

不通过髓心的树木圆盘年轮直径测定方法

张 宁 刘琪璟* 孟盛旺 周 华 刘文慧

(北京林业大学林学院省部共建森林经理重点实验室, 北京 100083)

摘 要 树干解析是测树学的基础技术,在森林生物量和生产力的测算上起着不可替代的作用。传统树干解析树木直径的测定方法是测量每个圆盘东西、南北两条直径线上每年(或龄阶)的直径,取两个方向同一年(或龄阶)直径的平均数作为测定结果。由于横断面为绝对圆形的树干很少,且髓心常常偏倚,使用传统方法测量的年轮直径往往小于真实直径,造成树木材积与生物量的低估。本研究对传统树干解析圆盘年轮的测定方法进行了改进,提出了不通过髓心的树木圆盘几何直径测定法,并制定了测定规则,以期减少个体测定差异,使测量值最大限度地接近真实值。使用不同方法对圆盘的年轮直径进行了测定,通过比较圆弧度、逼近度指数,证明了本方法较传统方法更为准确。本方法原理简明,易于操作,具有较强的实用性,对于提高森林蓄积量和生物量的估算精度具有重要意义。

关键词 几何直径;生理直径;髓心偏倚;年轮;轮宽

A non-through-pith method for tree stem analysis. ZHANG Ning, LIU Qi-jing*, MENG Sheng-wang, ZHOU Hua, LIU Wen-hui (*Key Laboratory of Forest Management, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*).

Abstract: Stem analysis is the most fundamental technique in forest mensuration. The traditional method for measuring diameters of tree rings is to average two geomagnetic directions (south-north and east-west) passing through the pith, which are perpendicular to each other. Since disks are usually eccentric, biomass or section area estimated by diameters passing through the pith can be significantly underestimated in general, which has been ignored in the past. This old-style method has never been challenged in dealing with accuracy. A new method, tested by digital photo technology, for getting individual ring diameters more close to the real diameters, was proposed in this paper. The line representing diameter of a ring was not necessarily set through the pith, rather on a subtense close to the real diameter. The ring diameters of the disks were measured by using different methods for accuracy comparison. It is proved that this method is more accurate than the traditional one tested by circularity index and closeness index. The method is easier for operation compared with the traditional one, which is expected to reduce the uncertainty in the measurement of tree growth as well as forest productivity.

Key words: geometric diameter; physiological diameter; stem eccentricity; tree ring; tree ring width.

树干解析是测树学的基础技术,从单株到样地、区域尺度的林木生长量或生产力的测算,都是以单木生长测定为基础的(成子纯,2002;李燕等,2010;李海奎等,2012;马武等,2015)。准确测定树木的生长过程不仅对估算森林蓄积量、生物量(Nojd *et al.*,

2008)、评价森林经营活动效果具有重要意义(Mörling *et al.*, 1999; Cao *et al.*, 2008),在树木年代学研究中也有重要的应用价值(Kozlov *et al.*, 2004)。

圆盘直径的测定是树干解析的关键环节。传统圆盘直径的测定方法为在横断面(圆盘)上按照东西、南北两个互相垂直的方向逐年或按龄阶测量通过髓心的直径,取其平均值作为测定结果(Avery *et*

al.,2002;孟宪宇,2006;Laar *et al.*,2007)。这种方法一直沿用至今,看似成熟,却存在不合理的地方,因为在多数情况下,即使是标准圆形的树干,髓心也常常是偏倚的,即髓心不位于圆盘的几何中心,通过髓心的直径往往小于真实直径。这在估算立木生长过程时会产生较大误差,而由个体尺度转换到林分或更大尺度时由于误差传递而导致的误差累计则会更大(刘琪璟,2008)。但这一问题却从未有人质疑,教科书中也没有给出明确的解决方法。

为了获得可靠的测定结果,对于髓心偏倚或形状不规则的树木圆盘,通常是增加方向测定直径,使其平均值更接近真实值(Newton,2004),但是真实值往往难以获得,而且这种方法会增加工作量。最近20年,照片测量技术的快速发展,为准确获得圆盘上各年轮的面积、周长等参数提供了便捷的手段(刘琪璟,2008;白星雯等,2013),这为树干解析提供了有利条件。本文提出了一种不通过髓心测定年轮直径的新方法,并利用照片处理技术进行精度检验。该方法不仅容易操作,还可以降低髓心偏倚圆盘的测定误差。

1 方法原理

1.1 传统方法

传统树干解析年轮直径的测量方法为测定通过髓心的东西、南北两个方向的各年(或龄阶)直径。在此称通过髓心的直径为生理直径,而作为几何平面圆本身的直径称为几何直径。当圆盘为标准圆形且髓心位于几何圆心时,生理直径即为真实直径。本文将真实直径定义为根据闭合年轮所包围的面积反推出的直径。由于测树学将偏心定义为不满足“通过髓心的任意2条弦的长度都相等”,所以只要年轮不是标准的同心圆,均属于偏心。由此可知,所有的椭圆形圆盘均为偏心(刘琪璟,2009)。实际上,髓心偏倚的圆盘占多数,尤其是靠近树干基部的圆盘,这是基部圆盘承受了更多的应力的原因(来自倾斜摇摆等)。在这种情况下通过髓心的东西、南北两个方向的直径平均值小于真实直径,其误差大小取决于偏心程度。假设圆盘为标准圆形但髓心在东-西和南-北方向上均有偏倚(图1),根据直径是同一圆中最长的弦可知,圆盘两个方向的生理直径小于真实直径。以 d_1, d_2, \dots, d_6 表示使用传统方法测定的不同年份直径,可以发现随着年龄的增大,生理直径与真实直径的偏差也越来越大。

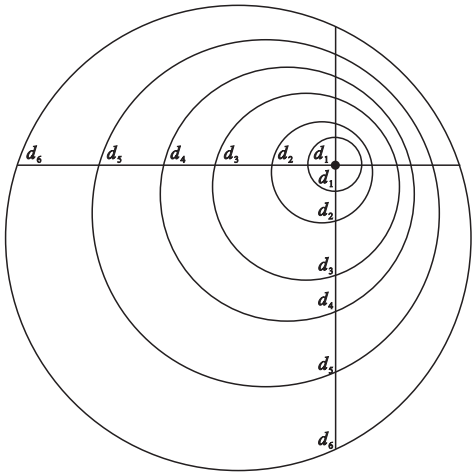


图1 传统方法直径测量示意图
Fig.1 A diagram showing the traditional way of tree disk measurement
该图几何形状为标准圆形,两个方向的生理直径均小于几何直径。

1.2 不通过髓心的几何直径测定法

与通过髓心的传统直径测量方法相反,本研究提出的新方法叫做不通过髓心的几何直径测定法,简称几何直径法。下文中的几何直径均指使用几何直径法测定的结果,而生理直径均为使用传统方法测定的结果。基本原理是无视髓心的位置,选取两条互相垂直的最大直径,以最大直径为基准,测定各年轮的直径(图2)。下面介绍具体测定方法。

(1)确定测定方位:在圆盘上取两条相互垂直的最大直径,划线,称之为控制线。当树干断面为标准圆形时,控制线的方向可以任意确定。

(2)确定测定位点:从中心第一个年轮的两侧(指第一个年轮与控制线平行的最大直径的两个端点。由于第一个年轮往往很小,用肉眼即可确定两侧的位置,即使基准线夹角的顶点位于髓心对其他年轮的测定结果影响也不大。)到控制线端点(即控制线与最外侧年轮的交点)划直线,称之为基准线。一条控制线对应二条基准线,形成未闭合的三角形。当控制线通过髓心时,控制线即为基准线。

幼树阶段,由于树干倾斜产生的应力很小,所以靠近髓心部分的年轮往往不偏心,这些年轮构成同心圆。这部分年轮的直径可以直接通过髓心测定(定义为中心生理直径)。余下年轮的测定可活用本方法,即基准线从最外侧的同心圆直径两侧分别连接控制线的两端,从而使基准线、控制线和中心生理直径,共同组成一个不规则四边形,而不是三角形(图3)。这样可以进一步提高精度,保证靠近髓心的年轮直径与实际值完全一致。

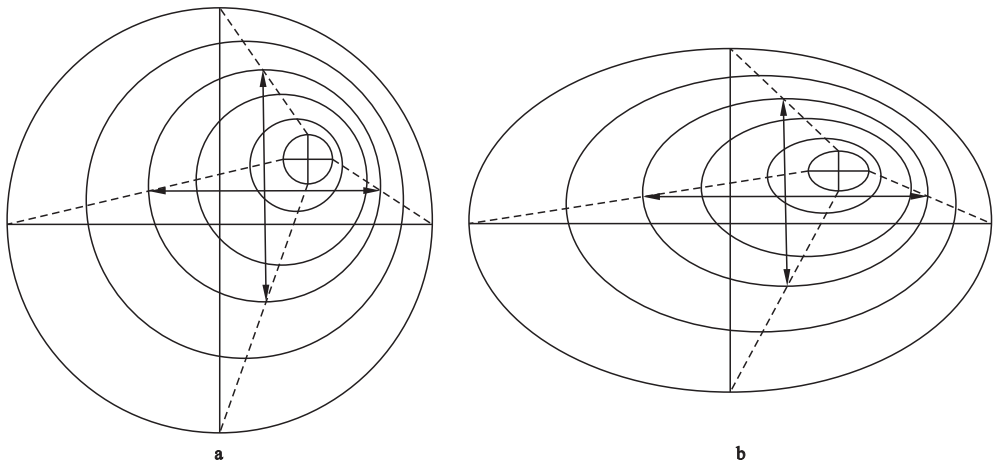


图 2 几何直径法测定圆盘直径的原理

Fig.2 A diagram showing the principle of geometric method for measuring annual ring diameters

a.圆形,b.椭圆形;纵横 2 条实线为控制线,即相互垂直的最大直径;虚线为基准线,即过控制线端点与中心第一个年轮两侧点的两条线段,每条控制线分别与对应的两条基准线构成不规则四边形;箭头线表示测定的各年直径端点(本图为从中心向外第 4 轮)。

(3)测定直径:每个年轮与两条基准线各有一个交点。在一个顶点未闭合三角形中的两条基准线上,测定同一个年轮的两个交点之间的距离(两点之间的连线不一定和控制线平行),就是对应年轮的直径。

(4)用上述方法测定另一个方向的各年轮直径,最后取两个方向的直径平均值。需要注意的是,靠近髓心的一轮直接测定其真实直径作为几何直径。

1.3 最大直径的确定方法

绘制控制线时,需要选取两条互相垂直的最大直径。确定最大直径的方法根据圆盘形状的不同而不同,下面举例说明。

(1)若树干断面为圆形,则最大直径的方向可以任意确定,只需保证两条直径互相垂直即可。

(2)若树干断面为较规则的椭圆,则椭圆的长轴短轴即为最大直径的位置。若树干断面为较不规则的椭圆(图 4a),则保证至少有一条直径线穿过髓心,或最大程度接近髓心,使该条直径为圆盘直径的最大值,另一条直径为其垂直方向的最大值。将这两条直径分别定义为此类圆盘的长径和短径,相当于椭圆的长轴和短轴。

(3)若树干断面不规则(图 4b),事先使用直尺测量实物圆盘的多个方向并求平均,选出直径符合平均值的位置,做好标记。这个位置即为其中一条直径线的位置。保证另一条最大直径与其垂直。

为了更加清晰直观,均以髓心作为由控制线与基准线形成的闭合三角形顶点(图 4、图 6)。而实际情况是,基准线的起点在第一轮年轮的两侧。

2 模拟圆盘

为了便于分析和说明,绘制了一个模拟圆盘(图 5),年龄为 6 a,年轮均为标准圆形,但髓心偏倚。首先绘制一条通过圆盘几何中心(不通过髓心)例如东西方向的测量线,即控制线。这条线的长度即为模拟圆盘最外侧年轮的几何直径或真实直径(形状为标准圆形的圆盘几何直径等于真实直径),然后绘制基准线。两条基准线与所有的年轮均相交。在同一年轮环上与基准线相交的两个交点之间的距离即为该年份直径的长度。例如,AB 即为第五年年轮的直径。南北方向直径的测定方法与此相同。同一年轮两个方向的直径平均值即为该年年

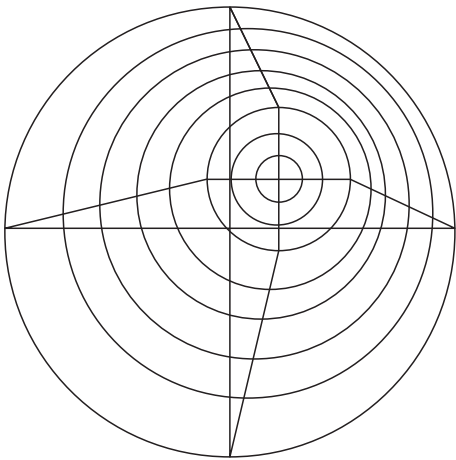


图 3 中心生理直径示意图

Fig.3 A diagram showing the central physiological diameter

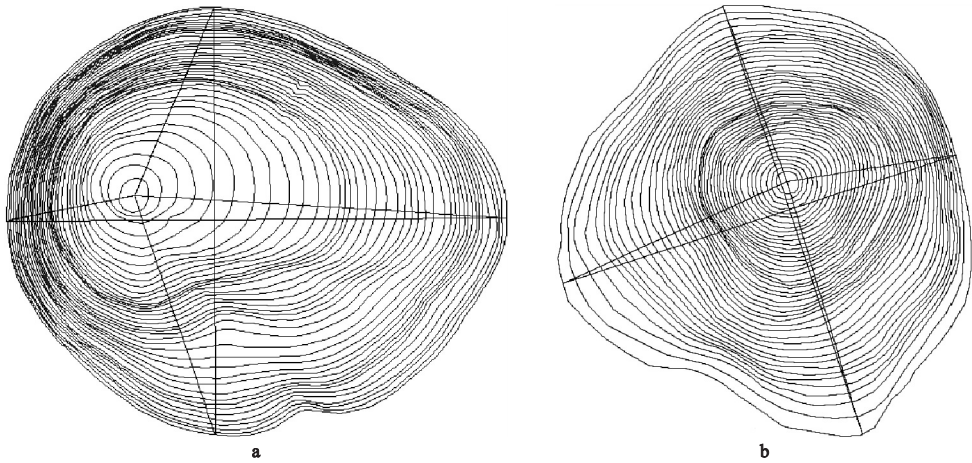


图 4 圆盘确定最大直径示意图

Fig.4 A diagram showing the method to determine the maximum diameter of disk

a.树干断面形状为较规则的椭圆,b.树干断面形状不规则。

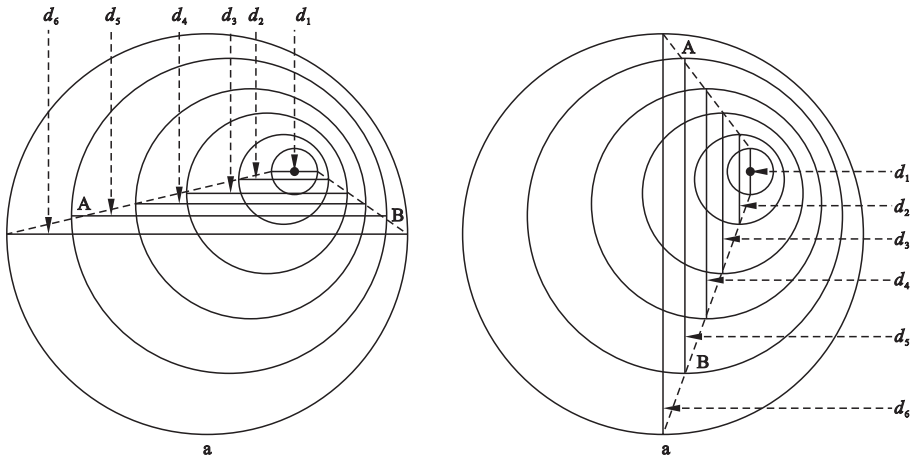


图 5 使用几何直径法测定模拟圆盘直径

Fig.5 A diagram showing the geometric method for measuring annual ring diameters

Left: east-west direction Right: north-south direction

a.东西方向,b.南北方向;最长的实线为通过几何圆心的控制线(也是最外侧年轮的真实直径),连接控制线两端和髓心的虚线为基准线; $d_1 \sim d_6$ 为使用本文提出的方法测定的直径。

轮直径。弦长 d_1 为第一轮年轮的几何直径。

使用传统方法与几何直径法对模拟圆盘年轮直径进行测定。使用本文提出的几何直径法得出的逼近度指数(下文说明)均为 1.00,而使用传统方法得出的逼近度指数为随着直径的增大而减小,最小值为 0.92 (表 1)。

3 实例验证

3.1 圆形度

圆形度(circularity index)是指多边形的面积与相同周长的圆形面积的比值,这一比值可以衡量圆盘面积与等周长的圆面积的偏离程度,其公式为:

$$C_i = 4\pi A / C^2$$

式中, C_i 为圆形度指数, C 为多边形的周长, A 为多边形的面积。标准圆的圆形度为 1,而其他任意多边形的圆形度均小于 1(如正方形的圆形度 \approx

表 1 测量值与真实值以及逼近度指数
Table 1 Closeness index of diameters between measured and real values

年龄 (a)	真实直径 (cm)	生理直径 (cm)	几何直径 (cm)	逼近度指数 生理直 径法	逼近度指数 几何直 径法
1	0.8	0.8	0.8	1.00	1.00
2	2.5	2.4	2.5	0.96	1.00
3	4.3	4.2	4.3	0.98	1.00
4	5.9	5.6	5.9	0.95	1.00
5	8.2	7.6	8.2	0.93	1.00
6	10.7	9.8	10.7	0.92	1.00

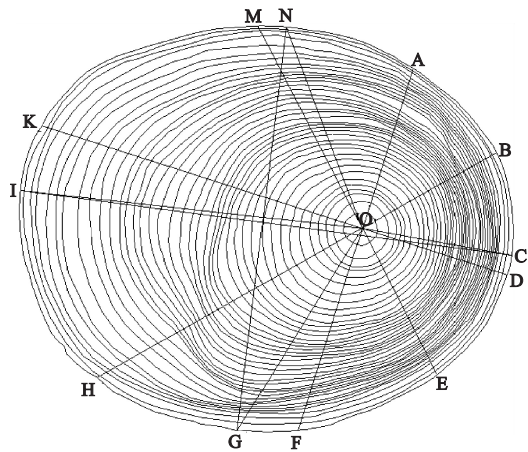


图 6 利用图像处理软件测定直径的示意图
Fig.6 A diagram showing different methods for measuring annual ring diameters with image processor

0.785, 正三角形的圆形度 ≈ 0.605) (Cook *et al.*, 1991)。同一年轮的周长围成不规则多边形面积小于该年轮围成圆形的面积, 圆形度越接近于 1, 说明多边形越饱满, 即更接近圆形。

3.2 逼近度指数

逼近度指数 (closeness index) 表达的是测定值与理论值的一致性。在本文中定义为使用不同方法测定的直径与由面积推导出的真实直径之比。其公式为:

$$C_i' = D_i / D$$

式中, C_i' 为逼近度指数, D_i 为使用不同方法测定的直径结果, D 为根据面积反推出的真实直径。

3.3 圆盘实例直径的测定

以一个 39 年生的针叶树基部圆盘为例。将圆盘扫描后使用遥感图像处理软件对年轮进行矢量化。如图 6 所示, AF 为南北方向通过髓心的直径, KD 为东西方向通过髓心的直径 (AF、KD 为生理直径), ME 为 AF 逆时针旋转 45° 后通过髓心的直径, BH 为 KD 逆时针旋转 45° 后通过髓心的直径, IC 为不通过髓心的最大直径, NG 是与 IC 垂直的最大直径 (IC、NG 为几何直径)。连接 OC、OI、ON、OG, 即可得到与各年轮的交点坐标, 通过计算便得到对应

直径。本文共选择了 6 个不同形状的圆盘进行测定, 测定结果类似, 图 6 是其中之一。

表 2 中年龄代表圆盘从内向外的年轮数。各年轮面积、周长是从软件上读取的像素值转换后的测量结果; 直径 1 是由南北、东西两个方向上求得直径的平均值, 也就是传统方法计算得到的直径, 直径 2 是将南北、东西方向的直径各逆时针旋转 45° 后, 使用同样的方法求算的直径, 其意义在于说明传统方法求算直径的不确定性, 即变换方向测定的结果会有差异。其中 π 取值为 3.14。

图 7a 为圆盘从第 1 年分别使用传统方法与几何直径法测定的结果, 图 7b 为 20 a 之后部分的放大显示。可以直观地看出: 使用传统方法测定的生理直径在树木年龄增大时明显小于真实直径, 尤其是 20 a 以后, 误差更为明显。而使用几何直径法测定的直径与真实直径一致性较高。即对于该圆盘来说, 传统方法测定的直径随着树木年龄的增加误差增大, 而几何直径法的测定结果在树木年龄增大时也较为准确。

4 精度分析

共选择 6 个圆盘 (包括上文提到的针叶树圆盘, 代表不同形状) 分别使用不同的方法测定圆盘年轮直径。圆盘的直径 25 ~ 34 cm 不等, 年龄在 27 ~ 45 a。6 个圆盘的形状和年轮均不规则。使用遥感图像处理软件对所有年轮进行矢量化, 共有 229 个年轮。利用 SPSS 19.0 在 0.05 显著水平下对真实直径和几何直径、真实直径和生理直径分别进行配对样本 *t* 检验, 结果显示 (表 3), 几何直径与真实直径差异不显著 ($P > 0.05$), 但生理直径与真实直径差异显著 ($P < 0.001$)。经计算, 真实直径、几何直径、生理直径的均值分别为 15.58、15.57 与 15.25 cm。比较三者均值发现, 使用几何直径法测定的直径绝对误差仅为 0.01, 相对误差为 0.04%。而使用传统方法直径绝对误差为 0.33, 相对误差为 2.10%。分别计算几何直径法和传统方法的残差平方和, 前

表 2 使用不同方法测定年轮直径结果
Table 2 Diameters measured with different methods

年龄 (a)	年轮面积 (cm ²)	年轮周长 (cm)	真实直径 (cm)	圆形度	几何直径 (cm)	直径 1 (cm)	直径 2 (cm)
1	2.8	5.98	1.88	0.98	1.81	1.84	1.89
2	8.0	10.09	3.19	0.99	3.03	3.15	3.19
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
39	525.5	82.21	25.87	0.98	25.74	24.65	24.85

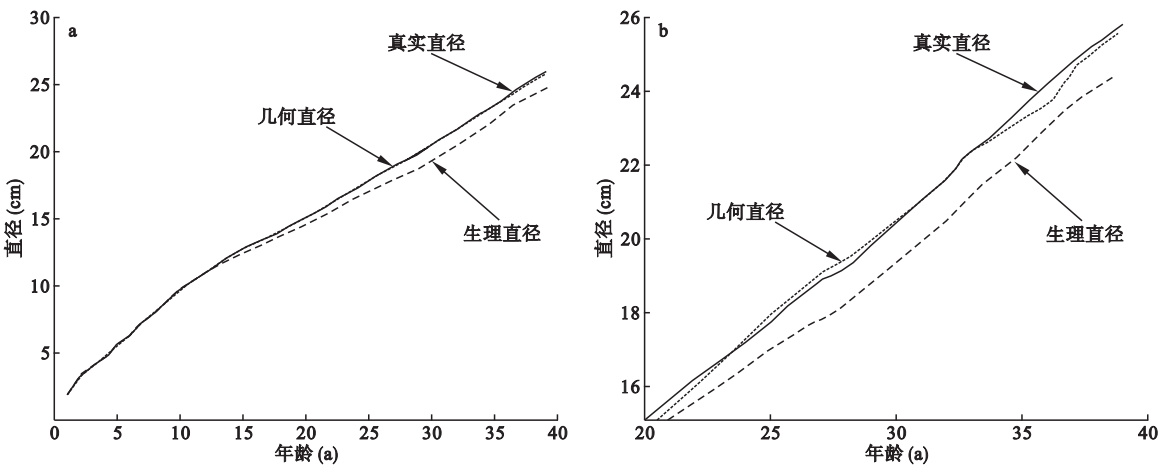


图 7 不同方法圆盘直径测定结果示意图
Fig.7 Annual ring diameters measured with different methods

者为 14.61,后者为 65.41,后者是前者的 4.5 倍。由此可知,本文提出的几何直径法比传统直径法更精确。下面以不同指标分别说明不同方法的精度。

4.1 圆形度

对 229 个年轮的圆形度进行计算,结果显示(图 8),所有年轮的圆形度均小于 1,表明年轮均非标准圆形。圆形度随着直径的变化而变化,多数年轮的圆

表 3 真实直径和几何直径、真实直径和生理直径配对样本检验
Table 3 Paired samples test of real diameter and diameter measured by different methods

配对样本	t 值	自由度 df	显著性 P(双侧)
真实直径-几何直径	0.334	228	0.739
真实直径-生理直径	11.990	228	<0.001

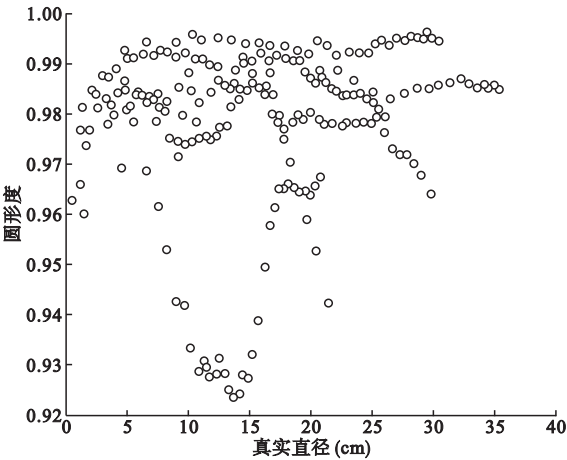


图 8 年轮圆形度分布图
Fig.8 Circularity distribution of annual rings in relation to diameter
年轮均非标准的圆形,表现为年轮的圆形度均小于 1。

形度在 0.97~0.99,有的甚至低于 0.93。从本文使用的样品看,年轮在早期趋向于饱满,随着树木年龄的增大,圆形度趋向降低。圆形度越低,年轮越不圆满,生理直径越小于真实直径。这意味着使用传统方法测量树木外侧直径时误差越大。由于圆形度大小不等,生理直径小于真实直径的程度也不同。

4.2 逼近度指数

不同方法测定值的逼近度指数绘制散点图如图 9,逼近度指数越接近于 1,说明测量值越接近于真实值。在 229 个年轮中,有 194 个(占 84.7%)生理直径低于真实直径;而几何直径只有 135 个(占 59.0%)低于真实直径。逼近度指数在 0.99~1.01 之间的生理直径为 88 个(占 38.4%),而几何直径为 112 个(占 48.9%)。此外,逼近度指数低于 0.95 的生理直径有 39 个,而几何直径仅有 2 个。甚至有一个年轮的生理直径的逼近度指数接近 1.20。而几何直径逼近度指数最大仅为 1.06。说明几何直径法的精度更高。

4.3 轮宽误差与断面积误差

年轮宽度为相邻两个半径之间的差值。几何轮宽与生理轮宽的误差绝对值之和分别为 5.47 与 5.58 cm,说明使用传统方法与几何直径法测得的直径轮宽差异不明显(图 10)。

断面积离差指测得的直径求算的断面积与圆盘真实断面积之差。当直径小于 7 cm 时,两种方法计算结果差异不大。但随着直径的增大,两种方法的差异也增大。传统方法计算的断面积误差,绝对值超过 20 cm²的年轮有 47 个(占 20.5%)。而使用几何直径法只有 8 个年轮(占 3.5%)超出了这个水平。

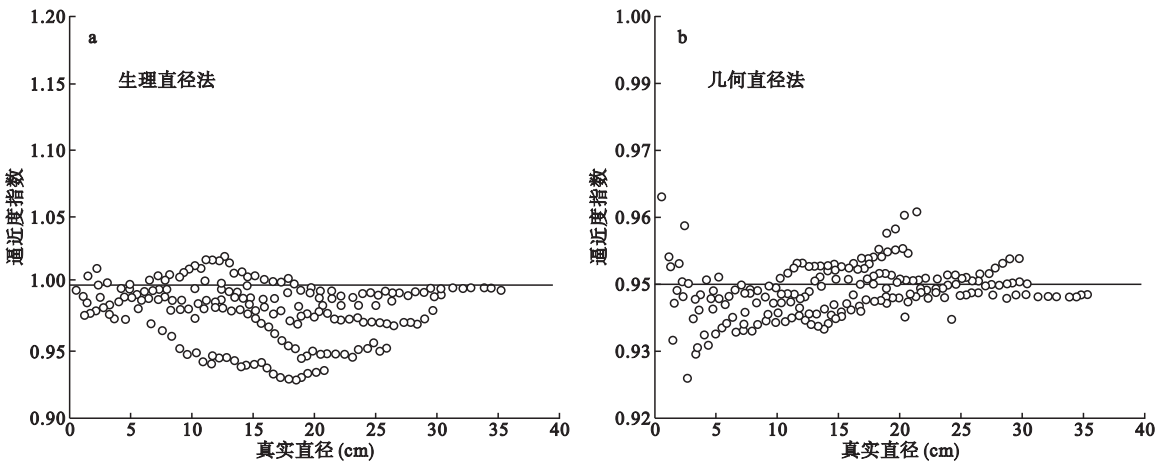


图 9 使用不同方法测定年轮直径的逼近度指数
Fig.9 Closeness indexes of diameters measured with different methods

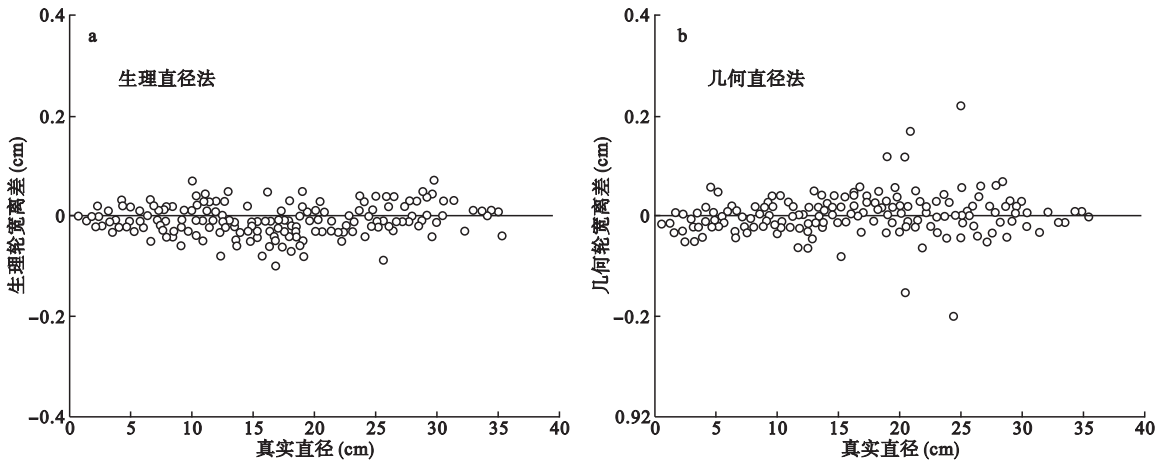


图 10 不同方法测得的轮宽误差
Fig.10 Biases in annual ring width measured with different methods to real ring widths

使用几何直径法计算的断面积误差绝对值不超过 10 cm² 的有 196 个 (占 85.6%) 年轮, 而传统方法为 150 个 (占 65.5%) 年轮 (图 11)。

若将每一年轮视为单独的个体, 229 个年轮断面积之和为 55984 cm²。传统方法断面积总误差的绝对值为 2412.1 cm², 几何直径法误差的绝对值为 1200.2 cm², 前者为后者的二倍。直观上, 直径轮宽误差并不显著, 但断面积误差显著, 是因为直径经过平方后, 误差被放大的原因。这表明, 大径阶的直径测量即使是微小的误差也会引起森林蓄积量或生物量估算的巨大误差。

5 讨 论

本文介绍了一种树干解析过程中测量直径的新方法, 即不通过髓心测定几何直径。经检验, 该方法有效地提高了圆盘年轮的测定精度, 从而减少了森

林生长量或生产力测算的不确定性。此外, 本方法更容易操作, 具有一定的实用价值。

(1) 直径测定的精度。树干解析技术虽然已经有 200 年的历史, 但由于年轮形式不规则, 其精度问题一直未能得到解决。使用生理直径计算林分蓄积量或生长量时, 往往会造成低估。本文提出的几何直径法可以有效地提高年轮直径的测定精度, 该方法尤其适用于髓心偏倚的圆盘。圆盘的离心率越大, 该方法越有效。对于圆形以及椭圆形的圆盘来说, 由于本方法在选择测定位置时有明确的规则, 不会因为操作者的不同而引起较大的差异。此外, 本方法解决了年轮密集区域直径难以测量的问题。对于大多数圆盘, 特别是标准圆形但偏心的圆盘, 至少可以保证最外层年轮的直径和实际值完全一致 (即零误差)。这样可以进一步提高精度, 保证靠近髓心的年轮直径与实际值完全一致。

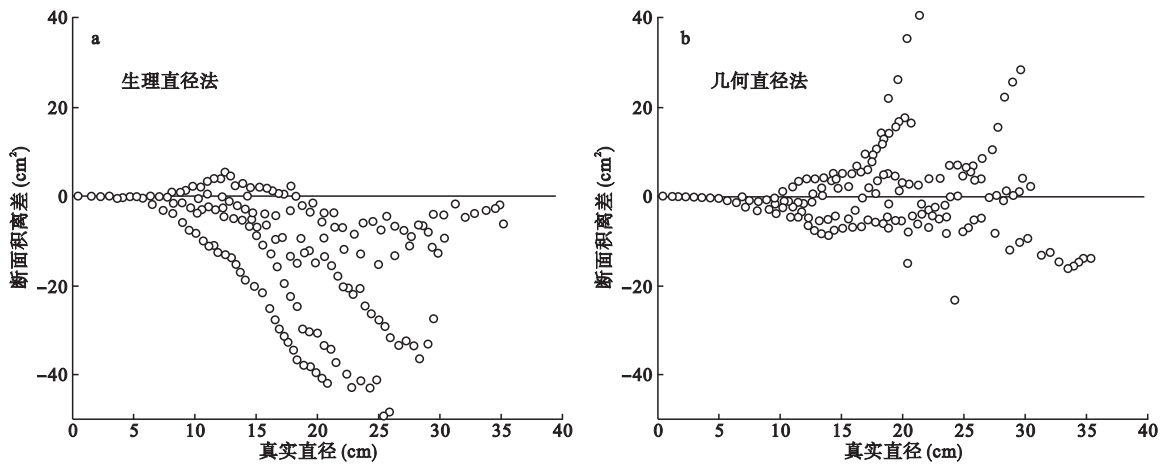


图 11 不同方法断面积差值

Fig.11 Biases in section area with different methods

由于试验样品的偏心程度不同,测定结果的统计学差异也会不同,但在任何情况下,采用几何直径法测定的结果都更接近真实值。是否要统计学上的差异显著程度作为选择方法的依据,取决于研究内容和目的。对于年轮研究,一般要求年轮宽度的绝对差异或误差在 0.01 mm 以下,而对于分析林分生长量或生产力,直径只是一个中间变量或自变量,需要检验的是最终变量或因变量的差异情况。所以,只要方法对精度有所提高,就值得采用。

(2)测定直径方向的选择。传统方法主要使用东西、南北方向直径的平均值作为测定结果,即使圆盘为椭圆形也依然使用这一方法。根据方向测定直径的意义是为了研究树木生长的方向变异特征及其与环境因子的关系。但是,年轮宽度的非对称生长是由树木倾斜导致的 (Fritts *et al.*, 1976; Schweingruber *et al.*, 1997; 李广起等, 2011), 而与太阳方位无关。即基于方向的年轮直径生长量并不能解释树木的生长过程与环境因子之间的关系,而且方位信息在实践中很少使用,林业工作者更加关注的往往是树木个体的生长过程,以此为林分相关指标的测定与分析提供依据。因此,在选择最大直径的测定方向时地磁方向因素可以忽略,而提高年轮直径的测量精度才是评价树木生长过程的关键或先决条件。值得注意的是,本文所说的不通过髓心是指在髓心偏倚的情况下,两条直径的交点无需穿过髓心,并不是指任意一条直径都不可以穿过髓心。使用本方法测定圆盘直径时,其中一条直径通过髓心是很普遍的现象。

(3)数字测量技术的优势。树干解析技术是测树学的最重要的技术之一,在目前乃至今后的一定时间之内仍将发挥不可替代的作用 (李永儒, 2006)。传统树干解析技术耗时、耗力,而且圆盘样品占据空间,难以久存。采集照片后,以照片替代实物,可利用图像分析软件将圆盘图片放大,便于对模糊的年轮进行准确判定。圆盘照片还可以记录测量过程,将年轮的矢量化文件保存在圆盘上,方便随时核对检查。

(4)展望。测树学是林业科学的基础,其中树干解析是森林测量的重要环节。在数字技术出现以前,树干解析工作完全依靠普通的直尺进行测定,有特殊要求时可以采用立体显微镜测定。但这些传统的方法耗费时间,因为真值很难获取,精度也往往难以评价。数字技术的迅速发展,给测树学的方法带来了革命。比如,通过采集照片可以替代实物圆盘;照片分析不仅可以获得真值,还可以对不同方法的精度进行比较。未来,通过数字图像开展树干解析工作将成为测树学的主要手段。医学领域使用的 CT 影像技术可以用于非破坏性采样,获取更高精度的数字圆盘。但最有发展前途的技术,将仍然是可见光扫描成像及其分析测定,即照片测量将在测树学中发挥越来越重要的作用。在个体尺度上,地面激光雷达扫描技术会向着更加实用的方法发展,特别是扫描的海量数据的处理技术。航空激光雷达在提取林木参数(冠幅、胸径等)上也具有广阔的发展前景。此外,无人机技术的改进,也将为林木参数的提取提供有效的方法。

参考文献

- 白星雯, 徐 罗, 李树滨. 2013. AutoCAD 在解析木圆盘数字照片中的应用. 林业资源管理, (2): 145–148.
- 成子纯. 1981. 树干解析的误差及其修正方法的研究. 林业科学, (4): 443–448.
- 李广起, 白 帆, 桑卫国. 2011. 长白山红松和鱼鳞云杉在分布上限的径向生长对气候变暖的不同响应. 植物生态学报, **35**(5): 500–511.
- 李海奎, 宁金魁. 2012. 基于树木起源、立地分级和龄组的单木生物量模型. 生态学报, **32**(3): 740–757.
- 李 燕, 张建国, 段爱国, 等. 2010. 杉木人工林生物量估算模型的选择. 应用生态学报, **21**(12): 3036–3046.
- 李永儒, 曹艳杰. 2006. 树干解析实用技术的探讨. 内蒙古林业调查设计, **29**(1): 63–65.
- 刘琪璟. 2009. 树干解析中圆盘直径及树皮断面积精准测定的方法. 生态学杂志, **28**(6): 1194–1200.
- 马 武, 雷相东, 徐 光, 等. 2015. 蒙古栎天然林单木生长模型研究——Ⅲ. 单木枯死模型. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, (4): 59–64.
- 孟宪宇. 2006. 测树学. 中国林业出版社.
- Avery TE, Burkhardt HE. 2002. Forest Measurements. New York: McGraw-Hill Press.
- Cao T, Valsta L, Härkönen S, *et al.* 2008. Effects of thinning and fertilization on wood properties and economic returns for Norway spruce. *Forest Ecology and Management*, **256**: 1280–1289.
- Cook ER, Kairiukstis LA. 1991. Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences. *Arctic and Alpine Research*, **23**: 245–251.
- Fritts HC. 1976. Tree Rings and Climate. London: Academic Press.
- Kozlov V, Kisternaya M. 2004. Architectural wooden monuments as a source of information for past environmental changes in Northern Russia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **209**: 103–111.
- Laar AV, Akça A. 2007. Forest Mensuration. Netherlands: Springer.
- Mörling T, Valinger E. 1999. Effects of fertilization and thinning on heartwood area, sapwood area and growth in Scots pine. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **14**: 462–469.
- Newton PF. 2004. A stem analysis computational algorithm for estimating volume growth and its empirical evaluation under various sampling strategies. *Computers and Electronics in Agriculture*, **44**: 21–31.
- NoJd P, Henttonen HM, MaKinen H. 2008. Increment cores from the Finnish National Forest Inventory as a source of information for studying intra-annual wood formation. *Dendrochronologia*, **26**: 133–140.
- Schweingruber FH. 1997. Tree Rings and Environment: Dendroecology. Vienna: Paul Haupt Publishers.

作者简介 张 宁,女,1991年生,硕士研究生,主要从事植被遥感研究。E-mail: 729541733@qq.com
责任编辑 张 敏
