

农林复合模式耗水特征的数值模拟 ——模型的建立与检验*

张劲松 孟平 宋兆民 陆光明 马秀玲

摘要 运用土壤—植物—大气水分传输理论,建立农林复合模式的土壤分层水量平衡模型。主要公式有:土壤蒸发与植被蒸腾、林木与小麦根系吸水、土壤层次间的水分交换及植被冠层截留量等水分要素的计算。模型的求解采用数值算法,并利用0~200 cm土壤容积含水量的实测值进行验证。研究表明:可以利用所建立的模型,模拟计算林带与小麦根系吸水量、林带与农田蒸散耗水量、林带影响农田土壤水分范围与程度。

关键词 农林复合模式、耗水特征、数值模拟

农林复合模式耗水特征的问题,国内外已开展了不少的研究^[1~8],但系统地、定量地研究林木与作物对土壤水分的共同作用及其机理等问题,尚缺少较深入的工作。目前,有关土壤水分研究的基本概念和内容,都已有很大的突破和深化。运用土壤—植物—大气水分传输理论,模拟土壤水分运动变化,进一步定量地研究单一农田生态系统中作物的耗水特征,这些方面的工作虽有人做过^{[9~12],1)},但在农林复合模式中,由于林木和作物根系的交织,以及土壤水平层次间水势梯度的存在,使得这方面的工作变得相对复杂,有关文献报道至今未见。本文将综合考虑林木、小麦的根系吸水量、土壤层次间的水分交换量以及植被冠层截留量等水分因子,建立农林复合模式土壤分层水量平衡模型,为该模式耗水特征的定量研究提供理论计算依据。

1 试验区概况

试验区地处黑龙港流域的河北省饶阳县官厅乡(115°40' E, 40°38' N)。属温带大陆性气候。年平均气温12.2℃,年均日照时数276.4 h,年均降水量549.8 mm,且年内降水量分配不均匀,多集中于6~8月份,地下水位8~10 m,地势平坦,地貌类型为滹沱河决口淤积平原,土壤类型为砂壤质潮土。种植制度一年两熟。该试验区占地849 hm²,于1983年始建,目前已形成一个完整的农林复合模式试验区,林木覆盖率1993年为20.4%。

2 复合模式土壤分层水量平衡模型的建立

2.1 概念模型的提出

土壤水量平衡,是指一定面积、一定深度土层在某一时段内的水分收支关系。其方程可表示为^[10]:

1995—12—24 收稿。

张劲松研究实习员,孟平,宋兆民(中国林业科学研究院林业研究所 北京 100091);陆光明,马秀玲(北京农业大学资源与环境学院)。

* 本文系“八五”国家科技攻关“农林复合系统结构和功能研究”专题的部分内容。

1) 龚元石. 以土壤水为中心的农田土壤平衡模型及应用的研究(博士后出站报告). 北京:北京农业大学,1994. 10.

$$W = P + IR + CU - CI - R - R_s - D - (EV + TR) \quad (1)$$

式中: W 为土体水量的变化值; P 为时段内降水量; IR 为灌溉量; CU 为地下水补给量; CI 为植被冠层截留量; R 为地表径流量; R_s 为壤中流; D 为渗漏量; EV 和 TR 分别为土壤蒸发量、植被蒸腾量; 两者合称为蒸散量(ET)。

对于地势平坦的平原农区, 地表径流量可忽略不计。若将根层分成若干层次, 则分层土壤水量平衡方程可表示为:

$$\begin{cases} (\theta_i^{j+1} - \theta_i^j) Z_i = P^j + IR^j - CI^j + QX_i^j + QZ_{i,2}^j - EV^j - ST_i^j - SW_i^j \\ (\theta_i^{j+1} - \theta_i^j) Z_i = QX_i^j + QZ_{i+1,1}^j - QZ_{i,i-1}^j - ST_i^j - SW_i^j (i > 1) \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ 为土壤容积含水量(%); i 为土壤层次序号; j 为时间序号; Z_i 为土层厚度(cm); QX 为水平方向上土壤层次间非饱和流入量与流出量之差($QX = QX_{左} - QX_{右}$); QZ 为垂直方向上土壤层次间非饱和流量(并规定向上为正, 向下为负); ST 、 SW 分别为林木根系吸水量、作物根系吸水量。其它各组分的意义同(1)式。

(2)式的边界条件为:

$$\begin{cases} -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} + K(\theta) \Big|_{z=0\text{cm}} = -EV^j \\ \theta \Big|_{z=200\text{cm}} = \theta_i^j \end{cases}$$

2.2 平衡分量的确定与计算

2.2.1 降水量 P 可从试验区东南方向 3.5 km 处的气象站观测得到。

2.2.2 截留量 CI

(1) 小麦截留量的计算公式^[12]为:

$$CI = \begin{cases} 0.092 \times LAI \times P^{0.53-0.0085(P-5.0)} \\ 0.025 \times LAI \end{cases} \quad (LAI \text{ 为叶面积指数})$$

(2) 林带截留量采用游有林(1991)在本试验区所做的统计模式:

$$CI = 0.2402 + 1.9788 \ln(P)$$

2.2.3 垂直方向上土壤层次间非饱和流量 当不发生降水或灌溉时, 土层之间的非饱和流量可根据非饱和流的达西定律^[13,14]求得:

$$QZ^j = -K_z \times \left(\frac{\partial \Psi_m}{\partial z} - 1 \right)$$

式中: z 为垂直坐标; K_z 为非饱和导水率; Ψ_m 为基模势, 由水分特征曲线方程求得。

当发生降水或灌溉时, 土表层首先接受水, 然后以饱和与非饱和流的形式向下渗漏。在以时间步长为一天模型中, 可假定一次降水或灌溉的入渗可在当天完成。其入渗量可用下式计算:

$$\begin{cases} QZ_{1,2}^j = P^j + IR^j - CI^j + \theta_1 \cdot Z_1 - \theta_{1'} \cdot Z_1 \\ \theta Z_{i,i+1}^j = QZ_{i-1,i}^j + \theta \cdot Z_i - \theta_{i'} \cdot Z_i \quad (i = 2, 3, 4, \dots, n) \end{cases}$$

式中: $\theta_{i'}$ 为土壤饱和含水量(%).

在计算过程中, 若第 i 层入渗量的计算值小于 0, 则入渗量均等于 0。

2.2.4 水平方向上土壤层次间非饱和流量 水平方向上土层间的非饱和流量, 可根据非饱和流的达西定律求得:

$$QX_{i,i+1}^j = -K_x \times \frac{\partial \Psi_m}{\partial x}$$

式中: K_x 为非饱和导水率。研究中, 假定层内土壤均质各向同性, 则 $K_x = K_z$ 。本文根据实测土壤含水量, 并假设相邻两个观测时段内的 θ_X 为均匀变化, 而推算得 QX 。

2.2.5 根系吸水模式 研究中采用姚德良^[9]的模式:

$$SZ(z, t) = - \{a(z, t) \cdot f[\Psi(z)] \cdot TR\} / \left\{ \int_0^{Lr} a(z, t) \cdot f[\Psi(z)] dz \right\}$$

式中: Lr 为根层厚度; $a(z, t)$ 为吸水根的密度分布函数; TR 为植被蒸腾强度。

本文是根据实测数据的时空变化趋势, 按一定的曲线方程统计拟合得到。 $f[\Psi(z)]$ 为 Z 点处土壤水分状态与平均水分状态偏差引起的根吸水率的偏差。

$$f[\Psi(z)] = \begin{cases} 0 & (\Psi < \Psi_w) \\ [(\Psi_w - \Psi) / (\Psi_w - \Psi_f)]^2 & (\Psi_w > \Psi > \Psi_f) \\ 1 & (\Psi > \Psi_f) \end{cases}$$

式中: Ψ_f 和 Ψ_w 分别表示田间持水量和凋萎湿度所对应的水势; T_w 为蒸腾量。

2.2.6 蒸腾、蒸发的计算模式

(1) 农田蒸散

$$\text{小麦蒸腾}^{[11]}: TR = \frac{1}{L} \cdot \frac{A + \rho C_p D / ra}{1 + \gamma(1 + rst/ra)} \quad (3)$$

$$\text{土壤蒸发}^{[1]}: EV = K_s \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{A + \rho C_p D / ra}{\gamma} \quad (4)$$

(3)、(4) 式中, A 为冠层净辐射; R_n 为太阳净辐射; ρ 、 C_p 分别为干空气密度和比热; γ 为干湿常数; D 为空气饱和差; L 为汽化潜热; γ 为饱和水汽压随温度变化的斜率; ra 、 rst 分别为边界层阻力、冠层总气孔阻力; K_s 为土壤水分胁迫系数; LAI 为叶面积指数。以上各参数的计算公式为:

$$A = R_n(1 - e^{K \cdot LAI})$$

式中: K 为消光系数, 取中午时刻左右的平均值, 文中 $K = 0.46$ (适用于小麦拔节期至乳熟期)。

$$ra = ran + 6.266(U_z / ran)^{-1/3} \quad ran = (\ln \frac{z-d}{Z_0})^2 / k^2 / U_z$$

式中: Z_0 为粗糙度, 取 $Z_0 = 0.13H$ (H 为小麦高度); U_z 为 Z 高度处的风速; k^2 为卡曼常数 ($k = 0.4$); d 为零平面位移 ($d = 0.63H$)。

$$rst = [rs \cdot \min + (rs \cdot \max - rs \cdot \min) \exp(-\beta Q)] f(D)$$

式中: $rs \cdot \min$ 为强辐射条件下最小气孔阻抗, $rs \cdot \max$ 为暗情况下最大气孔阻抗, 本文取 $rs \cdot \min = 1.79$ (s/cm), $rs \cdot \max = 45$ ($45 s/m$)。 β 为阻抗光的依赖参数。 Q 为总辐射; $f(D)$ 为空气饱和差对 rst 的影响。

$$f(D) = \begin{cases} 1 & (D < 15 \text{ mb}) \\ 0.04 \times D + 0.4 & (15 \text{ mb} < D < 30 \text{ mb}) \\ 0.04 \times D^{1.1} & (D > 30 \text{ mb}) \end{cases}$$

$$K_s = \ln(Av + 1) / \ln(101)$$

式中: $A_v = [(W - W_a) / (W_f - W_a) \times 100(\%)]$, A_v 表示土壤有效含水量百分数; W 为土壤实际贮水量; W_a 为风干土壤含水量; W_f 为凋萎湿度。

(2) 林带蒸散

林带蒸腾: 见(5)式。

土壤蒸发: 采用余新晓²⁾的计算公式:

$$EV = TR / (e^{K \times \{1.0 + A \times |\sin[(t - 13)\pi/12]| \} \times LAI} - 1)$$

式中: LAI 为叶面积指数; t 为一日中的时间, 从 0 点开始排序, 以小时为单位; K 为林木的消光系数; A 为消光系数 K 在日变化过程中的振幅值。

K 和 A 随不同树种有不同的值。刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.) $K = 0.4016$, $A = 0.987$
2. 本研究林带树种为毛白杨, 取 $K = 0.30$, $A = 1.20$ 。

2.3 观测项目及方法

2.3.1 土壤物理性质分析与测试 0~200 cm 土层中, 按土壤质地类型, 分层次地进行颜色、质地、结构、容重、田间持水量、饱和含水量、凋萎湿度及风干含水量的分析与测试。

2.3.2 土壤水分运动参数的测点 由田间采集原状土, 采用压力板法测定土壤水分特征曲线, 采用室内定水位法测定饱和和导水率, 采用 Jackson 方程计算求出饱和和导水率^[13]。

2.3.3 林带及冬小麦根长密度的测定

(1) 冬小麦 冬小麦根长密度的测定采用根钻法分层取土样, 清洗土壤和杂质后, 用交叉法^[15]求得: $L = 11 \times 14 \times N \times Y$, $RD = L/V$ 。式中: L 为根系长度(cm), RD 为根长密度(cm/cm^3), N 为交点数, Y 是与网络形状有关的常数。本研究中, 根钻横断面积约为 45.4 cm^2 , 每隔 10 cm 取土样, 取样点深度 100 cm。

测定时期: 拔节期、抽穗期、扬花期和乳熟期。

(2) 林带 林带根长密度的测定采用挖剖面法分层取样。清洗后以根直径 1 mm 为吸水根的界限进行分类, 再求算吸水根的根长密度和非吸水根的干重, 其求算方法和公式同冬小麦。研究中取样深度为 200 cm, 每隔 10 cm 取样, 土样体积为: $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 。假设年内树木根系数量变化较小, 并忽略不计。于 9 月下旬测定一次。

2.3.4 土壤含水量的测定 采用土钻法测定土壤含水量, 每隔 10 d 测定一次, 20 cm 以上每 10 cm 土层取样, 20 cm 以下每 20 cm 取样直至 200 cm 土深。

2.3.5 农田小气候观测 冬小麦拔节至乳熟期间, 选择典型天气日, 每旬观测 2~3 d。观测时刻: 07:00~19:00, 每小时观测一次, 夜间蒸散忽略不计。于各测点活动面及活动面上 0.5 m 处、2.0 m 处用通风干湿表与轻便风速表进行温、湿、风梯度观测, 并于活动面上 1 m 处用国产天空辐射表进行总辐射与射辐射的观测; 与此同时, 用 LI-1600 型稳态气孔仪测定小麦旗叶气孔阻抗。

2.3.6 林带蒸腾量的测定 利用 TN-100 型扭力天平, 采用快速称重法测定单株林木的蒸腾强度, 换算成林带蒸腾耗水量, 换算公式为:

$$TW = TR \times h \times B/10 \quad (5)$$

式中: TW 为林带蒸腾量; TR 为蒸腾强度; h 为小时数; B 为鲜叶生物量重(t/hm^2)。观测时间

2) 余新晓. 晋西北地区防护林生态系统土壤动力学水文理论及其应用研究. 北京林业大学博士论文, 1993.

与农田小气候观测同步。

3 方程的求解

由于非饱和导水率 K , 基模势 Ψ_m , 土水势 Ψ 以及根系吸水速率 $S(z, t)$ 本身都是土壤容积含水量的变量函数, 所以(2)式为非线性方程, 利用数值计算法求解方程时, 需对它进行线性化处理。本研究将采用预报校正法中的线性外推法, 即认为含水量在相邻两个时段内是线性变化的, 则可由上一时段初含水量 θ^{-1} 和时段末含水量 θ 线性外推求出本时段末含水量 θ^{+1} 或本时段中间含水量 $\theta^{+0.5}$; 其计算公式为:

$$\theta^{+1} = 2\theta - \theta^{-1}; \quad \theta^{+0.5} = 1.5\theta - 0.5\theta^{-1}$$

对于第一时段, 无法外推时, 则用显式外推法。此外, 对空间结点间的有关参数的处理, 采用几何平均法如:

$$K_{i \pm 0.5} = \sqrt{K_i \times K_{i \pm 1}}$$

本研究采用 TURBO PASCAL(2.0) 编程, 方程求解的流程图可用如下框图(图 1) 表示。

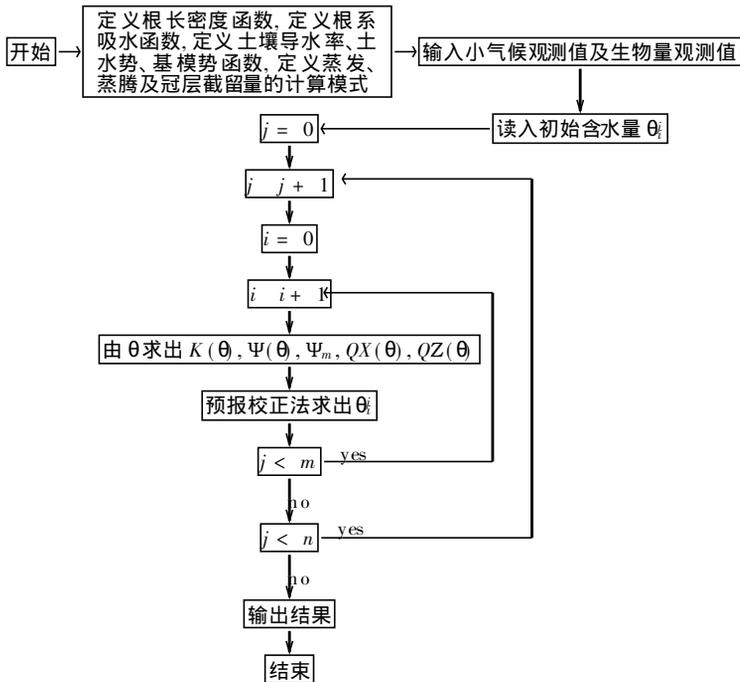


图 1 方程求解的流程图

4 模型的验证

4.1 测点布置

在试验区中部选择一代表性较好的农田林网, 网格面积为 $500 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 。林带树种为毛白杨(*Populus tomentosa* Carra), 一路两行($3 \text{ m} \times 5 \text{ m}$)。树龄 10 a, 树高 17 m, 枝下高 4.0 m, 疏透度 0.4~0.5。网内小麦品种为“农大 97”, 有灌溉条件。本研究以东西林带及其防护下的北侧农田为观测对象。设林带树高为 H , 在林带北侧中心线上 $0.0H$ (林带林缘处)、 $0.5H$ 、 1.0

H、2.0H、5.0H 处布设观测点(图2)。对照点设在试区东北方向500 m处的旷野农田内。

4.2 验证的结果与评价

利用所建立的土壤水量平衡模型,模拟计算了0.0H、0.5H、1.0H、2.0H及5.0H处冬小麦拔节期至乳熟期土壤贮水量的变化值。结果表明,各测点0~200 cm土层贮水量的模拟值与实测值的相对误差平均值分别是4.9%、5.0%、6.4%、5.2%、6.9%(见表1),并由各测点各土层土壤容积含水量模拟值与实测值的相对误差值(见表2)可知,0~200 cm土层土壤容积含水量的模拟效果较好。所以说,可以用建立的模型来模拟计算农林复合模式0~200 cm土层贮水量、蒸散耗水量、林木与小麦根系吸水量的时空变化值,以及林带影响农田土壤水分的范围与程度。

本模型对土壤含水量进行模拟计算时,其误差主

要来源于设计模型时的一些假设(如对径流、渗漏等水分因子的处理),计算方法的选择及参数的取值等。而且,本模型是在特定的自然条件、特定的复合模式结构条件下完成的。此外,水平方向上的非饱和流量由实测资料计算求得,以上种种不足之处均有待于改进与完善。

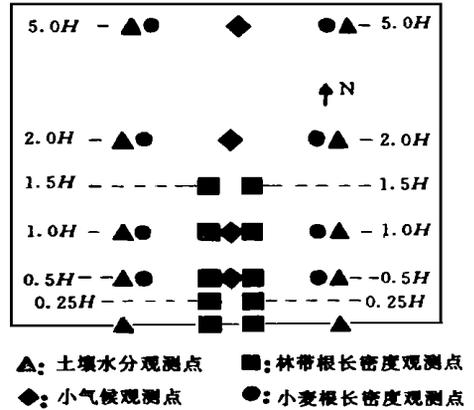


图2 测点布置示意图

表1 各测点0~200 cm土层土壤贮水量模拟值与实测值的比较 (1994年)

月—日	0.0H			0.5H			1.0H			2.0H			5.0H		
	S	M	R	S	M	R	S	M	R	S	M	R	S	M	R
	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(mm)	(%)
04-19	503.2	536.4	6.1	627.9	678.1	7.4	681.8	721.7	5.5	692.4	717.2	3.4	646.8	621.9	4.0
04-29	502.0	503.2	0.2	608.0	594.2	2.3	658.6	707.0	6.8	714.6	701.5	0.5	622.4	628.8	1.0
05-09	501.1	477.3	5.0	591.1	626.3	5.6	655.3	606.0	8.1	637.2	606.8	4.8	626.4	590.4	9.2
05-21	488.8	453.0	7.9	583.6	547.0	4.8	654.0	633.9	4.7	680.2	612.6	11.0	577.4	519.4	11.1
05-31	478.5	451.1	6.0	567.0	509.0	11.3	646.3	691.3	6.7	628.2	641.2	2.9	564.9	503.6	11.9
06-08	470.7	449.8	4.6	551.5	588.2	8.3	647.6	595.5	7.1	607.3	553.2	9.7	543.3	482.8	6.1
平均	-	-	4.9	-	-	5.0	-	-	6.4	-	-	5.2	-	-	6.9

注: S——模拟值, M——实测值, R——相对误差。

表2 各测点0~200 cm土层土壤容积含水量模拟值与实测值的相对误差 (1994年, 单位: %)

土层深度 (cm)	0.0H		0.5H		1.0H		2.0H		5.0H	
	04-19	05-03	04-19	05-03	04-19	05-03	04-19	05-03	04-19	05-03
10	7.6	7.5	7.4	8.3	5.8	9.7	5.1	8.2	8.5	3.3
20	8.4	9.8	8.5	9.7	6.2	8.3	3.6	7.0	3.7	6.1
40	0.6	0.7	4.5	5.1	5.4	10.7	5.8	6.3	3.8	5.6
60	0.8	3.6	1.4	1.8	4.5	7.9	2.2	1.4	10.6	12.3
80	3.1	0.4	4.6	6.3	5.2	10.1	2.3	5.5	2.3	17.3
100	5.7	3.7	3.7	1.9	7.8	10.9	1.3	8.1	3.6	13.5
120	3.3	3.9	4.7	4.6	5.9	7.0	1.6	1.8	5.0	4.1
140	7.3	5.6	2.2	11.2	6.3	9.7	4.5	1.0	1.2	7.7
160	7.8	7.1	3.1	5.2	5.1	11.4	3.7	4.7	2.1	7.5
180	7.2	4.2	2.2	5.9	6.1	4.3	1.4	7.3	1.8	9.0
200	8.1	2.5	5.3	1.6	2.3	1.2	1.3	1.6	1.4	1.1

参 考 文 献

- 1 谢京湘. 农林复合生态系统研究概况. 北京林业大学学报, 1989, 10(1): 104~108.
- 2 宋兆民. 黄淮海平原综合防护林体系生态经济效益的研究. 北京: 北京农业大学出版社, 1990.
- 3 任勇. 道路农田防护林系统水分关系的研究. 生态学杂志, 1993, 12(4): 1~6.
- 4 Eastham J. The effect of tree spacing on evaporation from an agroforestry experiment. *Agri. For. Meteorol.*, 1988, 42: 355~368.
- 5 陆光明. 农林复合系统中农田蒸散及可能蒸散的研究. 北京农业大学学报, 1993, 18(4): 409~415.
- 6 裴步祥. 农田水量平衡. 见: 中国农业百科全书. 农业气象卷. 北京: 农业出版社, 1986, 158~159.
- 7 McGowan M, Williams J B. The water balance of an records. *J. of soil Sci.*, 1980, 31: 217~230.
- 8 Nizinski J. A model of transpiration and soil-water balance for a mature oak forest. *Agric. For. Meteorol.* 1989, 47: 1~17.
- 9 姚德良. 在植物耗水条件下土壤水分动态的数值模拟. 土壤学报, 1993, 30(1): 111~115.
- 10 康绍忠. 土壤—植物—大气水分传输理论及其效应. 北京: 水利出版社, 1994, 85~114.
- 11 卢振民. 田间作物蒸腾量测算方法研究. 见: 卢振民主编. 农业生态研究. 北京: 气象出版社, 1989.
- 12 刘昌明. 土壤—植物—大气连续体的蒸散发模型. 水利学进展, 1992, 3(4): 255~263.
- 13 Daniel Hilles. *Fundamentals of soil physils.* New York: Academic Press, 1980.
- 14 雷志栋. 土壤水分动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- 15 Bohn W. (薛德榕译). 根系研究法. 北京: 科学出版社, 1979, 344~350.

Numerical Simulation on Characteristics of Water Consumption in Agroforestry: Model Establishment and Verification

Zhang Jinsong Men Ping Song Zhaomin Lu Guangming Ma Xiuling

Abstract This dissertation, applying the theory on water transport in soil-water-atmosphere continuum, develops a model of soil layered water balance of Agroforestry. This model has the main calculating methods of water factors in this model are: soil evaporation and plant transpiration, water uptake by roots of wheat and shelterbelt, water exchange between the soil layers, canopy rainfall interception. These theoretical data are obtained by numerical calculating method, and with experimental data of soil water content at 0~200 cm depth. The results show: the developed model could be used to calculate the water uptake by roots, the e-vapo-transpiration, and the extent that the shelterbelt exerts on the field soil water of shelterbelt and wheat.

Key words agroforestry, characteristics of water consumption, numerical simulation

Zhang Jinsong, Assistant Professor, Men Ping, Song Zhaomin (The Research Institute of Forestry, CAF Beijing 100091); Lu Guangming, Ma Xiuling (Beijing Agriculture University).