

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 23 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等 (7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等 (7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等 (7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等 (7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等 (7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等 (7302)
基于模型数据融合的干烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等 (7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华 (7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星 (7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等 (7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉 (7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等 (7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利 (7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等 (7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等 (7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等 (7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成 (7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等 (7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等 (7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚 (7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等 (7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现 (7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等 (7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等 (7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等 (7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等 (7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等 (7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等 (7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等 (7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等 (7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等 (7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅 (7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等 (7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等 (7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等 (7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等 (7595)
专论与综述	
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智 (7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等 (7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201111111706

辛小桂, 吴普特, 汪有科, 蔺君. 山地梨枣树耗水特征及模型. 生态学报, 2012, 32(23): 7473-7482.

Xin X G, Wu P T, Wang Y K, Lin J. A model for water consumption by mountain jujube pear-like. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7473-7482.

山地梨枣树耗水特征及模型

辛小桂^{1,2}, 吴普特^{1,2,*}, 汪有科^{1,2}, 蔺 君³

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学资源与环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 由于枣树树龄、品种、冠层形态、下垫面以及枣树种植区气象条件不同, 导致榆林地区枣树耗水规律研究缺乏系统性。本文利用 HYDRUS-1D 数学模型对枣树耗水规律进行了研究。2008—2010 年通过对榆林米脂县不同树龄山地梨枣树叶面积指数、根系分布规律, 作物系数的研究, 结合 HYDRUS-1D 模型预测所需土壤、气象等参数的测定, 对山地梨枣树土壤水分动态进行了模拟, 并对土壤水分模拟结果与实测值进行拟合, 反推出模型计算所需的消光系数及土壤水分胁迫系数等参数。结果表明: HYDRUS-1D 模型能够很好模拟该地区梨枣树土壤水分动态变化过程, 该地区成年(8 龄)梨枣树从发芽开始到梨枣收获期结束共耗水 267 mm。

关键词: 山地梨枣; 作物系数; 土壤水分胁迫系数; 耗水规律; 模型研究

A model for water consumption by mountain jujube pear-like

XIN Xiaogui^{1,2}, WU Pute^{1,2,*}, WANG Youke^{1,2}, LIN Jun³

1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water-Resources, Yangling 712100, China

3 College of Resources and Environment, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China

Abstract: The regulation of water consumption by mountain jujube trees, jujube pear-like, has not been previously researched in a systematic fashion because of differences among the jujube samples, including age, variety, canopy morphology, meteorological conditions, and land surface conditions. Numerical simulation is an effective and convenient method to investigate the patterns of water consumption of trees, including jujube trees. Therefore, this paper introduces a mathematical model (HYDRUS-1D) to simulate the soil moisture requirements for jujube pear-like.

First, to develop the model, the forecast parameters of the HYDRUS-1D model, such as soil properties, weather conditions, leaf area index (LAI), root distribution, and basal crop coefficient, were measured in the northern hilly area of Shannxi Province, China, from 2008 to 2010. Second, the dynamic characteristics of soil moisture in a rain-proof plot experiment were roughly simulated using the HYDRUS-1D model, then, we adjusted the model so that the simulated results better fit the measured data of soil moisture. We inversely extrapolated the parameters of soil water stress coefficient and extinction coefficient, which determine the values of the potential transpiration and potential evaporation, respectively, for the atmospheric boundary conditions. Finally, using the parameters we estimated, we used the HYDRUS-1D model to predict water consumption by eight-year-old jujube pear-like trees in the field.

The results showed the following. (1) The changes in LAI of jujube pear-like were consistent with a Gaussian function from germination to fruit ripening. Average LAI of jujube pear-like increased from young to old trees, but the inter-annual differences in LAI decreased in trees that were older than six years. (2) Root depth of jujube pear-like increased linearly

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAD29B04)

收稿日期: 2011-11-11; 修订日期: 2012-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

with the age of the tree. At the same time, the distribution of capillary roots decreased linearly with an increase in the root depth. The percentage of capillary roots at a depth of 40 cm was more than 70%. (3) To obtain the boundary conditions of the HYDRUS-1D model, we used LAI and the extinction coefficient combined with the crop coefficient to calculate the daily reference evapotranspiration. Fitting the model to the data indicated that, when extinction coefficient of mountain jujube pear-like was 0.52, the measured data of soil moisture fit the simulation quite well. (4) The correlation coefficient of simulated values and measured data of soil water storage reached 0.89, which proved that the parameters of the model with respect to water consumption of jujube pear-like were reliable and that the HYDRUS-1D model could simulate well the dynamic process of soil moisture changes and accurately estimate the water requirements of jujube pear-like. (5) As a result, cumulative evaporation of mountain jujube pear-like was 92 mm, and cumulative transpiration was 175 mm. The total water volume consumed by eight-year-old jujube pear-like trees, from germination to harvest, was 267 mm. Based on the actual amounts of local rainfall and water resources, jujube pear-like should be irrigated two to three times during its flowering and fruiting periods, and water application depths should reach 30—40 mm to meet the growth requirements of this crop plant.

Key Words: mountain jujube pear-like; crop coefficient; soil water stress coefficient; laws of evapotranspiration; model study

陕西榆林地区山地枣树由于树龄,品种,冠层形态,以及枣树种植区气象条件,下垫面条件不尽相同,导致枣树耗水规律研究缺乏系统性。依据根区土壤水分的动态变化规律来确定灌溉制度是合理可行的,对土壤水分动态变化的研究可以分为试验研究和数值模拟,后者在初始及边界条件已知时被认为是种科学、有效、便捷的方法^[1-2]。HYDRUS-1D 数学模型是美国农业部国家盐土实验室开发的用于模拟变饱和孔隙介质中水流和溶质运移的有限元计算机软件,在土壤水分动态模拟应用中较为广泛^[3-11]。

本文基于 2008—2010 年米脂山地梨枣树试验观测数据,分析确定了 HYDRUS-1D 模型预测所需要的参数,并用所获得的参数对山地梨枣树土壤水分动态进行了模拟与验证。以期简化不同条件下枣树耗水规律的研究,为指导该区枣树灌溉提供基本依据。

1 材料与方法

1.1 试区概况

试验位于黄土高原丘陵沟壑区的米脂县银州镇孟岔村山地枣树示范滴灌基地(37.78°N,110.23°E,海拔 870 m)进行。研究对象为 2 m×3 m 密植梨枣树,试验区土壤为粉沙壤土,有效氮、磷、钾含量分别为 13.5、2.79、86 mg/kg。本文分析与计算均基于 2008—2010 年连续 3a 无水分胁迫条件下不同树龄实测数据(3、4、8a)及 2010 年 4 年生梨枣树控水条件下实测数据。

2008 年自 DOY(日序 day of year)130 至 DOY270(生育期),对大田 8 年生梨枣树模拟对比试验在水平阶进行,地面坡度为 30°左右。试验期降雨量和累计参考蒸发量($C-ET_0$),灌水量(WAD)和 1.6 m 内土壤水分储量(SWR)见图 1。

2009 年及 2010 年自 DOY130 至 DOY260 对 3—4 龄梨枣树模拟对比试验在防雨棚内进行。通过在距树干 20 cm 处,分别在地表下 18、27 cm 及 60 cm 土层埋设平衡式土壤水分张力计(EQ15; Equilibrium Tensiometer,德国)来监控土壤水势,每小区维持土壤水

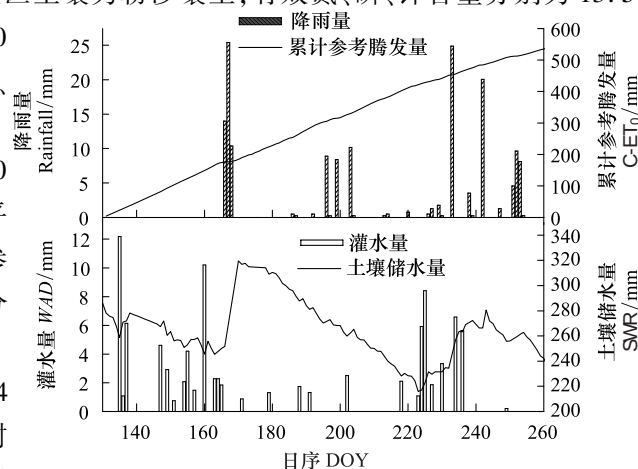


图1 2008 年降雨量及梨枣树试验期灌水量

Fig.1 Rainfall of 2008 and WAD of 8-year-old jujube

势在-30—50 kPa 范围内的 WAD 见图 2,2009、2010 年整个生育期分别灌水 138,194 mm。

梨枣树控水试验自 2010 年 DOY150 充分灌溉后开始监测,到 DOY230 期间不灌水,推求土壤水分胁迫系数。

1.2 观测项目

(1)气象要素 用 Watchdog 气象站观测气象指标,用 Penman-Monteith 公式估算 ET_0 ;

(2)叶面积指数(LAI) 用植物冠层分析仪(WinsCanopy2005a,加拿大)测量 3—10 年生梨枣树 LAI,每隔 10 d 测量 1 次。

(3)实际耗水量(AET) 灌水后(控制土壤水势到设计范围后)逐日记录每天水势变化过程,用水量平衡法计算梨枣树 AET。

(4)根系分布 采用剖面壕沟分层分段挖掘法对梨枣树根系形态分布特征进行研究。在水平阶面上,以树干为中心,挖一个长 1.2 m,宽 0.6 m 的壕沟,深直至无根系分布为止,每 10 cm 分层取样。

(5)土壤含水率 用 Trime(T3,德国)测定。距树干 20、40 cm 各布置一个 Trime 管,每 3—5d 测量 1 次,测定深度为 0—160 cm,隔 10 cm 取值。并用线性内插法计算中间天数土壤含水率。

1.3 Hydrus 模型

根系吸水条件下的土壤水分运动可以用一维饱和-非饱和模型来模拟该土壤剖面上的水分变化规律^[12-16],其数学模型为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} - S_r(z, t) \quad (1)$$

式中, θ 为土壤体积含水率, $D(\theta)$ 为土壤非饱和扩散率, $k(\theta)$ 为土壤非饱和导水率, t 为时间, z 为平面坐标, $s_r(z, t)$ 为源汇项,此处表示作物的蒸腾率。定解条件如下:

$$(1) \text{ 初始条件} \quad \theta(z, t) = \theta_0(z) \quad t = 0 \quad (2)$$

(2)边界条件 下边界条件为自由排水界面,上边界条件以地表蒸发强度 $Es(t)$ 为控制条件:

$$D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) = Es(t) \quad z = 0, t \geq 0 \quad (3)$$

1.4 研究方法

HYDRUS-1D 模型只是对 Richard 方程的一个数值解法,本身并无作物模型内涵,因此构建 HYDRUS-1D 模型时,首先要解决的就是梨枣树的作物系数,其次要确定蒸发强度 $Es(t)$ 和蒸腾强度 $s_r(z, t)$,在充分供水条件下,HYDRUS-1D 模型中有一个关键待定参数——消光系数 F ,决定潜在蒸发量和蒸腾量的比例^[17]:

$$S_r(z, t) = k_c \cdot ET_0 (1 - e^{-F \cdot LAI}) \quad (4)$$

$$Es(t) = k_c \cdot ET_0 \cdot e^{-F \cdot LAI} \quad (5)$$

式中, k_c 为作物系数, ET_0 为参考作物蒸发量, F 为消光系数, LAI 为叶面积指数。

在水分胁迫条件下,获得以上参数后,土壤水分胁迫系数(ks)成为唯一的待定参数。本研究根据 USDA 发布灌溉工程手册关于 ks 的计算方法先进行初步估算^[18],然后对比土壤含水率模拟值和实测值进行调整,最终确定梨枣树的 ks 。

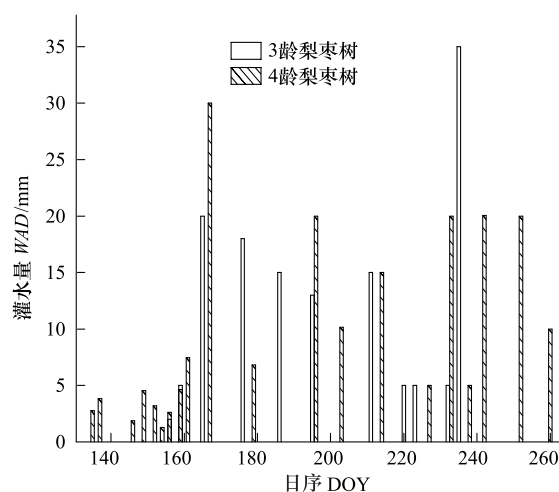


图 2 3 龄梨枣树及 4 龄梨枣树灌水量

Fig. 2 WAD of 3 and 4 year-old jujube pear-like in the trial period pear-like

2 结果与分析

2.1 Hdyrus 模型相关参数确定

2.1.1 土壤及气象参数

图3为该区2008—2010年 ET_0 ,从图中可见:2008—2010年变化趋势基本一致,在6月20日左右(梨枣花期) ET_0 达到最大值;图4为试验研究区土壤水分特征曲线,实测值为离心机实测数据,模拟值为利用VG方程模拟的土壤水分特征曲线,从图中可知^[19]:该区土壤田间持水量为体积15.1%,凋萎系数为体积7.2%;此外,用入渗仪(Guelph-2800k1,美国)测得饱和土壤导水率为40.6 cm/d。

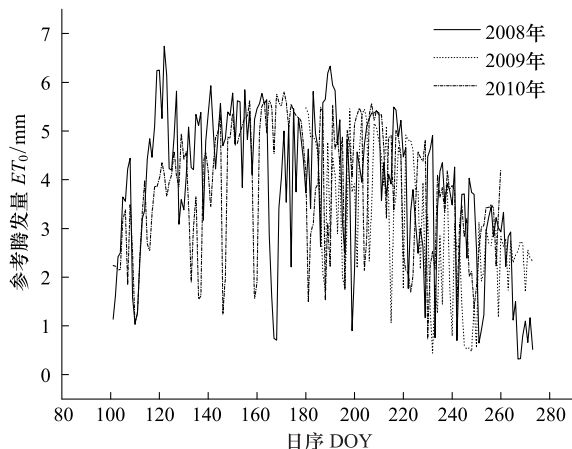


图3 2008—2010年试验地参考作物腾发量

Fig.3 Reference evapotranspiration in experiment station during 2008 to 2010

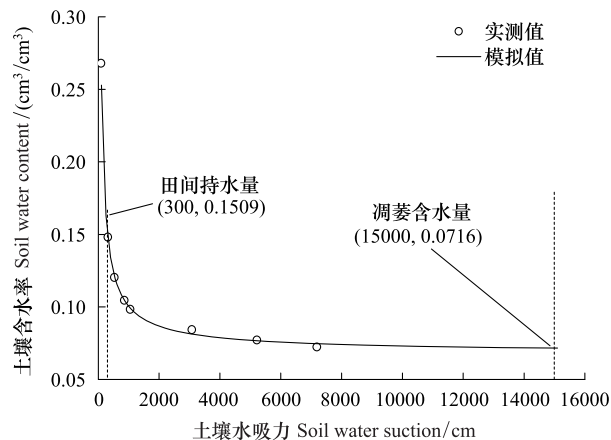


图4 试验区及试验小区土壤水分特征曲线

Fig.4 Soil water characteristic curve in experiment station

2.1.2 叶面积指数

8年生梨枣树叶面积指数随DOY及梨枣树的不同生长阶段(F_s)的变化结果见图5,从图中可以看出: LAI 在 $F_s=0.48$ 以前是线性增长,而在 $0.48 < F_s < 0.9$ 之间基本维持不变,此时梨枣已被采摘完毕,拟合分析表明 LAI 同DOY关系符合Gauss函数,回归系数达到0.98,其模型具体形式见公式6。

3—10年生梨枣树平均 LAI 见图6,不难发现树龄超过7a时,不同树龄 LAI 平均差异不大,为方便模型计算,对不同树龄平均 LAI 进行拟合,其修正系数见公式7。

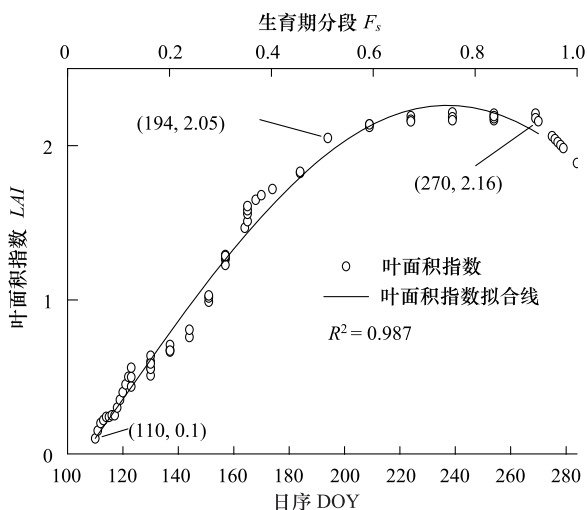


图5 8龄梨枣树生育期 LAI 动态变化过程

Fig.5 Process of LAI in 8-year-old jujube pear-like

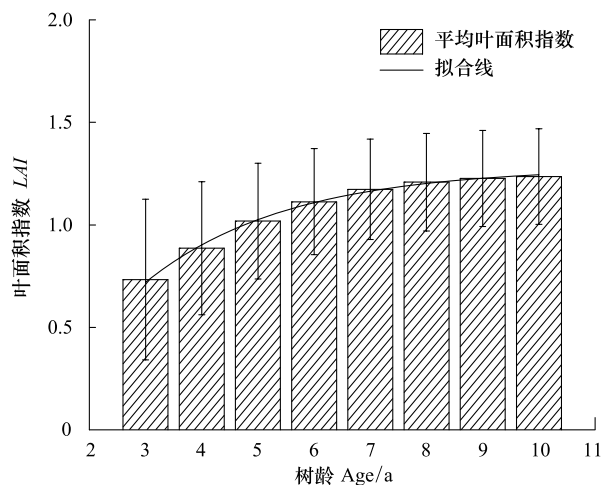


图6 不同树龄平均 LAI

Fig.6 Average LAI of different age jujube pear-like

$$LAI = k_t (-2.93 + 5.19e^{-2(\frac{x-237.08}{245.04})^2}) \quad (6)$$

$$k_t = \frac{(1.27 - 1.83e^{\frac{-y}{2.53}})}{1.24} \quad (7)$$

式中, LAI 为叶面积指数; k_t 为树龄修正系数; x 为时间自变量, DOY ; y 为树龄自变量, Age 。

2.1.3 梨枣树根系分布

本次试验模型采用一维分析, 故对不同水平距离根系分布求平均值作为根系的垂直分布。Hydrus 模型根系分布函数 $b(x)$ 是一个很特殊的函数, 它满足以下条件

$$\int_0^{LR} b(x) dx = 1 = \sum_{n=1}^M b_n \Delta z \quad (8)$$

式中, LR 为根系层厚度, x 为深度; Δz 为节点间距, b_n 为每个间距中的根系分布函数值, M 为根系层占节点数。

根据 $b(x)$ 函数特点, 本研究用不同深度吸水根系 ($< 2 \text{ mm}$) 占总吸水率根系的比例作为 $b(x)$ 函数值, 初步研究表明: 不同树龄梨枣树当年生白色毛细根系分布比例基本一致, 自上而下线性减少, 表层占到 20%, 8 年生梨枣树平均毛细根分布见图 7。不同树龄根系深度差异显著, 3—10 年生梨枣树根系深度见图 8。

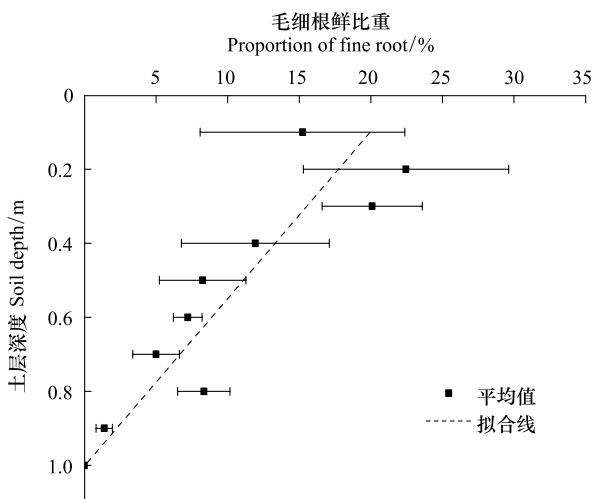


图 7 8 龄梨枣树毛细根垂直分布

Fig. 7 Fine root's vertical distribution of 8-year-old jujube pear-like

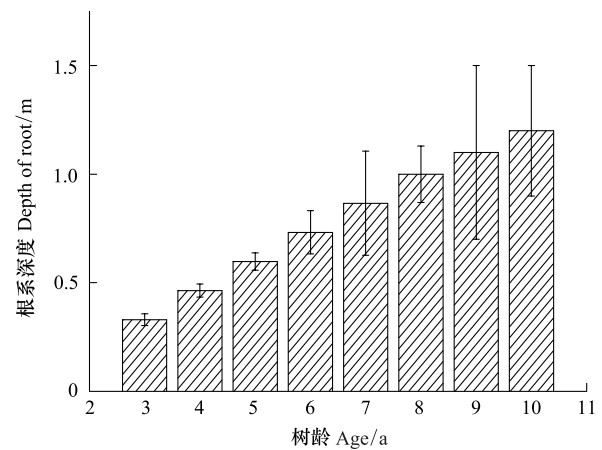


图 8 不同树龄梨枣树根系垂直分布

Fig. 8 Root's vertical distribution of different age jujube pear-like

HYDRUS-1D 模型将梨枣树不同土层深度的蒸腾量 $s_r(z, t)$ 根据根系分布比例进行分配, 所以 $b(x)$ 主要决定模型中不同土层土壤含水率的模拟计算结果, 从图 7 可以看出: 枣树的毛细根系主要分布在土壤浅层 40 cm 以上, 此部分根系吸水量占到总耗水量的 70% 以上。

2.1.4 基础作物系数的确定

Hydrus 模型要求输入潜在的蒸发、蒸腾量, 然后根据土壤剖面水分含量计算实际蒸发、蒸腾量, 故本研究作物系数是指梨枣树的基础作物系数 (k_{cb})。根据 USDA 灌溉工程手册关于 k_{cb} 的计算方法, 通过 LAI 变化趋势将 k_{cb} 分为 3 个阶段, 前期 k_{ci} 、中期 k_{cmid} 和后期 k_{cend} 。根据水量平衡法原理, 逐日计算水分充足条件下 8 年生梨枣树 AET 和 ET_0 的比值 (k_{cb}) 见图 9, 由图可见: 前期梨枣 k_{ci} 值约为 0.25, 这与 Wright 前期作物系

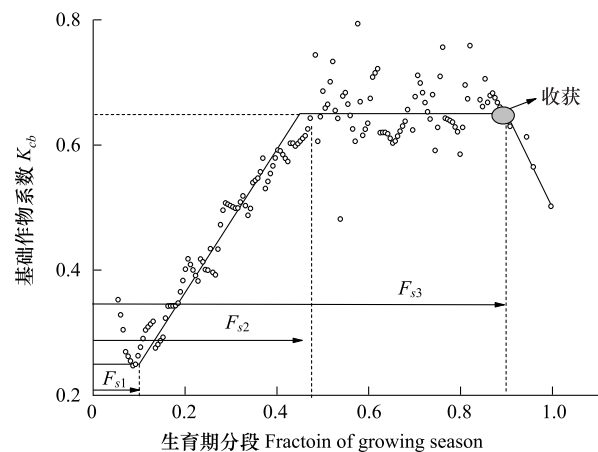


图 9 8 龄梨枣树作物系数

Fig. 9 Crop coefficient of 8-year-old jujube pear-like

数研究结论基本一致^[20],此后 k_{cb} 值线性增长,直至 $F_s=0.48$, k_{cb} 值在中期上下波动,平均值 $k_{cmid}=0.65$,波动的原因可能是由于降雨、灌溉所造成的影响。在 $0.9 < F_s < 1$ 区间内,开始采摘梨枣,此时梨枣树 k_{cb} 线性减少,至 0.5 左右。从图 9 中可以看出:梨枣相对其他作物,其 k_{cb} 相对较低,表明梨枣耗水量较少,是一种较为抗旱的作物。

通过对图 9 分析可知:只要获得 LAI 及 k_{cmid} 值,在梨枣收获期间的 k_{cb} 值可通过简单计算获得,见公式 9。

$$\begin{aligned} K_{cb} &= 0.25 & F_s < 0.1 \\ K_{cb} &= 0.25 + (k_{cmid} - 0.25) \left(\frac{F_s - F_{s1}}{F_s - F_{s2}} \right) & 0.1 < F_s < 0.48 \\ K_{cb} &= k_{cmid} & 0.48 < F_s < 0.9 \end{aligned} \quad (9)$$

式中, F_s 为梨枣树生育某阶段; F_{s1} 为梨枣树萌芽展叶期对应生育期分段; F_{s2} 为梨枣树开花坐果末期对应生育期分段。

为简化计算,2009—2010 年,对 3 年及 4 年生梨枣中期作物系数计算见表 1。由表 1 可见:梨枣树中期作物系数 k_{cmid} 值随树龄增加,3 年生梨枣 k_{cmid} 平均值为 0.55,4 龄梨枣树 k_{cmid} 值为 0.62。

表 1 2009—2010 年梨枣树中期作物系数 k_{cmid} 计算表

Table 1 Calculate result of k_{cmid} during 2009 to 2010

试验时间 Time	树龄/a Age	日序 DOY	灌溉量 WAD/mm	土壤水分变化量(0—1 m) Soil water variation/mm	潜在作物腾发量 $ET_0/(mm/d)$	中期作物系数 k_{cmid}
2009	3	190—260	78	-35.65	2.96	0.55
2010	4	190—260	125	-34.05	3.65	0.62

2.1.5 土壤水分胁迫系数 ks 初步确定

对于耐旱作物,其土壤有效水比例(ASW)大于 $ASW_c=25\%$ 时^[13], $ks=1$ 。 ASW 计算见公式 10:

$$ASW = \frac{\theta_v - \theta_{pwp}}{\theta_{fc} - \theta_{pwp}} \quad (10)$$

式中, θ_v 为土壤体积含水量, θ_{fc} 为田间持水量, θ_{pwp} 为凋萎含水量

参照土壤水分特征曲线,通过计算,当 $ASW=0.25$ 时,土壤含水量 $\theta_v=9.2\%$,占田间持水量的 60.8%,此时土壤水吸力等于 1500 cm 水柱。因此当土壤水吸力在 300—1500 cm 水柱时,梨枣树耗水不受水分胁迫影响,当土壤水吸力在 1500—15000 cm 水柱时, ks 线性比例减少。

2.2 消光系数 F 及 ks 率定

如前所述,水分充分条件下决定梨枣树蒸发蒸腾量比例的消光系数 F (公式 4) 是唯一不确定值,将以上所获得的 3—4 龄梨枣树在防雨棚内各参数代入 Hydrus 模型,通过取不同 F 值,就可得到观测点土壤水分、整体土壤水分储量(SWR)模拟值。经反复试算, F 值取 0.52 时,模拟值和实测值拟合度较好。图 10 为防雨小区 4 龄梨枣树 30 cm 和 60 cm 处土壤水势模拟值与实测值变化过程对比,与 1 m 内土壤水分储量(SWR)模拟值与实测值对比。

获得消光系数后,根据控水处理实测数据对初步确定的 ks 值进行验证。图 11 是在 150d 充分灌溉后开始控水,土壤 18、27、60 cm 处土壤水势的实测值与模拟结果,需要说明的是 173d 和 174d 共 20.6 mm 降雨由于意外没有被遮蔽。

Hydrus 模型关于 ks 初步设定中认为:当土壤水吸力在 300—1500 cm 水柱时,梨枣树耗水不受水分胁迫影响,从图 11 中可见:在土壤水势-1500 cm 水柱范围内,模拟值和实测值吻合较好,因此可以认定 Hydrus 模型中此范围确定的参数设定基本合理。

Hydrus 模型初始设定土壤水吸力在 1500—15000 cm 水柱时, ks 线性比例减少。从图 11 中可以看出:表层土壤 18 cm 处,土壤水势模拟值在达到-15000 cm 水柱后不再变化,但实测值仍然继续降低,表明山地梨枣

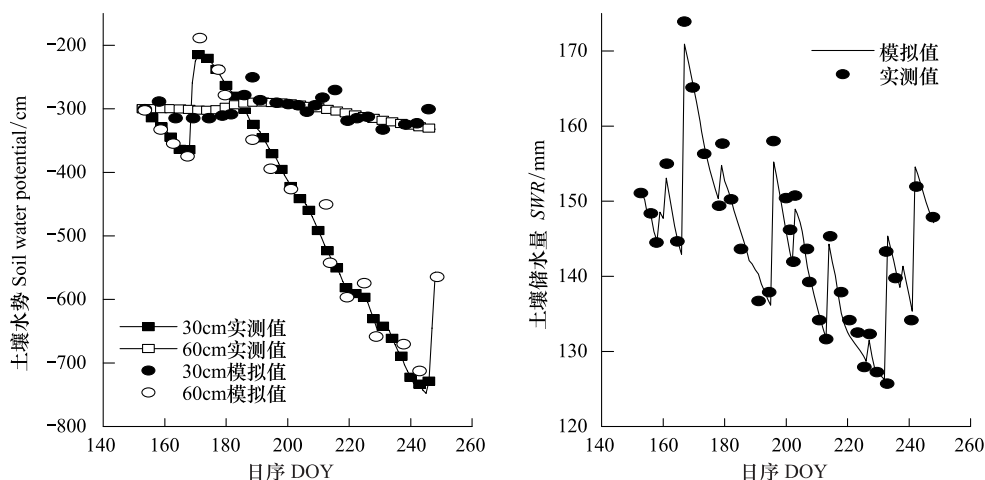


图 10 水分充足条件下 4 龄梨枣树不同深度土壤水势、土壤储水量 SWR 模拟值与实测值

Fig. 10 Simulated and measured value of soil water potential and SWR in different depth of 4-year-old jujube in water sufficient condition

树凋萎系数超过 -15000 cm ,达到 -16000 cm 。

2.3 梨枣树生育期耗水量模拟计算

将以上确定的山地梨枣树各项参数,利用 Hdyrus-1D 模型对 2008 年 8 年生梨枣树田间土壤水分动态变化过程进行模拟,其模拟结果与实测值的对比见图 12。即 1.6m 内 SWR 模拟值与实测值动态变化过程的对比和模拟的土壤含水率与实测值之间的相关分析。

从 SWR 模拟结果来看:实测数据和模拟数据之间拟合度较高,相关系数达到 0.89,说明梨枣树耗水模型各项参数取值较为可靠,模型能够反映梨枣树的需水规律,可用 Hydrus 模型确定该地区梨枣树各阶段需水量。

用 Hdyrus 模型模拟的水分充足条件下梨枣树棵间蒸发与叶面蒸腾结果见图 13。从图中可以看出:山地梨枣树生育期累计蒸发 92 mm,累计蒸腾 175 mm,共耗水 267mm。

根据梨枣树的耗水过程曲线结合实际降雨过程就可以准确制定出梨枣树生育期内合理的灌溉制度。2008—2010 年当地在梨枣树生育期降雨量分别为 243、248、252 mm,根据试验测定,当地有效降雨量系数为 0.5—0.8,考虑当地水资源实际情况,在开花坐果期灌溉 2—3 次,灌水定额为 30—40 mm 即可满足其正常生长要求。

3 结论与讨论

试验区位于水蚀风蚀交错区,需要同时考虑大气、地形、土壤、植被类型等边界条件的共同作用,国内一些学者结合我国北方旱区实际情况,对梨枣树根区土壤水分动态变化特征、水分亏缺与复水环境下梨枣树用水过程、不同生育期不同水平亏水处理对营养生长与生殖生长的影响进行了较为系统的研究^[21-25],但由于试验条件不同,导致枣树耗水规律研究仍然缺乏系统性与可借鉴性。

本文采用 2008—2010 年 3a 山地梨枣树的实测数据,获得了梨枣树耗水模型中的各参数,对其进行率定及验证,并获得梨枣树耗水规律。研究结果证明 Hdyrus 模型能够反映枣树的耗水规律,且能够对试验获得的参数进行验证,因此可以简化不同条件下枣树耗水规律的研究。

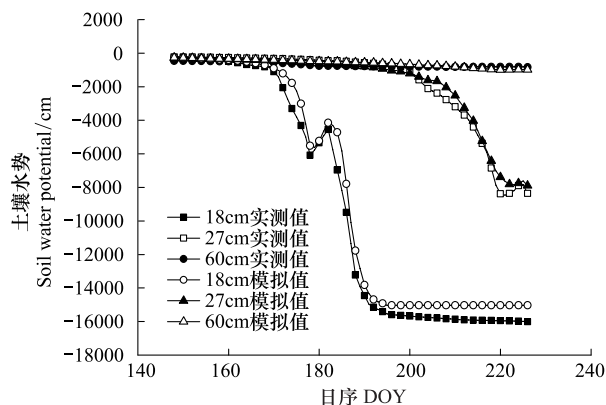


图 11 水分胁迫条件下 4 龄梨枣树不同深度土壤水势模拟值与实测值

Fig. 11 Simulated and measured value of soil water potential in different depth of 4-year-old jujube under water stress condition

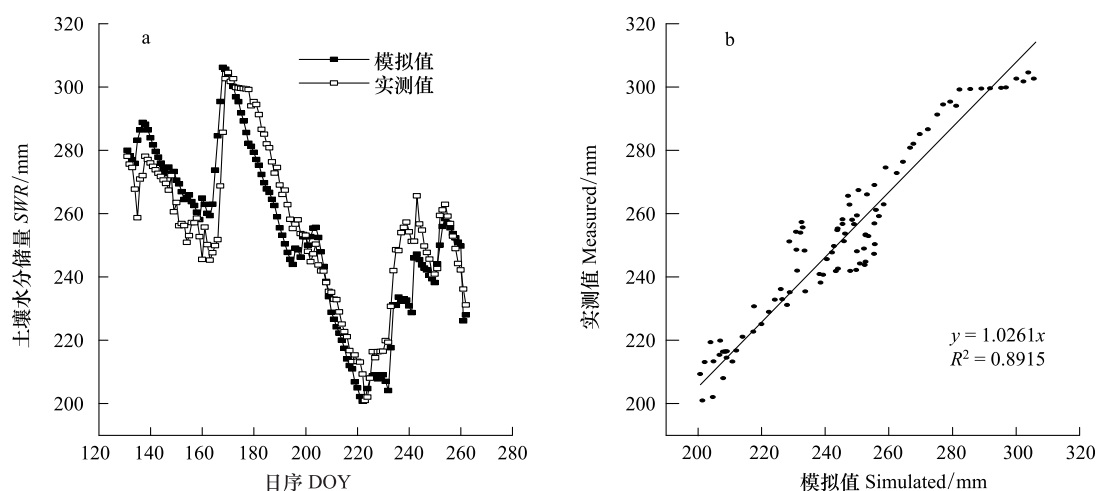


图 12 8 龄梨枣树不同深度土壤储水量 SWR 实测值与模拟值

Fig. 12 Simulated and measured value of SWR in different depth of 8-year-old jujube

梨枣树 3—4 龄生育期耗水量较少,分别为 138 mm 及 194 mm。成年梨枣生育期累计蒸发为 92 mm, 累计蒸腾 175 mm, 共耗水 267 mm, 其中累计蒸发量占到整个耗水的 34.5%, 基本与灌溉定额持平。因此在干旱半干旱地区, 通过覆盖降低其蒸发耗水^[26-27], 应是枣树获得高产的重要手段之一。

在模拟多年、全生育期枣树根区土壤水分动态时, Hdyrus 模型需要获得逐日蒸发量及蒸腾量, 目前这两个数值大多利用微型蒸渗仪和径流仪进行测定^[28-30], 工作量较大。本文利用枣树叶面积指数 LAI、消光系数 F 两个关键参数, 结合作物系数将逐日 ET_0 进行转化, 结果显示山地梨枣林的消光系数为 0.52 时, 土壤水分实测值与模拟值拟合较好, 不足之处在于试验取得的消光系数对于其他地区及枣树品种还需进一步验证。

在对土壤水分胁迫系数验证时发现: 在土壤底层较湿润区域, 土壤水分模拟值略高于实测值。原因或许在于本次研究没有考虑根系补偿吸水作用^[31-32], 枣树底部根系实际多吸收了一些水分, 补偿了上层根系层缺水状况。

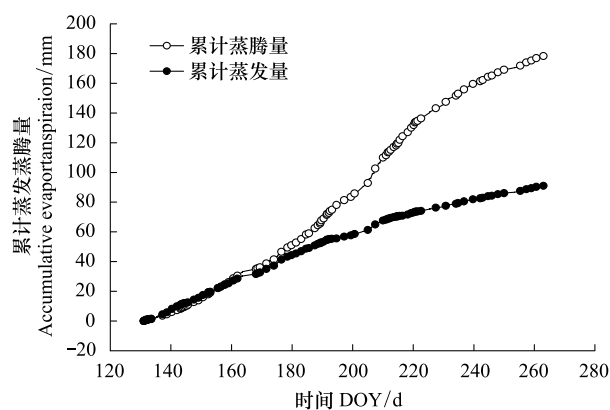


图 13 8 龄梨枣树累计蒸发变化过程曲线

Fig. 13 Curve of accumulate evapotranspiration change of jujube of eight age

References:

- [1] Xi B Y, Jia L M, Wang Y, Li G D. Simulation of soil water dynamics in triploid *Populus tomentosa* root zone under subsurface drip irrigation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 21-28.
- [2] Gao Y H, Chen Y C, Lü S H. Numerical simulation of different irrigation scheduling on oasis in Northwest China. *Progress in Geography*, 2004, 23(1): 38-50.
- [3] Mmolawa K, Or D. Experimental and numerical evaluation of analytical volume balance model for soil water dynamics under drip irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(6): 1657-1671.
- [4] Provenzano G. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, 133(4): 342-349.
- [5] Zhou Q Y, Kang S Z, Zhang L, Li F S. Comparison of APRI and Hydrus-2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation. *Plant and Soil*, 2007, 291(1/2): 211-223.

- [6] Bhatnagar P R, Chauhan H S. Soil water movement under a single surface trickle source. *Agricultural Water Management*, 2008, 95 (7) : 799-808.
- [7] Cote C M, Bristow K L, Charlesworth P B, Cook F J, Thorburn P J. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*, 2003, 22 (3/4) : 143-156.
- [8] Kang Y H, Ma X Y, Li J, Wang B L. Soil water movement model and subarea irrigation parameter for gravity subsurface drip irrigation in Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39 (3) : 90-95.
- [9] Yang H, Pei T F, Li Z, Wang A Z, Guan D X, Jin C J, Zhu J J. Numerical simulation of vertical one-dimensional water movement in unsaturated soil: a case study on coniferous forest brown soil on northern slope of Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (1) : 41-46.
- [10] Chi B L, Huang X F, Zhang D M, Li B G. Numerical simulation and validation of soil water movement under subsurface drip irrigation with point-source emitter. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21 (3) : 56-59.
- [11] Qi L B, Fan J, Shao M A, Wang W Z. Simulation and verification of soil moisture of root distribution functions for alfalfa. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25 (4) : 24-29.
- [12] Lei Z D, Yang S X, Xie S C. *Dynamics of Soil Water*. Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 206-214.
- [13] Hassan G, Persaud N, Reneau R B Jr. Utility of Hydrus-2D in modeling profile soil moisture and salinity dynamics under saline water irrigation of soybean. *Soil Science*, 2005, 170 (1) : 28-37.
- [14] Skaggs T H, Trout T J, Šimůnek J, Shouse P J. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 2004, 130 (4) : 304-310.
- [15] Bufon V B, Lascano R J, Bednarz C, Booker J D, Gitz D C. Soil water content on drip irrigated cotton: comparison of measured and simulated values obtained with the Hydrus 2-D model. *Irrigation Science*, 2011, 30 (4) : 259-273.
- [16] Mailhol J C, Ruelle P, Walser S, Schütze N, Dejean C. Analysis of AET and yield predictions under surface and buried drip irrigation systems using the Crop Model PILOTE and Hydrus-2D. *Agricultural Water Management*, 2011, 98 (6) : 1033-1044.
- [17] Šimůnek J, Šejna M, van Genuchten M T. *The Hydrus-2D Software Package for Simulating the Two-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media*. California: U. S. Salinity Laboratory, 1999: 1-253.
- [18] USDA-SCS. *National Engineering Handbook, Section 15, chap. 2: Irrigation Water Requirements*. Washington, DC: USDA, 1993: 82-83.
- [19] Wei Y C, Liu Z X, Kang L L. Derivation and verification of soil hydrodynamic parameters in cinnamon soil. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (3) : 81-86.
- [20] Wright J L. New evapotranspiration crop coefficients. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1982, 108 (1) : 57-74.
- [21] Zhao C M, Wang M X, Zheng L X, Zhou F Y. Effect of regulated deficit irrigation on transpiration and photosynthesis of pear-jujube tree. *Advances in science and Technology of Water Resources*, 2010, 30 (1) : 45-47.
- [22] Cui N B, Du T S, Li Z T, Wang M X, Guo J. Effects of regulated deficit irrigation at different growth stages on greenhouse pear-jujube quality. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25 (7) : 32-38.
- [23] Ma F S, Kang S Z, Wang M X, Pang X M, Wang J F, Li Z J. Effect of regulated deficit irrigation on water use efficiency and fruit quality of pear-jujube tree in greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22 (1) : 37-43.
- [24] Ma F S, Kang S Z, Hu X T, Wang M X, Li Z J, Gong D Z, Shm X J. Effects of water deficit at different growth stages on stem sap flux of Pear-jujube trees in greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22 (4) : 6-14.
- [25] Zhou F Y, Wang M X, Kou M L, Cai H J. Research on the effect of water and weather factor to the sap-flow of pear-jujube trees. *Journal of Irrigation And Drainage*, 2008, 27 (4) : 70-73.
- [26] Zhang J, Ren X L, Luo S F, Hai J B, Jia Z K. Influences of different covering materials mulching on soil moisture and corn yield. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (6) : 14-19.
- [27] Xie W Y, Fan G S, Zhou H P, Guan C L, Yang Z X. Effect of straw-incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42 (11) , 60-67.
- [28] Deng D Z, Fan Z P, Wang H, Sun X K, Gao J G, Zeng D H. Determination and estimation methods of tree transpiration; a review. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27 (6) : 1051-1058.
- [29] Zhao N N, Liu Y, Cai J B. Calculation of crop coefficient and water consumption of summer maize. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41 (8) : 953-959.
- [30] Yao P L, Dong X G, Guo K Z, Ma Y J, Yue W J. Simulation of soil water dynamic of arid region jujube root zone under drip irrigation. *Journal of Northwest A and F University: Natural Science Edition*, 2011, 39 (10) : 149-156.
- [31] Yadav B K, Mathur S, Siebel M A. Soil moisture dynamics modeling considering the root compensation mechanism for water uptake by plants.

Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(9): 913-922

- [32] North G B, Nobel P S. Radial hydraulic conductivity of individual root tissues of *Opuntia ficus-indica* (L.) miller as soil moisture varies. *Annals of Botany*, 1996, 77(2): 133-142.

参考文献:

- [1] 席本野, 贾黎明, 王烨, 李广德. 地下滴灌条件下三倍体毛白杨根区土壤水分动态模拟. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 21-28.
- [2] 高艳红, 陈玉春, 吕世华. 西北干旱区绿洲不同灌溉制度的数值模拟. *地理科学*, 2004, 23(1): 38-50.
- [8] 康银红, 马孝义, 李娟, 王波雷. 黄土高原重力式地下滴灌水分运动模型与分区参数研究. *农业机械学报*, 2008, 39(3): 90-95.
- [9] 杨弘, 裴铁璠, 李忠, 王安志, 关德新, 金昌杰, 朱教君. 一维垂向非饱和土壤水分运动的数值模拟——以长白山北坡山地棕色针叶林土为例. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 41-46.
- [10] 池宝亮, 黄学芳, 张冬梅, 李保国. 点源地下滴灌土壤水分运动数值模拟及验证. *农业工程学报*, 2005, 21(3): 56-59.
- [11] 齐丽彬, 樊军, 邵明安, 王万忠. 紫花苜蓿不同根系分布模式的土壤水分模拟和验证. *农业工程学报*, 2009, 25(4): 24-29.
- [12] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. *土壤水动力学*. 北京: 清华大学出版社, 1988: 206-214.
- [19] 魏义长, 刘作新, 康玲玲. 辽西淋溶褐土土壤水动力学参数的推导及验证. *水利学报*, 2004, (3): 81-86.
- [21] 赵春明, 王密侠, 郑灵祥, 周富彦. 调亏灌溉对梨枣树蒸腾作用和光合作用的影响. *水利水电科技进展*, 2010, 30(1): 45-47.
- [22] 崔宁博, 杜太生, 李忠亭, 王密侠, 郭军. 不同生育期调亏灌溉对温室梨枣品质的影响. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 32-38.
- [23] 马福生, 康绍忠, 王密侠, 庞秀明, 王金凤, 李志军. 调亏灌溉对温室梨枣树水分利用效率与枣品质的影响. *农业工程学报*, 2006, 22(1): 37-43.
- [24] 马福生, 康绍忠, 胡笑涛, 王密侠, 李志军, 龚道枝, 申孝军. 不同阶段亏水处理对温室栽培梨枣树茎液流变化影响的研究. *农业工程学报*, 2006, 22(4): 6-14.
- [25] 周富彦, 王密侠, 寇明蕾, 蔡焕杰. 水分及气象因子对梨枣树茎液流影响的研究. *灌溉排水学报*, 2008, 27(4): 70-73.
- [26] 张杰, 任小龙, 罗诗峰, 海江波, 贾志宽. 环保地膜覆盖对土壤水分及玉米产量的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 14-19.
- [27] 解文艳, 樊贵盛, 周怀平, 关春林, 杨振兴. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响. *农业机械学报*, 2011, 42(11): 60-67.
- [28] 邓东周, 范志平, 王红, 孙学凯, 高俊刚, 曾德慧. 林木蒸腾作用测定和估算方法. *生态学杂志*, 2008, 27(6): 1051-1058.
- [29] 赵娜娜, 刘钰, 蔡甲冰. 夏玉米作物系数计算与耗水量研究. *水利学报*, 2010, 41(8): 953-959.
- [30] 姚鹏亮, 董新光, 郭开政, 马英杰, 岳文俊. 滴灌条件下干旱区枣树根区的土壤水分动态模拟. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(10): 149-156.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (<i>Eumeces chinensis</i>): testing the maternal manipulation hypothesis	LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)
Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (<i>Tamias sibiricus</i>)	SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)
Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study	LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)
Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese <i>Anser indicus</i> wintering at Caohai Lake of Guizhou, China	YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)
Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau	CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)
Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China	GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)
Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach	REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)
Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province	ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)
Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method	LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)
Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study	ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)
Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing	FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)
The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island	WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)
Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province	QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)
The dynamic variation of maize (<i>Setaria mays</i> L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau	WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)
Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities	LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)
Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land	XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)
Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (<i>Setaria italica</i> (L.) Beauv.)	FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)
Photosynthetic response of different ecotype of <i>Illicium lanceolatum</i> seedlings to drought stress and rewating	CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)
Seasonal variations in the stems of <i>Larix principis-rupprechtii</i> at the treeline of the Luya Mountains	DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)
Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China	SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)
Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of <i>Catalpa bungei</i> clones	WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)
Effects of fire damages on <i>Larix gmelinii</i> radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China	WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)
A model for water consumption by mountain jujube pear-like	XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)
Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants	ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元