

基于 RAIGA 的 PPC 模型评价调亏灌溉对东北春玉米生长和产量的影响

滕云^{1,2,3}, 司振江^{1,2}, 陶延怀¹, 王柏¹, 王兰冰¹, 孙彦君¹

(1. 黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 黑龙江省粮食产能提升协同创新中心, 黑龙江 哈尔滨 150030;
3. 东北农业大学水利与建筑学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 为了研究调亏灌溉对东北春玉米生长和产量的综合影响, 在移动式遮雨棚下, 以东北春玉米为试验材料, 采用测筒栽培试验方法, 分析了玉米在苗期、拔节期、抽雄期中度调亏灌溉处理后对玉米干物质重、耗水量的影响, 并采用实码加速免疫遗传算法进行投影寻踪建模, 综合评价灌水方案优劣, 结果表明: 苗期亏水使玉米具有较强的适应干旱的能力, 苗期可中度亏水, 即控制土壤水分到田间持水量的 50% ~ 60%, 且苗期调亏的方案经模型评价要优于其它方案。

关键词: 玉米; 调亏灌溉; 水分胁迫; 生育指标; 产量; RAIGA - PPC
中图分类号: S275.1; S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)06-0026-06

Evaluating effects of regulated deficit irrigation to growth and yield of spring maize in northeast China based on RAIGA - PPC model

TENG Yun^{1,2,3}, SI Zhen-jiang^{1,2}, TAO Yan-huai¹, WANG Bai¹, WANG Lan-bing¹, SUN Yan-jun¹

(1. Water Conservancy Institute in Heilongjiang province, Harbin, Heilongjiang 150080, China;
2. Collaborative Innovation Center of Grain Production Capacity Improvement in Heilongjiang province, Harbin, Heilongjiang 150030, China;
3. College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: In order to research the comprehensive effects of regulated deficit irrigation to growth and yield of spring maize in northeast China, under the mobile awning, taking the spring maize of northeast China as experiment material, the effect of moderate regulated deficit treatment to the dry weight and water consumption in seedling stage, jointing stage and heading stage of maize was analyzed by using the cylinder cultivation experiment method. Also carried out the projection pursuit establishing model and comprehensive evaluation by adopted the real coded accelerating immune genetic algorithm. The result showed that: The water deficit in seedling stage, the maize will be had strong adaptability to drought, so in seedling stage, the water deficit can be moderated with 50% to 60% of field capacity, and the scheme of water deficit in seedling stage will be better than other schemes according to the model evaluation.

Keywords: maize; regulated deficit irrigation; water stress; growing index; yield, RAIGA - PPC

玉米是我国第二大粮食生产作物, 我国玉米按传统划分为三大种植区, 东北春玉米区、黄淮海夏玉米区、西南山地丘陵玉米区。东北春玉米区包括黑龙江、吉林和辽宁三省的全部, 以及内蒙古东部辽河平原部分县旗, 共有耕地 1 853.33 万 hm^2 , 灌溉面积 403.67 万 hm^2 。全区目前达到的节水灌溉面积 112 万 hm^2 , 占实灌面积的 27.7%, 旱作物灌溉农田生产能力是雨养农田的 1.61 倍, 因此灌溉农业节水及增产潜力均较大^[1]。

调亏灌溉(regulated deficit irrigation, 简称 RDI)是根据作物的生理生化作用受到遗传特性或生长激素影响的特征, 在作物生长发育的某些阶段主动施加一定程度的水分胁迫, 影响其光合产物向不同组织器官的分配, 舍弃营养器官的生长量和有机合成物

收稿日期: 2014-04-28
基金项目: 国家科技支撑计划(2007BAD88B01, 2011BAD25B06, 2012BAD08B05); 水利部“948”计划(201222); 黑龙江省水利厅科研计划(HSKY2009 - 02); 黑龙江省财政厅资助计划(2009 - 01)
作者简介: 滕云(1978—), 女, 黑龙江省依兰县人, 高级工程师, 博士生, 主要从事农业节水技术和作物高效用水技术方面的研究。E-mail: hljskyty@126.com。

质总量,从而获得较高的籽粒或果实产量的灌溉技术^[2]。国外学者对调亏灌溉果树的生理生化反应、需水规律和调亏时期、调亏程度等做了大量研究,并且对调亏灌溉在改善果实的品质方面进行了深入研究^[4-11]。国内调亏灌溉研究以 1988 年中澳合作研究课题为主导,研究对象主要为果树^[12-15],在国家“九五”科技攻关计划中,开始在大田作物方面进行研究,康绍忠、蔡焕杰、张喜英、王密侠等在山西洪洞对大田作物调亏灌溉技术模式模型进行了研究与示范,主要研究作物为棉花和冬小麦,对玉米也有研究,但主要是黄淮海地区夏玉米^[16-23],对东北春玉米调亏灌溉的试验研究还鲜见报道。

了解东北春玉米需水规律及生物性状形成特征和相互关系以及玉米不同生育期对水分胁迫的反应,确定生产中实用的调亏指标和调亏灌溉制度,对于东北地区节约灌溉用水,保证农业可持续发展,具有一定的实际意义。当地的生产实践已表明,玉米苗期适当“蹲苗”可以增加玉米的产量。产量虽是水分胁迫对玉米影响的重要指标,但百粒重、穗长、穗粒数、株高、干物质重等最终都将影响籽实产量,因此调亏灌溉对玉米的综合影响很难直观判断,而采用基于实码加速遗传算法(简称 RAGA)的投影寻踪(简称 PPC)模型进行作物生育与产量总和指标评价,经过实例检验,具有较好的应用效果^[24-33],本文通过田间试验,采用改进的实码加速免疫遗传算法 RAIGA(real coded accelerating immune genetic algorithm)的模型进行评价,提出不同生育期水分胁迫对玉米生育特性及产量影响的综合评价指标,探索东北春玉米灌溉最佳调亏阶段和调亏程度,为灌溉制度提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

试验于 2008—2009 年在黑龙江省水利科学研究院综合试验研究基地实施,地处 45°43′09″N,126°36′35″E,海拔高程 156 m。本地区多年平均气温 3.1℃,多年平均降水量为 619.7 mm,7—9 三个月占全年降水量 70%,无霜期为 130~140 d,适合种植一季农作物;多年平均蒸发量 727.1 mm,土壤质地为壤土,1 m 土层内的平均田间持水率(占干土重)28.4%,干容重 1.22 g·cm⁻³,土壤养分含量为速效氮(N)154.4 mg·kg⁻¹,速效磷(P₂O₅)40.1 mg·kg⁻¹,速效钾(K₂O)376.8 mg·kg⁻¹,pH 7.27。

1.2 试验设计

试验采用测筒测量法,试验玉米品种为当地品种久龙 5 号。测筒为圆形有底,与外部无水分交换,筒内径 50 cm,深度 95 cm,配有全自动感应式遮雨棚,能全面防止雨水进入,分层(10 cm)回填原状黑土,筒下卧土面与地面齐平,保证试验区与周边环境一致。玉米于 5 月 10 日播种,10 月 8 日收获,播种期 30 d,苗期至采收结束 121 d,其中苗期 28 d,拔节期 22 d,抽雄期 24 d,灌浆期 18 d,成熟期 29 d。为保证出苗,每个测筒播种 5 粒,根据玉米生长特性在玉米达到三叶一心时每个测筒定植 1 株。

试验采用正交设计 L₈(2⁷),共设 8 个处理,每个处理 3 次重复(见表 1)。对玉米苗期~拔节期、拔节期~抽雄期、抽雄~灌浆均作了中度亏水处理(占田间持水量 50%~60%),水分亏缺程度依据灌水定额占田间持水率的百分比确定,计划湿润层深度 60 cm,其它管理措施均一致。播前灌水至田间持水量水平,以保证苗全苗壮。

表 1 玉米调亏灌溉试验灌水方案

Table 1 The irrigation experimental scheme of RDI for maize

序号 No.	处理 Treatment	苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage	抽雄期 Heading stage
1	MMM	中度调亏 Moderate RDI	中度调亏 Moderate RDI	中度调亏 Moderate RDI
2	MMN	中度调亏 Moderate RDI	中度调亏 Moderate RDI	正常 Normal
3	MNM	中度调亏 Moderate RDI	正常 Normal	中度调亏 Moderate RDI
4	MNN	中度调亏 Moderate RDI	正常 Normal	正常 Normal
5	NMM	正常 Normal	中度调亏 Moderate RDI	中度调亏 Moderate RDI
6	NMN	正常 Normal	中度调亏 Moderate RDI	正常 Normal
7	NNM	正常 Normal	正常 Normal	中度调亏 Moderate RDI
8	NNN	正常 Normal	正常 Normal	正常 Normal

注:M—中度调亏,控制土壤相对湿度 50%~60%;N—正常,控制土壤相对湿度 70%~100%。
Note: M—Moderate RDI, water content of soil is 50%~60% the content of field holding water after every irrigation; N—Normal, water content of soil is 70%~100% the content of field holding water after every irrigation.

1.3 测定项目与方法

试验采用称重法控制土壤水分来调节调亏水平,每隔 1 天称重 1 次,用以计算玉米供水量及实际耗水量,所用电子吊秤分辨率为 0.05 kg。试验设计以土壤相对含水量下限控制灌水,达到控制下限时利用量筒加水至相对土壤含水量上限,使之控制在设计土壤相对含水量范围之内。由于筒下部无水分交换,又有自动遮雨棚遮挡自然降水,故可不必考虑地下水及降水对玉米的供水补给。每一生育阶段结束时测定株高、地上干物质质量,收获后对所有处理均进行取样测定生物量并进行考种。所测数据用 SPSS 软件进行数据统计, Duncan 法进行处理间的差异显著性检验, Excel 生成图表, MATLAB 编程建模寻优。

2 结果与分析

2.1 不同生育阶段水分胁迫对干物质积累的影响

根系的发育好坏决定了作物在其生长期内对水分和养分的吸收利用能力,调亏供水条件将导致根系生长的差异,从而直接影响地上部分的生长和最终的产量水平。不同时期调亏灌溉处理根干重、冠干重(冠干重不包括籽粒重)测定结果如下(图 1)。

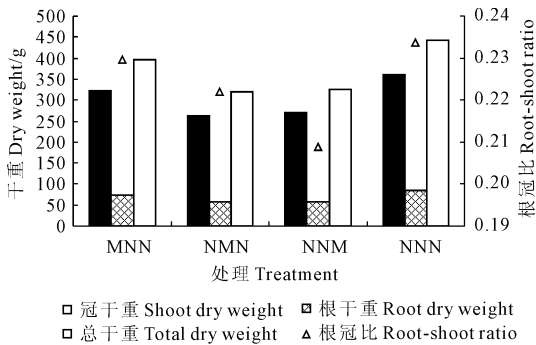


图 1 玉米收获时干物质积累

Fig.1 Dry matter accumulation in the maize harvesting

干物质累积是光合作用的直接产物,是作物形成最终产量的基础,而作物产量的高低,不但取决于光合作用产物的生产总量,并且与其在不同器官部分间的干物质分配有关。从图 1 可以看出拔节期和抽雄期亏水大幅度减少了玉米干物质积累,干物质积累大小顺序为:NNN>MNN>NNM>NMN,且拔节期亏水的处理 NMN 和抽雄期亏水的处理 NNM 比均不亏水的处理 NNN 干物质积累分别减少 28% 和 26.5%,说明拔节期和抽雄期对亏水反应更加敏感。而苗期亏水的处理 MNN 比均不亏水的处理 NNN 干物质积累减少 10.6%,且根冠比与均不亏水的处理 NNN 差异不大,说明苗期适度亏水能增加玉米适应干旱的能力,水分胁迫能够使光合产物可以更多地向根部输送,提高根系在整个植株体内的相对比重,也进一步说明苗期适度亏水后的复水补偿效果更好。

2.2 不同生育阶段水分胁迫对耗水量的影响

由表 2 可知,调亏处理玉米阶段耗水量与均未进行调亏的不同,调亏期间玉米耗水量显著低于不亏水的处理,数据显示苗期调亏期间的玉米耗水量平均较未调亏减少 38.1%,拔节期的减少 29.8%,抽雄期的减少 26.4%,可见玉米苗期亏水方案使苗期阶段耗水量减少幅度最大,抽雄期调亏方案的阶段耗水较同期减少的最少。原因就是玉米苗期时,植株矮小,生长缓慢,叶面蒸腾量小,水分消耗主要以土壤蒸发为主;由于供水减少,土壤含水率降低,尤其在土壤表层,水分蒸发较快,表层土壤中毛管水断裂,下层土壤水只能通过水汽形式扩散,使棵间蒸发速率降低。玉米拔节期时,进入旺盛生长阶段,对水分要求高,当水分亏缺时,土壤蒸发同样随表土含水率的降低而减少,而植株生长会由于水分亏缺受到抑制,意味着作物耗水也必将减少。玉米抽雄期,即玉米进入开花、受精期,叶面积大而稳健,冠生长基本结束,耗水以植株蒸腾为主,此时亏水,土壤含水率低,向叶片输送水分降低,作物的生理耗水减少。

表 2 不同时期调亏处理玉米的耗水量

Table 2 The water consumption of maize in different stage for regulated deficit treatment

序号 No.	处理 Treatment	苗期~拔节 Seedling to jointing stage /mm	拔节~抽雄 Jointing to heading stage /mm	抽雄~灌浆 Heading to filling stage /mm	合计 Total /mm
1	MMM	42.5	78.5	134.3	255.3
2	MMN	56.1	65.0	192.4	313.4
3	MNM	45.6	98.6	159.5	303.7
4	MNN	45.9	100.9	199.0	345.7
5	NMM	71.6	69.6	144.7	285.9
6	NMN	78.8	68.3	205.0	352.1
7	NNM	78.5	99.5	143.9	321.9
8	NNN	78.0	101.9	194.6	374.6

2.3 用 RAIGA 的 PPC 模型评价调亏灌溉对玉米的综合影响

2.3.1 在改进的实码加速免疫遗传算法(RAIGA)上建立的投影寻踪(PPC)模型 实码加速免疫遗传算法 RAIGA 是一种新型的融合算法。它利用生物免疫系统的自适应识别和排除侵入机体的抗原性异物的原理,将生物免疫系统的学习、记忆、多样性和模式识别的特点引入遗传算法。解决实际问题时,在保证抗体多样性的情况下,找出破解该抗原的抗体,即问题的解。基于实数编码的加速免疫遗传算法是在免疫相关原理、概念^[34]和遗传算法^[35]的基础上提出的,克服了二进制编码的缺点,使算法的寻优性能大大地增强^[36]。在 RAIGA 算法的基础上,利用 PPC 模型进行 RAIGA 程序操作,确定最大指标函数值或最小指标函数值对应的投影方向,找出最优投影方向,依此进行指标综合评价。

RAIGA 建模的基本流程^[36-42]:① 输入抗原,对待优化变量进行实数编码。② 初始群体生成。生成初始抗体群 N 、促进记忆细胞库 N_1 、检测记忆细胞库 N_2 。③ 抗体适应度计算。分别计算抗原和抗体以及抗体与抗体之间的亲和力。④ 更新免疫记忆细胞库。根据一定比例原则,分别从抗体群 N 中选出亲和力高与亲和力低的抗体,用亲和力高的抗体替换促进记忆细胞库 N_1 中亲和力低的抗体;用亲和力低的抗体替换检测记忆细胞库 N_2 中亲和力高的抗体。⑤ 抗体的促进与抑制。根据 N_1 中抗体浓度的最大值 c_{max} 设定此时促进记忆细胞库 N_1 的状态,用检测记忆细胞库 N_2 去检测抗体群 N 中是否含有已在 N_2 中记录的抗体,如果有就用随机抗体取代它。⑥ 将促进记忆细胞库 N_1 与检测后的抗体群 N 相结合生成新的抗体种群,对新的抗体种群 N 进行选择操作。⑦ 对种群 N 进行杂交操作。定义杂交参数 p_c 作为交叉操作的概率,从 $i = 1$ 到 N 重复以下过程:从 $[0, 1]$ 中产生随机数 r ,若 $r < p_c$,则选择 $x(j, i)$ 作为一个父代。⑧ 对种群 N 进行变异操作。定义变异参数 p_m 作为免疫遗传系统中的变异概率,由 $i = 1$ 到 N 。⑨ 加速演化迭代。采用加速的方法进行处理,用进化所产生的优秀个体变化区间作为下次迭代时优化变量新的变化区间,算法结束时把当前群体中最优秀个体作为 RAIGA 的寻优结果。

PPC 模型建模^[24,43]:① 样本评价指标的归一化处理,建立各指标值的样本集 $\{x^*(i, j) | i = 1, 2, \Delta, n, j = 1, 2, \dots, p\}$ 其中 $x^*(i, j)$ 为第 i 个样本的第 j 个指标值, n 、 p 分别为样本的总容量和指标的数

量。② 构造投影指标函数 $Q(a)$ 。把 p 维数据 $\{x^*(i, j) | j = 1, 2, \dots, p\}$ 综合乘以 $a = \{a(1), a(2), a(3), \dots, a(p)\}$ 得到投影方向的一维投影值 $Z(i)$ 。投影指标函数可以表达成 $Q(a) = S_Z D_Z$, 式中, S_Z 为投影值 $Z(i)$ 的标准差; D_Z 为投影值 $Z(i)$ 的局部密度。③ 优化投影指标函数,使目标函数最大化: $Max: Q(a) = S_Z \cdot D_Z$, 约束条件为: $s. t.: \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1$ 。④ 优化排列,把最佳投影方向 a^* 代入 $Z(i)$ 后,可得各样本点的投影值 $Z^*(i)$ 。将 $Z^*(i)$ 与 $Z^*(j)$ 进行逐一比较,二者越接近,表示样本 i 与 j 越倾向于归为同一类。按 $Z^*(i)$ 值从大到小排序,即是指标从优到劣的排序。

2.3.2 模型评价的玉米综合指标优化排序及结果分析 研究中选择了 9 个玉米指标对 8 个灌水处理进行综合指标排序,具体指标见表 2,指标中玉米的产量构成因素秃尖长为越小越优,其余指标均为越大越优。通过 MATLAB 7.1 编程,基于遗传规划模型采用 RAIGA 进行求解,选定父代初始群体规模为 $n = 400$, 抗体浓度阈值 $th = 0.85$, 交叉概率 $pc = 0.8$, 变异概率 $pm = 0.8$, 优秀个体数目选定 20 个, $\alpha = 0.05$, 加速运行 10 次进行优化。得出最大指标函数为 0.7905, 最佳投影方向 $a^* = (0.4400, 0.3114, 0.3720, 0.4367, 0.5125, 0.2005, 0.1872, 0.3586, 0.1172)$, 求得各种处理的投影值 $Z^*(j) = (0.1043, 1.2220, 1.4178, 2.4394, 0.6431, 1.2224, 1.2225, 2.1725)$ 。

从各个评价指标的最佳投影方向(图 2)可以看出各个评价指标对综合评价贡献率的大小与影响程度,其中株高和产量对整体评价结果影响最大,其次是根干重、冠干重、穗长和水分利用效率,而百粒重、穗粒数、秃尖对评价结果的贡献最小。调亏灌溉的目标就是降低营养器官的生长,提高作物经济系数,节水、优质、高效^[6]。在单生育阶段亏水处理中,株高、根干重、冠干重平均比不亏水处理降低了 4.84%、15.26%、20.84%,而产量仅降低 0.11%,但水分利用效率确提高了 5.63%;在两个生育阶段亏水处理中,株高、根干重、冠干重平均比不亏水处理降低了 9.52%、21.50%、25.94%,产量降低了 10.01%,水分利用效率却提高了 2.66%;在所有亏水处理中仅苗期调亏的处理产量提高 10.8%,水分利用效率提高 6.39%,也进一步说明不是玉米每个生育期都适宜进行水分胁迫。通过评价结果可知,玉米产量、株高、根干重、冠干重是对调亏灌溉评价影响最大的四个指标,这与调亏灌溉的宗旨相符,说

明株高与产量在评价调亏灌溉方案优劣中占有重要地位,与实际追求经济产量最高相符,具有实际意义。

表 3 不同时期调亏处理玉米的产量及其组成

Table 3 The maize yield and constitution in different stage for regulated deficit treatment

序号 No.	处理 Treatment	产量 Yield /g	WUE /(kg·cm ⁻³)	冠干重 Shoot dry weight /g	根干重 Root dry weight /g	株高 Plant height /cm	百粒重 100-grain weight /g	穗粒数 Grain number per spike	穗长 Spike length /cm	秃尖 Barren ear tip /cm
1	MMM	246	2.07	262.7	49.0	220.0	38.33	628	27.2	3.3
2	MMN	287	2.21	257.7	68.0	224.2	43.27	786	30.7	2.5
3	MNM	291	2.22	266.3	62.0	239.2	40.50	749	33.2	4.9
4	MNN	333	2.36	322.3	84.0	250.5	42.08	753	32.2	3.8
5	NMM	267	2.13	274.3	53.7	227.7	38.01	726	28.8	3.9
6	NMN	311	2.21	261.3	56.3	233.3	46.50	604	29.7	2.1
7	NNM	294	2.18	269.7	58.0	243.0	39.70	700	31.3	5.4
8	NNN	313	2.13	359.3	78.0	254.6	38.17	830	30.8	1.2

从各个处理的最佳投影值(图 3)可以看出不同时期调亏方案的优劣,评价结果表明,不同调亏灌溉方案优劣顺序为 MNN > NNN > MNM > NNM > NMN > MMN > NMM > MMM,可见苗期中度调亏方案 MNN 优于其它各个方案,而在拔节期进行单一调亏和同其它生育期连续调亏的方案,投影值均较低,说

明拔节期受旱对东北春玉米综合指标影响较大,所以拔节期玉米对水分亏缺比较敏感,这与丁瑞峰研究的黄淮海地区夏玉米拔节期对水分亏缺反应敏感的结论基本一致^[44],也说明在实码加速免疫遗传算法的基础上建立的投影寻踪模型对不同调亏灌溉方案优劣进行筛选评价是可行的。

3 结 论

- 1) 苗期亏水使玉米具有较强的适应干旱的能力,苗期可中度亏水,即控制土壤水分到田间持水量的 50% ~ 60%,而玉米拔节期和抽雄期亏水对水分反应比较敏感。
- 2) 利用 RAIGA – PPC 模型评价调亏灌溉下东北春玉米生育指标排序结论对制定玉米调亏灌溉制度及调亏时期、调亏程度等调亏指标的确定具有应用价值;经过该模型评价苗期调亏处理的方案要优于其它方案。

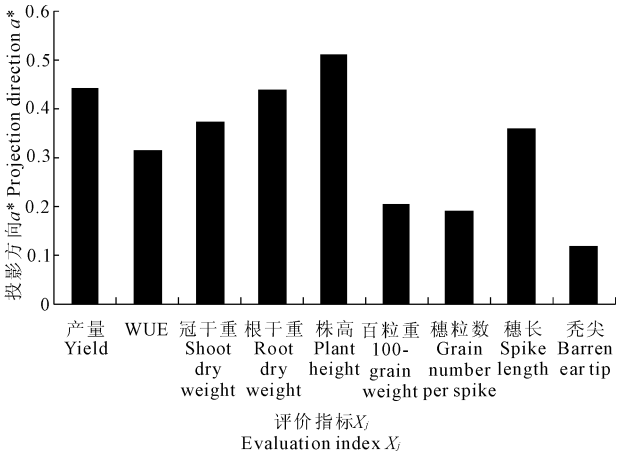


图 2 各评价指标的投影方向

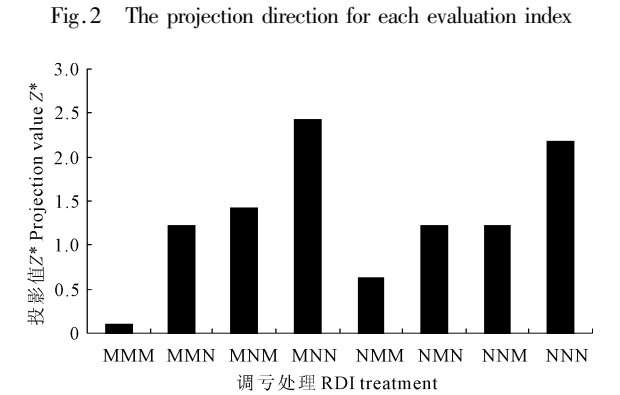


图 3 各处理的投影值

参 考 文 献:

[1] 刘小飞,孙景生,刘祖贵,等.我国玉米灌溉问题浅析[C]//段爱旺,黄修桥.中国粮食安全与农业高效用水研究.郑州:黄河水利出版社,2009:242-246.

[2] 康绍忠,蔡焕杰.作物根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论与实践[M].北京:中国农业出版社,2002:115-150.

[3] Chalmers D J, Mitchell P D, Jerie P H. The physiology of growth control of peach and pear trees using reduced irrigation[J]. Acta Horticulture, 1984,146:143-148.

[4] Chalmers D J, Burge P H, Michell P D. The mechanism of regulation of Bartlett pear fruit and vegetative growth by irrigation withholding and regulated deficit irrigation[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science,1986,11(6):944-947.

[5] Chalmers D J, Mitchell P D, van Heek L. Control of peach tree

Fig.3 The projection values for each treatment

- growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1981, 106(3): 307-312.
- [6] Ebel R C, Proebsting E L, Evans R G. Deficit irrigation to control vegetative growth in apple and monitoring fruit growth schedule irrigation[J]. Hortscience, 1995, 30(6): 1229-1237.
- [7] Kilili A W, Behboudian M H, Mills T M. Composition and quality of ‘Braeburn’ apples under reduced irrigation[J]. Scientia Horticulturae, 1996, 67: 1-11.
- [8] Mpelasoka B S, Behboudian M H, Mills T M. Effects of deficit irrigation on fruit maturity and quality of ‘Braeburn’ apple[J]. Scientia Horticulturae, 2001, 90: 279-290.
- [9] Marsal J, Rapoport H F, Manrique T, et al. Pear fruit growth under regulated deficit irrigation in container-grown trees[J]. Scientia Horticulturae, 2000, 85: 243-259.
- [10] Marsal J, Merce Mata, Amadeu Arbone’s, et al. Regulated deficit irrigation and rectification of irrigation scheduling in young pear trees: an evaluation based on vegetative and productive response[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 17: 111-122.
- [11] Boland A M, Jerie P H, Mitchell P D, et al. The effect of saline and non-saline water table on peach tree water use, growth, productivity and ion up take[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1996, 47(1): 121-139.
- [12] 李光永, 王小伟, 黄兴法, 等. 充分灌与调亏灌条件下桃树滴灌的耗水量研究[J]. 水利学报, 2001(9): 55-58, 63.
- [13] 黄兴法, 李永光, 王小伟, 等. 充分灌与调亏灌条件下苹果树微喷灌的耗水量研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 43-47.
- [14] 程福厚, 霍朝忠, 张纪英, 等. 调亏灌溉对鸭梨果实的生长、产量及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(4): 72-76.
- [15] 徐胜利, 陈小青. 膜下调亏灌溉对香梨产量和品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2003, 40(1): 6-9.
- [16] 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 24-27.
- [17] 张振华, 蔡焕杰. 覆膜棉花调亏灌溉效应研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 9-12.
- [18] 孟兆江, 刘安能, 庞鸿宾, 等. 夏玉米调亏灌溉的生理机制与指标研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(4): 94-98.
- [19] 裴冬, 张喜英, 亢茹. 调亏灌溉对棉花生长、生理及产量的影响[J]. 生态农业研究, 2000, 8(4): 52-55.
- [20] 郭相平, 康绍忠. 玉米调亏灌溉的后效性[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 58-60.
- [21] 孟兆江, 刘安能, 庞鸿宾, 等. 棉花调亏灌溉的生态生理效应[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(4): 30-33.
- [22] 孟兆江, 贾大林, 刘安能, 等. 调亏灌溉对冬小麦生理机制及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 66-69.
- [23] 史文娟, 康绍忠, 宋孝玉. 棉花调亏灌溉的生理基础研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 9(3): 91-95.
- [24] 付强, 赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-79.
- [25] 金菊良, 丁晶. 遗传算法及其在水科学中的应用[M]. 成都: 四川大学出版社, 2000: 42-47.
- [26] 迟道才, 王殿武. 北方水稻节水理论与实践[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2003: 1-24.
- [27] 彭世彰, 朱成立. 节水灌溉的作物需水量试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(2): 21-24.
- [28] 张礼兵, 程吉林, 金菊良, 等. 农业灌溉水质评价的投影寻踪模型[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 15-18.
- [29] 汤广民. 水稻旱作的需水规律与土壤水分调控[J]. 中国农村水利水电, 2001, (9): 18-21.
- [30] 付强, 金菊良, 梁川. 基于实码加速遗传算法的投影寻踪分类模型在水稻灌溉制度优化中的应用[J]. 水利学报, 2002, 33(10): 39-45.
- [31] 金菊良, 魏一鸣, 付强, 等. 农业生产力综合评价的投影寻踪模型[J]. 农业系统科学与综合研究, 2001, 17(4): 241-243.
- [32] 裴冬, 孙振山, 陈四龙, 等. 水分调亏对冬小麦生理生态的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 68-72.
- [33] 程建平, 曹贵贵, 蔡明历, 等. 不同灌溉方式对水稻产量和水分生产率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 28-33.
- [34] Sun Weidong, Tamura H, Tang Zheng, et al. An artificial immune network with diversity and its applications biomedical engineering [C]. IEEE EMBS Asian-Pacific Conference on 2003. 326-327.
- [35] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975: 1-22.
- [36] 任安, 王柏, 张忠学. 免疫遗传算法的研究及其在节水灌溉中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2009, (1): 36-38.
- [37] 方亮, 叶玉堂, 吴云峰, 等. 基于免疫遗传算法的二元光学元件的位相设计[J]. 光电工程, 2006, 33(9): 44-45.
- [38] 张礼兵, 金菊良, 刘丽. 基于实数编码的免疫遗传算法研究[J]. 运筹与管理, 2004, 13(4): 18-19.
- [39] 金菊良, 杨晓华, 丁晶. 标准遗传算法的改进方案——加速遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(4): 8-13.
- [40] 张有富, 周玉良, 金菊良. 改进的实码加速遗传算法[J]. 合肥工业大学学报, 2005, 28(6): 655-657.
- [41] 梁鸿生, 郝勇娜, 王凯, 等. 免疫算法[J]. 昆明理工大学学报, 2003, 28(5): 72-75.
- [42] 葛红, 毛宗源. 免疫算法的改进[J]. 计算机工程与应用, 2002, 14(47): 47-48.
- [43] 徐淑琴, 付强, 董淑喜, 等. 基于 RAGA 的 PPC 模型评价水分胁迫对寒区水稻生长和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 29-33.
- [44] 丁端锋, 蔡焕杰, 王健, 等. 玉米苗期调亏灌溉的复水补偿效应[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 64-67.