文章编号:1672-3031(2013)04-0249-07

农业水资源效用评价Ⅱ：方法与应用

雷 波[1,2,3]，许 迪[1,2,3]，刘 钰[1,2,3]

（1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100048；2. 中国水利水电科学研究院 水利研究所，北京 100048；
3. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心，北京 100048）

摘要：本文在农业水资源效用评价理论框架体系下，进一步完善了农业水资源效用综合评价方法体系：提出了评价模型，确定评价方法并构建了评价指标体系。应用提出的评价理论和方法体系，对华北平原井灌区的代表——北京大兴进行了案例研究。评价结果显示，大兴地区农业水资源利用效用综合得分均保持在良好状态区间，其最大的原因在于经济效益持续较好，贡献了总效应得分的50%以上，而环境效益则相对较差，除了有两年处于正常状态外，其余年份均处于警戒状态。评价结果表明大兴地区农业水资源利用存在着比较突出的环境问题，具体表现为水污染严重，水质较差，地下水超采严重。案例研究的结果与专家的研判大致相符证明了该方法体系的科学性和合理性，下一步的重点是如何从区域差异上解决方法的普适性问题。

关键词：农业水资源效用；层次分析法；评价

中图分类号：S277；X820.3 **文献标识码**：A

水资源参与农业生产过程中既是水资源自然循环过程，也是人类干预活动的结果。实际上，人类活动的干预对水资源循环通量已经超过了天然水循环的通量[1-2]。水资源效用评价研究的正是农业水资源循环过程对人类活动干预的效果反馈，这种反馈在农作物生产方面体现为经济效果，在其他方面则体现为生态环境效果和社会效果。农业水资源效用评价的核心是农业水资源及其参与农业生产过程中的水资源循环过程产生的各种自然、生态、经济、社会等效果。在文献[3]中，探讨了农业水资源效用评价的理论基础，经济学解释，并初步提出了农业水资源效用评价理论框架体系。本文将在前文的基础上进一步开展农业水资源效用综合评价方法与应用研究。

1 农业水资源效用评价方法

因为农业水资源的多功能性以及其在农业生产过程中提供服务功能的多重性决定了农业水资源效用是个多目标综合评价问题。在农业水资源效用评价框架体系内，建立评价模型、确定评价指标体系，明确多目标综合评价方法是关键和核心。

1.1 评价模型 农业水资源效用主要由经济效益、社会效益和环境效益三部分综合，属于典型的多目标综合评价问题。其综合效用按层次划分为三个层次：指标层，准则层和目标层。其效用综合评价模型为：

$$R=\sum_i W_i\times\left(\sum_j w_{ij}\times R_{ij}\right) \tag{1}$$

式中：R为农业水资源综合效用；W_i为准则层i的权重；w_{ij}为准则层i第j个指标的权重；R_{ij}表示准则层i第j个指标的标准值。

1.2 基于层次分析法的多目标综合评价方法 近20年来，综合评价技术的理论研究与实践活动均有了很大的发展，新的方法时有提出。从最初的评分评价、综合指数评价法、功效系数法到后来的多

收稿日期：2013-01-30
基金项目："十二五"农村领域国家科技计划课题(2011BAD25B05-2)；中国水利水电科学研究院"十二五"重点科研项目(节集1205)资助
作者简介：雷波(1976-)，男，四川成都人，博士，工程师，主要从事农业水管理、水资源经济研究。E-mail：leibo@iwhr.com

元统计评价法、模糊综合评判法、灰色系统评价法、AHP(层次分析)法，再到近几年来的DEA法(数据包络分析)、ANN(人工神经网络)法等，评价方法日趋复杂化、数学化、多学科化，使之成为一种交叉性的科学技术[3]。

农业水资源效用综合评价涉及到众多因素，从评价体系来看，划分为目标层、准则层、指标层三个层次，涉及农业水资源的经济效益、社会效益和生态环境效益等三大方面的综合效应评价。在这些因素指标中，尤其是非经济效益的评价指标非常复杂，想要对这些因素进行准确地定量化描述几乎不可能。比较分析多种评价方法，采用层次分析法可以较好的避免这些问题。层次分析法(Analytic Hierarchy Process，简称AHP法)是美国运筹学家T.L.Saaty于20世纪70年代提出的，是一种将定性分析和定量分析相结合的多目标决策方法。层次分析法可以对有关专家的经验判断进行量化，将定性、定量的方法有机结合起来，用数值衡量方案差异，使决策者对复杂对象的决策思维过程条理化。该方法特别适用于对目标结构复杂且缺乏必要数据的多目标多准则的系统进行分析评价[4]。从实际应用来看，层次分析法主要有以下几个步骤[5]：

(1)构建层次模型，确立系统的递阶层次关系。根据具体问题，一般将评价系统分为目标层、准则层和指标层，更复杂的系统可以划分为总目标层、子目标层、准则层(准则亚层)、方案措施层等。

(2)构造判断矩阵，判断指标相对权重。对同一层次的各个元素关于上一层次中的某一准则的重要性进行两两比较，构造判断矩阵。所构造的判断矩阵为T，见图1，其标度原则见表1。

$$T=\begin{vmatrix} 1 & t_{12} & t_{13} & \cdots & t_{1n} \\ 1/t_{12} & 1 & t_{23} & \cdots & t_{2n} \\ 1/t_{13} & 1/t_{23} & 1 & \cdots & t_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1/t_{1n} & 1/t_{2n} & 1/t_{3n} & \cdots & 1 \end{vmatrix}$$

图1　层次分析法判断矩阵结构

表1　AHP法的标度原则

标度t_{ij}	指标重要性比较
1	i指标与j指标相同重要
3	i指标比j指标略重要
5	i指标比j指标较重要
7	i指标比j指标非常重要
9	i指标比j指标绝对重要
2，4，6，8	为以上两个判断之间的中间状态对应的标度值
倒数	若j指标与i指标，其标度值$t_{ij}=1/t_{ji}$，$t_{ii}=1$

(3)求解判断矩阵的最大特征值λ_{max}和特征向量W，并进行一致性检验。当且仅当判断矩阵具有唯一非零特征值时，$\lambda_1=\lambda_{max}=n$时，该矩阵具有完全一致性，否则存在偏差。当不完全一致时，就需要对判断矩阵的一致性进行检验。其检验公式为：

$$CR=CI/RI \tag{2}$$

式中：CR为判断矩阵的一致性检验指标，为随机一致性比率；CI为判断矩阵偏离一致性指标取平均值；RI为判断矩阵随机一致性标准。

CI计算方法见下式：

$$CI=\left(\lambda_{max}-n\right)\Big/\left(n-1\right) \tag{3}$$

Saaty对RI的取值做了规定，见表2。

判断矩阵的一致性判别标准为：若$CR<0.10$，则认为判断矩阵具有满意一致性；否则要进行调整判断矩阵。

表2　APH法*RI*值

*W*的阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
*RI*值	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

（4）根据判断矩阵的特征值和特征向量，确定相应权重。主要方法有方根法和组合权重计算法等。

1.3　农业水资源效用评价指标体系　多目标综合评价指标体系的构建应该遵守几个基本的原则，包括科学性、针对性、可操作性和可比性等原则[6]。指标体系构建过程中需要考虑几个方面：指标概念必须明确，能够较客观地反映农业水资源综合效用的结构关系，并能较好地度量各种效益和反映农业水资源利用的特点、问题以及发展趋势；指标选择、数据获取及计算必须有相应的科学原理支撑；指标体系作为一个整体，能够全面的反映农业水资源利用对农村社会、生态和经济发展带来的冲击和问题，指标选择和计算口径一致；指标选择和计算尽量客观合理，避免人为因素的干预，以保证结果的公正、合理。实际上，在构建评价指标体系过程中，还必须考虑区域差别和用水特点，因此不同区域的不同农业水资源开发利用方式，其评价指标体系可能存在一定的差别。基于以上的原则和考虑，从资源禀赋，水资源利用的可持续性，经济合理性，社会公平与进步性，环境协调性，生态友好性等多个方面选择了11个具有代表性的指标，构建农业水资源效用综合评价指标体系（见表3）。

表3　农业水资源效用综合评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标选择标准	指标属性
农业水资源综合效用	经济效益	亩均可利用水资源量/(m^3/亩)	评价区域农业水资源禀赋	资源禀赋
		农业有效耗水系数	评价生产消耗用水水平	可持续性
		水分生产效率/(g/mm)	评价农业水资源生产能力	经济合理性
		农业水资源产出效益/(元/m^3)	评价农业水资源直接经济效益	经济合理性
	社会效益	水管体制合理化程度	反映水资源管理制度和能力	社会进步性
		节水意识改进度	反映区域居民对节水的认识	社会公平性
		节水灌溉率/%	反映节水技术对当地的贡献	社会进步性
		广义生态耗水比例	评价资源性节水效果	可持续性
	生态环境效益	灌区水质综合指数	评价当地农业用水污染程度	环境协调性
		灌区林草覆盖率/%	反映当地生态指标情况	生态友好性
		地下水采补比	评价当地地下水采补情况	环境协调性

2　华北井灌区农业水资源效用综合评价

提出理论基础和方法体系，只是从理论的角度解决了农业水资源效用评价要做什么以及怎么做的问题。而要检验方法是否具有实用性和可操作性还应该对方法进行应用。本节选择华北平原井灌区代表——北京大兴为例，运用本文提出的农业水资源效用评价理论与方法体系对其近年来农业水资源开发利用的效用进行综合评价。

2.1　评价区概况　北京大兴位于海河流域中部，北京南郊，总面积1 030km^2。大兴属北温带半湿润季风型大陆气候，多年平均降水量为516.4mm，丰水年（20%）为672.8mm，平水年（50%）为490.5mm，枯水年（75%）为364.8mm，特枯水年（95%）为237.6mm。降水量年内分布极不均匀，多年平均汛期（6—9月）降水量为429.3mm，占多年平均降水量的83.1%，从空间分布来看，大兴降水量西北部地区相对较大，中部次之，南部地区最小。大兴区水资源可利用总量为2.58亿m^3，多年平均用水消耗量为2.91亿m^3，多年平均水资源利用消耗率达112.8%，靠超采地下水满足社会经济和工农业生产生活需要。大兴平原区浅层地下水可开采量为2.21亿m^3，多年平均实际开采量为2.91亿m^3，平原区浅层地下水开采率达到131.7%。

由于自20世纪80年代以来，降水量减少，大兴境内河流逐渐干枯，二十多年来农业水资源利用除了降水之外，主要来源地下水灌溉。根据大兴统计年鉴显示，近年来，大兴农业用水占总用水比

例80%以上[7-8]。

2.2　多目标综合评价方法应用

2.2.1　指标标准化处理　指标数值主要来源于大兴统计资料、实验监测数据和遥感数据。反映农业水资源综合效用的指标涵盖社会、经济和生态各个领域，其指标不仅具有不同量纲，指标之间数值量级也有很大的差异。在综合效用评价中，这些不同量纲、量级的数值是不能进行直接的比较或加和计算的，必须对其进行无量纲化处理。离差化方法简单，直接，利于运算，应用范围较广。离差法处理后北京大兴农业水资源效用评价指标标准化值见表4。

表4　农业水资源效用综合评价指标标准化值

指标属性	指标名称	指标代码	不同水平年指标数据					
			2003	2004	2005	2006	2007	2008
经济效益	亩均可利用水资源量	a_{11}	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	农业有效耗水系数	a_{12}	0.73	0.87	0.99	0.67	0.87	0.90
	水分生产效率	a_{13}	0.75	0.71	0.76	0.96	0.70	0.73
	农业水资源产出效益	a_{14}	0.69	0.85	0.73	0.73	0.78	0.84
社会效益	水管体制合理化程度	a_{21}	0.61	0.65	0.71	0.71	0.75	0.77
	节水意识改进度	a_{22}	0.42	0.45	0.53	0.49	0.47	0.45
	节水灌溉率	a_{23}	0.87	0.89	0.91	0.93	0.95	0.95
环境效益	广义生态耗水比例	a_{31}	0.76	0.70	0.74	0.74	0.71	0.73
	灌区水质综合指数	a_{32}	0.24	0.21	0.22	0.19	0.21	0.20
	地下水采补比	a_{33}	0.46	0.42	0.49	0.44	0.48	0.43

2.2.2　指标权重确定　指标权重的确定采用层次分析法，权重判断矩阵采用专家打分建立。我们采用问卷调查，由8位长期在北京大兴从事农业节水试验研究、示范和推广的专家以及大兴农业、水务等相关管理部分的3位工作人员分别根据各自的专业背景和认识对不同指标两两之间的相对重要性打分，通过打分构建权重判断矩阵，然后对判断矩阵进行层次排序，并计算出各指标的权重。其值的确定判断打分情况见表5—表8。

通过对指标矩阵进行层次单排序，层次总排序及一致性检验，并根据不同层次内指标数量对指标进行总体修正后，得出准则层和指标层对总体评价目标的权重。表5—表8是层次单排序及一致性建议结果。

表5　判断矩阵R–A及其特征值

R	a_1	a_2	a_3	w_i
a_1	1	3	1	0.37
a_2	1/3	1	1/3	0.25
a_3	1	1	1	0.37
			CR=0.004 3 < 0.1	

表6　判断矩阵A_1–A_{1j}及其特征值

A_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	w_{1i}
a_{11}	1	1/7	1/9	1/9	0.07
a_{12}	7	1	1/3	1/3	0.23
a_{13}	9	3	1	1	0.35
a_{14}	9	3	1	1	0.35
			CR=0.004 2 < 0.1		

表7　判断矩阵A_2–A_{2j}及其特征值

A_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	w_{2i}
a_{21}	1	1	1/3	0.29
a_{22}	1	1	1/3	0.28
a_{23}	3	3	1	0.43
		CR=0.000 1		

表8　判断矩阵A_3–A_{3j}及其特征值

A_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	w_{3i}
a_{31}	1	3	1/3	0.32
a_{32}	1/3	1	1/5	0.21
a_{33}	3	5	1	0.47
		CR=0.000 1		

由于影响经济效益(A_1)、社会效益(A_2)、生态效益(A_3)的指标个数不完全相同，因此，需对其权重w_i进行加权修正。计算公式为：

$$\overline{w_i} = \frac{n_i w_i}{\sum_i n_i w_i} \tag{4}$$

式中：n_i为w_i所支配的指标个数；$\overline{w_i}$为修正后的指标A_i对于农业水资源总效用指标R的权重。

则修正后的A_i对R的权重指标向量：

$$\overline{w} = (0.44,\ 0.22,\ 0.34)'$$

则若$\overline{w_{i_j}}$为指标a_{ij}对R的权重向量，则：

$$\overline{w_{i_j}} = \begin{pmatrix} 0.03 & & \\ 0.10 & 0.06 & 0.11 \\ 0.15 & 0.06 & 0.07 \\ 0.15 & 0.10 & 0.16 \end{pmatrix}$$

2.2.3　农业水资源效用评价　农业水资源效用由经济效益、社会效益和生态效益综合构成。在进行效用综合评价中，经济效益、社会效益和生态环境效益是三个基本准则。根据评价模型式(1)，计算北京大兴地区2003—2008年农业水资源效用综合度，其结果见表9。

表9　北京大兴2003—2008年农业水资源效用综合评价结果

	2003	2004	2005	2006	2007	2008
经济效益	0.72	0.79	0.79	0.79	0.76	0.80
社会效益	0.66	0.69	0.74	0.74	0.75	0.75
生态环境效益	0.51	0.47	0.51	0.48	0.50	0.48
综合效用	0.64	0.66	0.68	0.67	0.67	0.68

纵观5年的趋势，大兴地区的经济效益基本上都维持在较高水平，其综合评价值均高于0.70。分析其评价结果的构成表明，农业水资源产出效益和水分生产效率贡献最多，其次为农业有效耗水系数，贡献最低的是亩均水资源量。

大兴地区农业水资源利用的社会效益基本上呈现逐年上升趋势，其主要原因在于近年来大兴区水资源状况比较紧张，农业工程节水发展较好，其对农业用水的管理也较为合理。但居民的节水意识还存在着起伏不定的趋势，与降水量的多少呈现一种正相关的关系，这一点需要改进。

经济效益和社会效益相比，大兴区农业水资源利用的环境效益不太理想，全部在0.4~0.5的偏低位徘徊。分析其得分低的原因，主要有两个，一是受工业和农业污染，大兴地区的水质较差，其次为地下水超采严重。

效用综合评价结果表明，2003年总效用得分为0.64，其中经济效益贡献排名第一，其贡献率为50%；其次为环境效益，贡献率26%；最后为社会效益，贡献率为23%。2004年总效用得分为0.66，其中经济效益贡献排名第一，其贡献率为53%；其次为社会效益，贡献率24%；最后为环境效益，贡献率为23%。2005年总效用得分为0.68，其中经济效益贡献排名第一，其贡献率为51%；其次为环境效益，贡献率25%；最后为社会效益，贡献率为24%。2006年总效用得分为0.67，其中经济效益贡献排名第一，其贡献率为51%；其次为环境效益和社会效益，贡献率均为24%。2007年总效用得分为0.67，其中经济效益贡献排名第一，其贡献率为50%；其次为环境效益和社会效益，贡献率均为25%。2008年总效用得分为0.68，其中经济效益贡献排名第一，其贡献率为52%；其次为社会效益，贡献率25%；最后为环境效益，贡献率为23%。

2.3　综合评价结果分析　为了对评价结果进行判断，需要设计农业水资源综合效用状态区间，即确定预警分界点。采用层次分析法评价农业水资源综合效用，其指标数值在经过标准化处理并进行加权计算后，其综合评价值处于0~1区间。在结合传统分析方法的基础上，通过对综合效用理论值范围进行划分，确定出各类状态范围，见表10。当状态值处于0.2以下时，表明农业水资源利用状况处于极差状态；当状态值处于0.2~0.4时，说明农业水资源利用状况处于差的状况；当状态值处于0.4~0.5时，说明农业水资源利用状况处于警戒状态，如不及时纠正，将出现恶化；当状态值大于0.5时，说

表10　农业水资源综合效用状态区间

分级	理想状态	良好状态	一般状态		较差状态	恶劣状态
			正常状态	警戒状态		
区间值	[1，0.8)	[0.8，0.6)	[0.6，0.5)	[0.5，0.4)	[0.4，0.2)	[0.2，0)

表11　大兴区农业水资源综合效用状况判断

	2003	2004	2005	2006	2007	2008
经济效益	良好	良好	良好	良好	良好	良好
社会效益	良好	良好	良好	良好	良好	良好
环境效益	正常	警戒	正常	警戒	警戒	警戒
综合效用	良好	良好	良好	良好	良好	良好

明农业水资源利用状况处于正效应，状态值越高，效果越理想。

根据评价结果显示，总体上来说，大兴地区农业水资源利用效用综合得分都还不错，均保持在良好状态区间，其最大的原因在于大兴地区农业水资源利用的经济效益较好，贡献了总效应得分的50%以上，而环境效益得分最低，除了有两年刚好迈入正常状态外，其余年份均处于警戒状态。因此大兴地区农业水资源利用存在着比较突然的环境问题，具体表现为水污染严重，水质较差，还有就是地下水超采严重。

3　结论

本文将农业水资源效用看作一个无量纲的度，采用多目标综合评价的方法判断区域农业水资源效用变化程度，这种思路的优势在于可以简单直观的解决农业水资源效用的多重性，以及不同效用指标的差异性，评价的结果也可以很直观的对农业水资源利用效果进行判断。对华北平原井灌区代表——北京大兴地区2003—2008年间的农业水资源利用效用评价结果的分析也基本上和相关领域专家学者对大兴近年来农业水资源利用现状判断吻合，证明了文章所提出的理论和方法具有一定的科学性和适用性。未来的重点应该关注如何解决方法的独特性和灌区类型差异性之间的结合，如何从指标权重的差异性来解决不同类型灌区不同指标对综合效用的影响程度。此外如果将农业水资源开发利用放在市场的角度下来考虑，可能还需要从可衡量的价值角度来进行考量。如何将农业水资源的非经济效益价值化应该是下一步农业水资源效用评价研究的趋势。

参　考　文　献：

[1] 王浩，王成明，王建华，等．二元年径流演化模式及其在无定河流域的应用[J]．中国科学E辑，2004，34(增刊)：42-48．

[2] 桑学锋，秦大庸，周祖昊，等．基于广义ET的水资源与水环境综合规划研究：应用[J]．水利学报，2009，40(12)：9-16．

[3] 雷波，许迪，刘钰．农业水资源效用评价Ⅰ：理论初探[J]．中国水利水电科学研究院学报，2013，11(3)：161-166．

[4] 苏友华．多指标综合评价理论及方法问题研究[D]．厦门：厦门大学，2000：9-12，99-104．

[5] 甘应爱，田丰，李维铮，等．运筹学[M]．北京：清华大学出版社，1990．

[6] 雷波，刘钰，杜丽娟，等．灌区节水改造环境效应综合评价研究初探[J]．灌溉排水学报，2011，30(3)：100-103．

[7] 北京市大兴区统计局．大兴区“十一五”时期社会经济统计资料汇编[G]．北京，2006．

[8] 北京市大兴区统计局．北京市大兴区统计年鉴2007年[M]．北京，2008．

（下转第259页）

（上接第 254 页）

Comprehensive evaluation of agriculture water utility Ⅱ. method and application

LEI Bo[1, 2], XU Di[1, 2], LIU Yu[1, 2]

（1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower research, Beijing* 100048, *China*;
2. *National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing* 100048, *China*）

Abstract: The study focuses on the theoretical application of comprehensive evaluation of agriculture water utility (AWU) to Da-xing County, Beijing. Based on hierarchical structure of Target-Criterion-Index, the evaluation index system of agriculture water utility of Da-xing county, Beijing is constructed. Furthermore, the agriculture water utility of Da-xing county for the period of 2003-2008 is evaluated by application of the Analysis Hierarchy Process (AHP), which proves that AHP might be the proper method applicable to comprehensive evaluation of agriculture water utility. The evaluation results reveal that the actual effect of agriculture water utilization in Da-xing County, Beijing is in a good condition. The main reason for such results is that economic benefit of agriculture water utilization received an outstanding effect, contributing more than 50% score of comprehensive utility. On the contrary, eco-environment benefit is relatively poor. More than 60% of evaluated years is in the state of alert. The main problems for eco-environment of Da-xin County are serious pollution and groundwater overexploitation.

Key words: agriculture water utility; comprehensive evaluation; the analysis hierarchy process

（责任编辑：王学凤）