膜下滴灌棉花根系吸水模型的建立

王一民，虎胆·吐马尔白，弋鹏飞，张金珠，吴争光
（新疆农业大学 水利与土木工程学院，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘　要：通过田间试验，建立了实用性膜下滴灌棉花根系吸水模型，研究了在作物生长条件下的土壤水分运动，以揭示膜下滴灌棉花根系吸水规律。调查了不同生育期膜下滴灌棉花根系的分布，在棉花宽行及窄行采用根钻取样，将土样冲洗后，测定棉花根长参数，进而建立了棉花根长密度分布函数。根据理论分析和计算，考虑根长密度、土壤含水率及植株蒸腾量，建立了棉花根系一维吸水模型，其形式简单，涉及的参数较少。建立的棉花根系一维吸水模型能够反映棉花根系吸水的实际情况，应用方便，具有实际应用价值。

关键词：膜下滴灌；吸水模型；棉花；根长密度
文献标识码：B　　**文章编号**：1000-288X(2011)01-0137-04　　**中图分类号**：S152.7，S275.6

Modeling Water Uptake by Cotton Roots with Drip Irrigation Under Mulch Film

WANG Yi-min, Hudan-Tumarbay, YI Peng-fei, ZHANG Jin-zhu, WU Zheng-guang
(*School of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*)

Abstract: In the present study, the model for cotton-root water uptake with drip-irrigation under mulch film was established based on field experiment. With the model, water dynamics and redistribution was addressed under the condition of cultivation. The fundamental mechanisms of water uptake by cotton roots were carefully discussed. Core samples were collected by drilling separately in wide rows and narrow rows of cotton plants, and the root samples were then separated by water from the soil cores for measuring root lengths. Based on the root lengths, a distribution model was developed regarding root length density of cotton. Based on theoretic analysis and mathematical calculation, one-dimensional cotton root uptake model was built by incorporating factors such as root length density, soil moisture content and plant evaporation. The model had a simple structure with only a few parameters. The cotton root uptake model matched well with field observation and is readily to be applied.

Keywords: drip irrigation under mulch film; water uptake model; cotton; root length density

任何作物的稳产高产都需要一个发育良好的根系，而根系是植物与土壤相互作用的纽带，其结构的形成过程也是根个体之间对根系可利用生物量竞争的结果，所形成的根系结构也是对环境因素响应的结果[1]。膜下滴灌是将覆膜栽培措施和滴灌节水技术相结合，能有效改善土壤水、热、气等特征，进而改善土壤环境，为作物根际提供良好的水分环境。由于棉花根系广泛分布在地下，导致根系的研究比地上部的研究相对困难。研究根系的最终目的是阐明根系的吸水、吸肥等方面的机理，其中根系吸水是最为重要的，因此，需要建立棉花根系吸水模型，使其能够应用方便，形式简单。对根系吸水模型的研究始于 20 世纪中期，随着计算机的发展及土壤水分运动模拟研究的深入，取得了大批成果。国外大部分模型都是在 Richard 方程的基础上进行完善而成的；国内有康绍忠、邵明安、刘昌明等学者对不同地区根系吸水模型进行了研究，其中具有代表性的根系吸水模型有：康绍忠的冬小麦根系吸水模型[2]，邵明安的冬小麦根系吸水模型[3]及罗毅等人改进的 Feddes 模型[4]等。棉花属深根作物，根系的分布呈多维分布特性，研究难度较大。现有的植物根系吸水模型有微观模型和宏观模型两类。这两类模型的出发点有所不同，微观模型由植物单根吸水出发，深入研究根系吸水的微观机理及特性，侧重于根系吸水机理性研究，难以应用到

收稿日期：2010-04-28　　**修回日期**：2010-07-13
资助项目：国家自然科学基金项目“干旱区膜下滴灌棉田土壤水盐运移规律与次生盐渍化预警”(51069015)；新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(200821172)；新疆水利水电工程重点学科资助项目(xjzdxk-2002-10-05)
作者简介：王一民(1984—)，男(汉族)，甘肃省武山县人，硕士研究生，研究方向为地下水土壤水盐运移理论。E-mail：wym620524@sina.cn。
通信作者：虎胆·吐马尔白(1961—)，男(哈萨克族)，新疆维吾尔自治区博乐市人，博士，教授，研究方向为地下水土壤水盐运移理论及节水灌溉理论。E-mail：hudant@hotmail.com。

实际生产；宏观模型将根系作为一个整体进行研究，引入根重密度、根长密度、有效根长密度或根系吸水强度等概念，此模型与作物实际情况相符，从而更便于应用[5]。本试验旨在研究膜下滴灌棉花根系吸水模型的建立，力求形式简单，应用方便，在生产实践中可为膜下滴灌棉花的生长、增产机理和优化灌溉制度提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在新疆生产建设兵团农八师石河子市郊区的石河子大学现代节水灌溉试验站。石河子地处天山北麓中段，准噶尔盆地西南缘，属中温带大陆性干旱气候，冬季长而严寒，夏季短而炎热。该区多年平均降雨量207 mm，平均蒸发量1 660 mm。试验站地理位置44°19′28″N，85°59′47″E，海拔327 m，地势南高北地。土壤质地为中壤土，土壤田间持水量22.90%（重量百分比），土壤容重1.49 g/cm^3。

1.2 试验设计

试验于2009年4—10月在石河子大学干旱区绿洲农业重点实验室进行，试验区面积为45 m×10 m，分12个小区。供试棉花为新陆早7号，采用一膜2管4行的种植模式。采用新疆天业公司生产的单翼迷宫式滴灌带，滴头间距为30 cm，设计滴头流量为2.6 L/h。在每次灌水的同时随水施肥，每次施肥量为尿素30 kg/hm^2，磷酸氢钾15 kg/hm^2。在每次灌水前后用美国CPN公司生产的DR503.9型中子仪监测土壤水分，遇降雨加测。用自动气象站监测气象参数。棉花行距30 cm，株距10 cm，在棉花不同的生育期（蕾期7月9日、花期7月21日、铃期8月10日、絮期9月25日）用根钻以棉花主根为中心，距主根10，20 cm区域内，在地膜的宽行和窄行取根，每次取3株棉花，各数据取其平均值。每个土样深度为10 cm，随着棉花生育期的进行，取根深度逐渐增加。将取出的根系土样编号带回实验室，土样浸泡后，在0.5 mm土筛中冲洗后，捡出棉花根系，去掉死根和杂根，将拣出的根系放入烘箱，在65 ℃的温度下烘干72 h后，用感量为0.000 1 g的天平称重并测量各根系长度。用直接法得到根系重量及根系长度，由此可换算得到每个土样的根重密度及根长密度，单位体积土壤中的根重及根长即为根重密度和根长密度。

2 结果与分析

2.1 根长密度分布函数的建立

建立以根长密度分布特征的函数，其有效吸水根（$d\leqslant 2$ mm）分布函数用指数形式来表示[6]。由于棉花根系的生长分布的数量在各生育期不同，导致根系在各生育期的根长密度分布函数不同，但都符合指数函数的形式，本文根据在棉花各生育期所取样的实测资料，将有效吸水根系分布函数用指数形式来表示，其符合负指数的关系，具体形式可设为：

$$L(z,t)=A\mathrm{e}^{-B(z/Z_r)} \quad (1)$$

式中：$L(z,t)$——有效根长密度（10^{-2} cm/cm^3）；A——随棉花生育期变化的系数；B——根系随生育期的分布形态系数；z/Z_r——相对深度；Z_r——根系下扎最大深度（cm）；z——土样深度（cm）。

以棉花蕾期为例，拟合具式体形见式(2)。

$$L(z,t)=30.005\mathrm{e}^{-2.201z/Z_r} \quad (R^2=0.846\ 9) \quad (2)$$

将式(2)模拟计算后与实测值比较，能较好地反映出根长密度的实际生长及分布情况（见图1）。随深度的增加根长密度逐渐减小，符合作物生长规律，说明建立的根长密度函数是可行的。在棉花蕾期和花期，根系分布较浅，根系在此区域内分布较多，分布函数较陡。进入铃期和花期后，为满足棉花生理需求，需要更多的水分来维持正常的生长。随着棉花根系下扎深度的增大，在较深的土层中根系的分布逐渐增加；而表层的根系生长分布相对较小，根系生长的速率比前期有所减弱。在棉花的整个生育期，根系在土壤中的分布随着生育期的进行而变化，因此，建立根长密度分布函数应考虑在不同的生育期建立不同的函数。在棉花不同的生育期，单位土体中的有效根长密度减小，各生育期由棉花根长密度拟合的系数见表1。

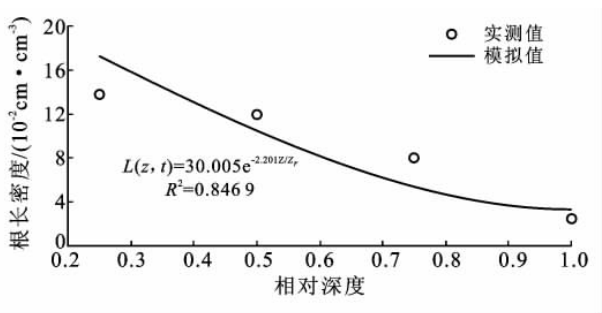


图1 棉花蕾期根长密度分布

表1 棉花各生育期根长密度拟合系数

拟合系数	蕾 期	花 期	铃 期	絮 期
A	30.005 0	24.674 0	2.850 1	3.858 5
B	2.201 0	3.111 7	0.219 8	2.456 4
R^2	0.846 9	0.951 1	0.631 7	0.976 2

2.2 由根长密度分布建立的棉花根系吸水模型

棉花作为直根系深根作物，有下扎较深的主根及

分布较多的侧根,吸收水分主要是根系的根尖部分。土壤中根系的分布对水分、养分的吸收有直接的影响,能够量化其在时空上的变化关系对提高灌溉水量的利用效率及提高产量有帮助。因此研究棉花根系生长规律及根系吸水模型,对制定合理的灌溉、施肥及种植方案有重要意义[7]。棉花根系吸水的速率与土壤非饱和导水率、土壤水势及土壤含水率有密切关系,其根系在土壤根系中的分布与根系吸水能力的大小有着重要的关系[8]。

棉花蒸腾量可根据 FAO 所推荐的 FAO-56-PM 公式计算参考作物蒸散量(E_{T0})。FAO-56-PM 方程以 0.12 m 作为参考作物草的高度,气象和湿度的观测高度是 2 m,蒸发潜热 $\lambda=2.45$ MJ/kg,地表阻抗为 70 s/m,地表反射率为 0.23。计算公式如下:

$$E_{T0}=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)} \tag{3}$$

式中:E_{T0}——作物蒸散量(mm/d);R_n——植被层净辐射〔MJ/(m² · d)〕;G——土壤地热通量〔(MJ/m² · d)〕;T——2 m 高度的平均气温(℃);U_2——2 m 高度的风速(m/s);e_s,e_a——饱和水汽压和实际水汽压(kPa);Δ——水汽压梯度(kPa/℃);γ——干湿球常数(kPa/℃)。

由于根长密度与土壤含水率对棉花根系吸水的影响是未知的,于是可以用指数形式来表示[9-11],将棉花根系吸水模型假设为:

$$S(z,t)=\alpha_1 E_{T0}L(z,t)^{\alpha_2}e^{\alpha_3\theta(z,t)} \tag{4}$$

式中:t,z——时间和位置的坐标;θ——土壤体积含水率(cm³/cm³);$S(z,t)$——作物根系吸水率(1/d),即单位时间内由单位体积土壤中所吸收水分的体积。$L(z,t)$——棉花根长密度分布函数(10^{-2} cm/cm³);E_{T0}——棉花蒸腾强度(cm/d)。

将式(4)两边取对数,令 $Y=\ln[S(z,t)/E_{T0}]$,$b_0=\ln\alpha_1$,$b_1=\alpha_2$,$b_2=\alpha_3$,$X_1=\ln[L(z,t)]$,$X_2=\theta(z,t)$,则可将式(4)转化为:

$$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2 \tag{5}$$

采用 7 月 9 日和 7 月 12 日的数据,用 SPSS 17.0软件进行多元回归分析,可得到 α_1,α_2,α_3 系数,$b_0=-11.146$,$b_1=1.218$,$b_2=19.034$,各生育期吸水模型拟合系数见表 2。

在不同的生育期其根系下扎深度不同,在试验中棉花根系的最大下扎深度取在 75 cm,取到了棉花主要的吸水根系,以棉花蕾期所取样测得的数据建立的吸水模型见公式(6)。

表 2　各生育期吸水模型拟合系数

拟合系数	蕾期	铃期	絮期
α_1	1.445×10^{-5}	3.903×10^{-5}	6.6226×10^{-4}
α_2	1.218	4.878	0.861
α_3	19.034	11.325	16.505
R^2	0.809	0.743	0.719

由于棉花采用膜下滴灌,其水分的土面蒸发损失可以忽略不计。

将式(2)代入式(5)得到棉花蕾期根系吸水模型为:

$$S(z,t)=1.44\times10^{-5}E_{T0}L(z,t)^{1.218}e^{19.034\theta(z,t)} \tag{6}$$

2.3　模型验证

根据确定的根系吸水模型,在棉花蕾期,以 7 月 9 日和 7 月 12 日所测得的土壤含水率实测数据与模拟值进行对比分析。田间根系取样深度为 40 cm。因为棉花在蕾期根系下扎深度较浅,棉花主要的吸水根系分布在此范围内,取样到 40 cm 深度处较为合理,模拟深度为 60 cm。由图 2 可以看出,在 50 cm 以上模型计算值与田间实测值具有良好的一致性,说明所建立的棉花根系吸水模型能够真实地反映土壤水分的变化,进一步证明模型的合理性和可靠性。而在 50 cm 以下,模拟值与实测值偏差较大,这是由于在此区域内棉花根系分布很少所致。

在棉花进入絮期后,根系的吸水强度减弱,但根系下扎到最大深度。在絮期以 9 月 11 日及 12 日的实测数据进行模拟对比,根系调查取样深度为 75 cm,模拟土壤中 100 cm 内的土壤水分(图 3)。在图 3 中模拟值与实测值非常接近,其值相差较小,可见所建立的模型可以准确反映水分的变化,说明建立的模型是可靠的。

3　结 论

(1) 在整个生育期内,棉花根系的空间分布不同,本文所建立的模型中根长密度的测定深度随生育期的进行而变化,不同生育期具体的参数也不同,进而能更准确地模拟根系吸水的真实情况,其形式为:$L(z,t)=Ae^{-B(z/Z_r)}$ 能较为准确地反映根系分布规律。

(2) 采用棉花各生育期的实测资料,建立了棉花根长密度分布函数。由根长密度、土壤含水率和植株蒸腾量建立的棉花根系一维吸水模型,即 $S(z,t)=\alpha_1E_{T0}L(z,t)^{\alpha_2}e^{\alpha_3\theta(z,t)}$,能够准确地反映根系吸水的大小,可以达到较高的模拟地精度,形式简单具有较强的实际应用价值。

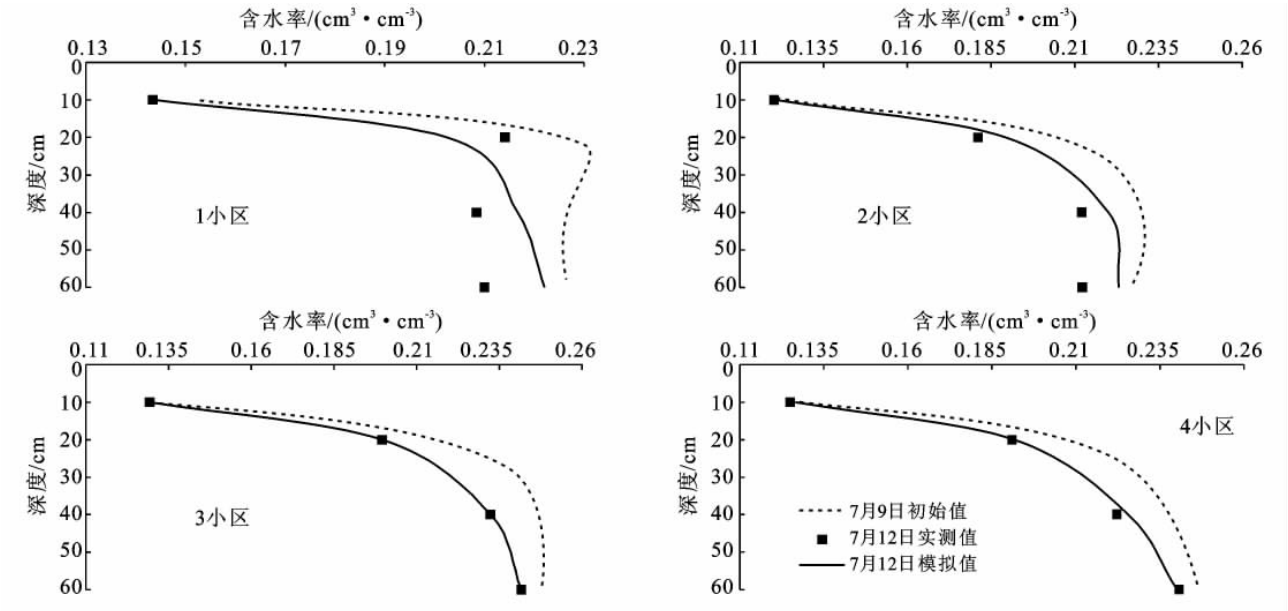


图 2 棉花蕾期根系吸水模拟值与实测值

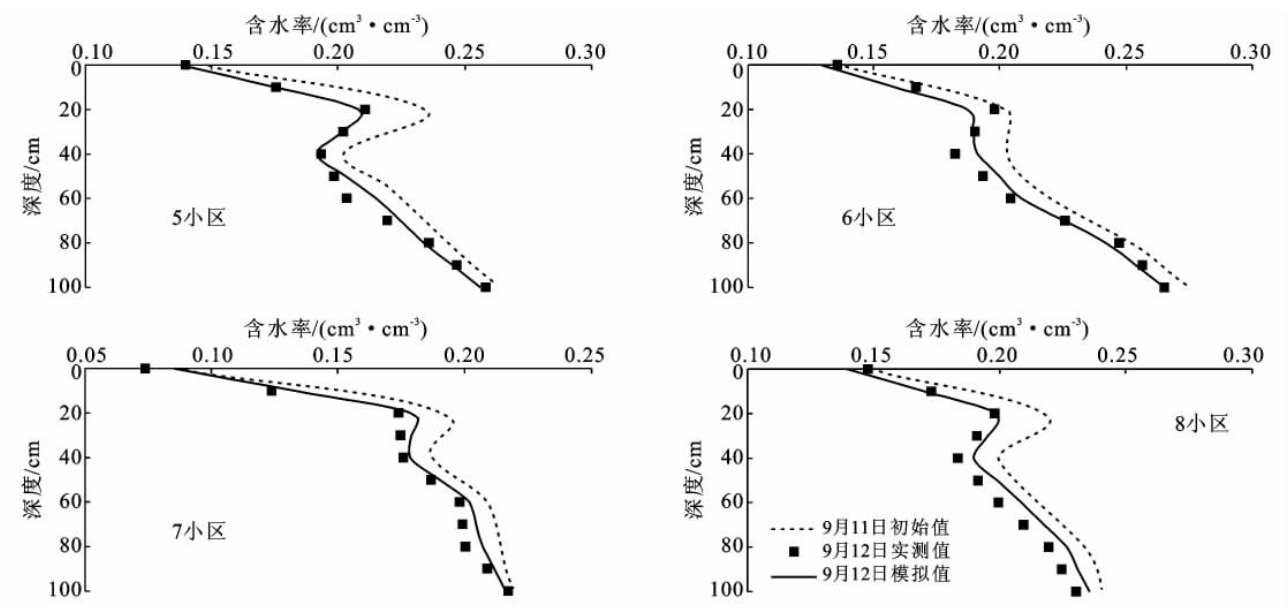


图 3 棉花絮期根系吸水模拟值与实测值

(3) 作物蒸腾量的强弱与气象因素有关。采用 FAO-56-PM 公式需监测的气象因素较多,如风速、温度、水汽压等,因此计算棉花实际蒸腾量较复杂。土壤水分经根系吸水最终在棉花叶面经气孔散发到大气中,故提出棉花实际蒸腾量与棉花叶面积或叶面积指数有关,而棉花叶面积或叶面积指数的测定比较简单而且操作方便,省时省力。在建立棉花根系吸水模型时需考虑棉花叶面积或叶面积指数,使模型更具可操作性及普适性。

本文通过大田试验测定了棉花根系分布参数、土壤含水率及植株蒸腾量,建立了棉田膜下滴灌棉花一维根系吸水模型,该模型在一定程度上能反映棉花根系吸水规律,但大田土壤水分运动及棉花根系的分布是三维问题,因此,为进一步了解膜下滴灌棉花根系吸水规律,需建立二维或三维根系吸水模型,使得其模拟精度和应用价值更高,更精确地掌握棉花根系吸水和耗水规律,为膜下滴灌的设计和棉花的灌溉制度提供帮助。

[参 考 文 献]

[1] Bidel L P R, Pages L, Rivier L M, et al. MassFlowDyn I: A carbon transport and partitioning model for root system architecture[J]. Annals of Botany, 2000,85:869-886.

[2] 康绍忠,刘晓明,熊运章. 冬小麦根系吸水模式研究[J]. 西北农业大学学报,1992,20(2):5-12.

(下转第 261 页)

生态系统健康的动态变化作更深入细致地研究,以便揭示出喀斯特高原地区生态系统演替特征。

依据生态赤字占人均生态足迹比率,建立基于生态足迹的喀斯特高原山地生态系统健康评价标准,对喀斯特地区生态系统健康评价具有借鉴和参考价值。建议在喀斯特地区应大力提倡低碳经济发展模式,加强喀斯特高原山地地区石漠化治理和植被的恢复,使喀斯特生态系统健康状况由亚健康状态和欠健康状态向健康状态的良性循环转化。

西部喀斯特地区是国家退耕还林还草和石漠化治理的重点区域,如何保证退耕还林还草和石漠化治理的成功,加强生态补偿机制的完善和实施,切实保护好喀斯特高原山地生态系统的健康,将是政府和环保部门应密切关注的问题。

喀斯特高原山地地区是我们国家经济发展落后的地区,人地矛盾突出,如何处理好发展经济与生态环境保护问题,将是今后喀斯特高原地区生态系统管理的重要研究方向。

[参 考 文 献]

[1] 赵旭阳,高占国,韩晨霞. 基于生态复杂性的湿地生态系统健康评价[J]. 地理科学进展,2008,27(4):61-68.

[2] 张晓琴,石培基. 基于 PSR 模型的兰州城市生态系统健康评价研究[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(3):35-40.

[3] 官冬杰,苏维词. 城市生态系统健康评价方法及其应用研究[J]. 环境科学学报,2006,26(10):1716-1721.

[4] 刘国彬,胡维银,许明祥. 黄土丘陵区小流域生态经济系统健康评价[J]. 自然资源学报,2003,18(1):44-49.

[5] 张宏锋,李卫红,陈亚鹏. 生态系统健康评价研究方法与进展[J]. 干旱区研究,2003,20(4):530-535.

[6] 邢清枝,任志远,王丽霞. 基于生态足迹法的陕北地区水资源可持续利用评价[J]. 干旱区研究,2009,26(6):793-798.

[7] 薛乃川,安尼瓦尔·阿木提,贡璐. 新疆近十年生态足迹与生态承载力研究[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(6):24-28.

[8] Wackernagel M, Yount J D. Footprint for sustainability: the next step[J]. Environment, Development and Sustainability, 2002(2):21-42.

(上接第 108 页)

[12] Thompson K. Predicating the fate of temperate species response to human disturbance and global change[M]//Boyle T J B, Boyle C E B eds. Biodiversity Temperate Ecosystems, and Global Change. Heidelberg: Springer-Verlag., 1994:61-76.

[13] Spellerberg I F, Sawyer J W D. Standards for biodiversity: A proposal based on biodiversity standards for fore plantations [J]. Biodiversity and Conservation, 1996,5:447-459.

[14] 胡相明,程积民,万惠娥. 黄土丘陵区人工林下草本层植物的结构特征[J]. 水土保持通报,2006,26(3):41-45.

[15] 陈海滨,刘淑明,党坤良,等. 黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究:土壤水分有效性及其亏缺状况的分析[J]. 西北林学院学报,2004,19(1):5-8.

[16] 王孟本. 晋西北黄土区不同人工林生物生产力的研究[J]. 植物学报,1994,36(S):237-240.

[17] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海:华东师范大学出版社,2001.

[18] 卜耀军,温仲明,焦峰,等. 黄土丘陵区人工与自然植物群落物种多样性研究:以安塞县为例[J]. 水土保持研究,2005,12(1):4-6.

(上接第 140 页)

[3] 邵明安,杨文治,李玉山. 植物根系吸收土壤水分的数学模型[J]. 土壤学报,1987,24(4):295-304.

[4] 罗毅,于强,欧阳竹,等. 利用精确的田间实验资料对几个常用根系吸水模型的评价与改进[J]. 水利学报,2000,32(4):73-80.

[5] 姚立明,康绍忠,龚道枝,等. 苹果树根系吸水模型研究[J]. 灌溉排水学报,2004,23(6):67-70.

[6] 虎胆·吐马尔白. 作物根系吸水率模型的试验研究[J]. 灌溉排水,1999,18(4):15-18.

[7] 张立桢,曹卫星,张思平,等. 棉花根系生长和空间分布特征[J]. 植物生态学报,2005,29(2):266-273.

[8] 阳园燕,郭安红,安顺清,等. 土壤—植物—大气连续体系统中植物根系吸水模型研究进展[J]. 气象科学,2004,32(5):316-321.

[9] Landsberg J J, McMurtrie R. Water by isolated trees [J]. Agric. Water Manage., 1984(8):223-242.

[10] 姚建文. 作物生长条件下土壤含水量预测的数学模型[J]. 水利学报,1989,30(9):32-38.

[11] 朱李英,孙西欢,马娟娟. 棉花根系吸水模型试验研究[J]. 山西水利,2009,45(3):45-47.