

基于 AquaCrop 模型 江苏农业用水效率多因素分析

付梁其¹, 何晓静^{2*}, 李勋章³, 胡腾腾⁴, 刘飞诗⁵

(1. 江苏先行建设有限公司, 江苏 常州 213100; 2. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏 常州 213100;
3. 常州市金坛区水资源管理服务中心, 江苏 常州 213200; 4. 常州市金坛区水利建设管理所, 江苏 常州 213200;
5. 江苏远瀚建筑设计有限公司, 江苏 常州 213000)

摘要: 基于 AquaCrop 作物-水生产力模型, 综合分析研究了影响江苏省农业用水效率的影响因素。在此基础上, 利用模型模拟结果, 估算了不同作物在变化的环境条件下的净灌溉需求和作物需水量。最后, 根据多因素回归模型计算各环境要素对农业用水效率的影响大小。研究发现, 平均湿度、总灌溉面积、滴灌面积、施肥率、土壤表面优良率是最需要注意的五项影响因素。通过关键影响因素分析可知, 改善农业用水效率需要加强农田水利设施建设、减少土壤侵蚀和水资源污染、推行田间节水灌溉技术。同时, 为保证农业用水的高效使用, 在生长季节提供的灌溉用水量不得超过作物的有效用水需求。

关键词: 农业用水效率; AquaCrop 模型; 多因素分析; 江苏省

中图分类号: [TV93] **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2022)09-0043-0006

Multi-factor regression analysis of agricultural water efficiency in Jiangsu Province based on AquaCrop crop-water productivity model

FU Liangqi¹, HE Xiaojing^{2*}, LI Xunzhang³, HU Tengting⁴, LIU Feishi⁵

(1. Jiangsu Xianxing Construction Co., Ltd., Changzhou 213100, China; 2. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau (Changzhou Sub-Bureau), Changzhou 213100, China;
3. Changzhou Jintan District Water Resources Management Service Center, Changzhou 213200, China;
4. Changzhou Jintan District Water Conservancy Construction Management Office, Changzhou 213200, China;
5. Jiangsu Yuanhan Architectural Design Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: Based on the AquaCrop crop-water productivity model, this article comprehensively analyzed the factors affecting agricultural water efficiency in Jiangsu Province. On this basis, using model simulation results, the net irrigation requirements and crop water requirements of different crops under changing environmental conditions were estimated. At last, according to the multi-factor regression model, the impact of various environmental factors on the efficiency of agricultural water use was calculated. The results of the study found that the average humidity, total irrigated area, drip irrigation area, fertilization rate, and soil surface goodness rate were the five most important

收稿日期: 2021-12-15

基金项目: 水利部水科学与水工程重点实验室开放研究基金项目(YK914012); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201401083-2)

作者简介: 付梁其(1990—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水利工程建设和水利规划的研究。E-mail: 870036519@qq.com

通信作者: 何晓静(1991—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事节水灌溉和水资源高效利用的研究。E-mail: 1475123193@qq.com

factors. Through the analysis of key influencing factors, we can see that improving agricultural water efficiency requires strengthening the construction of farmland water conservancy facilities, reducing soil erosion and water pollution, and implementing field water-saving irrigation technologies. Meanwhile, in order to ensure the efficient use of agricultural water, the amount of irrigation water provided during the growing season must not exceed the effective water demand of the crop.

Key words: agricultural water efficiency; AquaCrop model; multi-factor analysis; Jiangsu Province

灌溉和粮食生产用水需求是淡水资源面临的巨大压力之一,资料显示全球农业每年消耗大约70%的淡水量^[1]。另一方面,全球只有大约17%的农田得到灌溉,而这些农田为全世界提供了40%的食物^[2]。在许多发展中国家,不断增长的灌溉需求、不断增加的人口和有限的管理水平对水资源的分配造成了越来越大的压力。为了维持农业的可持续用水和确保粮食安全,需要大幅度提高农业用水效率,需要更有效的灌溉方法,使得农田的用水量减少30%~70%,并使作物产量提高20%~90%^[3]。目前,众多研究聚焦于作物生产用水的有效规划和农田管理方案的优化。如,李英能^[4]指出,提高灌溉用水效率有两种方法:减少输送用水损失,以及改善植物用水。对于这两种途径,学者们开展的改进研究涉及了多种主题,如流程链^[5]、灌溉优化^[6-7]、肥料和种植频率^[8]、灌溉制度^[9]、种植管理^[10]。再如,为实现优化灌溉管理以避免不必要的水资源浪费,许多学者使用作物水生产力模型(粮农组织模型-AquaCrop)估算作物的净灌溉和用水需求^[11]。在此基础上,为了帮助解决人口增长和当地经济发展造成的缺水问题,学者们采用了多种统计分析方法来检验和调查农业水资源的各个方面^[12-14],包括头尾计算法、DEA模型、MALMQUIST指数模型、城市化驱动下的用水变化的完全分解模型、投影寻踪分类模型。

江苏省是我国的农业大省,其农业用水占全省用水总量的一半以上,而农业用水中90%的用水都消耗于农田灌溉。近些年来,江苏省的水利事业和农业发展突飞猛进,江苏省水利厅系统部署水利改革发展方向,对农田水利设施建设、农业用水效率、粮食安全等方面提出更高要求。因此,当前江苏省农业用水利用率的研究对于实施最严格的水资源管理制度、促进水资源的高效利用具有重要的现实意义。根据国内外学者在农业用水方面的丰富理论成果和实践基础,本文综合多方面研究观点,以水资源科学管理为目的,综合多种因素来分析江苏

省的农业用水效率影响因素,从而找出其中的关键因素。

1 材料与方法

1.1 AquaCrop作物-水生产力模型

AquaCrop是由粮农组织土地和水资源司开发的作物水生产力模型。它模拟产量对水的响应,特别适合解决水是作物生产的关键限制因素的情况。AquaCrop执行每日水平衡,包括所有进出水通量(渗透、径流、深层渗透、蒸发和蒸腾)以及土壤含水量的变化。水分亏缺对作物的影响通过4个胁迫响应系数表示,这些系数是根区总可用水(田间持水量和永久枯萎点之间的土壤体积)的消耗分数的函数。这4个系数分别用于叶片生长、气孔导度、冠层衰老和授粉失败,每个系数都对水分胁迫敏感。可收获产量由累积生物量和收获指数(I_H)计算,收获指数在开花开始后随时间增加^[15]。对水的产量响应描述了作物产量与由于生长期降雨或灌溉供水不足而导致的水分胁迫之间的关系。经验生产函数评估对水的产量响应公式如下:

$$(1-Y/Y_x)=K_s(1-ET/ET_x) \quad (1)$$

式中: Y_x 和 Y 分别为最大产量和实际产量, $(1-Y/Y_x)$ 表征相对产量下降; ET_x 和 ET 为最大蒸散量和实际蒸散量, $(1-ET/ET_x)$ 表征相对水分胁迫; K_s 表征相对产量下降和蒸散量相对减少的比例因子。AquaCrop的计算过程:

(i)实际蒸散量(ET)分为土壤蒸发量(E)和作物蒸腾量(Tr):

$$ET = E + Tr \quad (2)$$

ET 分离为土壤蒸发和作物蒸腾作用避免了非生产性消耗性用水(土壤蒸发)的混杂效应。这一点很重要,尤其是当季节早期地面覆盖不完整或由于种植稀疏时。

(ii)最终产量 Y 转化为生物量(B)和收获指数:

$$Y = I_H(B) \quad (3)$$

上式将产量分为生物量和收获指数,可以将相

应的功能关系划分为对环境条件的响应。它们的分离避免了水分胁迫对 B 和 I_{th} 的混杂影响。 B 由下式确定:

$$B = P_w \sum Tr \quad (4)$$

式中: Tr 为作物蒸腾作用; P_w 为水生产力参数。

要运行 AquaCrop, 必须收集 4 个主要模型域的输入数据, 即气候、土壤、作物和管理。在图 1 中总结了模型结构、输入参数和主要处理步骤的概述。AquaCrop 与其他作物模型相比, 其特色在于: 聚焦

于水; 使用冠层覆盖代替叶面积指数; 使用针对大气蒸发需求和 CO_2 浓度标准化的水生产力值, 使模型具有对不同地点、季节和气候(包括未来气候情景)的扩展外推能力; 参数数量相对较少; 输入数据只需要明确的和最直观的参数和变量; 完善的用户界面; 在准确性、简单性和稳健性之间取得了相当大的平衡; 适用于现有的各种农业系统; 该模型从生理学和农艺学的角度强调了作物生产力和对缺水反应的基本过程。

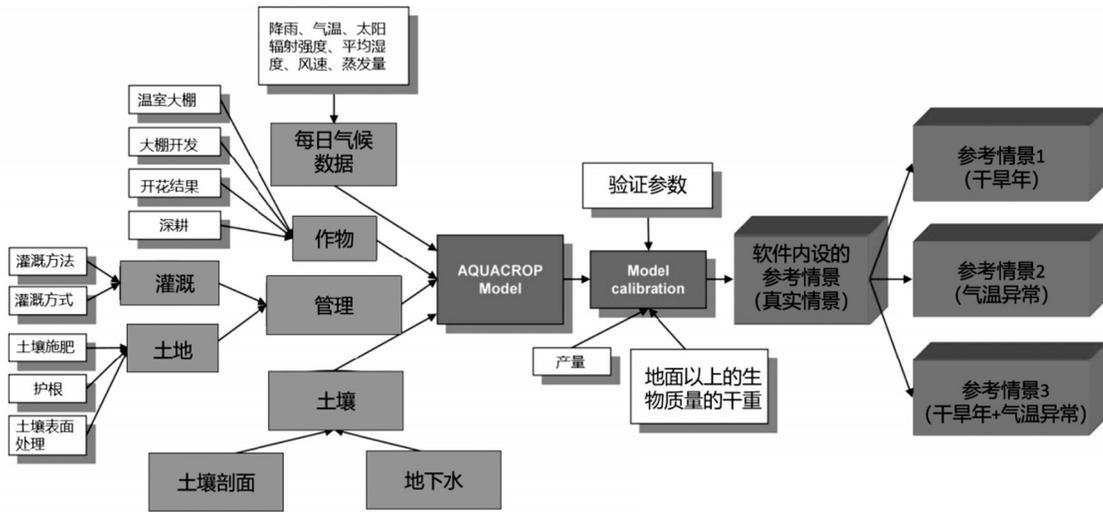


图 1 AquaCrop 模型结构、输入参数和主要处理步骤概述

1.2 江苏省农业用水多因素回归分析

在 AquaCrop 模型的基础上, 本研究可获得江苏省农业水资源利用受到的资源因素的影响。为了进一步探究其影响因素的驱动方式, 本文引入了多因素回归分析方法, 从而解释影响因素之间的关系。农业灌溉系统是一个多要素的复杂系统, 基于此, 本文从实地调研和统计资料查找出发, 全面考虑了影响江苏省农业用水的主要因素, 选取了降雨 (x_1)、气温 (x_2)、辐射强度 (x_3)、平均湿度 (x_4)、风速 (x_5)、蒸发强度 (x_6)、温室面积 (x_7)、耕地面积 (x_8)、总灌溉面积 (x_9)、滴灌面积 (x_{10})、施肥率 (x_{11})、休整土地面积 (x_{12})、土壤表面优良率 (x_{13})、地下水量 (x_{14}) 这 14 个可能影响农业用水效率的因素。多因素回归分析研究的技术路线为: 主成分分析以消除变量之间的强关联性 → 形成新的变量群(无多重共线性的影响) → 通过线性变换使新变量包含旧信息 → 形成多因素回归方程。

在本文中, 将 x_1 至 x_{14} 作为影响因素变量指标(初始变量), 然后, 利用下式对新变量数据进行标

准化处理:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sqrt{\text{var}(x_j)}} \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

式中: \bar{x}_j 是第 j 个变量的平均值; $\sqrt{\text{var}(x_j)}$ 是第 j 个变量的标准差。

将 z_1 至 z_m 作为新变量指标, 如下所示:

$$\begin{cases} z_1 = k_{11}x_1 + k_{12}x_2 + \dots + k_{1p}x_{14} \\ z_2 = k_{21}x_1 + k_{22}x_2 + \dots + k_{2p}x_{14} \\ \vdots \\ z_m = k_{m1}x_1 + k_{m2}x_2 + \dots + k_{mp}x_{14} \end{cases} \quad (6)$$

根据主成分分析方法, 新变量 z_1 至 z_m 分别成为初始变量的第 1, 第 2, ... 第 m 主成分。所得的标准化数据构成标准化矩阵:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1p} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2p} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{np} \end{bmatrix} \quad (7)$$

进一步, 可以得到相关矩阵, 如下式:

$$Z = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $r_{ij}(i, j=1, 2, \dots, p)$ 为变量之间的相关系数, $r_{ij}=r_{ji}$, 其计算公式为:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (z_{ki} - \bar{z}_i)(z_{kj} - \bar{z}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (z_{ki} - \bar{z}_i)^2 \sum_{k=1}^n (z_{kj} - \bar{z}_j)^2}} \quad (9)$$

最后, 根据特征根与标准正交特征向量计算主成分贡献率:

$$\frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} \quad (i=1, 2, \dots, p) \quad (10)$$

式中, λ_i, λ_k 分别是特征向量的特征值。

鉴于此, 在完成了主成分分析之后, 利用 SPSS 软件得到多因素线性回归方程:

$$y = a_1 z_1 + a_2 z_2 + \cdots + a_m z_m \quad (11)$$

2 结果和讨论

本文数据主要选取 2006—2019 年间江苏省的农作物产出数据、水资源数据和气象数据, 并依据水资源公报和统计年鉴等资料得到全省年农业用水量及其影响因素的数据。将自然资源和农作物数据输入 AquaCrop 模型, 本文得到了基于作物需水量的净灌溉水量统计数据, 见图 2。由图 2 可知, 作物需水量是作物在没有水分胁迫的情况下生长所

需的最佳用水量, 在传统的农业中, 必须满足作物的需水量才能获得最大产量。而净灌溉需求是补充根区土壤含水量所需的水量, 代表作物需水量与有效降水量之间的差异。AquaCrop 模型可根据当地气候条件、土壤水力特性和作物特性确定作物每日需水量。依据 AquaCrop 模型结果可知, 江苏省的累积水平衡量是农作物季末主要的进出水通量, 累积水平衡量是作物通过蒸发蒸腾来满足缺水所需的水量。另一方面, AquaCrop 模型的模拟输出结果可为负责农业和水资源管理的当局提供参考以作出最佳的决策(图 3), 本文研究表明, 提高江苏省农业用水效率, 可从以下几个方面努力:

- (1) 尽量减少从地下水、湖泊或河流中抽取水资源;
- (2) 最大限度地减少深层渗透;
- (3) 尽量减少对水资源(地下水、河流、湖泊和泉水)的污染;
- (4) 尽量减少土壤侵蚀;
- (5) 尽量减少燃料消耗和二氧化碳排放量;
- (6) 最大限度地提高可收获的作物产量;
- (7) 最大限度地提高灌溉效率。

利用 SPSS 对 x_1 至 x_{14} 的影响因素变量进行数据的标准化处理, 得到标准化数据见表 1。

根据标准化数据进行主成分分析和多因素回归分析, 计算各类因素的作用强度, 本文得到了江苏省农业用水效率主要影响因素模型输出结果, 见表 2。

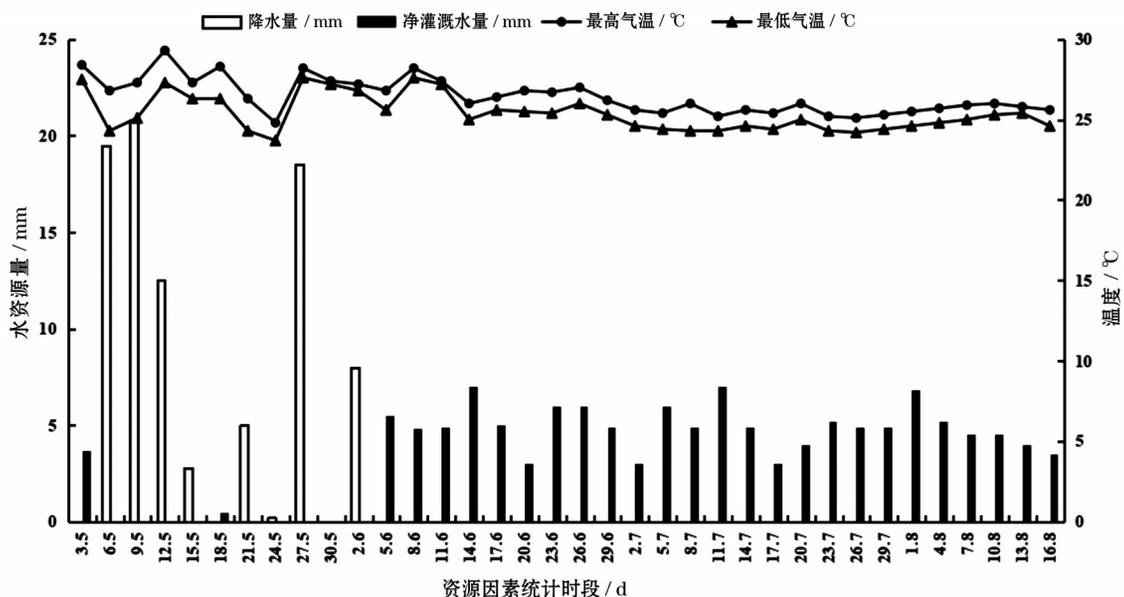


图2 基于作物需水量的净灌溉水量统计数据(以时段内全省农作物产出为据)

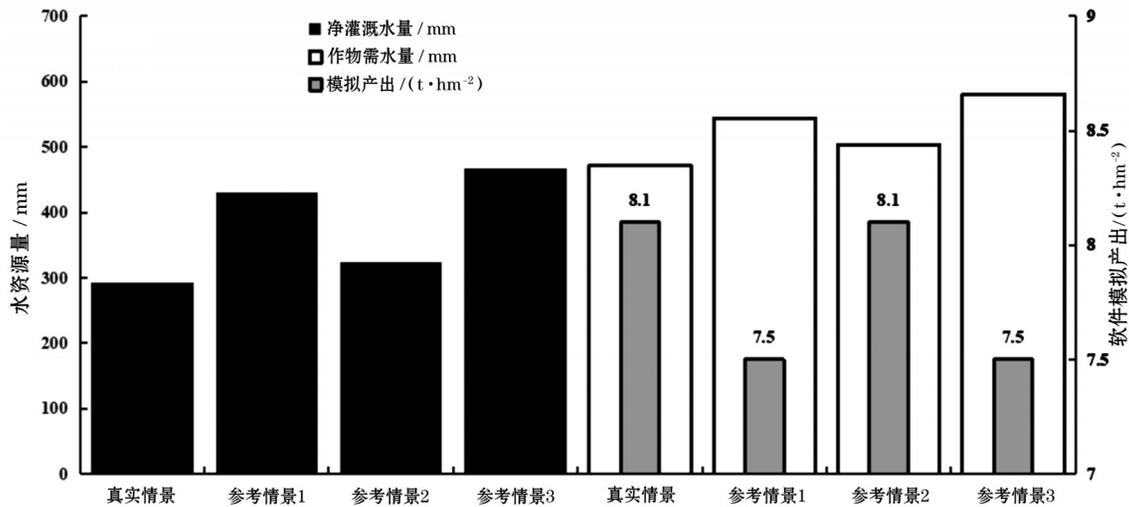


图3 AquaCrop模型模拟输出结果

表1 江苏省农业用水效率影响因素数据标准化

| 年份 | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | x_9 | x_{10} | x_{11} | x_{12} | x_{13} | x_{14} |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2006 | -1.58 | -1.88 | -1.02 | 0.17 | -1.44 | -1.04 | 0.99 | 0.13 | 0.12 | 1.30 | -0.93 | 1.80 | -1.10 | -1.35 |
| 2007 | -1.44 | -1.78 | 0.93 | 1.15 | 1.46 | 1.26 | -1.23 | 0.26 | -1.77 | 1.22 | -0.91 | 1.50 | -1.32 | -0.81 |
| 2008 | -1.58 | -1.33 | 0.91 | -1.04 | 0.11 | 0.54 | -1.05 | 0.43 | 1.40 | 1.55 | 1.39 | 1.61 | -1.11 | -0.50 |
| 2009 | -0.99 | -0.45 | 0.13 | 1.49 | 0.22 | 0.48 | -1.13 | -1.25 | 0.76 | 0.87 | 1.10 | 0.57 | -0.66 | -0.50 |
| 2010 | -0.88 | -0.68 | -1.81 | -0.54 | -1.82 | -1.08 | -0.85 | -1.13 | 0.76 | 0.55 | 1.10 | 0.66 | -0.77 | -0.04 |
| 2011 | -0.45 | -0.36 | -1.77 | -1.13 | -0.78 | -1.07 | -0.55 | 0.48 | 1.25 | 0.63 | 0.89 | 0.23 | -0.23 | 0.04 |
| 2012 | -0.02 | 0.01 | 1.98 | 1.29 | 1.95 | 1.05 | -1.78 | 0.53 | 1.22 | -0.12 | 0.80 | -0.18 | 0.34 | -0.14 |
| 2013 | 0.12 | 0.52 | -1.79 | -1.67 | -1.89 | -1.95 | 0.99 | 0.88 | -0.98 | -0.22 | 0.60 | -0.27 | 1.30 | -0.77 |
| 2014 | 0.16 | 0.57 | 0.77 | 0.18 | 0.66 | 1.61 | 0.23 | -1.30 | -0.68 | -0.65 | 0.44 | -0.60 | 1.40 | -0.52 |
| 2015 | 0.75 | 0.66 | 0.49 | -0.53 | 0.01 | 0.84 | 0.54 | -0.50 | 0.33 | -0.55 | 0.38 | -0.87 | 1.88 | -0.11 |
| 2016 | 0.97 | 0.98 | 1.00 | 0.34 | 0.09 | 0.98 | 1.44 | 1.51 | -0.53 | -1.02 | -1.01 | -0.90 | 0.91 | 0.41 |
| 2017 | 1.38 | 0.88 | -0.54 | -0.34 | -0.16 | -0.73 | 1.21 | 1.20 | -0.78 | -1.07 | -1.00 | -0.98 | 0.60 | 0.67 |
| 2018 | 1.18 | 1.52 | 0.17 | -0.49 | 0.17 | -0.16 | 0.52 | 0.40 | 0.38 | -1.12 | -1.13 | -1.15 | 0.17 | 1.58 |
| 2019 | 1.66 | 1.59 | -0.02 | -0.59 | -0.18 | -0.03 | 0.66 | -1.88 | -1.05 | -1.22 | -1.22 | -1.18 | -0.50 | 1.32 |

用特征值大于1为选取公因子的标准。为了更好地解释因子的含义,采用方差最大化正交旋转法使得因子间方差差异达到最大,前5个主因子在各变量上的载荷见表3。前5个公因子特征值的累积贡献率达到82.82%,所以这些主因子包含了14个指标的信息。

为了对江苏省农业用水效率变化驱动力特征进行科学分类和进一步分析驱动机制的作用机理,就提取的5个主因子采用多因素回归法计算各省份的因子得分,由于公因子对诸变量的方差贡献总和反映了各因子的重要程度,因此以各个主因子对总信息量的贡献率为权数加权,计算综合评价得分

(S),根据表3计算结果得到S的计算公式为:

$$S=0.352z_1+0.217z_2+0.130z_3+0.069z_4+0.061z_5 \quad (12)$$

根据多因素回归分析结果,对江苏省农业用水效率起主要作用的是主因子 z_1 和 z_2 。再从主因子变量 z_1 和初始变量以及其余主成分之间的线性回归关系可以看出,平均湿度(x_4)、总灌溉面积(x_9)、滴灌面积(x_{10})、施肥率(x_{11})、土壤表面优良率(x_{13})是最需要注意的影响因素。因此,针对江苏省农业用水的实际情况,本文建议大力推进工程、管理、技术等多领域的不断强化和改进,通过加大基础水利设施的投入,推行喷滴灌等节水灌溉技术,另一方面,注重农田休整和土壤改良是保证灌溉水高效利用的主要途径。

表2 主因子在各变量上的载荷

| 初始变量 | 主成分 z_1 | 主成分 z_2 | 主成分 z_3 | 主成分 z_4 | 主成分 z_5 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| x_1 | -0.31 | -0.32 | -0.20 | -0.43 | 0.09 |
| x_2 | 0.03 | 0.14 | 0.11 | -0.51 | 0.04 |
| x_3 | 0.30 | 0.33 | 0.75 | -0.15 | 0.03 |
| x_4 | 0.84 | -0.32 | -0.17 | 0.03 | 0.12 |
| x_5 | 0.70 | 0.52 | -0.46 | 0.17 | 0.15 |
| x_6 | 0.73 | 0.13 | 0.23 | 0.01 | -0.14 |
| x_7 | 0.28 | -0.34 | 0.16 | 0.66 | 0.081 |
| x_8 | 0.36 | 0.21 | 0.81 | 0.38 | -0.02 |
| x_9 | -0.87 | 0.36 | 0.19 | -0.02 | -0.07 |
| x_{10} | -0.86 | 0.20 | 0.23 | -0.07 | -0.07 |
| x_{11} | 0.81 | -0.22 | -0.31 | 0.16 | 0.04 |
| x_{12} | 0.50 | 0.62 | -0.55 | 0.33 | -0.21 |
| x_{13} | -0.8 | 0.52 | 0.25 | 0.19 | 0.49 |
| x_{14} | 0.51 | 0.80 | 0.028 | -0.13 | -0.09 |

表3 主因子特征值及贡献率和累积贡献率

| 主因子 | 特征值 | 贡献率/% | 累积贡献率/% |
|-------------|------|-------|---------|
| 第一主因子 z_1 | 5.99 | 35.15 | 35.15 |
| 第二主因子 z_2 | 4.50 | 21.68 | 56.83 |
| 第三主因子 z_3 | 2.88 | 12.99 | 69.82 |
| 第四主因子 z_4 | 1.66 | 6.89 | 76.71 |
| 第五主因子 z_5 | 1.32 | 6.11 | 82.82 |

3 结 论

农业生产的高效用水仍然是世界范围内的主要挑战之一。因此,为了提高农业用水效率,必须优化灌溉管理以避免重要水资源的不必要浪费。为实现这一目标,本文利用 AquaCrop 模拟模型,估算不同作物在变化的环境条件下的净灌溉需水量和作物需水量,然后利用多因素回归模型计算各环境要素对农业用水效率的影响大小,主要结论如下:

(1)通过 AquaCrop 模型分析可知,作物需水量应该被定义为补偿农田蒸发蒸腾损失所需的水量。为保证农业用水的高效使用,在生长季节提供的灌溉用水量不得超过作物的有效用水需求。

(2)针对自然资源影响因素,模型模拟结果建议管理部门应尽量减少从地下水中抽取水资源、减少土壤侵蚀和水资源污染,同时减少燃料消耗和二氧化碳排放量,从而最大限度地提高可收获的作物产量。

(3)江苏省地方农业部门用水强度大,政府应

联合当地居民共同推动工程、管理、技术等领域的不断加强和完善,加大基础水利设施的投入,推行喷滴灌等节水灌溉技术,同时注重农田休整和土壤改良。

(4)农业部门应加强地表水节水技术推广,节约农业水资源,并调整农业种植结构,实现水资源的优化配置。

参考文献:

- [1] HOWELL T. A. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture[J]. *Agron. J.*, 2001(93):281-289.
- [2] KRESOVIĆ B, TAPANAROVA A, TOMIĆ Z, et al. Grain yield and water use efficiency of maize as influenced by different irrigation regimes through sprinkler irrigation under temperate climate [J]. *Agric. Water Manag.*, 2016(169):34-43.
- [3] 王学渊,赵连阁. 中国农业用水效率及影响因素[J]. *农业经济问题*, 2008(3):10-17.
- [4] 李英能. 浅论灌区灌溉水利利用系数[J]. *中国农村水利水电*, 2003(7):23-26.
- [5] HSIAO T C, STEDUTO P, FERERES E. A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture[J]. *Irrig. Sci.*, 2007(25):209-231.
- [6] 陈兆波. 基于水资源高效利用的塔里木河流域农业种植结构优化研究[D].北京:中国农业科学院研究生院, 2008.
- [7] 梁美社. 基于虚拟水土资源贸易的区域农业结构优化研究[D].杨凌:西北农林科技大学, 2011.
- [8] 雷波,刘钰,许迪. 灌区农业灌溉节水潜力估算理论与方法[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1):10-14.
- [9] 周和平,张明义,周琪,等. 新疆地区农业灌溉水利利用系数分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(22):100-107.
- [10] 彭世彰,高晓丽. 提高灌溉水利利用系数的探讨[J]. *中国水利*, 2012(1):33-35.
- [11] WALLACE J S. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production [J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2000(82):105-119.
- [12] MAHER O., Abu-Madi. Farm-level perspectives regarding irrigation water prices in the Tulkarm district, Palestine[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(9):1344-1350.
- [13] 薛薇. 统计与 SPSS 的应用[M].北京:中国人民大学出版社, 2001.
- [14] HUSSAIN I, TURRAL H. Measuring and enhancing the value of agricultural water in irrigated river basins[J]. *Irrig. Sci.*, 2007(25):263-282.
- [15] HENG L K, HSIAO T, EVETT S, et al. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize[J]. *Agron. J.*, 2009(101):488-498.