

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190305

# 基于水文气象要素的淮北平原夏玉米蒸散灰色模型研究

范月<sup>1</sup>, 李薇<sup>2</sup>, 王振龙<sup>3</sup>, 吕海深<sup>1</sup>, 许莹莹<sup>1</sup>, 梅海鹏<sup>3</sup>, 胡永胜<sup>3</sup>, 王怡宁<sup>4</sup>

- (1. 河海大学, 江苏 南京 210098; 2. 水利部信息中心(水文水资源监测预报中心), 北京 100053;  
3. 安徽省(水利部淮委)水利科学研究院 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233000;  
4. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:**准确预测作物蒸散量对制定精准的灌溉制度和提高水分利用率至关重要。为进一步研究识别气象要素对作物蒸散的影响, 本文采用五道沟水文实验站大型称重式蒸渗仪实测资料及气象资料, 利用灰色关联法分析了玉米蒸散量与 14 个水文气象要素间的关联度, 建立 12 个不同影响因素组合下的 GM(1, n) 逐日蒸散量预测模型。结果表明: 淮北平原夏玉米蒸散量与各影响因素的灰色关联度从大到小排序依次为: 水汽压力差 > 日最高气温 > 地温 100cm > 地温 30cm > 地温 10cm > 地温 50cm > 日平均气温 > 相对湿度 > 绝对湿度 > 叶面积指数 > 饱和差 > 日最低气温 > 日照时数 > 风速; 不同影响因素组合下的建模结果表明输入要素个数为 4~8 时, 模型预测精度均合格, 后验差比值均小于 0.45, 小误差概率均大于 0.8, 可用于蒸散预测。采用 GM(1, 7) 模型时, 模型精度最高。

**关键词:**蒸散; 灰色关联分析; GM(1, n) 模型; 夏玉米; 淮北平原

中图分类号: S274

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2020)03-0065-06

蒸散是植物蒸腾与植株间土壤蒸发量之和, 是土壤-植物-大气系统 (SPAC) 中重要的水交换过程。如今全球气候变化加剧, 加之人类活动的强烈干扰, 增加了蒸散过程的复杂性和不确定性, 准确预测蒸散量对制定精准的灌溉计划、监测农田旱情及提高水分利用率有重要意义。

针对作物蒸散量计算方法, 国内外学者已进行了大量研究。Ortega Farias S 等<sup>[1]</sup>利用彭曼模型估计大豆蒸散量; 高磊等<sup>[2]</sup>基于水稻生长季蒸渗仪水稻实际蒸散数据及生物、气象资料, 建立了作物系数估计模型, 该模型一定程度上简化了作物系数计算过程; 张薇等<sup>[3]</sup>以极限学习机和广义回归神经网络模型 GRNN 为基础, 对多年蒸散进行了估算, 得出机器学习模型的精度明显更高, 其中 GRNN 模型精度最高; 李玫等<sup>[4]</sup>利用单因子分析法, 对影响该地区蒸散的气象因子的敏感性进行分析, 运用多元线性逐步回归法, 建立了由各气象因子构成的蒸散优化计算模型。

目前常用的一些预测方法(如回归分析、方差分析、时间序列预测等)<sup>[5-7]</sup>, 对样本数据要求较高, 而灰色模型所需样本数相对较少, 运算方便, 且建模精度高, 其建模序列更能动态地反映系统最新特征, 可以克服其他模型对波动性较大的非平稳序列预测精度低的缺点。目前利用灰色模型预测蒸散的研究较少, 本文利用五道沟大型称重式蒸渗仪实测数据, 基于作物蒸散量与各水文气象要素进行灰色关联分析, 对蒸散量的影响因子进行预处理, 从模型精度及实用性考虑, 以关联度最高的前 3 个要素为基础, 逐步添加要素至 14 个分别建立灰色模型, 从而模拟作物蒸散变化, 以期得到更精准的蒸散量, 为制定更科学的灌溉制度提供依据。

## 1 实验内容与处理设计

### 1.1 实验区概况

试验于 2018 年在安徽省蚌埠市五道沟水文水资源实验站进行。该地区(117°21'E, 33°09'N)属暖温带

收稿日期: 2019-09-12

基金项目: 国家重点研发计划课题“河湖沼系统生态需水保障技术体系及应用”(2017YFC0404504)

作者简介: 范月(1996-), 女, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源统计与分析研究。E-mail: 1163382617@qq.com

通讯作者: 王振龙(1965-), 男, 安徽寿县人, 博士, 教授级高工, 主要从事水文水资源实验研究。E-mail: skywzl@sina.com

半湿润季风气候,四季分明,雨热同期。降雨量年际变化大,多年平均降雨量为 899mm,其中汛期(6-9月)占 63.8%。多年平均蒸发为 1181.3mm,地下水埋深在 1-3m 变化,凋萎含水率为 10%-13%,田间持水率为 28%-30%。土壤类型主要是砂姜黑土(54%)和黄潮土(33%),作物以玉米、小麦和大豆为主。

## 1.2 实验设施及资料选取

以淮北平原分布较广泛的砂姜黑土区为对象,研究夏玉米逐日蒸散动态变化规律,玉米实际蒸散量由大型称重式蒸渗仪测得<sup>[8-10]</sup>。蒸渗仪土柱口径 4.0m<sup>2</sup>,高度 4.0m,地下水埋深为 1m。土壤为分层回填土,10cm、30cm、50cm、100cm 埋深处分别设有土壤水分、温度、电导三参数传感器,数据每 10min 获取一次。蒸渗仪南侧设有气象观测场,可获取空气温度、湿度、降水量、风速、水面蒸发量和日照时数等水文气象要素。夏玉米于 2018 年 6 月 22 日播种,10 月 9 日收获。自动采集数据资料时段选取 2018 年 6 月 22 日至 10 月 8 日,及同期气象观测场的气象要素数据。

## 2 灰色关联分析及模型构建方法

### 2.1 灰色关联分析

在实际的预测问题中,系统的发展往往由多个因素共同影响,且不同因素对系统变化态势的影响不同。因此找到关键影响因素有利于快速、有效建立灰色预测模型。本文采用灰色关联分析<sup>[11]</sup>来分析各个因素对于结果的影响程度,其核心是按照一定规则确立随时间变化的参考序列,把各个评估对象随时间的变化作为比较序列,求各个比较序列与参考序列的相关程度,依照相关性大小得出结论。灰色关联分析是对一个系统发展变化态势的定量描述和比较的方法,其基本思想是通过确定参考数据列和若干个比较数据列的几何形状相似程度来判断其联系是否紧密,反映曲线间的关联程度。主要分为以下 5 个步骤:

(1)确定参考和比较数列。本文选择蒸散量为参考数列,各影响因素为比较序列,分别记为:

$$Y=y(k) \quad k=1,2,\dots,n \quad (1)$$

$$X_i=x_i(k) \quad k=1,2,\dots,n; \quad i=1,2,\dots,m \quad (2)$$

式中: $X_i$  为影响因素; $Y$  为蒸散量; $k$  为时间段; $i$  为比较数列中的一行(即一个影响因素)。

(2)对参考和比较序列无量纲化。系统中各因素列中的数据量纲不同,不便于比较,因此要进行无量纲处理,如式(3)所示。

$$x_i(k)=\frac{x_i(k)}{\bar{x}} \quad k=1,2,\dots,n; \quad i=0,1,2,\dots,m \quad (3)$$

式中: $\bar{x}$  为  $X_i$  的均值,其他变量同式(1)。

(3)计算关联系数,见式(4)。

$$\zeta_i(k)=\frac{\min_i \min_k |y(k)-x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k)-x_i(k)|}{|y(k)-x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k)-x_i(k)|} \quad (4)$$

式中: $\zeta_i(k)$  为灰色关联系数; $\rho \in (0, \infty)$ , 为分辨系数,其作用在于提高关联系数间的差异显著性, $\rho$  越小,分辨力越大,通常取值 0.5<sup>[11]</sup>;其他变量同式(1)。

(4)计算关联度,见式(5)。

$$r_i=\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k) \quad k=1,2,\dots,n \quad (5)$$

式中: $n$  为计算关联度选取影响因素的水平数; $r_i$  为关联度,其与 1 的差值越小,参考序列对比较序列越敏感。

(5)关联度排序。根据所得关联度按大小排序,如果  $r_1 < r_2$ , 则  $y$  与  $x_2$  关联度更高。

### 2.2 灰色模型构建

夏玉米蒸散量是一个由复杂关系组成的动态系统。使用灰色模型(Grey Model,简称 GM 模型)通过少量的、不完全的信息,建立灰色微分模型并作出预测。一般表达式为 GM( $n, x$ )模型,其含义是:用  $n$  阶微分方程对  $x$  个变量建立模型。其原理是对多组序列用累减的方式生成多组趋势明显的新数据序列,按新数据序列的增长趋势建立模型进行预测,再恢复原始数据序列,进而得到预测结果。该模型无需大量数据样本,运算过程简单。

常用的灰色系统预测模型主要有 GM(1,1)和 GM(1, $n$ )<sup>[12-14]</sup>。由于作物蒸散发受多个因素影响,且影响夏玉米蒸散量的因素有一定的不确定性,因此本文采用 GM(1, $n$ )模型。具体建模步骤如下<sup>[17-18]</sup>:

(1)明确主行为蒸散序列  $X_1^{(0)}$  与影响因子序列  $X_i^{(0)}$  ( $i=2,3,\dots,n$ ):

$$X_1^{(0)}=(x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), \dots, x_1^{(0)}(n)) \quad (6)$$

$$X_2^{(0)}=(x_2^{(0)}(1), x_2^{(0)}(2), \dots, x_2^{(0)}(n))$$

$$\vdots \quad (7)$$

$$X_N^{(0)}=(x_N^{(0)}(1), x_N^{(0)}(2), \dots, x_N^{(0)}(n))$$

(2)对与蒸散序列具有协调性的影响因子集作 GM(1, $n$ )建模。令  $X_i^{(0)}$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) 的 1-AGO 序列为  $X_i^{(1)}$ , 生成  $X_i^{(1)}$  紧邻均值序列  $Z_1^{(1)}$  (见式(9)), 则 GM(1, $n$ )模型表示为:

$$x_1^{(0)}(k) + aZ_1^{(1)}(k) = \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k) \quad (8)$$

$$Z_1^{(1)}(k) = \frac{1}{2} [X_1^{(1)}(k) + X_1^{(1)}(k-1)] \quad k=2, 3, \dots, n \quad (9)$$

式中:  $a$  为发展系数;  $b_i$  为驱动系数;  $b_i x_i^{(1)}(k)$  为驱动项。

$$\text{令 } B = \begin{pmatrix} -Z^{(1)}(2) & x_2^{(1)}(2) & \dots & x_N^{(1)}(2) \\ -Z^{(1)}(3) & x_2^{(1)}(3) & \dots & x_N^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -Z^{(1)}(n) & x_2^{(1)}(n) & \dots & x_N^{(1)}(n) \end{pmatrix} \text{ 和 } Y = \begin{pmatrix} x_1^{(0)}(2) \\ x_1^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x_1^{(0)}(n) \end{pmatrix}$$

再令  $\beta = (a, b_1, b_2, \dots, b_N)^T$ , 由最小二乘参数估计可得  $\beta = (B^T B)^{-1} B^T Y$ 。当  $X_i^{(1)}(i=1, 2, \dots, N)$  变化幅度较小时, 得出 GM(1, n) 近似时间相应式和累计还原式见式(10)~(11)。

$$\hat{x}_1^{(1)}(k+1) = \left[ x_1^{(0)}(1) - \frac{1}{a} \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k+1) \right] e^{-ak} + \frac{1}{a} \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k+1) \quad (10)$$

$$\hat{x}_1^{(1)}(k+1) = \hat{x}_1^{(1)}(k+1) - \hat{x}_1^{(1)}(k) \quad (11)$$

(3) 将式(10)和式(11)结果累减还原, 即可得到预测值。

### 2.3 模型精度评价标准

灰色模型评价指标主要包括相对残差  $e(k)$ 、后验差比值  $C$  和小误差概率  $P^{[3]}$ 。另外引入了均方根误差 RMSE 及纳什效率系数  $E$ , 用以评价模型模拟值与实测值之间的误差及一致性情况, 其中 RMSE 越接近 0, 模型精度越高;  $E$  越接近 1, 表示模式质量越好, 模型可信度越高。各指标计算如式(12)~(16)所示。

$$e(k) = \frac{|x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)|}{x^{(0)}(k)} \quad k=2, 3, \dots, N \quad (12)$$

$$C = \frac{S_2}{S_1} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{k=2}^n (e - \bar{e})^2}{n-1}}}{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x^{(0)}(k) - \bar{x})^2}{n}}} \quad (13)$$

$$P = P\{|e - \bar{e}| < 0.6745S_1\} \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k))^2}{n}} \quad (15)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k))^2}{\sum_{k=1}^n (x^{(0)}(k) - \bar{x})^2} \quad (16)$$

式中:  $x^{(0)}(k)$  为实测值;  $\hat{x}^{(0)}(k)$  为模型模拟值;  $k$  为影响因子序列数;  $e$  为相对残差;  $\bar{e}$  为实测值的均值;  $\bar{e}$  为相对残差的均值;  $S_1$  为实测值标准差;  $S_2$  为相对残差的标准差。以后验差比值和小误差概率为依据对模型精度进行评价, 如表 1 所示。

表1 灰色模型预测精度等级评价

Table1 Evaluation of gray model prediction accuracy

预测精度等级	P	C
好	>0.95	<0.35
合格	>0.80	<0.45
勉强合格	>0.70	<0.50
不合格	≤0.70	≥0.65

## 3 结果与分析

### 3.1 夏玉米蒸散特征分析

根据研究区的实际观测资料, 将玉米生长发育期划分为 3 个阶段, 如表 2 所示。从播种、出苗到拔节的过程为苗期阶段; 从拔节到抽穗为穗期阶段, 是生长最为旺盛的时期, 该期又可划分为拔节期、大喇叭口期和小喇叭口期; 从抽穗到结实的时期为花粒期, 包括抽雄期、散粉期和结实。并对玉米生长期内蒸散情况进行特征分析<sup>[15-19]</sup>。

表2 玉米生长阶段划分

Table2 The stages for the growth of corn

生长阶段	日数
苗期(6.22-7.22)	31
穗期(7.23-8.10)	19
花粒期(8.11-10.8)	59

日均蒸散量在各生育期的大小顺序为: 穗期>花粒期>苗期。在苗期阶段, 作物根系短, 植株矮小且叶片数量少, 蒸散发能力较弱, 日均蒸散量仅为 2.23mm/d。在穗期阶段, 日均蒸散量为 6.65mm/d, 玉米叶面积指数增加, 温度升高, 且降雨量增加, 因此蒸散发量快

速增加,这一阶段玉米生长最为旺盛。花粒期玉米逐渐成熟,后期叶片开始衰老,叶面积指数下降,太阳净辐射处于下降水平,且降水较少,蒸散量也随之下降,日均蒸散量为 4.76mm/d。将玉米逐时实测蒸散量按 24h 累加,得到玉米逐日蒸散量变化过程线图(见图 1)。

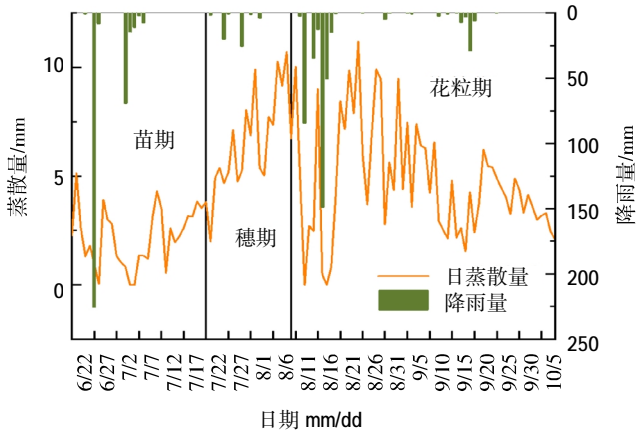


图 1 2018 年夏玉米日蒸散量及降雨变化过程

Fig.1 Variation of summer maize diurnal evapotranspiration and rainfall change in 2018

### 3.2 灰色关联计算结果分析

应用灰色关联法分析淮北平原夏玉米实际蒸散量 ET 与各影响因素的关联度,主要针对日平均气温(TA)、日最高气温( $T_{max}$ )、日最低气温( $T_{min}$ )、日照时数(h)、风速(u)、绝对湿度(AH)、相对湿度(RH)、饱和差(e1)、水汽压力差(e2)、10cm 地温(D-10)、30cm 地温(D-30)、50cm 地温(D-50)、地温 100cm(D-100)和叶面积指数(LAI)进行分析,得到夏玉米日蒸散量与各水文气象要素的关联度。灰色关联分析通过 Matlab 实现。

根据灰色关联法计算得出的结果可知,在玉米全生长期,各影响因素的关联度按从大到小排序为:水汽压力差(0.8229)>日最高气温(0.7812)>地温 100cm(0.7812)>地温 30cm(0.7774)>地温 10cm(0.7762)>地温 50cm(0.7760)>日平均气温(0.7716)>相对湿度(0.7684)>绝对湿度(0.7646)>叶面积指数(0.7626)>饱和差(0.7584)>日最低气温(0.7531)>日照时数(0.7398)>风速(0.7100)。日蒸散量与各要素的关联度均大于 0.6,关联度较强。图 2 为夏玉米日蒸散量与关联度最高的前 7 个水文气象要素变化过程。可以看出,水汽压力差的变化趋势与蒸散量变化趋势有较高的一

致性,符合灰色关联分析结果,日最高气温和不同深度地温变化趋势与日蒸散量也基本一致,依此逐步建立灰色模型。

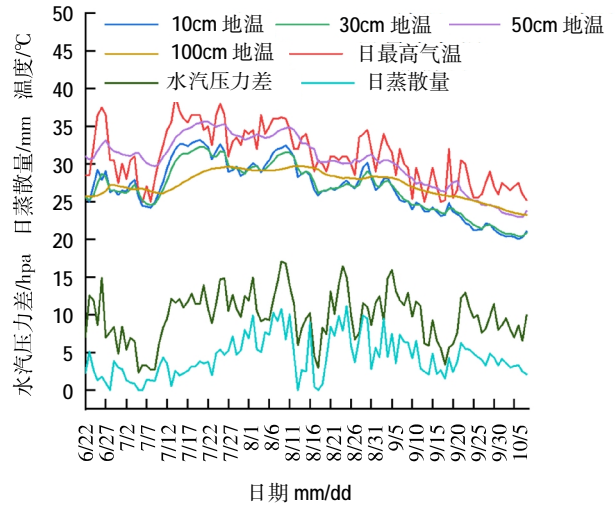


图 2 全生长期夏玉米日蒸散量与各气象要素变化过程

Fig.2 The process of summer maize evapotranspiration in the whole growth period and the change of meteorological elements

### 3.3 灰色模型预测结果分析

表 3 中当输入要素为 4~8 个时,模型精度合格;当采用 GM(1,7)模型时,模型的预测效果最好,表明这些要素是影响蒸散量的关键因素,对淮北平原实际蒸散的预测精度影响较大;当输入因素个数大于等于 9 个时,模型预测精度变差,多个要素之间相关性较大,容易产生多重共线性问题和过拟合现象,不能用于预测蒸散量。当输入因素个数小于 4 个时,模型涵盖特征较少,不足以预测蒸散。从模型应用性考虑,利用 GM(1,4)模型即可进行蒸散量预测,但从模型精度角度考虑推荐 GM(1,7)模型。

采用夏玉米全生长期数据进行训练,GM(1,7)模型后验差比值为 0.3272,小误差概率为 0.9825,均方根误差约为 0.71,纳什效率系数约为 0.74。结合降雨变化过程看,当出现较大降雨时,实际值与预测值的差距相比无雨日较大,可能由于降雨量较大抑制作物蒸散发作用,导致模型的预测效果下降(见图 3)。

为了检验模型的适用性,本文选取了同种土质、同种口径、同种作物及同种埋深的测筒数据进行验证,两个测筒蒸散趋势出现差异可能是内部环境有差别。采用蒸渗仪内相应地温及各水文气象要素,将所得 GM(1,7)模型用于验证集,所得均方根误差约为

表3 不同影响因素组合下灰色模型的蒸散量预测精度

Table3 The accuracy of estimation evapotranspiration of gray model under different influencing

因素个数	模型输入变量	C	P
3	$e2, T_{max}, D-100$	0.6772	0.7741
4	$e2, T_{max}, D-100, D-30$	0.5544	0.8921
5	$e2, T_{max}, D-100, D-30, D-10$	0.4347	0.8892
6	$e2, T_{max}, D-100, D-30, D-10, D-50$	0.3877	0.8665
7	$e2, T_{max}, D-100, D-30, D-10, D-50, TA$	0.3272	0.9825
8	$e2, T_{max}, D-100, D-30, D-10, D-50, TA, RH$	0.4388	0.8634
9	$e2, T_{max}, D-100, D-30, D-10, D-50, TA, RH, AH$	0.4538	0.8434
10	$e2, T_{max}, D-100, D-30, D-10, D-50, TA, RH, AH, LAI$	0.4691	0.8612
11	$e2, T_{max}, D-100, D-30, D-10, D-50, TA, RH, AH, LAI, e1$	0.5763	0.8314
12	$e2, T_{max}, D-100, D-30, D-10, D-50, TA, RH, AH, LAI, e1, T_{min}$	0.6251	0.7116
13	$e2, T_{max}, D-100, D-30, D-10, D-50, TA, RH, AH, LAI, e1, T_{min}, h$	0.8573	0.6237
14	$e2, T_{max}, D-100, D-30, D-10, D-50, TA, RH, AH, LAI, e1, T_{min}, h, e1$	0.8744	0.6144

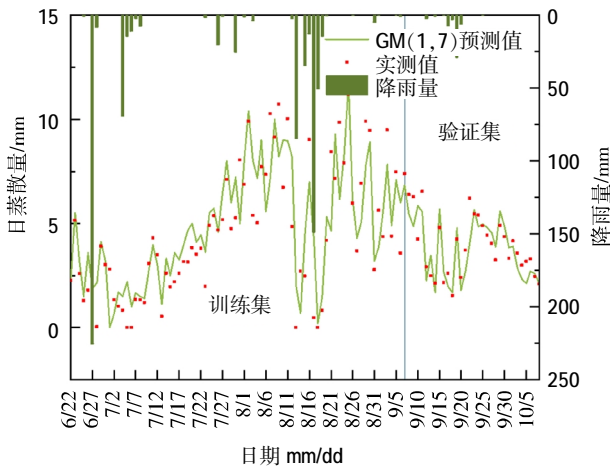


图3 GM(1,7)模型逐日蒸散量实测值与预测值对比图  
Fig.3 The comparison of measured and predicted daily evapotranspiration of GM(1,7) model

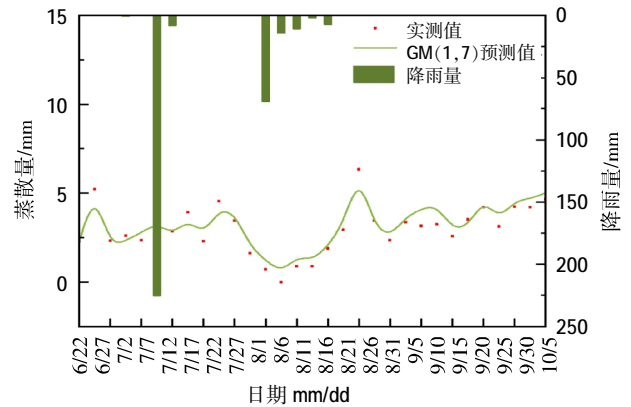


图4 同等条件 GM(1,7)模型逐日蒸散量实测值与预测值对比图  
Fig.4 The comparison of measured and predicted daily evapotranspiration of GM(1,7) model under the same circumstances

0.64, 纳什效率系数约为 0.70, 模型所得后验差比值为 0.3188, 小误差概率为 1.1307, 模型精度较高。从图 4 可以看出, 夏玉米全生长期实际蒸散值与预测值的变化趋势基本一致, 模型模拟效果较好。表明水汽压力差、气温及地温对蒸散的影响较大, 在作物生育期内可根据这些气象数据建立 GM(1,7)模型预测蒸散。

#### 4 结语与讨论

(1)夏玉米逐日蒸散量与各影响因子灰色关联分析, 按关联度从大到小依次为: 水汽压力差(0.8229) > 日最高气温(0.7812) > 地温 100cm(0.7812) > 地温 30cm

(0.7774) > 地温 10cm(0.7762) > 地温 50cm(0.7760) > 日平均气温(0.7716) > 相对湿度(0.7684) > 绝对湿度(0.7646) > 叶面积指数(0.7626) > 饱和差(0.7584) > 日最低气温(0.7531) > 日照时数(0.7398) > 风速(0.7100)。

(2)以关联度最大的 3 个要素为基础建立灰色模型, 逐步添加要素至 14 个。可知输入 7 个影响要素时, 模型精度最高, 后验差比值 C 为 0.3272, 小误差概率 P 为 0.9825。该模型在训练集和验证集中均方根误差分别为 0.71 和 0.64, 纳什效率系数分别为 0.74 和 0.70。

本文以灰关联分析为基础建立了作物蒸散量 GM(1,n)模型, 该模型具有适用、精度高等优点, 可用于蒸散预测。不同土壤、不同作物的灰色预测模型构建及其在大田尺度上的应用需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1] Ortega-Farias S, Olioso A, Antonioletti R, et al. Evaluation of the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration [J]. *Irrigation Science*, 2004,23(1):1-9.
- [2] 高磊,申双和,邵立瑛,等. 水稻蒸散特征及日尺度作物系数估算[J]. *中国农业气象*, 2016,37(2):158-165. (GAO Lei, SHEN Shuanghe, SHAO Liying, et al. Evapotranspiration characteristics of rice and estimation of daily-scale crop coefficients [J]. *Chinese Agricultural Meteorology*, 2016,37(2):158-165. (in Chinese))
- [3] 张薇,霍树义,贾悦,等. 机器学习模型在河北省参考作物蒸散量计算中的比较[J]. *节水灌溉*, 2018,(4):50-53+58. (ZHANG Wei, HUO Shuyi, JIA Yue, et al. Comparison of machine learning models in calculation of reference crop evapotranspiration in Hebei province [J]. *Water Saving Irrigation*, 2018,(4):50-53+58. (in Chinese))
- [4] 李玫,邱诚,周洋,等. 基于气象因子敏感性的参照蒸散发简化计算模型[J]. *人民长江*, 2015,46(11):18-20. (LI Mei, QIU Cheng, ZHOU Yang, et al. Simplified calculation model of reference evapotranspiration based on meteorological factor sensitivity [J]. *Yangtze River*, 2015,46(11):18-20. (in Chinese))
- [5] Goyal R K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India) [J]. *Agricultural Water Management*, 2004,69(1):1-11.
- [6] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. *Cropevapotranspiration: Guide-Lines for Computing Crop Water Requirements* [M]. Rome: FAO, 1998:41-202.
- [7] Tabari H, Kisi O, Ezani A, et al. SVM, ANFIS, regression and climate based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment [J]. *Journal of Hydrology*, 2012,444-445:78-89.
- [8] Ding R, Kang S, Li F, et al. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010,98(1):87-95.
- [9] 李杰,吴杨焕,陈锐,等. 基于大型称重式蒸渗仪研究北疆滴灌麦田蒸散量[J]. *作物学报*, 2016,42(7):1058-1066. (LI Jie, WU Yanghuan, CHEN Rui, et al. Study on evapotranspiration of drip irrigation wheat field in northern Xinjiang based on large scale lysimeter [J]. *Crop Journal*, 2016,42(7):1058-1066. (in Chinese))
- [10] 汪秀敏,申双和,韩晓梅,等. 大型称重式蒸渗仪测定的冬小麦农田的蒸散规律研究[J]. *气象与环境科学*, 2011,34(4):14-18. (WANG Xiumin, SHEN Shuanghe, HAN Xiaomei, et al. Study on evapotranspiration of winter wheat field measured by large scale lysimeter [J]. *Meteorological and Environmental Science*, 2011,34(4):14-18. (in Chinese))
- [11] 聂兵其,汤明高,邵山,等. 基于灰色关联法的涉水边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. *长江科学院院报*, 2019,36(1):123-126. (NIE Bingqi, TANG Minggao, SHAO Shan, et al. Sensitivity analysis of factors affecting stability of water-slope slope based on grey correlation method [J]. *Yangtze River Academy*, 2019,36(1):123-126. (in Chinese))
- [12] 栾紫清. 基于灰色关联与预测模型分析陕西省交通运输碳排放[J]. *汽车实用技术*, 2019,(3):121-122+141. (LUAN Ziqing. Analysis of traffic carbon emissions in Shaanxi province based on grey correlation and forecasting model [J]. *Automotive Practical Technology*, 2019,(3):121-122+141. (in Chinese))
- [13] 王志强,朝伦巴根,柴建华. 用多变量灰色预测模型模拟预测参考作物蒸散量的研究 [J]. *中国沙漠*, 2007,(4):584-587. (WANG Zhiqiang, CHAO Lunbagen, CHAI Jianhua. Research on simulating and predicting evapotranspiration of reference crops with multivariate grey forecasting model [J]. *Chinese Desert*, 2007,(4):584-587. (in Chinese))
- [14] 毕永. 高级计算器在灰色预测 GM(1,1)模型精度检验中的使用[J]. *世界最新医学信息文摘*, 2019,19(30):270-271. (BI Yong. Use of advanced calculator in grey prediction GM(1,1) model accuracy test [J]. *World's Latest Medical Information Digest*, 2019,19(30):270-271. (in Chinese))
- [15] Clark G A, Smajstrla A G, Zazueta F S. Atmospheric Parameters which Affect Evapotranspiration [M]. Florida:University of Florida, 1989:1-6.
- [16] 郭春明,任景全,张铁林,等. 东北地区春玉米生长季农田蒸散动态变化及其影响因子[J]. *中国农业气象*, 2016,37(4):400-407. (GUO Chunming, REN Jingquan, ZHANG Tielin, et al. Dynamic change of farmland evapotranspiration and its influencing factors in spring maize growing season in Northeast China [J]. *Chinese Agricultural Meteorology*, 2016,37(4):400-407. (in Chinese))
- [17] 刘美含,史海滨,李仙岳,等. 河套灌区玉米农田蒸散动态变化及其影响因子的通径分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2018,36(11):1081-1086. (LIU Meihan, SHI Haibin, LI Xianyue, et al. Path analysis of evapotranspiration dynamic change and its influencing factors in maize farmland in hetao irrigation district [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018,36(11):1081-1086. (in Chinese))
- [18] 米娜,张玉书,陈鹏狮,等. 玉米农田蒸散过程及其对气候变化的响应模拟[J]. *生态学报*, 2010,30(3):698-709. (MI Na, ZHANG Yushu, CHEN Pengshi, et al. Evapotranspiration process of maize farmland and its response to climate change [J]. *Journal of Ecology*, 2010,30(3):698-709. (in Chinese))
- [19] 阳伏林,张强,王文玉,等. 黄土高原春小麦生长季农田蒸散量动态变化及其影响因子[J]. *中国农业气象*, 2016,37(4):400-407. (YANG Fulin, ZHANG Qiang, WANG Wenyu, et al. Dynamic change of farmland evapotranspiration and its affecting factors in spring wheat growing season in the Loess Plateau [J]. *Chinese Agricultural Meteorology*, 2016,37(4):400-407. (in Chinese))

[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2008. (in Chinese)

1986,(5):42-44. (MING Muhe. Discussion on the problem of deep water salinization in Hengshui [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1986,(5):42-44. (in Chinese))

[10] 明木和. 衡水深层淡水咸化问题的探讨 [J]. 水文地质工程地质,

### Study on Inter-layers Hydraulic Connection of Porous Aquifers in the Wensihe River Alluvial Flood Plain in Shandong Province

CHEN Hao<sup>1,2</sup>, WANG Jiading<sup>1</sup>, YE Jinxia<sup>2</sup>

(1. North West University, Xi'an 710069, China; 2. Lunan Geological Engineering Investigation Institute of Shandong Province, Yanzhou 272100, China)

**Abstract:** The Quaternary thickness of the axis part in alluvial flood plain is relatively large in the Wensihe River, and its pore groundwater is stratification-distributed. The water quality of each layer is various due to different recharge and runoff conditions. It is of great significance to study the hydraulic relationship between aquifers on water resources management and sustainable development and utilization of high-quality groundwater. This paper conducted a group hole pumping test to study the hydraulic relationship between shallow and deep pore water in the Yuanzhuang water source. The water quality indexes of the 6 pumping wells after pumping was higher than that before. The highest one was cross-strata well nearby with 4 indicators averagely increased by 1.07 times. During the pumping test, the water stage in the deep observation hole was consistent with the pumping well while that in the shallow observation hole showed a natural fluctuation except the slight decrease in the cross-strata well. The recharge of shallow pore water near the cross-strata well was four times higher than other pumping wells. The quality before and after pumping, dynamic variation rule of water level and the recharge proportion of shallow pore water in the pumping well indicates that deep pore water is affected by shallow pore water in the process of development and utilization. However, the hydraulic relations between the aquifers could be weakened by reasonable impervious method.

**Key words:** group hole pumping test; porous aquifer; impervious; hydraulic connection

(上接第 70 页)

### Study on Grey Model of Summer Maize Evapotranspiration Based on Hydrometeorological Elements in Huaibei Plain

FAN Yue<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, WANG Zhenlong<sup>3</sup>, LV Haishen<sup>1</sup>, XU Yingying<sup>1</sup>, MEI Haipeng<sup>3</sup>, HU Yongsheng<sup>3</sup>, WANG Yining<sup>4</sup>

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Information Center (Hydrology Monitor and Forecast Center), MWR, Beijing 100053, China; 3. Water Resources Research Institute of Anhui Province, Bengbu 233000, China; 4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Accurate prediction of crop evapotranspiration is critical to developing irrigation schedules and increasing water use efficiency. In order to reflect the dynamic change of the daily evapotranspiration of crops and consider the impact of meteorological elements on crop growth, grey correlation method was used to analyze the correlation between corn evapotranspiration and 14 various Hydrometeorological elements. 12 GM (1,n) models were established to predict daily evapotranspiration based on the data of large-scale weighing lysimeter and weather monitoring station in Wudaogou hydrological experimental station. The results show that the gray correlation degree between summer corn evapotranspiration and various influencing factors in Huaibei Plain arranged in order is: water vapor pressure difference > daily maximum temperature > ground temperature 100cm > ground temperature 30cm > ground temperature 10cm > ground temperature 50cm > daily average temperature > relative humidity > absolute humidity > leaf area index > saturation difference > daily minimum temperature > sunshine hours > wind speed. The modeling results under different combinations of influencing factors indicate that when the input elements are range from 4 to 8, the model prediction is qualified, the posterior difference ratio C is less than 0.45, and the small error probability P is greater than 0.8. When using the GM (1,7) model, C is about 0.327 and P is about 0.984. And the model has the highest prediction accuracy. It can be used for evapotranspiration prediction. The model has the highest prediction accuracy and can be used for evapotranspiration prediction.

**Key words:** evapotranspiration; grey correlation analysis; GM(1,n) model; summer corn; Huaibei Plain