

基于改进 Valiantzas 方程的黄河下游柳园口灌区 ET_0 预测研究

景 明^{1,2},王军涛^{1,2},程献国^{1,2},高子乐³

(1.黄河水利委员会黄河水利科学研究院,河南 郑州 450003; 2.黄河流域农村水利研究中心,河南 新乡 453003;
3.河南省豫东水利工程管理局惠北水利科学试验站,河南 开封 475000)

摘 要: 根据黄河调度旬方案编制对作物需水量逐旬预报的要求,分析了参考作物需水量计算方法。以河南省柳园口灌区为典型,对以空气相对湿度等为输入参数的 Valiantzas 方程进行了改进,研究建立了基于特征气温的空气相对湿度预测方法。采用多元回归方法,建立了以特征气温、日序数为输入的改进 Valiantzas 方程,并对模型精度进行了验证。研究表明,改进的 Valiantzas 方程的相对误差比原方程可减少 12.4%,均方根偏差降低 37.4%,相关系数提高 13.4%。同时,改进的 Valiantzas 方程能够实现对未来 10 d 作物需水量的预测,符合黄河水量旬精细调度对基础数据中期预报的要求。

关键词: 参考作物需水量;Valiantzas 方程;改进;预测;黄河下游
中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A

Improved Valiantzas equation for ET_0 prediction in typical Yellow River irrigation district

JING Ming^{1,2}, WANG Jun-tao^{1,2}, CHENG Xian-guo^{1,2}, GAO Zi-le³

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Resarch, YRCC, Zhengzhou, Henan 450003, China;
2. Yellow River Irrigation, Drainage and Rural Water Supply Research Center, Xinxiang, Henan 453003, China;
3. Huibei Water Conservancy Science Experimental Station of East Henan Water Conservancy Project Administration, Kaifeng, Henan 475000, China)

Abstract: Selecting the Liuyuankou irrigation area in Henan Province as the representative area, the Valiantzas equation with the air relative humidity (RH) as the input parameter is improved and that based on the characteristic temperature was also established in this paper. Using the multiple regression method, an improved Valiantzas equation with the input of characteristic temperature and daily ordinal number was established, and the accuracy of the model was verified. Compared with original equation, the improved Valiantzas equation had a 12.4% reduction in the relative error and a 37.4% in root mean square deviation. In addition, the correlation coefficient was increased by 13.4%. Therefore, the improved Valiantzas equation could provide basic information about crop water requirement forecast at ten-day scale.

Keywords: reference crop evapotranspiration; Valiantzas equation; prediction; Lower Yellow River

根据 2006 年国务院第 472 号令《黄河水量调度条例》,黄河水资源实行年度水量调度计划与月、旬水量调度方案以及实时调度指令相结合的管理方式对干流用水过程进行统一调度,其中用水高峰时制订并下达旬水量调度方案。旬调度方案需要对未来 10 d 左右各省(区)引黄需水量作出预测,重点是确定干流各省(区)灌溉需水量,需要对不同区域灌区的引黄灌溉过程作出预测。特别是 2008 年黄河水利委员会提出黄河功能性不断流^[1]以来,对农业灌溉用水过程的准确判断成为黄河水量旬调度方案编制的关键技术问题。作为预测农业灌溉需水的重要参数,参考作物需水量(Evapotranspiration, ET_0)的预测精度在很大程度上决定了灌溉预报的准确性和有效性^[2-4]。目前计算 ET_0 的常用方法是联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)推荐的 Penman-Monteith 方法(简称 P

-M 方法)^[5],但该方法输入参数较多,且部分参数不能通过天气预报等方式实现量化预报,导致 P-M 方法的预测 ET_0 功能较差。国内外学者对 ET_0 计算和预测方法开展了大量研究^[6-14],其中应用较为广泛的是逐日均值修正模型^[2]。2006 年,Valiantzas 研究建立了以特征气温和空气相对湿度为基本输入的 ET_0 计算方法,即 Valiantzas 方程。该方程已在欧洲、非洲和印度等地得到了成功应用^[8,15]。徐冬梅等^[16]采用该方法研究了华北地区参考作物需水量变化。潘云等^[17]首次将该方程引入中国并进行了修订,认为采用修订后的 Valiantzas 方法计算精度高于 Priestley-Taylor 模型^[19]和 Hargreaves 模型^[20],在风速、日照时数缺乏情况下应用该方法计算 ET_0 结果较好,其计算 ET_0 的精度适合中国大部分地区。但潘云修订后的 Valiantzas 方法仍需空气相对湿度(Relative air humidity, RH)作为基本输入参数,而 RH 目前尚不能实现量化预报,因此,本文研究建立了 RH 预测方法,进一步减少了 Valiantzas 方程输入项的数量,并以黄河下游柳园口灌区为典型对 Valiantzas 方法进行了改进,增强其对 ET_0 的预测功能,为黄河下游地区引黄灌溉需水量预报提供参考,同时为黄河水量旬调度方案编制提供技术支撑,推进黄河水量精细调度。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河南、山东两省历来是黄河水量调度的重要区域,灌区主要分布在黄河下游冲积平原。黄河下游引黄灌区属暖温带半湿润季风气候,年均降水量 510~790 mm,多年平均蒸发量 1100~1400 mm,冬春季雨雪稀少。灌区土壤主要有砂土、砂壤土、壤土和黏土。本文选取河南省境内的柳园口灌区为典型灌区。灌区位于河南省开封市,处在东经 114°21'~114°27',北纬 34°35'~34°53',在惠济河以北,黄河大堤以南,东界三义寨引黄灌区,西连黑岗口灌区。灌区土壤主要有砂壤土、轻壤土,多年平均降水量 627 mm,多年平均蒸发量 1316 mm。柳园口灌区在黄河下游引黄灌区中段,其土壤特性、气候条件等与黄河下游引黄灌区具有较好的一致性,且黄河水是该灌区唯一的地表水灌溉水源,其气候特征、水资源条件、农业种植模式等在黄河下游众多引黄灌区中具有一定的代表性。

1.2 ET_0 计算方法

本文计算 ET_0 的气象数据选用位于柳园口灌区的河南省豫东水利科学试验局惠北水利科学试验

站气象观测场 1993—2011 年的逐日气象资料,包括太阳辐射、日照时数、气温、风速、空气相对湿度等参数。其中,采用 1993—2010 年数据建立相关模型,以 2011 年的相关数据验证模型精度。

1.2.1 Penman-Monteith 方法简介 目前计算 ET_0 的常用方法是 FAO 推荐的基于能量平衡和空气动力学原理的 Penman-Monteith 方法,其计算方程为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中, ET_0 为参考作物腾发量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率; R_n 为太阳辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$); γ 为湿度计常数($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); T 为空气温度($^\circ\text{C}$); u_2 为在地面以上 2 m 高处的风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为日平均饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa)。

本文采用 FAO 推荐的 ET_0 Calculator V31 计算了柳园口灌区逐年逐日 ET_0 值。其中,对于气象站没有监测的项目,根据文献[5]的方法,采用气温、空气相对湿度、日照时数等常规观测资料进行推求确定。

1.2.2 Valiantzas 方法简介 根据 FAO 推荐方法计算参考作物需水量输入的参数较多,且空气相对湿度、风速、日照时数等参数目前尚未实现实时量化预报,影响到参考作物需水量的中短期预报精度,与当前黄河水量旬调度方案编制的基础数据预报时段要求不一致。因此,基于常规气象预报数据的参考作物需水量计算方法,可以为土壤墒情预测、引黄灌区农业灌溉预报等提供有效的技术方法。2006 年,Valiantzas 等^[17]根据能量平衡理论,对 Penman-Monteith 方法进行了简化处理,建立了潜在水面蒸发的计算方程,即:

$$E_{\text{pen}} = E_{\text{rads}} - E_{\text{radL}} + E_{\text{aero}} \quad (2)$$

式中, E_{pen} 为潜在水面蒸发量(mm); E_{rad} 为入射短波辐射(mm); E_{radL} 为向外长波辐射(mm); E_{aero} 为空气动力部分(mm)。

在此基础上,Valiantzas 通过设定平均风速和水面反射率,建立了无风速数据输入的水面潜在蒸发量计算公式:

$$E_{\text{PEN}} \approx 0.047 \cdot R_s \cdot \sqrt{T + 9.5} - 2.4 \left(\frac{R_s}{R_A} \right) + 0.09 \cdot (T + 20) \cdot \left(1 - \frac{RH}{100} \right) \quad (3)$$

式中, E_{PEN} 为水面潜在蒸发量(mm); R_s 为太阳辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为平均气温($^\circ\text{C}$); R_A 为大气层外太阳辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),根据 Hargreaves 能量方

程^[20],它主要与日地距离、太阳赤纬、日没时角、日出时角等参数有关,可通过地理纬度、太阳赤纬角和日序数通过理论计算确定^[21]; RH 为空气相对湿度(%)。

潘云等^[17]通过修订地表发射率等方法,对 Valiantzas 方法进行了修订,建立了计算参考作物需水量的 Valiantzas 修订方法:

$$ET_0 = 0.314 \cdot k_{Rs} \cdot \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} \cdot R_A \cdot \frac{\Delta}{\Delta + 0.0617} - 2.4 \cdot k_{Rs}^2 (T_{\max} - T_{\min}) + 0.09 \cdot (T + 20) \cdot (1 - \frac{RH}{100}) \quad (4)$$

式中, K_{Rs} 为调节系数,FAO 建议取值为 0.16 ~ 0.19,根据潘云等人的研究,取 0.17; $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 为日最高和最低气温(℃); Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率,计算方法详见参考文献[6]。

从中国气象数据网、欧洲中期天气预报中心等气象数据平台获悉,目前气象数值预报尚不能提供未来 10 d 的空气相对湿度(RH)预报值。因此,为提高 Valiantzas 方程的预测功能,本文在研究建立 RH 预测方法的基础上,进一步改进 Valiantzas 方程,以适应黄河水量调度对灌区需水信息研判的实际需求。

1.2.3 改进 Valiantzas 方法

(1) 基于常规气象预报数据的 RH 预测方法

通过分析,笔者首先建立了关于最高气温和最低气温的特征气温函数表达式:

$$W(T_{\max}, T_{\min}) = \exp(T_{\max} - T_{\min})^{0.21} \quad (5)$$

式中, $W(T_{\max}, T_{\min})$ 为逐日最高气温和最低气温的函数。

此外,研究建立了空气相对湿度函数表达式:

$$G(RH) = (273.3 + RH)/(T_{\max} - T_{\min}) \quad (6)$$

式中, $G(RH)$ 空气相对湿度函数。

依据式(5)和式(6),以柳园口灌区 1993—2010 年观测的逐日 RH , $T_{\max}$, $T_{\min}$ 为输入,分别计算 $W(T)$ 和 $G(RH)$,寻求二者规律建立关系,推算 RH 估算式 $RH = f(T_{\max}, T_{\min})$ 。

(2) Valiantzas 方法改进

通过对式(4)的研究认为,该表达式右部可分解为三项,其中 K_{Rs} 可视为常数项。因此,式(4)可表示为:

$$ET_0 = a \cdot \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} \cdot R_A \cdot \frac{\Delta}{\Delta + 0.0617} + b \cdot (T_{\max} - T_{\min}) + c \cdot (T + 20) \cdot (1 - \frac{RH}{100}) \quad (7)$$

式中, a 、 b 、 c 为待定系数,其它符号意义同前。

以 Penman - Monteith 方法计算的柳园口灌区 ET_0 多年逐日平均值为因变量,对上式进行多元回归分析,确定待定系数。

2 结果与分析

2.1 空气相对湿度预测

根据上述方法,采用典型灌区 1993—2010 年逐日最高气温、最低气温和空气相对湿度,分别计算式(5)和式(6),建立特征气温函数与空气相对湿度函数之间的关系,见图 1。

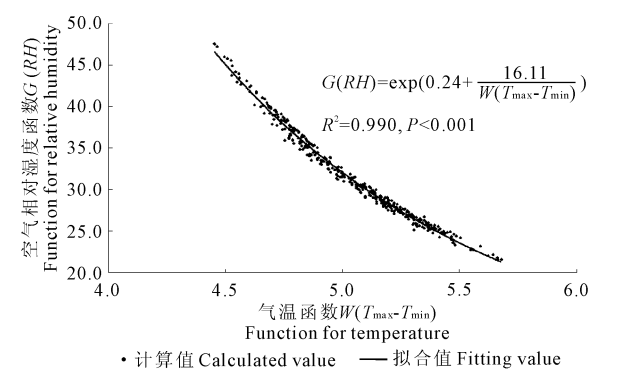


图 1 空气相对湿度与气温函数之间的关系

Fig.1 Functions of relative humidity and air temperature

从图 1 中可以看出,特征气温函数 $W(T_{\max} - T_{\min})$ 与空气相对湿度函数 $G(RH)$ 之间存在较好的 S 关系。据此可推求计算 RH (空气相对湿度)的方法,见下式:

$$RH = (T_{\max} - T_{\min}) \exp[0.24 + \frac{16.11}{\exp(T_{\max} - T_{\min})^{0.21}}] - 241.0 \quad (8)$$

将典型灌区多年日均温差代入式(8),得空气相对湿度估算值。与实测值比较表明,当温差小于 5℃时,按照式(8)计算的部分空气相对湿度超过 100%,与实际情况不符。大量分析表明,典型灌区日温差小于 5℃的天数一般年份不超过 30 d,且当日温差小于 5℃时,空气相对湿度平均值在 89%左右,且偏差较小。因此,对式(8)作进一步分段计算如下:

$$RH = \begin{cases} 89, (T_{\max} - T_{\min}) < 5^{\circ}\text{C} \\ (T_{\max} - T_{\min}) \exp[0.24 + \frac{16.11}{\exp(T_{\max} - T_{\min})^{0.21}}] - 241, (T_{\max} - T_{\min}) \geq 5^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (9)$$

根据典型灌区 2011 年实测空气相对湿度,以及天气预报提供的未来 10 d 最高气温和最低气温,对式(9)的计算精度进行验证,见图 2。

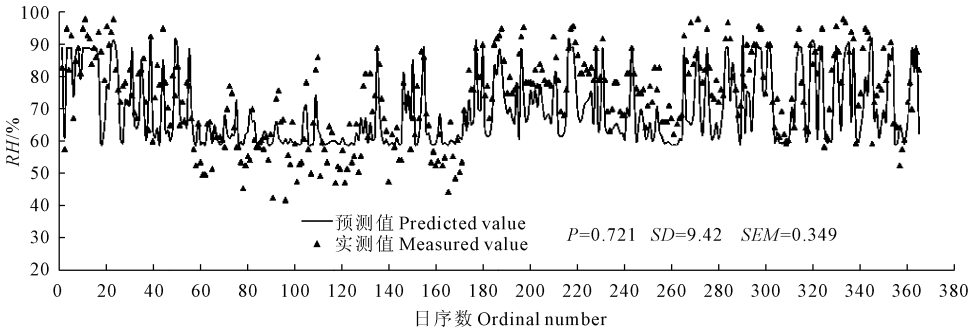


图 2 典型灌区空气相对湿度预测(2011 年)

Fig.2 Predicted values of relative humidity in typical irrigation area at 2011

从图 2 中可以看出,典型灌区 2011 年空气相对湿度实测值和预测值之间相关系数为 0.728,检验为极显著相关,标准偏差为 9.06,标准误差为 0.474。其中,标准偏差相对较大,且集中体现在 3—5 月份。初步分析认为,该时段典型灌区风速相对较大,而本文研究并未考虑风速的影响,致使该阶段空气相对湿度实测值和预测值之间差异相对较大。但对二者均值比较认为,实测值与计算值之间并不存在显著差异。因此,本文采用式(9)作为预测空气相对湿度的预测方法,解决预报 ET_0 基础参数难以直接获取的问题。

2.2 改进 Valiantzas 方程

以典型灌区 1993—2010 年逐日相关数据为基础,采用 Penman – Monteith 方法计算逐日 ET_0 ,并采用多元回归方法确定式(7)的待定系数: $a = 0.159$, $b = -1.308$, $c = 0.045$,相关系数为 0.986。计算结果见图 3。

综合分析,改进的 Valiantzas 方程可表示为:

$$ET_0 = 0.159 \cdot \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} \cdot R_A \cdot \frac{\Delta}{\Delta + 0.0617} - 1.308 \cdot (T_{\max} - T_{\min}) + 0.045 \cdot (T + 20) \cdot (1 - \frac{RH}{100}) \quad (10)$$

从上式可以看出,改进 Valiantzas 方法包括 5 个输入参数,分别是日最高气温、日最低气温和平均气温,以及日序数、研究区地理纬度。其中,气温数据可以从常规天气预报等信息平台获取。

2.3 方法验证

为验证上述模型在典型灌区的应用效果,采用 Penman – Monteith 方法计算了典型灌区 2011 年逐日 ET_0 值,并以典型灌区 2011 年 1 月 1 日为起点,以天气预报提供的未来 10 d(如 1 月 1 日至 1 月 10 日)的逐日最高、最低气温作为输入,结合式(9)空气相对湿度预测方法,采用式(13)计算逐日 ET_0 预测值,同时与潘云等修正的 Valiantzas 方法进行比较,见图 4。

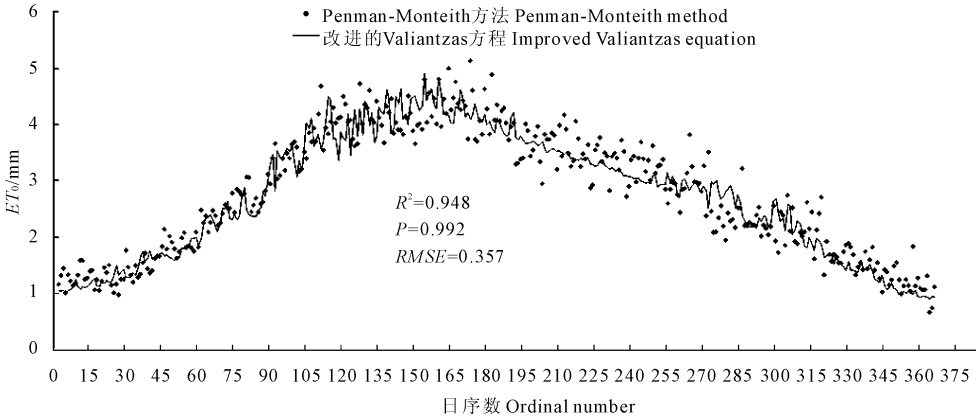


图 3 改进的 Valiantzas 方程预测多年平均逐日 ET_0 (2005—2010 年)

Fig.3 The average daily ET_0 by improved Valiantzas equation(2005—2010)

与 Penman – Monteith 方法相比,本文研究改进 Valiantzas 方程和潘云修订的 Valiantzas 方法计算 ET_0 的均差、相对误差、均方根偏差和相关系数如表

1 所示。从表中可以看出,二者计算结果均与 P – M 方法计算结果呈极显著相关,但改进的 Valiantzas 方程相关系数更高。与原方程相比,改进 Valiantzas 方

程在预测典型灌区 2011 年的 ET_0 相对误差减少 12.4%,均方根误差降低 37.4%,相关系数提高 13.4%。因此,改进的 Valiantzas 方法的预测精度明显高于原方程,能够更好地预测典型灌区参考作物需水量变化过程。同时,本文改进的 Valiantzas 方法

以目前天气预报可提供的日最高气温、最低气温、平均气温为主要输入参数,能够实现对参考作物需水量的中期预报(3~10 d),与黄河水量旬调度要求提供未来 10 d 逐日作物需水量等基础数据的实际需求一致。

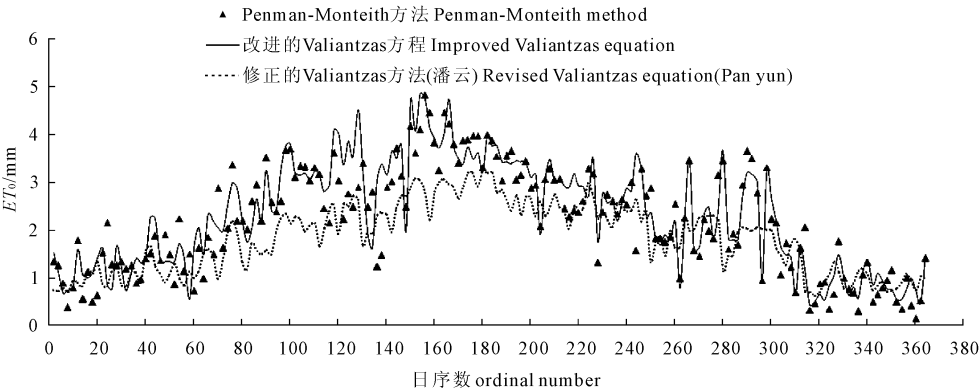


图 4 ET_0 计算和预测结果

Fig.4 Calculated and predicted ET_0 value by different methods

表 1 改进前后的 Valiantzas 方程计算 ET_0 与 Penman – Monteith 方法计算精度比较				
Table 1 ET_0 computational accuracy of the original and improved Valiantzas equation with Penman – Monteith model				
方法 Methods	均差 MD	相对误差 RE	均方根误差 RMSE	相关系数 R^2
改进 Valiantzas 方程 Improved Valiantzas method	0.108	4.91 %	0.496	0.905 **
修正 Valiantzas 方法(潘云) Corrected Valiantzas method	-0.382	17.28 %	0.792	0.784 **

注: ** 表示极显著相关。 Note: ** highly significant.

3 讨 论

在气象资料缺乏情况下,FAO 推荐以气温为主要输入的 Hagreaves 方法计算参考作物需水量,但该方法在风速高于 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和空气相对湿度较高的情况下容易产生对 ET_0 计算的误差^[5],并不适合黄河下游灌区的应用条件。茆智等^[2]建立的逐日均值修正模型需要长系列基础数据确定天气类型修正系数,但以灌区为单元的历史气象资料难以对“曇、阴”等天气类型作出精确判断。本文在潘云等学者研究的基础上,采用常规天气预报提供的气温数据,建立了估算空气相对湿度的方法,进一步降低了 Valiantzas 方程输入参数种类,构建了适合典型引黄灌区的 ET_0 计算和预测方程。本文采用的多元回归方法虽然提高了 Valiantzas 方程在典型灌区的预测精度,但由于经验系数需要结合当地气候、地理等条件确定,应用于其它区域时,需要重新确定相应的待定系数。因此,下一步应结合空气动力学、数值模拟等方法,开展参考作物需水量预测方法的通用性研究,以期更精确地应用于不同区域作物需水量预

测,更好地服务于黄河水量精细调度,并为引黄灌区灌溉水资源需求研判等提供基础数据支撑。

4 结 论

本文在分析 Valiantzas 方程及其改进方法计算 ET_0 的基础上,确定出采用改进方程计算 ET_0 的主要输入参数为特征气温和空气相对湿度。其中,中期天气预报能预报特征气温(最高气温、最低气温、日均气温),但目前尚未实现对空气相对湿度的量化预报。为解决空气相对湿度量化预报技术的问题,本文以河南省柳园口灌区 1993—2010 年逐日最高气温、最低气温、空气相对湿度等数据为基础,研究建立了空气相对湿度预测的方法。采用 2011 年相关数据验证表明,本文研究建立的空气相对湿度计算方法能够反映典型引黄灌区逐日空气相对湿度变化过程。此外,对潘云等人修正的 Valiantzas 方程进行了改进,根据典型引黄灌区的多年逐日 ET_0 变化特征,分析确定了修正 Valiantzas 方程的多元回归方程。以常规天气预报提供未来 10 d 的特征气温数据作为主要输入,采用 Penman – Monteith 方法计算

的 2011 年逐日 ET_0 值作为标准值,分析了本文研究提出改进 Valiantzas 方程的计算精度。分析认为,本文研究改进的 Valiantzas 方程的相对误差、均方根误差等均低于已有修正 Valiantzas 方法,且相关系数也相对较高。因此,改进的 Valiantzas 方程可实现基于常规天气预报的灌区参考作物需水量预测,符合黄河水量精细调度的实时性、精确性、差异性、动态性的要求^[18],能够为黄河水量旬调度方案编制提供技术支持,并可以为灌区作物灌溉需水量的中期预报提供基础数据支持。

参 考 文 献:

[1] 李国英. 努力实现黄河功能性不断流[N]. 黄河报, 2008 - 1 - 26.

[2] 菲 智, 李远华, 李会昌. 实时灌溉预报[J]. 中国工程科学, 2002, 4(5): 24-33.

[3] 彭世彰, 胡 玲, 张利昕. 国内外灌溉预报研究现状与动态分析[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(4): 6-10.

[4] 景 明, 程献国, 王军涛, 等. 黄河下游引黄灌溉需水预测关键技术分析[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(6): 60-63.

[5] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guide lines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: United Nations FAO, Engineering, 2003, 129(1): 53-63.

[6] 罗 毅, 雷志栋, 杨诗秀. 潜在腾发量的季节性变化趋势及概率分布特性研究[J]. 水科学进展, 1997, 8(4): 308-312.

[7] 罗玉峰, 崔远来, 蔡学良. 参考作物腾发量预报的傅立叶级数模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(6): 45-48.

[8] Valiantzas J D. Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331: L: 690-702.

[9] 罗玉峰, 李 思, 彭世彰, 等. 基于气温预报和 HS 公式的参考

作物腾发量预报[J]. 排灌机械工程报, 2013, 31(11): 987-992.

[10] Luo Yufeng, Chang Xiaomin, Peng Shizhang, et al. Short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using the Hargreaves-Samani model and temperature forecasts[J]. Agricultural Water Management, 2014, (36): 42-51.

[11] 赵 琪, 罗玉峰, 彭世彰, 等. 基于天气预报和 Penman - Monteith 公式的短期逐日参考作物腾发量预报[J]. 节水灌溉, 2014, (1): 1-4.

[12] Perera K C, Western W A, Nawarathna B, et al. Forecasting daily reference evapotranspiration for Australia using numerical weather prediction outputs[J]. Agric Forest Meteorol, 2014, (194): 50-63.

[13] 谢梅香, 罗玉峰, 钱子嘉, 等. 基于气温预报和神经网络的参考作物腾发量预报[J]. 节水灌溉, 2015, (2): 33-36.

[14] Luo Yufeng, SeydouTraore, XinweiLyu, et al. Medium range daily reference evapotranspiration forecasting by using ANN and public weather forecasts[J]. Water Resources Management, 2015, 9(10): 3863-3876.

[15] 徐冬梅, 常向前, 王路平, 等. 灌区水资源实时调度研究与应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2007: 61-63.

[16] Lewis T, Lamoureux S F. Twenty-first century discharge and sediment yield predictions in a small high Arctic watershed[J]. Global and Planetary Change, 2010, 71(1/2): 27-41.

[17] 潘 云, 宫辉力, 李小娟, 等. 蒸散发模拟的 Valiantzas 方法在中国的应用[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 30-37.

[18] 苏茂林. 黄河水资源精细调度研究[J]. 人民黄河, 2007, 29(1): 1-2, 60.

[19] Priestly C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat and evaporation using large-scale parameters[J]. Mon Weather Rev, 1972, 100: 81-92.

[20] Hargreaves G H, Allen R G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(1): 53-63.

[21] 翁笃鸣. 中国辐射气候[M]. 北京: 气象出版社: 1997: 26-37.

(上接第 48 页)

[17] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 66-74.

[18] Liu X P, He Y H, Zhao X Y, et al. Characteristics of deep drainage and soil water in the mobile sandy lands of Inner Mongolia, Northern China[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(2): 238-250.

[19] Sherrod L A, Peterson G A, Westfall D G. Cropping intensity enhances soil organic carbon and nitrogen in a no-till agroecosystem[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68: 1533-1539.

[20] Wang X B, Hoogmoed W B, Cai D X, et al. Crop residue, manure and fertilizer in dryland maize under reduced tillage in northern Chi-

na: II nutrient balances and soil fertility[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 79(1): 17-34.

[21] 吴祥云, 张 黎, 丁玉荣, 等. 科尔沁沙地农牧交错带土地利用方式对土壤特性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 116-119.

[22] 赵哈林, 张铜会, 周瑞莲. 科尔沁沙地沙质农田的土壤环境与生产力形成过程[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 194-199.

[23] 刘任涛, 赵哈林. 科尔沁沙地土地利用变化对土壤特性的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2079-2084.