

# 基于 AHP 方法的农业用水资源综合评价与分析

龚 宇<sup>1,2</sup>, 王 璞<sup>2</sup>, 王聪玲<sup>2</sup>

(1. 河北省唐山市气象局, 河北 唐山 063000; 2. 中国农业大学农学与生物技术学院农学系, 北京 100094)

**摘 要:** 农业用水资源进行综合评价对指导进行合理开发、有效调控和持续利用有重要意义。运用层次分析方法, 借鉴已有研究成果, 对沧州地区的农业用水资源状况进行综合评价, 实现了农业用水资源综合评价从定性评价到定量评价的转化。结果表明: 该地区农业用水资源综合状况不好 ( $G = 2.42$ ), 表现在水资源先天不足, 农业用水供需矛盾突出(水资源  $G_1 = 1$ , 供水  $G_2 = 4.33$ )。加上用水水平不高 ( $G_3 = 3$ ), 环境和效益比较差 ( $G_4 = 1.33$ )。

**关键词:** 层次分析法; 农业用水资源; 综合评价

**中图分类号:** TV211.1 **文献标识码:** A

农业用水资源是关系国计民生的最重要资源之一。我国作为世界上人均和地均水资源严重缺乏的国家之一, 农业用水资源进行综合评价对指导进行合理开发、有效调控和持续利用具有重要意义。在一定水资源总量范围内, 农业用水资源由于受到工业用水、生活用水的挤占, 实际不是一个固定的量。加上其受用水及环境和效益等一些难以定量指标的影响, 对其进行比较和综合评价显得比较困难。层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP) 是对一些较为复杂、较为模糊的问题做出判定的简易方法, 特别适用于那些难于完全定量分析的问题。最初由美国运筹学家 T. L. Saaty 教授于 20 世纪 70 年代初期提出, 它是将半定性、半定量问题转化为定量问题的有效途径, 将各种因素层次化, 并逐层比较多种关联因素, 为分析和预测事物的发展提供可定量依据。主要用于确定综合评价的权重系数, 所用数学工具主要是矩阵运算。已在各项工作中得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。

## 1 农业用水资源供需状况指标体系

### 1.1 建立指标体系

由于地区农业水资源评价涉及范围广泛, 为了使评价的结果能最大程度地反映客观实际, 需要考虑的指标较多, 同时要考虑到数据资料的取得相对容易, 指标要容易量化等问题。因此, 在确定指标体系过程中要尽量使指标体系成为一个有机整体, 如实反映客观情况。针对该地区的实际情况, 经查阅有关

文献<sup>[2~5]</sup>及咨询相关领域专家, 最后确定指标体系 (图 1)。农业用水资源状况综合评价结果也采用 3 级评判标准进行分析。

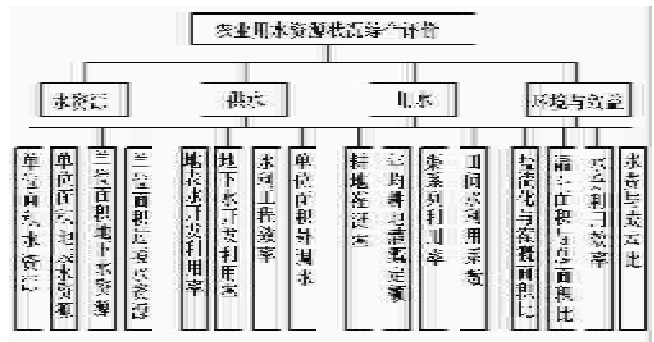


图 1 农业用水资源综合评价指标体系

### 1.2 指标评定系数的确定

根据农业用水资源供需综合状况评价指标体系及黑龙港地区实际具体情况, 参考文献<sup>[3,4]</sup>的评定方法, 相应的评定系数列于表 1~表 4。

## 2 权重的确定

权重的确定是将各项指标的影响程度用无量纲数量表示出来的过程, 是评价分析的重要参数。首先采用专家咨询方法, 对水资源、供水、用水、环境与效益 4 个方面的权重进行分配研究。本研究根据专家的意见, 对 4 个指标采用等权重处理, 即每一个指标各占 1/4 权重。对该 4 个方面指标的下级共

计 16 个指标的权重采用层次分析的方法确定权重,然后按照层次分析方法的要求进行一致性检验,以消除主观判断引起的误差。

表 1 水资源指标与等级  $\text{m}^3/\text{hm}^2$

等级与得分	单位面积 水资源	单位地表 水资源	单位地下 水资源	单位面积 可引水资源
一级(5)	5 250~3 750	3 000~2 250	3 000~2 250	3 500~2 250
二级(3)	3 750~2 250	2 250~1 500	2 250~1 500	2 250~1 500
三级(1)	<2 250	<1 500	<1 500	<1 500

表 2 供水指标与等级

等级与得分	地表水开发 利用率/%	地下水开发 利用率/%	供水工程 效率/%	单位面积外调水/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )
一级(5)	>60	80~100	>80	>3 000
二级(3)	60~30	50~80	80~50	3 000~1 500
三级(1)	<30	30~50	<50	<1 500

表 3 用水指标与等级

等级与 得分	灌溉率/ %	年均耕地灌溉 定额/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	渠系水利用 率/%	田间水利用 率/%
一级(5)	>80	<4 500	$\geq 70$	$\geq 80$
二级(3)	80~50	4 500~6 750	70~50	80~70
三级(1)	<50	6 750~9 000	<50	<70

表 4 环境与效益指标及等级

等级与 得分	盐渍化面积与 灌溉面积比/%	漏斗面积与 总面积比/%	单方水产粮/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	水费与成本 比/%
一级(5)	<10	<10	$\geq 1.5$	>60
二级(3)	10~35	15~50	1.5~1.0	60~40
三级(1)	>35	>50	<1.0	<40

## 2.1 判断矩阵的建立

判断矩阵表示针对上一层某因素,本层次上有关因素之间相对重要性的比较。假定某层次因素  $G_k$  与下一层又联系,则构造的判断矩阵一般为表 5 形式。

表 5 判断矩阵构造形式

$G_k$	$B_1$	$B_2$	...	$B_n$
$B_1$	$B_{11}$	$B_{12}$	...	$B_{1n}$
$B_2$	$B_{21}$	$B_{22}$	...	$B_{2n}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$B_n$	$B_{n1}$	$B_{n2}$	...	$B_{nn}$

表 5 中,  $B_{ij}$  为判断矩阵中系数( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ),具体数值依据 1~9 标度方法表示出(略)。

## 2.2 权重的计算与一致性检验

在层次分析法中,利用判断矩阵计算权重的方法主要分为几何平均法和规范列几何法。但是,该矩阵的构造是基于专家经验得出的数值,难免出现与实际不符的情况,缺乏一致性,因此要对每一层相对于上一层进行一致性检验以消除人为判断的局限性。如表 5 所示,如果  $B$  层因素对于  $G$  层排序的指标为  $CI$ ,相应的平均随机一致性指标为  $RI$ ,则层次总排序一致性比率为:

$$CR = CI/RI$$

其中

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i}$$

式中:  $A$  为判断矩阵;  $n$  为矩阵阶数;  $W$  为权重向量;  $RI$  依同阶平均随机一致性指标查出。

如  $CI < 0.1$ , 则说明构造的判断矩阵符合要求<sup>[1]</sup>。

近年来,随着计算机水平的不断发展,相关软件开发步伐加快,对于层次分析法的计算问题国内外均有成熟的数学软件推出,如国外的 Expert Choice 软件,国内的 DPS 数据处理软件等,大大简化了研究人员的劳动强度。经计算得各权重值见表 6。

表 6 农业用水资源综合评价各指标相应权重

$G/B/C$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$W_i$
	0.25	0.25	0.25	0.25	
$C_{11}$	0.125				0.031
$C_{12}$	0.125				0.031
$C_{13}$	0.375				0.094
$C_{14}$	0.375				0.094
$C_{21}$		0.368			0.092
$C_{22}$		0.368			0.092
$C_{23}$		0.193			0.048
$C_{24}$		0.071			0.018
$C_{31}$			0.375		0.094
$C_{32}$			0.375		0.094
$C_{33}$			0.125		0.031
$C_{34}$			0.125		0.031
$C_{41}$				0.333	0.083
$C_{42}$				0.167	0.042
$C_{43}$				0.167	0.042
$C_{44}$				0.333	0.083

最后进行权重一致性检验得  $CR_{G-B} = 0, CR_{B_1-C_{1i}} = 0, CR_{B_2-C_{2i}} = 0, CR_{B_3-C_{3i}} = 0, CR_{B_4-C_{4i}} = 0$ , 总  $CR_{B-C} = 0.003$ , 各  $CR$  值均小于 0.1, 说明上述权重计算结果符合一致性, 判断矩阵成功。

## 3 实证研究——以黑龙港地区沧州为例

黑龙港地区位于河北平原的东南部,包括沧州地区、衡水地区全部和邢台以及邯郸地区部分县市,共计 50 个县,总面积  $37\ 853 \text{ km}^2$ , 占河北省总面积的 20.2%, 占河北平原面积的 66%。属海河南系的下游。该区为半干旱气候区,具有热量资源丰富,光照充足,降水时空变化大的气候特点,多年平均降雨量为 500~600 mm,降雨年际和年内分布极不均匀,少雨年的雨量仅为多雨年的 1/4,汛期雨量(6~9 月)占全年雨量的 70%~80%。由于降雨的这些特点,长期以来区内旱、涝灾害十分频繁,成为黄淮海平原水资源最为紧缺的地区,严重限制了农业生产的稳产和进一步增产。

位于黑龙港平原东北部的沧州区域具有该地区的自然和经济状况的典型特征。以沧州地区进行实证分析,可进一步说

明评价指标体系在实际中的应用情况。沧州总面积 14 056 km<sup>2</sup>, 总面积占黑龙港地区的 1/3, 其中耕地面积 806 633 hm<sup>2</sup> (2003 年底), 主要作物为玉米、小麦、大豆、棉花等。农业用水的来源有当地的地表水、地下水以及少量的过境水。近年来, 由于该地区外来水源的减少, 加上先天自然降水不能满足农业生产的需要, 为了弥补农业灌溉的需要, 不得不超采地下水来补充农业灌溉用水以维持农业生产的正常用水。AHP 分析法中判断矩阵中各项指标及相应的等级见表 7(以 2003 年底资料计算整理而成)。

表 7 沧州地区农业水资源综合状况及等级

指 标	数量	评定等级
单位面积地表水资源/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	559	1
单位面积地下水资源/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	523	1
单位面积水资源/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	1 083	1
单位面积过境水/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	32	1
地表水开发利用率/%	57.4	5
地下水开发利用率/%	>100	5
水利工程效率/%	55	3
单位面积外调水/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	71	1
耕地灌溉率/%	63.9	3
年均耕地灌溉定额/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	3 000	3
渠系利用系数/%	0.8	5
田间水利用系数/%	0.5	1
盐渍化面积/灌溉面积比例/%	36	1
漏斗面积比例/%	>50	1
水分利用效率/(kg·m <sup>-3</sup> )	1.1	3
单方水水费成本比	<1/3	1

### 3.1 综合评价模型的建立与计算结果

水资源综合评价模型界定为:

$$G = \sum W_i K_i$$

式中:  $G$  为农业用水综合评价值;  $W_i$  为各项指标权重(表 6);  $K_i$  为各要素相应的评定等级(表 7)。

经过计算得  $G = 2.42$ , 下一层次的评价值分别为: 水资源  $G_1 = 1$ , 供水  $G_2 = 4.33$ , 用水  $G_3 = 3$ , 环境与效益  $G_4 = 1.33$ 。

### 3.2 供需状况的评价与分析

由以上综合评价计算结果可以看出, 该地区农业用水资源综合状况比较差( $G = 2.42$ )。可是从其下层次指标看出。首先是水资源非常缺乏( $G_1 = 1$ ), 各项评定值全部为 1。但是供水水平却非常高( $G_2 = 4.33$ ), 说明农业用水出现严重的供需

矛盾。这可以从地下水开发利用率大于 100%来说明。当地为了弥补农业灌溉用水的需要, 每年不得不靠超采大量地下水来维持农业生产, 引起地面下沉, 漏斗面积不断扩大等环境负面效应<sup>[6]</sup>。当然, 用水水平不高( $G_3 = 3$ )在一定程度上加大了用水需求总量, 加剧了农业用水的供需矛盾。虽然该地区普遍采用软管输水到田间, 但是到了田间后还是大水漫灌为主, 影响了用水效率和单方水的产出效率。因此, 如何提高田间利用效率就是一个非常值得关心的问题。中国农业大学在该地区试验研究的冬小麦节水栽培技术就应该大力推广和应用。据研究, 该技术能在少浇 1~2 水的情况下, 可达到省肥与稳产或高产目标。

此外, 由于农业用水资源严重的供需矛盾, 加上用水水平不高( $G_4 = 1.33$ ), 环境与效益比较差。因此地下水超采严重, 漏斗面积不断扩大和盐渍面由沿海地区西移, 盐渍化区不断加大也就在情理之中。据统计, 2003 年地下 50 m 漏斗面积已达 7 456 km<sup>2</sup>, 占总面积 14 056 km<sup>2</sup> 的仅 53%。虽然单方水产粮为 1.1, 但是由于水费与成本比例太低(小于 1/3), 农民不采用节水灌溉技术, 田间大水漫灌不触及多大经济利益, 对节水技术的推广也不利。事实上, 该地区在抽取地下水进行灌溉时并没有收取水费, 灌溉直接成本实际上只体现在电费或油费中(除劳工费)。因此, 从长远利益来看, 为了保护该地区的生态环境和地质环境, 实现农业用水持续有效利用, 进行该地区农业用水(包括自提水)的收费改革势在必行。

### 参考文献:

[1] 吕永波. 系统工程[M]. 北京. 清华大学出版社, 2006: 184-190.  
 [2] 吴建军. 生态农业综合评价的指标体系及权重[J]. 应用生态学报, 1992, 3(1): 1-5.  
 [3] 李英能. 华北地区节水农业标准初探[J]. 灌溉排水, 1993, 12(4): 12-16.  
 [4] 张红丽, 陈旭东. 新疆农业水资源可持续利用能力的评价[J]. 新疆农垦经济, 2004, (2): 22-25.  
 [5] 任鸿遵, 李 林. 华北平原水资源供需状况诊断[J]. 地理研究, 2000, 19(3): 316-323.  
 [6] 王 彤, 张桂平. 迎接水的挑战—沧州水资源现状及对策[J]. 河北水利, 1999, (3): 43-44.  
 [7] 舒卫萍, 崔远来. 层次分析法在灌区综合评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2005, (6).  
 [8] 韩 栋. AHP 的两种近似算法在水利项目后评价中的比较[J]. 中国农村水利水电, 2006, (4): 88-90.

(上接第 30 页)

[4] Aquino P. The adoption of bed planting of wheat in the Yaqui Valley [R]. Wheat Special Report No. 17a. CIMMYT, Mexico, 1998, 349.  
 [5] 王法宏, 刘世军, 王旭清, 等. 小麦垄作栽培技术的生态生理效应[J]. 山东农业科学, 1999, (4): 4-7.  
 [6] 王旭清, 王法宏, 董玉红, 等. 小麦垄作栽培的肥水效应及光能利用分析[J]. 山东农业科学, 2002, (4): 3-5.  
 [7] Wang F H, Wang X Q, Sayre K D. Comparison of conventional,

flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China [J]. Field Crops Research, 2004, (87): 35-42.  
 [8] 王法宏, 王旭清, 任德昌, 等. 水浇地冬小麦垄作栽培技术研究[J]. 麦类作物学报, 2004, 24(2): 68-72.  
 [9] Sayre K D, Agustin L, Bram G. Experiences with permanent bed planting systems [C]. CIMMYT/Mexico. Australia. ACIAR Workshop on Permanent Bed Planting Systems, 2005.  
 [10] 赵良菊, 肖洪浪, 郭天文, 等. 甘肃灌漠土土壤肥力的空间变异性典型研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 451-455.