

典型节水灌溉技术综合性能评价研究

索滢^{1,2}, 王忠静^{1,3,4*}

- (1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;
3. 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;
4. 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016)

摘要:【目的】通过典型节水灌溉技术宏观尺度综合量化评价,揭示灌溉技术未来发展趋势。【方法】采用文献调研与知识管理重构的方法分析了典型节水灌溉技术特点,提出以适应性和经济性作为节水灌溉技术综合性能评价指标。其中适应性包括对作物类型、地形、水源水质、水源水量、土壤渗透性、土壤盐碱度、气候的适应程度以及管理难易等8项指标,经济性包括田间水利用率、灌溉均匀度、增产率、投资、节地率、节水程度等6项指标。通过评估各指标适宜范围构造赋值标准,运用德尔菲调查法和变异系数法构造赋值权重,计算得到各灌溉方式各大类得分,最终通过不满意度综合评价法计算得到不满意度作为综合得分。【结果】微灌综合性能最好,滴灌和微喷灌的不满意度分别为2.42、2.77;其次为喷灌、节水型畦灌、波涌灌以及节水型沟灌;小畦灌表现最差为5.14;各灌溉方式的经济性和适应性得分之间具有较强的竞争性;各灌溉方式的发展历程表明,未来的灌水方式将向适应性和经济性方面双优方向发展。【结论】在宏观尺度上,灌溉技术一直朝着适应性和经济性双好的方向发展,提高器械灌溉的适应性和提高非器械灌溉的经济性,是未来节水灌溉技术的发展方向。

关键词:节水灌溉;综合性能;评价;德尔菲法

中图分类号:S275

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20170075

索滢,王忠静. 典型节水灌溉技术综合性能评价研究[J]. 灌溉排水学报,2018,37(11):113-120.

0 引言

灌溉是第一耗水大户,约占我国总用水量的70%。发展节水灌溉、提高用水效率,是缓解水资源短缺、改善水资源供需矛盾的重要方式。世界范围内,人们围绕着节水灌溉发明了多种技术,产生了不同的节水效果^[1]。由于不同的节水灌溉技术有着不同的特点、适应性和后续效应,如何综合评价其性能,是业界和学者们一直关注的问题之一,也不断有研究成果发表。如朱兴业等^[2]选取了针对喷灌的指标,利用主成分分析方法对喷灌机组评价,但其中2个指标占了98.75%的权重;罗金耀等^[3]构造了经济、技术和社会三大类12个指标的评价体系,通过德尔菲法构权进行了多层次灰色关联综合评价,最终得出综合最优的灌溉方法为滴灌;高峰等^[4]以豫东某节水农业试验区为例使用模糊神经网络综合评价方法评价了5种灌溉技术,但其建立的7大类41个指标的评价体系中有一些指标权重极低,可以省略;Zerihun等^[5]提出了以田间灌溉水有效利用率和灌水均匀度等指标作为改进的地面灌溉技术评价指标,并分析了各指标间的关系,认为渠系长度和灌溉水量会影响灌溉水有效利用率指标;Karami^[6]采用层次分析法对3种灌溉方式进行优先级分析,认为喷灌适合大面积规模化灌溉,为当地农民的选择提供了参考。

在前人研究基础上,为进一步突出灌水技术的综合特性,兹从灌溉技术的适应性和经济性2方面,建立节水灌溉的综合评价指标体系及其标准量化评价方法,对当前典型节水灌溉技术类型进行宏观综合评价,进一步判断节水灌溉未来发展趋势,揭示节水灌溉技术的下一步发展方向。

收稿日期:2017-12-28

基金项目:国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFC0402900);青海省科技计划项目(2017-SF-116)

作者简介:索滢(1995-),女,河南鹤壁人。博士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail: suoy17@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者:王忠静(1963-),男,山东莱芜人。教授,主要从事水文水资源研究。E-mail: zj.wang@tsinghua.edu.cn

1 评价方法

1.1 评价对象及评价指标

节水灌溉技术体系包括工程节水技术、农艺节水技术和管理节水技术,本研究的评价对象是工程节水灌溉技术。选取目前我国常用的 12 种节水灌溉技术^[7],分别是①水平畦灌、②小畦灌、③长畦分段灌、④节水型沟灌、⑤波涌灌、⑥固定式管道喷灌、⑦半固定式管道喷灌、⑧移动式管道喷灌、⑨定喷式喷灌机、⑩行喷式喷灌机、⑪滴灌、⑫微喷灌。这些灌水技术田间以上部分的输水方式不限。

对于节水灌溉技术评价有经济类指标(工程投资、年运行费等)、资源环境类指标(耗水量、节水程度等)和社会政策类指标(社会的支持程度、农民满意度等)^[8-11]。按照指标体系建立的系统性、非相容性、客观性、实用性和层次性原则,进一步提出综合指标(一级指标),包含适应性和经济性两大类(二级指标)和 14 个具体指标(三级指标)。适应性指标包括对作物的适应性 A1、地形适应性 A2、水质适应性 A3、水量适应性 A4、土壤渗透性适应性 A5、土壤盐碱度适应性 A6、气候适应性 A7 和是否便于管理 A8;经济性指标包括田间水利用率 B1、灌溉均匀度 B2、增产程度 B3、工程投资 B4、节地率 B5 和节水程度 B6。

1.2 评价指标权重构造方法

各灌水技术的优势方面不同,每个方面可由多项指标描述。为描述灌水技术的综合性能,通常要进行各方面各指标的权重构造。常用的权重构造方法有德尔菲法和变异系数法。

德尔菲法^[12]:将所有描述节水灌溉技术的指标分为 n 大类,每大类下有 m 个小指标,称为 x_{ij} ($i=1,2,3,\dots,n,j=1,2,3,\dots,m$)。对指标体系分类赋予权重,每大类指标下各小指标的权重和为 1,即:

$$\sum_{j=1}^m \eta_{ij} = 1, \quad (1)$$

式中: η_{ij} 为第 i 大类第 j 个小指标的权重值。

由于各项指标在最终的评价中并非同一权重,任何单个评判者给出的权数均不可避免的有倾向性。为避免此类情况,选用有反馈的群组构权法,又称“德尔菲构权法(Delphi)”来确定每项指标的权重。即专家通过专业知识,对各指标在评价中的重要性打分,1分(不重要)~5分(十分重要)。第一轮打分过后先将同一指标下各专家打分进行综合,计算式为:

$$\omega_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^t \rho_k w_{ij}^k}{\sum_{k=1}^t \rho_k}, \quad (2)$$

式中: ρ_k 为第 k 个专家的“可信度”或“构权能力”的一个测度值,取 1; w_{ij}^k 为第 i 大类指标下第 j 个小指标的第 k 位专家的重要程度打分值; t 为专家总数。

为避免专家的过度奇异性,设定标准差和标准差系数作为评价专家意见分歧度的指标,设置控制阈值分别为 0.8、0.2,循环次数为至少 2 次最多 5 次。标准差及标准差系数计算式为:

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^t \rho_k (\omega_{ij}^k - \omega_{ij})^2}{\sum_{k=1}^t \rho_k}}, \quad (3)$$

$$v_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\omega_{ij}}, \quad (4)$$

式中: σ_{ij} 为第 i 类指标下第 j 个小指标的专家评分标准差; v_{ij} 为第 i 类指标下第 j 个小指标的标准差系数。

经过多轮调查满足专家分歧度指标后,得出各指标最终综合评分,然后对评分进行归一化处理,计算式为:

$$\eta_{ij} = \frac{\omega_{ij}}{\sum_{j=1}^m \omega_{ij}}. \quad (5)$$

变异系数法^[13]:利用各技术在 x_{ij} 指标下的评分结果 $z_{ij}^1, z_{ij}^2, \dots, z_{ij}^n$, 计算得到该指标的变异系数,由变异系数数值归一化得到最终权重值。记该组评分的平均数和方差计算式为:

$$\bar{z}_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^n z_{ij}^n}{n}, \quad (6)$$

$$s_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n (z_{ij}^n - \bar{z}_{ij})^2}{n-1}}. \quad (7)$$

变异系数是描述该组数据的离散程度的指标,其计算式为:

$$b_{ij} = \frac{s_{ij}}{|\bar{z}_{ij}|}. \quad (8)$$

对于所选指标 x_{ij} ,将第 i 大类的所有指标 $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}$ 的变异系数 $b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}$ 归一化即得到指标在该大类下的相应权重为:

$$\eta_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{j=1}^m b_{ij}}. \quad (9)$$

1.3 灌水技术综合评价方法

通过计算各技术某大类下指标得分加权和,得到该技术在该类的综合评价价值。计算式为:

$$R_i = \sum_{j=1}^m R_{ij} \cdot \eta_{ij}, \quad (10)$$

式中: R_i 为第 i 大类下得分; R_{ij} 为第 i 大类 j 指标下的得分。

通过评分等级设计使得各类指标最终得分 R_i 越大越好,选取各大类评分上限构成理想点。各技术的综合评分距理想点的距离即不满意度,越小越好。计算式为:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - R_i)^2}{n}}, \quad (11)$$

式中: R 为最终得分; M_i 为各大类评分上限。

2 数据来源及指标量化

2.1 数据来源

采用知识重构的方法,选取国内外关于灌溉技术的有代表性和高引用次数的参考文章以及学术专著共 19 篇作为各灌溉技术的技术指标数据来源^[14-32],综合摘录后得到兼具定性以及定量化的描述,见表 1、表 2。

表 1 各地面灌溉方式综合资料汇总

指标	水平畦灌	小畦灌	长畦分段灌	节水型沟灌	波涌灌
A1	适用于各类作物 ^[14]	主要适用于灌溉窄行距密植作物或撒播作物 ^[16]	适用于各类作物 ^[14]	主要适合宽行距作物如玉米、棉花及薯类等作物 ^[26]	适用于大田任何作物 ^[27]
A2	适宜坡度<1/3 000 ^[14]	对田块平整度要求不高 ^[16]	适宜的田面坡度为 0.001~0.003 ^[16]	适宜坡度一般小于 6% ^[25] 一般在 0.005~0.02 之间 ^[16]	适宜坡度范围为 0.0005~0.005 ^[15,27]
A3	对灌溉水质无特殊要求	同左	同左	同左	同左
A4	需水量较大	灌水定额<675 m ³ /hm ² ^[16]	可实现灌水定额 450 m ³ /hm ² ^[16]	需水量与传统灌溉无大差别	可实现灌水定额 330 m ³ /hm ² ^[27]
A5	入渗速率较低的黏性土壤 ^[14]	对土壤渗透性要求不高	同左	同左	透水性中等的壤质土壤,结构良好的中沙壤土 ^[14]
A6	预防土壤盐碱化发生 ^[16]	同左	无特殊表现	同左	同左
A7	对气候无太大要求	同左	同左	同左	同左
A8	可实现机械化	畦埂增多不利于机械化,管理不便	省工、管理费用低 ^[14]	不便于机械化耕作与收割 ^[26]	可以实现自动控制,便于管理 ^[16]
B1	90%以上 ^[14]	畦长越小利用率越高 ^[16]	>80% ^[16]	75% ^[19]	81%~87% ^[27]
B2	85% ^[14,28]	>80% ^[16]	>85% ^[14,16]	80%~85%	可达 80%~90% ^[29]
B3	精平 30% ^[14]	10%~15% ^[16]	10%~15% ^[24]	10%~15%	11%~30% ^[27]
B4	需要激光平地,成本高	3 000 元/hm ² ^[16]	与传统方式无异	同左	同左
B5	与传统方式无异	增加了田间畦埂的数量	可以省去 1~2 级田间输水沟渠 ^[14,16]	与传统方式无异	与传统方式无异
B6	>20% ^[16]	20%~30% ^[16]	20%~30%	达 30%以上 ^[23]	21%~35% ^[16,31-32]

表2 各器械灌溉方式综合资料汇总

指标	固定式管道喷灌	半固定式管道喷灌	移动式管道喷灌	定喷式喷灌机	行喷式喷灌机	滴灌	微喷灌
A1	灌水频繁、经济价值高的蔬菜果园及经济作物 ^[14]	同左	不适用于高秆密植作物、果树 ^[16]	适用各类作物 ^[19]	适用于各类作物,但不适宜果树	果树/蔬菜/经济作物/温室/缺水地区的大田灌溉 ^[16]	果树/经济作物/花卉/草坪/温室大棚 ^[16]
A2	几乎可以适应所有地形 ^[19]	同左	同左	可用于山丘地区分散耕地灌溉 ^[16]	地形平坦,土地开阔连片 ^[16]	可适用不同坡度 ^[21]	同左
A3	灌溉水需经过滤处理	同左	同左	同左	同左	一般应先沉淀/过滤/特殊情况还需进行化学处理 ^[16]	对水质有过滤要求 ^[21]
A4	水源水量不满足地面灌溉要求时也可以使用 ^[19]	同左	同左	同左	同左	需水量小,在干旱区有推广 ^[16]	同左
A5	土壤适应性强可根据土壤质地和透水性确定雨滴强度 ^[19]	同左	同左	同左	同左	对土壤的适应性强 ^[21]	同左
A6	可以控制水分,不抬高地下水位,防止次生盐碱化 ^[19]	同左	同左	同左	同左	会引起土地盐分积累 ^[16]	同左
A7	易受风影响 ^[14] 四级风以上均匀性大幅降低空气湿度过低蒸发损失加大 ^[19]	同左	同左	同左	同左	对气候无太大要求	受风的影响 ^[21]
A8	操作方便易于管理 ^[16]	介于固定式和移动式管道喷灌之间	拆装搬移强度大,不利于管理 ^[16]	管理不便 ^[16]	自动化程度高,节省管理人员 ^[16]	有利于实现,自动化管理 ^[16]	同左
B1	85% ^[16]	同左	同左	同左	同左	90%~95% ^[19]	90%
B2	80%~90% ^[16]	同左	同左	同左	同左	80%~90% ^[16]	同左
B3	大田作物10%~30%;蔬菜30%~50%;经济作物15%~60% ^[19,30]	同左	同左	同左	同左	20%~30% ^[16]	30% ^[16]
B4	15 000元/hm ² ^[19]	7 500~12 000元/hm ² ^[19]	比固定式和半固定式管道喷灌成本低	约4 500元/hm ² ^[20]	约6 000元/hm ² ^[20]	15 000~30 000元/hm ² ^[16]	1 500~9 750元/hm ² ^[22]
B5	10%~20% ^[16]	同左	同左	同左	同左	比喷灌表现更好	同左
B6	30%~50% ^[16]	同左	同左	同左	同左	30%~50% ^[16]	同左

2.2 指标量化

对各指标定性指标进行规范化,确定量化标准,见表3。根据上节表述并参照文献[33]的指标分级方法,将所有指标分为5级,指标的评分量化标准设计见表4。

表3 各指标规范方法

指标	规范方法
A1	从我国目前的600种栽培作物中挑选各大类的代表性作物进行分析,通过倍比缩放得出适应作物百分比,适应种类越多得分越高。
A2	适宜坡度范围越大得分越高。
A3	在满足灌溉水基本水质的基础上如有特殊要求则得分越低。
A4	对当地水储存量的要求,可以通过灌水定额来间接反映,要求越高得分越低。
A5	适宜灌溉的土壤种类越多得分越高。
A6	对土壤盐碱度有利影响则得分高,反之得分低。
A7	灌溉时对气候条件的要求高则得分低。
A8	便于机械化、规模化、自动化的得分高。
B1	取范围均值,利用率越高得分越高。
B2	取范围均值,均匀度越高得分越高。
B3	取范围均值,增产百分比越大得分越高。
B4	根据2006年国家制定的社会折现率8%计算至2017年,取范围均值,投资越小得分越高。
B5	取范围均值,节地程度越大得分越高。
B6	取范围均值,节水程度越高得分越高。

3 结果与分析

3.1 综合评价结果

通过对多名专家进行多轮咨询打分评价后,根据式(2)一式(5)得出德尔菲法构造的各指标权重。同时

采用变异系数法根据式(6)一式(9)计算得出第二组权重,结果见表5。

表4 各指标评分量化标准

指标	1~2	3~4	5~6	7~8	9~10
A1	适宜耕种45%~55%的农作物	适宜耕种55%~65%的农作物	适宜耕种65%~75%的农作物	适宜耕种75%~85%的农作物	适宜耕种85%~95%的农作物
A2	适应坡度范围为0~0.1	适应坡度范围为0.1~0.2	适应坡度范围为0.2~0.3	适应坡度范围为0.3~0.4	适应坡度范围为0.4~0.5
A3	对水质要求极高,需净化处理	对水质要求较高	对水质有一些要求,不得有大颗粒物	对水质要求较低	对水质无特殊要求
A4	灌水定额 720~825 m ³ /hm ²	灌水定额 615~720 m ³ /hm ²	灌水定额 510~615 m ³ /hm ²	灌水定额 405~510 m ³ /hm ²	灌水定额 300~405 m ³ /hm ²
A5	适用于1种土壤	适用于2种土壤	适用于3种土壤	适用于4种土壤	适用于5种土壤
A6	加重土壤盐碱度	可能会略微增加土壤盐碱度	对土壤本身盐碱度无影响	对土壤盐碱度有少许缓解	可用来改良盐碱土
A7	对气候要求极严	对气候要求较高	对气候有一定要求	对气候要求较低	几乎适应所有气候
A8	与传统地面灌溉无差别	可节约少许劳力	可一定程度上节约劳力	可节约较多劳力	可实现自动化、大规模节约劳力
B1	75%~79%	79%~83%	83%~87%	87%~91%	93%~96%
B2	81%~82%	82%~83%	83%~84%	84%~85%	85%~86%
B3	10%~16%	16%~22%	22%~28%	28%~34%	34%~40%
B4	36 000~45 000元/hm ²	27 000~36 000元/hm ²	18 000~27 000元/hm ²	600~18 000元/hm ²	0~600元/hm ²
B5	<0	0~4%	4%~8%	8%~12%	12%~16%
B6	20%~27%	27%~34%	34%~41%	41%~48%	48%~55%

表5 各指标最终权重值

方法	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4	B5	B6
德尔菲法	0.17	0.12	0.11	0.14	0.12	0.12	0.12	0.1	0.17	0.17	0.18	0.19	0.13	0.16
变异系数法	0.13	0.16	0.18	0.09	0.07	0.12	0.11	0.14	0.17	0.09	0.19	0.18	0.18	0.19

通过式(10)计算得出德尔菲法和变异系数法构权下各个技术的适应性和经济性得分如表6所示。

表6 不同权重下各技术大类得分

类别		灌溉技术											
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	㉑	㉒
适应性	德尔菲法	6.15	7.46	6.9	6.62	6.86	5.78	6.02	5.74	4.56	5.57	7.42	6.89
	变异系数法	6.45	7.41	6.74	6.36	6.89	5.69	5.81	5.41	4.03	5.21	6.91	6.42
经济性	德尔菲法	6.02	3.19	5.6	4.65	5.46	6.51	7.4	7.91	7.91	7.4	7.76	7.62
	变异系数法	5.39	3.06	5.06	4.28	5.05	6.51	7.41	7.95	7.95	7.41	7.8	7.65

从表6可以看出,使用变异系数法得出的10种灌溉方式适应性得分较德尔菲法低,这是因为变异系数法的关注点在各技术表现的差异,差异性越大则认为该指标区分对象的能力强,而赋予较大的权重。从而高估了对水质的适应性(A3)要求,并低估了对水量的适应性(A4)和对土壤渗透性的适应性(A5)这2个指标的重要性。在经济性方面2种权重方法的结果总体差别不大,在各技术都表现较好且实际重要性较高的灌溉均匀度(B2)这一指标上,变异系数法低估了其重要性。以上分析说明变异系数法仅从数字特征中考虑了各指标的重要性,而忽略了指标的实际应用重要性。因此,相对来说,德尔菲法综合了各专家对各项指标的理解和技术发展的现状,构权结果相对更具有说服力。

使用德尔菲法所构权重,根据式(11)得出最终得分如表7所示。

表7 各灌溉技术最终得分汇总

类别	灌溉技术											
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	㉑	㉒
最终得分R	3.92	5.14	3.81	4.47	3.90	3.87	3.36	3.36	4.12	3.63	2.42	2.77

从表7可以看出,适应性得分较高的为小畦灌、微灌,主要是因为二者在地形(A2)、作物种类(A1)适应性较好,但小畦灌由于增加畦埂而减少了种植面积(B5)使经济性表现不佳。相比较而言喷灌在经济性方面有较好的表现,因为其成本(B4)相比微灌方式低且在灌溉效果上无较大差距,但由于其在气候(A7)、地形(A2)适应性上表现不佳,所以适应性得分偏低。

使用不满意度评价得出最终评分,评分越低说明技术距理想点越近,则表现越好。因此各灌溉技术的最终排名由高到低依次为:㉑ 滴灌、㉒ 微喷灌、⑧ 移动式管道喷灌、⑦ 半固定式管道喷灌、⑩ 行喷式喷灌机、

③长畦分段、⑥固定式管道喷灌、⑤波涌灌、①水平畦灌、⑨定喷式喷灌机、④节水型沟灌技术、②小畦灌。

3.2 特征及趋势

将各灌溉技术由2种构权法得到的二大得分点绘到二维坐标中(图1),可以发现2种构权方法得分较为接近。以 $y=x$ 做直线和以原点为圆心做半径为8.89的圆弧,除微灌以外的其他灌溉模式基本分布在圆弧周围,说明各技术在适应性和经济性方面有竞争关系;以畦灌为代表的地面灌溉技术多落在直线的左上部分,代表其适应性占优而经济性不佳;以喷灌为代表的器械灌溉技术多落在直线的右下部分,代表其经济性占优而适应性不高。总体看,微灌在各灌溉技术间得分较高。

将图1的各项节水灌溉技术的发明年代标出(图2)后发现,地面灌溉方式在适应性较好的条件下逐渐发展其经济性特征,除波涌灌外,其余器械灌溉方式在逐渐提升其适应性方面的表现。波涌灌属于器械灌溉与地面灌溉方式结合的灌溉方法,虽然理论上可以节水,但实际应用后节水效果并不理想,所以逐渐被其他节水灌溉方式取代。总的来说2种构权方法得到的结果都显示,不论是地面节水灌溉技术还是器械式灌溉技术,都是沿着 $y=x$ 直线的方向发展,未来灌溉技术将向适应性和经济性均衡占优的方向发展。

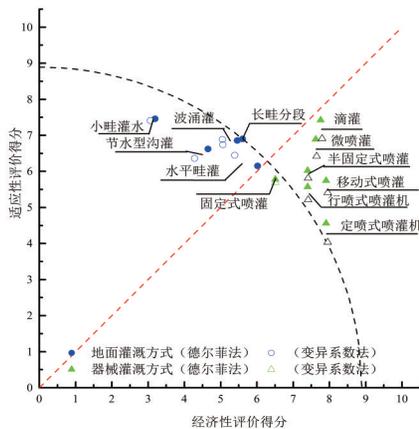


图1 各灌溉技术综合评分的空间分布

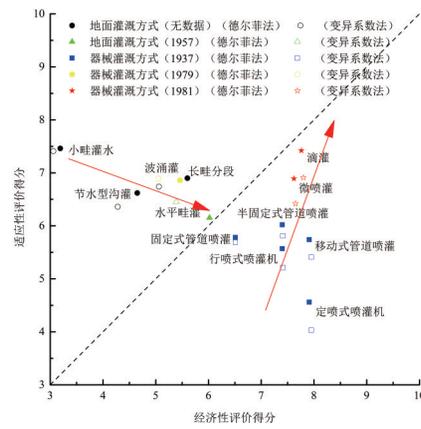


图2 各灌溉技术发展起始时间与发展趋势示意图

4 讨论与结论

通过量化分析目前应用较为普遍的12种节水灌溉技术认为,微灌在适应性(滴灌7.42、微喷灌6.89)和经济性(滴灌7.76、微喷灌7.62)方面表现较为优秀,但其成本较高是其弱点,与文献[34]结论一致。喷灌因其较好的灌溉效果和低于微灌的成本得到较高的经济性得分(平均7.43),但因在山区丘陵地形和气候适应性等方面表现欠佳导致适应性较低,与吴普特等^[35]的研究结论一致。节水型地面灌溉方法中小畦灌由于畦埂数量增加导致的耕地面积减少使得经济性得分(3.19)较低。此外,从本研究还可看出,地面灌溉在适应性较高的基础上逐步提高其经济性,就有了水平畦灌技术的产生;器械灌溉在经济性较高的基础上逐步提高其适应性,产生了滴灌等微灌技术。总体上,节水灌溉技术在向着更全面的方向发展,这与黄修桥等^[36]提出的目前节水灌溉技术的发展是单项性的,单项技术成熟之后必然向综合方向发展的结论相同。

通过以上分析得出:1)综合表现最好为滴灌(2.42),其次是微喷灌(2.77),微灌的排名均靠前,紧接着是喷灌,最后是节水型畦灌和波涌灌以及节水型沟灌,表现最差的是小畦灌(5.14);2)从各灌溉模式适应性与经济性的分布关系可以看出适应性与经济性有较为明显的竞争;3)从各类灌溉方式的发明年代发展可以看出,未来灌溉技术将在适应性和经济性双优的方向发展,也就是说,灌溉技术将在得到更好的适应性同时具有更优良的性能。本研究未来将进一步考虑将可持续发展纳入评价体系中^[37],同时进行各技术对各指标的敏感性分析,研究为未来技术改进方向。

参考文献:

[1] TÖRNQVIST R, JARSJÖ J. Water Savings Through Improved Irrigation Techniques: Basin-Scale Quantification in Semi-Arid Environments[J]. Water Resources Management, 2012, 26(4): 949-962.
 [2] 朱兴业, 袁寿其, 刘建瑞, 等. 轻小型喷灌机组技术评价主成分模型及应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 98-102.
 [3] 罗金耀, 李道西. 节水灌溉多层次灰色关联综合评价模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(5): 38-41.
 [4] 高峰, 雷声隆, 庞鸿宾. 节水灌溉工程模糊神经网络综合评价模型研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 84-87.

- [5] ZERIHUN D, WANG Z, RIMAL S, et al. Analysis of surface irrigation performance terms and indices[J]. *Agricultural Water Management*, 1997, 34(1): 25-46.
- [6] KARAMI E. Appropriateness of farmers' adoption of irrigation methods: The application of the AHP model[J]. *Agricultural Systems*, 2006, 87(1):101-119.
- [7] 胡永宏. 综合评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [8] 卢玉邦, 郭龙珠, 郎景波. 综合评价方法在节水灌溉方式选择中的应用[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2):33-36.
- [9] 雷卿. 基于层次分析与模糊评判的节水灌溉技术评价方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [10] 陈成. 基于层次分析法的农业节水灌溉适宜技术的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [11] 赵阿丽. 灌区节水改造综合效益评价和灌溉水资源合理配置研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [12] 苏为华. 综合评价学[M]. 北京: 中国市场出版社, 2005.
- [13] 孙景生, 康绍忠. 我国水资源利用现状与节水灌溉发展对策[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(2): 1-5.
- [14] 迟道才. 节水灌溉理论与技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [15] 刘群昌, 许迪, 谢崇宝, 等. 波涌灌溉技术田间适应性分析[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 35-40.
- [16] 刘作新, 尹光华, 李桂芳. 辽西半干旱区褐土涌流畦灌的节水效果[J]. *沈阳农业大学学报*, 2004, 35(5): 384-386.
- [17] 于纪玉. 节水灌溉技术[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2007.
- [18] 刘恩民, 刘晓云, 刘传收, 等. 低压管道输水小畦灌的优势与发展前景[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(3): 37-40.
- [19] 周世峰. 喷灌工程学[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2004.
- [20] 赵竞成, 任晓力. 喷灌工程技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [21] 何龙, 何勇. 微灌工程技术与装备[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006.
- [22] 奕永庆. 经济型喷微灌[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [23] 郝和平, 郑和祥, 史海滨, 等. 内蒙古河套灌区节水型地面灌溉技术研究[J]. *内蒙古水利*, 2009(3):6-8.
- [24] 王智. 长畦分段灌溉法灌水技术的研究[J]. *灌溉排水*, 1986, 5(4):15-26
- [25] 罗金耀. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [26] 李宗尧. 节水灌溉技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [27] 彭立新, 周和平, 张荣, 等. 地面节水灌溉新技术: 波涌灌综述[J]. *节水灌溉*, 2000(6):13-14.
- [28] AL-QINNA M I, ABU-AWWAD A M. Soil water storage and surface runoff as influenced by irrigation method in arid soils with surface crust[J]. *Agricultural Water Management*, 1998, 37(3): 189-203.
- [29] HUNSAKER D J. Cotton yield variability under level basin irrigation[J]. *Transactions of the Asae*, 1992, 35(4): 1 205-1 211.
- [30] EL-DINE T G, HOSNY M M. Field Evaluation of Surge and Continuous Flows in Furrow Irrigation Systems[J]. *Water Resources Management*, 2000, 14 (2): 77-87.
- [31] TIWARI K N, SINGH A, MAL P K. Effect of drip irrigation on yield of cabbage (*Brassica oleracea*, L. var. capitata) under mulch and non-mulch conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 58(1): 19-28.
- [32] ISMAIL S M, DEPEWEG H, SCHULTZ B. Surge flow irrigation under short field conditions in Egypt[J]. *Irrigation & Drainage*, 2004, 53(4): 461-475.
- [33] 吴景社, 康绍忠, 王景雷. 节水灌溉综合效应评价指标的选取与分级研究[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(5): 17-19.
- [34] 雷晓霞. 疏勒河流域主要作物节水灌溉技术适宜性评价[J]. *甘肃水利水电技术*, 2013, 49(10): 17-20.
- [35] 吴普特, 冯浩, 牛文全, 等. 我国北方地区节水农业技术水平及评价[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(1): 26-30.
- [36] 黄修桥, 高峰, 王宪杰. 节水灌溉与21世纪水资源的持续利用[J]. *灌溉排水*, 2001, 20(3): 1-5.
- [37] 雷波, 姜文来. 节水农业综合效益评价研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(3): 65-69.

Systematically Evaluating the Performance of Typical Water-saving Irrigation Techniques

SUO Ying^{1,2}, WANG Zhongjing^{1,3,4*}

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to resolve the issues involved in macro-scale evaluation of typical water-saving irrigation technology and its future development. **[Method]** Literature survey and knowledge management reconstruction method were used to analyze the characteristics of typical water-saving irrigation technology. Two categories of indicators adaptability and economic efficiency were used to systematically evaluate the indices of water-saving irrigation technology. The adaptability factors included eight indices: crop type, topography, water quality, water source, soil permeability and soil salinity, and the adaptability factors included climate and difficulty in management. The economic efficiency factors include field water use rate, irrigation uniformity, yield in-

crease rate, investment, land saving rate and water saving level. Through refining each index score, we obtained the assignment criteria. Using the Delphi method, we constructed the weight of each index calculated its final score. **【Result】** The overall performance of micro-irrigation was the best with the scores of drip irrigation and micro-sprinkler irrigation being 2.42 and 2.77 respectively, followed by conventional sprinkler irrigation, water saving border-irrigation, surge irrigation and water-saving furrow irrigation. Small border irrigation was the worst, with a score of 5.14. The scores of economic efficiency and adaptability of all irrigation methods had strong competition. The development of those irrigation methods showed that the future irrigation would have good adaptability and economic efficiency. **【Conclusion】** From the perspective of macro scale, irrigation technology has been developing in the direction of good adaptability and economic efficiency. Improving the adaptability of instrument-based irrigation and the economics of non-instrumental irrigation is hence the future in developing water-saving irrigation technology.

Key words: water-saving irrigation; comprehensive performance; evaluation; Delphi method

责任编辑:陆红飞

(上接第 105 页)

Using the Green-Ampt Model to Analyze Enhanced Infiltration in Slope Corn Field in the Loess Plateau

WANG Jian¹, MA Fan^{1,2}, MENG Qinqian^{1*}, MA Yuhong³, WU Faqi¹

(1. Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750000, China; 3. Xi'an Water and Soil Conservation Station, Xi'an 710000, China)

Abstract: **【Objective】** Cropping alters soil structure and hence hydrological cycle. This paper aimed to study the influence of corns planted in slope on water infiltration and the water use efficiency. **【Method】** The experiment was conducted on a slope with slope angle of 3° to 15°; the infiltration of an artificial rainfall was measured. The infiltration process was simulated using the Green-Ampt model, and the steady infiltration rate was determined based on the infiltration rate measured at the late stage of the experiment. We also calculated water deficit parameter of the root zone soil and derived soil water infiltration processes based on the surface-runoff time and the precipitation intensity. **【Result】** The corn field intercepted precipitation and thus delayed the occurrence of surface runoff. The capacity of the interception increased gradually as the corn grew. The efficacy of the tasseling period in reducing surface runoff was most notable, with the average runoff time delayed from 4.69 min to 17.98 min. The cumulative infiltration before runoff occurred was higher than that on a bare surface, increasing by 20.46%, 130.91%, 272.54%, and 235.93% respectively on the seedling, jointing, tasseling and late tasseling stages. The cumulative infiltration in the corn field was also higher than that on a bare surface, increasing by 2.44%, 6.33%, 31.01% and 24.13% respectively on the above four growth stages. Planting corn increased soil hydraulic conductivity, thus improving its infiltration capacity and soil water content, compared to bare soil surface. **【Conclusion】** The Green-Ampt model is able to simulate water infiltration in the slope planted with corn and the calculated infiltration rate can match with the measured date despite a slight overestimation because the model does not consider the surface compaction induced by raindrops.

Key words: rainfall infiltration; sloping land; corn; Loess Plateau

责任编辑:陆红飞