

网络出版时间:2012-03-21 17:11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120321.1711.009.html>

基于温光和土壤湿度的丹参根生长发育预测模型

黄淑华,王渭玲,曹鲜艳,王 静,睢少华

(西北农林科技大学 生命科学学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] **【目的】**研究丹参根生长发育与温度、光辐射和土壤湿度的关系,建立丹参根生长发育预测模型。**【方法】**以紫花丹参为试材,通过小区试验测定其主根长、主根最大直径(主根粗)、根鲜质量、根干质量、根粗 >3 mm 分根数及根含水量;测定丹参生长环境的温度、光辐射和土壤湿度,求出环境影响因子积,分别绘制丹参主根长、主根粗、根鲜质量、根干质量、分根数及根含水量与环境影响因子积的关系曲线,模拟其方程,建立丹参主根长、主根粗、根鲜质量、根干质量、根粗 >3 mm 分根数及根含水量的预测模型,采用回归估计标准误差(RMSE)对所建模型的预测效果进行检验。**【结果】**丹参主根长、主根粗、根鲜质量、根干质量、根粗 >3 mm 分根数及根含水量与环境影响因子积分别呈对数函数、二次多项式函数、二次多项式函数、二次多项式函数、幂函数及对数函数关系,其预测值与实测值之间的 RMSE 分别为 0.778 2 cm,0.510 9 mm,3.925 4 g,2.588 6 g,0.685 0 和 1.097 0%。**【结论】**成功建立了基于温光和土壤湿度的丹参根生长发育预测模型,该模型的 RMSE 较小,预测效果较好,可以较为准确地预测丹参根的生长发育进程。

[关键词] 丹参;根生长发育;温度;光辐射;土壤湿度;预测模型

[中图分类号] S567.7⁺9

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2012)04-0191-06

Prediction model of *Salvia miltiorrhiza* root growth and development based on temperature, solar radiation and soil humidity

HUANG Shu-hua, WANG Wei-ling, CAO Xian-yan, WANG Jing, SUI Shao-hua

(College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** This article studied the relationship of root growth and development and temperature, solar radiation and soil humidity in *Salvia miltiorrhiza*, and built models of root growth and development. **【Method】** With *Salvia miltiorrhiza* Bunge as testing material, main root length, main root thick, root weight, root dry weight, root tips and root water content were measured through block trials. Product's environmental factors were calculated by accumulated effective temperature, total photosynthetically active radiation and accumulated soil humidity in the area of *Salvia miltiorrhiza* growing. Relation curves between main root length, main root thick, root weight, root dry weight, root tips, root water content and product environmental effect factors were protracted, respectively. Then, we simulated the equations and built the predictive models. At the same time, the models were validated through the method of Root mean square error. **【Result】** The relationship between main root length, main root thick, root weight, root dry weight, root tips, root water content and product environmental effect factors is logarithmic function, quadratic polynomial function, quadratic polynomial function, quadratic polynomial function, exponential

* [收稿日期] 2011-09-27

[基金项目] 国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAD79B01, 2007BAD79B06)

[作者简介] 黄淑华(1986—),男,山东济宁人,在读硕士,主要从事药用植物规范化栽培研究。E-mail: hsh813@126.com

[通信作者] 王渭玲(1962—),女,陕西渭南人,教授,博士,主要从事药用植物规范化栽培及植物生态生理研究。

E-mail: ylwwl@163.com

function and logarithmic function, respectively. RMSE between the predicted and measured values of main root thick, main root length, root weight, root dry weight, root tips, root water content were: 0.778 2 cm, 0.510 9 mm, 3.925 4 g, 2.588 6 g, 0.685 0 and 1.097 0%, respectively. 【Conclusion】 Root growth and development models were built successfully and its RMSE is small. The models developed in this study obtain good predictive effect and could predict the real root development process of *Salvia miltiorrhiza* Bunge precisely.

Key words: *Salvia miltiorrhiza* Bunge; root growing development; temperature; radiation; soil humidity; prediction model

丹参(*Salvia miltiorrhiza* Bunge)又称血参、赤参、红根等,属唇型科鼠尾草属多年生草本植物,以根及根茎入药,具有“祛癖止痛、活血通经、清心除烦”之功效^[1],是我国传统的大宗药材。近年来,随着人们对丹参药理作用研究的不断深入,其应用日益广泛,导致市场需求量剧增,现有的野生丹参资源远远不能满足市场需求^[2],因此各地纷纷展开引种栽培,并已初具规模。但由于对丹参栽培生理学的基础研究缺乏系统性,尤其是有关生长环境对其根部生长发育和干物质积累影响的研究甚少^[3],从而制约了丹参种植业的规模化发展。

建立作物生长发育与环境温度、光辐射等因子的关系模型,是研究环境与作物生长发育关系的方法之一^[4]。前人已就环境温度^[5-6]、光照^[6]、水分^[7-8]、肥料^[9-10]等因素对丹参根的影响进行了大量研究,但这些研究多是讨论单一环境因素对根生长发育的影响,而且是相对静态的描述,而有关多环境因素对根生长发育动态变化过程影响的研究目前尚未见报道。本研究以陕西商洛地区主栽的丹参品种紫花丹参为试材,探讨了其根部生长发育与温度、光辐射和土壤湿度的关系,并建立了根部生长发育与主要环境因子的生长发育预测模型,以期对丹参整体模型的建立积累材料,为丹参栽培过程中的精准管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试丹参由陕西商洛天士力植物药业有限公司提供,经西北农林科技大学生命科学院舒志明副教授鉴定为紫花丹参。紫花丹参是陕西商洛地区丹参栽培的主要品种,具有药用成分含量高、品质较纯正、外观形状好、分枝均匀等特点,是陕西省商洛市的特产,为丹参中的极品。

1.2 试验设计

试验于 2009 年在陕西商洛天士力植物药业有

限公司的沙河子药源基地进行。从试验地选择 3 个试验区,分别编号为 1, 2 和 3,其 0~20 cm 土层土壤的养分含量如下:有机质含量分别为 19.7, 13.6 和 12.2 g/kg,全氮含量分别为 2.5, 1.3 和 0.62 g/kg,碱解氮含量分别为 249.1, 137.6 和 67.8 mg/kg;速效磷含量分别为 130.8, 95.3 和 67.8 mg/kg,速效钾含量分别为 103.5, 92.3 和 89.4 mg/kg。根据 3 个试验区土壤肥力的差异,参考文献[11-12]对其采取不同的施肥处理,其中 1 号试验区不施肥;2 号试验区施氮 80 kg/hm²、P₂O₅ 80 kg/hm²;3 号试验区施氮 120 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²。试验所用氮肥为尿素(氮≥46%)、磷肥为磷酸二铵(N≥18%,P₂O₅≥46%),磷肥在整地时作基肥一次施入;氮肥的 1/3 作基肥施入,其余 2/3 作为追肥在丹参幼苗移栽返青后(04-26)施入(穴施)。每种施肥处理重复 3 次,共 9 个小区,小区面积为 20 m²(4 m×5 m)。1 和 3 号试验区数据用于建立模型,2 号试验区数据用于验证模型。

丹参幼苗于 03-28 移栽,种植密度为株距 20 cm×行距 25 cm,田间管理同一般大田生产,04-16 返青,11-15 收获。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 丹参根生长发育相关生理指标的测定 在丹参生育期内(05-01—11-15),每隔 15 d 在每小区选取发育正常、无病虫害的丹参植株 5 株进行采挖,用游标卡尺测定主根的最大直径(主根粗);用钢卷尺测定主根长度;记录根粗>3 mm 的分根数(后文简称分根数);用精度为 0.01 g 的天平称量根鲜质量,之后于 105 ℃烘箱中杀青 30 min,60 ℃下烘至恒定质量,称质量,计算根含水量: $RWC = (RW - RDW) / RW \times 100\%$ 。式中:RWC 表示根含水量,RW 表示根鲜质量,RDW 表示根干质量。所有指标重复测定 5 次,结果取平均值。

1.3.2 环境数据的获取及处理 利用河北邯郸仪器有限公司生产的空气温光湿三位一体记录仪和土

壤温湿记录仪自动采集环境数据,采集的指标为试验地上方 2 m 高处空气温度和太阳辐射及 20 cm 深度土壤湿度,采集频率为 1 次/min,存储 1 h 的平均值。由获取的环境数据计算以下指标。

1) 累积有效温度。累积有效温度为丹参春季返青(04-16)到采收期内的有效温度累积值:

$$T=\frac{T_1+T_2+\cdots+T_{24}}{24}。 \tag{1}$$

$$TU=\sum_{i=1}^n(T_i-T_b)。 \tag{2}$$

式中: T 为日平均温度; $T_1、T_2、\cdots、T_{24}$ 分别为 1 d 内 1—24 h 的平均温度; TU 为 n d 内的累积有效温度; T_i 为第 i 天的日平均温度; T_b 为丹参生长基础温度,取值为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [13]。

2) 累积有效光辐射。累积有效光辐射为丹参进行光合作用补偿点以上的有效光辐射累积值:

$$L=\frac{L_1+L_2+\cdots+L_{24}}{24}。 \tag{3}$$

$$PR=\sum_{i=1}^n(L_i-L_b)。 \tag{4}$$

式中: L 为日平均光辐射; $L_1、L_2、\cdots、L_{24}$ 为 1 d 内 1—24 h 的平均光辐射; PR 为 n d 内的累积有效光辐射; L_i 为第 i 天的日平均光照强度; L_b 为丹参光合作用补偿点,取值为 5.4 klx [14]。

3) 积土壤湿度。累积土壤湿度为丹参春季返青到采收期内的土壤湿度累积值,可由下式计算得到:

$$SH=\sum_{i=1}^n(SH_i)。 \tag{5}$$

式中: SH 为 n d 内的累积土壤湿度, SH_i 为第 i 天的日平均土壤湿度。

4) 环境影响因子积。根据多因子积效原理 [15],将累积有效温度、累积有效光辐射与累积土壤湿度的乘积定义为环境影响因子积(EF),它表征了综合环境因子对丹参根生长的影响,其表达式为:

$$EF=TU\times PR\times SH。 \tag{6}$$

1.4 丹参根生长发育预测模型的建立

以 EF 为横坐标(x),分别以主根长、主根粗、根鲜质量、根干质量、分根数和根含水量为纵坐标(y),绘制曲线,拟合其方程,建立丹参根生长发育预测模型。

1.5 丹参根生长发育预测模型的检验

首先,基于预测值与实测值之间的 1 : 1 直线,检验预测值与实测值之间的线性相关 [16],直线的斜率越接近于 1,截距越小,表明预测值与实测值的平行性越好,模型拟合性也越好。

然后,采用回归估计标准误差(Root mean square error, RMSE)检验预测值与实测值的符合度。RMSE 值越小,表明预测值与实测值的一致性越好,模拟值与实测值之间的偏差越小,模型的预测结果越准确、可靠。因此, RMSE 能够很好地反映模型的预测精度,其计算公式为:

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(OBS_i-SIM_i)^2}{n}}。 \tag{7}$$

式中: OBS_i 为实测值, SIM_i 为模型预测值, n 为样本容量。

2 结果与分析

2.1 基于温光和土壤湿度的丹参根生长发育模型的建立

2.1.1 主根长及主根粗的模型 结果表明,丹参主根长及主根粗与环境影响因子积分别呈对数函数(图 1)和二次多项式函数(图 2)关系,决定系数 R^2 分别达到 0.972 0 和 0.947 9,模型 F 值分别为 452.016 7 和 100.087 0,均达到极显著水平($P<0.01$)。

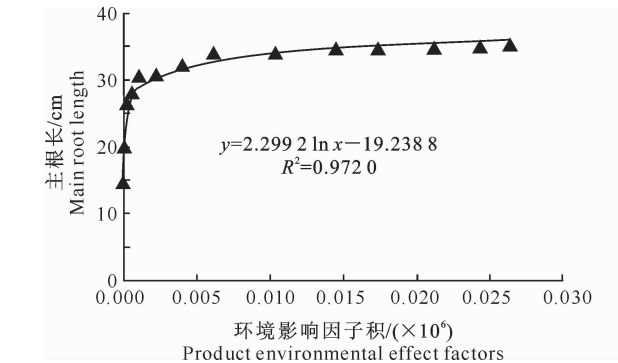


图 1 丹参主根长与环境影响因子积的关系

Fig.1 Relation between main root length and product environmental effect factors

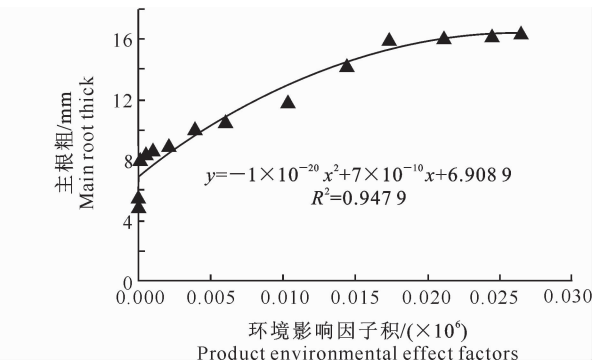


图 2 丹参主根粗与环境影响因子积的关系

Fig.2 Relation between main root thick and product environmental effect factors

2.1.2 根鲜质量和干质量的模型 结果表明,丹参根鲜质量和干质量与环境影响因子积均呈二次多项式函数(图 3,4)关系,决定系数 R^2 分别为 0.985 8

和 0.983 5,模型 F 值分别为 382.336 4 和 326.864 7,均达到极显著水平($P<0.01$)。

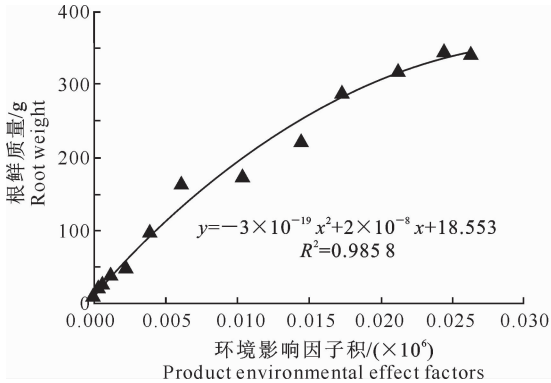


图 3 丹参根鲜质量与环境影响因子积的关系
Fig.3 Relation between root weight and product environmental effect factors

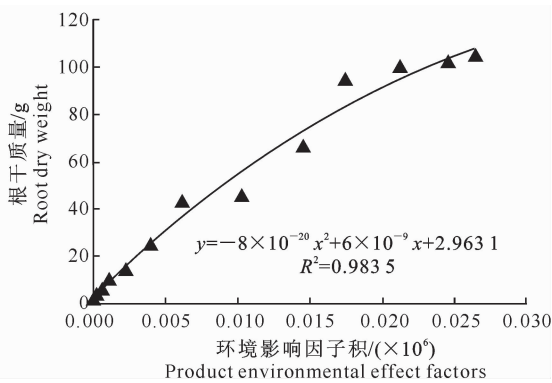


图 4 丹参根干质量与环境影响因子积得关系
Fig.4 Relation between root dry weight and product environmental effect factors

2.1.3 分根数及根含水量的模型 结果表明,丹参分根数及根含水量与环境影响因子积分别呈幂函数(图 5)和对数函数(图 6)关系,相关系数 R^2 分别为

0.973 4和 0.929 1,模型 F 值分别为 575.596 1 和 157.198 4,均达到极显著水平($P<0.01$)。

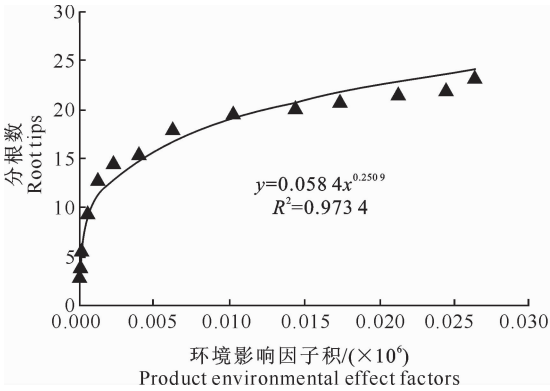


图 5 丹参分根数与环境影响因子积的关系
Fig.5 Relation between root tips and product environmental effect factors

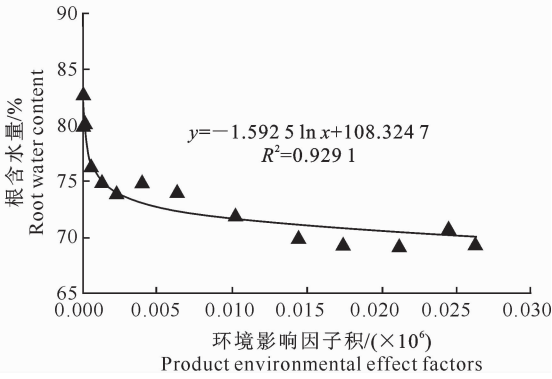


图 6 丹参根含水量与环境影响因子积的关系
Fig.6 Relation between root water content and product environmental effect factors

2.2 丹参根生长发育模型的验证

当土壤肥力不能满足丹参生长要求时,其肥力的差异会导致丹参根生长不同^[9-10]。本试验以 3 个不同的施肥标准对不同土壤肥力的试验地进行施肥,使丹参生长所需要的土壤肥力充足^[17],并在此前提下,利用与建模数据相独立的试验数据,对所建立的丹参根的相关生长发育模型进行检验。首先,依据丹参生长发育过程中的环境影响因子积和丹参根生长发育过程中相关生理指标与环境影响因子积间的数学关系公式,反演计算出丹参的主根长、主根粗、根鲜质量、根干质量、分根数及根含水量,即预测值;然后,对丹参根生长发育过程中相关生理指标的

预测值与实测值基于 1 : 1 直线,检验预测值(y)与实测值(x)之间的线性关系,结果如表 1 所示。由表 1 可知,丹参主根长、主根粗、根鲜质量、根干质量、分根数和根含水量的预测值与实测值间线性关系斜率均接近 1,截距大多接近于 0, R^2 分别为 0.985 0, 0.987 0, 0.979 4, 0.980 2, 0.991 3 和 0.938 9,说明预测值与实测值之间的一致性较好。

同时,采用 RMSE 对模型进行检验,结果表明,丹参主根长、主根粗、根鲜质量、根干质量、分根数和根含水量预测值与实测值之间的 RMSE 分别为 0.778 2 cm, 0.510 9 mm, 3.925 4 g, 2.588 6 g, 0.685 0 和 1.097 0%,与实测值相比, RMSE 值均较

小,说明本试验建立的模型可以较准确地预测丹参根的生长发育进程。

表 1 丹参根生长发育模型的预测效果

Table 1 Predictive results of prediction model of *Salvia miltiorrhiza* root growth and development

指标 Index	预测值与实测值的数学关系式 Mathematical formula of predicted and actual values	决定系数 R^2	回归估计标准误差 RMSE
主根长 Main root length	$y=0.955\ 1x+1.299\ 0$	0.985 0	0.778 2 cm
主根粗 Main root thick	$y=1.020\ 4x-0.156\ 0$	0.987 0	0.510 9 mm
根鲜质量 Root weight	$y=1.086\ 1x-4.966\ 3$	0.979 4	3.925 4 g
根干质量 Root dry weight	$y=1.012\ 9x-0.525\ 3$	0.980 2	2.588 6 g
分根数 Root tips	$y=0.971\ 3x+0.450\ 1$	0.991 3	0.685 0
根含水量 Root water content	$y=0.913\ 9x+6.204\ 1$	0.938 9	1.097 0%

3 结论与讨论

近年来,对丹参的研究多集中在生物学特性^[18]、规范化栽培^[6-9]、药用成分^[9,11]、次生代谢物^[19]等方面,而对其与关键生境因子,如环境温度、光照和水分动态关系的研究尚鲜见报道。本研究结果表明,丹参根生长发育过程中的环境影响因子积与主根长、主根粗、根鲜质量、根干质量、分根数及根含水量均有一定的相关关系,其中与主根长、根含水量呈对数函数关系,与主根粗、根鲜质量、根干质量均呈二次多项式函数关系,与分根数呈幂函数关系。

本研究综合考虑了温光及土壤湿度 3 个环境因子,建立了丹参主根长、主根粗、根鲜质量、根干质量、分根数及根含水量的预测模型,并对其进行了验证,结果表明,上述 6 个指标预测值与实测值的 RMSE 均较小,说明模型的预测效果较好,可以较为准确地预测丹参根的生长发育进程。

滕林等^[20]以环境影响因子积综合表征温度和太阳辐射,对设施番茄各序果实的果径和果型指数进行模拟,结果显示,预测值与实测值之间符合度较好,模型实用性较强。倪纪恒等^[21]以辐热积综合表征温度和太阳辐射,对黄瓜果长、果茎、果实鲜质量和干质量进行模拟,其鲜质量的模拟值与实测值之间的 RMSE 和 R^2 (分别为 25.04 g 和 0.687 2) 均较基于有效积温建立的果实生长模型结果 (分别为 28.52 g 和 0.606 8) 好,模型精确度更高。结合本研究结果可知,以环境影响因子积综合表征温度、光辐射等对作物生长发育有重要影响的环境因素建立的回归模型,较单一基于时间或有效积温建立的回归模型^[22]更符合生产实际,更具有推广应用价值。

除温度、光辐射和土壤湿度等因素对丹参根生长发育有影响外,土壤温度、病虫害等^[13]因素对丹参根生长发育也有重要影响,另外不同地区^[23]、时

期及生长年限^[6]丹参根的生长发育也有所差异。因此,笔者今后还将进一步利用不同地区、播期和生长年限丹参的试验数据对本试验建立的模型进行修正,以增加模型的精确度,并深入研究丹参根生长发育与其他关键生境因子的关系,以实现人为控制丹参根生长发育过程的目的,提高丹参产量。

[参考文献]

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部 [S]. 北京:化学工业出版社,2010:52.
Pharmacopoeia Commission of the People’s Republic of China. Pharmacopoeia of the People’s Republic of China: Volume I [S]. Peking:Chemical Industry Press,2010:52. (in Chinese)

[2] 杜冠华,张均田. 丹参现代研究概况与进展 [J]. 医药导报, 2004,23(6):355-360.
Du G H,Zhang J T. The general situation and progress of the modern research of red sage root (radix salviae miltiorrhizae) [J]. Herald of Medicine,2004,23(6):355-360. (in Chinese)

[3] 冯玲玲,周吉源. 丹参的研究现状与应用前景 [J]. 中国野生植物资源,2004,23(2):4-7.
Feng L L,Zhou J Y. The research status and application prospection of *Salvia miltiorrhiza* Bunge [J]. Chinese Wild Plant Resources,2004,23(2):4-7. (in Chinese)

[4] Bonesmo H. Modeling spring growth of timothy and meadow fescue by an expolinear growth equation [J]. Acta Agriculturae Scandinavica,1999,49(4):216-224.

[5] 叶殿秀,周微红,肖永全,等. 温度对西洋参生长发育和产量品质的影响 [J]. 中国农业气象,1998,19(1):30-33.
Ye D X,Zhou W H,Xiao Y Q,et al. The effect of temperature on the growth and development,the yield and quality of *Panax quinquefolium* L. [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1998,19(1):30-33. (in Chinese)

[6] 李倩. 环境因子对丹参生长及活性成分累积的影响规律研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
Li Q. Effect of ecological environment on growth and active constituents of *Salvia miltiorrhiza* Bunge [D]. Yangling, Shaanxi:Northwest A&F University,2006. (in Chinese)

[7] 刘大会,郭兰萍,黄璐琦,等. 土壤水分含量对丹参幼苗生长及有效成分的影响 [J]. 中国中药杂志,2011,36(3):321-325.
Liu D Q,Guo L P,Huang L Q,et al. Effects of soil water con-

- tent on seedlings growth and active ingredients of *Salvia miltiorrhiza* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medince*, 2011, 36(3): 321-325. (in Chinese)
- [8] 高 扬, 梁宗锁, 刘 燕. 不同土壤水分条件下丹参耗水特征与水分利用率的研究 [J]. *西北植物学报*, 2004, 24(12): 2221-2227.
- Gao Y, Liang Z S, Liu Y. Study on water consumption characteristic and water use efficiency of *Salvia miltiorrhiza* in different soil water [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(12): 2221-2227. (in Chinese)
- [9] 王渭玲, 梁宗锁, 孙 群, 等. 丹参高产栽培优化配方施肥技术研究 [J]. *西北植物学报*, 2004, 24(1): 130-135.
- Wang W L, Liang Z S, Sun Q, et al. Study on optimal fertilizer techniques for high yield cultivation of *Salvia miltiorrhiza* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(1): 130-135. (in Chinese)
- [10] 翟彩霞, 温春秀, 王凯辉, 等. 氮、磷、钾肥对丹参根生长及养分含量的影响 [J]. *华北农学报*, 2008, 23(增刊): 220-223.
- Zhai C X, Wen C X, Wang K H, et al. Effects of N, P and K fertilizer on roots growth and nutrition content of *Salviae miltiorrhiza* [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(suppl): 220-223. (in Chinese)
- [11] 韩建萍, 梁宗锁, 孙 群, 等. 丹参根系氮、磷营养吸收及丹参酮累积规律研究 [J]. *中国中药杂志*, 2004, 29(3): 207-211.
- Han J P, Liang Z S, Sun Q, et al. Study on the characteristic of assimilating nitrogenous phosphorous fertilizer and the accumulation disciplinarian of total tanshinons of *Salvia miltiorrhiza* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medince*, 2004, 29(3): 207-211. (in Chinese)
- [12] 王渭玲, 梁宗锁, 孙 群, 等. 丹参氮、磷肥效应及最佳施肥模式研究 [J]. *西北植物学报*, 2003, 23(8): 1406-1410.
- Wang W L, Liang Z S, Sun Q, et al. Study on N, P fertilization model of *Salvia miltiorrhiza* in different soil fertility [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(8): 1406-1410. (in Chinese)
- [13] 胡晓黎, 田 玲, 刘 娜, 等. 丹参优质高产栽培技术探讨 [J]. *陕西农业科学*, 2010(2): 213-214.
- Hu X L, Tian L, Liu N, et al. Investigation on high quality and high yield cultivation technocoly of *Salvia miltiorrhiza* Bunge [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2010(2): 213-214. (in Chinese)
- [14] 薛永峰, 王建华, 耿慧云, 等. 丹参光合日变化的研究 [J]. *山东农业科学*, 2008(7): 21-23.
- Xue Y F, Wang J H, Geng H Y, et al. Research on diurnal changes of photosynthesis in *Salvia miltiorrhiza* [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2008(7): 21-23. (in Chinese)
- [15] 李建明, 邹志荣, 黄 志. 温光驱动甜瓜壮苗指数模型研究 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(8): 149-152.
- Li J M, Zou Z R, Huang Z. Study of vigorous muskmelon seedling index model driven by temperature and radiation [J]. *Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed*, 2008, 36(8): 149-152. (in Chinese)
- [16] 刘光祖. 概率论与应用数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Liu G Z. Probability theory an applied mathematical statistics [M]. Peking: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [17] 张兴国, 程方叙, 仇有文, 等. 丹参土壤肥力的实验研究 [J]. *时珍国医国药*, 2008, 19(2): 330-332.
- Zhang X G, Cheng F X, Qiu Y W, et al. Study on the fertility of the organic material and nitrogen in the soil for *Salvia miltiorrhiza* Bunge [J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2008, 19(2): 330-332. (in Chinese)
- [18] 刘文婷, 梁宗锁, 蒋传中, 等. 丹参生殖生物学特性研究 [J]. *现代中药研究与实践*, 2004, 18(5): 17-20.
- Liu W T, Liang Z S, Jiang C Z, et al. Study on characteristics of reproductive biology of *Salvia miltiorrhiza* Bunge [J]. *Research and Practice of Chinese Medicines*, 2004, 18(5): 17-20. (in Chinese)
- [19] 李文渊, 高 伟, 邵爱娟, 等. 诱导子对丹参有效成分次生代谢的诱导与调控 [J]. *中国中药杂志*, 2011, 36(3): 258-262.
- Li W Y, Gao W, Shao A J, et al. Effect of elicitors on induction and manipulation of secondary metabolic effective ingredients in *Salvia miltiorrhiza* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medince*, 2011, 36(3): 258-262. (in Chinese)
- [20] 滕 林, 程智慧, 赖琳玲, 等. 基于温度和太阳辐射的番茄果型果径模拟模型 [J]. *西北农业学报*, 2010, 19(5): 141-144.
- Teng L, Cheng Z H, Lai L L, et al. Simulation model of tomato fruit diameter and fruit shape index based on temperature and solar radiation [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(5): 141-144. (in Chinese)
- [21] 倪纪恒, 陈学好, 陈春宏, 等. 用辐射积分法模拟温室黄瓜果实生长 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 192-196.
- Ni J H, Chen X H, Chen C H, et al. Simulation of cucumber fruit growth in green house based on production of thermal effectiveness and photosynthesis active radiation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(5): 192-196. (in Chinese)
- [22] 李立昆, 李玉红, 程智慧, 等. 基于有效积温早春设施厚皮甜瓜果实发育模拟模型 [J]. *北方园艺*, 2010(6): 97-100.
- Li L K, Li Y H, Cheng Z H, et al. Simulation model of muskmelon fruit development in early spring protected cultivation based on effected accumulated temperature [J]. *Northern Horticulture*, 2010(6): 97-100. (in Chinese)
- [23] 付桂芳, 冯学锋, 格小光, 等. 丹参栽培品、野生品及不同产地药材性状显微组织差异比较 [J]. *中国中药杂志*, 2010, 35(10): 1235-1238.
- Fu G F, Feng X F, Ge X G, et al. Differences in shapes and properties and microscopic frameworks of wild and cultivated radix *salviae miltiorrhizae* from different regions [J]. *China Journal of Chinese Materia Medince*, 2010, 35(10): 1235-1238. (in Chinese)