doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.019

太行山前平原井灌农田点尺度土壤水分动态随机模拟*

任庆福[1,2]　严登华[2]　穆文彬[2,3]　裴宏伟[4]

(1.北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
3.河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 4.中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050022)

摘要: 基于中国科学院栾城农业生态系统试验站 2002—2008 年夏玉米生长期内的土壤水分观测数据及 2000—2008 年的降水(灌溉)、气象、生物数据,结合 Laio 土壤水分动态随机模型研究了太行山山前平原典型农田点尺度土壤水分动态的随机性。结果表明:研究区 2000—2008 年夏玉米生长期内日平均降水量为 10.71 mm,降水频率 0.290 9,其中小雨、暴雨的发生频率表现出明显上升趋势,中雨的发生频率呈显著下降趋势,大雨发生频率表现出微弱下降倾向;玉米生长期的土壤含水率 6 月份处于增长期,7 月份达到生长期最高值并稳定在 32.2% 的水平,8 月份以后下降并在 9 月份趋于稳定;Laio 模型模拟得到土壤相对湿度的概率密度函数在曲线形状(峰值、峰值出现的位置、90% 置信区间)与数字特征(中位数、均值、方差)方面与观测结果一致($\alpha = 0.05$),模型在井灌区具有很好的适用性,且可以将灌溉作为一次降雨事件来处理;应用 Laio 模型得到在多年平均降雨条件下,32.1 mm 的田间净灌溉量可以在 50% 水平上使夏玉米生长期内的土壤含水率保持在田间持水量的 80% 以上。

关键词: 井灌区　土壤水分随机性　点尺度　Laio 土壤水分动态随机模型

中图分类号: S152.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2015)03-0131-11

Stochastic Model of Irrigated Farmland Soil Moisture Dynamics at a Point in Piedmont of Mount Taihang

Ren Qingfu[1,2]　Yan Denghua[2]　Mu Wenbin[2,3]　Pei Hongwei[4]

(1. *College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*
3. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*
4. *Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang* 050022, *China*)

Abstract: Un-deterministic dynamic of the energy process, water recycling and biological process in farmland is leading from its stochastic components, such as precipitation, evapotranspiration, heterogeneity of soil, topography and so on. The soil water balance is often described as a reservoir that is deterministically depleted via water losses due to evapotranspiration, runoff, leakage, and stochastically receives water from precipitation, so the stochastic property is the inherent nature of soil moisture. Based on the data of soil moisture, precipitation, meteorology and crop from 2000 to 2008 in Luancheng experimental station of agro-ecosystem of CAS on the stage of summer maize growth, the simulation was carried out with the stochastic model for soil moisture dynamics of the farmland at a point in piedmont plain of Taihang Mountain by using Laio model. The results show that the frequency and mean amount of daily rainfall from 2000 to 2008 in study area on the stage of summer maize growth are 0.290 9, 10.71 mm,

收稿日期: 2014-08-27　修回日期: 2014-11-19

*国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2010CB951102)和"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAC19B03)

作者简介: 任庆福,博士生,主要从事农业水文水资源和气候变化研究,E-mail: wxws.2008@163.com

通讯作者: 严登华,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事气候变化与水资源综合应对研究,E-mail: denghuay@gmail.com

respectively. And different changing trends were found among the frequency occurrence of different rainfall levels, the light rain and storm showed sharply increase trends, and the opposite trends was found in the moderate rain, for the heavy rain, the trends was slightly decrease. The revolution of soil water content of the growth stage of summer maize was expressed as increasing in June, stable in July, and decreased from August to September, and the maximum of soil water content was found in July, the value was 32.2%. A good agreement between the result of modeling and observation was found based on the curve shape of probability density function which included the curve peak value, the position of the peak, the confidence interval of 90% and the digital characteristic of the relative soil moisture which included the median value, expected value, and the variance ($\alpha = 0.05$). And the Laio model had a good application in the irrigated farmland, and the irrigation was treated as a rain. The amount of the irrigation which could made the soil moisture remained above 80% of field capacity on the stage of the summer maize growth under any loss in irrigation activity conditions was calculated by the Laio model, and the value was 32.1 mm at the probability of 50%.

Key words: Irrigated farmland Stochastic characteristic of soil moisture A point scale Stochastic model of soil moisture of Laio

引言

土壤水资源作为农作物生长最直接的水分源泉,在农业用水过程中发挥着重要的作用[1]。土壤水分动态涉及到农田水热、生物等不同过程和许多不确定性变量(降水、蒸散、土壤异质性、地形等),因此随机属性是土壤水分动态的本质特征[2-3]。这种随机属性决定了土壤水分动态模型的解只有以概率性描述的形式出现才会有意义[4]。对于土壤水分动态的随机模拟研究,Eagleson 等[5]早在 20 世纪 70 年代将随机的概念引入土壤水量平衡方程,随后 Milly[6]、Rodriguez-Iturbe 等[3]、Laio 等[7]、Porporato 等[8]先后对土壤水分动态建立了随机数学模型,并得到了广泛的应用[9]。国内对土壤水分随机性的研究起步较晚,在早期集中体现在利用时间序列分析法对土壤水分动态变化的规律进行趋势性、周期性、随机性的提取与分解[10];并建立简单的随机模型,如 AR 时间序列模型[11],并没有深入分析气候因素、土壤特性、植被条件、地形特征等因子对土壤水分随机性的影响。1998 年,罗毅等[12]通过分析作物潜在蒸散的随机性,结合土壤水分平衡方程,给出了根系层储水量满足的随机微分方程,从机理上分析了土壤水分动态变化的随机性;而对于引起土壤水分随机性变化的降雨,该研究将其作为确定性变量来处理,使得研究结果带有很大的局限性;随后国内学者对 Milly、Rodriguez-Iturbe、Laio 等土壤水分随机模型的推导及优缺点进行了分析[4, 13],土壤水分随机特征的机理性研究在国内进一步展开[14-16]。但这些研究主要针对草地、沙漠生态系统,对于这些生态系统,降水是土壤水分的主要来源。然而在农田生态系统中,灌溉水是农田土壤水分的重要组成部分,在以往土壤水分随机性研究中,常常将灌溉作为一个确定的变量或是土壤水分的一种函数[17]。尽管在农田管理中需要比较精确的灌溉水分阈值,但由于土壤水分的变化受到降水、蒸发、土壤特性等的影响,在长期的动态变化中随机性凸显,因此用随机模拟方法来探讨土壤水分在长时期内的变化规律,对于精准农业的实施具有重要的理论指导意义。

本文利用中国科学院栾城农业生态系统试验站 2002—2008 年连续 7 年夏玉米生长期内的土壤水分观测数据及 2000—2008 年的降水(灌溉)、气象、生物数据,研究探讨 Laio 土壤水分动态随机模型在井灌区农田生态系统的适用性问题,并从机理上分析太行山山前平原典型农田生态系统在夏玉米生长期内点尺度的土壤水分动态变化的随机特征,以期为该地区土壤水分动态模拟、农田水分的高效利用及管理提供理论依据。

1 Laio 土壤湿度随机模型

忽略土壤水分侧向交换,农田点尺度的土壤水量平衡可以表示为[7]

$$nZ_r \frac{\mathrm{d}s(t)}{\mathrm{d}t} = \varphi(s(t),t) - \chi(s(t)) \tag{1}$$

$$\varphi(s(t),t) = R(t) - I(t) - Q(s(t),t) \tag{2}$$

$$\chi(s(t)) = E(s(t)) + L(s(t)) \tag{3}$$

$$s(t) = \frac{\theta(t)}{n} \tag{4}$$

式中 n——土壤孔隙度

Z_r——有效土壤厚度(根系层深度),cm

t——时间,d

$\theta(t)$——t 时刻的土壤体积含水率，%

$s(t)$——t 时刻的土壤相对湿度

$\varphi(s(t),t)$——降雨入渗率，cm/d

$\chi(s(t))$——土壤水分损失率，cm/d

$R(t)$——降水速率，cm/d

$I(t)$——冠层截留量，cm/d

$Q(s(t),t)$——地表径流量，cm/d

$E(s(t))$——作物蒸散速率，cm/d

$L(s(t))$——深层渗漏速率，cm/d

式(1)～(3)中，$\varphi(s(t),t)$为模型的水分输入项，包括降水速率 $R(t)$、冠层截留量 $I(t)$以及地表径流量 $Q(s(t),t)$；$\chi(s(t))$为模型中的水分消耗项，主要包括作物蒸散速率 $E(s(t))$以及深层渗漏速率 $L(s(t))$。

1.1　基于水量平衡的土壤湿度概率密度函数

Laio 模型假设了降水事件为连续时间序列上的点事件，且服从频率为 λ 的 Poisson 过程，每次降水带来的降水量服从均值为 α 的指数分布。冠层截留量受到作物类型、叶面积指数、叶片角度以及降雨强度、降雨持续时间等因素的影响。而 Laio 模型假定存在一个降雨阈值 Δ（最大冠层截留量）只与植被类型有关，则 Laio 模型的降水量输入为 γ，降水频率输入为 λ'。由于模型不考虑每次降水事件的中间过程，只关注来水量对土壤水分的补给，且相对于灌溉量 Δ 甚小，因此本研究将灌溉作为一次暴雨事件来处理。

$$\frac{1}{\gamma}=\frac{\alpha}{nZ_r} \tag{5}$$

$$\lambda'=\lambda e^{-\frac{\Delta}{\alpha}} \tag{6}$$

式中　α——研究时段内降水量平均值，cm/d

γ——标准化之后的降水量，d^{-1}

Δ——冠层截留阈值，cm

Laio 模型引入 4 个土壤湿度的临界值，即土壤吸湿系数 s_h、土壤凋萎系数 s_w、植物受到水分胁迫开始点 s^*、土壤田间持水量 s_{fc}；并且认为土壤湿度低于 s_h 时，蒸散发为 0；当土壤湿度 $s_h<s\leqslant s^*$ 时，蒸散发为土壤湿度的线性函数，当土壤湿度达到 s^* 以上时，蒸散发达到最大值，不受水分胁迫，并且土壤湿度超过 s_{fc}时，深层渗漏开始发生。Laio 模型的水分消耗项蒸散输入表示为 η、η_w；深层渗漏输入为 m，有

$$\eta=\frac{E_{\max}}{nZ_r} \tag{7}$$

$$\eta_w=\frac{E_w}{nZ_r} \tag{8}$$

$$m=\frac{K_s}{nZ_r\left[e^{\beta(1-s_{fc})}-1\right]} \tag{9}$$

式中　E_w——土壤湿度低于 s_w 时的土壤蒸发量，cm

$E_{\max}$——无水分胁迫时的最大蒸散量，cm

K_s——土壤的饱和导水率，cm/d

β——土壤孔隙度分布参数

η_w——标准化之后的土壤蒸发量

η——标准化之后的最大蒸散量

m——标准化之后与土壤饱和导水率有关的参数

其中，$E_{\max}$ 可由 FAO－56 提供的作物系数法求得[18]，即

$$E_{\max}=R_{ET}K_c \tag{10}$$

式中　R_{ET}——参考作物蒸散量，mm

K_c——作物系数

R_{ET}由 Penman－Monteith 公式求得，K_c 参照 Liu 等[19]的研究，6 月份：$K_c=0.59$；7 月份：$K_c=1.24$；8 月份：$K_c=1.38$；9 月份：$K_c=1.17$。

土壤相对湿度的概率密度函数 $p(s,t)$，通过 Chapman－Kolmogorov 前进方程，将 t 趋于无穷大获得，具体步骤参照文献[3,7]。基于土壤水分的平衡方程，最后导出 Laio 模型的土壤相对湿度 s 的概率密度函数 $p(s)$，其表达式为

$$p(s)=\begin{cases}\dfrac{c}{\eta_w}e^{-\gamma s}\left(\dfrac{s-s_h}{s_w-s_h}\right)^{\lambda'\left(\frac{s_w-s_h}{\eta_w}\right)-1} & (s_h<s\leqslant s_w)\\[2ex] \dfrac{c}{\eta_w}e^{-\gamma s}\left[1+\left(\dfrac{\eta}{\eta_w}-1\right)\left(\dfrac{s-s_w}{s^*-s_w}\right)\right]^{\frac{\lambda'(s^*-s_w)}{\eta-\eta_w}-1} & (s_w<s\leqslant s^*)\\[2ex] \dfrac{c}{\eta}\left(\dfrac{\eta}{\eta_w}\right)^{\frac{\lambda'(s^*-s_w)}{\eta-\eta_w}}e^{-\gamma s+\frac{\lambda'}{\eta}(s-s^*)} & (s^*<s\leqslant s_{fc})\\[2ex] \dfrac{c}{\eta}\left[\dfrac{\eta e^{\beta s}}{(\eta-m)e^{\beta s_{fc}}+me^{\beta s}}\right]^{\frac{\lambda'}{\beta(\eta-m)}+1}e^{-(\beta+\gamma)s+\beta s_{fc}+\frac{\lambda'}{\eta}(s_{fc}-s^*)}\left(\dfrac{\eta}{\eta_w}\right)^{\frac{\lambda'(s^*-s_w)}{\eta-\eta_w}} & (s_{fc}<s\leqslant 1)\end{cases} \tag{11}$$

式中 c 为积分常数,由 $\int_{s_h}^{1} p(s)\,\mathrm{d}s = 1$ 求得。

1.2 土壤相对湿度的分布函数及数字特征

1.2.1 土壤相对湿度的分布函数

积分常数 c 可通过求土壤相对湿度的分布函数 $P(s=1)=1$ 得到。

土壤相对湿度的分布函数为

$$P(s)=\begin{cases}\dfrac{ca_h}{\eta_w}\mathrm{e}^{-\gamma s_h}c_h^{-b_h}\{\Gamma(b_h)-\Gamma[b_h,\gamma(s-s_h)]\} & (s_h<s\leqslant s_w)\\ P(s_w)+ca_w c_w^{-b_w}\exp(-\gamma(s_w-\eta_w a_w))[\Gamma(b_w,c_w)-\Gamma(b_w,\gamma(s-s_w)+c_w)] & (s_w<s\leqslant s^*)\\ P(s^*)+\dfrac{cb_x}{\eta}\left(\dfrac{\eta}{\eta_w}\right)^{b_w}\left[\exp\left(-\gamma s+\dfrac{\lambda'}{\eta}(s-s^*)\right)-\mathrm{e}^{-\gamma s^*}\right] & (s^*<s\leqslant s_{fc})\\ P(s_{fc})+\dfrac{c}{m\beta}x_f^{-p_f}(1-x_f)^{-q_f}\left(\dfrac{\eta}{\eta_w}\right)^{b_w}\exp\left(-\gamma s_{fc}+\dfrac{\lambda'}{\eta}(s_{fc}-s_x)\right)[B_1-B(x_f\mathrm{e}^{-\beta(s-s_{fc})},p_f,q_f)] & (s_{fc}<s\leqslant 1)\end{cases} \tag{12}$$

其中

$$\begin{cases}a_h=s_w-s_h\\ b_h=\dfrac{\lambda'}{\eta_w}a_h\\ c_h=\gamma a_h\end{cases} \tag{13}$$

$$\begin{cases}b_w=\lambda' a_w\\ a_w=\dfrac{s^*-s_w}{\eta-\eta_w}\\ c_w=\eta_w\gamma a_w\end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases}b_w=\dfrac{\lambda'-\gamma\eta}{\gamma}\\ b_x=\dfrac{\eta}{\lambda'-\gamma\eta}\end{cases} \tag{15}$$

$$\begin{cases}x_f=\dfrac{m-\eta}{m}\\ p_f=1+\dfrac{\gamma}{\beta}\\ q_f=\dfrac{\lambda'}{\beta(m-\eta)}\end{cases}\qquad(\eta\leqslant m) \tag{16}$$

$$B_1=B(x_f,p_f,q_f) \tag{17}$$

式中 $\Gamma(:)$——伽马函数

$\Gamma(:,:)$——不完全伽马函数的余项

$B(:,:,:)$——不完全贝塔函数

1.2.2 土壤相对湿度的期望与方差

土壤相对湿度的期望与方差,即土壤相对湿度的一阶原点矩及二阶中心距,分别为 $E(s)$、$E(s-E(s))^2$,分别通过对概率密度函数 $p(s)$ 与 s、s^2 乘积的积分求得。

1.3 模型参数率定

本文利用遗传算法对 Laio 模型中的 n、β、s_h、s_w、s^*、s_{fc}、K_s 共 7 个参数进行优化。各参数取值范围见 2.3 节。种群大小设为 80,交叉率设为 0.8,突变率设为 0.001,迭代次数直到种群全部个体适应度稳定为相同值为止;选择 χ^2 拟合优度值作为适应度。

$$f(\chi^2\mid n,\beta,s_h,s_w,s^*,s_{fc},K_s)=C_m-\chi^2 \tag{18}$$

$$\chi^2=\sum_{i=1}^{b}\frac{(N_{ob}^i-NP_{mb}^i)^2}{NP_{mb}^i} \tag{19}$$

式中 $f(\chi^2\mid n,\beta,s_h,s_w,s^*,s_{fc},K_s)$——适应度

C_m——常数,取 10 000.0

χ^2——卡方值

b——土壤含水率区间数

N_{ob}^i——第 i 区间观测值的个数

N——观测值总个数

P_{mb}^i——第 i 区间模拟值的概率

从 0.25 ~ 0.90 以 0.05 的间隔将土壤相对湿度 s 划分为 13 个区间,$b=13$。第 i 区间观测值的个数 N_{ob}^i 根据输入的土壤含水率与每次迭代计算的土壤孔隙度得到。χ^2 检验的原假设为 s 的样本来自分布为 $P(s)$ 的总体;在 $\alpha=0.05$ 水平上 $\chi^2<\chi^2_{0.05}(n_n)$,$n_n$ 为自由度,$n_n=b-1=12$。χ^2 值越小,模拟效果越好。

2 研究区概况及模型参数

2.1 研究区概况

研究区位于中国科学院栾城农业生态系统试验站(37°53′N,114°41′E,海拔高度 50.1 m)(图 1)。该站地处太行山山前平原中部,属于半干旱半湿润季风气候,多年平均降水量 487 mm,降水主要集中于 6 ~ 9 月份,占全年 75% 左右;而该时段正处于夏玉米生长期。研究区土壤类型以潮褐土为主,地势平坦,无地表径流,称重式蒸渗仪观测的农田实际蒸散量在 800 ~ 900 mm 之间,明显高于同期降水量。长期抽取地下水导致栾城站的地下水埋深从 20 世纪 70 年代的 10 m 左右下降至目前的 42 m,土壤水与地下水的水力联系微弱。

种植制度为冬小麦-夏玉米一年两熟轮作制:小麦于 10 月初播种,翌年 6 月上旬收割;夏玉米于小

麦收割前 10 d 左右套种，9 月下旬收获。

2.2　数据来源

Laio 模型忽略了一次降水的中间过程、将蒸散视为土壤湿度的线性函数，并且假设研究季节内气象因子相对均一。而研究区夏玉米生长期正值夏季及初秋、雨热相对稳定，因此选取夏玉米生长期作为本文研究时段，并且将 2002—2006 年作为参数率定期，2007—2008 年为模型验证期。

本研究土壤、夏玉米数据来源于《中国生态系统定位观测与研究数据集-农田生态系统卷》（河北栾城站 1998—2008）[20]（下文简称《数据集》），土壤含水率通过中子仪观测，观测时间：每隔 5 d 观测一次，降水和灌溉后加测；观测深度为 0 ~ 150 cm，共 15 层，10 cm/层。逐日降雨、气象数据由中国科学院栾城农业生态系统试验站提供；其他参数数据由相关文献查得。

应用 Matlab R2011b、Origin 9.0 等软件、Fortran 语言对数据进行整理分析。

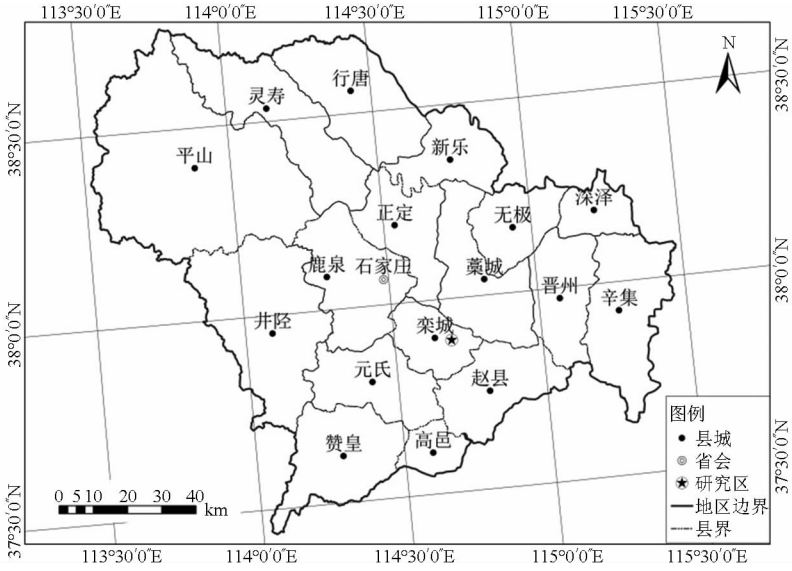

图 1　试验区位置图

Fig. 1　Location of study area

2.3　参数取值

夏玉米生长起始日期及生长期内降水量见表 1；土壤孔隙度、凋萎系数及田间持水量、土壤饱和导水率见表 2，其中土壤饱和导水率参照文献[22]获得[21]；一般认为，当土壤含水率高于田间持水量的 80% 时，作物不会受到水分胁迫[22]，选取田间持水量的 80% 作为水分胁迫开始点。土壤孔隙大小分布参数（β）、冠层截留阈值（Δ）参照文献[7]确定，冠层截留阈值 $\Delta = 0.15$ cm。根系层深度内的土壤含水率按照加权平均法[23]求算。

由表 2 及文献[7]、公式(4)，并利用遗传算法对 Laio 模型的 n、β、s_h、s_w、s^*、s_{fc}、K_s 共 7 个参数进行优化，各参数取值范围分别为：[0.442, 0.531]、[12.1, 14.0]、[0.12, 0.21]、[0.21, 0.40]、[0.45, 0.68]、[0.68, 0.84]、[43.4, 110.0]。

表 1　夏玉米生长期起始日期及降水量

Tab. 1　Lasting days and precipitation of summer maize growth seasons

参数	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
播种日期	06－01	06－02	06－02	05－29	05－28	05－29	06－11	06－15	06－19
成熟日期	09－22	09－24	09－25	09－25	09－28	09－26	09－24	09－26	10－02
生长天数/d	114	115	116	120	124	121	106	104	106
降水量/mm	337.6	215.6	287.0	302.5	425.0	323.3	337.5	232.4	353.4

表 2　研究区土壤物理特征参数

Tab. 2　Physical parameters of soil properties in study area

土壤深度/cm	土壤质地	田间持水量/%	凋萎系数/%	孔隙度	容重/(g·cm^{-3})	饱和导水率/(cm·d^{-1})
0 ~ 20	粉砂壤土	32.9	9.4	0.531	1.22	109.0
20 ~ 40	粉砂壤土	36.4	10.6	0.453	1.44	43.4
50 ~ 110	粉砂壤土	37.1	11.8	0.442	1.46	73.0

3 结果分析

3.1 夏玉米生长期降水特征分析

夏玉米生长期内总降水量变化见表 1。由表 1 可知 2000—2008 年夏玉米生长期内平均降水量为(312.70 ±63.50) mm,表现出微弱增加的趋势,气候倾向率为 82.7 mm/(10 a)。从年际变化来看,2001 年生长季总降水量最低,为 215.6 mm;2004 年总降水量则为 425.0 mm;变动幅度达到 209.4 mm。降水等级频率分析(表 3)表明,2000—2008 年夏玉米生长期小雨、中雨的发生频率分别为 0.735 5、0.141 3,大雨发生了 22 次,暴雨发生了12 次;期间并无大暴雨、特大暴雨发生。图 2 表明小雨、暴雨的发生频率表现出明显的上升趋势,中雨的发生频率则呈显著下降趋势,大雨发生频率则有微弱下降倾向。对各次降水等级加权平均得到 2000—2008 年夏玉米生长期平均降水量为10.71 mm。

Laio 模型将降水事件假设为连续时间序列上的点事件,并且服从频率为 λ 的 Poisson 过程,每次降水带来的降水量服从均值为 α 的指数分布。记相邻降水事件时间间隔为 τ[7],则研究区夏玉米生长期内 τ 的频率分布服从指数分布。图 3 中,相邻两次降水事件的间隔时间以 0 ~4 d 为主,累积频率达到 0.653 7;0 ~10 d 的累积频率 0.915 2;τ 的最大值在 28 d。λ 与 τ 的均值互为倒数,对模型率定期与验证期的 τ 值进行加权平均,由此得到研究区 2002—2008 年降水频率为 0.290 9。

以上对夏玉米生长期的降雨分析,并未考虑灌溉的影响,将灌溉作为一次暴雨事件来处理,得到 Laio 模型降水输入项 α 在参数率定期(2002—2006 年)为 12.535 mm,降水频率 λ 为 0.327 7;在模型验证期(2007—2008 年)为 13.536 mm;降水频率 λ 为 0.312 2。

表 3 研究区夏玉米生长期不同降水等级发生频率表

Tab.3 Frequency of rainfall levels in maize growth seasons in study area

参数	降雨等级						总计
	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨	特大暴雨	
雨量/mm	(0,10]	(10,25]	(25,50]	(50,100]	(100,200]	(200,∞)	
次数	203	39	22	12	0	0	276
相对频率	0.735 5	0.141 3	0.079 7	0.043 5	0	0	1.000 0

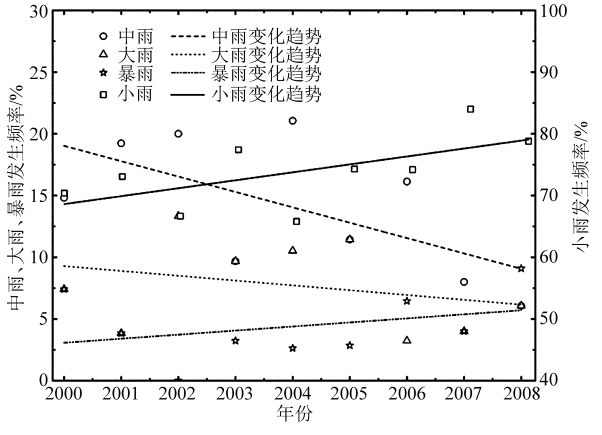

图 2 各降水等级发生频率变化特征

Fig. 2 Variation of frequency of rainfall levels

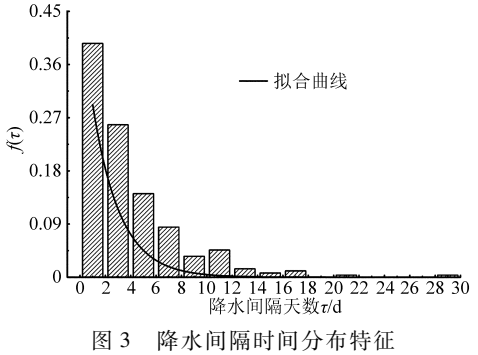

图 3 降水间隔时间分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of rainfall interval times

3.2 根系层土壤含水率的动态变化

图 4 中展示了 2003—2004、2006—2007 年玉米生长季不同土壤深度的平均土壤含水率动态变化(Z_r = 40 cm、Z_r = 80 cm)。

图 4 中,夏玉米生长期在 0 ~40 cm、0 ~80 cm 两深度的土壤含水率(θ)与降水的变化总体上都表现出一致的趋势,但呈现一定的滞后性。相对于 0 ~80 cm深度的土壤含水率,0 ~40 cm 深度的变化对降水较为敏感;2004 年 6 月下旬到 7 月下旬的多雨月份,0 ~40 cm 深度的土壤含水率要略高于 0 ~80 cm,;而在少雨月份,0 ~80 cm 深度的土壤含水率等于或高于 0 ~40 cm,如 2003 年 5 月下旬到 6 月下旬。两深度的土壤含水率总体上都处在较高的水平,且年际间变化呈现“上升-稳定-下降”的周期变化;由表 1 可知,2004 年夏玉米生长期内总降水量为 425 mm,高于研究时段的其他年份,对应于表 1 数据,图 4 中土壤含水率的变化在 2004 年也相应的高于往年,表明研究区土壤水分对降水的响应极为敏感。

图 5 显示了研究区 0 ~40 cm、0 ~80 cm 深度的土壤含水率在旬尺度上的变化规律,总体变化规律一致,即 6 月份处于增长期,7 月份随着降水的增加

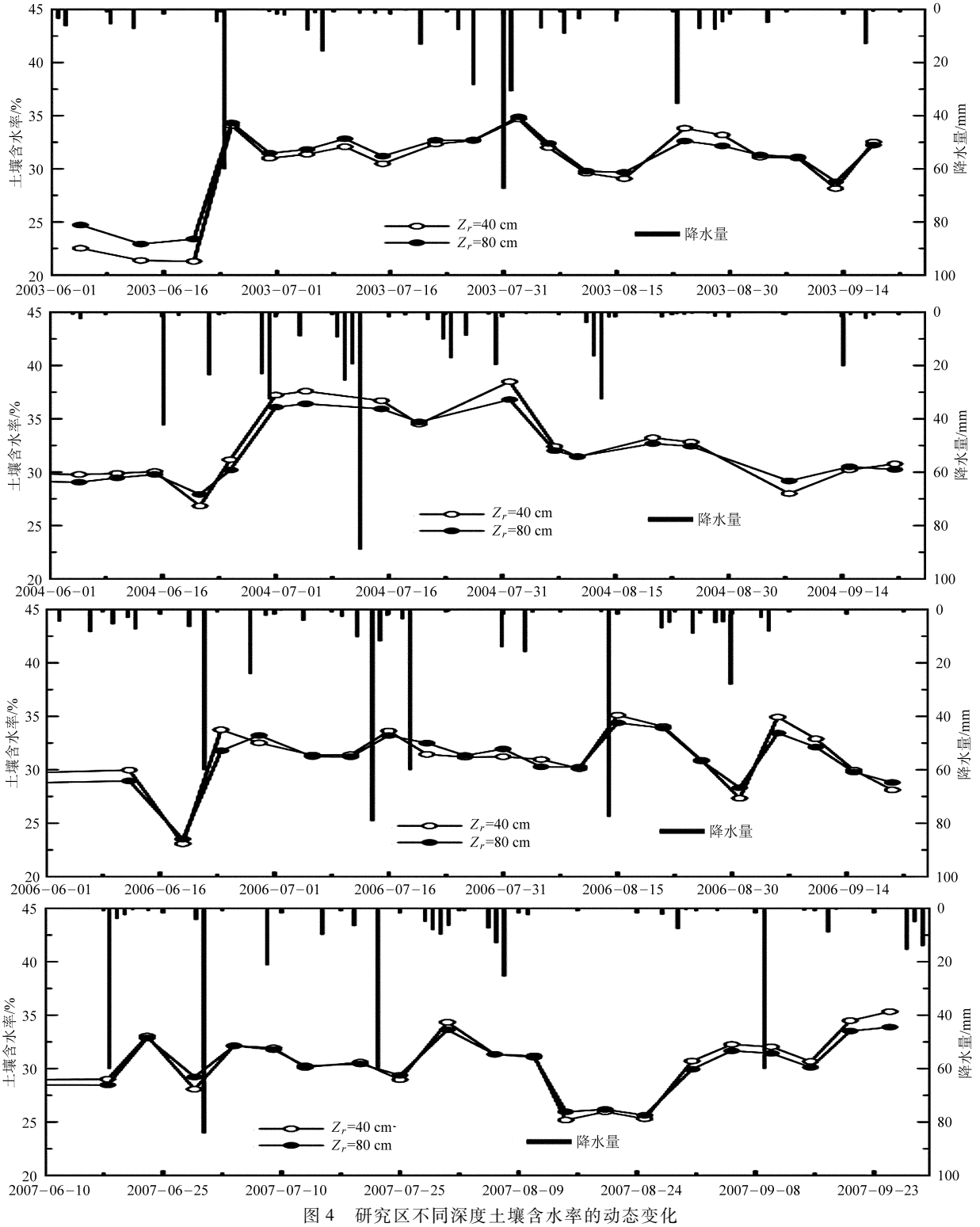

图 4　研究区不同深度土壤含水率的动态变化

Fig. 4　Dynamics of soil water content in different depths in study area

(表 4),含水率到达生长期最高值并稳定在 32.2% 的水平,进入 8 月份,降水减少,年均旬降水量从 7 月下旬的 52.53 mm 下降到 8 月上旬的 34.07 mm,而此时正值夏玉米拔节、吐丝抽穗阶段,耗水量增加,因此含水率表现出降低的趋势,9 月份趋于稳定。从年际变化上来看,两深度的土壤含水率的年际变化较大,都表现出随机过程的特征;在 6 月上旬,0 ~ 40 cm 深度的含水率年际间变异达 8.39%;0 ~ 80 cm 深度的变异为 6.76%;而在 7 月下旬至 8 月上旬,前者变异则为 1.26%,后者为 1.35%。

对 2002—2008 年夏玉米生长季两深度的土壤含水率的统计分析表明:0 ~ 40 cm 的平均土壤含水率为 (30.72 ± 3.67)%,0 ~ 80 cm 为 (30.60 ± 3.13)%;经 t 双侧检验,在 $\alpha = 0.05$ 水平上,0 ~ 40 cm

深度的平均土壤含水率与 0 ~ 80 cm 深度的土壤含水率并无显著差异。结合夏玉米根系分布数据(表 5),将地表至根系生物量 95% 以上分布范围设定为根系层深度,因此本文 Laio 模型中 Z_r 取 80 cm。

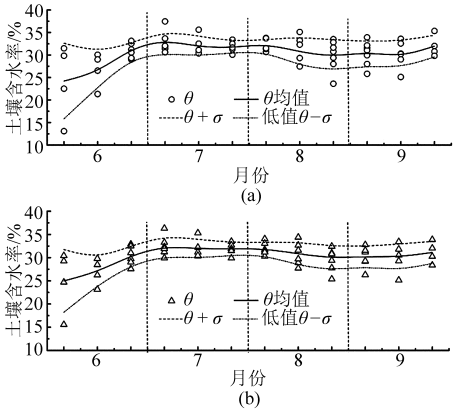

图 5 不同深度土壤含水率的旬变化(2002—2008 年)

Fig. 5 Dynamics of soil water content by 10 d (2002—2008)

(a) Z_r = 40 cm (b) Z_r = 80 cm

3.3 土壤含水率的概率分布特征及随机模拟

对参数率定期(2002—2006 年)、模型验证期(2007—2008 年)夏玉米生长期内 Z_r = 80 cm 的土壤含水率的数字特征进行统计分析,主要包括 s 在两时期的均值 $E(s)$、方差 $\sigma^2(s)$、上四分位数 $\theta_{0.25}$、中位数 $\theta_{0.50}$以及下四分位数 $\theta_{0.75}$(表 6)。对两时期 θ 进行 K-S 检验,结果表明两个时期的 θ 均服从正态分布(α = 0.05),两个时期 θ 的频率分布直方图及正态拟合曲线(图 6、7)表明,土壤含水率的 $f(\theta)$ 最大值,在参数率定期为 0.292 7,分布在区间[32%,34%];而在模型验证期则为 0.368 4,分布在区间[30%,32%];较参数率定期偏低。$f(\theta)$ 的数据分布在参数率定期相对零散,主要分布在 28% ~ 34% 之间;相比之下 $f(\theta)$ 在模型验证期的分布比较集中,在 26% ~ 34% 之间。图 6、7 中,对两时期的 $f(\theta)$ 进行拟合,得到的正态曲线均呈单峰状,拟合的峰值参数率定期发生在 θ = 31.67% 处;模型验证期则发生在 θ = 30.38% 处。

Laio 模型包括了土壤、作物、降水 3 方面的 13 个参数,利用遗传算法对其中 7 个参数进行优化,得到适合研究区夏玉米生长期 $p(s)$ 的最适参数(表 7)。将表 7 中率定后的参数输入到 Laio 模型中,得到研究区夏玉米生长期的土壤相对湿度的概率密度函数 $p(s)$ 及分布函数 $P(s)$(χ^2 = 18.863 6 <

表 4 研究区夏玉米生长期年均旬降水量(2002—2008 年)

Tab. 4 Mean 10 d precipitation in maize growth seasons in study area (2002—2008)

月份	6 月份			7 月份			8 月份			9 月份		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
降水量/mm	13.33	10.51	37.36	33.51	50.19	52.53	34.07	33.43	31.71	8.20	19.20	4.57

表 5 研究区夏玉米根系生物量累计百分率(2004—2008 年)

Tab. 5 Accumulative percentage of crop root biomass in study area (2004—2008)

土壤深度/cm	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100
玉米根系生物量/%	54.53	68.42	77.02	83.18	92.22	96.55	100.00

表 6 土壤含水率数字特征的模拟结果

Tab. 6 Results of digital characteristic of θ from Laio's model %

数字特征	参数率定期(2002—2006 年)			模型验证期(2007—2008 年)		
	模拟值	观测值	误差	模拟值	观测值	误差
$\theta_{0.25}$	29.97	29.52	1.53	29.14	28.47	2.36
$\theta_{0.50}$	32.73	31.29	4.60	31.97	30.43	5.06
$\theta_{0.75}$	35.48	32.79	8.20	34.90	31.74	9.93
$E(\theta)$	32.63	30.80	5.96	31.96	30.18	5.91
$\sigma^2(\theta)$	0.160 0	0.120 4	32.890 0	0.380 0	0.022 9	1 559.390 0

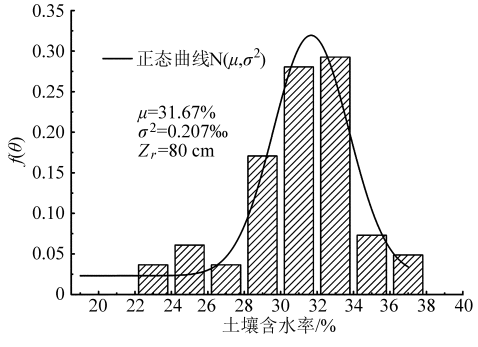

图 6 土壤含水率的频率分布特征(2002—2006 年)

Fig. 6 Probability distribution characteristics of soil water content on calibration stage (2002—2006)

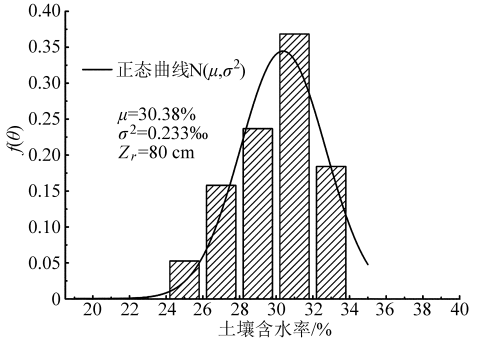

图 7 土壤含水率的频率分布特征(2007—2008 年)

Fig. 7 Probability distribution characteristics of soil water content on validation stage (2007—2008)

$\chi^2_{0.05}(12)=21.026\,1$，见图 8、9；其中 s 为率定后的孔隙度，利用公式(4)计算得到。

表 7　遗传算法模型参数率定后取值

Tab. 7　Calibrated model parameters by genetic algorithm

	模型参数	率定后取值	验证期取值
土壤	土壤孔隙度 n	0.520 0	0.520 0
	土壤孔隙度大小分布参数 β	12.800	12.800
	根系层深度 Z_r/cm	80	80
	土壤饱和导水率 K_s/(cm·d^{-1})	80.000 0	80.000 0
	吸湿系数 s_h	0.201 5	0.20 15
	凋萎系数 s_w	0.342 2	0.342 2
	水分胁迫开始点 s^*	0.674 5	0.674 5
	田间持水量 s_{fc}	0.730 0	0.730 0
	凋萎系数对应土壤蒸发 E_w/cm	0.010 0	0.010 0
作物	冠层截留阈值 Δ/cm	0.150 0	0.150 0
	日最大蒸散量 E_{max}/cm	0.382 9	0.420 0
降水	生长季平均降水量 α/(cm·d^{-1})	1.253 5	1.353 6
	生长季降水频率 λ/d^{-1}	0.327 7	0.312 2

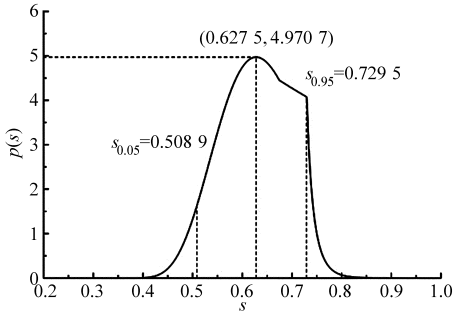

图 8　参数率定期 s 的概率密度函数模拟结果

Fig. 8　Probability density function of relative soil moisture on calibration stage

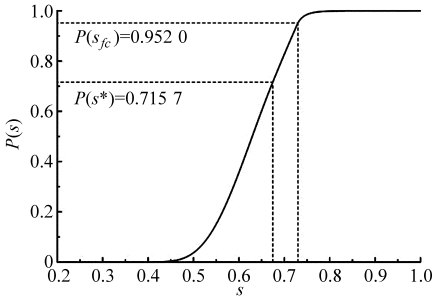

图 9　参数率定期 s 的分布函数模拟结果

Fig. 9　Cumulative distribution function of relative soil moisture on calibration stage

图 8 中 $p(s)$ 总体上呈单峰曲线，峰值为 4.970 7，出现在 $s=0.627\,5$ 的位置，相应土壤含水率为 32.63%，这与图 6 中正态曲线拟合的结果基本吻合。从 s^* 起 $p(s)$ 开始呈缓慢下降趋势，这是由于土壤相对湿度到达水分胁迫点以后，供水充分条件下夏玉米蒸散量达到最大值(式(12))，土壤水分平衡相对稳定，s 更趋于保持在较高的水平，因此 $p(s)$ 的变化趋于平缓；土壤相对湿度在 s^* 与 s_{fc} 之间的概率为 0.236 3(图 9)。当 s 高于 s_{fc} 时发生深层渗漏，$p(s)$ 表现出负指数下降趋势，土壤相对湿度大于 s_{fc} 的概率为 0.048 0(图 9)。图 8 还显示了 Laio 模型模拟土壤相对湿度 90% 的置信区间为[0.508 9, 0.729 5]，相应的土壤含水率区间为[26.46%, 37.93%]。由此从曲线上看，Laio 模型获得的 $p(s)$ 与实测的土壤相对湿度的 $f(\theta)$ 非常接近。

为进一步验证 Laio 模型模拟结果与实测土壤含水率的吻合度，分别对两者的数字特征进行分析，模拟结果见表 6。表 6 表明在降水量为 12.535 mm、降水频率为 0.327 7、夏玉米最大蒸散量为3.829 mm 条件下，θ 的平均取值为 32.63%，与实测值相比，模拟误差为 5.96%；发生概率为 50% 时，土壤含水率取值为 32.73%，与实测值相比，模拟误差为 4.60%；上四分位数的误差为 1.53%；下四分位数其误差也在 8.2% 之内。方差是用来描述随机变量取值相对于均值的离散程度的一种度量，从方差上看，Laio 模拟结果在均值(32.63%)附近的离散程度要远小于观测取值在 30.80% 附近的离散程度，其误差也达到了 32.89%。这是由于尽管 Laio 模型充分考虑了降水、作物以及土壤等方面的因素，但模型输入的降水量、降水频率以及夏玉米的最大蒸散量是多年平均值，模型输出的结果也是土壤相对湿度的一种稳态，因此对于引起土壤含水率变化的各种因素的变异并未完全考虑，而观测值的方差是引起土壤含水率变异的各种因素的综合反映。

对 Laio 模拟得到的 $p(s)$ 曲线与相应土壤含水率的数字特征分析表明，Laio 模型可以很好地模拟研究区夏玉米生长期的土壤水分的随机变化特征。为进一步验证模型在研究区的可行性，在其他参数不变的条件下，将 2007—2008 年夏玉米生长期内的平均降水量与降水频率、最大蒸散量输入模型中，得到 2007—2008 年夏玉米生长期内的土壤相对湿度概率密度函数 $p(s)$ 及分布函数 $P(s)$，见图 10、11。

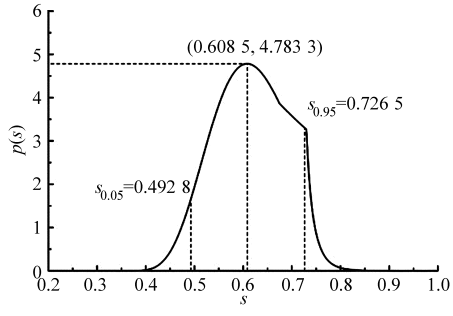

图 10　模型验证期 s 的概率密度函数模拟结果

Fig. 10　Probability density function of relative soil moisture on validation stage

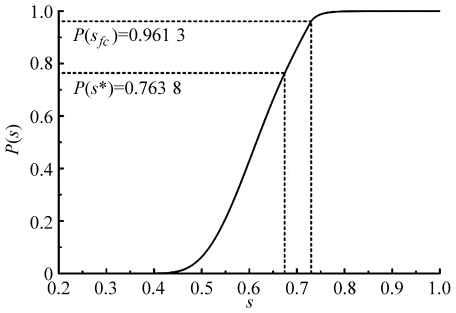

图 11 模型验证期 s 的分布函数模拟结果

Fig. 11 Cumulative distribution function of relative soil moisture on validation stage

图 10 中,Laio 模拟得到的 2007—2008 年夏玉米生长期的 $p(s)$ 呈单峰曲线,峰值为 4.783 3,出现在 s = 0.608 5 的位置,相应的土壤含水率为 31.64%,这与图 7 中正态曲线拟合的结果基本接近。$p(s)$ 曲线在 s^* 与 s_{fc} 之间下降趋势明显,主要由于 2007—2008 年夏玉米的最大蒸散量稍高于往年,因此土壤水分储存量相对较少,土壤相对湿度在 s^* 与 s_{fc} 之间的概率为 0.197 5(图 11)。深层渗漏发生以后,土壤相对湿度大于 s_{fc} 的概率为 0.038 7。图 10 中Laio 模型模拟土壤相对湿度 90% 的置信区间为[0.492 8,0.726 5],相应的土壤含水率为[25.63%,37.78%],略大于图 7 中 s 的频率分布范围。进一步分析 Laio 模拟得到的土壤含水率的数字特征(表 6),结果显示在降水量为 13.536 mm、降水频率为 0.312 2、夏玉米最大蒸散量为 4.2 mm 条件下,θ 的平均取值为 31.96%,与实测值相比,模拟误差为 5.91%;其上四分位数、中位数误差在 6% 之内,下四分位数误差为 9.93%。模型模拟的方差,其误差达到 1 559.39%。尽管方差误差较大,但 Laio 模拟 s 的概率分布 $p(s)$ 与 $f(\theta)$ 相比,其 χ^2 为 10.613 1,小于 $\chi^2_{0.05}(12)$ = 21.026 1,在 α = 0.05 水平上通过 χ^2 检验,因此,可以认为 Laio 模型可以对研究区夏玉米生长期的根层土壤水分的随机变化进行很好的预测。

将研究区 2000—2008 年的降水数据(日平均降水量 10.71 mm、降水频率 0.290 9)与最大蒸散量(4.015 mm)输入 Laio 模型中,得到在不考虑灌溉条件下夏玉米生长期内土壤含水率的均值为 28.40%,$\theta_{0.50}$ = 28.09%。假定研究区夏玉米生长期内在 6 月份灌溉一次,则 6 月份降水频率 λ = 0.290 9 + 1/30 = 0.324 2,在最大蒸散量不变的情况下,假定灌溉后土壤相对湿度的中位数要达到田间持水量的 80%,即 $\theta_{0.50} = 0.8\theta_{fc}$ = 30.37%,则由 Laio 模型计算得到的降水量输入 α = 1.14,进而计算出由灌溉入渗到土壤中的水量为 32.1 mm,因此可认为 32.1 mm 的田间净灌溉量,可使稳定土壤含水率以 50% 的概率保持在田间持水量的 80% 以上。

4 讨论

(1)土壤中的水分来源主要包括降雨入渗、灌溉以及地下水补给 3 个方面。Laio 模型是在 Rodriguez 模型基础之上增加了两个土壤水分的临界值 s_h、s_w,更适合应用于干旱条件[7],因而 Laio 模型在仅有降雨输入,无地下水补给的地区得到了广泛应用[9,15-16]。而在灌溉活动频繁的灌区,由于在以往的土壤水量平衡分析中,灌溉常作为一个确定的变量[9],因此 Laio 模型的应用受到了限制。随着灌溉管理理念及管理方式向“按需实时灌溉”、“非充分灌溉”的不断转变,灌溉制度的制定及管理受制于农田生态系统水文-气候-土壤-作物复杂的作用机制[17],Giulia 等[17]在 Porporato 土壤水分随机模型基础上,引入土壤水分在灌溉开始点与结束点两个阈值,建立了以气候、作物、土壤性质为自变量,灌溉需求为函数的随机模型。但该模型参数过多、参数取值范围严格、解析解复杂,其应用受到了限制。由于灌溉的实施,受制于降雨的发生,本研究将灌溉作为一次降水的随机事件,利用 Laio 模型很好地模拟了研究区夏玉米生长期内的土壤相对湿度的概率分布,表明 Laio 模型在井灌区或存在灌溉活动的地区仍然适用。

(2)Laio 等[7]分别改变土壤类型、降雨频率、降雨量、植被蒸散等参数,获得 12 种土壤相对湿度的概率分布函数曲线,包括了不同的土壤深度(30 ~ 90 cm)、不同气候类型(干气候到湿气候)等 12 种环境条件,其中土壤类型为壤土、深度为 90 cm、降水频率为 0.2 的情况与本研究条件接近,本文得到的太行山山前平原夏玉米农田土壤相对湿度的概率密度函数曲线与该类型的曲线一致。由于本文中降水频率要高于 0.2,因此曲线峰值出现的位置偏右,峰值都在 4.5 ~ 5.0 之间。姚淑霞等[15]利用 Laio 模型模拟科尔沁沙地土壤水分动态,得到的 $p(s)$ 曲线峰值出现的位置处于低值,位于土壤水分胁迫开始点,与本文模拟结果类似,峰值出现点 s = 0.627 5 或 s = 0.608 5 靠近土壤水分胁迫开始点 s = 0.674 5。

(3)本文对 Laio 模型在夏玉米生长季的农田水分的随机模拟应用方面做了初步的探讨,事实上华北平原玉米季降雨较多,冬小麦缺水较为严重,为冬小麦制定合理的灌溉制度更为迫切,但由于 Laio 模型前提假设在模拟期间内(生长季)的气象条件及植被参数相对稳定,冬小麦生长季从每年 10 月上旬到翌年的 6 月中旬,期间经历秋(10、11 月份)、冬

(12、1、2 月份)、春(3、4、5 月份)、夏(6 月份)四季变化,气候因子与植被参数变化明显,并不满足 Laio 模型的前提假设条件。对冬小麦生长季的土壤水分的随机模拟,需要分不同月份、不同小麦发育期进行进一步深入研究。

5　结论

(1)研究区降水特征:2000—2008 年夏玉米生长期内平均降水量为 312.70 mm,呈微弱增加的趋势。单次降水量为 10.71 mm,降水频率 0.290 9,但各等级降水发生频率并不一致,其中小雨、暴雨的发生频率表现出明显上升趋势,中雨的发生频率呈显著下降趋势,大雨发生频率表现出微弱下降倾向。

(2)研究区夏玉米生长期的土壤含水率在旬尺度上,6 月份处于增长期,7 月份达到生长期最高值并稳定在 32.2% 的水平,8 月份以后表现出降低的趋势,9 月份趋于稳定;在年际变化上表现出随机过程的特征。夏玉米生长期内土壤含水率序列服从正态分布($\alpha = 0.05$)。

(3)通过土壤相对湿度的概率密度函数曲线形状(峰值、峰值出现的位置、90% 置信区间)与土壤含水率的数字特征(中位数、均值、方差)等方面的对比表明,Laio 模型可以对研究区土壤概率密度函数进行较好的模拟,并且 Laio 模型应用于井灌区或存在灌溉活动的地区时,可以将灌溉作为一次降水事件来处理。

参　考　文　献

1　王浩,杨贵羽,杨朝晖. 水土资源约束下保障粮食安全的战略思考[J]. 中国科学院院刊, 2013,28(3): 329 – 336.
Wang Hao, Yang Guiyu, Yang Zhaohui. Thingking of agriculture development in China based on regional water resoures and land cultivation[J]. Chinese Academy of Sciences, 2013,28(3): 329 – 336. (in Chinese)

2　Rodriguez-Iturbe I, Entekhabi I A, Bras D A, et al. Nonlinear dynamics of soil moisture at climate scales[J]. Stochastic Analysis, 1991, 27(8): 1899 – 1906.

3　Rodriguez-Iturbe I, Porporato A, Ridolfi L, et al. Probabilistic modeling of water balance at a point: the role of climate, soil and vegetation[J]. Proceedings of the Royal of Society A, 1999, 455(1999): 3789 – 3805.

4　刘鹄,赵文智. 基于土壤水分动态随机模型的土壤湿度概率密度函数研究进展[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 894 – 904.
Liu Hu, Zhao Wenzhi. Advances in research on soil moisture probability density functions obtained from models for stochastic soil moisture dynamics[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(6): 894 – 904. (in Chinese)

5　Eagleson P S. Climate, soil, and vegetation: 6. Dynamics of the annual water balance[J]. Water Resource Research, 1978, 14(5): 749 – 763.

6　Milly P C D. An analytic solution of the stochastic storage problem applicable to soil water[J]. Water Resource Research, 1993, 29(11): 3755 – 3758.

7　Laio F, Porporato A, Ridolfi L, et al. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress: II. Probabilistic soil moisture dynamics[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(7): 707 – 723.

8　Porporato A, Daly E, Rodriguez Iturbe I. Soil water balance and ecosystem response to climate change[J]. The American Naturalist, 2004, 164(5): 625 – 632.

9　Verma P, Yeates J, Daly E. A stochastic model describing the impact of daily rainfall depth distribution on the soil water balance [J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(8): 1039 – 1048.

10　康绍忠. 土壤水分动态的随机模拟研究[J]. 土壤学报, 1990(1): 17 – 24.
Kang Shaozhong. Stochastic modeling of dynamic process of soil moisture[J]. Acta Pedologica Sinica, 1990(1): 17 – 24. (in Chinese)

11　刘洪斌,武伟,魏朝富,等. AR 模型在土壤水分动态模拟中的应用[J]. 山地学报, 2004, 22(1): 121 – 125.
Liu Hongbin, Wu Wei, Wei Chaofu, et al. Soil water dynamics simulation by auto-regression models[J]. Journal of Mountain Science, 2004, 22(1): 121 – 125. (in Chinese)

12　罗毅,雷志栋,杨诗秀. 根系层储水量对随机腾发响应特性的初步分析[J]. 水利学报, 1998(5): 44 – 49.
Luo Yi, Lei Zhidong, Yang Shixiu. Theoretical analysis of stochastic response of soil water storage to evapotranspiration flutuation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(5): 44 – 49. (in Chinese)

13　潘兴瑶,夏军,张橹. 土壤水分随机模型支持下的土壤水平衡研究进展[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 460 – 467.
Pan Xingyao, Xia Jun, Zhang Lu. A review of soil water balance studies based on stochastic soil moisture model[J]. Resources Science, 2008, 30(3): 460 – 467. (in Chinese)

14　刘鹄,赵文智,何志斌,等. 祁连山浅山区草地生态系统点尺度土壤水分动态随机模拟[J]. 中国科学 D 辑, 2007, 37(9): 1212 – 1222.
Liu Hu, Zhao Wenzhi, He Zhibin, et al. The stochastic model of soil moisture dynamics in the grass ecosystem at a point in the Qilian mountainous area[J]. Science in China:Series D, 2007, 37(9): 1212 – 1222. (in Chinese)

(下转第 157 页)

12 王淼,谢宪丽,周睿,等. 基于可见光-近红外漫反射光谱的红壤有机质预测及其最优波段选择[J]. 土壤学报,2011,48(5):1083 - 1089.
Wang Miao,Xie Xianli,Zhou Rui,et al. Determination of soil organic matter in red soils using VIS - NIR diffuse reflectance spectroscopy selection of optimal spectral bands[J]. Acta Pedologica Sinica,2011,48(5):1083 - 1089. (in Chinese)

13 陈彬,刘阁,张贤明,等. 连续投影算法的润滑油中含水量的近红外光谱分析[J]. 红外与激光工程,2013,42(12):3168 - 3174.
Chen Bin,Liu Ge,Zhang Xianming,et al. Analysis on near infrared spectroscopy of water content in lubricating oil using successive projections algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering,2013,42(12):3168 - 3174. (in Chinese)

14 Sun Tong,Xu Wenli,Lin Jinlong,et al. Determination of soluble solids content in navel orange by Vis/NIR diffuse transmission spectra combined with CARS method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2012,32(12):3229 - 3233.

15 周竹,李小昱,高海龙,等. 马铃薯干物质含量高光谱检测中变量选择方法比较[J]. 农业机械学报,2012,43(2): 128 - 133.
Zhou Zhu,Li Xiaoyu,Gao Hailong,et al. Comparison of different variable selection methods on potato dry matter detection by hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2):128 - 133. (in Chinese)

16 马雯婷,郑开逸,邵娟,等. 近红外光谱结合化学计量学评价胚胎发育潜能[J]. 化学通报,2013,76(1):60 - 64.
Ma Wenting, Zheng Kaiyi, Shao Juan, et al. Evaluating reproductive potential of embryos using near infrared spectroscopy combined with chemometric methods[J]. Chemistry, 2013,76(1):60 - 64. (in Chinese)

17 陈立旦,赵艳茹. 可见-近红外光谱联合随机蛙跳算法检测生物柴油含水量[J]. 农业工程学报,2014,30(8):168 - 173.
Chen Lidan,Zhao Yanru. Measurement of water content in biodiesel using visible and near infrared spectroscopy combined with Random-Frog algorithm[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(8): 168 - 173. (in Chinese)

18 Balabin R M,Safieva R Z,Lomakina E I. Wavelet neural network (WNN) approach for calibration model building based on gasoline near infrared (NIR) spectra [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,2008,93(1):56 - 62.

19 Chunhan N,Ravi V,Chandra D K, et al. Differential evolution trained wavelet neural networks: application to bankruptcy prediction in banks[J]. Expert Systems with Applications,2009,36(4):7659 - 7669.

20 Balabin R M,Lomakina E I. Support vector machine regression (SVR/LS - SVM)—an alternative to neural networks (ANN) for analytical chemistry comparison of nonlinear methods on near infrared (NIR) spectroscopy data[J]. Analyst,2011,136(8):1703 - 1712.

(上接第 141 页)

15 姚淑霞,张铜会,赵传成. 科尔沁沙地土壤水分动态分析及其概率密度函数模拟[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 62 - 72.
Yao Shuxia, Zhang Tonghui, Zhao Chuancheng. Analysis of soil moisture dynamics and its probability density function simulation in Horqin sand land[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 62 - 72. (in Chinese)

16 黄磊,张志山,陈永乐. 干旱人工固沙植被区土壤水分动态随机模拟[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 568 - 573.
Huang Lei, Zhang Zhishan, Chen Yongle. Probabilistic modelling of soil moisture dynamics in a re-vegetated desert area[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(2): 568 - 573. (in Chinese)

17 Vico G, Porporato A. From rainfed agriculture to stress-avoidance irrigation: I. A generalized irrigation scheme with stochastic soil moisture[J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(2): 263 - 271.

18 Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements[M]. Michigan: Food and Agriculture Organization of United Nations, 1998: 56.

19 Liu C, Zhang X, Zhang Y. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(2): 109 - 120.

20 胡春胜,程一松. 河北栾城站(1998—2008)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.

21 张喜英,张橹,刘昌明. 太行山前平原土壤水分特征曲线拟合参数的确定[J]. 华北农学报, 2001, 16(2): 75 - 82.
Zhang Xiying, Zhang Lu, Liu Changming. On describing the hydraulic properties of unsaturated soil in piedmont of Mt. Taihang [J]. Acta Agricultural Boreali-Sinica, 2001, 16(2): 75 - 82. (in Chinese)

22 Zuo Q, Shi J, Li Y, et al. Root length density and water uptake distributions of winter wheat under sub-irrigation[J]. Plant and Soil, 2006, 285(1): 45 - 55.

23 Miller G R, Baldocchi D D, Law B E, et al. An analysis of soil moisture dynamics using multi-year data from a network of micrometeorological observation sites[J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(5): 1065 - 1081.