

日尺度下的干旱区成龄枣树耗水量 敏感因素建模分析

魏光辉,马亮,马英杰,董新光

(新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:以新疆阿克苏地区成龄枣树为研究对象,以日均气温(x_1)、日均相对湿度(x_2)、日均风速(x_3)、日太阳辐射总量(x_4)、日均大气压(x_5)、0~100 cm土壤日均含水率(x_6)及0~20 cm土壤日均温度(x_7)为模型影响因子,采用偏最小二乘回归法建立了枣树耗水量预测模型,在此基础上运用缺省因子法分析了枣树耗水量对各因子的敏感性,并采用灰色关联分析法加以验证。结果表明:偏最小二乘回归模型(PLSR)具有较高的模拟精度(相关系数 $r = 0.9789$),不仅能够定量预测枣树耗水量(平均相对误差为 6.40%),而且能够从机理上解释各因素对耗水量的影响;枣树耗水量对太阳辐射能量、土壤含水率和温度这3因素最为敏感(敏感性指数分别为 3.24、2.18 和 2.09);基于缺省因子法的枣树耗水敏感因素排序($x_4 > x_1 > x_6 > x_3 > x_7 > x_2 > x_5$)与灰色关联分析计算结果($x_4 > x_1 > x_6 > x_3 > x_7 > x_5 > x_2$)基本一致,尤其在主要影响因素的判别上是完全一致的。

关键词:枣树;耗水量;温度;土壤含水率;太阳辐射;偏最小二乘回归;灰色关联分析;干旱区

中图分类号: S665.1; S607+.1 **文献标志码:** A

Modeling analysis on sensitive factors of water consumption for mature jujube tree under daily scale in arid area

WEI Guang-hui, MA Liang, MA Ying-jie, DONG Xin-guang

(School of Water Resources and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: Taking the mature jujube tree in Akesu, Xinjiang as the research object, the average daily temperature (x_1), relative humidity(x_2), wind speed(x_3), solar radiation(x_4), atmospheric pressure(x_5), soil moisture content in 0~100 cm(x_6) and soil temperature in 0~20 cm(x_7) as the model influence factors, has established the water consumption forecast model by using the PLSR method. On the basis of default factor method, has analyzed the sensitivity of water consumption to each factor, furthermore using the gray relational analysis method to test and verify. The results showed that: The PLSR model had rather high accuracy(correlation coefficient $r = 0.9789$), not only quantitative forecast the water consumption of jujube tree (average relative error was 6.4%), but also explain the impact of each factor on water consumption through mechanism. The three factors as solar radiation, soil moisture and temperature were the most sensitive factors on water consumption of jujube (sensitivity index were 3.24, 2.18 and 2.09, respectively). Based on the default factor method, has sequenced the sensitive factors as ($x_4 > x_1 > x_6 > x_3 > x_7 > x_2 > x_5$) almost agreement with the calculated results by the grey relational analysis as($x_4 > x_1 > x_6 > x_3 > x_7 > x_5 > x_2$), especially the main influence factors were completely consistent.

Keywords: jujube tree; water consumption; temperature; soil moisture; solar radiation; PLSR; grey relational analysis; arid area

作物耗水量是农田水量平衡计算的一个重要环节,其计算和预测方法不仅成为农田生态系统水循环和水平衡研究的重要领域,同时在制定农田灌溉

制度、进行水土资源配置等方面也具有非常重要的作用^[1-2]。目前,国内外主要采用彭曼(Penman)方法、蒸发皿观测法、涡动相关观测法和蒸渗仪观测法

收稿日期:2014-03-11

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金资助(2013211B18);新疆水文学及水资源重点学科资助(XJSWSZYZDK20101202)

作者简介:魏光辉(1981—),男,新疆石河子人,高级工程师,博士,主要从事干旱区水资源利用研究。E-mail:xndwgh@sina.com。

通信作者:董新光(1957—),男,山东文登人,教授,博士生导师,主要从事干旱区水资源利用研究。

及卫星遥感反演法来测量或估算作物蒸散量。一般来说,在大尺度、长系列作物蒸散量估算中基本上都采用彭曼法来计算参考作物腾发量,之后再通过作物系数估算作物实际蒸散量^[3-4]。当然,最近有不少研究还用蒸发皿观测的蒸发量,分析了陆面蒸散量的空间分布特征及其对气候变化的响应规律^[5-7]。也有部分研究采用涡动相关法或微气象塔的梯度观测来估算作物蒸散量^[8-10]。蒸渗仪观测法在小尺度水分循环研究中已开始用这种方法^[11-12]。

随着卫星遥感技术的进步,也有尝试使用卫星遥感资料反演作物蒸散量,并取得了一定的成果^[13-14]。但与此同时,对于干旱区影响作物耗水量的敏感因素研究(尤其是关于枣树方面的)迄今未见国内外有过报道。作物耗水量敏感因素的判断,对于进一步挖掘农业节水潜力,促进农业节水灌溉理论与技术的进步具有重要的指导意义。影响作物耗水量的因素比较多,主要可以归纳为以下3个方面^[15]:一是土壤条件(包括土壤含水率、土壤温度、土壤容重等因素);二是生物学因素(包括作物品种、生长阶段、作物特性等因素);三是气象因素(温度、太阳辐射、风速、相对湿度等因素)。本文以新疆塔里木盆地的枣树作物为例,研究干旱区枣树耗水量影响因素,以期缓解塔里木盆地干旱区日趋严峻的水资源短缺提供依据。

目前,关于系统敏感因素的判定方法主要是采用单一的方差分析法^[16]、主成分分析法^[17]、偏相关系数法^[18]、偏导数法^[19]等,这些方法不仅要求大样本,而且要求样本具有典型的概率分布,在实际中很难实现。本文在前人研究基础上,以枣树日耗水量(本文所指耗水量,是指作物蒸腾耗水量与棵间蒸发量之和,下同)为计算尺度,将气象因素(温度、太阳辐射、风速等因素)、土壤条件(土壤温度、土壤含水率)等影响作物耗水量的因素引入到偏最小二乘回归模型中,运用缺省因子法分析各影响因素对枣树耗水量的敏感程度,并采用灰色关联分析法对影响因素进行敏感性排序,最后将两种模型所得结果进行对比,这样既实现了方法对方法的验证,提高了研究结果的可靠度,也为灰色关联分析法的广泛应用提供了实例支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验在新疆阿克苏地区农业科技示范园内

进行,示范园地理位置为 $41^{\circ}16'18''\text{N}$, $80^{\circ}20'03''\text{E}$,海拔1170 m,地下水水位在10 m以下。该地区属于典型的大陆性暖温带干旱沙漠性气候,多年平均气温 10.7°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温为 $3\ 902.9^{\circ}\text{C}$ 左右,多年平均日照时数 $2\ 750\sim 3\ 078\ \text{h}$,全年无霜期约212 d;研究区干旱少雨,多年平均降水量为101.6 mm,主要集中在6—9月,约占全年总降水量的60%以上;多年平均蒸发量为 $2\ 070.4\ \text{mm}$ (直径20 cm的小型蒸发皿观测资料),蒸降比高达20.4,属于极端干旱区;多年平均太阳辐射总量 $546\sim 592\ \text{kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$,有利于果树种植。

试验小区占地面积为 $50\ \text{m}\times 24\ \text{m}$,试验枣树品种为灰枣,树龄5 a,株行距为 $2\ \text{m}\times 3\ \text{m}$ 。试验区土壤质地为壤土,土壤容重为 $1.34\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,田间持水率为34.2%(体积含水率)。灌溉方式为滴灌,水源为当地井水,矿化度为 $0.7\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,试验设计中每组处理设3次重复,设计灌水周期为3组重复的灰枣植株根部土壤30~60 cm深度处平均体积含水率低于20.4%(土壤田间持水率的60%)为临界值,低于此值则开始灌溉,每次灌水定额为 $450\ \text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,生育期累计灌水次数为17次(不含冬、春灌)。试验期间累计降水量为64.3 mm,有效降水量为11.8 mm(以单次降水量 P 在5~50 mm为有效降水量计算依据)^[20]。

1.2 数据获取方法

试验区微气象条件利用美国Davis公司生产的Weather Link自动气象站测得。自动气象站可同步观测日均气温($x_1,^{\circ}\text{C}$)、日均相对湿度($x_2, \%$)、日均风速($x_3, \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、日太阳辐射总量(x_4, J)、日均大气压(x_5, hPa)。而0~100 cm土壤日均含水率($x_6, \%$)与0~20 cm土壤日均温度($x_7,^{\circ}\text{C}$)这两因素采用Hydra仪器自动测得(每组重复设置1台观测仪器),数据采集时间间隔为1 h,Hydra探头埋设深度为100 cm,可分别观测0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~60 cm、60~80 cm、80~100 cm深度处土壤含水率与土壤温度,仪器含水率采集数据精度为0.1%,温度采集数据精度为 0.1°C 。

选取上述7因素为模型输入因素,即自变量;枣树日耗水量(y, mm)为模型输出值,即因变量。各因素的日统计值由于篇幅所限,在此未列出。

1.3 数据计算方法

枣树生育期耗水量采用水量平衡方程计算^[21-22]:

$$P + I + Q_1 + E_g = P_a + R + Q_z + E_p \pm \Delta W \quad (1)$$

式中, P 为有效降水量(mm); I 为灌溉水量(mm); Q_1 、 Q_z 为土壤中水平流入、流出量(mm); E_g 为地下水向上补给量(mm); P_a 为入渗量(渗漏量), 可通过深层渗漏盘测得(mm); R 为地表径流量(mm); E_p 为作物耗水量(mm); ΔW 为土壤储水变量, 其日变化过程可根据 Hydra 仪器自动测得(mm)。

研究选取枣树展叶期(日平均气温稳定在 15℃ 以上) 至收获前的日气象资料和日耗水量数据, 枣树生育期日耗水量过程见图 1。

针对试验区土壤质地(壤土偏沙) 以及地下水位的实际情况, 其土壤中水平流入、流出量(Q_1 、 Q_z)、地下水向上补给量(E_g)、入渗量(渗漏量, P_a) 以及地表径流量(R) 均为零, 故本模型将式(1) 进一步简化为式(2):

$$P + I = P_a + E_p \pm \Delta W \quad (2)$$

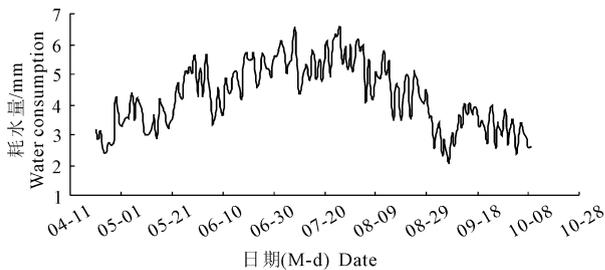


图 1 枣树耗水量变化

Fig.1 Change of water consumption of jujube tree

2 偏最小二乘法

偏最小二乘法是一种新的多元统计数据分析方法, 于 1983 年由伍德(S. Wold) 和阿巴诺(C. Albano) 等首次提出^[23], 模型计算过程如下^[24]:

1) 假设 F_0 是因变量的标准化矩阵, E_0 为自变量集合 X 的标准化矩阵, t_h ($h = 1, 2$) 为自变量集合 X 的提取成分。

2) 从 F_0 中提取成分 u_1 , $u_1 = F_0 c_1$, $\|c_1\| = 1$ 。由于 F_0 只是一个变量, 所以 c_1 是一个常数。同时从 E_0 中提取一个成分 t_1 , $t_1 = E_0 w_1$, w_1 是 t_1 的第一主轴, $w_1 = \frac{E_0^T F_0}{\|E_0^T F_0\|}$, 并且 $\|w_1\| = 1$ 。分别求 E_0 和 F_0 对 t_1 的两个回归方程:

$$E_0 = t_1 p_1^T + E_1 \quad (3)$$

$$F_0 = t_1 r_1^T + F_1 \quad (4)$$

式中, $p_1 = \frac{E_0^T t_1}{\|t_1\|^2}$, $r_1 = \frac{F_0^T t_1}{\|t_1\|^2}$; E_1 、 F_1 为方程残

差矩阵。

3) 用方程残差矩阵 E_1 和 F_1 取代 E_0 和 F_0 , 求解 w_2 轴和 c_2 以及 u_2 和 t_2 , 重复进行 m 次运算, 则:

$$E_0 = t_1 p_1^T + t_2 p_2^T + \cdots + t_m p_m^T + E_m \quad (5)$$

$$F_0 = t_1 r_1^T + t_2 r_2^T + \cdots + t_m r_m^T + F_m$$

由于 t_1, \dots, t_m 可以表示成 E_{01}, \dots, E_{0p} 的线性组合, 因此, 式(5) 可还原为 $y^* = F_0$, 关于 $x_j^* = E_{0j}$ 的回归方程形式, 即:

$$y^* = \alpha_1 x_1^* + \alpha_2 x_2^* + \cdots + \alpha_p x_p^* + F_m \quad (6)$$

式中, F_m 为残差矩阵; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ 为模型回归系数; $x_1^*, x_2^*, \dots, x_p^*$ 为模型自变量。

3 模型建立与计算结果分析

3.1 偏最小二乘回归计算

3.1.1 最小二乘回归方程 利用上述影响因素 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ 与 x_7 建立最小二乘回归方程:

$$y = 4.6551 + 0.0687x_1 - 0.0173x_2 + 0.5739x_3 + 0.0006x_4 - 0.0047x_5 - 0.1675x_6 - 0.0191x_7$$

$$(n = 91, r = 0.9917, r_{0.01} = 0.2673) \quad (7)$$

式中, y 为日耗水量; n 为统计样本数; r 为方程相关系数; $r_{0.01}$ 为显著性 0.01 时的临界相关系数, 下同。

由式(7) 可以看出, 所建回归方程的相关系数 $r = 0.9108$, 置信度为 0.01 时的临界相关系数 $r_{0.01} = 0.2170$, 这表明该方程通过了相关系数检验, 且达到极显著水平。但是该方程却无法解释各影响因素对作物耗水量的贡献情况, 即从式(7) 的物理意义方面来讲, 它无法合理解释各自变量对因变量的影响。例如式(7) 中, 因素 x_6, x_7 的系数分别为 -0.1675 、 -0.0191 , 这就是说, 在其它影响因素保持不变的情况下, 耗水量将会随着土壤含水率、土壤温度的增加而减小, 这种解释明显是说不通的, 是与实际情况相违背的。

3.1.2 偏最小二乘回归方程 根据式(3) 至式(6), 先将自变量、因变量进行标准化处理, 得到自变量和因变量的标准化序列 F_0 与 E_{0j} 。通过提取两个成分 t_1, t_2 , 得到多元线性回归预测方程:

$$\hat{F}_0 = 0.1744E_{01} - 0.3062E_{02} + 0.118E_{03} + 0.7505E_{04} - 0.1479E_{05} + 0.105E_{06} + 0.0191E_{07}$$

将上述标准化回归方程变换成 y 对 x 的偏最小二乘回归方程:

$$\hat{y} = 28.018 + 0.0517x_1 - 0.026x_2 + 0.2366x_3 + 0.0006x_4 - 0.031x_5 + 3.2325x_6 + 0.0147x_7$$

$$(n = 91, r = 0.9789, r_{0.01} = 0.2673) \quad (8)$$

式(8) 拟合效果(相关系数) 通过了相关系数检验,

达到极显著水平,而且回归方程能够合理解释各自变量对因变量的贡献情况。影响因子 x_6 、 x_7 的系数分别为 3.2325、0.0147,也就是说,日耗水量将会随着土壤含水率的增加与土壤温度的升高呈现增加趋势,即从方程的物理意义上来讲,式(8)更为合理,它不仅能够从数值上做出精确的模拟,更能从耗水

机理上解释各自变量(影响因素)对因变量(耗水量)的作用。

3.1.3 偏最小二乘回归方程的预测效果检验 为检验所建偏最小二乘回归方程的预测效果,取同期观测的另外 16 组样本数据值(重复处理平均值)进行模型外延预测效果检验。检验效果见表 1。

表 1 偏最小二乘回归模型预测效果检验
Table 1 The prediction effect test for the PLSR model

日期 Date (M - d)	生育期 Growth period	实测值/mm Measured values	预测值/mm Simulation value	相对误差绝对值/% Relative error value
06 - 06		3.39	3.12	8.04
06 - 07		3.65	3.41	6.65
06 - 08	花期 Florescence	4.60	4.45	3.36
06 - 09		3.75	3.86	2.97
06 - 10		3.66	4.01	9.51
07 - 09		5.34	5.80	8.60
07 - 10		4.40	4.64	5.51
07 - 11		4.58	4.93	7.64
07 - 12		5.15	4.76	7.51
07 - 13		5.32	5.04	5.31
07 - 14	果实膨大期 Fruit enlargement period	4.80	5.05	5.11
07 - 15		5.75	6.37	10.82
07 - 16		5.42	5.10	5.83
07 - 17		4.84	5.18	7.08
07 - 18		5.51	5.31	3.66
07 - 19		4.76	4.53	4.74
平均值 Average		4.68	4.72	6.40

根据表 1 可知,模型预测样本最大相对误差为 10.82%,最小相对误差为 2.97%,平均相对误差为 6.40%,模型预测效果较好,可以用于后续的敏感因素分析。

3.2 基于偏最小二乘回归的敏感因素分析

3.2.1 缺省因子法 本文将缺省因子法^[25]引入到偏最小二乘回归计算中,通过对各影响因素的逐一缺省,构建偏最小二乘回归模型及检验,根据其检验误差与全因素模型检验误差的比值 R_i 大小来确定缺省因子的敏感程度。

$$R_i = RMSE_i / RMSE \quad (9)$$

式中, R_i 为敏感性指数; $RMSE_i$ 为缺省第 i 个因子时模型检验误差; $RMSE$ 为全因子模型检验误差。若 $RMSE_i > RMSE_j$, 表示耗水量对第 i 个因子较第 j 个因子敏感。

3.2.2 敏感因子分析结果 根据前述方法,分别缺省因子 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 , 利用偏最小二乘回归模型建立其余六因素的模型拟合方程。枣树耗水量

实测值与缺省主要因子后模拟值的对比见图 2。

通过缺省因子检验法分析比较,得到各因素的敏感性指数 R (见表 2)。

由表 2 可知,日太阳辐射能量因素对枣树日耗水量的敏感性指数较大,其 R 值为 3.24;其次为日均温度和土壤日均含水率这两种因素,其 R 值分别为 2.18 和 2.09;再次为日均风速与土壤日均温度两种因素,其 R 值分别为 1.87 和 1.69;最后为日均相对湿度和日均大气压这两种因素,其 R 值分别为 1.30 和 1.08。各因素对枣树日耗水量的敏感性由大到小排序为: $x_4 > x_1 > x_6 > x_3 > x_7 > x_2 > x_5$ 。

太阳辐射是地球的能量之源,植物依靠太阳辐射进行光合作用。可以说,太阳辐射直接影响作物的光合作用与温度因素(包括土壤温度与大气温度)。在植物所能承受的一定范围内,作物光合作用随着太阳辐射的增强而增大,而作物光合作用需要水分的参与,这直接导致作物根系从土壤中吸收水分,进行光合作用。

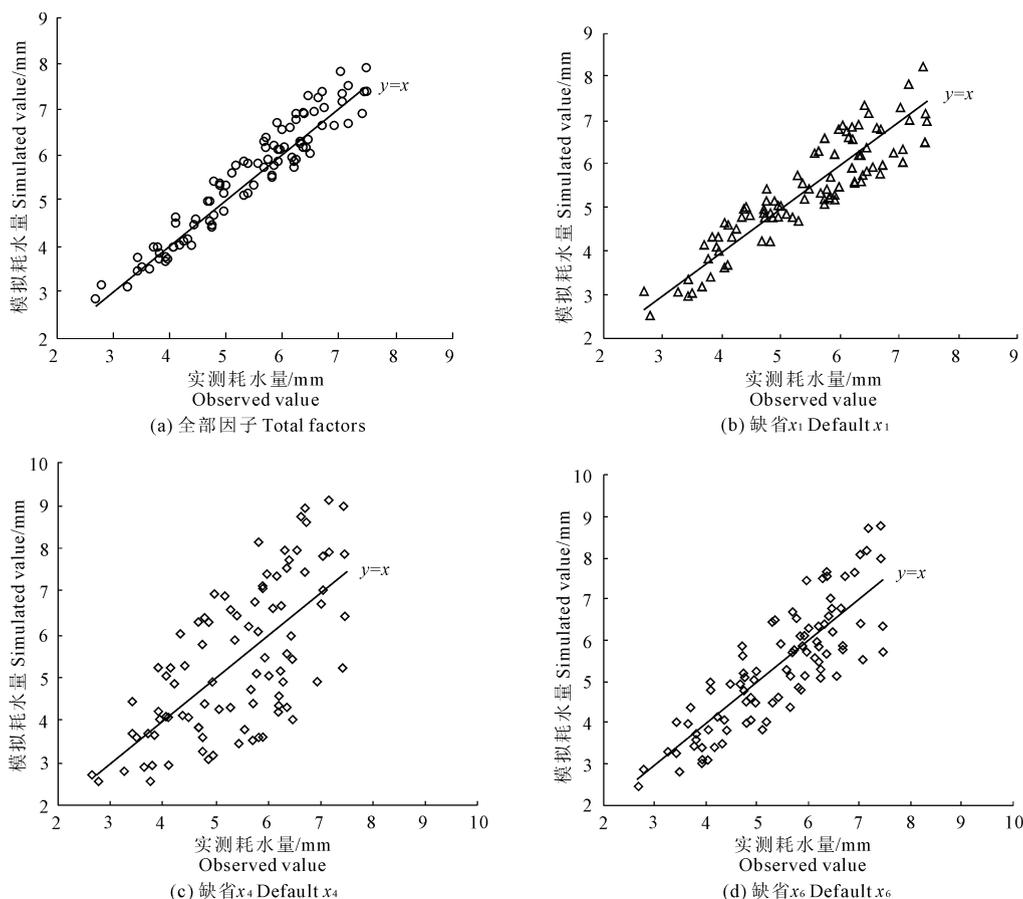


图 2 枣树耗水量实测值与模拟值的对比

Fig.2 Comparison of observed value with simulated value of water consumption

表 2 缺省因子法检验结果

Table 2 Test results by default factor method

影响因子 Factors	平均相对误差/% Mean relative error	R	敏感性排序 Sequencing
全部因子 Total factors	5.67	—	—
x_1	12.36	2.18	2
x_2	7.35	1.30	6
x_3	10.59	1.87	4
x_4	18.37	3.24	1
x_5	6.12	1.08	7
x_6	11.86	2.09	3
x_7	9.58	1.69	5

受太阳辐射的直接影响,当土壤含水量在某一范围内,随着土壤温度的升高,土壤中水分子的活动加剧,水分通过土壤孔隙运动到大气中,参与大气中的水循环。

当土壤含水量较高时,土壤孔隙中的水分在温度升高与风速变大的作用下,蒸发量加剧。

风速对作物耗水量的影响也是很大的,风速不

仅会使土壤表层蒸发量加剧,也会使作物冠层处形成饱和水气压差,加快作物叶面与外界的水分交换,进而增加作物的耗水量。

3.3 基于关联分析法的枣树耗水量影响因素验证分析

3.3.1 关联分析法的可行性 在系统主要影响因素分析中,常用的定量分析方法有数理统计法,如回归分析、方差分析、主成分分析、主分量分析等,它们往往要求大样本,而且要求样本具有典型的概率分布,而这在实际中却很难实现。灰色关联分析方法却可以不受这些局限,该分析方法可在不完全的信息中对所要分析研究的各因素,通过一定的数据处理,在随机的因素序列间,找出他们的关联性,发现主要矛盾,找到主要特征性和主要影响因素。即灰色关联分析是基于行为因子序列的微观或宏观几何接近,以分析和确定因子间的影响程度或因子对主行为的贡献测度而进行的一种分析方法。它根据因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素间接接近的程度。由于关联分析是按发展趋势分析,因而对样本量的大小没有太高的要求,分析时也不需要

典型的分布规律,而且分析的结果与定性分析相吻合,因此具有广泛的实用性^[26]。

3.3.2 灰色关联模型 灰色系统理论^[26]是邓聚龙教授在 20 世纪 80 年代提出的。灰色关联分析是灰色系统理论的重要组成部分,它通过计算关联系数和关联度,来确定各种影响因素的重要程度。灰色关联分析法的基本思想是一种相对性的排序分析^[27],通常对原始数据采用标准化变换,计算关联系数和关联度。

设参考数列为 $X_0(k)$, 比较数列为 $X_i(k)$, $i = 1, 2, 3, \dots, m$, 序列长度为 N 。

关联系数为 $\zeta_i(K) =$

$$\frac{\min_i \min_k |X_0(K) - X_i(K)| + P \max_i \max_k |X_0(K) - X_i(K)|}{|X_0(K) - X_i(K)| + P \max_i \max_k |X_0(K) - X_i(K)|} \quad (10)$$

式中, $\min_i \min_k |X_0(K) - X_i(K)|$ 为两极最小差, \max_i

$\max_k |X_0(K) - X_i(K)|$ 为两极最大差, P 为分辨系数,一般取 $0.5^{[27]}$ 。对关联系数求算数平均值,即为关联度。

3.3.3 灰色关联分析 利用式(10)计算得出各影响因素与枣树耗水量的关联系数,对其求平均值得到灰色关联度及关联度排序(见表 3)。由表 3 计算的灰色关联度可知,各影响因素对枣树耗水量的关联度由大到小排序为: $x_4 > x_1 > x_6 > x_3 > x_7 > x_5 > x_2$ 。

灰色关联分析的计算结果与采用偏最小二乘回归法和缺省因子法的综合模型计算结果基本一致,而且在判断主要影响因素的结论上完全一致。这不仅说明了基于偏最小二乘回归和缺省因子法的综合模型在耗水量敏感因素分析判断上的可行性,也从另一个角度验证了灰色关联分析的可行性与正确性。

表 3 枣树耗水量与各影响因素的关联度及排序

Table 3 Relevance and sequence of water consumption with each influence factor

项目 Item	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
关联度 Relevance	0.8019	0.7567	0.7955	0.9211	0.7635	0.7995	0.7804
排序 Sequence	2	7	4	1	6	3	5

4 讨 论

1) 本文建立的基于日尺度的枣树耗水量因素模型,没有将枣树生物学因素(如生长阶段、叶面积指数等)引入到模型当中。下一步,如何将枣树生物学因素(如生长阶段、叶面积指数等)引入到模型当中,建立大尺度下(旬、月、年尺度)的枣树耗水量因素模型以及进行以生长阶段作为划分单元,建立不同生长阶段下的枣树耗水量因素模型仍然是值得我们研究的一个问题。

2) 本文提出太阳辐射、温度和土壤含水率是影响枣树耗水量的主要因素。那么,在大尺度(旬、月、多年尺度)研究条件下,影响枣树耗水量的主要因素是否仍然是太阳辐射、温度和土壤含水率,这还有待于下一步的研究。

5 结 论

1) 基于偏最小二乘回归与缺省因子法的枣树耗水敏感因素研究结果表明:枣树的日耗水量对日太阳辐射能量和日均土壤含水率、温度(包括环境温度与土壤温度)这三因素最为敏感,敏感性指数分别为 3.24、2.18 和 2.09。

2) 基于偏最小二乘回归与缺省因子法的枣树耗水敏感因素分析结果($x_4 > x_1 > x_6 > x_3 > x_7 > x_2 > x_5$)与灰色关联分析的结果($x_4 > x_1 > x_6 > x_3 > x_7 > x_5 > x_2$)基本一致,尤其在主要影响因素的判别上是完全一致的,这充分说明上述两种方法在枣树耗水量敏感性分析上的可行性。

3) 偏最小二乘回归模型在枣树耗水量建模过程中,方程物理意义明确,能从机理上解释各自变量对因变量的影响,且模型精度可靠,通过了置信度为 0.01 的显著性检验,可以作为耗水量模拟的备选模型之一。

4) 节水农业是现代农业发展的必然方向。本文分析得出太阳辐射、温度和土壤含水率是影响枣树耗水量的主要因素,因此在节水灌溉理论与技术的研究中,可以通过采用地面覆盖(地膜、秸秆等)、地下滴灌等方式减少土壤表层蒸发;设施农业中,在确保农产品产量与质量的前提下,通过合理控制温室大棚内太阳辐射与温度这两种因素来减少作物植株腾发量,达到合理节水的目的。

5) 从枣树耗水量的物理意义解释来看,模型分析结果是合理的,原因如下:太阳辐射直接影响作物光合作用与大气温度,在一定范围内作物光合作用

随着太阳辐射的增强而增大,而作物光合作用需要水分的参与,这直接导致作物根系从土壤中吸收水分,进行光合作用与植株蒸腾;大气温度受太阳辐射的影响,又从某种程度上影响着作物光合作用,进而影响作物的植株腾发量;受太阳辐射影响,土壤含水量(尤其是土壤表层含水量)蒸发,且随着太阳辐射的增强,蒸发量加剧。

参 考 文 献:

- [1] 左大康.我国农田蒸发测定方法和蒸发规律研究的近期进展[C]//左大康,谢贤群.农田蒸发研究.北京:气象出版社,1991:1-4.
- [2] 许迪,刘钰.测定和估算田间作物腾发量方法研究综述[J].灌溉排水,1997,16(4):54-59.
- [3] 黄英,王宇.云南省蒸发量时空分布及年际变化分析[J].水文,2003,23(1):38-42.
- [4] 刘波,马柱国.中国北方近45年蒸发变化的特征及与环境的关系[J].高原气象,2006,2(5):840-848.
- [5] 马金玲,周宏飞.塔里木盆地西北部不同类型蒸发器水面蒸发变化趋势分析[J].干旱区地理,2005,28(3):300-304.
- [6] 邱新法,刘昌明.黄河流域近40年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J].自然资源学报,2003,18(4):437-442.
- [7] 左洪超,李栋梁,胡隐樵,等.近40年中国气候变化趋势及其同蒸发皿观测的蒸发量变化的关系[J].科学通报,2005,50(11):1125-1130.
- [8] Hu Yinqiao, Yang Xuanli, Zhang Qiang, et al. The characters of energy budget on the Gobi and desert surface in Hexi region[J]. Journal of Meteorological Research, 1992,6(1):82-91.
- [9] Xia Guimin, Kang Sshaozhong, Li Fusheng, et al. Diurnal and seasonal variations of sap flow of Caragana korshinskii in the arid desert region of northwest China[J]. Hydrological Processes, 2008,22(8):1197-1205.
- [10] 李品芳,李保国.毛乌素沙地水分蒸发和草地蒸散特征的研究[J].水利学报,2000,(3):24-28.
- [11] 柯晓新.大型称重式蒸渗计的研制[J].应用气象学报,1994,5(2):344-353.
- [12] 杨兴国,杨启国,柯晓新,等.旱作春小麦蒸散量测算方法的比较[J].中国沙漠,2004,24(5):651-656.
- [13] Boegh E, Soegaard H, Thomsen A. Evaluating evapotranspiration rate and surface conditions using Land sat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,79:329-343.
- [14] Glenn P E, Morino K. Scaling sap flux measurements of grazed and ungrazed shrub communities with fine and coarse-resolution remote sensing[J]. Eco Hydrology, 2008,1(4):316-329.
- [15] 陈玉民,郭国双,王广兴,等.中国主要作物需水量与灌溉[M].北京:水利电力出版社,1995:73-80.
- [16] 林少宫,袁溥嘉,申鼎焯.多元统计分析及计算程序[M].武汉:华中工学院出版社,1985.
- [17] 彭世彰,魏征,徐俊增.参考作物腾发量主成分神经网络预测模型[J].农业工程学报,2008,24(9):161-164.
- [18] 段春锋.西北地区参考作物蒸散变化特征及其主要影响因素[J].农业工程学报,2011,27(8):77-83.
- [19] 梁丽乔,李丽娟,张丽,等.松嫩平原西部生长季参考作物蒸散的敏感性分析[J].农业工程学报,2008,24(5):1-5.
- [20] 徐凤琴.有效降水量浅析[J].气象水文海洋仪器,2009,26(1):96-100.
- [21] 康权.农田水文学[M].北京:水利电力出版社,1993:119-122,199-205.
- [22] 曾德超,因·古德温.果园现代高科技节水高效灌溉技术指南[M].北京:中国农业出版社,2001:8-31.
- [23] 付强.基于偏最小二乘回归的水稻腾发量建模[J].农业工程学报,2002,18(6):9-12.
- [24] 秦蓓蕾,王文圣,丁晶.偏最小二乘回归模型在水文相关分析中的应用[J].四川大学学报(工程科学版),2003,35(4):115-118.
- [25] 于国强,李占斌,张霞.土壤水盐动态的BP神经网络模型及灰色关联分析[J].农业工程学报,2009,25(11):141-147.
- [26] 刘思峰,党耀国,方志耕.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2008.
- [27] 魏光辉,马亮.基于灰色关联分析与RBF神经网络的水面蒸发量预测[J].干旱气象,2009,27(1):73-77.