第 40 卷 第 2 期
2003 年 3 月

土 壤 学 报
ACTA PEDOLOGICA SINICA

Vol 40, No 2
Mar., 2003

玉米单根木质部水势与径向水力导度的轴向变化*

李秧秧　邵明安
(中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵　712100)

摘　要　在前人用多个吸水小室测定单根径向水力导度和用不同渗透势溶液同时测定根木质部水势和径向水力导度的基础上, 将这两种方法结合, 用之研究了不同土壤水分条件下玉米单根木质部水势和径向水力导度的轴向变化。结果表明: 根木质部水势在距根尖 9 cm 以前是不断下降的, 土壤干旱导致根木质部水势下降且前 7 cm 根木质部水势的下降幅度增大。根尖是对水分胁迫最敏感的部位。正常水分处理根径向导度在 3 cm 以前逐渐增加, 3~ 10 cm 间达到最高值且维持稳定, 10 cm 以后, 根系径向导度下降。土壤干旱导致根径向导度下降, 轴向上的下降部位提前, 轴向变化的梯度减小。

关键词　玉米, 根木质部水势, 径向水力导度, 轴向变化
中图分类号　S152.7

当代研究田间土壤水分和平衡、土壤- 植物水分关系和 五水 转化是以土壤- 植物- 大气连续体(SPAC) 为基础的。其中, 根系中的水分传输是 SPAC 中的一个重要组成部分。水分在根系中的传输主要决定于根表面与木质部的水势差及根系的水力导度。根木质部水势可以反映根系的水分状况, 根水力导度是根系最基本的水分动力学性质之一, 为 SPAC 水分模拟所必需。根水力导度涉及径向和轴向水力导度, 相比而言, 除根尖部位外, 根系吸水受径向导度的影响远远大于轴向导度, 因而研究径向导度似乎更重要。由于根系在轴向上呈现出明显的吸水速率[1]、解剖结构[2] 和水分运行通道[3] 等的差异, 其木质部水势和径向水力导度也可能存在轴向变化。迄今为止, 有关这方面的一些研究[4,5] 多是在水培或砂培条件下用热电偶和压力探针技术得出的, 这些与自然的土壤与蒸腾条件有较大的差别。为此, 本研究试图在准原位条件下, 对不同土壤水分条件下玉米单根木质部水势和径向水力导度进行准确测定, 以为根系吸水机理的阐明和根系水分传输的准确模拟提供实验依据。

1　材料与方法

1 1　试验材料与装置

供试玉米品种为陕单九号。试验装置由二部分组成: 上管与下管。上管为直径 10 cm、高 15 cm 的 PVC 管, 下部侧壁相对开二个长方形小窗口(3　5 cm^2), 并用胶带纸密封, 底部套入同直径的塑料盒(可取下以观察根系的生长) 并用胶带纸密封。上管内按 1.3 g cm^{-3}的容重装入粉碎过筛后的　土, 并浇水至田间持水量的80% ~ 85% (TDR 控制)。消毒催芽后的玉米先播种在上管, 待根长至底部时, 将上管放入下管中央。下管也为 PVC 管, 其直径为 20 cm、高 15 cm, 使用前在机床上划成相等的两半并用胶带纸密封, 底部为同直径的堵头(也可拧开), 内装入细砂(含少量珍珠岩), 其容重为 1.45 g cm^{-3}, 含水量控制同上管。当最长根生长至底部时, 控制含水量使对照和干旱处理的含水量分别为田间持水量的 80% ~ 85% 和 50% ~ 55%, 一周后打开下管并轻轻除去细砂, 选择足够长的根进行测定。每个处理重复 6 次。

1 2　测定方法

在 Barrowclough 等用多个蒸腾计测定根径向导度[2] 和 Zwieniieck 等用单个蒸腾计同时测定根木质部

* 国家自然科学基金项目(40001010) 和国家杰出青年科学基金项目(40025106) 资助
收稿日期: 2001- 03- 05; 收到修改稿日期: 2002- 01- 11

水势和径向导度[6] 的基础上, 我们采用 5 个蒸腾计同时测定单根轴向上不同部位的根木质部水势和径向导度, 5 个蒸腾计距根尖的部位分别为 1~ 2 cm 、3~ 4 cm 、6~ 7 cm、9~ 10 cm、13~ 14 cm。试验装置如图 1。其中吸水小室长 3 cm, 直径为 1. 0 cm, 侧壁开有 2 个直径为 2. 0 mm 的小孔, 当根穿过该小孔后, 用黄油与石蜡的混合物密封。其上端的毛细管直径为 1 mm, 长 20 cm 左右, 毛细管通过橡皮塞与吸水小室相连, 下部的橡皮塞可取下以排放溶液。

由于在稳态条件下, 植物根系径向流符合稳态水流方程: $J_v = L_p(\ _s - \ _x)$ (其中, J_v 是水流通量 ($m\ s^{-1}$) , L_p 是径向水力导度($m\ MPa^{-1}s^{-1}$) , $_s$ 和 $_x$ 分别为根表面和根木质部水势 (MPa) , 因而可通过测定不同渗透势下的水流通量, 用线性回归的方法计算出 L_p 和 $_x$, 该回归直线的斜率即为 L_p, 在 $_s$ 轴上的截距即为 $_x$。本研究中, 所用 PEG 溶液的渗透势分别为 - 0. 05、- 0. 1、- 0. 2 和 - 0. 3 MPa。不同根区的水流通量可通过毛细管弯月面移动的稳定速率及根系表面积(粗根和细根毛的根直径分别在放大 10 倍和 40 倍的显微镜下测量) 求出。图 2 为一根区的测定及根木质部水势和径向导度的计算结果。所有处理测定时光强约为 400　$mol\ m^{-2}s^{-1}$, 相对湿度为 60% 左右。为使根木质部水势不变, 测定时间尽量控制在 1 h 内, 测定前进行 30~ 40 min 光诱导。各处理不同根区测定重复 3~ 5 次。

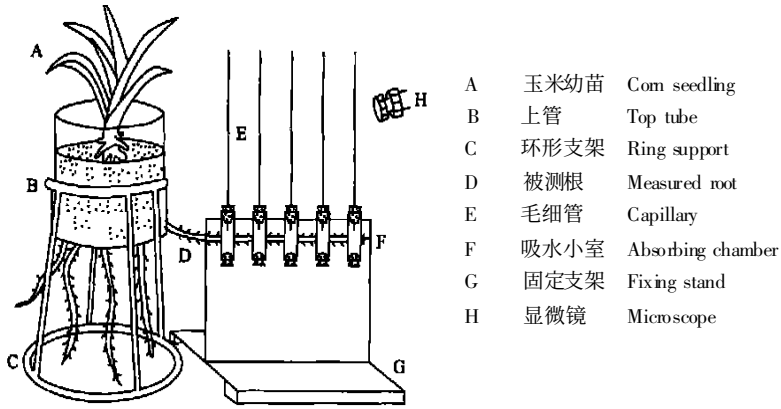

图 1　同时测定根木质部水势与径向水力导度的实验装置(示意图)

Fig. 1　Experimental setup of simultaneously measuring root xylem water potential and radial hydraulic conductivity

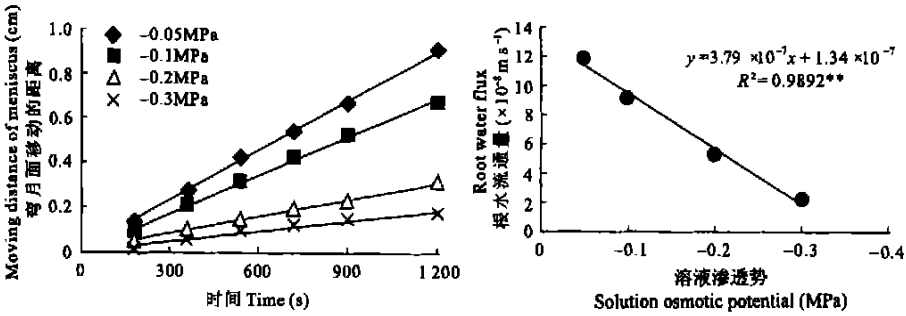

图 2　实验过程中毛细管内弯月面随时间的变化及根木质部水势和径向导度的计算

(正常水分处理 6~ 7 cm 根区的测定结果, 其中 y 为根水流通量, x 为溶液渗透势。

L_p 为 $3.79\ \ 10^{-7}\ m\ MPa^{-1}s^{-1}$, $_x$ 为 - 0. 35 MPa)

Fig. 2　Changes in capillary meniscus with time and calculation of root xylem water potential and radial hydraulic conductivity(the measured value of 6~ 7 cm zone for well-watered treatment. y is root water flux, x is solution osmotic potential. $L_p = 3.79\ \ 10^{-7}\ m\ MPa^{-1}s^{-1}$, $_x = -0.35$ MPa)

2 实验结果

2.1 玉米单根木质部水势的轴向变化

图3为不同水分条件下玉米单根木质部水势的轴向变化。从中可看出,正常水分处理的根木质部水势在距根尖9 cm以前是不断下降的,且愈靠近根尖部位,根木质部水势下降愈快,在9 cm以后,根木质部水势不再变化。干旱处理不同根区木质部水势明显低于正常水分处理,其变化趋势基本同于正常水分处理,但在距根尖6 cm以后根木质部水势就不再变化。若以测定部位距根尖的平均距离为横坐标,二个处理根木质部水势的变化可用二次抛物线拟合(正常水分: $R^2=0.9594^*$; 干旱处理: $R^2=0.9550^*$)。比较干旱处理不同根区相对于正常水分处理的水势下降幅度,发现1~2 cm处根木质部水势的下降幅度最大,达83.3%,表明这一部位对水分胁迫的敏感性最强。离根尖愈远,根系对水分胁迫的敏感性愈低。

2.2 玉米单根径向水力导度的轴向变化

正常水分处理径向导度沿轴向上的变化可明显分为三段:在距根尖3 cm以前,径向导度逐渐增加;在3~10 cm之间,径向导度几乎不变,此时,径向导度平均为3.63 10^{-7} m $MPa^{-1}s^{-1}$;在10 cm以后,径向导度明显下降(图4)。无论哪一阶段,干旱处理的径向导度均低于正常水分处理。干旱处理径向导度在距根尖3 cm以前也是逐渐增加的,3~7 cm处达到最大且基本稳定,为1.65 10^{-7} m $MPa^{-1}s^{-1}$,但7 cm后径向导度已逐渐下降。正常水分处理最大径向导度为13~14 cm处径向导度的3.70倍,而干旱处理则为2.94倍,说明土壤干旱条件下根径向导度沿轴向变化的幅度缩小。比较不同根区干旱处理径向导度相对于正常处理的下降幅度,发现1~10 cm处的下降幅度均较大,介于53.2%~64.8%之间,而13~14 cm这一部位根径向水流对水分胁迫的敏感性降低。

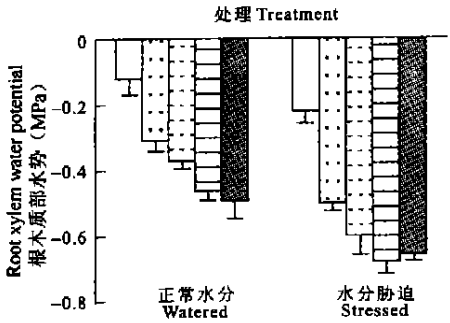

图3 不同水分条件下玉米单根木质部水势的轴向变化

Fig. 3 Axial changes in root xylem water potential of corn under different soil water conditions

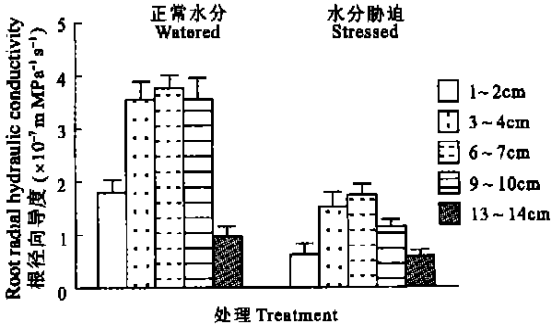

图4 不同水分条件下玉米单根径向水力导度的轴向变化

Fig. 4 Axial changes in root radial hydraulic conductivity of corn under different soil water conditions

3 讨 论

本研究结果表明:根尖的木质部水势在土壤干旱时下降幅度最大,表明根尖是对水分胁迫最敏感的部位。离根尖的部位越远,根木质部水势的下降幅度愈低,根系对水分胁迫愈不敏感。根木质部水势的下降主要与轴、径向阻力比有关[5],该比值越大,根木质部水势下降越快。愈靠近根尖部位,轴向阻力愈大,径向阻力愈小,轴向阻力/径向阻力比愈大,因而根木质部水势下降很快。距根尖7 cm前,受水分胁迫的根木质部水势下降幅度明显高于正常水分处理,表明7 cm前水分胁迫增大轴向阻力的效应要大于径向阻力。7 cm后,二者变化幅度差异不大。

单根径向导度呈现出明显的轴向变化。径向导度的变化主要与不同根区内、外皮层的发育状态、径向流水力通道的贡献及根毛数量等有关。在距根尖3 cm以前,径向导度增加的主要原因可能在于后生木质部导管的发育的逐渐成熟使根系吸水增加;3~10 cm之间,内皮层的凯氏带已形成,但外皮层的栓质层正在发育中,虽有局部外皮层栓质化现象的出现,但尚不能完全阻断水分的质外体传输,加之根毛

数量的增加,这时径向导度基本稳定且维持较高的水平; 10 cm 后,内外皮层的凯氏带和栓质层已发育完全,从而阻挡了质外体水流,使质外体水流的贡献率降低,因而导致径向导度下降。水培玉米在距根尖2~ 12 cm 之间,其径向导度基本稳定,其外皮层的凯氏带和栓质层在 12~ 13 cm 才检测到[4,5],看来土培条件下根系的发育可能早于水培。水分胁迫导致不同根区的径向导度明显降低,其原因可能主要归于内外皮层凯氏带和木栓化程度的增大[7,8]、皮层细胞因萎缩和塌陷而形成气腔[7]、及径向流水流通道透性的改变[3]等原因。此外,水分胁迫也使径向水力导度下降的部位提前,径向导度垂直变化的梯度减小。Cruz 等[8]在受水分胁迫的高粱根上也观察到内外皮层细胞壁的木栓化提前,这同我们在此观察到的径向导度的提前下降一致。径向导度垂直变化的梯度减小可能与水分胁迫导致的发育老化有关。

由于本研究是在距根尖14 cm 以前的距离内测定的结果,对 14 cm 以后直至根基部的根木质部水势和径向导度的变化规律仍不清楚。对这一问题的深入研究,将对揭示根水势和水力导度的轴向变化规律、丰富和完善根系吸水机理具有十分重要的意义。

参考文献

1 Rosene H F. Distribution of the velocities of absorption of water in the onion root. Plant Physiology, 1937, 12(1): 1~ 9

2 Barrowclough D E, Peterson C A, Steudle E. Radial hydraulic conductivity along developing onion roots. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(344): 547~ 557

3 Steudle E. Water transport across roots. Plant and Soil, 1994, 167: 79~ 90

4 Frensch J, Steudle E. Axial and radial hydraulic resistance to roots of maize (*Zea Mays* L.). Plant Physiology, 1989, 91: 719~ 726

5 Melchior W, Steudle E. Water transport in onion (*Allium cepa* L.) roots: changes of axial and radial hydraulic conductivity during root development. Plant Physiology, 1993, 101: 1 305~ 1 315

6 Zwieniecki M A, Boersma L. A technique to measure root tip hydraulic conductivity and root water potential simultaneously. Journal of Experimental Botany, 1997, 48(307): 333~ 336

7 North G B, Nobel P S. Changes in hydraulic conductivity and anatomy caused by drying and rewetting roots of *Agave deserti*. Amercian Journal of Botany, 1991, 78(7): 906~ 915

8 Cruz R T, Jordan W R, Drew M C. Structural changes and associated reduction of hydraulic conductance in roots of *sorghum bicolor* L. following exposure to water deficit. Plant Physiology, 1992, 99: 203~ 212

AXIAL CHANGES IN ROOT XYLEM WATER POTENTIAL AND RADIAL HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF CORN

Li Yang-yang Shao Ming-an

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Summary

Radial hydraulic conductivity of root is usually measured using potometer method and both root xylem water potential and the conductivity can be measured by solutions with different osmotic potentials. In this paper an improved method was presented to measure axial changes in root xylem water potential and radial hydraulic conductivity of corn at different distances from root apex. The results indicated that root xylem water potential decreased continuously along 9 cm from root apex. Soil drought not only decreased root xylem water potential but also increased the decreasing degree of root water potential along 7 cm from the root apex. The apical zone was the most sensitive zone to water stress. Root radial hydraulic conductivity gradually increased within the first 3 cm from root apex, reached maximum and maintained constant between 3 cm and 10 cm and decreased thereafter. Water stress decreased radial hydraulic conductivity earlier and made the gradient of its axial changes smaller.

Key words Corn, Root xylem water potential, Radial hydraulic conductivity, Axial changes