维普资讯 http://www.cqvip.com

5-12

第20卷 第2期 西北农业大学学报 Vol.20 No.2
1992年5月 Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis May 1992

冬小麦根系吸水模式的研究*

康绍忠 刘晓明 熊运章
(西北农业大学水利与建筑工程系 陕西杨陵·712100)

S512 1061

摘 要 依据冬小麦根系伸展深度、重量根密度以及土壤含水量分布的实测资料，对冬小麦根系吸水分布进行了动态模拟。在分析根系吸水规律的基础上考虑根系分布状况、土壤含水率、蒸腾速率等因素的影响，建立了一个冬小麦根系吸水模式，该模式经实际应用，效果良好。

关键词 冬小麦，根系吸水，动态模型，密度，土壤含水量/蒸腾 土壤
中图分类号 S152.7

作物根系吸水是土壤-植物-大气连续体水分传输问题研究中的一个重要部分，同时又是根区土壤水分动态模拟必不可少的资料。关于作物根系吸水研究可归结为微观法和宏观法。微观法假定作物根系分布是均匀的，在根层中的土壤水吸力也是均匀分布的，然后研究单根的吸水状况。由于微观法假定与大田实际情况差别太大，因此就难以应用单根吸水的微观模型定量分析根层中土壤和根系中的水流运动。宏观法忽略了水分向个别根的流动，在水分运动基本方程式右边加一个根系吸水项。随着研究工作的不断深入，不少学者改进和发展了宏观模型，实质上是修改根系吸水项的数学模型较多，但大多数是以 Van den Honert (1948)的假定为基础，例如 Molz 模型和邵明安模型[1]在物理学和生理学意义上都是正确的，但需要根系分布、密度、根系阻力和根水势等资料，难于测定，因此这类方法在实际中不便于应用[3-5]。本文拟从冬小麦根系吸水机理出发，建立具有一定物理学意义、又简便实用的冬小麦根系吸水模式。

1 冬小麦根系吸水的动态模拟

不断变化着的大气条件、作物根系的错综分布，以及土壤质地和结构的非均匀性等，使得作物根系吸水的研究十分困难。为此必须对实际问题进行简化。假定冬小麦田土壤水分在平面上分布均匀，仅考虑垂直方向的一维流动，忽略溶质和温度势的影响，则有

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[D(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}\right]-\frac{\partial k(\theta)}{\partial z}-S(z,t) \tag{1}$$

相应的定解条件为

$$\theta(z,t)\big|_{t=0}=\theta_0(z) \tag{2}$$

文稿收到日期：1991-05-25
* 国家自然科学基金资助项目
水资源专业90届毕业生王天录参加部分计算工作

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$-D(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}+K(\theta)\Big|_{z=0}=-E_{v}(t) \tag{3}$$

$$\theta(z,t)\big|_{z=d}=\theta_{0}(d) \tag{4}$$

式中：θ 为土壤含水量 (cm^3/cm^3)；t 为时间 (h)；z 为深度 (cm)；$D(\theta)$ 为土壤水分扩散率 (cm^2/h)；$K(\theta)$ 为土壤导水率 (cm/h)；$S(z,t)$ 为作物根系吸水项 (h^{-1})；E_v 为土壤蒸发率 (cm/h)。

作物根系吸水项 $S(z,t)$ 可通过田间实测土壤含水率分布用下式进行动态模拟：

$$S(z,t)=\frac{\partial}{\partial z}\left[D(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}\right]-\frac{\partial K(\theta)}{\partial z}-\frac{\partial\theta}{\partial t} \tag{5}$$

由于这是非线性、非齐次的偏微分方程，不能用解析法求其精确解，只能用数值方法求其近似解。本文采用有限差分法求解。用隐式差分格式写出式(5)的差分方程

$$S_i^j=\frac{D_{i-1/2}^{j+1}\left(\theta_{i-1}^{j+1}-\theta_i^{j+1}\right)-D_{i+1/2}^{j+1}\left(\theta_i^{j+1}-\theta_{i+1}^{j+1}\right)}{(\Delta z)^2}-\frac{K_{i+1}^{j+1}-K_{i-1}^{j+1}}{2(\Delta z)}-\frac{\theta_i^{j+1}-\theta_i^j}{\Delta t} \tag{6}$$

其中：$i=0$、1、2……、$n-1$、n；$j=0$、1、2……、$m-1$、m。$D_{i-(1/2)}^{j+1}$ 与 $D_{i-(1/2)}^{j+1}$ 取上下两点的几何平均值，K_{i+1}^{j+1} 与 K_{i-1}^{j+1} 取上下两点的算术平均值。经在西北农业大学灌溉试验站进行试验得到土壤导水率和扩散率的计算公式

$$K(\theta)=\begin{cases}1.371\times10^{-5}e^{-9.643\theta}(1+0.020\,5e^{24.64\theta}) & (0\sim50\text{cm土层})\\ 7.96\times10^{-6}e^{-9.742\theta}(1+0.017\,97e^{26.19\theta}) & (51\sim200\text{cm土层})\end{cases} \tag{7}$$

$$D(\theta)=\begin{cases}0.146\,5e^{14.997\theta} & (0\sim50\text{cm土层})\\ 0.079\,2e^{16.440\theta} & (51\sim200\text{cm土层})\end{cases} \tag{8}$$

用式(6)编制计算机模拟软件，即可根据不同时间在不同土层深度实测的土壤含水率、棵间土壤蒸发率对作物根系吸水进行动态模拟。

根据以上过程求得1990年3～5月冬小麦生育期内不同时段的根系吸水率在田间土壤剖面上的分布。模拟结果表明冬小麦根系吸水分布具有如下几条规律。

1.1 根系分布状况对作物根系吸水的影响

田间实测结果表明：根系在土壤剖面上的分布呈指数递减，表层10cm范围内的根系重量密度较大。因此，在土壤含水率分布较均匀、表层土壤含水率较高时，上层10～20cm范围的根系吸水率较大，在田间垂直剖面上呈指数递减。如图1-a中3月29日和4月16日是灌水以后土壤均匀湿润时的情况，表层根系吸水率较大，这是由于上层根系分布密度较大而造成的；4月16日的根系吸水区域比3月29日向更深土层发展，吸水率峰值也向下移，这是因为随着时间的延长，根系向下伸展而致。因而，冬小麦根系吸水和根系密度分布有较密切的关系。

1.2 土壤含水率对冬小麦根系吸水的影响

土壤含水率的高低影响根系吸水的难易程度。土壤含水率大，土壤基质势也高，土—根系统的水势梯度大，水流阻力小，其根系吸水率大；相反则根系吸水率小。土壤含

维普资讯 http://www.cqvip.com

水率在垂直剖面上的分布形式不同也影响根系吸水率的分布。图1—b中4月22日的根系吸水率分布是表层土壤含水率较低的情况，上层根系吸水率较低，吸水率峰值下移。4月19日是表层灌水后，灌溉水入渗仅在上层30cm内的情况，中间30～60cm土层土壤含水率较低，因而，其根系吸水率的分布与土壤含水率的垂直分布密切相关。

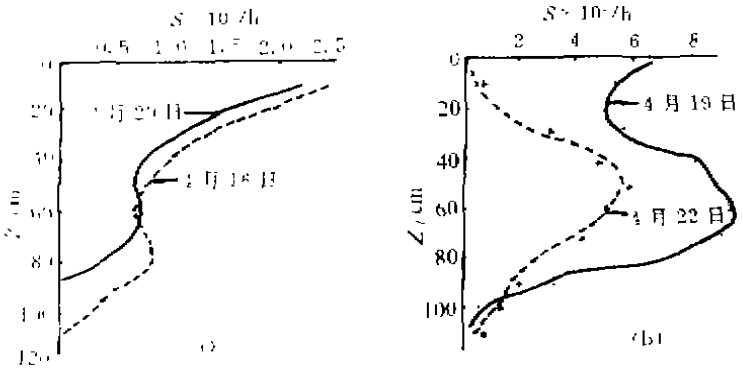

图1　冬小麦根系吸水速率垂直分布

1.3　蒸腾速率对冬小麦根系吸水的影响

作物根系吸水包括主动吸水和被动吸水，而被动吸水在两者中起关键性作用，一般占总吸水的95%以上。被动吸水是由叶片蒸腾拉力作用产生的，因此作物根系吸水与蒸腾作用密切相关。在不考虑作物体内液胞含水量的微小变化和蒸腾对根系吸水的滞后作用时，某一时刻的蒸腾速率等于根系吸水率在土壤剖面上的积分值。由上可知蒸腾速率对冬小麦根系吸水有较大影响。蒸腾速率大，根系吸水率也大。如图1—b中所示，4月19日冬小麦根系吸水率大于4月22日的，这是因为4月22日全天阴转多云，净辐射变化微弱，白天净辐射小于50W/m^2，而4月19日为晴天，中午净辐射达569.16W/m^2。

1.4　冬小麦根系吸水率在土壤剖面上的分布规律

冬小麦根系吸水率在土壤剖面上的分布状况是由土壤含水量的垂直分布和根系密度分布状况所决定的。在垂直剖面上的土壤含水率均匀分布时，根系吸水率的分布与根密度的分布相同，其吸水率随着距地表的距离增加而降低。土壤水分的消耗是不均匀的，吸水率大的地方其土壤水分消耗较多，随着时间的延伸，这种高吸水区将逐渐向下转移，上层土壤变干，其吸水率减小。当土壤含水率呈非均匀分布时，其根系吸水率的分布状况很不规律，与土壤含水率和根系密度分布密切相关。

2　冬小麦根系吸水模式的建立

由冬小麦根系吸水动态模拟结果所反映的根系吸水规律，在建立根系吸水模式时必须考虑如下几个关系。

2.1　根系吸水与根系密度分布的关系

由于土壤均匀湿润时的根系吸水强度分布与根系密度分布一致，因而我们有充分的理由认为冬小麦根系吸水率的分布在土壤充分湿润时正比于根系的分布密度。根系分布

维普资讯 http://www.cqvip.com

密度不易测定，建立模式时不能直接考虑根系密度因子，而是通过根系分布密度与深度的关系来直接建立根系吸水率随深度的分布关系。为此，分析了充分湿润时的根系吸水强度随深度的变化规律，结果表明不同深度的根系吸水强度 S_{zo} 与表面的最大吸水强度 S_{max} 之间的比值与相对土层深度 z/z_r 呈指数关系，即

$$S_{zo}/S_{max}=0.9046e^{-1.80z/z_r} \tag{9}$$

其相关系数 $R=-0.9092$，方程达显著水平。式中 S_{zo} 为 z 深度的根系吸水率(h^{-1})，S_{max} 为土壤充分湿润时表层的最大根系吸水率(h^{-1})，z_r 为根系层深度(cm)。因此，根系吸水率与根系密度分布的关系可间接通过其相对深度 z/z_r 来表达。

2.2 土壤—冬小麦系统的水平衡关系

在忽略冬小麦体内含水量的微小变化和不考虑蒸腾对于根系吸水的滞后作用时，有

$$CT_p=\int_0^{z_r}S_{zo}\cdot dz \tag{10}$$

把式(9)代入式(10)，有

$$CT_p=\int_0^{z_r}0.9046S_{max}\cdot e^{-1.80z/z_r}dz \tag{11}$$

积分后整理得

$$S_{max}=\frac{CT_p}{0.9046}\cdot\frac{1.80}{(1-e^{-1.80})z_r} \tag{12}$$

把式(12)代入式(9)得

$$S_{zo}=CT_p\cdot\frac{1.80e^{-1.80z/z_r}}{(1-e^{-1.80})z_r} \tag{13}$$

式中：CT_p 是作物潜在蒸腾量(cm/h)，其余符号意义同前。该式即为根据土壤—冬小麦系统的水平衡关系导出的当土壤充分湿润时的根系吸水率分布表达式。

2.3 根系吸水率和土壤剖面含水率的关系

土壤剖面含水率的分布状况对冬小麦根系吸水产生较大影响。土壤含水率呈非均匀分布时，冬小麦根系吸水率与各层土壤水分状况有关。当土壤含水率降低时，根系吸水率 $S(z,t)$ 小于 S_{zo}，应考虑土壤含水率的修正，即

$$S(z,t)=CT_p\cdot\frac{1.80e^{-1.80z/z_r}}{(1-e^{-1.80})z_r}\cdot\left(\frac{\theta_z-\theta_{WP}}{\theta_F-\theta_{WP}}\right)^A \tag{14}$$

式中：θ_z 为 z 深度的土壤含水率(cm^3/cm^3)，θ_F 与 θ_{WP} 分别为田间持水量和凋萎系数(cm^3/cm^3)，A 为经验指数。

式(14)是冬小麦根系吸水模式的基本表达式。由实测土壤水分分布资料模拟的 S_i' 与同一时间、同一深度的 θ_i' 对应进行分析，分析时 θ_F 取1 m土层内的平均值23.0%(占干土重的%)，θ_{WP} 为6.851%。回归结果为 $A=0.6967$，相关系数 $R=0.8433$。因

维普资讯 http://www.cqvip.com

此，冬小麦根系吸水模式为

$$S(z,t)=CT_p\frac{1.80e^{-1.80z/z_r}}{(1-e^{-1.80})z_r}\cdot\left(\frac{\theta_z-\theta_{WP}}{\theta_F-\theta_{WP}}\right)^{0.6967}$$

$$=2.1565CT_p\frac{e^{-1.80z/z_r}}{z_r}\cdot\left(\frac{\theta_z-\theta_{WP}}{\theta_F-\theta_{WP}}\right)^{0.6967}\tag{15}$$

式中符号意义同前。

式(15)反映了冬小麦根系吸水率 $S(z,t)$ 与蒸腾速率呈正比，随土层深度 z 呈指数降低；$S(z,t)$ 还与各层的土壤有效水 AW$\left(AW=\frac{\theta_z-\theta_{WP}}{\theta_F-\theta_{WP}}\right)$有关，随有效水 AW 的降低而降低。

3　冬小麦根系吸水模式的初步应用

建立冬小麦根系吸水模式的目的在于研究田间水分的动态变化，因此，我们利用所建立的冬小麦根系吸水模式代入有根系吸水条件的土壤水分运动方程式(1)，对麦田土壤水分动态进行了预报。预报时首先将式(1)按隐式差分格式写出差分方程

$$\frac{\theta_i^{j+1}-\theta_i^j}{\Delta t}=\frac{D_{i+\frac{1}{2}}^{j+1}\left(\theta_{i+1}^{j+1}-\theta_i^{j+1}\right)-D_{i-\frac{1}{2}}^{j+1}\left(\theta_i^{j+1}-\theta_{i-1}^{j+1}\right)}{(\Delta z)^2}$$

$$-\frac{\left(K_{i-1}^{j+1}-K_i^{j+1}\right)-\left(K_i^{j+1}-K_{i-1}^{j+1}\right)}{2\Delta z}-S_i^{j+\frac{1}{2}}\tag{16}$$

令 $r_1=\Delta t/(\Delta z)^2$、$r_2=\Delta t/2\Delta z$，上式整理后得

$$-r_1\cdot D_{i-\frac{1}{2}}^{j+1}\cdot\theta_{i-1}^{j+1}+\left[1+r_1\left(D_{i-\frac{1}{2}}^{j+1}+D_{i+\frac{1}{2}}^{j+1}\right)\right]\theta_i^{j+1}-r_1\cdot D_{i+\frac{1}{2}}^{j+1}\cdot\theta_{i+1}^{j+1}$$

$$=\theta_i^j-r_2\left(K_{i+1}^{j+1}-K_{i-1}^{j+1}\right)-\Delta t\cdot S_i^{j+\frac{1}{2}}\tag{17}$$

式中：$i=1、2、\cdots、n-1$. 上式还可写为

$$a_i\cdot\theta_{i-1}^{j+1}+b_i\cdot\theta_i^{j+1}+c_i\cdot\theta_{i+1}^{j+1}=h_i\qquad(i=1,2,\cdots n-2)\tag{18}$$

式中：

$$\left.\begin{aligned}a_i&=r_1\cdot D_{i-(1/2)}^{j+1}\\b_i&=1+r_1\cdot\left(D_{i-(1/2)}^{j+1}+D_{i+(1/2)}^{j+1}\right)\\c_i&=-r_1\cdot D_{i-(1/2)}^{j+1}\end{aligned}\right\}\quad(i=1,2,\cdots,n-1)\tag{19}$$

$$h_i=\theta_i^j-r_2\cdot\left(K_{i+1}^{j+1}-K_{i-1}^{j+1}\right)-\Delta t\cdot{}_i^{j+1/2}\quad(i=1,2,\cdots,n-2)\tag{20}$$

在地表边界处土壤蒸发率已知的情况下，在 $z=0$ 的边界由式(3)再补充一个差分方程，在边界节点 $i=0$ 处列差分方程，$\partial\theta/\partial z$ 取向前差分，则有

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$-D_0^{i+1}\frac{\theta_1^{i+1}-\theta_0^{i+1}}{\Delta z}+K_0^{i+1}=-E_s^{i+\frac{1}{2}} \tag{21}$$

式中：$E_s^{i+\frac{1}{2}}$ 表示时段内的平均蒸发率。上式亦可写为

$$b_0\cdot\theta_0^{i+1}+c_0\cdot\theta_1^{i+1}=h_0 \tag{22}$$

式中 $b_0=D_0^{i+1}/\Delta z$，$c_0=-b_0$，$h_0=-E_s^{i+1/2}-K_0^{i+1}$

式(22)即为求解的方程组中的第一个方程。

当 $i=n-1$ 时，差分方程(16)写为

$$a_{n-1}\cdot\theta_{n-2}^{i+1}+b_{n-1}\cdot\theta_{n-1}^{i+1}=h_{n-1} \tag{23}$$

其中 $$h_{n-1}=\left[\theta_{n-1}^{i}-r_2\cdot\left(K_n^{i+1}-K_{n-2}^{i+1}\right)\right]-c_{n-1}\cdot\theta_n=\Delta t\cdot S_{n-1}^{i+\frac{1}{2}} \tag{24}$$

式中：$S_{n-1}^{i+1/2}$ 表示时段内的平均吸水率。

由以上过程知：要根据时段初已知的含水率预测时段末各节点的含水率时必须联立求解如下方程组，即

$$\begin{bmatrix} b_0 & c_0 & & & & 0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & & & \\ & a_2 & b_2 & c_2 & & \\ & & a_{n-2} & b_{n-2} & c_{n-2} & \\ & 0 & & & & \\ & & & a_{n-1} & b_{n-1} & \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\theta_0^{i+1}\\ \theta_1^{i+1}\\ \theta_2^{i+1}\\ \\ \theta_{n-2}^{i+1}\\ \theta_{n-1}^{i+1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}h_0\\ h_1\\ h_2\\ \\ h_{n-2}\\ h_{n-1}\end{bmatrix} \tag{25}$$

该方程组中系数矩阵仅在主对角线及相邻两侧对角线上有非零元素，是三对角形的，采用追赶法求解。由于系数方阵和常数项矩阵中包括了土壤导水率和扩散率等参数，而 $D(\theta)$、$K(\theta)$ 均是土壤含水量的非线性函数，故存在非线性问题的处理，本文中采取预报—校正法来处理这一问题，在计算时 $K(\theta)$ 与 $D(\theta)$ 仍然是在空间上取上下两节点的几何平均，在时间上取其前后两节点和算术平均。

求解过程中，根系伸展深度采用下式确定：

$$z_r=-4.4013+0.7744J_d+0.00036J_d^2 \tag{26}$$

式中：J_d 是冬小麦播种后的天数(d)，z_r 是根系伸展长度(cm)。冬小麦蒸腾量采用彭曼—蒙特斯(*Penman－Monteith*)模式计算，棵间土壤蒸发量采用蒸腾量乘以棵间蒸发与叶面蒸腾分摊系数求得[12]。

根据以上过程对冬小麦生育期内田间土壤水分动态进行了预报，并将预报期间(1990年3～4月)的土壤含水量预报值与实测值进行了比较，不同时间的预报值和实测

维普资讯 http://www.cqvip.com

值的离差分析结果如表 1。从表 1 可看出用本文所提出的冬小麦根系吸水模式代入有根

表 1　土壤容积含水量预报值与实测值之间的离差值

4 月	1 日	5 日	10 日	15 日	17 日	19 日	25 日	29 日	平均离差
离　差 (cm^3/cm^3)	0.007 9	0.018 2	0.027 5	0.016 3	0.006 1	0.013 3	0.018 3	0.016 4	0.015 5

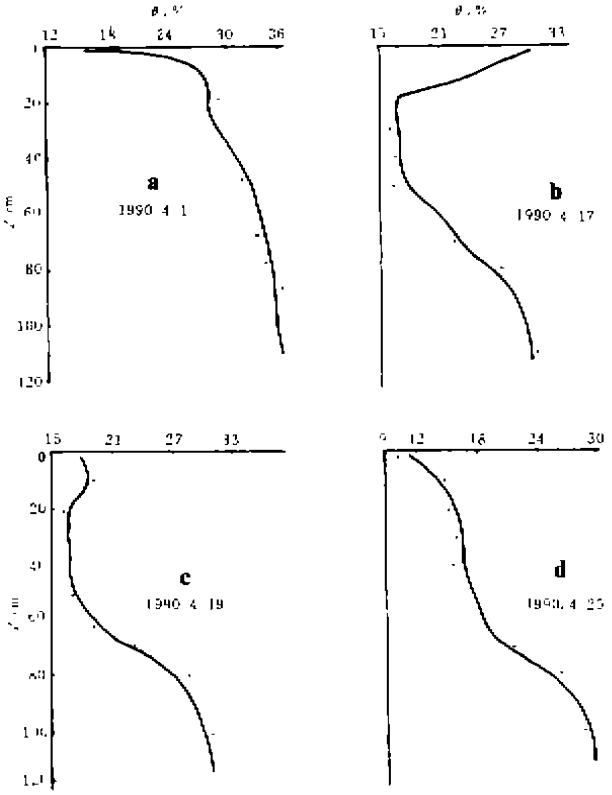

图 2　土壤含水量预报值(线)与实测值(点)的比较

系吸水条件下的土壤水分运动方程预测麦田土壤水分动态变化具有较高的精度，在预测期间的容积含水量预报值的最大离差为 0.027 5 cm^3/cm^3(相当于重量含水量 1.91%)，在整个预报期间的平均离差为 0.015 5 cm^3/cm^3(相当于重量含水量 1.08%)。我们还选择了 4 d 比较不同深度土壤含水量的预报值与实测值，如图 2 所示。从图 2 可知，不同深度的土壤容积含水量预报值与实测值之间是较一致的。为了充分检验该根系吸水模式的可靠性，还用此方法预测了 1991 年冬小麦生育期内(3 月 21 日至 4 月 24 日，共 35 d)的田间土壤水分动态，结果表明预报期间的最大离差为 0.024 8 cm^3/cm^3(相当于重量含水量的 1.72%)，预报期间的平均离差为 0.019 0 cm^3/cm^3(相当于重量含水量的 1.32%)。

综上所述，本文所建立的冬小麦根系吸水模式是在较为充分地分析了其根系吸水的物理过程和影响因素的关系基础上提出的，它能反映冬小麦根系吸水的实际情况，而且

维普资讯 http://www.cqvip.com

从实用角度考虑，在根系吸水模式中不包括根系密度、阻力等预先难以确定的参数，在实用上也较现有模型具有优越性。根据该模式的初步应用亦证明该模式具有较高的精度，但是，该模式是在一定时段内实测资料基础上分析得到的，由于受其特定条件的影响，模型不可避免地带有一定的局限性。因此，本模式还有待今后进一步检验。

参 考 文 献

1 邵明安，李玉山，杨文治．植物根系吸收土壤水分的数学模拟．土壤学报．1987(4)．295～305

2 康绍忠．土壤-植物-大气连续体水分传输理论的研究．西北农业大学1990届博士研究生学位论文，1990：49～78

3 姚建文．作物生长条件下土壤含水量预测的数学模型．水利学报，1989(9)：32～38

4 Novak V. Estimation of soil water extraction patterns by roots. *Agricultural water Management*. 1987, 12(4): 271～278

5 Nimah M N. Model for estimating soil water, plant and atmospheric interrelations: I. description and sensivety. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1973;37:522～527

Research on the Model of Water Uptake by Winter Wheat Root System

Kang Shaozhong　Liu Xiaoming　Xiong Yunzhang

(*Department of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest Agricultural University, Yangling, Shaanxi, 712100*)

Abstract Based on the measured data of stretching depth, weight density of winter wheat root system as well as the distribution of soil water contents in the profile, a dynamic simulation for water uptake by winter wheat root system was conducted. A model of water uptake by wheat root system was established by taking into account the effects of such factors as root system distribution, soil moisture content and transpiration rate, etc. in accordance with the analysis of water uptake laws by wheat root system. The results of the model are much better in practical application.

Key words winter wheat, root systems, water absorption, dynamic models, density, water content of soils / transpiration