quad 0.0541 \quad 0.0703 \quad 0.0303 \quad 0.0239 \quad 0.0308 \quad 0.1160 \quad 0.0892$
 $0.0465 \quad 0.0557 \quad 0.0653 \quad 0.0534 \quad 0.0859 \quad 0.0685 \quad 0.0142 \quad 0.0299 \quad 0.0339]$
 $W_{\text{白沙滩}}=[0.0523 \quad 0.1224 \quad 0.0715 \quad 0.0833 \quad 0.0401 \quad 0.0316 \quad 0.0407 \quad 0.0539 \quad 0.0826$
 $0.0606 \quad 0.0911 \quad 0.0659 \quad 0.0652 \quad 0.0518 \quad 0.0492 \quad 0.0140 \quad 0.0086 \quad 0.0151]$
 $W_{\text{星星哨}}=[0.0757 \quad 0.1775 \quad 0.1037 \quad 0.1207 \quad 0.0581 \quad 0.0458 \quad 0.0590 \quad 0.0752 \quad 0.0207$
 $0.0652 \quad 0.0289 \quad 0.0578 \quad 0.0146 \quad 0.0376 \quad 0.0184 \quad 0.0157 \quad 0.0139 \quad 0.0115]$
 $W_{\text{五间房}}=[0.0550 \quad 0.1288 \quad 0.0753 \quad 0.0876 \quad 0.0421 \quad 0.0333 \quad 0.0428 \quad 0.0506 \quad 0.0494$
 $0.0295 \quad 0.0697 \quad 0.0378 \quad 0.0121 \quad 0.0311 \quad 0.0274 \quad 0.0274 \quad 0.1518 \quad 0.0482]$

将熵权法得到的指标权重代入 TOPSIS 模型中，得到各灌区加权矩阵，在此基础上，确定正、负理想值，计算各评价期距离正、负理想解的距离，最后计算贴进度分值并进行排序。距离正理想解贴进度 (SS_i^+) 和距离负理想解贴进度 (SS_i^-) 为：

饮马河灌区： $SS_i^+=[1.3801 \quad 1.3816 \quad 0.2334 \quad 0.5936]$ ； $SS_i^-=[0.4900 \quad 0.6712 \quad 1.5815$
1.1210]

白沙滩灌区： $SS_i^+=[1.0581 \quad 1.3147 \quad 0.5059 \quad 0.5647]$ ； $SS_i^-=[0.6151 \quad 0.6403 \quad 1.4050$
1.0458]

星星哨灌区： $SS_i^+=[1.1006 \quad 1.5338 \quad 0.7482 \quad 0.7305]$ ； $SS_i^-=[0.7823 \quad 0.7619 \quad 1.5236$
1.0571]

五间房灌区： $SS_i^+=[1.0452 \quad 1.0782 \quad 1.2748 \quad 1.0670]$ ； $SS_i^-=[0.7511 \quad 1.2617 \quad 1.0600$
0.7650]

四个样点灌区水有效利用测算方法优选综合评估分别结果为：

饮马河灌区：[0.2620 0.3270 0.8714 0.6538]

白沙滩灌区：[0.3676 0.3275 0.7352 0.6493]

星星哨灌区：[0.4155 0.3319 0.6707 0.5914]

五间房灌区：[0.4181 0.5392 0.4540 0.4176]

具体地，在饮马河灌区，典型渠段测量法为最优的测算方法，典型渠段测量法 > 动态测量法 > 首尾测算法 > 传统测算方法；在白沙滩灌区，典型渠段测量法为最优的测算方法，典型渠段测量法 > 动态测量法 > 传统测算方法 > 首尾测算法；在星星哨灌区，典型渠段测量法是最优的测算方法，典型渠段测量法 > 动态测量法 > 传统测算方法 > 首尾测算法；在五间房灌区，首尾测算法是最优的测算方法，首尾测算法 > 典型渠段测量法 > 传统测算方法 > 动态测量法。

经测量方法优选，发现对于所选择的大、中型灌区（饮马河、白沙滩和星星哨灌区）典型渠段测量法是最优方法，饮马河、白沙滩和星星哨灌区等大、中型灌区在科技推广、教育率和技术、数据储备方面有着较好的基础，这也为典型渠段测量法在灌区的实施提供了有利条件。

首尾测算法是小型灌区（五间房灌区）该方法是最优的灌溉水有效利用系数测量方法，因为该方法由于不需要对各级渠道的渠道水利用系数进行测定，克服了典型渠段测量法、传统测算方法等测定工作量大的缺点，适用于技术、数据储备较差的地区；另一方面，该方法只是单纯为了确定灌区的水有效利用系数，不能分别反映渠系输水损失和田间水利用的情况，在设施较为完备和数据较为丰富的大型灌区，该方法在方法功能上逊于其它方法。

本研究在灌区农业灌溉用水有效利用测算方法优选的基础上，进一步开展灌溉用水有效利用系数综合估算。具体地，首先，基于多种方法对各灌区农业灌溉用水有效利用系数进行测算；其次，基于灌区农业灌溉用水有效利用测算方法综合评估结果，确定各方法权重，并在此基础上综合估算各灌区农业灌溉用水有效利用系数。农业灌溉用水有效利用系数、方法权重及灌溉用水有效利用系数综合测算结果如表 2 所示，各灌区灌溉用水有效利用系数分别为：55.9%（饮马河灌区）、58.5%（白沙滩灌区）、50.8%（星星哨灌区）以及 52.2%（五间房灌区）。

表 2 多灌区、多方法的农业灌溉用水有效利用系数（%）、方法权重及灌溉用水有效利用系数测算结果

	传统测算方法		首尾测算法		典型渠段测量法		动态测量法		灌溉用水有效利用系数
	系数	权重	系数	权重	系数	权重	系数	权重	
饮马河灌区	56.6	0.12	62.4	0.15	55.6	0.41	52.9	0.31	55.9
白沙滩灌区	57.2	0.18	59.2	0.16	53.7	0.35	52.8	0.31	58.5
星星哨灌区	53.3	0.21	58.9	0.17	47.0	0.33	48.9	0.29	50.8
五间房灌区	47.4	0.23	58.4	0.29	54.7	0.25	46.3	0.23	52.2

3 结语

利用改进熵权 TOPSIS 法对开展吉林省样点灌区农业用水有效利用测算方法优选研究，有效利用原始数据的信息，避免赋权等方法对评价结果带来的人为影响，反映各方案之间的差距，客观真实地反映实际情况。根据方法优选结果，发现对于所选择的大、中型灌区（饮马河、白沙滩和星星哨灌区）典型渠段测量法是最优方法，对于所选择小型灌区（五间房灌区）

首尾测算法是最优的灌溉水有效利用系数测量方法。基于灌区农业灌溉用水有效利用测算方法综合评估结果,本研究进一步开展了灌溉用水有效利用系数综合估算,获得了多灌区、多方法的农业灌溉用水有效利用系数。本研究开发的灌溉用水有效利用系数综合估算体系,能够综合多种测算方法优点,在适用性上优于单一测算方法,可以有效提高灌溉水利用系数测算科学性和准确性,为吉林省农业节水工作提供技术支持和科学依据。

参考文献

- [1] 赵红洁, 吕志远, 霍星, 魏学敏, 商宝印. 麻地壕黄河灌区灌溉水利用系数分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(8):5-8.
- [2] 高峰, 赵竞成, 许建中, 黄修桥, 倪文进, 李英能, 王景雷. 灌溉水利用系数测定方法研究[J]. 灌溉排水学报, 2004(1):14-20.
- [3] 张立明, 杨绍峰, 孙伟东. 动态测定法在渠道水利用系数测定中的应用[J]. 内蒙古水利, 2012(6):25-26.
- [4] 韩振中, 裴源生, 李远华, 郭慧滨. 灌溉用水有效利用系数测算与分析[J]. 中国水利, 2009(3):11-14.
- [5] 胡成彦, 刘列涛. 吉林省农业用水节水潜力分析[J]. 吉林水利, 2007(11):37-38.
- [6] 周四军, 庄成杰. 基于距离综合评价法的我国国民幸福指数 NHI 测评[J]. 财经理论与实践, 2008(5):112-115.
- [7] 曾雪婷, 李永平, 崔亮, 乔祥利, 刘静. 基于熵权 TOPSIS 法的水保项目管理评价[J]. 人民黄河, 2015(5):80-83.

Application of Entropy-Weight TOPSIS Method in the calculation of Irrigation Water Utilization Efficiency in Jilin Province

Xueting Zeng, Junlong Zhang, Jian Kang

Abstract: Entropy-weight TOPSIS method is used for the selection of calculation method of irrigation water utilization efficiency in multiple irrigation area in Jilin Province. Besides, multi-area and multi-method calculation of irrigation water utilization efficiency is conducted based on the method selection. From the results, typical canal section measurement method is found to be the best method for big and middle irrigation area (e.g. Yinmahe area, Baishatan area and Xingxingshao area). Head-end measurement method is found to be the best method for small area (e.g. Wujianfang area).

Key words: Irrigation area; Irrigation water utilization efficiency; Method selection; TOPSIS