

基于遗传投影寻踪模型的黑河中游地区农业 节水潜力综合评价*

赵西宁^{1,2} 王玉宝^{3**} 马学明⁴

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院 杨凌 712100; 4. 江西省水利规划设计院 南昌 330029)

摘 要 农业节水潜力综合评价是进行节水规划的重要依据。目前, 区域农业节水潜力的定量研究和综合评价研究仍存在不足。为此, 本研究以地处西北内陆的黑河中游地区为研究单元, 以流域统计资料和野外参与式农户调查资料为基础, 借鉴层次分析方法原理, 考虑区域社会经济发展水平、水文水资源状况、农业水资源开发利用、农业节水水平和生态环境对区域农业节水潜力的影响, 建立了区域农业节水潜力综合评价指标体系。并针对各个单项评价指标的不相容问题, 提出基于实码加速遗传投影寻踪的区域农业节水潜力综合评价模型, 利用最佳投影方向判断各指标对综合评价目标的贡献大小和方向, 通过投影指标值大小对黑河中游地区各县(甘州区、民乐县、临泽县、高台县和山丹县)农业节水潜力实现水平进行评价。结果表明: 水利投资占 GDP 比例、渠道防渗面积比和管道输水面积比等指标对区域农业节水潜力的影响较大, 而人均粮食产量、人均水资源拥有量、供水量模数等指标影响较小; 2005 年, 甘州区、民乐县、临泽县、高台县和山丹县的投影值 $Z(i)=(1.366\ 5, 1.170\ 4, 1.239\ 1, 1.259\ 6, 1.158\ 6)$, 故甘州区、高台县和临泽县农业节水技术水平较高, 山丹县和民乐县农业节水技术水平较低, 节水技术应用潜力空间较大。研究结果可为区域节水农业技术持续发展提供科学依据和决策支持。

关键词 投影寻踪模型 农业节水潜力 指标体系 综合评价 黑河中游地区

中图分类号: S274.3 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2014)01-0104-07

Comprehensive evaluation of agricultural water-saving potential in the middle reaches of Hei River using genetic projection pursuit model

ZHAO Xining^{1,2}, WANG Yubao³, MA Xueming⁴

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. Jiangxi Provincial Water Conservancy Planning and Designing Institute, Nanchang 330029, China)

Abstract A comprehensive evaluation of agricultural water-saving potential is the basis for agricultural water planning. Currently, however, insufficiencies of quantitative research have precluded the comprehensive evaluation of regional agricultural water-saving potential. This study therefore focused on agricultural water-saving potential in the middle reaches of Hei River, which is located in the northwest inland of China. Based on the principle of analytical hierarchy, a comprehensive evaluation index system of the regional agricultural water-saving potential was established, which combined a series of statistical data and participatory rural appraisal which took into account the impacts of socio-economic development, hydrology and water resources, agricultural water resources development and utilization, agricultural water-saving level and ecology on regional water-saving potential. Given that the evaluation indexes were incompatible, the projection pursuit model (based on genetic algorithm) was used to evaluate agricultural water-saving potential. The model used the optimum projection vector to evaluate the directional contribution of each index in the

* 国家科技支撑计划项目(2011BAD29B09)和国家自然科学基金项目(50809055)资助

** 通讯作者: 王玉宝, 主要从事农田水土资源高效利用科学研究。E-mail: wyb0406@sina.com

赵西宁, 主要从事农业水土资源高效利用及其效益评价方面的研究。E-mail: xiningz@aliyun.com

收稿日期: 2013-09-17 接受日期: 2013-11-20

comprehensive evaluation system. Projection index value was used to evaluate future achievable agricultural water-saving potential of the district and counties in the study area. The districts/counties included Ganzhou District, Minle County, Linze County, Gaotai County and Shandan County. Results indicated that the index ratios of water conservancy investment to GDP, impermeable channel area and pipeline irrigation area had significant influence on regional agricultural water-saving potential. Then per capita grain yield index, per capita water resources index and water supply modulus index had little influence on regional agricultural water-saving potential. The projected values $[Z(i)]$ for Ganzhou District, Minle County, Linze County, Gaotai County and Shandan County in 2005 were 1.366 5, 1.170 4, 1.239 1, 1.259 6 and 1.158 6, respectively. This showed that agricultural water-saving levels of Ganzhou District, Gaotai and Linze Counties were higher than other counties/districts. These other counties/districts were at a lower level and had large agricultural water-saving potential. This study provided scientific basis and decision-making support for developing regional agricultural water-saving technology.

Keywords Projection pursuit model; Agricultural water-saving potential; Indexes system; Comprehensive evaluation; Middle reaches of Hei River

(Received Sep. 17, 2013; accepted Nov. 20, 2013)

我国是一个水资源十分短缺的国家, 又是一个农业用水大国, 大力发展节水农业技术是确保我国粮食安全、战略水安全和生态安全的重大举措。自“九五”以来, 国家连续将节水农业的相关技术与示范列为重要方向进行持续稳定支持, 已在我国节水农业应用基础研究、节水农业新技术与产品研发、科技成果示范与应用等方面取得重要进展, 但这些项目大多注重节水农业的具体技术和产品以及示范区建设, 对区域农业节水潜力的定量研究和综合评价相对薄弱, 有可能导致节水农业技术的盲目发展和效益不高等问题^[1-2]。农业节水潜力综合评价是进行节水规划的重要依据, 目前对于农业节水潜力的内涵仍没有一个公认的标准, 对节水潜力的评价和计算也没有一致的方法^[3-4]。《全国水资源规划大纲》实施的技术细则中认为节水潜力是以各部门、各行业(或作物)通过综合节水措施所达到的节水指标为参考标准, 现状用水水平与节水指标的差值即为最大可能节水数量。崔远来等^[5]在对灌区渠系进行等效概化基础上, 采用经验公式法进行了不同工况下不同环节灌溉用水效率的分析计算。傅国斌等^[6-7]从作物需水量出发, 考虑有效降水量、地下水、输水损失、田间损失、无效蒸腾等因素后, 构造了理论节水潜力的计算公式。周振民等^[8]依据灰色系统理论, 建立了灰色微分预测模型来估算灌区的节水潜力。罗玉丽等^[9]依据灌区灌溉水的循环转化过程, 分析节水措施在不同尺度上产生的节水效果, 在此基础上提出目前常用节水措施的田间、灌区不同尺度地表水和地下水的节水潜力计算公式。刘路广等^[10]综合考虑取水、耗水和回归水 3 个方面, 提出农业理论节水潜力概念, 并利用水量平衡原理对相应计算方法进行了推导。同时根据不同的节水措施, 提出了农业耗水理论节水潜力、农业回归水理论节水潜力和农业取水理论节水潜力的概念及计算方法。裴源生等^[11]通过广义水资源配置模型和平

原区水循环模型的有机耦合, 分析了宁夏的真实节水潜力——耗水节约量, 并建立了宁夏平原区取用水与耗水节水两者之间的定量化关系。农业节水潜力综合评价就是根据综合评价指标, 通过所建立的模型, 对区域农业节水潜力进行评价。农业节水潜力影响因素众多, 综合评价也是一个多层次、多目标的复杂系统, 各项指标评价结果都不相容, 单项指标大小很难代表节水农业潜力高低, 综合指数、层次分析和模糊综合评判等方法多是把各个评价指标赋权后得到一个综合数值, 但权重赋予多带有人为因素, 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化评价^[12-13]。本研究针对上述问题, 以地处西北内陆的黑河中游地区张掖市(甘州区、民乐县、临泽县、高台县和山丹县)各区县为例, 在对相关数据资料采集和野外参与式农户调查基础上, 采用层次分析方法原理构建区域农业节水潜力综合评价指标体系, 并采用基于实码加速遗传算法的投影寻踪模型对其潜力进行评价, 以期对区域节水农业技术持续发展提供科学依据和决策支持。

1 基于实码加速遗传算法的投影寻踪模型

投影寻踪模型基本思路是: 把高维数据投影到低维(1~2 维)子空间上, 对于投影到的构形, 采用投影指标函数来衡量投影暴露某种结构的可能性大小, 寻找出使投影指标函数达到最优(即能反映高维数据结构或特征)的投影值, 根据该投影值分析高维数据的结构特征, 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^[14-16]。建模过程包括以下 4 步。

步骤 1: 样本评价指标集的归一化处理。设各指标值样本集为 $\{x^*(i, j) | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p\}$, 其中 $x^*(i, j)$ 为第 i 个样本的第 j 个指标值, n 、 p 分别为样本的个数(样本容量)和指标的数目。为了消除各

指标值量纲和统一各指标值变化范围,采用下式进行极值归一化处理:

对于越大越优的指标:

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

对于越小越优的指标:

$$x(i, j) = \frac{x_{\max}(j) - x^*(i, j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (2)$$

式中, $x_{\max}(j)$ 、 $x_{\min}(j)$ 分别为第 j 个指标值的最大值和最小值, $x(i, j)$ 为指标特征值归一化的序列。

步骤 2: 构造投影指标函数 $Q(a)$ 。投影寻踪聚类分析就是把 p 维数据 $\{x(i, j) | j=1, 2, \dots, p\}$ 合成 1 维 $a = \{a(1), a(2), a(3), \dots, a(p)\}$ 投影方向的投影值。

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(j) x(i, j) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式(3)中, a 为单位长度向量。综合投影指标值时,要求投影值 $z(i)$ 的散布特征应为: 局部投影点尽可能密集, 最好凝聚成若干个团; 整体投影点团之间尽可能散开。投影指标函数可以表达成:

$$Q(a) = Sz \times Dz \quad (4)$$

式中, Sz 为投影值 $z(i)$ 的标准差, Dz 为投影值 $z(i)$ 的局部密度, 即:

$$Sz = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z(i) - E(z)]^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$Dz = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [R - r(i, j)] \times u[R - r(i, j)] \quad (6)$$

式中: $E(z)$ 为序列 $\{z(i) | i=1, 2, \dots, n\}$ 的平均值; R 为局部密度窗口半径, 其选取既要使包含在窗口内的投影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 可以根据试验来确定, 在实际运算中可取 αSz , α 可以取 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; $r(i, j) = |z(i) - z(j)|$ 表示样本之间的距离; $u(t)$ 为一单位阶跃函数, 当 $t \geq 0$ 时, 其值为 1, $t < 0$ 时其函数值为 0。

步骤 3: 优化投影目标函数, 确定最佳投影方向。不同投影方向反映不同数据结构特征, 最佳投影方向就是最大可能地暴露高维数据某类特征结构的投影方向。当各指标值的样本集给定时, 投影指标函数 $Q(a)$ 只随着投影方向的变化而变化, 可通过求解投影指标函数最大化来估计最佳投影方向。

$$\text{最大化目标函数: } \max[Q(a)] = SzDz \quad (7)$$

$$\text{约束条件: } s.t. \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1 \quad (0 \leq a(j) \leq 1)$$

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实码加速遗传算法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。目标函数达到极值时得到最佳投影方向 a 。

步骤 4: 建立区域农业节水潜力综合评价模型。把最佳投影方向 a 代入式(3)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 区域农业节水潜力综合评价指标体系

建立合理的综合评价指标体系, 可为客观、公正地评价区域农业节水潜力提供科学依据。目前农业节水潜力的计算主要是从具体节水灌溉工程入手, 多针对某单一节水技术或节水方案或某一具体用水环节进行, 而对于区域尺度上农业节水潜力的评价缺乏综合的、有机的分析与集成。区域农业节水潜力受到区域社会经济发展、水文水资源、农业水资源开发利用、农业节水水平和区域生态环境等因素影响, 这些因素共同决定了农业用水规模大小和节水水平发展高低状况等^[17-18]。综合考虑上述 5 个方面因素对区域农业节水潜力的影响, 遵循层次分析方法原理^[19], 将区域农业节水潜力评价指标体系分为 3 个层次: 第 1 层为目标层, 即区域农业节水潜力实现水平(A); 第 2 层为准则层, 包括社会经济发展水平(B_1)、水文水资源状况(B_2)、农业水资源开发利用状况(B_3)、农业节水水平(B_4)和区域生态环境(B_5); 第 3 层为具体指标层 $C_i (i=1, 2, \dots, m)$ 。遵循系统、科学、实用及简明的原则, 通过理论分析和频率统计, 提出若干项具体评价指标(表 1)。由于不同区域在社会经济发展水平和生态环境等方面存在较大差异, 尚难建立起对各区域都适用、统一的农业节水潜力综合效益评价指标体系, 表 1 仅是与区域农业节水潜力影响因素有关的相对完整的指标体系, 对某一具体区域评价时, 可结合具体情况和统计资料的现势性及易得性在这些评价指标中选取, 组成具体的农业节水潜力综合评价指标体系。

3 黑河中游地区农业节水潜力综合评价

黑河是我国西北地区第二大内陆河, 发源于祁连山, 跨青海、甘肃、内蒙古 3 省(区), 流域面积 12.83 万 km^2 。黑河中游地区包括张掖市的甘州区、民乐县、临泽县、高台县和山丹县, 土地面积 2.56 万 km^2 , 该区光热资源丰富, 但干旱严重, 多年平均降水量仅有 140 mm, 年蒸发能力达 1 410 mm, 水资源是限制该区经济发展的主要因素。为了实现黑

表 1 区域农业节水潜力综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of regional agricultural water-saving potential

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer
区域农业节水潜力实现水平 Realizable level of regional agricultural water-saving potential (A)	社会经济 发展水平 Socio-economic development level (B ₁)	人均粮食产量(区域粮总产量/人口) Per capita grain yield (regional grain output / population) (C ₁) 农民人均年纯收入 Annual per capita net income of farmers (C ₂) 人均农业产值(区域农业产值/人口) Per capita agricultural output value (regional agricultural output value / population) (C ₃) 人均 GDP(区域 GDP/人口) GDP per capita (regional GDP / population) (C ₄) 恩格尔系数 Engel coefficient (C ₅) 耕地率(区域耕地面积/土地面积) Arable rate (regional arable land area / total land area) (C ₆) 非农业经济比重(区域非农业 GDP/GDP) Proportion of non-agricultural economy (regional non-agricultural GDP / GDP) (C ₇) 单位耕地面积农业机械拥有量(农业机械总量/耕地面积) Agricultural machinery per unit area of arable land (total amount of agricultural machinery / arable area) (C ₈) 水利总投入占 GDP 比例(区域水利总投资/GDP) Ratio of water conservancy investment to GDP (regional total investment in water conservancy / GDP) (C ₉)
	水文水资源 Hydrology and water resources (B ₂)	人均水资源拥有量(区域水资源总量/人口) Per capita water resources (regional water resources volume / population) (C ₁₀) 水资源开发利用率(区域年供水量/年均水资源量) Ratio of water resources development and utilization (regional annual water supply / average amount of water resources) (C ₁₁) 地表水开发利用程度(区域地表水供水量/年均地表水资源量) Degree of development and utilization of surface water (regional annual surface water supply / average annual amount of water resources) (C ₁₂) 地下水开发利用程度(地下水开采量/地下水允许开采量) Extent of groundwater exploitation (groundwater extraction amount / groundwater allowable exploitation amount) (C ₁₃) 单位耕地面积水资源量(区域水资源总量/耕地面积) Water resources per unit area of arable land (amount of regional water resources / arable area) (C ₁₄) 灌溉水质达标率(达标水体总量/水资源量) Irrigation water qualification rate (total amount of water meeting the quality standards / amount of water resources) (C ₁₅) 供水量模数(总供水量/土地面积) Water supply modulus (total water supply / land area) (C ₁₆) 河流下游径流量占总径流量百分比(下游径流量/总径流量) Percentage of downstream river runoff to total runoff (downstream runoff / total runoff) (C ₁₇) 地下水矿化度 Groundwater salinity (C ₁₈)
	农业水资源开发利用 Development and utilization of agricultural water resources (B ₃)	农业用水比例(农业供水/总供水量) Ratio of agricultural water use (agricultural water supply / total water supply) (C ₁₉) 耕地灌溉率(农田灌溉面积/耕地面积) Ratio of irrigation farmland (irrigation area of farmland / arable area) (C ₂₀) 农田灌溉用水定额(农田灌溉用水总量/灌溉面积) Irrigation water quota of farmland (irrigation water withdraw of farmland / irrigation area) (C ₂₁) 单方水农业产值(农业总产值/农业用水量) Agricultural output value per unit of water (agricultural output value / agricultural water withdraw) (C ₂₂) 水分利用效率 Water use efficiency (C ₂₃) 灌溉水利用系数 Irrigation water use coefficient (C ₂₄) 灌溉配套率(有效灌溉面积/农田灌溉面积) Irrigation matching rate (effective irrigation area / irrigation area of farmland) (C ₂₅)
	农业节水水平 Level of agricultural water-saving (B ₄)	高耗水作物种植面积比(高耗水作物种植面积/种植面积) Ratio of sown area of high water consumption crop (sown area of high water consumption crop / sown area) (C ₂₆) 农民用水协会数 Number of Farmer Water Users Association (C ₂₇) 抗旱节水优良品种种植面积比(优良品种种植面积/播种总面积) Ratio of planted area of drought-resistant & water-saving crop varieties (sown area of superior varieties / sown area) (C ₂₈) 保护性耕作面积比(保护性耕作面积/耕地面积) Ratio of conservation tillage area (conservation tillage area / arable area) (C ₂₉) 覆盖保墒面积比[(秸秆+薄膜)面积/耕地面积] Ratio of covering moisture conservation area [(straw + film) covering area / arable area] (C ₃₀) 化学保墒面积比(化学保墒措施实施面积/耕地面积) Ratio of chemical moisture conservation area (area of chemical moisture conservation / arable area) (C ₃₁) 渠道防渗面积比(渠道防渗面积/灌溉面积) Ratio of channels impermeable area (channel seepage area / irrigated area) (C ₃₂) 管道输水面积比(管道输水面积/灌溉总面积) Ratio of pipeline irrigation area (pipeline irrigation area / irrigated area) (C ₃₃) 喷、微灌溉面积比[(喷灌+微灌)面积/灌溉面积] Ratio of spray, micro irrigation area [(sprinkler + micro irrigation) area / irrigated area] (C ₃₄) 集雨补灌面积比(集雨灌溉面积/灌溉面积) Ratio of area of rainwater harvesting for supplemental irrigation (area of rainwater harvesting for supplemental irrigation / irrigated area) (C ₃₅)
	生态环境 Ecology (B ₅)	水土流失治理面积比(水土流失治理面积/水土流失总面积) Ratio of soil erosion controlled area (soil erosion controlled area / area of soil erosion) (C ₃₆) 盐碱化耕地治理面积比(盐碱耕地治理面积/盐碱耕地总面积) Ratio of salinization controlled area (salinization controlled area / salinization area of cultivated land) (C ₃₇) 荒漠化率(荒漠化土地面积/土地面积) Desertification rate (desertification land area / land area) (C ₃₈) 草场退化率(草场退化面积/草场总面积) Ratio of grassland degradation (grassland degradation area / grassland area) (C ₃₉) 植被覆盖率(植被面积/土地面积) Ratio of vegetation cover (vegetation area / land area) (C ₄₀) 河流断流机率(年发生断流天数/全年天数) Rivers cutout probability (number of days of rivers cutout / 365) (C ₄₁) 载畜量变化率(规划年与基准年载畜量之差/基准年载畜量) Change rate of stocking (annual stocking difference between the planned and the base year / base year stocking) (C ₄₂) 生态用水比例(生态用水总量/用水总量) Ratio of ecological water (ecological water withdraw / water withdraw) (C ₄₃)

指标层中各指标后的括号内内容为指标的计算方法。In the index layer, in the parentheses is calculation methods of the indexes.

河流域综合治理目标与张掖市社会经济持续发展的双赢,水利部结合全国节水型社会建设进程实践要求,将黑河中游的张掖市作为全国首个节水型社会建设试点,经过多年节水型社会建设的实施,节水

农业技术取得了一定进步,各区县单项指标都有较大程度提高。考虑到黑河中游地区实际情况和数据资料的限制,本研究选择 16 项指标用于评价该区的农业节水潜力(表 2)。

表 2 黑河中游地区不同年份农业节水潜力综合评价指标特征值

Table 2 Comprehensive evaluation index eigenvalues of agricultural water-saving potential in the middle reaches of Hei River in different years

评价指标 Evaluation index	甘州 Ganzhou			民乐 Minle			临泽 Linze			高台 Gaotai			山丹 Shandan		
	1999	2002	2005	1999	2002	2005	1999	2002	2005	1999	2002	2005	1999	2002	2005
C_1 (kg·capita ⁻¹)	594	627	684	605	866	931	789	903	993	536	584	955	290	545	669
C_2 (Yuan)	2 848	3 255	3 947	2 608	2 765	3 156	2 722	3 144	3 821	2 718	3 111	3 782	2 709	3 001	3 658
C_4 (Yuan)	4 960	6 722	10 083	3 559	4 123	5 355	4 843	6 366	9 394	4 389	5 718	8 485	4 900	6 135	8 175
C_9 (%)	3.52	9.59	3.47	2.77	6.34	1.79	1.63	9.74	2.86	1.52	11.38	2.10	0.21	2.91	1.19
C_{10} (m ³ ·capita ⁻¹)	3 349	3314	3 231	1 813	1 806	1 846	1 766	1 742	1 747	746	746	754	669	683	698
C_{16} (10 ⁴ m ³ ·km ⁻²)	21.77	21.63	21.7	9.54	9.34	6.89	7.91	7.98	17.81	19.39	19.06	18.61	2.50	2.51	2.49
C_{19} (%)	99.74	98.21	92.69	98.82	97.62	97.17	98.14	96.42	90.11	98.84	98.13	97.66	97.93	95.68	92.59
C_{21} (m ³ ·hm ⁻²)	11 910	11 040	10 275	12 420	11 535	10 635	12 210	10 785	10 410	12 255	11 310	10 485	12 465	11 805	10 710
C_{23} (kg·m ⁻³)	0.86	1.01	1.15	0.97	1.21	1.06	0.95	1.02	1.16	0.89	0.99	1.03	0.99	1.23	1.11
C_{24} (%)	0.44	0.53	0.55	0.43	0.52	0.52	0.42	0.52	0.54	0.41	0.50	0.53	0.42	0.51	0.51
C_{25} (%)	93.66	93.81	90.64	93.48	93.28	92.43	90.76	91.28	91.50	81.12	80.69	80.69	96.30	96.3	96.30
C_{32} (%)	58.90	67.48	65.40	51.68	52.09	52.03	24.08	28.26	31.43	16.93	5.85	14.30	22.76	24.22	25.03
C_{33} (%)	2.91	8.96	15.72	2.18	2.46	4.54	1.36	6.11	14.05	2.82	3.48	21.29	2.44	2.72	6.79
C_{34} (%)	0.56	1.48	1.66	0.57	1.17	1.36	0.09	1.01	2.48	0.59	1.00	1	0.28	0.45	0.44
C_{37} (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	18.44	0	0	58.35	0	0	35.85
C_{43} (%)	0	0.26	3.02	0	0.20	0	0	0.87	9.35	0	0.40	0.33	0	0.05	0.03

利用基于实码加速遗传算法的投影寻踪模型对张掖地区农业节水潜力进行综合评价,借助 MATLAB 7.0 环境编制程序来完成模型的实现。表 2 为甘州区、民乐县、临泽县、高台县和山丹县不同年份的农业节水潜力评价指标样本,每个样本有 16 个指标,属于 16 维数据。实码加速遗传计算过程中选定父代初始种群规模为 400,交叉概率为 $p_c=0.80$,变异概率 $p_m=0.80$,优秀个体数目选定为 25 个,加速次数为 20 次,得出最佳投影方向各分量值为: $\alpha = (0.104\ 5, 0.291\ 7, 0.217\ 8, 0.367\ 3, 0.132\ 3, 0.140\ 6, 0.188\ 1, 0.263\ 8, 0.275\ 6, 0.253\ 4, 0.269\ 2, 0.321\ 3, 0.316\ 6, 0.295\ 7, 0.223\ 4, 0.161\ 1)$ 。最佳投影方向各分量值 α 代表了相应各指标的权重,实际上反映各评价指标对该地区农业节水潜力的贡献程度。从投影值大小可看出农民人均年纯收入、人均 GDP、水利投资占 GDP 比例、农田灌溉用水定额、单方水粮食产量、灌溉水利用效率、渠道防渗面积比、管道输水面积比、喷微灌灌溉面积比对区域农业节水潜力的影响较大。随着黑河中游地区社会经济发展和节水型社会建设试点方案实施,农民收入不断增加,对农业节水投入能力也不断增加,节水农业技术措施发展迅速,使农田灌溉用水定额、单方水粮食产

量、灌溉水利用效率和渠道防渗面积比等指标随着农业节水技术实施发生明显变化,这与黑河中游地区农业节水发展实际情况相吻合。人均粮食产量、人均水资源拥有量、供水量模数、农业用水比例、灌溉保证率对于农业节水潜力贡献程度较小,因为黑河中游地区农业水资源量十分有限,导致中游地区近年来农业灌溉面积变化幅度不大,限制了其农业种植的规模。另外,中游地区各用水部门进行了结构调整,但农业用水仍占有很大比例,变化幅度较小,对区域农业节水潜力影响不显著。生态环境逐渐趋向于良性发展,也从侧面表明黑河中游地区农业节水向着持续健康方向发展,所得投影方向值也体现了生态环境建设在农业节水潜力开发中的重要性。

根据计算的最大投影方向,把农业节水潜力评价样本代入式(3),得到各区县 2005 年、2002 年、1999 年的投影值 $z(i)$,其计算值为:甘州区 $z(i)=(1.366\ 5, 1.013\ 4, 0.724\ 1)$;民乐县 $z(i)=(1.170\ 4, 0.951\ 4, 0.647\ 3)$;临泽县 $z(i)=(1.239\ 1, 1.039\ 4, 0.709\ 9)$;高台县 $z(i)=(1.259\ 6, 0.887\ 5, 0.636\ 5)$;山丹县 $z(i)=(1.158\ 6, 0.879\ 5, 0.612\ 2)$ 。投影值 $z(i)$ 大小体现了各区县不同水平年节水潜力的实现水平,

也反映出农业节水技术发展现状及其节水潜力存在的空间大小(图1)。从图1可以看出, 各区县从1999年到2005年农业节水潜力实现水平都显著提高, 呈逐年增长趋势。1999年农业节水潜力实现水平为甘州区>临泽县>民乐县>高台县>山丹县; 2002年为临泽县>甘州区>民乐县>高台县>山丹县; 2005年为甘州区>高台县>临泽县>民乐县>山丹县。总体分析可知, 黑河中游地区各区县农业节水技术发展具有一定规模, 甘州区、高台县和临泽县节水农业技术发展水平较高, 民乐县和山丹县较低, 从侧面也反映出山丹县和民乐县农业节水技术应用潜力较大, 需要加大农业节水技术的实施力度, 进一步挖掘其节水潜力。基于实码加速遗传算法的投影寻踪模型对区域农业节水潜力的综合评价结果客观、准确, 适用性强, 与各区县农业节水技术发展实际情况基本相符, 可为区域节水农业技术持续发展提供科学依据和决策支持。

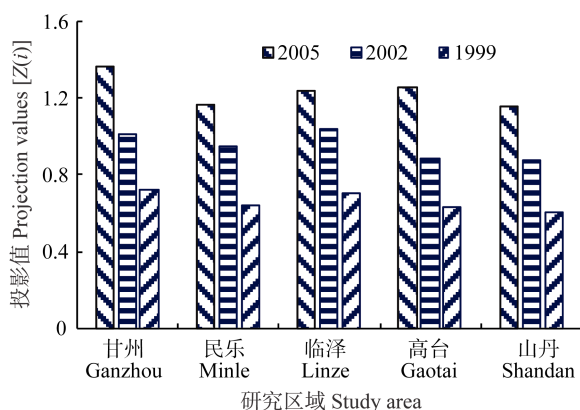


图1 研究区域各区县不同水平年投影值 $z(i)$

Fig. 1 Projected values $z(i)$ of different counties in the study area in different years

4 结论

以黑河中游地区统计资料和野外参与式农户调查资料为基础, 借鉴层次分析法原理, 考虑区域社会经济发展水平、水文水资源状况、农业水资源开发利用状况、农业节水水平和生态环境对区域农业节水潜力的影响, 建立了区域农业节水潜力综合评价指标体系。

将实码加速遗传算法与投影寻踪模型相结合, 建立了基于遗传投影寻踪的区域农业节水潜力综合评价模型, 解决了高维数据全局寻优问题。利用最佳投影方向可以科学地确定各评价指标权重, 给出了农业节水潜力各个评价指标投影方向和大小, 客观反映了各指标对综合评价目标的贡献程度和方向。

利用投影指标值大小对黑河中游地区各区县(甘州区、民乐县、临泽县、高台县和山丹县)的农业

节水潜力进行评价。甘州区、高台县和临泽县农业节水技术发展水平较高, 民乐县和山丹县农业节水技术发展水平较低, 农业节水潜力较大。评价结果客观、准确, 适用性强, 与各区县农业节水技术发展实际情况基本相符。

参考文献

- [1] 吴普特, 冯浩, 牛文全, 等. 现代节水农业技术发展趋势与未来研发重点[J]. 中国工程科学, 2007, 9(2): 12-18
Wu P T, Feng H, Niu W Q, et al. Technical trend and R&D focus of modern water-saving agriculture[J]. Engineering Science, 2007, 9(2): 12-18
- [2] 康绍忠, 胡笑涛, 蔡焕杰. 现代农业与生态节水的理论创新及研究重点[J]. 水利学报, 2004(12): 1-7
Kang S Z, Hu X T, Cai H J. New ideas and development tendency of theory for water saving in modern agriculture and ecology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(12): 1-7
- [3] 彭致功, 刘钰, 许迪, 等. 基于RS数据和GIS方法估算区域作物节水潜力[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 8-12
Peng Z G, Liu Y, Xu D, et al. Application of RS and GIS technique for water-saving potential estimation of regional crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(7): 8-12
- [4] 谢先红, 崔远来. 灌溉水利用效率随尺度变化规律分布式模拟[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 681-689
Xie X L, Cui Y L. Distributed hydrological modeling of irrigation water use efficiency at different spatial scales[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(5): 681-689
- [5] 崔远来, 谭芳, 郑传举. 不同环节灌溉用水效率及节水潜力分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 788-794
Cui Y L, Tan F, Zheng C J. Analysis of irrigation efficiency and water saving potential at different scales[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 788-794
- [6] 傅国斌, 于静洁, 刘昌明, 等. 灌区节水潜力估算的方法及应用[J]. 灌溉排水, 2001, 20(2): 24-28
Fu G B, Yu J J, Liu C M, et al. Estimation of water-saving potential in an irrigation district[J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(2): 24-28
- [7] 傅国斌, 李丽娟, 于静洁, 等. 内蒙古河套灌区节水潜力的估算[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 54-58
Fu G B, Li L J, Yu J J, et al. Estimation of water-saving potential in the Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(1): 54-58
- [8] 周振民, 赵红菲. 灰色系统理论在节水潜力估算中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2008(4): 54-56
Zhou Z M, Zhao H F. Gray theory in water-saving potential evaluation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(4): 54-56
- [9] 罗玉丽, 黄介生, 张会敏, 等. 不同尺度节水潜力计算方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(9): 8-11
Luo Y L, Huang J S, Zhang H M, et al. Research on how to calculate water-saving potential of different scales[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(9): 8-11
- [10] 刘路广, 崔远来, 王建鹏. 基于水量平衡的农业节水潜力

- 计算新方法[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 696–702
- Liu L G, Cui Y L, Wang J P. New calculation method for water-saving potential in agriculture based on water balance principle[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(5): 696–702
- [11] 裴源生, 张金萍, 赵勇. 宁夏灌区节水潜力的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(2): 239–243, 249
- Pei Y S, Zhang J P, Zhao Y. Water saving potential in irrigation area of Ningxia Autonomous Region[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(2): 239–243, 249
- [12] 赵西宁, 吴普特, 冯浩, 等. 黄土高原降雨径流调控利用潜力定量评价模型[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 32–36
- Zhao X N, Wu P T, Feng H, et al. Quantitative potential assessment model of rainfall runoff regulation and utilization in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(3): 32–36
- [13] 马学明, 赵西宁, 冯浩, 等. 塔里木河流域农业节水潜力综合评价体系研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 112–118
- Ma X M, Zhao X N, Feng H, et al. Research on comprehensive evaluation system of agricultural water-saving potential in Tarim River Basin[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3): 112–118
- [14] 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 Z M, Zheng H X, Liu B Q. Comprehensive evaluation of agricultural water use efficiency based on genetic projection pursuit model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(3): 66–70
- [15] 赵小勇, 崔广柏, 付强. 投影寻踪分类模型在小流域治理效益评价中的应用[J]. 水利学报, 2007(10): 436–439
- Zhao X Y, Cui G B, Fu Q. The application of projection pursuit classification model in benefit evaluating harness of small watershed[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007(10): 436–439
- [16] Wang Y B, Wu P T, Zhao X N, et al. Water-saving crop planning using multiple objective chaos particle swarm optimization for sustainable agricultural and soil resources development[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2012, 40(12): 1376–1384
- [17] 来海亮, 汪党献, 吴涤非. 水资源及其开发利用综合评价指标体系[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 96–101
- Lai H L, Wang D X, Wu D F. Comprehensive assessment indicator system for water resources and its development and use[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(1): 96–101
- [18] 王友贞, 施国庆, 王德胜. 区域水资源承载力评价指标体系的研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 597–604
- Wang Y Z, Shi G Q, Wang D S. Study on evaluation index of regional water resources carrying capacity[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(4): 597–604
- [19] 赵西宁, 冯浩, 吴普特, 等. 黄土高原小流域雨水资源化综合效益评价体系研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(3): 354–360
- Zhao X N, Feng H, Wu P T, et al. Study on integrated benefit of rainwater resources utilization in small watershed on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(3): 354–360