

基于 SRFR 软件垄沟灌土壤水分入渗 参数反推方法评价

金建新¹, 张新民^{1,2}, 徐宝山¹, 王文娟¹, 张吉孝³

(1. 甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃 兰州 730020;
3. 甘肃省静宁县水务局, 甘肃 静宁 743400)

摘要:以民勤绿洲沟灌水流推进试验实测资料为依据,建立了垄作沟灌土壤水分入渗 Kostiakov 模型,并利用 WinSRFR 数值模拟软件反向率定沟灌 Kostiakov 入渗模型中入渗系数 k 和入渗指数 α ,模拟分析不同沟底宽灌水沟裸地条件下水流推进和消退过程,并通过实测与模拟的水流推进过程相匹配来反向率定在动水头影响下的土壤入渗参数。结果表明,通过相对误差 K 、均方根误差 $RMSE$ 以及不同灌水沟在 30 cm 处的水深变化过程来评价得到的入渗参数的精确度,表明利用大田实测与 WinSRFR 模型反推的入渗参数模拟的水流推进和消退过程较为一致。WinSRFR 软件反推法求得的沟灌土壤水分入渗参数模拟结果满足试验精度要求,大大减小了入渗参数确定的工作量。

关键词: 土壤水分; 入渗参数; 沟灌; 反推参数
中图分类号: S152.7+2; TV93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)04-0059-06

Evaluation on backstepping method of infiltration parameters of soil water under furrow irrigation based on the software SRFR

JIN Jian-xin¹, ZHANG Xin-min^{1,2}, XU Bao-shan¹, WANG Wen-juan¹, ZHANG Ji-xiao³

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;
2. Research Institute of Water and Soil Conservation of Gansu, Lanzhou 730020, China;
3. Water Affair Bureau of Jingning County, Jingning, Gansu 743400, China)

Abstract: Based on the measured data of furrow irrigation test in Minqin oasis, the Kostiakov model of soil water infiltration was established, and the infiltration coefficient k and infiltration coefficient α were calculated by using backstepping method with the software WinSRFR. The water flow advance and recession process under bare ground condition with different width of furrow bottom was simulated, and the soil infiltration parameters influenced by moving water head were determined by matching the measured and simulated water flow advance process. According to the relative error (K), root-mean-square error ($RMSE$) and accuracy of infiltration parameters evaluated by the change process of water depth in different irrigation furrows, it was indicated that the measured results were much coincident with the water flow advance and recession process simulated with the infiltration parameters that were calculated by WinSRFR model. The simulation results of infiltration parameters of soil water under furrow irrigation obtained by backstepping method with the software WinSRFR could meet the accuracy requirements of the test, which greatly reduced the workload in determining infiltration parameters.

Keywords: soil water; infiltration parameter; furrow irrigation; backstepping method

入渗是地表水从土壤表层进入土壤内,并转化为土壤水和地下水的过程,土壤水分入渗参数是代表土壤入渗能力的一项重要指标,土壤入渗能力是指在特定大气压下,土壤在供水充分时单位面积每单位时间入渗的水量^[1],其直接影响田间水分利用率和灌溉质量。土壤入渗能力与土壤水分状况、水

收稿日期: 2013-11-02
基金项目: 国家自然科学基金项目“干旱区春小麦垄作沟灌技术参数研究”(51169002)
作者简介: 金建新(1988—),男,甘肃定西人,硕士研究生,主要从事农业水资源利用的研究。E-mail: 13609313759@139.com。
通信作者: 张新民(1965—),男,甘肃庆阳人,正高级工程师,博士,硕士生导师,主要从事农业水资源利用研究。E-mail: xnzhs@yahoo.com.cn。

稳性团粒含量、土壤结构性以及土壤空隙特征和连通状况等因素有关^[2]。对入渗参数国内外均有大量的研究,常用主要有双环入渗仪法、单环入渗法、圆盘入渗仪、Hood 入渗仪法等^[3],双环法入渗仪法作为野外测定土壤入渗最常用的方法,其只能测定土壤表层的入渗情况,对土地的平整度要求较高,且耗时费水;单环法往往会发生侧渗,并且会受到田间不均匀性的影响较大;圆盘入渗仪、Hood 入渗仪法入渗面积均较小,代表性比较差;Hood 入渗仪法有严重的测渗现象,影响精度。这些方法均没有考虑实际灌水过程中动水头的影响,聂卫波等提出测定沟灌土壤入渗参数的流入-流出法^[4],这种方法水量的流出量较难测定;张新民、费良军等提出通过灌溉

水流资料推求土壤入渗参数的方法,计算量较大^[5-6]。基于此借助 SRFR 数值模拟软件率定垄沟灌土壤水分 Kostiakov 入渗模型中入渗系数 k 和入渗指数 α ,旨在确定垄沟灌不同灌水沟断面形式土壤入渗参数,为制定合理的灌水技术要素和灌溉制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在甘肃省水利科学研究院民勤节水农业暨生态建设试验示范基地进行,试验区土壤基本参数如表 1 所示,各土层土壤级配曲线如图 1 所示。

表 1 试验区土壤性质
Table 1 Physical properties of test soil

剖面层次/cm Profile	田间持水量/% Field water capacity	质量含水率/% Mass water content	土壤容重/(g·cm ⁻³) Soil bulk density	总孔隙度/% Total porosity	土壤质地 Soil texture
0~20	27	14	1.44	48.3	粘壤土 Clay loam
20~40	24	15	1.49	55.0	沙壤土 Sand loam
40~60	18	7	1.56	39.1	壤砂土 Loamy sand

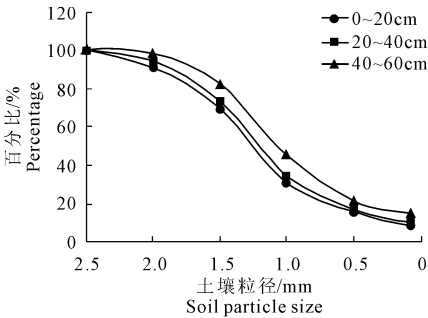


图 1 各土层土壤级配曲线

Fig.1 Soil grading curve of various layers

1.2 试验设计

垄沟灌田间水流推进试验区灌水沟地面用激光平整,沟长 60 m,田面坡度 1/500,灌水沟断面形状分别按沟底宽 0、10、15 cm 共 3 个水平处理设置,灌水沟坡度均为 1:1,不同灌水沟流量为 1.6 L·s⁻¹。用水表控制流量,每条沟灌入总水量为 600 m³·hm⁻²。试验中从沟首开始每 10 m 立一标杆,记录水流前锋推进至该处的时间及相应时刻各标杆处的水深,每个处理设置 3 个重复。入渗试验采用定水头法,与水流推进试验选择同一地块,按照三个不同试验处理开挖沟底宽分别为 0、10、15 cm,长 50 cm、坡度为 1:1 的试验坑,试验采用马氏瓶供水,保

持其入渗水头不变(本试验均采用 10 cm 水头),实验过程中每 2 min 读一次马氏瓶刻度,调整一次水头。

1.3 反推方法

SRFR 软件是美国农业部开发的用于地面灌溉水流推进与消退模拟的模型,主要通过输入灌溉方式、沟畦断面尺寸、田面糙率、入渗参数(可以选择不同的入渗模型,进而通过实验确定其中的入渗参数)、入沟(畦)流量以及灌水时间等,可以模拟得到地面灌溉的水流推进和消退、不同断面的水深、流量等信息。本文通过不断调整 Kostiakov 模型中的入渗参数,使 SRFR 模型模拟得到的沟灌水流推进与实测值相吻合时,可以认为该入渗参数基本能代表该田面的土壤入渗情况。

2 入渗模型建立与数值模拟

2.1 田面糙率系数的确定

糙率是反应田面粗糙情况的一个综合性系数,是影响沟灌水流推进的重要水力参数,其在不同的种植情况和田间农业技术措施下,田间糙率系数的变化很大^[7],目前国内外学者提出许多推求方法,其中王成志^[8]等利用曼宁公式计算沟灌过程中的田面糙率,其精度能较好地满足一般田间水力计算和优

化灌溉设计,计算公式为:

$$n = \frac{AR^{2/3}J^{1/2}}{Q}$$

(1)

式中, A 为过水断面面积; R 为水力半径; J 为连续两测点之间的水力坡度。

本研究采用曼宁公式计算田面糙率系数,不同试验处理所对应的糙率系数见表 2 所示。

表 2 不同处理田面糙率系数

Table 2 The field surface roughness under different treatments

水力参数 Hydraulic parameter	沟底宽 Ditch wide/cm		
	0	10	15
$J/\%$	1/500	1/500	1/500
$Q/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	1.6	1.6	1.6
n	0.085	0.10	0.12

2.2 入渗模型建立

垄沟灌土壤水分入渗属二维入渗,灌溉水沿灌水沟入渗的同时,受重力及土壤基质吸力作用,沿灌水沟断面纵向下渗和横向入渗浸润土壤^[9],其入渗和水流推进受沟长、湿周、沟距和侧向入渗等多因素制约^[10]。本研究垄沟灌土壤水分入渗模型采用 Kostiakov 入渗模型,该模型以其形式简单,未知量较少,物理意义明确,拟合方便而被广泛采用,具体形式为:

$$Z = kt^{\alpha}$$

(2)

式中, Z 为累计入渗量(mm); t 为累计入渗时间(h); k 、 α 为拟合参数,分别为入渗指数和入渗系数,在定水头法过程中认为其不随入渗水量而变化。

用定水头法所得的不同处理累计入渗量和入渗历时如图 2~图 4 所示。

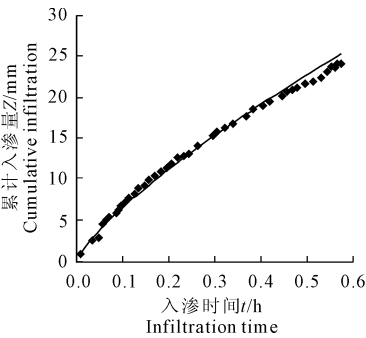


图 2 沟底宽 0 cm 累计入渗量曲线
Fig.2 Cumulative infiltration curve under 0 cm wide ditch

拟合上述累计入渗量与入渗历时过程曲线,得到不同处理 Kostiakov 入渗模型入渗系数 k 和入渗指数 α ,结果如表 3 所示。

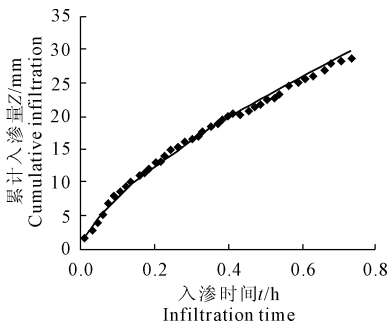


图 3 沟底宽 10 cm 累计入渗量曲线
Fig.3 Cumulative infiltration curve under 10 cm wide ditch

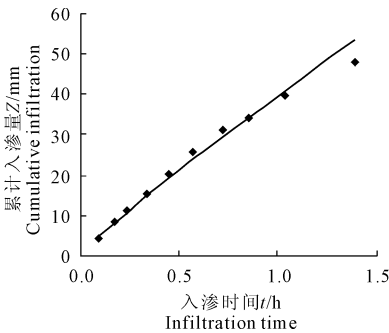


图 4 沟底宽 15 cm 累计入渗量曲线
Fig.4 Cumulative infiltration curve under 15 cm wide ditch

表 3 不同处理 Kostiakov 入渗模型 k 、 α 拟合
Table 3 Simulated results of k and α in Kostiakov model under different treatments

入渗参数及相关系数 Infiltration parameter and correlation coefficient	沟底宽 Ditch wide/cm		
	0	10	15
k	39.573	38.645	36.672
α	0.8996	0.7684	0.6775
R^2	0.992	0.991	0.994

注: R^2 为相关系数。下同。
Note: R^2 denotes correlation coefficient. The same below.

2.3 水流推进田间试验

用美国农业部开发的 SRFR 数值模拟软件对沟畦灌过程中的水流运动进行动态模拟,该模型操作简单,能选择不同的模型完成不同垄沟参数、灌溉参数、微地形条件下沟灌和畦灌的水流推进和消退过程^[11]。在裸地进行水流推进现场大田试验,用得到的水流推进实测资料拟合推进规律,其推进基本符合幂函数规律^[12]:

$$x = pt^{\delta}$$

(3)

式中, x 为水流推进距离(m); t 为水流推进至距沟首 x 距离的时间(s); p 、 δ 为拟合参数。实测不同处理水流推进拟合参数如表 4 所示。

表 4 实测水流推进曲线 p 、 δ 拟合

Table 4 Fitting results of p and δ in advance curve of water flow

推进参数及相关系数 Infiltration parameter and correlation coefficient	沟底宽 Ditch wide/cm		
	0	10	15
p	3.5979	3.0306	2.8948
δ	1.2663	1.3718	1.4157
R^2	0.9930	0.9820	0.9880

3 入渗参数反推率定与评价

3.1 入渗参数反推率定

已知田面糙率 n 的情况下,用实测的水流推进过程线与 SRFR 数值模拟软件时间值进行匹配,当其达到最佳吻合程度时(实际田间试验水流推进至所有标杆处的时间与 SRFR 软件模拟的最大偏差值不超过 5%),反推 Kostiakov 入渗模型中入渗系数 k 和入渗指数 α ,通过 SRFR 数值模拟软件率定的土壤水分入渗参数与田间定水头法试验测得的相比较,判断其精度。垄沟灌过程中水流推进和利用 SRFR 数值软件模拟达到最佳契合程度时的推进过程如图 5~图 7 所示。

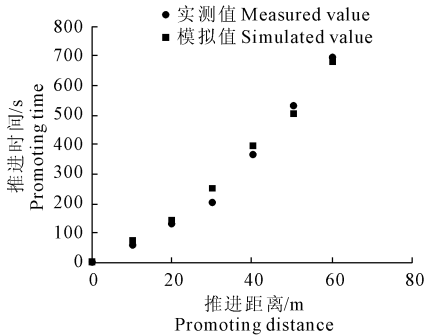


图 5 沟底宽 0 cm 水流推进实测与模拟值曲线

Fig.5 Water advance curve of measured and simulated values under 0 cm wide ditch

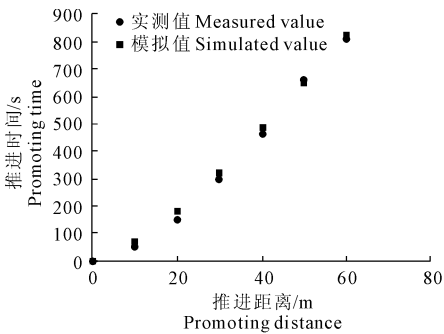


图 6 沟底宽 10 cm 水流推进实测与模拟曲线

Fig.6 Water advance curve of measured and simulated values under 10 cm wide ditch

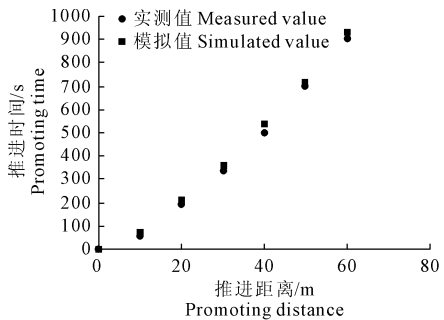


图 7 沟底宽 15 cm 水流推进实测与模拟曲线

Fig.7 Water advance curve of measured and simulated values under 15 cm wide ditch

用两种方法得到的 Kostiakov 入渗模型中入渗系数 k 和入渗指数 α 见表 5。

3.2 评价指标

为了检验 SRFR 数值模拟软件率定的土壤水分入渗参数的精确度,利用统计分析方法对定水头法和 SRFR 数值模拟软件率定的 Kostiakov 入渗模型中入渗参数进行计算评价,具体指标主要包括模型预测值与实测值之间相对误差 K 、均方根误差 $RMSE$ 。计算结果见表 6。

表 5 定水头法和 SRFR 软件反推的 Kostiakov 入渗参数

Table 5 Infiltration parameters obtained by constant water head method and backstepping method with SRFR software

方法 Method	入渗参数 Infiltration parameter	垄沟底宽处理 Treatment of ditch width/cm		
		0	10	15
定水头法 Constant water head method	k	39.5730	38.6450	36.6720
	α	0.8996	0.7684	0.6775
SRFR 软件反推法 Backstepping method with SRFR	k	38.290	36.892	37.781
	α	0.8533	0.7341	0.6432

$$K_i = \frac{|S_i - O_i|}{\frac{\sum_{i=1}^n O_i}{n}} \tag{4}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \tag{5}$$

式中, S_i 为模拟值; O_i 为实测值; n 为取样总数。

表 6 不同方法推求入渗参数的相关系数和均方根误差
Table 6 Correlation coefficients and root-mean-square error of infiltration parameters calculated by different methods

入渗参数 Infiltration parameter	评价参数 Evaluation parameter	垄沟底宽处理/cm Treatment of ditch width		
		0	10	15
k	K	3/100	5/100	3/100
	$RMSE$	1.28	1.75	1.11
α	K	5/100	4/100	5/100
	$RMSE$	0.05	0.03	0.03

由表 6 可以看出,两种方法求得入渗系数 k 的相对误差 K 均小于或等于 5%,均方根误差 $RMSE$ 在 1.11~1.75 之间,入渗指数 α 的相对误差也均小于 5%,均方根误差 $RMSE$ 在 0.03~0.05 之间,模拟结果和实测值变异不是很大,能满足指导实际生产的要求。

3.3 模型验证及讨论

将沟底宽为 0 cm 和 15 cm 反推与实测的 Kostiakov 入渗模型中入渗系数 k 和入渗指数 α 用 SRFR 数值模拟软件进行垄沟灌水流推进模拟 30 m 处水位上涨与消退的动态变化,并与实测水位过程线进行比较分析,模拟结果与试验结果如图 8、图 9 所示。

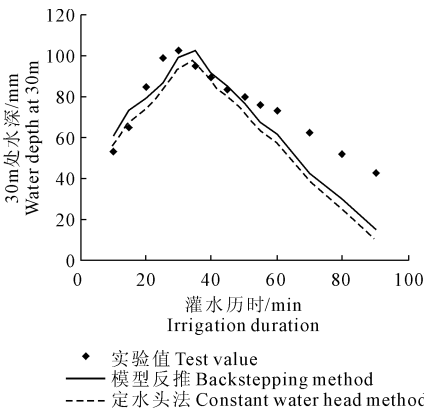


图 8 沟底宽 0 cm 在 30 m 水深变化模拟与实测值
Fig.8 Simulated and measured values of water depth at 30 m under 0 cm wide ditch

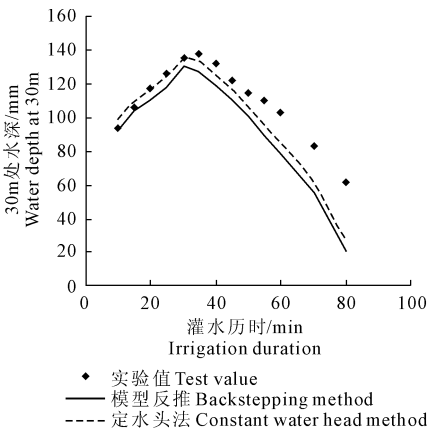


图 9 沟底宽 15 cm 在 30 m 水深变化模拟与实测值
Fig.9 Simulated and measured values of water depth at 30 m under 15 cm wide ditch

由图 8 和图 9 可知,定水头法和 SRFR 数值模型率定的土壤水分入渗参数在 30 m 处的水深水流推进过程线变化区别不大,与实测值在水位上升阶段比较吻合,说明在水深增加阶段具有较高的精度。但在水深降低阶段,模拟值与实测值具有较大的差异性,可能是因为在入渗后期达到稳定入渗阶段后,由于入渗水分的作用,使得土壤结构性、孔隙性等土壤物理参数发生较大的变化导致,但是,这并不影响定水头法和 SRFR 软件反推法的精度,因此 SRFR 软件反推法可以作为在精度要求不高的情况下田面土壤入渗参数的反推。

4 结 论

- 1) 利用垄沟灌水流推进试验实测资料与 SRFR 数值模拟软件相结合的方法反向率定 Kostiakov 入渗模型中入渗系数 k 和入渗指数 α ,相对误差 K 和均方根误差 $RMSE$ 均较小,能满足试验精度的要求,表明用 SRFR 软件数值模拟田间土壤入渗参数是可行的,可以用于指导灌溉制度等农业生产实际。
- 2) 利用 SRFR 数值模拟软件率定田间土壤水分入渗参数所需实测资料较少,仅能通过一次或者几次田间沟灌或者畦灌田面水流推进过程即可求解,相比以前双环、单环、流入-流出法等大大减小了田间工作量,具有很大的优越性。
- 3) 由于不同区域的土壤质地、结构、空隙状况、含水率等均存在差异,在具体应用时还需针对某一特定区域的土壤类型进行进一步的测定和检验。

参 考 文 献:

[1] 赵勇刚,赵世伟,曹丽花,等.半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响[J].农业工程学报,2008,24(6):14-

- [20] 武 敏,冯绍元,孙春燕,等.北京市大兴区典型土壤水分入渗规律田间试验研究[J].中国农业大学学报,2009,14(4):98-102.
- [3] 朱良君,张光辉,任宗萍.4种土壤入渗测定方法的比较[J].水土保持通报,2012,32(6):164-167.
- [4] 聂卫波,马孝义,王术礼.沟灌土壤水分运动数值模拟与入渗模型[J].水科学进展,2009,20(5):668-675.
- [5] 张新民,王根绪,胡想全.用畦灌试验资料推求土壤入渗参数的非线性回归法[J].水利学报,2005,(1):1-9.
- [6] 费良军.由灌溉水流推进资料确定土壤入渗参数[J].西北水资源与水工程,1993,(4):16-20.
- [7] 刘作新,李 哲,孙中和,等.田间曼宁糙率系数的推求[J].灌溉排水,1998,17(3):5-9.
- [8] 王成志,杨培岭,陈 龙,等.沟灌过程中土壤水分入渗参数与糙率的推求和验证[J].农业工程学报,2008,24(3):43-47.
- [9] 孙西欢,王文焰.多参数沟灌入渗模型的试验研究[J].西北水资源与水工程,1993,4(3):46-51.
- [10] 李雪转,吴争兵.影响土壤入渗能力因素分析[J].山西水利,2009,(4):69-71.
- [11] 闫庆健,李久生.地面灌溉水流特性及水分利用率的数学模拟[J].灌溉排水学报,2005,24(2):62-66.
- [12] 刘 钰,蔡甲冰,白美健,等.黄河下游簸箕李灌区田间灌水技术评价与改进[J].中国水利水电科学研究院学报,2005,3(1):32-39.

(上接第 46 页)

参考文献:

- [1] 国家中医药管理局,《中华本草》编委会.中华本草[M].上海:上海科学技术出版社,1999.
- [2] 刘世巍,丁建海,刘立红,等.龙葵的化学成分及生物活性研究进展[J].时珍国医国药,2010,21(4):976-978.
- [3] 丁霞,高思国,李冠业.龙葵不同提取部位体外抗肿瘤作用的研究[J].时珍国医国药,2011,22(5):1244-1246.
- [4] 罗明华,罗英,王璞.水杨酸处理对干旱胁迫下丹参幼苗抗氧化能力的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):102-105.
- [5] 常云霞,王红星,陈龙.水杨酸对锌胁迫下小麦幼苗生长抑制的缓解效应[J].西北植物学报,2011,31(10):2052-2056.
- [6] 王俊斌,王海凤,刘海学.水杨酸促进盐胁迫条件下水稻种子萌发的机理研究[J].华北农学报,2012,27(4):223-227.
- [7] 吴晓丽,罗立津,黄丽岚,等.水杨酸和油菜素内酯对花椰菜幼苗生长及抗旱性的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):168-172.
- [8] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [9] 张志良.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [10] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [11] 刘萍,李明军.植物生理学实验技术[M].北京:科学出版社,2008.
- [12] 余利平,张春雷,马霓,等.甘蓝型油菜对于干旱和低磷双重胁迫的生理反应Ⅱ:叶片叶绿素含量及叶绿素荧光参数[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):169-175.
- [13] 孙三杰,李建明,姚勇哲,等.亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗渗透调节物质与抗氧化酶活性的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):166-171,218.
- [14] 王宝山.植物生理学[M].北京:科学出版社,2004.
- [15] 张娜,赵宝平,张艳丽,等.干旱胁迫下燕麦叶片抗氧化酶活性等生理特性变化及抗旱性比较[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):166-171,218.
- [16] 冯晓敏,张永清,李鹏,等.糜子幼苗对不同强度干旱胁迫的形态与生理响应[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):176-181.
- [17] Jiang Y, Huang B. Drought and heat stress injury to two cool season turf grasses in relation to antioxidant metabolism and lipid peroxidation[J]. Crop Sci, 2001,41:436-442.
- [18] 张智猛,戴良香,宋文武,等.干旱处理对花生品种叶片保护酶活性和渗透物质含量的影响[J].作物学报,2013,39(1):133-141.
- [19] Hosseini Boldaji S A, Khavari Nejad R A, Hassan Sajedi R, et al. Water availability effects on antioxidant enzyme activities, lipid peroxidation, and reducing sugar contents of alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Acta Physiol Plant, 2012,34:1177-1186.
- [20] Babita M, Maheswari M, Rao L M, et al. Osmotic adjustment, drought tolerance and yield in castor (*Ricinus communis* L.) hybrids [J]. Environ Exp Bot, 2010,69:243-249.
- [21] Campos K F, Carvalho K, Souza F S, et al. Drought tolerance and antioxidant enzymatic activity in transgenic 'Swingle' citrus plants over-accumulating proline [J]. Environ Exp Bot, 2011,72:242-250.
- [22] 韩多红,张勇,晋玲,等.碱性盐及混合盐碱胁迫对蒙古黄芪种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].中草药,2013,43(12):1661-1666.
- [23] 杜伟莉,高杰,胡富亮,等.玉米叶片光合作用和渗透调节对干旱胁迫的响应[J].作物学报,2013,39(3):530-536.