

植物根系轴向水流阻力的研究

邵明安

康绍忠 蔡焕杰

(中国科学院
水利部西北水土保持研究所)

(西北农业大学)

摘 要

本文以泊肃叶定律为基础,提出了测定植物根系轴向水流阻力的降水头法,并用此法对鹰嘴豆根系的轴向阻力进行了测定。结果表明:降水头法其测定可靠性是令人满意的,尤其适用在较短时间内测定根系的轴向阻力。

根轴向水流阻力的泊肃叶公式计算值与实测值的比较结果表明:对鹰嘴豆根系来说,实测值总大于计算值;二者的比值随根导管调和平均直径的减少而增加,所有不同直径根轴向阻力测定平均值为计算值的3.8倍。

关键词 植物根系 轴向水流阻力 根直径

A STUDY ON THE AXIAL HYDRAULIC RESISTANCE TO WATER FLOW IN PLANT ROOTS

Shao Mingan Kang Shaozhong Cai Huanjie

Abstract

A falling head method of measuring the axial hydraulic resistance of plant roots was presented, based on the Poiseuille's Law. The method was used to measure the axial hydraulic resistance to water flow in chickpea root. The results showed that the reliability of the method was satisfactory, especially for the shorter time measurement.

Comparison between calculation of Poiseuille Formula and measurement of the axial resistance in chickpea roots showed that the value of measurement was always greater than that of calculation and the ratio of the former to later increased with the increase of mean diameter of vessels in xylem. The mean axial resistance of measurement was 3.8 times as much as that of calculation for chickpea roots.

key words: plant roots root axial resistance to water flow root-diameter

引 言

土壤—植物—大气连续体 (SPAC), 是研究田间水分循环与平衡、土壤水动力学的基础。SPAC中的水流速率, 在瞬态条件下, 由水势梯度、水流阻力和水容确定, 因此, SPAC中各部分的水流阻力直接涉及系统内水分运行速率, 尤其是在稳态情况下。

SPAC中的水流阻力可分为土壤阻力、根系吸收（径向）阻力、根轴向阻力、茎叶传导阻力、气孔扩散阻力和边界层扩散阻力以及大气扩散阻力等等。关于它们的大小和相对重要性，作者已经做过较系统的研究^[1]。

由于难于直接测定土壤中的根系水势，就很难用水流阻力的电路模拟法来计算其根系的轴向阻力，因而多采用毛细管流的泊萧叶公式来计算根的轴向水流阻力。我们知道，泊萧叶流的毛细管要求刚性、光滑、横截面为圆形，而根木质部的导管既不光滑，横截面也不为圆形、且沿轴向有多孔隔板。所以，可以推断根轴向阻力的实际值应比用泊萧叶公式计算的值要大，故人们常假定根轴向水流阻力数倍于泊萧叶公式计算值^[2,3]。然而，这种假定缺乏足够的定量依据。换句话说，只有通过直接或间接用实验测定根轴向水流阻力，才有可能进行客观的评价，本文正是以根轴向水流阻力的直接测定为基础，从而对根系轴向阻力这一长期存在疑问的问题进行论述的。

1 研究方法

如前所述，根轴向阻力大多由泊萧叶公式计算而得。本文则以直接测定为基础，并把测定值与泊萧叶公式计算值做一比较，从而探讨根系的轴向阻力。

1.1 计算根轴向阻力的泊萧叶公式

根木质部由许多导管组成，每一导管视为一毛细管，由毛细管流的泊萧叶公式，对所有导管迭加，可得出单位根长其轴向阻力的泊萧叶公式如下，

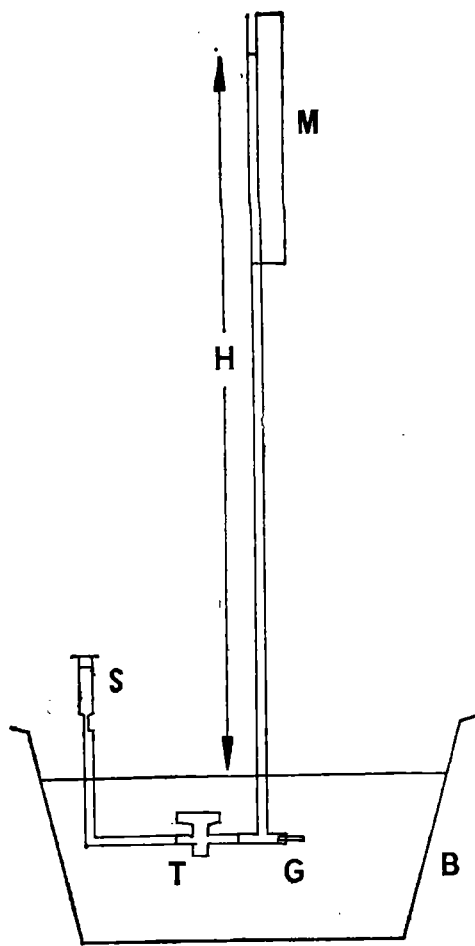
$$R_x = \frac{128\eta}{\pi \sum d_i^4} \quad (1)$$

式中 R_x 为单位根长的根轴向阻力； η 为流体的动力粘滞系数； d_i 为根横截面上某一导管的等值直径（因导管横截面多为椭圆或不规则形状，应由其截面积求等值直径）。

当用显微镜确定每一导管的等值直径后，就可用（1）式来计算根系的轴向阻力。

1.2 测定根轴向阻力的降水头法

降水头法测定根轴向阻力所依据的原理仍为泊萧叶定律。一段根长为 l ，截面上有 n 个导管，在压力头为 h 时，其水流量为，



B——盛水盆；G——被测根系；T——阀门；
S——注射器；H——水柱高度；M——标尺。

图1 测定根木质部水流阻力的降水头装置

$$Q = \frac{\pi h}{128\eta} \sum_{i=1}^n d_i^4 \quad (2)$$

由图1的降水头装置,任一时刻(t)通过被测根的水流量为,

$$Q = -\pi r^2 \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

由(1)、(2)、(3)式可得,

$$\frac{dh}{h} = -\frac{dt}{R_x l \pi r^2} \quad (4)$$

令 $K = -\frac{1}{R_x l \pi r^2}$, 并积分(4)式, 有

$$\ln(h/h_0) = Kt \quad (5)$$

式中 h_0 为初始压力头(水头高度)。

由(5)式可知,只要量测水柱高度随时间的变化过程,则可用统计的方法求出K值,由下式计算 R_x ,

$$R_x = -\frac{1}{K l \pi r^2} \quad (6)$$

我们采用图1的降水头装置,对鹰嘴豆不同直径的根系进行了轴向水流阻力测定。其测定步骤为:先饱和被测根系(约4~6h),置根系G于玻璃管口,其微小间隙用蜡密封;关闭阀门T,管H内注水,留一定余地;倒置装置(橡皮塞封其管H之顶,开阀门T,由注射器S注入足够量空气,使水柱与气压平衡,顺置装置,去掉皮塞,略抽出空气,使水柱与被测根系接触,关闭阀门T,记录初始水头 h_0 ,T右侧不再有空气;此后,则在一定时间间隔内由标尺M读出水头高度,从而获得水头高度的时间变化过程。

2 测定结果

2.1 关于测定方法的可靠性

由于降水头法以泊肃叶定律为其理论背景,因此,如果水柱高度的实测时间变化过程符合(5)式,则可以认为其测定是可靠的。对于鹰嘴豆根系,其典型的测定结果如图2和图3所示。

由图2和图3可见,无论是对较短和较长的测定时间,其水柱高度的时间过程线都相当符合(5)式,因而,测定方法是可靠的。然而,较短测定时间(1600s)比较长测定时间(16000s),其水柱高度随时间的变化更符合于(5)式。这表明,用降水头法测定根轴向阻力宜采用较短的测定时间和较短的测定间隔。至于较长测定时间内符合程度略低的可能原因,作者认为与根皮层的水流有关。因为有证据表明,玉米种子根内轴向流总量的25%是通过皮层进行的^[4]。且从图3也可以看出,若分段求其斜率,其值趋向于逐渐降低,也就是说,根轴向水流阻力是逐渐增大的。作者对此可能给出的解释是,随着水柱高度的持续下降,根皮层其水流量亦随之减小,即水流的轴向通道减少了,因而轴向水流阻力增加。所以,较短时间内测定的轴向阻力似应理解为根木质部水流阻力与根皮层水流阻力的并联等值总阻力,尽管这一推测还需更多的实验证据。

2.2 泊肃叶公式计算值与实测值的差别

鹰嘴豆根系轴向水流阻力的泊肃叶公式计算值与实测值的比较结果如图4所示。由

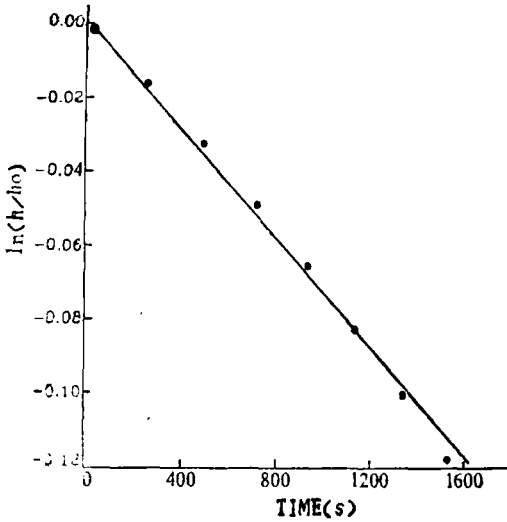


图2 较短测定时间内水柱高度随时间的变化

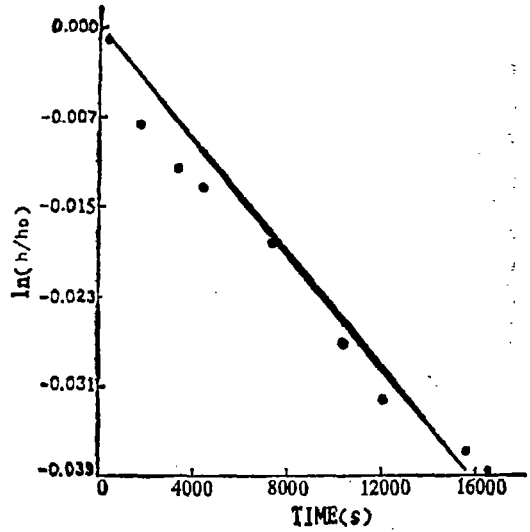


图3 较长测定时间内水柱高度随时间的变化

图4可以看出,对鹰嘴豆根系来说,根轴向水流阻力的实测值总大于泊肃叶公式计算值;二者比值随根导管调和平均直径的减小而增加,所有不同直径根系轴向阻力测定平均值为泊肃叶公式计算值的3.8倍。该比值比小麦种子根和豌豆主根的(1.3~2.3倍)要大^[5],和黑麦草和鸭茅根系的(2~3倍)较为接近^[5]。

3 讨 论

由于植物根内木质部导管及根皮层形状和结构的复杂性,根轴向水流阻力构成了SPAC中水流阻力一个较为困难确定的分量,此外,根系的轴向水流不仅仅沿木质部导管进行,使得问题更加复杂化了。

关于田间情况下的植物根系,其木质部导管除形状不规则以及沿轴向可能存在多孔隔板外,导管内还可能存在活的内含物,尤其是幼根^[6],田间条件下,当土壤水势较低时($< -0.1\text{MPa}$),根木质部大的导管内还可能形成封闭气泡^[7];根内轴向流动的液体实际上是溶液而不是纯水^[8],这就增加了粘滞系数;此外,还有文中已经提及的轴

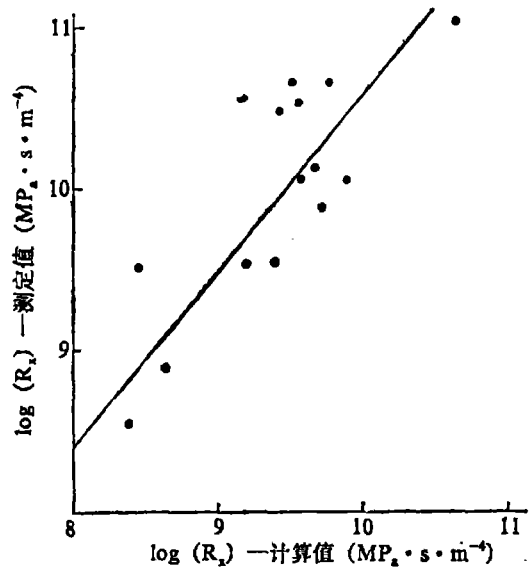


图4 鹰嘴豆根木质部水流阻力(R_x)计算值与测定值的比较

向流的皮层通道。在上述因素中,大多都使根轴向水流阻力增加。因此,至少我们可以推断,田间条件下未老化根系,其根轴向水流阻力比降水头法的测定值还要大,当然就比用泊萧叶公式的计算值大得更多了。由于不同植物根系其结构不同,也有例外的情况,如梯牧草根轴向水流阻力的实测值就与泊萧叶公式计算值接近^[5]。至于老化根系,如乳熟期小麦的种子根,其测定值还比泊萧叶公式计算值小得多^[6],这显然是轴向导水通道以及导管畅通度都明显增加等缘故。

本文中测定根轴向水流阻力的降水头装置,简单易行,测定可靠,对较粗根系的植物种类尤其适用,特别是乔灌根系以及某些豆科作物等;但对具有较细根系的植物种类,如禾谷类则在操作上存在一定困难。因此,对后者寻求另外的实测方法,如直接或间接测定根系水势的轴向分布,由水流电模拟法计算其阻力等,是很有必要的。

参 考 文 献

- [1] 邵明安等,土壤—植物—大气连续体中的水流阻力及相对重要性,《水利学报》,1986年第9期, 8~14页。
- [2] Wind, G.P. 1955. Flow of water through plant roots. *Neth. J. Agr. Sci.*, 3, 259~264.
- [3] Passioura, J.B. 1972. The effect of root geometry on the yield of wheat growing on stored water. *Aust. J. Agric. Res.* 23, 745~752.
- [4] Kozinka, V., Luxova, M. 1971. Specific conductivity of conducting and non conducting tissues of *Zea mays* root. *Biol. Plant.* 13, 257~266.
- [5] Ponsana, P., Ph.D Thesis, Adelaide, 1975, Australia.
- [6] Newman, E. I., 1976. Water movement through root systems. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 273, 463~478.
- [7] Tyree, M. T. et al., 1986. Detection of xylem cavitation in corn under field conditions. *Plant Physiol.* 82, 597~599.
- [8] Canny, M. J., McCully, M.E. 1988. The xylem sap of maize roots. Its collection, composition and formation. *Aust. J. Plant Physiol.* 15, 557~566.