

# 基于遗传投影寻踪模型的农业水资源利用效率综合评价

封志明<sup>1</sup>, 郑海霞<sup>1,2</sup>, 刘宝勤<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国农业科学院农业经济所, 北京 100081)

**摘要:** 针对农业水资源利用效率评价指标的不相容性问题, 提出了农业水资源利用效率综合评价的遗传投影寻踪方法。该方法可以依据样本自身的数据特性寻求最佳投影方向, 利用最佳投影方向可以判断各评价指标对综合评价目标的贡献大小和方向。通过最佳投影方向与评价指标的线性投影得到投影指标值, 通过这一指标可以对样本进行统一评价和分类。利用该方法对甘肃省81个县域单元的农业水资源利用效率进行综合评价, 评价结果很好的反映了各评价指标对综合评价目标的贡献大小和方向以及各评价单元综合利用效率。

**关键词:** 农业水资源利用效率; 综合评价; 投影寻踪; 遗传算法

**中图分类号:**           **文献标识码:** A           **文章编号:** 1002-6819(2005)03-0066-05

封志明, 郑海霞, 刘宝勤 基于遗传投影寻踪模型的农业水资源利用效率综合评价[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 66- 70  
Feng Zhiming, Zheng Haixia, Liu Baoqin Comprehensive evaluation of agricultural water use efficiency based on genetic projection pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(3): 66- 70 (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

作为农业和人口大国, 粮食生产和资源安全问题一直是关系到中国国计民生的重大问题, 而由于气候等条件的限制, 水资源一直是中国农业生产和经济发展的关键因素, 作为人均水资源量不足世界平均水平1/4的国家, 中国农业生产却主要靠灌溉保证, 全国灌溉面积约0.51亿hm<sup>2</sup>, 占总耕地面积的53%, 生产的粮食约占粮食总产量的2/3<sup>[1]</sup>。灌溉用水量约占水资源总量的80%左右, 而灌溉水资源利用率只有30%~40%, 世界发达国家可达70%~80%。作物水分生产效率全国平均约0.8kg/m<sup>3</sup>, 发达国家可达2kg/m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>。因此, 提高农业水资源利用效率对于农业生产、国民经济发展和生态建设方面都具有重要意义。

由于农业水资源利用效率是一个多层次、多目标的系统, 各项指标的评价结果常常是不相容的, 单项指标的大小很难代表水资源综合利用效率的高低, 综合指数法、层次分析法、模糊综合评判法等方法多是把各评价指标赋权后得到一个综合数值, 权重的赋予多带有人为的因素, 容易偏离评价的目标, 并缺乏各指标对总体目标贡献大小和方向的结构性评价。

本文利用20世纪70年代Friedman提出的多元数据分析的投影寻踪(project pursuit, PP)方法<sup>[3-6]</sup>, 并应用现代优化算法中的实码加速遗传算法, 在各单项指标评价的基础上, 利用大样本数据进行最优化求解, 以甘肃省81个县域单元为例, 得到分县农业水资源利用效率评价的最佳投影方向和投影值。

## 1 基于遗传算法的投影寻踪模型

投影寻踪方法的基本思路是: 把高维数据通过某种组合投影到低维子空间, 用低维空间中投影散点的分布结构揭示高维数据的结构性特征, 或根据该投影值与研究系统的输出值之间的散点图构造数学模型以预测系统的输出。建模过程包括以下5个步骤:

### 1) 投影指标的建立

投影指标由各县农业水资源利用效率评价指标构成, 为消除量纲、统一指标的变化范围, 采用下式进行标准化处理。

$$x(i, j) = [x^*(i, j) - x_{\min}(j)] / [x_{\max}(j) - x_{\min}(j)] \quad (1)$$

式中  $x_{\max}(j), x_{\min}(j)$  —— 分别为  $i$  个样本中第  $j$  个评价指标的最小值和最大值。

### 2) 构造投影指标函数

把  $x(i, j)$  投影到投影方向  $a$  上, 设  $a = (a(1), a(2), \dots, a(j))$ ,  $a$  为单位长度向量, 投影值  $z(i)$  为

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(i, j)x(i, j) \quad (2)$$

### 3) 构造投影目标函数

为了在多维指标中找到数据的结构组合特征, 在综合投影时, 要求投影值  $z(i)$  尽可能多地提取  $x(i, j)$  中的变异信息, 即  $z(i)$  的标准差  $S_z$  尽可能大, 同时投影值  $z(i)$  的局部密度  $D_z$  达到最大, 基于此, 投影目标函数可构造为<sup>[7]</sup>

$$Q(a) = S_z D_z \quad (3)$$

$$S_z = \left[ \sum_{i=1}^n (Z(i) - E_z)^2 / (n - 1) \right]^{0.5} \quad (4)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) u(R - r_{ij}) \quad (5)$$

式中  $E_z$  ——  $Z(i)$  ( $i = 1 \sim n$ ) 的均值;  $R$  —— 求局部密度的窗口半径;  $R$  的选取既要使包含在窗口内的投影

收稿日期: 2004-03-27 修订日期: 2004-09-06  
基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-333)  
作者简介: 封志明(1962-), 男, 河北平山人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事农业资源利用与可持续发展研究。北京 中国科学院地理科学与资源研究所, 100101。E-mail: Fengzm@igsrr.ac.cn

点的平均个数不太少, 避免滑动平均偏差太大, 又不能使它随着  $n$  的增大而增加太高,  $R$  一般可取值为  $\alpha z$ ,  $\alpha$  可以为 0.1、0.01、0.001 等, 依据投影点  $z(i)$  在区域间的分布情况进行适当调整, 距离  $r_{ij} = z(i) - z(j)$ ;  $u$ ——单位阶跃函数, 当  $R - r_{ij} \geq 0$  时其函数值为 1, 当  $R - r_{ij} < 0$  时其函数值为 0。

#### 4) 优化投影目标函数, 确定最佳投影方向

不同的投影方向反映不同的数据结构特征, 最佳投影方向就是最大的可能暴露高维数据某类特征结构的投影方向。可通过求解投影指标函数最大化来估计最佳投影方向, 即

$$\max(Q(a)) = S \cdot D \cdot z \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^p a^2(j) = 1, \quad -1 \leq a(j) \leq 1 \quad (7)$$

这是一个以  $a(j)$  为优化变量的复杂非线性优化问题, 用常规优化方法处理较困难。模拟生物优胜劣汰规则与群体内部染色体信息交换机制的加速遗传算法 (RAGA) 是一种通用的全局优化方法, 用它来求解上述问题十分简便和有效, RAGA 的具体算法可参见文献[8]。目标函数达到极值时得到最佳投影方向  $a$ 。

#### 5) 评价

把最佳投影方向  $a$  代入 (2) 式得各样本的投影值  $z(i)$ , 据此可对评价样本集进行统一评价。

## 2 农业水资源利用效率评价指标的选取

农业水资源高效利用的内涵是依据作物需水规律和当地供水条件, 为充分有效地利用自然降水和灌溉水, 通过采用水利工程、农业技术、管理等措施, 最大限度地减少从水源通过输水、配水、灌水直至作物耗水过程中的损失, 在获得社会效益、经济效益、生态环境效益的前提下, 最大限度地提高农业水资源的利用率和生产效率, 可以从以下 3 个方面进行评价:

1) 首先是农产品生产过程中的投入产出效率, 即农业水资源生产效率, 依据水分的来源不同又可以分为灌溉水、降水、作物耗水以及总水分等方面。由于作物产量的高低除与水分密切相关外, 还受光、温、土、肥和地形地貌的影响, 因此, 认为农业水资源生产效率只是水资源表现产出效率, 可以用降水效率、灌溉效率、耗水效率和总水分生产效率等 4 个指标表征。

2) 农业水资源在利用转化过程中的效率, 可以称为农业水资源利用率, 主要体现在输水及田间利用过程中农业水资源的利用率和作物对水分吸收、转化率。可以用农田水分盈亏率 ( $WUR$ )、农田耗水比率 ( $ETR$ )、农田水分利用率 ( $WUE$ ) 和农业水资源潜力利用率 ( $WPR$ ) 4 个指标表征。

3) 基于虚拟水的概念, 可以从农产品中所包含的虚拟水评价水资源利用效率, 可以用虚拟水耗水系数表征, 由于表示理想状态下农产品的耗水系数, 没有作为现状水资源利用效率评价指标。

各评价指标的内涵和具体估算公式如下:

#### 1) 降水效率 ( $PUE$ )

降水效率是农业水资源利用效率最基础的指标, 表示单位降水投入量所产生的粮食产量, 即:

$$PUE = Y_p / P \quad (8)$$

式中  $PUE$ ——降水速率,  $\text{kg}/\text{mm} \cdot \text{hm}^2$  或  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $Y_p$ ——单位播种面积粮食产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $P$ ——年降水量,  $\text{mm}$ 。

#### 2) 灌溉效率 ( $IUE$ )

灌溉效率也是农业水资源表现利用效率, 计算公式为:

$$IUE = Y / I \quad (9)$$

式中  $IUE$ ——灌溉效率,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $Y$ ——粮食总产量,  $\text{kg}$ ;  $I$ ——引堤灌溉水资源总量,  $\text{m}^3$ 。

#### 3) 总水分生产效率 ( $WE$ )

总水分生产效率用粮食总产量与农业水资源总投入量之比表示, 估算式为:

$$WE = Y / (I + P + \Delta W) \quad (10)$$

式中  $WE$ ——总水分生产效率,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $I, P$ ——分别为引堤灌溉水量、年降水量, 物理含义同式 (8) 和式 (9);  $\Delta W$ ——3 月与 10 月土壤储水量的变化量,  $\text{m}^3$ 。

#### 4) 耗水生产效率 ( $ETE$ )

$ETE$  表示单位耗水量所获得的粮食产出,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。耗水生产效率通过作物结构对作物耗水生产效率校正得到, 作物耗水生产效率用作物单位面积产量与实际耗水量的比率表示, 公式如下:

$$ETE_i = (Y_i / ET_{ai}) \quad (11)$$

$$ETE = \left( \sum_{i=1}^n R_i \cdot Y_i \cdot ET_{ai} \right) / R \quad (12)$$

式中  $ETE_i$ ——作物  $i$  的耗水生产效率,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $Y_i$ ——作物  $i$  的单位播种面积产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $ET_{ai}$ ——作物  $i$  单位播种面积产量的实际耗水量,  $\text{m}^3$ ;  $ETE$ ——耗水生产效率  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $R_i$ ——作物  $i$  的播种面积比例, %;  $R$ ——主要作物总播种面积比例, %。

作物实际耗水量  $ET_{ai}$  的来源包括降水、灌溉水、土壤水、地表径流、潜水蒸发等, 估算模型为:

$$ET_{ai} = \begin{cases} P + I - \Delta W & P + I - \Delta W < ET_m \\ ET_m & P + I - \Delta W > ET_m \end{cases} \quad (13)$$

式中  $ET_m$ ——作物需水量,  $\text{mm}$ ;  $ET_m$  用作物系数  $K_c$  与作物潜在蒸散量  $ET_0$  的乘积得到,  $ET_0$  由 1998 年 FAO 提供的 Penman-Monteith 方法计算得到<sup>[9]</sup>。

#### 5) 农田水分盈亏率 ( $WUR$ )

农田水分盈亏率通过作物水分盈亏率进行作物结构校正得到, 作物水分盈亏率估算公式为:

$$WUR_i = (P_e + I + \Delta W) / ET_m \quad (14)$$

式中  $WUR_i$ ——作物水分盈亏率;  $P_e$ ——作物生育期有效降水量,  $\text{mm}$ ;  $I$ ——引堤灌溉水量,  $\text{mm}$ ;  $\Delta W$ ——生育期土壤储水量的变化量,  $\text{mm}$ ;  $ET_m$ ——作物最大需水量,  $\text{mm}$ 。

#### 6) 农田耗水比率 ( $ETR$ )

作物耗水比率用作物实际耗水量与最大需水量的比例表征, 农田耗水比率通过作物结构校正得到。

## 7) 农田水分利用率(WUE)

农田水分利用率通过对作物水分利用率进行作物结构校正得到, 作物水分利用率公式为:

$$WUE_i = ET_{ai}/(P + I + \Delta W) \quad (15)$$

## 8) 农业水资源潜力利用率(WPR)

水资源潜力利用率是反映农业水资源潜力开发程度的指标, 同样通过对作物水资源潜力利用率进行作物结构校正得到农业水资源潜力利用率。作物水资源潜力利用率计算公式为:

$$WPR_i = Y_{pr}/P_c \quad (16)$$

式中  $Y_{pr}$ ——单位面积作物产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $P_c$ ——作物水资源潜力,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

表1 农业水资源利用效率评价指标相关性分析

Table 1 Correlation analysis of evaluation indexes of agricultural water use efficiency

	降水效率	总水分生产效率	耗水生产效率	农业水资源潜力利用率	灌溉效率	农田耗需水比例	农田水分盈亏率	农田水分利用率
降水效率	1	-	.644(**)	.480(**)	-.289(**)	.375(**)	.707(**)	-.620(**)
总水分生产效率	-	1	.360(**)	.375(**)	-	.337(**)	-	.271(*)
耗水生产效率	.644(**)	.360(**)	1	.902(**)	-	.366(**)	.734(**)	-.530(**)
水资源潜力利用率	.480(**)	.375(**)	.902(**)	1	-	.245(*)	.563(**)	-.362(**)
灌溉效率	-.289(**)	-	-	-	1	-.474(**)	-.352(**)	.299(**)
农田耗需水比例	.375(**)	.337(**)	.366(**)	.245(*)	-.474(**)	1	.514(**)	-
农田水分盈亏率	.707(**)	-	.734(**)	.563(**)	-.352(**)	.514(**)	1	-.784(**)
农田水分利用率	-.620(**)	.271(*)	-.530(**)	-.362(**)	.299(**)	-	-.784(**)	1

注: \*\*表示相关系数在0.01水平上显著, \*表示相关系数在0.05水平上显著(双尾检验), -表示没有显著性相关。

利用遗传投影寻踪方法, 以甘肃省81个县8个评价指标作为基本数据库, 使目标函数约束达到最大, 当 $\alpha = 0.001$ 时, 得到最佳投影方向 $a$ 。

$$a = (0.596, -0.393, 0.0246, 0.14, 0.0602, 0.4341, 0.5178, -0.0969)$$

最佳投影方向各分量值代表了相应指标对总体评价目标贡献的大小和方向, 各分量所代表的指标顺序依次为: 降水效率、灌溉效率、水分生产效率、耗水生产效率、水资源潜力利用率、耗需水比率、水分盈亏率和水分利用率。

从最佳投影方向可以看出, 灌溉效率、水分利用率2个指标同一方向,  $a(j)$ 为负值, 降水效率、耗需水比率、水分盈亏率等6个指标同一方向,  $a(j)$ 为正值, 与相关分析结果一致。需要说明的是, 这里的正负只是反映了评价指标投影方向的不同, 并不反映绝对数值的大小, 由于降水效率投影分量 $a(1)$ 值最大, 认为降水效率对甘肃省县域农业水资源利用效率影响最大, 其次为耗需水比率、水分盈亏率、灌溉效率、水分生产效率、水资源潜力利用率和水分利用率对甘肃省农业水资源综合利用效率的影响很小, 这与甘肃省农业水资源利用的实际情况相符。

把最佳投影方向代入式(2)可以得到甘肃省81个县的投影值 $Z(i)$ , 由于灌溉水的来源也是降水, 灌溉提高了降水效率, 一定程度上也提高了农业水分生产力, 作为表现效率的评价指标, 降水效率和灌溉效率在评价目标上是不一致的, 而降水效率更能代表农业水资源综合利用效率的方向。因此, 取降水效率等指标所反映的

## 3 评价结果分析

依据多层次、多目标的评价原则, 利用上述8个指标进行农业水资源利用效率综合评价, 为进一步掌握这些指标所表征的综合利用效率的方向和它们之间的关系, 首先对这些指标进行相关性分析(表1)。分析结果显示: 指标之间的相关性都不大, 只有水资源潜力利用率和耗水生产效率的相关性达到了0.9, 多数指标不存在显著性相关, 这表明评价指标存在相对独立性; 灌溉效率、农田水分利用率与其它指标存在负相关关系, 反映了这些指标评价目标的不一致性和不相容性, 也是用投影寻踪方法进行综合评价的必要性和优势。

正方向代表农业水资源综合利用效率的方向, 即投影值越大表示农业水资源综合利用效率越高, 按投影值的大小把甘肃省农业水资源综合利用效率分为极高、较高、中等、较低和极低5级, 得到农业水资源综合利用效率空间分级图(图1)。

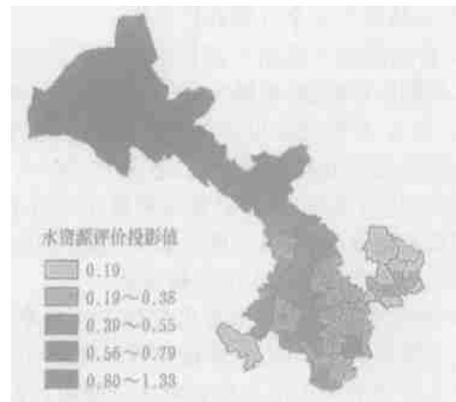


图1 农业水资源利用效率评价指标投影值

Fig 1 Projection index values of agricultural water use efficiency

从图1中可以看出, 农业水资源综合利用效率极高的区域主要集中在疏列河灌区的酒泉地区、嘉峪关市以及黑河平川灌区的高台、临泽和张掖市, 该区光热资源丰富, 农业水资源能满足作物生长需求, 土壤条件好, 光、热、水、土资源协调一致, 也是甘肃省粮食高产区。

农业水资源利用效率较高的区域以河西山区和石羊河内流灌区为主, 与极高区相比, 由于受到温度或水分等农业生产条件的限制, 该区农业水资源综合利用效率也随之降低。

农业水资源综合利用效率处于中等水平区域集中在白银、兰州、临夏和甘南州等地区, 该区农业生产条件与作物产量都处于中等水平。

农业水资源综合利用效率较低和极低的区域均处于陇东、陇中和陇南黄土高原地区, 这些地区热量资源较丰富, 但光照条件、农业水资源和土壤条件都较差, 作物产量也处于较低的水平。因此, 农业水资源利用效率也较低(图1)。

从上述农业水资源利用效率分级可以看出每一级别农业水资源利用效率在空间上相对连片, 依据空间连续性原则, 分别以极高、较高、中等级别为主形成3个农业水资源利用效率区, 较低和极低级别合并形成一个分区, 将甘肃省81个县域单元划分为4个农业水资源利

用效率区, 分别为农业水资源综合利用极高、较高、中等和较低效率区(图2), 各区水资源评价指标值和投影值如表2。



图2 农业水资源利用效率分区

Fig 2 Regions of agricultural water use efficiency

表2 各分区农业水资源利用效率评价指标值和投影值

Table 2 Evaluation indexes of agricultural water use efficiency and projection index values of subareas

分区	降水效率	灌溉效率	总水分生产效率	耗水生产效率	水资源潜力利用率	耗需水比率	水分盈亏率	水分利用率	评价投影值
I	1.9864	0.5258	0.5117	1.7723	0.5533	0.9871	2.3361	0.4759	1.1717
II	0.4571	0.8149	0.5850	1.2570	0.5029	0.9212	1.0297	0.9167	0.6495
III	0.1024	4.1838	0.5917	0.8186	0.3076	0.8875	0.6697	0.9455	0.4573
IV	0.0531	12.6925	0.5069	0.7311	0.2752	0.6986	0.3904	1.0000	0.2516

从表2可以看出, 从I~IV区评价投影值依次减小, 表明农业水资源综合利用效率依次降低。同样, 降水效率、耗水生产效率、农业水资源潜力利用率、农田耗需水比率、农田水分盈亏率等5项指标评价价值依次减小, 表明农业水资源综合利用效率减小。灌溉效率与水分利用率评价指标值依次增加, 而这两个指标评价目标与农业水资源综合利用效率方向相反, 这反映了利用遗传投影寻踪方法对农业资源利用效率综合评价的结果与单项评价指标表征的结果是一致的。

### 5 结论与讨论

通过遗传投影寻踪方法对甘肃省81个县域农业水资源利用效率进行综合评价, 并利用指标投影值 $Z(i)$ 进行了农业水资源利用效率分区。结论如下:

1) 利用最佳投影方向可以科学地确定各评价指标的权重, 给出了各评价指标投影的方向和大小, 客观的反映了各评价指标的重要性和方向性。

2) 把多维评价指标综合成一维投影指标, 利用投影指标值 $Z(i)$ 的大小可以对农业水资源利用效率进行统一评价, 评价结果客观、准确, 与实际农业水资源利用效率相符。

3) 依据农业水资源利用效率综合评价结果, 把甘肃省81个县域划分为极高、较高、中等和极低4个农业

水资源利用区。

### 【参 考 文 献】

[1] 李远华, 赵金河, 张思菊, 等. 水分生产率计算方法及应用 [EB/OL]. <http://www.cws.net.cn/Journal/cwr/200108/33.htm>

[2] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 关于提高灌溉水利用率的认识 [EB]. <http://www.watsave.com/nceibs/books/0001/>, 见水利部农村水利司, 中国灌溉排水发展中心主编. 农业节水探索

[3] 杨晓华, 杨志峰, 郦建强. 区域水资源潜力综合评价的遗传投影寻踪方法[J]. 自然科学进展, 2003, 13(5): 554- 558

[4] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 水质综合评价的投影寻踪模型[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4): 431- 434

[5] 王顺久, 侯玉, 张欣莉. 流域水资源承载能力的综合评价方法[J]. 水利学报, 2003(1): 88- 92

[6] 金菊良, 魏一鸣. 投影寻踪门限自回归模型在海洋冰情预测中的应用[J]. 海洋预报, 2002, 19(4): 60- 66

[7] 金菊良, 魏一鸣, 付强. 农业生产力综合评价的投影寻踪模型[J]. 农业系统科学与综合研究, 2001, 17(4): 241- 243

[8] 金菊良, 杨晓华, 丁晶. 基于实数编码的加速遗传算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2000, 32(4): 20- 25

[9] 封志明, 郑海霞, 杨艳昭. 基于GIS的甘肃省农业气候资源区域化问题研究[J]. 地理科学, 2004, (4): 444- 451

## Comprehensive evaluation of agricultural water use efficiency based on genetic projection pursuit model

Feng Zhiming<sup>1</sup>, Zheng Haixia<sup>1,2</sup>, Liu Baoqin<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100101, China; 2. Institute of Agricultural Economics, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** A new method, projection pursuit based on genetic algorithm, was used to evaluate agricultural water use efficiency for solving the incompatibility of evaluation indexes of it. Projection pursuit can be used to project high dimensional data to low dimensional space and find the optimum projection vector of data in one-dimensional space, which is helpful to comprehensively evaluate the value and direction of every index in comprehensive evaluation. The projection index value was given by multiplying projection vector by standardization value of evaluation indexes, which can synthesize the characteristics of agricultural water use efficiency and classify agricultural water use efficiency. The method was used to comprehensively evaluate eighty-one county units in Gansu Province, and the results of the value and direction of every index were accorded with the practice. The comprehensive use efficiencies of agricultural water of eighty-one counties were given.

**Key words:** agricultural water use efficiency; comprehensive evaluation; projection pursuit; genetic algorithm