

DOI:10.3969/j.issn.1004-4701.2018.1.01

基于水量平衡方程推求盐分胁迫条件下 春玉米根系吸水模型参数

袁成福

(江西水利职业学院水利工程系,江西 南昌 330013)

摘要:为了探究作物根系吸水与根区土壤盐分运动的关系,在甘肃省石羊河流域开展春玉米田间试验,试验在测坑中进行,引入 Feddes 提出的根系吸水模型,在春玉米生育期内选择7个时间段作为研究春玉米根系吸水时间段,设置淡水灌溉、3 g/L 水与 6 g/L 水灌溉处理,利用水量平衡方程分别计算各处理在各时段的根系吸水量.在此基础上,利用最小二乘法优化得到盐分胁迫修正系数的参数 p 为 1.397,并且对 3 g/L 水与 6 g/L 水处理的根系吸水量模拟值和实测值进行了比较,相关系数在 0.99 以上,模拟值和实测值的误差在允许误差 15% 范围之内.建立了盐分胁迫条件下春玉米根系吸水模型,为该地区研究春玉米种植条件下土壤水盐运动规律奠定基础.

关键词:测坑;微型蒸渗桶;盐分胁迫;水量平衡方程;春玉米;根系吸水模型

中图分类号:TV93 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4701(2018)01-0000-05

0 引言

西北干旱区是我国水资源短缺最严重的地区之一,水资源总量约 $1.979 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国水资源量的 5.84%,人均水资源量约为 1.573 m^3 ,占全国人均水平的 68%^[1].农业灌溉是西北地区的用水大户,西北地区农业年用水量约 $778 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总水量的 89.3%,远高于全国的 70%.对于地表水资源极其短缺的西北干旱地区,利用地下咸水灌溉是农业生产的重要方式.但长时期采用咸水灌溉,会向土壤带入大量的盐分,如果盐分在作物根系区大量累积,会造成盐分胁迫,抑制作物的生长发育.作物与土壤水盐之间的关系问题一直是 SPAC 系统中水盐运移规律必不可少的内容^[2].作物的各项生理活动都需要通过根系不断的从土壤中吸收水分来完成,研究作物根系吸水规律一直受到国内外相关学者的关注^[3].目前作物根系吸水规律主要有两大类模型,即微观模型与宏观模型.微观根系吸水模型是描述微观土壤区域内水分向根的运动,是基于物理机制建立在单根尺度上的,研究流向和进入典型单根的径向流,侧重于描述根系吸收水分的过程机理^[4].宏观根系吸水模型将整个根-土系统看作一个整体,忽略了根的水力特性,综合考虑作物根系对土壤水分的吸

收^[5].尽管众多研究者已经建立了大量作物根系吸水模型,但由于各模型存在一定的自身特点和局限性,不能完全借鉴.特别是在干旱地区,作物常遭遇盐分胁迫,盐分胁迫会抑制作物根系吸水^[6].因此,有必要研究干旱地区盐分胁迫条件下的作物根系吸水模型.甘肃省石羊河流域地处我国西北干旱内陆区,该地区水资源极其短缺.春玉米是该地区的主要粮食作物之一,具有种植面积广,生育期长,耗水量大的特点^[7].因此,开展盐分胁迫条件下春玉米根系吸水规律的研究,对于制定合理的灌溉制度,提高咸水资源利用效率和解决水资源短缺等均有重要意义.国内外已有大量关于盐分胁迫条件下作物根系吸水规律研究的报道,其中应有较普遍的是由 Feddes 提出的根系吸水模型.本文通过设置不同灌溉水矿化度处理的田间试验,引入 Feddes 提出的根系吸水模型,根据田间试验实测数据,利用水量平衡方程以及最小二乘法优化方法,推求该模型的参数,建立盐分胁迫条件下春玉米根系吸水模型,为该地区研究春玉米生长条件下土壤水盐运动规律奠定基础.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2011 年 4 月至 9 月在中国农业大学石羊河

收稿日期:2017-08-07

项目来源:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ161472)

作者简介:袁成福(1989-),男,硕士,高职讲师.

试验站内进行,该试验站位于甘肃省武威市凉州区,处于石羊河流域中游区域。多年平均降水量和蒸发量分别为160 mm与2 020 mm,地下水位埋深达48.00 m。试验在测坑中进行,准备有底测坑6个,每个测坑面积为6.66 m²(3.33 m×2.00 m),深度为3.00 m,坑底为水泥地板,在底板和回填土间有20 cm厚的砂石滤层,并设有排水通道,可以监测深层渗漏量。测坑0~100 cm土壤为粉质壤土(国际制),其粒径组成为:砂粒(0.05~1.00 mm)含量(体积分数,下同)为35.59%,粉粒(0.005~0.05 mm)含量为40.99%,黏粒(<0.005 mm)含量为23.42%(采用马尔文MS2000激光粒度分析仪测定)。测坑0~100 cm土壤平均容重为1.51 g/cm³,饱和含水率为0.41 cm³/cm³(体积含水率,下同),田间持水率为0.30 cm³/cm³,凋萎系数为0.075 cm³/cm³。测坑100~300 cm土壤为粉质壤土,其粒径组成为:砂粒含量为36.12%,粉粒含量为46.00%,黏粒含量为17.88%,土壤容重为1.54 g/cm³,饱和含水率为0.42 cm³/cm³,田间持水率为0.32 cm³/cm³,凋萎系数为0.084 cm³/cm³。

1.2 试验设计

田间试验设置灌溉定额和灌溉水矿化度两种因素,

灌溉定额设置1种水平:S(充分灌溉,灌溉定额=1ET_c),ET_c为作物需水量,玉米全生育期ET_c累计值为510 mm^[8]。灌溉水矿化度设置3种水平:F(研究区地下水矿化度为0.71 g/L,可近似认为是淡水),3(灌溉水矿化度为3 g/L)、6(灌溉水矿化度为6 g/L)。试验采用随机方式布置,共设3个处理,分别为SF、S3与S6,每个处理重复2次,共设置6个小区。根据春玉米不同生育阶段,结合当地灌溉经验,设置灌溉制度见表1所示,在春玉米播种前(4月10日)进行一次春灌,灌水定额为150 mm,目的是为春玉米苗期储水和压盐。测坑灌溉采用管道进行灌溉,管道材料为PVC塑料硬管,试验站有主管供水到田间,再由支管分到每个测坑,每个支管安装水表,用来控制灌溉水量。本试验所用的淡水是通过水泵抽取当地地下水得到,咸水是采用质量比为2:2:1的NaCl、MgSO₄和CaSO₄混合地下水配制而成。供试作物是品种为“金穗1号”的当地春玉米,于2011年4月22日播种,9月12日收获,全生育期143天。每个小区按8列6行进行播种,每个小区共计48株,玉米行距35 cm,株距25 cm,玉米生育期内的农艺措施均参照当地实际情况进行。

表1 各试验处理灌溉制度

处理	灌溉水矿化度 (g/L)	灌水定额			灌溉定额
		4月10日	6月6日	6月25日	
SF	0.71	150	120	135	660
S3	3	150	120	135	660
S6	6	150	120	135	660

1.3 测定项目与方法

在春玉米全生育期内选取7个时间段作为研究春玉米根系吸水时间段,分别为:6月9日~6月24日(时段1),6月29日~7月16日(时段2),7月27日~7月31日(时段3),7月31日~8月8日(时段4),8月13日~8月23日(时段5),8月23日~9月1日(时段6),9月1日~9月12日(时段7),其中时段1为春玉米拔节期,时段2为春玉米抽穗期,时段3为春玉米开花期,时段4、5为春玉米灌浆期,时段6为春玉米乳熟期,时段7为春玉米成熟期。分别在这7个时间段的初期和末期通过土钻获取土样,每个取样点均分为6层,分别为0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm和100~120 cm,每次取样完后回填钻孔并做标记,采用烘干法测定土壤含水率。土钻取土留部分土样,将土样风干,进行研磨和过1 mm筛后,采用1:5的土水比配制成土壤饱和浸提液,利用SG-3型电导率

仪测定其电导率EC_{1:5},并用公式($S = 0.0275EC_{1:5} + 0.1366$)将EC_{1:5}转化为土壤含盐量^[9]。在2011年田间试验初期采用离心机法测定试验地的土壤水分特征曲线,采用水平土柱法测定试验地的土壤水分扩散率。土面蒸发量采用自制微型蒸渗桶(MLS)直接测定,在这7个时间段内每个小区埋设MLS,MLS内径10 cm,高度20 cm,下端采用不封底的形式,呈圆柱状,采用PVC材料制成,每天早晨8:00时刻对MLS进行称重,相邻两天的重量之差即为前一天的土面蒸发量,遇到降雨的情况时,降雨后一天进行换土后再进行测量。同时收集好试验站春玉米生育期内的气象资料。

1.4 相关计算公式

1.4.1 根系吸水量计算公式

$$S = P + \Delta W - E - q \quad (1)$$

$$\Delta W = W_0 - W_t \quad (2)$$

式中:S为根系吸水量,mm;P为时间内的降雨量,

mm; ΔW 为 0 ~ 100 cm 土壤水分变化量, mm; W_0 为时段初土壤含水量, cm^3/cm^3 ; W_i 为时段末土壤含水量, cm^3/cm^3 ; E 为时段内的土面蒸发量, mm; q 为 0 ~ 100 cm 土层底部的土壤水分通量, mm。

1.4.2 0 ~ 100 cm 土层底部土壤水分通量的计算公式

根据达西定律计算 0 ~ 100 cm 土层底部的土壤水分通量:

$$q = -K(\bar{\theta}) \text{grad} H \quad (3)$$

式中: q 为土壤水分通量, mm/d; $\text{grad} H$ 为水力梯度, 无量纲, 可通过 80 ~ 100 cm 和 100 ~ 120 cm 深度处土壤的水势差求得; $\bar{\theta}$ 为 0 ~ 100 cm 土层底部的土壤含水量, cm^3/cm^3 ; $K(\bar{\theta})$ 为非饱和导水率, mm/d, 采用下式计算:

$$K(\theta) = C(\theta) D(\theta) \quad (4)$$

式中: θ 为土壤体积含水率, cm^3/cm^3 ; $C(\theta)$ 为比水容量, cm^{-1} ; $D(\theta)$ 为土壤水扩散率, cm^2/min ; $C(\theta)$ 通过实测的土壤水分特征曲线求得, 如下式表示:

$$s = 5.39 \times 10^5 e^{-26.886\theta} \quad (5)$$

$$C(\theta) = 6.895 \times 10^{-8} e^{26.886\theta} \quad (6)$$

式中: s 为土壤吸力, cm 水柱; θ 为土壤体积含水率, cm^3/cm^3 。

$D(\theta)$ 采用水平土柱法测定, 由下式表示:

$$D(\theta) = 0.0008 e^{21.275\theta} \quad (7)$$

1.4.3 根系吸水模型

Feedes 提出的根系吸水模型为:

$$S(z, t) = \gamma(h) S_{\max} \quad (8)$$

式中: $S(x, t)$ 为仅存在盐分胁迫条件下的根系吸水量, mm; $\gamma(h)$ 为盐分胁迫修正系数; S_{\max} 为最适土壤水分情况下的根系吸水量, mm。

1.4.4 盐分胁迫修正系数的表示方法

Van Genuchten 等采用一种非线性方程, 利用 S 型曲线函数来表示盐分胁迫修正系数, 即:

$$\gamma(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_0}{h_{050}}\right)^p} \quad (9)$$

式中: h_0 为土壤渗透势, cm; h_{050} 为 $\gamma(h)$ 等于 0.5 时对应的土壤渗透势, cm; p 为拟合参数。

2 结果与分析

2.1 春玉米根系吸水量的计算

春玉米的根系主要分布在 0 ~ 100 cm 土层区域内, 春玉米根系吸水对土壤水分的主要影响也在该区域内。某一段时间内, 进入该区域土体的水量主要有时段内的有效降雨量、0 ~ 100 cm 土层底部以下的深层补给量; 流出该区域土体的水量主要有该时段内的土面蒸发量、0 ~ 100 cm 底部以下的深层渗漏量和土体内的作物根系吸水量。如果知道该时段内的土壤水分变化量就可以应用水量平衡方程即公式(1)来计算春玉米根系吸水量。

2.1.1 各时段内 0 ~ 100 cm 土层土壤水分变化量

通过公式(2)可以计算出各时段内 0 ~ 100 cm 土层各处理的土壤水分变化量, 见表 2 所示。

2.1.2 各时段内的土壤表面蒸发量

本次试验通过自制微型蒸渗桶直接测定每天的土面蒸发量, 时段内累积值为该时段的累积土面蒸发量, 降雨天气认为土壤蒸发量极少而忽略不计, 见表 3 所示。其中时段 5 期间处在连续降雨天气中, 蒸发量很小且难以通过蒸渗桶测定, 因此该时段的土壤蒸发量近似为 0。

表 2 各时间段内 0 ~ 100 cm 土层土壤水分变化量

处理	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6	时段 7
SF	118.72	92.12	28.54	44.86	-52.89	22.82	55.33
S3	114.60	83.28	19.65	28.24	-58.94	19.02	49.05
S6	106.84	75.23	19.09	22.63	-64.18	15.38	43.82

2.1.3 各时段内 0 ~ 100 cm 土层底部的水分通量

各时段内 0 ~ 100 cm 土层底部的水分通量通过公式(3) ~ (7) 计算, 计算结果见表 4。正值表示作物根

区土壤水分向深层渗漏, 负值表示深层土壤水分向作物根区土壤补给。

表3 各时段内的土壤表面蒸发量

mm

处理	时段1	时段2	时段3	时段4	时段5	时段6	时段7
SF	32.57	51.65	7.38	16.16	0	9.04	20.81
S3	31.43	49.87	7.03	15.31	0	8.38	19.66
S6	30.30	48.70	7.30	14.04	0	6.99	18.28

表4 各时段0~100 cm 土层底部的水分通量

mm

处理	时段1	时段2	时段3	时段4	时段5	时段6	时段7
SF	37.33	25.36	-23.75	-12.90	19.47	11.68	23.37
S3	40.72	21.55	-29.46	-27.10	16.25	9.75	20.49
S6	39.39	20.72	-28.37	-28.60	14.94	8.96	17.93

2.1.4 各时段内的有效降雨量

通过试验站气象站实测资料得到各时段内的降雨量,除去作物叶面截流等未渗入地下的降雨后为有效降

雨量,本次试验采用实测降雨量乘以系数0.9后的值作为渗入土壤的有效降雨量,各时段的有效降雨量见表5所示。

表5 各时段的有效降雨量

mm

处理	时段1	时段2	时段3	时段4	时段5	时段6	时段7
SF	0	36.9	0	0	90	9	12.6
S3	0	36.9	0	0	90	9	12.6
S6	0	36.9	0	0	90	9	12.6

2.1.5 各时段内的玉米根系吸水量

通过水量平衡公式即公式(1)可以计算出各时段

内的各处理的春玉米根系吸水量,计算结果见表6所示。

表6 各时段的根系吸水量

mm

处理	时段1	时段2	时段3	时段4	时段5	时段6	时段7
SF	48.82	52.01	11.23	41.60	17.64	11.09	23.75
S3	42.45	48.76	10.52	40.03	14.81	9.89	21.50
S6	37.15	42.71	10.04	37.20	10.88	8.43	20.22

2.2 盐分胁迫修正系数的参数推求

由于SF处理为淡水充分灌溉且灌溉定额为当地春玉米的作物需水量,所以可认为SF处理的根系吸水量为最适土壤水分情况下的根系吸水量 S_{max} ,而S3与S6处

理可认为仅存在盐分胁迫下的根系吸水量 $S(x,t)$ 。通常认为盐分胁迫条件下的作物根系吸水量为最适土壤水分情况下的根系吸水量乘以盐分胁迫修正系数 $\gamma(h)$,因此 $\gamma(h)$ 可由公式(8)计算,结果见表7所示。

表7 盐分胁迫修正系数的计算

处理	时间段1	时间段2	时间段3	时间段4	时间段5	时间段6	时间段7
SF	48.82	52.01	11.23	53.76	17.64	11.09	23.75
S3	42.45	48.76	10.52	51.34	14.81	9.89	21.50
S6	37.15	42.71	10.04	47.24	10.88	8.43	20.22
$\gamma(h)$	0.87	0.94	0.94	0.92	0.89	0.85	0.93
	0.76	0.82	0.88	0.86	0.63	0.77	0.85

公式(9)中已给出求盐分胁迫修正系数的常用经验公式,其中 p 为拟合参数; h_{050} 为 $\gamma(h)$ 等于 0.5 时对应的土壤渗透势,参照 Skaggs 等提供的经验值, h_{050} 取值为 $-15\ 000\ \text{cm}^{[10]}$; h_0 为某时段内的平均土壤渗透势,由以下公式计算^[11]:

$$c_w = 6.7 \times 10^{-4} EC_{1:5} \quad (10)$$

$$c_s = \frac{c_w v \gamma}{m \theta} \quad (11)$$

$$h_0 = -5.63 \times 10^5 c_s \quad (12)$$

式中: c_w 为土壤浸出液盐分质量浓度, g/cm^3 ; $EC_{1:5}$ 为土壤浸出液电导率, ds/m ; c_s 为土壤溶液盐分质量浓度, g/cm^3 ; v 为土壤浸提液的体积, cm^3 ; γ 为土壤容重, g/cm^3 ; m 为风干土的质量, g ; θ 为体积含水率, cm^3/cm^3 。 h_0 的计算结果见表 8。

根据以上计算出的各个参数值,代入到公式(9)中,

表 8 各时段内平均土壤渗透势

处理	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6	时段 7
S3	-4 518	-9 886	-8 771	-9 537	-8 913	-14 605	-10 098
S6	-4 849	-12 182	-8 885	-11 522	-9 223	-13 457	-10 177

通过最小二乘法优化可以得到拟合参数 p 为 1.397,进而得到盐分胁迫修正系数的计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_0}{-15\ 000}\right)^{1.397}}$$

将求得到的 p 值代入到上述公式中可以求出不同时段盐分胁迫修正系数的计算值 $\gamma(h)'$,再乘以最适土壤水分情况下的根系吸水量 S_{max} ,得到盐分胁迫条件下的根系吸水量模拟值 $s(z,t)'$,图 1、2 为盐分胁迫条件下的根系吸水量模拟值与实测值的比较。

由图 1、2 可以看出,S3 与 S6 处理的根系吸水量模拟值与实测值比较接近,相关系数在 0.99 以上,误差最大为 14.6%,最小为 0.6%,在允许误差 15% 误差范围之内。可见,拟合参数 p 为 1.397 是合理的。因此,盐分胁迫条件下春玉米根系吸水模型为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_0}{h_{050}}\right)^{1.397}}$$

3 结 论

在甘肃省石羊河流域开展春玉米田间试验,引入 Feddes 提出的根系吸水模型,分别在春玉米生育期内选择 7 个时间段作为研究玉米根系吸水时间段,设置 SF、S3 与 S6 处理,利用水量平衡方程分别计算各处理在各时段的根系吸水量,在此基础上,利用最小二乘法优化得到盐分胁迫修正系数 p 为 1.397,并且对 S3 与 S6 处理根系吸水量的模拟值和实测值进行了比较,相关系数在 0.99 以上,模拟值和实测值的误差在允许误差 15% 范围之内。建立了盐分胁迫条件下春玉米根系吸水模型,为该地区研究春玉米种植条件下土壤水盐运动规律奠定基础。

参考文献:

- [1] 陈亚宁,杨青,罗毅,等.西北干旱区水资源问题研究思考[J].干旱区地理,2012,35(1):1~9.
- [2] 王玉阳,陈亚鹏.植物根系吸水模型研究进展[J].草业学报,2017,26(3):214~225.
- [3] 高晓瑜,霍再琳,冯绍元.水盐胁迫条件下作物根系吸水模型研究进展及展望[J].中国农村水利水电,2013(1):45~48.

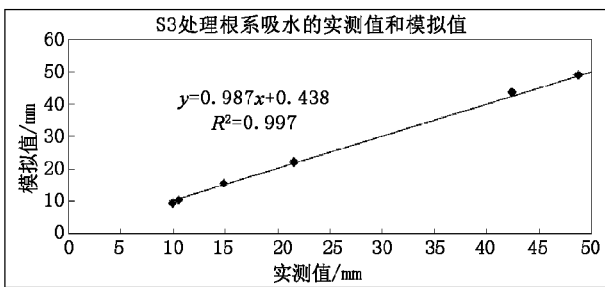


图 1 S3 处理根系吸水量的模拟值和实测值的比较

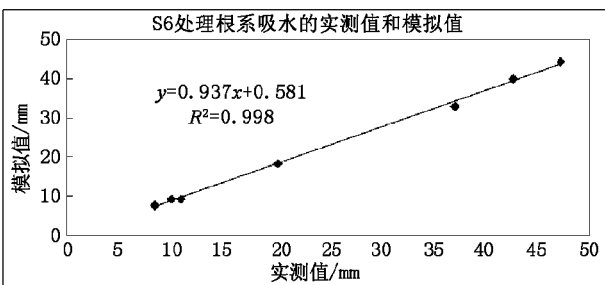


图 2 S6 处理根系吸水量的模拟值和实测值的比较

- [4] Albasha R, Mailhol J C, Cheviron B. Compensatory uptake functions in empirical macroscopic root water uptake models experimental and numerical analysis[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 155: 22 ~ 39.
- [5] Hopmans J W, Bristow K L. Current capabilities and future needs of root water and nutrient uptake modeling[J]. *Advance in Agronomy*, 2002, 77: 103 ~ 183.
- [6] Sepaskhah A R, Yarami N. Evaluation of macroscopic water extraction model for salinity and water stress in saffron yield production[J]. *International Journal of Production*, 2010, 4(3): 175 ~ 186.
- [7] 蒋静, 冯绍元, 霍再林, 等. 盐化土壤节水灌溉春玉米产量及耗水规律研究[J]. *中国农村水利水电*, 2015(5): 19 ~ 22.
- [8] Jiang Jing, Feng Shaoyuan, Ma Juanjuan, et al. Irrigation management for spring maize grown on saline soil based on SWAP model[J]. *Field Crop Research*, 2016, 196: 85 ~ 97.
- [9] 袁成福, 冯绍元, 蒋静, 等. 咸水非充分灌溉条件下土壤水盐运动 SWAP 模型模拟[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 72 ~ 82.
- [10] Skaggs T H, Shouse P J, Poss J A. Irrigating forage crops with saline waters: 2. Modeling root uptake and drainage. *Vadose Zone J*, 2006, 5(3): 824 ~ 837.
- [11] 王利春, 石建初, 左强, 等. 盐分胁迫条件下冬小麦根系吸水模型的构建与验证[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 112 ~ 117.

编辑: 张绍付

The calculating of the root water uptake model parameters of spring maize under salt stress conditions based on water balance equation

YUAN Chengfu

(Department of Hydraulic Engineering, Jiangxi Water Resources Institute, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to study the relations between the root - water - uptake of crop and soil water salt transport in root zones, field experiments were conducted under the conditions of spring maize growth in Shiyang Rive Basin of Gansu province. The field experiments were carried out in test - pits. It was introduced into the root - water - uptake model, which was proposed by Feddes. During the growing period of spring maize, the seven time periods were selected to study the root - water - uptake of spring maize. Fresh water, 3 g/L and 6 g/L irrigation treatment were set up in field experiments. The root - water - uptake content of each treatments at different period was calculated using water balance equation. The parameter (p) of salt stress reduction function was optimized by the least square method and the parameter(p) was 1.397. The root - water - uptake content of 3 g/L and 6 g/L irrigation treatment was simulated and compared with measured value. The correlation coefficient was above 0.99 and the error between the simulated and measured values was within the allowable error range of 15%. It establishes the root - water - uptake model of spring maize under salt stress conditions. This model is conducive to understanding of the law of soil salt movement under spring maize growth.

Key words: Test - pits; Micro - lysimeter; Salt stress; Water balance equation; Spring maize; Root - water - uptake model

翻译: 袁成福