

春玉米根系生育特征与冠层关系的研究

侯 琼¹, 沈建国²

(1. 内蒙古气象研究所, 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古气象局, 呼和浩特 010051)

摘要:以农田实际观测资料为依据, 分析了春玉米根系生育特征及其与冠层生长的关系, 并提出了定量描述方程; 较详细地阐述了水分条件对根系生长的影响, 指出利用根系伸展深度确定灌溉计划湿润层深度和进行根冠调控, 以指导农田优化灌溉的可行性。

关键词:根系生育; 根冠关系; 水分调节; 计划湿润层

Study on root development characteristics of spring maize and its relationships with canopy growth

HOU Qiong¹, SHEN Jian-Guo² (1. *The Meteorological Institute of Inner Mongolia, Huhhot 010051, China*; 2. *The Meteorological Bureau of Inner Mongolia, Huhhot 010051, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1536~1541

Abstract: The root development characteristics of spring maize and its relation to the canopy growth were analyzed based on field observed data. Equations were derived to quantify their relationships. The water effect on root growth was described in details. Methods to determine the irrigation wetting depth and to control the root to canopy ratio were developed according to rooting depth. This is quite helpful to the irrigation planning.

Key words: root development; root to canopy relation; water regulation; irrigation wetting depth

文章编号: 1000-0933(2001)09-1536-06 中图分类号: S513 文献标识码: A

农田优化灌溉量的确定与作物根系生育状况关系密切。研究不同水分条件下作物根系的生育规律及其与土壤耗水的关系, 不仅可为农业节水高产提供重要理论基础和科学依据, 而且还可对制定优化灌溉方案提供一些实际指导和具体措施。由于根系研究耗力费时, 而且测根、掘根存在许多实际困难, 以往田间观测和理论研究多集中在某一发育阶段的测定研究上, 对大田条件下整个生育进程中根系动态变化研究远不及对冠层动态变化的研究深入和广泛, 田间条件下根系生长动态变化、土壤水分等因素对根系生育影响及根冠关系的研究还不够深入, 定量化程度较低^[1]。本文根据内蒙古玉米主要种植区代表站点 1999 年春玉米田间实测资料, 分析了水分适宜和胁迫条件下春玉米根系生长的动态变化规律; 提出了定量描述方程, 及根系与冠层生长和土层耗水量之间的关系; 同时举例计算了灌溉计划湿润层深度和灌溉量, 与传统灌溉制度相比, 可以节约大量的灌溉用水。

1 试验设计与观测方法

1.1 试验设计

田间试验在巴盟临河农业气象试验站和通辽市郊区农田内进行。每个站点各选择两个试验小区供根系观测用, 小区面积 14m×5m, 其中一个小区为充分供水型, 即生育期间 100cm 以上土层的土壤水分保持在 70% 以上, 另一个小区为缺水型, 在拔节期前后 100 cm 以上土层含水量控制在 45%~50% 左右, 其它时

基金项目: 内蒙古“九五”科技攻关研究(半干旱区水资源综合利用决策服务系统研究, 970124)和中国气象局青年基金(内蒙古半干旱区农田优化灌溉模型研究)资助项目

收稿日期: 1999-12-18; 修订日期: 2001-03-05

作者简介: 侯 琼(1960~), 女, 河北行唐人, 高级工程师。主要从事农业气候、节水农业等与农业气象等研究。

期水分保持在 60% 以上,生育期间每隔 10d 观测 1 次土壤湿度,测深 2 m。根系生长从出苗期开始每隔 5d 观测 1 次最大根深、主要根深和横向宽度,直到根系停止生长为止。同时,同步观测植株高度、冠层生物量,记载各发育期。

1.2 观测方法 根系生长进程的观测采用 Ares 提出的田间挖掘窗口法^[2],具体方法是,在小区边缘挖一个 2.5m 深的坑,坑的里侧做观察面,将一个 0.5 cm 厚的玻璃板安装于垂直观察表面,把一层过筛的细土涂于本土面和玻璃板的内表面,固定玻璃,用一张黑塑料片覆盖玻璃,以排除光线;坑的外侧留 2 到 3 级台阶,以便观测时上下方便。被观测植株种植在距玻璃面 5~10 cm 处。为避免风、降水和灌溉的损害,坑四周筑起小埂,同时覆盖整个洞穴。

株高测定采用定株观测法,每区选择 5 株有代表性的植株进行观测。冠层生物量每隔 10d 取样 1 次,每次 5 株,从 3 叶期开始直到收获。

2 试验结果分析

2.1 春玉米根系生长特征分析

作物根系生长同冠层生长一样从出苗到成熟的生长过程是一动态过程,在这一过程中根系的伸展程度是单调增值的。一般而言,根系的生长速度,特别是垂直向生长速度有较明显的“慢-快-慢”规律,即生长初期和开花、吐丝期前后生长速率较低,7 叶到抽雄期之间生长速率较高。图 1 和图 2 分别是临河和通辽地区垂直向最大根深($H_{\max}$)、主要根深(H_{main})和水平向伸展(H_{level})的生长速度过程线。两地曲线的变化趋势十分相似,均在出苗后 90d 左右时达到最大值,即在开花期伸展到最大深度,并停止生长保持恒定。由于两地的土壤类型、水肥、气象条件及生产管理水平存在一定差异,造成根系伸展程度明显不同。水分满足条件下,临河地区春玉米根系垂直向伸展最大可达 150 cm,水平向最大可达 51 cm;通辽地区垂直向和水平向伸展的最大深度分别为 135 cm 和 32 cm,表明临河地区春玉米根系的发育程度明显高于通辽地区春玉米根系的发育程度。

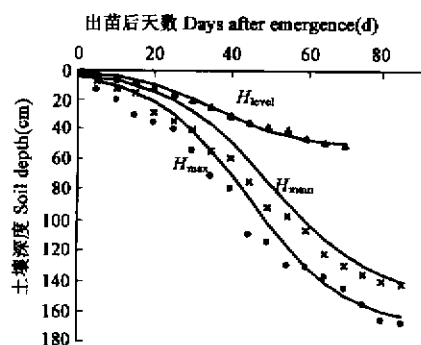


图 1 临河适宜水分时根系生长进程

Fig. 1 The root growth process under suitable water conditions in Linhe

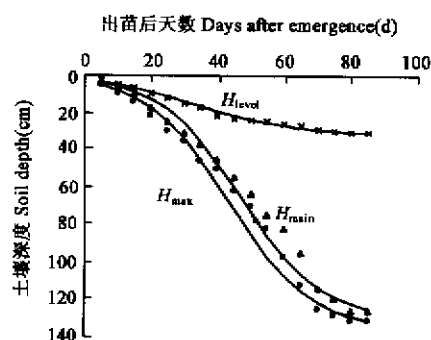


图 2 通辽水分适宜时根系生长进程

Fig. 2 The root growth process under suitable water conditions in Tongliao

春玉米根系生长过程用 Logistic 函数表示:

$$H = H_c / (1 + e^{a+bt}) \quad (1)$$

式中, H 、 H_c 分别为根系伸展深(宽)度(cm)和最大伸展深度(cm), t 为出苗后天数, a 、 b 为方程待定系数。表 1 给出各地垂直、水平向伸展动态方程式的待定系数值。

由经验方程式(1)可以模拟计算出春玉米生长期任一时刻根系垂直向伸展深度。在农田优化灌溉中可参考不同时期根系下扎深度确定灌水计划湿润层深度,以便有效防止灌水不足影响作物生长或灌水过多造成的渗漏损失,达到节水增效的目的。

表 1 Logistic 方程系数和相关系数表

Table 1 Fitting coefficient of Logistic equation and the correlation coefficient

地区 Regions	水分条件 Water conditions	方程 Equations	a	b	H_c	n	R^2
临河 Linhe	适宜 Suitable	H_{max}	3.0667	-0.0698	150	18	0.9871
		H_{min}	3.6030	-0.0822	125	18	0.9875
		H_{level}	3.3454	-0.0940	51	15	0.9867
	胁迫 Stressed	H_{max}	3.1317	-0.0787	170	18	0.9804
		H_{min}	3.3902	-0.0751	150	18	0.9896
		H_{level}	2.7826	-0.0860	55	14	0.9873
通辽 Tongliao	适宜 Suitable	H_{max}	3.5621	-0.0820	135	17	0.9889
		H_{min}	3.8849	-0.0830	130	17	0.9874
		H_{level}	2.2784	-0.0671	32	17	0.9919
	胁迫 Stressed	H_{max}	3.6538	-0.0858	145	17	0.9798
		H_{min}	3.8135	-0.0825	140	17	0.9869
		H_{level}	2.5317	-0.0731	36	15	0.9584

* 各方程均通过 0.01 显著性检验 All equations passed the significant test at 0.01 level

2.2 水分胁迫对春玉米根系生长的影响

土壤水分对根系生长发育、空间分布,乃至冠层生长、产量状况等的影响要比其它因素的影响大得多。水分胁迫影响根系水平和垂直向伸展,土壤干旱会促进根系生长^[3]。图 3 是根据临河试验田测得的 1m 土层土壤相对含水量与同步观测的根系垂直向伸展状况资料绘制的。在两种土壤水分条件下,根系伸展过程曲线变化趋势基本一致。土壤水分适宜地块,水分含量在拔节孕穗期(出苗后 60 d 左右)以前,始终高于水分胁迫时的含水量,并在 30d 左右时达最大,其余时期两者接近;根系伸展表现为生长初期两者相差不大,水分胁迫条件下根系下扎深度略大于水分适宜条件下的根系,出苗 30d(拔节前)后差异增大,直到出苗后 60d 左右(孕穗期)时,差异达最大,相差 30cm。此后随水分状况改善,差距有所减小。在停止生长时,最大根深达到 170 cm 比水分适宜时多延伸 20cm。通辽地区两种水分条件下根系生长过程曲线变化规律同临河试验区的相似,同样在出苗后 60d 左右(孕穗期)时,根系垂直向伸展的差距达最大(15 cm),停止生长时水分胁迫条件下的根系最大深度达 145cm,比水分适宜条件下的根系深 10 cm。水平向伸展宽度水分胁迫时比水分适宜时多出 4 cm。

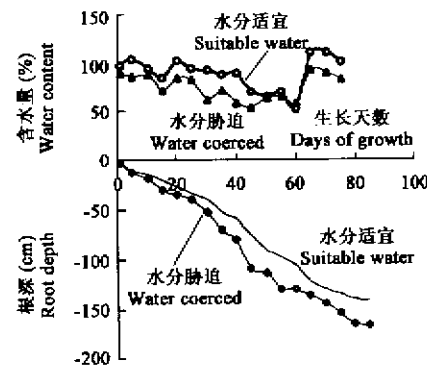


图 3 临河不同土壤含水量与根深的关系

Fig. 3 Relation between different soil water content and root depth

以上分析表明,春玉米根系生长进程受土壤水分条件影响不大,一般在开花期停止生长,且范围达最大,随后保持恒定,或因呼吸消耗、部分根系死亡腐烂等损失而降低,但水分对根系生长绝对量特别是根系伸展深度的影响很大。因此,在根系停止生长前,即春玉米在开花前采取适当调控措施,调节根系,可以增加作物的抗旱能力。

2.3 春玉米根系生长与冠层生长的关系

春玉米根系生长与植株高度和冠层生物量生长存在明显的相关关系。用一元二次方程或直线方程及指数曲线等方程拟合(表 2),相关系数可达 0.95 以上。图 4 反映出根系与株高的变化趋势,根系随株高增加不断向下延伸,表现出较明显的同伸关系,特别是在水肥条件较差的通辽地区,表现的更加明显,根深与

株高呈直线关系变化。一般根系生长时间比株高生长时间长,当玉米抽穗后株高达最大,并停止生长,根系仍有 10d 左右的生长时间。

表 2 根深与株高和冠层生物量的关系式表达式

Table 2 Relationships among rooting depth, plant height and the crown biomass

地区	相关因子	水分条件	关系式	N	R
Regions	Correlation factor	Water conditions	Relationships		
临河 Linhe	根深与株高 ^①	适宜 ^③	$Hr = -0.0005h_g^2 - 0.4908h_g + 7.8857$	14	0.9944
		胁迫 ^④	$Hr = -0.0002h_g^2 + 1.022h_g + 10.2380$	14	0.9955
	冠层生物量与根深 ^②	适宜 ^③	$G = 0.0003Hr^{0.7415}$	9	0.9919
		胁迫 ^④	$G = 0.0001Hr^{0.8467}$	9	0.9886
通辽 Tongliao	根深与株高 ^①	适宜 ^③	$Hr = 0.6565h_g - 1.3144$	14	0.9937
		胁迫 ^④	$Hr = 0.7528h_g - 0.1544$	14	0.9959
	冠层生物量与根深 ^②	适宜 ^③	$G = 1.2153e^{0.2413Hr}$	9	0.9759
		胁迫 ^④	$G = 1.2274e^{0.0351Hr}$	9	0.9658

* 各关系式均达到极显著水平 All equations passed the significant test at 0.01 level, ① Rooting depth and plant height, ② Canopy biomass and rooting depth, ③ Suitable water, ④ Stressed water

根系在达到最大深度以前,其生长速度与冠层生物量之间遵循指数关系或乘幂关系变化规律(表 2)。两地曲线拟合方程虽然不同,但变化趋势相近,即玉米生长初期根系生长比冠层生长快,当根系生长到一定深度(50~60cm 左右)时,冠层生物量迅速增加,且在根系达到最大深度,停止生长后,冠层生物量仍在增加。同时,水分条件影响根深与生物量的比例,相同根深条件下,水分适宜时的冠层生物量较水分胁迫时大,表明光合产物分配到冠层的比例较水分胁迫时分配到冠层的比例大^[4]。根冠关系曲线在水肥条件优越的临河试区呈抛物线型变化,通辽地区则呈直线变化,在株高停止生长以前,根深和株高始终保持相同生长速度,同时两个地区充分供水条件下的根冠比均小于水分胁迫条件下的根冠比,说明干旱条件有利于根系生长。

2.4 根系生长与土层耗水量的关系

作物对土壤水的利用主要表现在利用深度和能力上^[5]。通常作物根系随作物生长逐渐向深层发展,但 60% 以上的根量集中在 0~20cm 的土壤中,至作物生育的中后期,中部土层的根长密度有较大的增加,上部土层的根长密度由于根系的老化和死亡而出现相对降低^[6]。本文通过对 1m 深土层内不同时期不同层次土壤水分耗失情况和根系生长情况的计算,得出:随着根深的加深,根系对土壤水分利用的层次也越来越深(见表 3 和表 4)。以临河为例,在玉米出苗后 20d 之前,根量主要集中在 9.6cm~15.4cm 范围内,加上地表蒸发强烈,1m 土层中水分的散失近一半集中在 20cm 以上土层中;进入拔节期时根系垂直向下伸到 53.7cm,水平向伸展到 30.7cm,70% 的水分消耗于 40cm 以上的土层中;之后根系迅速生长到 46.3cm~98.8cm 范围内,耗水量也逐渐向深层发展,拔节孕穗期间 20cm~60cm 土层耗水量占总耗水量的 55.4%;授粉灌浆期根系生长范围扩大的虽然不多,但新生根多,活力强,授粉期 60% 的水分消耗在 20cm~60cm 的土层中;进入灌浆期 40cm~100cm 土层中损失的水分占总耗水的 65%。通辽地区各土层耗水规律与临河相似。

利用公式 $Q = 10^4 HR(W_t - W_f) \times 1/\eta_{\text{根}}$ 计算灌溉量^[7],其中 H 为计划湿润层深度(m), R 为土层平均

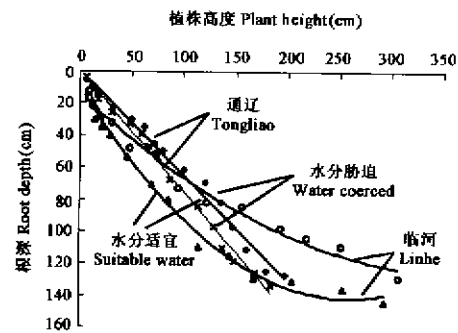


图 4 根系深度与植株高度的关系

Fig. 4 Relation ship between root depth and plant height

容重(t/m^3); $W_{上}$ 为适宜土壤含水量上限,取田间持水量的 90%; $W_{下}$ 为土壤含水量下限,本试验拔节期取田间持水量的 55%,抽穗期取田间持水量的 70%; $\eta_{田}$ 为田间水有效利用系数,取值 0.90。根据根深计算确定出计划湿润层深度拔节期为 0.5m,抽穗期为 1m,代入上式计算得出临河地区拔节期和抽穗期的灌溉量分别为 604.8 和 830.5 m^3/h ,通辽地区这两个时期的灌溉量分别为 619.8 和 868.5 m^3/h 。目前,内蒙古主要灌区的灌溉量大多数在 900~1050 m^3/h 范围内,部分水分常通过径流和渗漏损失掉,造成浪费。采用根深确定灌水深度至少可节约灌溉用水 180~450 m^3/h ,显著提高水资源的利用率。

表 3 不同时段各土层水分散失量占总土层耗水量的百分数(%,临河)

Table 3 Water consumption percentage of each soil layer to the total water consumption in 1m soil layer during different development periods (Linhe)								
生育期 Developmental stages	根深(cm) Rooting depth		各土层耗水量占总耗水量的百分数(%) Water consumption percentage in each soil layer					1m 土层耗水量 Water consumption in 1m soil layer
	横向 Horizontal	纵向 Vertical						
			0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	
出苗~七叶 ^①	9.6	15.4	47.9	30.7	17.8	3.4	0.3	12.8
七叶~拔节 ^②	30.7	53.7	36.3	33.7	24.3	4.6	1.0	30.3
拔节~孕穗 ^③	46.3	98.8	26.8	26.6	28.8	14.3	3.4	42.3
孕穗~授粉 ^④	50.2	118.9	18.1	25.9	34.1	11.6	10.3	60.6
授粉~灌浆初 ^⑤	50.9	123.8	14.6	20.6	31.6	20.2	13.1	45.9
灌浆初~乳熟 ^⑥	50.0	124.8	15.9	20.7	26.8	21.0	15.7	35.3

① Emergence to seven leaves; ② Seven leaves to node elongation; ③ Node elongation to ear formation; ④ Ear formation to pollination; ⑤ Pollination to grain filling; ⑥ Grain filling to mature

表 4 不同时段各土层水分散失量占总土层耗水量的百分数(%,通辽)

Table 4 Water consumption percentage of each soil layer to the total water consumption in 1m soil layer during different development periods (Tongliao)								
生育期 Developmental stages	根深(cm) Rooting depth		各土层耗水量占总耗水量(%) Water consumption percentage in each soil layer					1m 土层耗水量 Water consumption in 1m soil layer
	横向 Horizontal	纵向 Vertical						
			0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	
出苗~七叶 ^①	9.0	12.7	38.2	33.3	24.1	3.7	0.7	29.4
七叶~拔节 ^②	19.2	47.1	22.9	35.8	22.8	15.1	3.4	39.2
拔节~孕穗 ^③	27.3	97.4	11.2	37.3	27.6	17.1	6.8	46.5
孕穗~授粉 ^④	30.6	122.2	10.7	30.1	31.5	22.0	8.3	55.7
授粉~灌浆初 ^⑤	31.6	128.4	13.2	21.6	30.2	23.2	12.4	48.2
灌浆初~乳熟 ^⑥	31.9	129.7	15.6	16.9	28.1	25.4	14.1	35.4

① Emergence ot seven leaves; ② Seven leaves to node elongation; ③ Node elongation to ear formation; ④ Ear formation to pollination; ⑤ Pollination to grain filling; ⑥ Grain filling to mature

3 结论

3.1 春玉米根系生长速度,特别是垂直向生长速度存在明显的“慢-快-慢”规律。无论生长环境如何,变化趋势一致。根系伸展最大幅度在出苗后 90d(即开花期)左右时出现。水肥条件优越的临河地区,垂直向和水平向最大根深可达 150cm 和 51 cm,通辽地区两者分别达到 135cm 和 32 cm。根系生长过程可用 S 型曲线方程描述,相关系数均在 95% 以上。

3.2 水分胁迫对春玉米根系垂直向和水平向延伸,一般干旱会促进根系生长。临河地区受水分胁迫影响的根系比适宜水分条件下生长的根系垂直向多延伸 20 cm,可达 170 cm;通辽地区多延伸 10cm,达 145

cm,水平向多延伸 4 cm。

3.3 春玉米根系与株高生长速度之间因栽培条件不同而呈抛物线形或直线变化,经拟合相关程度很高,体现出根冠生长存在明显的同伸关系,而且水肥条件相对较差时,这种关系表现得更为明显。春玉米根系净增长速度在开花期停止,生长量达最大值;植株高度在抽穗后停止生长,达最大,根系伸展时间比株高生长时间多 10d 左右。因此,对玉米根冠进行调控时应在开花期或抽穗期以前进行效果明显。

3.4 随着根深的加深,耗水量逐渐向深层发展,但主要集中在 1m 以上土层中。利用经验方程计算根系下扎深度,并以此确定灌溉计划湿润层深度,可节约灌溉用水 180~450m³/h。生产中采取减少灌溉量,适当增加灌溉次数的方法可以减少水资源的浪费^[8]。

3.5 本文所得结论是根据内蒙古两个地区的试验资料得出的,是否有普遍性,还需验证。根系功能不仅取决于根系数量多少和伸展范围大小,而且还有赖于根系活力的强弱。因此,在根系密度(根量)和根系活力方面本文尚未涉及还有待于今后进一步探讨。

参考文献

[1] 冯广龙,罗远培,石元春,等.节水高产作物根系适宜生长发育状况,见:石元春,刘昌明,龚元石主编.节水农业应用基础研究进展 北京:中国农业出版社,1995. 108~113.

[2] C Wayne Cook and James Stubbendieck 著.许志信,韩国栋,王明玖,等译.研究根系的方法.见:草地研究——基本问题和技术.陕西:天则出版社,1990. 117~119.

[3] 王万里.植物对水分胁迫的反应.植物生理学通讯,1981,5:55~64.

[4] 张喜英,刘昌明.提高太行山山前平原高产区灌溉水利用效率的田间试验研究,见:刘昌明,于沪宁主编.土壤-作物-大气系统水分运动实验研究.北京:气象出版社,1997. 161~165.

[5] 杨培岭,罗远培,陆锦文.冬小麦根系吸水功能的研究.见:李韵珠,陆锦文,罗远培,等著.土壤水和养分的有效利用.北京:北京农业大学出版社,1994. 42~48.

[6] 刘昌明,张喜英,尹雁峰.土壤-植物-大气系统水分运行规律的初步研究.见:刘昌明,于沪宁主编.土壤-作物-大气系统水分运动实验研究.北京:气象出版社,1997. 18~31.

[7] 廖永诚,樊志升,狄美良.节水灌溉工程技术.见:胡毓骥,李英能,编著.华北地区节水型农业技术.北京:中国农业科技出版社,1995. 114~115.

[8] Brent E, Clothier and Steven R Green. Root-zone Processes and the efficient use of irrigation water. *Agricultural Water Management*, 1994, (25): 1~12.