

李涛, 杨路华, 张玮婷, 等. 基于变权重组合模型的灌溉水有效利用系数预测[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 719-727.
LI T, YANG L H, ZHANG W T, et al. Prediction of irrigation water effective utilization coefficient based on variable weight combination model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 719-727. (in Chinese)

基于变权重组合模型的灌溉水有效利用系数预测

李涛¹, 杨路华¹, 张玮婷¹, 王妍², 高立川²

(1. 天津农学院水利工程学院, 天津 300392; 2. 滦平县水务局, 河北 滦平 068250)

摘要:通过逐步回归法分析影响灌溉水有效利用系数各因素的重要程度, 筛选出节水灌溉面积为影响灌溉水有效利用系数的关键因素。考虑关键因素与时间序列两方面, 基于逐步回归法、GM(1,1) 模型和 Logistic 生长模型构建变权重组合模型。变权重组合模型的预测精度优于各单项模型, 模拟效果与实际符合度高, 适用于灌溉水有效利用系数的预测。最后采用变权重组合模型对广东省 2023—2035 年灌溉水有效利用系数进行预测分析。2023—2035 年广东省灌溉水有效系数逐年提高, 其中 2035 年预测值达到 0.679 2, 高于全国绝大多数灌溉水有效利用系数的现状值。变权重组合模型预测法可为农业水资源规划与灌溉管理提供科学参考。

关键词:灌溉水有效利用系数; 逐步回归法; 灰色 GM(1, 1) 模型; Logistic 生长模型; 变权重组合模型

中图分类号: S275.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0073

全国各省开展灌溉水有效利用系数测算工作以来, 灌溉水有效利用系数已经成为评估农业节水效果和实施水资源管理制度的重要指标^[1]。分析灌溉水有效利用系数的影响因素和变化规律, 对我国灌区提档改造升级和现代化建设以及农业水价改革具有重要意义^[2-3]。针对灌溉水有效利用系数的提升和预测大量学者进行了研究。Lankford^[4]列出有效灌溉面积、节水灌溉面积比等 13 个影响灌溉水有效利用系数的因素, 提出可通过减少可控损失因素来提高灌溉效率。高峰等^[5]提出以首尾测定法和典型渠道测量法修正灌溉水有效利用系数的综合测定法, 完善了灌溉水有效利用系数的计算方法。战家男等^[6]使用灰色 GM(1,1) 预测模型, 预测了 2015 年宁夏灌区的灌溉水有效利用系数。郑招阳等^[7]通过优化影响模型精度的参数, 构建灰色 Verhulst 模型, 预测了咸阳市 2021—2023 年的灌溉水有效利用系数。鞠艳等^[8]采用偏相关分析和主成分分析方法, 对江苏省灌溉水有效利用系数年际变化及其影响因素进行分析研究。陈启军等^[9]采用灰

色关联度定性分析筛选出影响温州灌区灌溉水有效利用系数的主要因素, 以改进型灰色 GM(1,1) 预测模型预测温州市 2018—2022 年灌溉水有效利用系数。Tang 等^[10]通过结合多目标规划和模糊可信约束规划建立了新的 AquaCrop 模型提高黑龙江绥化长岗灌区的灌溉水利用效率, 减少了灌溉用水量。但前人的研究多从基础的理论测算和单一模型模拟为出发点, 未从影响因素和时间序列等多维度反映系数的变化规律, 预测精度相对较低。因此, 本文通过分析影响灌溉水有效利用系数的关键因素, 考虑灌溉水有效利用系数的影响因素及变化规律两个方面, 建立新的变权重组合模型。以广东省农业灌区实际情况为例, 验证变权重组合模型的准确性并预测广东省未来年份的灌溉水有效利用系数, 为灌溉水有效利用系数的计算和预测提供参考。

1 灌溉水有效利用系数预测模型

变权重组合模型是在逐步回归法、灰色 GM(1,1) 预测模型和 Logistic 生长预测模型的预测基础上分配相应的权重占比组合而成。

收稿日期: 2024-03-14 修回日期: 2024-07-05 网络出版时间: 2024-08-02

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240801.1725.010>

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目子课题(2023YFD900802-01)

作者简介: 李涛(1999—), 男, 甘肃庆阳人, 主要从事农田水利方面研究。E-mail: klausltcs@163.com

通信作者: 杨路华(1970—), 男, 河北内丘人, 教授, 博士, 主要从事农田水利、农业水资源规划与水环境、节水灌溉理论与技术等方面研究。E-mail: yangluhua@126.com

1.1 逐步回归法

逐步回归法是基于多元线性回归分析,利用双检验法找到与被解释变量强相关的解释变量,排除相关性较弱的变量以建立最优多元线性回归的算法^[11-12]。其主要思想为通过剔除与被解释变量相关性不强或与其他变量高度相关的变量,引入新的强显著变量,重复以上步骤,直到既没有重要的自变量被选入回归方程,也没有不重要的自变量被从回归方程中去除,以确保最终引入回归方程的变量都是最优的变量组合。

以灌溉水有效利用系数为被解释变量,在 h 个解释变量 X_1, X_2, \dots, X_h 中存在 s 个解释变量 ($h \neq s$) 使得建立的逐步回归方程表现最好,即:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_s X_s \quad (1)$$

许多因素会影响灌溉水有效利用系数,但它们对该系数的影响程度是不同的。采用逐步回归法筛选出相关性最高的影响因素,引入变权重组合模型,从而提高预测模型的精度。

1.2 灰色 GM(1,1) 预测模型

灰色预测 GM(1,1) 模型原理认为表面复杂无章的数据其内部一定存在着规律,通过整理原始数据的方式弱化其随机性,挖掘和利用其内在规律,然后用于研究和描述数据的变化过程^[13-16],模型可针对数据量小、数据完整性较低的数据序列进行精确预测。灰色预测 GM(1,1) 模型可解决灌溉水有效利用系数时间序列较短的问题。

设原始数据列为: $x_{(0)} = (X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n))$, 称 $x_{(1)}(k) = (X_1(1), X_1(2), \dots, X_1(n))$ 为 $x_{(0)}$ 的 1 次累加生成数列。其中:

$$x_{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x_{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

对一阶累加生成的数据序列 $x_{(1)}(k)$ 建立相应的一元一阶动态模型 GM(1,1) 的微分方程:

$$\frac{dx_{(1)}(t)}{dt} + ax_{(1)}(t) = \mu \quad (3)$$

利用最小二乘法求解得到上述白化微分方程的值(时间效应):

$$x_{(1)}(k) = \left(x_{(0)}(1) - \frac{\mu}{a}\right)e^{-ak} + \frac{\mu}{a} \quad (4)$$

或离散效应:

$$x_{(1)}(k+1) = \left(x_{(0)}(1) - \frac{\mu}{a}\right)e^{-a(k+1)} + \frac{\mu}{a}, k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (5)$$

式中: k 为时间序列,可为年、季、月。

参数 a 满足 $\hat{a} = [\alpha, \mu]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_n$, 其中:

$$B = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}(X_{(1)}(1) + X_{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(X_{(1)}(2) + X_{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(X_{(1)}(n-1) + X_{(1)}(n)) & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$Y_n = (X_{(0)}(2), X_{(0)}(3), \dots, X_{(0)}(n))^T \quad (7)$$

1.3 Logistic 生长预测模型

Logistic 模型广泛应用于生命体生长预测研究,对于经济社会现象研究也成果颇丰,其特点是前期增长速度缓慢,中期快速增长,到达某个限度以后,增长又缓慢下来,反映了事物发生、发展到成熟并趋于饱和极限的过程,呈“S 型”变化^[17],与灌溉水有效利用系数的变化规律相符合。Logistic 模型的微分形式为

$$\frac{dy}{dt} = zy \left(1 - \frac{y}{z}\right) \quad (8)$$

式中: y 为种群大小, z 为环境容纳量, t 为时间。

对式 (8) 求解可得到 Logistic 模型的一般形式:

$$y = \frac{z}{1 + ce^{-bt}} \quad (9)$$

式中: c, b, z 为模型的 3 个待定参数。 z 为 y 的极限值: $t > 0, z > 0; t \rightarrow \infty$ 时, $y \rightarrow z$ 。

1.4 变权重组合预测模型

对于同一个预测问题,设 $Y = \{y_t\} (t=1, 2, 3, \dots, q)$ 为实际观测值,有 m 种预测方法可以应用,第 i 种预测模型 f_i 的预测值为 $f_i = \{f_{it}\} (t=1, 2, 3, \dots, q; i=1, 2, \dots, m)$,则由这 m 种单一模型组合的变权重模型^[18] 为

$$f = w_1 f_1 + w_2 f_2 + \dots + w_m f_m = \sum_{i=1}^m w_i f_i \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1 \text{ 且 } w_i \geq 0 \quad (11)$$

第 i 种模型的预测误差 e_{it} 和组合模型的预测误差 e_t 用下式表示:

$$e_{it} = Y_t - f_{it} \quad (12)$$

$$e_t = Y_t - f_t = \sum_{i=1}^m w_i e_{it} \quad (13)$$

将变量的权重进行组合,以最小化样本点处的组合预测误差平方和为目标函数,可得到以下优化组合模型:

$$\min J = e^T e = \sum_{i=1}^q e_i^2; \mathbf{R}^T \mathbf{W} = 1 \quad (14)$$

式中: \mathbf{W} 为权重系数向量; \mathbf{R} 为元素均为 1 的 q 维列向量。

对于权重系数 W 的求解分以下两种情况进行:

(1) 在 t 时刻, 所有模型的预测误差值均为正数或负数, 即 $e_{it} \geq 0$ (或 $e_{it} \leq 0$), 此时第 p 种模型预测误差的绝对值最小, 则模型 (14) 的解为:

$$\begin{cases} W_{pt} = 1 \\ W_{it} = 0 \end{cases} (t = 1, 2, \dots, q; i \neq p) \quad (15)$$

(2) 在 t 时刻, 所有模型预测的所有误差值存在正数和负数, 即存在部分 i 使 $e_{it} \geq 0$, 存在另一部分 i , 使 $e_{it} \leq 0$, 说明此时预测模型的误差是不完全同向的。此种情况下, 式 (14) 的解为

$$\begin{cases} W_{p1t} = \frac{|e_{p2t}|}{|e_{p1t}| + |e_{p2t}|} \\ W_{p2t} = \frac{|e_{p1t}|}{|e_{p1t}| + |e_{p2t}|} \end{cases} \quad (16)$$

变权重组合预测模型结合了各种单一预测方式的优势, 从而提高预测精度。在式 (15)、(16) 的基础上, 使用下式计算时刻 $t=u+1, u+2, \dots, u+j$ 处的各组合模型的权重值:

$$W_{i(u+1)} = \frac{1}{u} \sum_{i=1}^u W_{it}, \dots, W_{i(u+j)} = \frac{1}{u} \sum_{i=j}^{u+j-1} W_{it} \quad (17)$$

式中: u 为预测时所选基础数据的个数。

变权重组合模型应选取两种以上单一预测模型组合来提高精度。灌溉水有效利用系数的发展变化趋势, 不仅受到政策、投资、管理等因素的影响, 还有自身随时间的变化规律。在不同发展阶段, 这两个方面的影响程度各不相同。采用逐步回归法确定由影响因素决定的灌溉水有效利用系数, 灰色 GM(1,1) 预测模型和 Logistic 生长预测模型确定由时间序列决定的灌溉水有效利用系数。考虑不同阶段权重变化的影响, 采用变权重组合模型预测灌溉水有效利用系数更加精准。

2 实例应用

2.1 研究区概况与数据来源

广东省位于我国大陆最南端, 地处北纬 $20^{\circ}14' \sim 25^{\circ}31'$ 、东经 $109^{\circ}40' \sim 117^{\circ}20'$ 。陆地南北相距约 800 km, 东西相距约 1 000 km, 年均降水量多为 1 500~2 000 mm, 水资源丰富^[19-20]。农作物以水稻、甘蔗、花生为主。全省农田有效灌溉面积 $1.97 \times 10^6 \text{ hm}^2$,

灌区 30 980 处, 其中, 大型灌区 3 处, 中型灌区 388 处, 小型灌区 30 589 处。全省以地表水灌溉为主, 多采用河道泵站提水灌溉。本文采用的灌溉水有效利用系数来自广东省水利部门发布成果。年均降水量、农业用水量、耕地面积、节水灌溉面积、工程投资等数据来源于 2006—2016 年《广东农村统计年鉴》《广东省水资源公报》。

2.2 灌溉水有效利用系数影响因素分析

2.2.1 影响因素选取

影响灌溉水有效利用系数的因素众多^[21-23], 如灌溉方式、灌区地质地形、灌区工程状况、灌区管理和灌溉水平等^[24]。根据现有数据资料, 考虑数据的可得性、连续性与科学性等因素, 选取了年平均降水量、农业用水量、耕地面积、农作物种植面积、有效灌溉面积、节水灌溉面积、灌区工程投资等 7 个因素作为解释变量, 灌溉水有效利用系数 η 作为被解释变量进行逐步回归。灌溉水有效利用系数主要影响因素选取及取值见表 1、表 2。

表 1 灌溉水有效利用系数主要影响因素选取
Tab. 1 Selection of the main influencing factors of IWEUC

类别	影响因素
自然因素	年平均降水量 X_1/mm
种植及管理情况	农业用水量 $X_2/\text{亿m}^3$
	耕地面积 $X_3/10^6 \text{ hm}^2$
	农作物种植面积 $X_4/10^6 \text{ hm}^2$
灌区工程状况	有效灌溉面积 $X_5/10^6 \text{ hm}^2$
	节水灌溉面积 $X_6/10^6 \text{ hm}^2$
灌区工程投资	灌区工程投资 $X_7/\text{亿元}$

2.2.2 影响因素逐步回归分析

采用 SPSS 24.0 中的步进法进行逐步回归分析, 给定置信水平 95% ($\alpha=0.05$), 为涵盖尽可能多的解释变量以分析各个影响因素的情况, 使用 F 的概率设置变量进入模型的条件为 $P \leq 0.15$, 逐步回归结果见表 3。

本次逐步回归一共进行了 5 次输入, 逐步引入回归模型的变量分别是节水灌溉面积 (X_6)、耕地面积 (X_3)、农作物种植面积 (X_4)、农业用水量 (X_2)、灌区工程投资 (X_7)。

根据逐步回归结果, 节水灌溉面积 (X_6)、耕地面积 (X_3)、农作物种植面积 (X_4)、农业用水量 (X_2)、灌区工程投资 (X_7) 等 5 个变量均与灌溉水有效利用系数有显著的相关关系。逐步回归阶段 II 至 IV 中的 X_3 与 X_2 均与 η 呈负相关关系, 其余变量与 η 呈正相

关关系。阶段 II 中的变量 X_3 未通过显著性检验, 阶段 III、IV、V 中的变量 X_3 、 X_4 、 X_5 均通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。

表 2 2006—2016 年广东省灌溉水有效利用系数主要影响因素值

Tab. 2 Values of the main influencing factors of IWEUC in Guangdong Province from 2006 to 2016

年份	X_1/mm	$X_2/\text{亿m}^3$	$X_3/10^6 \text{ hm}^2$	$X_4/10^6 \text{ hm}^2$	$X_5/10^6 \text{ hm}^2$	$X_6/10^6 \text{ hm}^2$	$X_7/\text{亿元}$	η
2006	2 107.3	232.4	2.88	4.84	1.87	0.159	22.08	0.399 2
2007	1 569.0	230.2	2.85	4.37	2.80	0.171	17.06	0.405 4
2008	2 136.0	232.2	2.83	4.41	2.80	0.176	18.64	0.411 5
2009	1 578.6	233.1	2.82	4.48	2.81	0.195	23.26	0.418 4
2010	1 922.0	231.3	2.82	4.26	2.81	0.209	35.29	0.430 0
2011	1 461.0	228.3	2.60	4.57	2.81	0.212	37.02	0.453 0
2012	1 847.6	227.6	2.62	4.63	2.66	0.220	34.87	0.460 0
2013	2 124.5	223.7	2.17	3.13	2.66	0.240	22.51	0.466 0
2014	1 652.5	224.4	2.16	3.16	2.66	0.280	18.62	0.475 0
2015	1 845.7	227.0	2.63	3.19	2.66	0.296	16.39	0.480 0
2016	2 321.0	220.5	2.51	3.22	2.66	0.302	18.14	0.488 0

表 3 灌溉水有效利用系数影响因素逐步回归分析结果

Tab. 3 The results of stepwise regression analysis of influencing factors to IWEUC in Guangdong Province

项目	灌溉水有效利用系数				
	阶段 I	阶段 II	阶段 III	阶段 IV	阶段 V
X_6	0.611***	0.611***	0.611***	0.611***	0.004***
X_3		-0.028***	-0.047***	-0.041***	-0.043***
X_4			0.022***	0.024***	0.022***
X_2				-0.002**	-0.003***
X_7					$0.109 \times 10^{-2**}$
-cons.	0.308***	0.403***	0.325***	0.901***	1.019***
R^2	0.902	0.930	0.967	0.982	0.992
调整后的 R^2	0.892	0.912	0.953	0.969	0.984

注: **表示通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验, ***表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。

在建立的 5 个回归方程中, 节水灌溉面积 (X_6) 的系数大于其余变量的系数。从模型检验来看: 随着引入变量的增多, 创建的回归模型调整后的 R^2 整体由阶段 I 的 0.892 增加到了阶段 V 的 0.984; 阶段 I 到阶段 V, R^2 变化量对回归模型影响很小, 阶段 I 引入的自变量已能解释 89% 以上的因变量 η 的变化, 模型整体拟合优度很高。因此, 节水灌溉面积是影响灌溉水有效利用系数的最关键因素, 选择阶段 I 建立灌溉水有效利用系数影响因素的回归方程:

$$\eta = 0.308 + 0.611X_6 \quad (18)$$

2.3 灌溉水有效利用系数预测

以广东省 2006—2016 年的实测数据建立相关预测模型, 验证年限为 2017—2022 年。

2.3.1 单一模型选取及应用

根据组合预测的必要条件, 在利用逐步回归模型、灰色 GM(1,1) 预测模型和 Logistic 生长模型对广东省灌溉水有效利用系数进行组合预测时, 需对各单一预测模型进行非劣预测模型的筛选^[18]。利用 MATLAB 建立灰色 GM(1,1) 预测模型和 SPSS 24.0 建立 Logistic 生长模型, 结合 2.2.2 节中逐步回归模型结果, 得到 3 种单项预测模型。3 种单一模型参数的估计值见表 4。各预测模型的误差 e_1 、 e_2 、 e_3 见表 5。比较各模型的计算误差, 发现在各个时间点各误差的绝对值之间大小关系不恒定, 因此每个预测模型相互都是非劣的。根据预测模型的特性, 可以将它们组合成一个组合模型来预测, 3 种模型平均相对误差均小于 5%, 符合模型要求, 可以成功应用于预测任务中。

表 4 单一预测模型计算公式及相关指标说明

Tab. 4 The formula of single prediction model and its related indicators description

模型	公式	平均相对误差 $\bar{e}/\%$
逐步回归模型	$\eta_1 = 0.308 + 0.611 X_6$	1.673
灰色 GM(1,1) 模型	$\eta_2 = \eta(t+1) = 18.4469 e^{-0.02177t} - 18.0471$	0.913
Logistic 生长模型	$\eta_3 = 0.645 / (1 + 0.07 e^{-0.6324t})$	0.882

表5 单一预测模型误差

Tab. 5 Errors of the single prediction models

年份	逐步回归模型 e_1	灰色GM(1,1)模型 e_2	Logistic生长模型 e_3
2006	0.006 1	0	-0.004 9
2007	0.007 0	0.000 7	-0.000 5
2008	0.004 1	0.003 5	0.003 9
2009	0.008 6	0.005 7	0.007 3
2010	0.005 7	0.003 5	0.005 7
2011	-0.015 7	-0.010 0	-0.007 5
2012	-0.017 9	-0.007 3	-0.004 9
2013	-0.011 5	-0.003 3	-0.001 7
2014	0.004 0	-0.002 1	-0.001 7
2015	0.008 8	0.003 3	0.002 0
2016	0.004 2	0.005 9	0.002 3

2.3.2 变权重组合模型预测模型建立及验证

利用式(15)和式(16),对表4中的单一预测模型进行处理,求出它们在预测灌溉水有效利用系数组合模型中的权重值,详见表6。逐步回归模型、灰色GM(1,1)模型和Logistic生长模型在组合预测模型各个阶段的权重值不同,模型建立期间(2006—2016年)变权重组合模型的3个平均权重值分别为0.117、0.351和0.532。

表6 变权重组合预测模型建立阶段的权重值

Tab. 6 Variable weight combination predicts the weight values in the model establishment stage

年份	权重值1(w_1)	权重值2(w_2)	权重值3(w_3)
2006	0	0.439	0.561
2007	0	0.417	0.583
2008	0	1.000	0
2009	0	1.000	0
2010	0	1.000	0
2011	0	0	1.000
2012	1.000	0	0
2013	0	0	1.000
2014	0.287	0	0.713
2015	0	0	1.000
2016	0	0	1.000

利用表4中的3种单一预测模型分别对广东省2006—2016年灌溉水有效利用系数进行计算,结合表6列出的各模型相应时刻的最优权重,灌溉水有效利用系数变权重组合模型的公式由(10)可简写为

$$\eta = \eta_1 w_1 + \eta_2 w_2 + \eta_3 w_3 \quad (19)$$

式中: η_1 、 η_2 、 η_3 分别为逐步回归法、灰色GM(1,1)预测模型、Logistic生长预测模型的计算值; w_1 、 w_2 、 w_3 分别为逐步回归法、灰色GM(1,1)预测模型、Logistic生长预测模型在组合模型中的权重值。

利用式(19)建立变权重组合模型计算相应年份的灌溉水有效利用系数,计算结果见表7。

表7 广东省灌溉水有效利用系数计算值

Tab. 7 The results of IWEUC in Guangdong Province

年份	单一预测模型计算值			变权重组合模型计算值 η
	逐步回归模型 η_1	灰色GM(1,1)模型 η_2	Logistic生长模型 η_3	
2006	0.405 3	0.399 2	0.394 3	0.396 5
2007	0.412 4	0.406 1	0.404 9	0.405 4
2008	0.415 6	0.415 0	0.415 4	0.415 0
2009	0.427 0	0.424 1	0.425 7	0.424 1
2010	0.435 7	0.433 5	0.435 7	0.433 5
2011	0.437 3	0.443 0	0.445 5	0.445 5
2012	0.442 1	0.452 7	0.455 1	0.452 3
2013	0.454 5	0.462 7	0.464 3	0.464 3
2014	0.479 0	0.472 9	0.473 3	0.475 0
2015	0.488 8	0.483 3	0.482 0	0.482 0
2016	0.492 2	0.493 9	0.490 3	0.490 3
平均值	0.444 5	0.444 2	0.444 2	0.444 0

为验证模型的有效性,将3种模型的计算结果与2006—2016年灌溉水有效利用系数实际测算值进行比较,计算计算值和灌溉水有效利用系数实际测算值之间的误差,见表8。由表8可以看出,变权重组合模型建立阶段(2006—2016年)逐步回归、灰色GM(1,1)、Logistic生长模型、变权重组合模型等4种模型对广东省灌溉水有效利用系数预测的平均相对误差绝对值分别为1.67%、0.91%、0.88%、0.75%;由图1可以看出,在3种单一预测模型中,逐步回归模型与灌溉水有效利用系数实际曲线拟合效果稍逊于其他模型,但每个模型的计算误差都在5%以内。

利用式(17)来计算验证期间(2017—2022年)各单一预测模型的权重,3个平均权重值分别为0.147、0.275和0.578。利用式(19)建立变权重组合模型预测相应年份的灌溉水有效利用系数。结果表明:验证阶段(2017—2022年)变权重组合模型预测平均值为0.514 5,与实际测算值的平均相对误差绝对值为0.91%,模型预测误差在5%之内,详见图2;独立样本t检验下,灌溉水有效利用系数的预

测值和实际测算值在 0.05 显著性水平下不呈现差异, 见表 9。

表 8 变权重组合模型建立阶段误差绝对值

Tab. 8 The absolute values of error in the establishment stage of the variable weight combination models

年份	逐步回归模型	灰色GM(1,1)模型	Logistic生长模型	变权重组合模型
2006	0.011 2	0.000 0	0.012 3	0.006 9
2007	0.013 0	0.001 7	0.001 2	0.000 0
2008	0.005 7	0.008 5	0.009 5	0.008 5
2009	0.016 0	0.013 6	0.017 4	0.013 6
2010	0.008 4	0.008 1	0.013 3	0.008 1
2011	0.039 4	0.022 1	0.016 6	0.016 6
2012	0.043 7	0.015 9	0.010 7	0.016 7
2013	0.029 8	0.007 1	0.003 6	0.003 6
2014	0.002 4	0.004 4	0.003 6	0.000 0
2015	0.012 2	0.006 9	0.004 2	0.004 2
2016	0.002 5	0.012 1	0.004 7	0.004 7
平均值	0.016 7	0.009 1	0.008 8	0.007 5

变权重组合预测模型与灌溉水有效利用系数曲线拟合效果最佳, 这是由于变权重组合预测模型在

不同阶段结合了各单一模型的优势, 对平均相对误差大模型权重占比小, 平均相对误差小的模型权重占比大, 从而预测的每个阶段都取了最优权重。验证结果也表明, 基于广东省 2006—2016 年灌溉水利用系数实际测算值建立的预测模型, 在验证年度 2017—2022 年的灌溉水有效利用系数预测误差最小, 预测精度最高。因此, 变权重组合预测模型用于灌溉水有效利用系数预测符合预测精度要求, 优势更加明显。

2.3.3 广东省灌溉水有效利用系数预测分析

由于未来年份自变量节水灌溉面积未知, 使用逐步回归预测时, 需要先对未来年份节水灌溉面积进行预测。使用广东省 2011—2022 年度节水灌溉面积数据, 建立节水灌溉面积与时间的函数关系, 见图 3。图 3 表明线性拟合 R^2 达到 0.956, 拟合结果优良, 节水灌溉面积呈现线性增长的趋势较为显著^[25-26]。根据该函数关系预测广东省 2023 年以后各年的节水灌溉面积, 预测广东省 2025 年、2030 年和 2035 年节水灌溉面积分别为 0.554×10^6 、 0.682×10^6 和 $0.810 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。

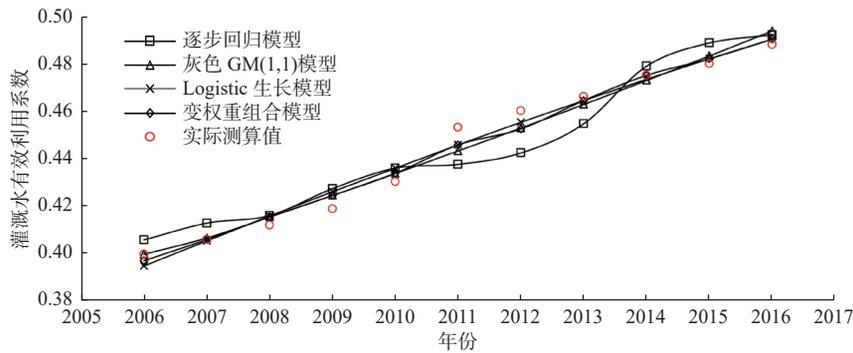


图 1 各预测模型计算值与灌溉水有效利用系数实际测算值对比

Fig. 1 Comparison of the calculations of each model and the measured results of IWEUC

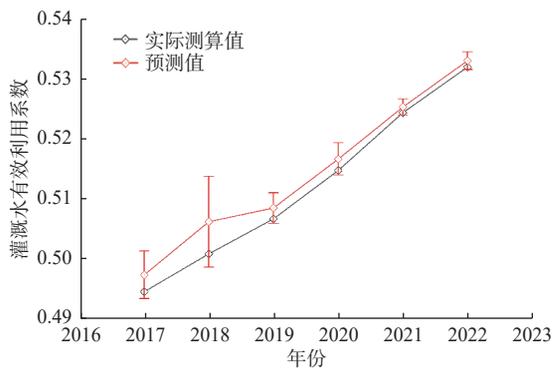


图 2 变权重组合模型预测值与灌溉水有效利用系数实际测算值的误差

Fig. 2 Error plot of the predicted values of the variable weight combination model and the measured values of IWEUC

表 9 变权重组合模型预测值与灌溉水有效利用系数实际测算值的显著性分析

Tab. 9 Significance analysis of the predicted values of the variable weight combination model and the measured values of IWEUC

组别	均值	t值	显著性
预测值	0.515	0.291	0.812*
实际测算值	0.512		

注: *表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。

根据 2006—2022 年数据重新建立新的逐步回归模型、灰色 GM(1,1) 模型和 Logistic 生长模型, 采用变权重组合法预测广东省未来 2023—2035 年灌溉水有效利用系数, 结果见表 10。变权重组合模型

预测的 2025 年、2030 年和 2035 年的灌溉水有效利用系数分别为 0.572 4、0.628 6 和 0.679 2。2025 年灌溉水有效利用系数预测值比现状提高 0.040 4,略高于全国 2022 年的平均值;2030 年预测值比现状

提高 0.096 6,位于全国前列,高于全国 28 个省份的灌溉水有效利用系数;2035 年广东省灌溉水有效利用系数预测值比现状值提高 0.147 2,仅次于北京市、上海市和天津市的灌溉水有效利用系数。

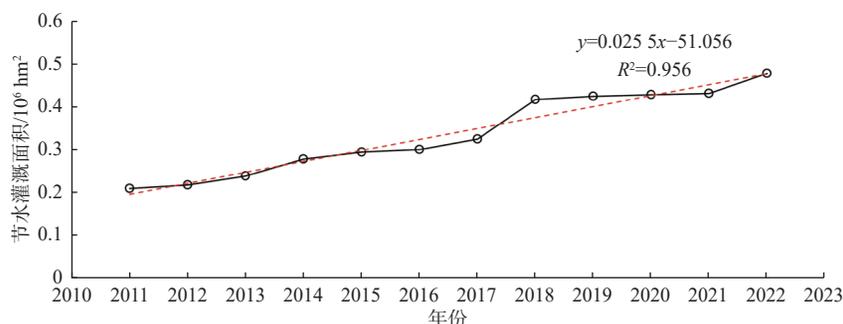


图3 广东省 2011—2022 年度节水灌溉面积变化

Fig. 3 Change of water-saving irrigation area in Guangdong Province from 2011 to 2022

表 10 变权重组合模型预测值

Tab. 10 The predicted values of combined model with variable weights

年份	节水灌溉面积/ (10 ⁶ hm ²)	权重值 w_1	权重值 w_2	权重值 w_3	η
2023	0.504	0.475	0.195	0.330	0.548 9
2024	0.529	0.508	0.177	0.315	0.560 1
2025	0.554	0.490	0.174	0.336	0.572 4
2026	0.580	0.478	0.164	0.358	0.584 8
2027	0.605	0.459	0.174	0.367	0.595 6
2028	0.631	0.436	0.185	0.379	0.607 2
2029	0.657	0.408	0.196	0.396	0.617 8
2030	0.682	0.376	0.207	0.417	0.628 6
2031	0.708	0.398	0.218	0.384	0.639 2
2032	0.733	0.369	0.233	0.398	0.647 8
2033	0.759	0.345	0.246	0.409	0.658 3
2034	0.784	0.362	0.235	0.403	0.668 4
2035	0.810	0.386	0.216	0.398	0.679 2

3 结论

首先,利用逐步回归法构建回归方程,选取了 7 个影响灌溉水有效利用系数的因素作为引入变量,逐步回归结果表明节水灌溉面积对逐步回归方程拟合精确程度影响最大,将其确定为影响灌溉水有效系数的关键因素。其次,利用 2006—2016 年数据建立灰色 GM(1,1) 预测模型和 Logistic 生长模型,综合逐步回归结果计算出各模型的权重值,建立了变权重组合模型并验证了模型精确性。最后,利用 2006—2022 年数据重新建立变权重组合模型,对广东省灌溉水有效利用系数进行预测研究。结果表

明:变权重组合模型的平均相对误差为 0.75%,小于各单一预测模型,更适用于灌溉水有效利用系数预测。预测了广东省 2023—2035 年的灌溉水有效利用系数,2035 年灌溉水有效利用系数达到 0.679 2,与全国各省灌溉水有效系数的现状值相比位于前列水平。预测结果与广东省的实际情况相符,变权重组合模型可用于灌溉水有效利用系数的预测,为全国执行水资源管理和农业规划以及建立节水型社会提供重要的参考和依据。

参考文献:

- [1] 杨芳,郑江丽,李兴拼.省级灌溉水有效利用系数测算工作评估方法探讨[J].节水灌溉,2016(9):129-132. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2016.09.029.
- [2] 朱福民,李博.兴安盟农田灌溉水有效利用系数测算分析[J].灌溉排水学报,2021,40(S1):102-106. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2021232.
- [3] 赵姜,孟鹤,龚晶.京津冀地区农业全要素用水效率及影响因素分析[J].中国农业大学学报,2017,22(3):76-84. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2017.03.10.
- [4] LANKFORD B A. Localising irrigation efficiency, [J]. Irrigation and Drainage, 2006, 55: 345-362. DOI: 10.1002/ird.270.
- [5] 高峰,赵竞成,许建中,等.灌溉水利用系数测定方法研究[J].灌溉排水学报,2004(1):14-20. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2004.01.004.
- [6] 战家男,张维江,马晓阳,等.宁夏农业灌溉用水有效利用系数预测研究[J].农业科学研究,2012,33(4):51-53. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0747.2012.04.012.
- [7] 郑招阳,陈新明.基于灰色 Verhulst 模型的灌溉水利用系数预测研究:以咸阳市为例[J].水利与建筑工程学报,2022,20(4):64-71. DOI: 10.3969/j.issn.1672-

- 1144.2022.04.010.
- [8] 鞠艳, 杨星, 毕克杰, 等. 江苏省农田灌溉水有效利用系数年际变化及其影响因素分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(12): 123-130. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2022102.
- [9] 陈启军, 张仁贡, 段永刚. 基于改进型灰色系统理论的农田灌溉水有效利用系数预测 [J]. *节水灌溉*, 2020(6): 105-107. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2020.06.021.
- [10] TANG P X, LI N, LI M, et al. Rice irrigation water efficiency improvement: An AquaCrop-based optimization modeling approach [J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 148: 126867. DOI: 10.1016/j.eja.2023.126867.
- [11] LIU Y X, Gerard B M, BAI Z G, et al. Analysis of spatio-temporal variation of crop yield in China using stepwise multiple linear regression [J]. *Field Crops Research*, 2021, 264: 108098. DOI: 10.1016/j.fcr.2021.108098.
- [12] LI S T, MU N, REN Y J, et al. Spatiotemporal characteristics of cultivated land use eco-efficiency and its influencing factors in China from 2000 to 2020 [J]. *Arid Land*, 2024, 16: 396-414. DOI: 10.1007/s40333-024-0094-z.
- [13] ZENG B, LI H, MA X. A novel multi-variable grey forecasting model and its application in forecasting the grain production in China [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 150: 106915. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106915.
- [14] ATIF M K, MAGDALENA O. Comparing forecasting accuracy of selected grey and time series models based on energy consumption in Brazil and India [J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 212: 118840. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.118840.
- [15] 程毛林, 韩云. 基于可变成系数的灰色模型 GM(1, 1) 及其应用 [J]. *统计与决策*, 2020, 36(4): 15-18. DOI: 10.13546/j.cnki.tjyc.2020.04.003.
- [16] 刘斌, 刘思峰, 翟振杰, 等. GM(1, 1) 模型时间响应函数的最优化 [J]. *中国管理科学*, 2003(4): 54-57. DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2003.04.011.
- [17] 刘永, 缴锡云, 程明瀚, 等. 基于 DEM 与 Logistic 函数的灌区渠系工作制度模拟: 以周桥灌区为例 [J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(9): 101-107. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2019378.
- [18] 李文博, 丁勇, 李登华. 基于变权重重大坝预测模型的组合告警方法研究 [J]. *人民长江*, 2023, 54(12): 233-240. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.12.031.
- [19] 安静, 庞树江, 王小胜, 等. 基于供水风险的灌溉水资源多目标优化配置模型 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(9): 100-111. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.09.010.
- [20] 肖洵, 谭超, 黄本胜, 等. 广东省流域控制性水利工程管理体制优化研究 [J]. *水利经济*, 2024, 42(3): 102-108. DOI: 10.3880/j.issn.10039511.2024.03.015.
- [21] 刘春成, 朱伟, 庞颖, 等. 区域灌溉水利用率影响主因分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(4): 40-43. DOI: 10.7631/j.issn.1672-3317.2013.04.010.
- [22] 冯保清. 我国不同分区灌溉水有效利用系数变化特征及其影响因素分析 [J]. *节水灌溉*, 2013(6): 29-32. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2013.06.008.
- [23] 贾玉慧, 杨路华. 灌溉水有效利用系数测量方法试验研究 [J]. *节水灌溉*, 2015(9): 105-108. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2015.09.026.
- [24] 申佩佩, 杨路华, 谢晓彤, 等. 灌区灌溉水有效利用系数内涵及测定方法研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2013(6): 73-75. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2013.06.018.
- [25] 郭丹丹, 张世伟, 吴劲, 等. 基于 Horton 分形的灌区灌溉水有效利用系数影响因素分析 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(3): 436-444. DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020175.
- [26] 张威, 邵景安, 刘毅, 等. 重庆市不同规模灌区农灌水有效利用系数测算与对比研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(3): 43-52. DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2020.03.007.

Prediction of irrigation water effective utilization coefficient based on variable weight combination model

LI Tao¹, YANG Luhua¹, ZHANG Weiting¹, WANG Yan², GAO Lichuan²

(1. College of Hydraulic Engineering, Tianjin Agricultural College, Tianjin 300392, China;

2. Luanping County Water Bureau, Luanping 068250, China)

Abstract: The irrigation water effective utilization coefficient serves as a crucial indicator to assess the efficacy of agricultural irrigation, as well as a vital component in implementing a stringent water resource management system. However, until now, there has been a lack of efficient and accurate methods for predicting the irrigation water effective utilization coefficient. In light of this, a novel prediction approach was presented for the irrigation water

effective utilization coefficient.

Initially, a stepwise regression analysis was employed to determine the significance of each factor contributing to the coefficient, with the water-saving irrigation area being identified as the primary factor influencing the irrigation water effective utilization coefficient. Secondly, the stepwise regression model was selected considering the key factors, and the GM(1,1) model and Logistic growth model were selected considering the time series. Finally, it was constructed of a variable weight combination model with enhanced prediction accuracy, which utilized the three weight values derived from the error values of the stepwise regression method, GM (1,1) model and Logistic growth model. The prediction error revealed that the curve of the variable weight model aligns well with the measure results curve, demonstrating a prediction accuracy that was markedly superior to that of the individual models, making it suitable for predicting the irrigation water effective utilization coefficient.

The variable weight combination model was utilized to predict and analyze the irrigation water effective utilization coefficient in Guangdong Province from 2023 to 2035. The prediction result indicated that the forecast value of the irrigation water effective utilization coefficient will reach 0.679 2 in Guangdong Province by 2035.

The theoretical reference is provided for the planning and management system of agricultural water resources. It is of great significance to the upgrading and modernization of irrigation districts in China as well as to the reform of agricultural water prices.

Key words: irrigation water effective utilization coefficient; stepwise regression method; gray GM (1, 1) model; Logistic growth model; variable weight combination model



摄影|曲帅超