

基于春玉米微咸水灌溉的水盐生产函数研究

王军涛,程献国,李强坤

(黄河水利科学研究院,河南 郑州 450003)

摘 要:在石羊河流域开展微咸水灌溉试验,综合考虑水分与盐分因素对春玉米生长的影响,以国际上通用的水分生产函数 Blank 模型和 Jensen 模型为基础进行作物水盐模型的构建,通过引入盐分胁迫因子,将水分生产函数转变为水盐生产函数。通过 2009 年和 2010 年春玉米不同矿化度微咸水灌溉试验,结合函数求解,探求春玉米各生育阶段的盐分敏感指数,得出春玉米的盐分敏感程度顺序为苗期>拔节期>抽雄灌浆期>成熟期。同时以交替灌溉试验进行验证,结果表明微咸水安排在盐分敏感程度小的生育阶段更有利于作物的生长。

关键词:微咸水;春玉米;Blank 模型;Jensen 模型;水盐生产函数;西部内陆区

中图分类号: S513.071 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)03-0078-03

我国西北内陆区干旱少雨、蒸发强烈,水资源严重匮乏。据调查,西北地区水资源总量仅占全国总量的 5.84%,人均占有量为全国的 80.5%^[1]。淡水资源的日益短缺使微咸水灌溉成为解决我国西北地区水危机的重要措施之一。我国西北地区地下微咸水资源丰富,据初步统计,矿化度 2~5 g/L 的地下咸水资源达 88.6 亿 m³,但目前地下微咸水资源的利用率相对不高^[2],就全国范围看,矿化度 1~3 g/L 的微咸水每年开采量仅为 55.69 亿 m³,而 3~5 g/L 的半咸水则更少,仅为 1.51 亿 m³^[3]。因此,在农田灌溉中充分开发利用微咸水资源,将大大增加灌溉水资源量,对减轻我国尤其是西北内陆区的用水紧张问题有显著作用。

国内外在微咸水利用及咸淡水交替灌溉方面做了大量的试验研究,取得了许多成功的经验^[4-8],其中作物产量与灌溉水含盐量、土壤含盐量之间的内在联系的研究工作也得到较快发展,但是由于系统

复杂等因素的影响,导致此方面的研究工作并不完善。本文通过在西北石羊河流域开展的试验研究,综合考虑水分与盐分因素对春玉米生长的影响,构建微咸水灌溉条件下春玉米的水盐生产函数,并以此探求各生育阶段的盐分敏感指数,研究春玉米不同生育阶段的耐盐性,为制定科学的咸淡水交替措施、合理利用微咸水灌溉提供技术支撑。

1 试验概述

春玉米的微咸水灌溉试验于 2009 年—2010 年在中国农业大学“石羊河流域农业与生态节水试验站”进行,该试验站位于 37°49' N, 102°52' E,海拔 1 557.5 m,地处甘肃省武威市凉州区,属典型的内陆干旱荒漠气候。多年平均降水量仅为 164.4 mm,而多年平均蒸发量为 2 000 mm 左右。春玉米生育期内月降水情况详见表 1 所示。

表 1 春玉米生育期内降雨量

Table 1 Rainfall in the growth period of spring corn

年份 Year	降雨量 Rainfall(mm)						合计 Total
	4 月 Apr.	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 Aug.	9 月 Sep.	
2009 年	4	13	7	21.4	51.8	21.8	119
2010 年	5	31	16	9	6	11	78

试验设置淡水、1.3、5 g/L 和 7 g/L 的微咸水共 5 种灌溉水处理,每种处理设置 3 个重复。试验共计小区 15 个,每个小区面积 12 m²(3 m×4 m),小区

起垄且用 1 m 深的硬塑料布隔开,防止侧渗,每个小区均下不封底。试验田间管理与当地大田相同。每年的灌溉情况见表 2 所示。

收稿日期:2012-01-03

基金项目:水利部公益性行业专项经费项目(200901021);国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB403303);黄河水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(HKY-JBYW-2009-19)

作者简介:王军涛(1980—),男,山东招远人,工程师,主要从事节水灌溉、农业水土环境方面的研究。E-mail: wjt4317@163.com。

表2 试验小区灌溉情况

Table 2 Irrigation schedule of the test area

年份 Year	灌溉方案 Irrigation schedule			
2009	灌溉日期 Irrigation date	5月7日 May 7	6月21日 June 21	7月12日 July 12
	灌溉水量(mm) Amount of irrigation water	35	110	110
2010	灌溉日期 Irrigation date	6月16日 June 16	7月14日 July 14	8月10日 August 10
	灌溉水量(mm) Amount of irrigation water	110	110	110

2 春玉米水盐生产函数的构建

本研究采用国际上通用的作物水分生产模型为基础构建作物水盐响应模型,并计算各个生育阶段的水盐胁迫敏感系数。经对比分析,选用加法模型 Blank 模型和乘法模型 Jensen 模型为基础作为作物水盐模型的构建基础,这两种模型的表述形式分别为:

$$\text{Blank 模型: } \frac{Y_a}{Y_m} = \sum_{i=1}^n k_{bi} \left(\frac{ET_i}{ET_{mi}} \right) \quad (1)$$

$$\text{Jensen 模型: } \frac{Y_a}{Y_m} = \prod_i \left(\frac{ET_i}{ET_{mi}} \right)^{\lambda_i} \quad (2)$$

式中: Y_a 为作物单位面积实际产量; Y_m 为作物充分灌溉时单位面积最大产量; i 为生育期; ET_i 为第 i 生育期的实际蒸发蒸腾量; ET_{mi} 为第 i 生育期的潜在蒸发蒸腾量; n 为作物生育期数目; k_{bi} 、 λ_i 为作物水分敏感指数。

已有大量研究认为,植物对盐分胁迫有一定的耐受阈值,低于该值时,环境盐分的增加不会抑制耐盐植物的生长,超过此阈值植物生长(作物产量)将随土壤中盐分浓度的增加而减小。本项目通过引入盐分胁迫因子 $f(EC)$,将水分生产函数转变为水盐生产函数,采用盐分胁迫因子如下式:

$$f(EC) = \begin{cases} 1 & \text{当 } EC_i < EC_{\min} \text{ 时} \\ \left(\frac{EC_{\max} - EC_i}{EC_{\max} - EC_{\min}} \right)^{\sigma_i} & \text{当 } EC_{\min} \leq EC_i < EC_{\max} \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } EC_i > EC_{\max} \text{ 时} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $EC_{\max}$ 为植物能够容忍的土壤电导率 (EC , dS/m) 最大值,当土壤含盐量大于该值时,植物因生理缺水而死亡; $EC_{\min}$ 为土壤电导率的临界值,低于该值时,植物生长不受影响; EC_i 为第 i 生育阶段土壤实际电导率; σ_i 为盐分敏感指数。

修正后的 Blank 模型与 Jensen 模型分别如下式

所示:

修正后的 Blank 模型

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n k_{bi} \left(\frac{ET_i}{ET_m} \right) & \text{当 } EC_i < EC_{\min} \text{ 时} \\ \sum_{i=1}^n \left(\frac{ET_{\max} - ET_i}{ET_{\max} - ET_{\min}} \right)^{\sigma_i} k_{bi} \left(\frac{ET_i}{ET_m} \right) & \text{当 } EC_{\min} \leq EC_i < EC_{\max} \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } EC_i > EC_{\max} \text{ 时} \end{cases} \quad (4)$$

修正后的 Jensen 模型

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \begin{cases} \prod_i \left(\frac{ET_i}{ET_m} \right)^{\lambda_i} & \text{当 } EC_i < EC_{\min} \text{ 时} \\ \prod_i \left(\frac{ET_{\max} - ET_i}{ET_{\max} - ET_{\min}} \right)^{\sigma_i} \left(\frac{ET_i}{ET_m} \right)^{\lambda_i} & \text{当 } EC_{\min} \leq EC_i < EC_{\max} \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } EC_i > EC_{\max} \text{ 时} \end{cases} \quad (5)$$

式中符号意义同前。此外,由于作物生长受众多环境因素影响,水、肥、气、热、结构等状况的不同都会导致长势和生物量的差异。为消除各处理间其它因素的作用,需对观测数据进行标准化处理,将各生物量指标换算为相对生物量。

3 模型求解

本研究在 2009 年和 2010 年,连续进行两年矿化度分别为 0、1、3、5、7 g/L 的微咸水灌溉春玉米试验,对春玉米生育期内土壤水盐动态变化情况、作物蒸发蒸腾量及作物生育指标进行测量。并将春玉米的生育阶段分成苗期(30 d)、拔节期(41 d)、抽雄灌浆期(58 d)、成熟期(30 d)四个生育期来进行计算,根据实测土壤电导率数据,应用公式 3 求得各生育阶段的盐分胁迫因子。应用公式 4 和公式 5 分别建立分阶段水盐生产函数,将不同矿化度微咸水灌溉处理条件下蒸发蒸腾量、土壤电导率及产量的试验数据代入进行回归分析,求得各生育阶段的盐分敏感指数与水分敏感指数,结果见表 3。

从表中可以看出,修正的 Blank 模型和修正的 Jensen 模型相关性均比较强,决定系数 (R^2) 分别达到 0.91、0.97。对于盐分敏感指数,模型中盐分敏感指数越大,表示该阶段对盐分胁迫越敏感。通过对两种模型计算出来的结果分析均能得出,盐分敏感程度顺序为苗期 > 拔节期 > 抽雄灌浆期 > 成熟期。以修正的 Blank 模型为例,盐分敏感指数 σ_{bi} 在苗期最大,可达 1.58,说明春玉米在这个生育阶段对盐分胁迫最为敏感,土壤中的盐分含量高时,抑制春玉

米生长;生育中后期(抽雄灌浆期与成熟期)盐分敏感指数相对比较小,说明春玉米在生育中后期对盐分胁迫相对不敏感,其对生长的影响相对较小。

表 3 春玉米分阶段水盐生产函数模型参数
Table 3 Model parameters of water-salt production function for spring corn in different stages

模型 Model	盐分敏感指数 Salt sensitivity index				水分敏感指数 Water sensitivity index				R^2	F
	苗期 σ_1 Seedling	拔节期 σ_2 Jointing	抽雄灌 浆期 σ_3 Tasseling - grouting	成熟期 σ_4 Maturity	苗期 λ_1 Seedling	拔节期 λ_2 Jointing	抽雄灌 浆期 λ_3 Tasseling - grouting	成熟期 λ_4 Maturity		
修正的 Blank 模型 Revised Blank model	1.58	0.69	0.51	0.09	0.85	1.19	1.2	-0.15	0.91	77.56**
修正的 Jensen 模型 Revised Jensen model	4.6	3.28	2.8	0.62	0.57	1.4	-1.24	0.52	0.97	143.39**

同时从表中还可以看出水分敏感指数差异较大,甚至出现负值。在本试验条件下,认为造成此种现象的原因可能是:本次试验设计不以水分控制为主,各处理的灌溉水量完全相同,模型计算不能很好地反映水分敏感情况;反求参数用最小二乘法时,为使剩余平方和最小,正负协调可能不同的生育阶段出现负值。

4 咸淡水交替灌溉试验

为了验证上述成果,本研究进行了相同微咸水使用量情况下,不同交替灌溉次序的淡水与微咸水(7 g/L)交替灌溉春玉米试验。根据当地春玉米需水量,试验共灌水三次,总灌水量 330 mm。灌水时间分别为 6 月 16 日(拔节期)、7 月 14 日(抽雄期)和 8 月 10 日(灌浆期),分别进行了“淡咸咸”“咸淡咸”和“咸咸淡”三种交替灌溉方式,每个处理重复三次。

不同处理条件下春玉米产量、百粒重和干物质重的结果见表 4。

表 4 不同灌溉处理对春玉米生长的影响
Table 4 Effect of different irrigation treatments
for spring corn growth

指标 Index	淡咸咸 Fresh - saline - saline	咸淡咸 Saline - fresh - saline	咸咸淡 Saline - saline - fresh
产量(kg/hm ²) Yield	10319.4	10137.3	10032.3
百粒重(g) Weight per 100 - grain	32.4	32.4	32.2
干物质重(kg/hm ²) Weight of dry matter	592.9	586.4	568.5

从表中可以看出,不同处理条件下,春玉米的产量、百粒重、干物质重均有差别,整体上淡咸咸的生长效果相对最好,其次是咸淡咸处理,咸咸淡处理条件下春玉米的生长相对最差。可以得出,将微咸水

安排在春玉米的生育后期使用,其对作物的影响将相对减弱,即春玉米生育阶段后期对盐分胁迫相对不敏感。这与水盐生产函数计算得出的结果相同,由此得出,在进行交替灌溉时,应尽量将微咸水安排在生育阶段的中后期。

5 结 论

本文基于作物水分生产函数建立了春玉米水盐生产模型,经试验结果验证,具有较好的相关性。从计算的盐分敏感指数分析表明,春玉米的盐分敏感程度顺序为苗期>拔节期>抽雄灌浆期>成熟期。由于试验设计不以土壤水分控制为主,各处理的灌溉水量完全相同,模型计算未能很好地反映水分敏感情况,应进行进一步的研究。

经过不同交替灌溉顺序的春玉米灌溉试验,淡咸咸处理条件下微咸水对春玉米生长的影响相对最小,其次是咸淡咸处理,而咸咸淡处理的影响相对最大。

通过水盐生产函数计算,以及交替灌溉试验的验证,研究认为在进行交替灌溉时,应尽量将微咸水安排在生育阶段的中后期。

参 考 文 献:

[1] 中国工程院“西北水资源”项目组.西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究[J].中国工程科学,2003,5(4):1-26.
[2] 王卫光,王修贵,沈荣开,等.微咸水灌溉研究进展[J].节水灌溉,2003,(2):9-11.
[3] 李 彬,王志春,孙志高,等.中国盐碱地资源与可持续利用研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):154-158.
[4] 张展羽,郭相平.作物水盐动态响应模型[J].水利学报,1998,(12):66-70.
[5] Yaron D. A model of optimum irrigation scheduling with saline water [J]. Water Resource Research, 1980, (16):327-332.

(下转第 95 页)

Study on the placement of sensors for moisture content in soil profile for cotton under mulched drip irrigation condition

SHEN Xiao-jun¹, SUN Jing-sheng^{1*}, ZHANG Ji-yang¹, WANG Jing-lei¹,
LI Ming-si², YANG Gui-sen³

(1. Key Laboratory of Crop Water Use and Regulation, Chinese Ministry of Agriculture, Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China;

2. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

3. Irrigation Experiment Station, Water Conservancy Bureau in Xinjiang Production and Construction Corps, Urumqi 832002, China)

Abstract: In order to find the layout scheme of moisture probes in soil profile for drip irrigation under mulch, a field experiment was conducted in the oasis region of Xinjiang during 2009. Based on the observation data of moisture content in different depths and different positions in soil profile which were monitored with oven drying method, the correlation of soil water content in different depths and different positions was analyzed, the data of 8 depths at different positions were sorted by R type hierarchical clustering method, and the layout scheme of soil moisture probes was screened out in cotton filed with drip irrigation under mulch. The experimental verification results showed that it was reasonable that soil moisture probes were embed into 0 ~ 10 cm, 20 ~ 30 cm, 40 ~ 50 cm and 60 ~ 80 cm in vertical direction and 0 cm, 32.5 cm and 50 cm distance with drip line in horizontal direction.

Keywords: drip irrigation; soil water content; soil moisture probe; soil moisture monitoring

(上接第80页)

- [6] 魏占民,陈亚新,史海滨,等.作物水、盐响应模型的研究进展 [C]//康绍忠.农业高效用水与水土环境保护.西安:陕西科学技术出版社,2000.
- [7] 郑重,张凤荣,马富裕,等.基于棉花—水—盐生产函数的耕

地盐碱化分级与评价[J].灌溉排水学报,2010,20(1):47-49.

- [8] 王春霞,王全九,刘建军,等.微咸水滴灌条件下土壤水盐分布特征试验研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):30-35,57.

Study on water-salt production function based on saline water irrigation for spring corn

WANG Jun-tao, CHENG Xian-guo, LI Qiang-kun

(Institute of Water Conservancy for the Yellow River, YRCC, Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: Plot experiments were carried out under irrigation with water of different salinity in the Shiyang River Basin to study the effect of water and salt factors on the growth of spring corn. Based on Blank model and Jensen model which were generally used in the world, crop water-salt model was built. And then salinity stress factor was used to transform water production function into water-salt production function. Through tests of irrigation with water of different salinity in 2009 and 2010 and function solutions, the salt sensitive index in different growth stage of spring corn was sought. The results showed that the salt sensitive degree sequence was seedling stage > jointing stage > tasseling-grouting stage > maturity stage. The result was verified by alternative saline water irrigation, and it showed that the crop would grow better if the irrigation happened in the growth stage with little salt sensitive degree.

Keywords: saline water; spring corn; Blank model; Jensen model; water-salt production function; Northwest China