

作物根系形态观测方法研究进展讨论

廖荣伟 刘晶淼

(中国气象科学研究院生态环境与农业气象研究所, 北京 100081)

摘要 介绍了根系观测中的主要方法,侧重介绍目前作物根系研究中较为常用的观测方法——微根管法(Minirhizotron),讨论和分析了根系观测方法的优缺点。指出从气象预报业务需要的角度出发,根系观测有助于订正陆面模式中地下基本参数获取不准确给模拟结果带来的误差,提高区域小气候预测的准确率,更加深入地研究地气相互作用,掌握天气变化规律。通过对国内外一些根系研究情况的回顾与分析,指出科研人员在野外试验中选择具体方法时应基于特定的研究目的或者特定的科学条件,需要对各种方法的适用条件有所了解,并在这些条件下进行分析比较,选取适宜的观测方法。最优的根系研究方法要根据研究目的和研究条件来确定,对于具体的研究,往往需要采用不只一种方法。

关键词 根系 观测方法 微根管

引言

作物根系对于作物的生长发育和产量形成具有极其重要的影响,但由于作物根系隐藏于地下,人们对根系的了解,是一个从自发认识到自觉研究的过程。特别是随着根系形态、生理以及生态方面研究的深入开展和研究手段的不断改进,人们对作物根系作用的认识不断深入。根系不仅仅是一个吸收器官,而且是作物地上与地下各部分物质及信息交换的系统之一。并且,作物根系在其生长发育过程中也可以合成氨基酸和其他生命活性物质,从而保证了整株作物生长发育的正常进行。此外,根系还是作物品种的基本特性之一,还可以作为对土壤化学、物理等环境的综合指标,以及作物生长发育壮弱的衡量指标等^[1]。根系吸水能力的强弱对作物产生的影响也能改变下垫面气候特征,改变地表、土壤水循环系统,改变气象要素日变化的幅度^[2]。研究根系,有助于了解作物生长地区的大气降水、温度、湿度、风速及蒸散发等参数信息;有助于细致地考虑植被在地气相互作用中的重要性,并通过对比下垫面气象要素的差异,掌握天气变化规律;有助于更加精确地获取气象基本要素,改进和发展高分辨率的天气、

气候预报模式,并对未来气象要素的精细预报有一定的参考意义^[3]。近几十年来,研究人员在开发陆面过程模式的同时,逐步将土壤-植被-大气系统作为一个整体,且在研究土壤-植被-大气连续系统中,根系的观测研究是重要的环节之一。

要科学地理解作物生产,就必须全面地认识作物根系发育、根群分布、不同生育时期根系吸收水分养分的活力,以及不同环境条件下的根系变化^[4],就必须对根系进行研究。研究了解根系的结构分布和动态生长规律具有相当难度。一百多年来,人们所使用的大部分方法都对地下根系或多或少的具有破坏性,如何寻找和使用实用性强、便于操作的根系研究方法在实际应用中显得尤其重要。但是,建立这样的方法仍然是当前农业科技领域中的一大难题。因此,为了解决农业科技领域中的这一大难题,急需破坏性小、快速、便于观察作物根系的结构形态并能对根系进行精确测量的技术。本文拟从目前作物根系形态观测研究中的基本方法的介绍入手,对根系观测中存在的问题进行总结,并提出展望。

1 根系形态观测方法的研究进展

1.1 根系观测的起源

18 世纪初期人们开始比较系统的根系研究工

国家科技部“大型科学仪器协作共用及升级改造”项目和“大型植物根剖面观测系统改造升级”项目联合资助

作者简介:廖荣伟,男,1981年生,硕士研究生,助理工程师,从事水文气象研究,Email:lion1222@hotmail.com

收稿日期:2007年8月8日;定稿日期:2007年8月21日

作,首次使用挖掘技术,测定根长及根重量。19世纪后半叶,根系研究得到重视,研究人员对根系吸收作用有了一定的认识,研究方法仍然以挖掘法为主。20世纪前半叶,研究人员运用生态学方法,建立专门的根系研究设施,对根的发生、生长、外界条件等关系进行了比较深入的探讨^[1]。进入20世纪50和60年代,不少研究人员开展了大规模、全面深入、细致的根系研究,并取得了显著的成绩。特别是随着光学和微电子技术的发展,根系观测研究进入一个崭新阶段。CCD(Charge Coupled Device,电荷耦合器件)技术的不断成熟,并配合计算机使得微根系微根管观测技术实现了数字化;运用计算机软件控制观测,根系的观测方法实现了自动化。近年来国际上一些专业仪器设备公司,开始生产专门的仪器设备,以低破坏的方法快速、准确地测量根系生长及分布状况。如美国CID公司的CI-600根系生长监测系统;Bartz公司开发的微根管观测系统^[5];澳作生态仪器有限公司开发的Win/Mac RHIZO根系图像分析系统;加拿大的ET-100根系生态监测系统^[6]。

1.2 根系观测的进展

1937年Bates^[7]提出微根管法观测微根系生长。通过在土壤中钻若干个孔,把玻璃管压入孔内,使用绑有镜子和灯泡的杆插入管中,利用反光镜观测根系,并结合素描记录图像,实现根系观测。1978年,Sanders^[8]使用光学照相机在微根管中实现了植物根系观测,然后通过截线法测定了图像中的根长。1983年,Upchurch等^[9]在微根管中使用黑白摄像机进行地下根系的观测,发现在地表20cm以下观测的根长密度与实测结果相关性较好。此后,Jurgen Bauhas和Christian Messier^[10]发明了一套简便的观测方法评估微根系测量结果的准确性,此方法可运用到其它根系观测结果的检验,较为实用。

2000年,Patea George等^[11]使用小型电脑系统开发低成本的观测软件,用于观测花生根系发育情况,获取根系的参数信息。Carlos Costa等^[12]采用扫描原理观测并分析玉米的根系动态特征。吴长高等^[13]将计算机视觉技术应用于根系形态分析,建立了根系形态参数测定及根构型分析系统,实现了根系形态参数的快速准确测量与分析。2001年,Keith T. Ingram等^[14]发展了一种全新、准确、快速的从数据图像测量根系长度的软件RMS,对于微根

系的测量工作意义重大,可以节约大量时间。2002年,周本智等^[15]利用微根管(Minirhizotron)技术监测了火炬松新根系的生长动态,并发现施肥对新根生长没有明显的影响。

2003年,胡秀娟等^[16]在植物根部埋设透明管,以CCD摄像系统为图像采集系统,通过透明视窗拍摄到根部的图像,并由此知道根部的动态变化。2004年,罗锡文等^[17]采用XCT(X-Ray Computed Tomography,计算机断层)成像技术实现植物根系原位形态构型的定性观察和定量测量,并对成像技术、介质成分和根系类型等影响根系成像质量的主要因素进行系统分析,但是图像噪声较严重,需要对图像作进一步处理。刘九庆^[18]利用透明管、CCD摄像系统和计算机组成根系监测系统,获取根的长度、根的分布密度等动态特性;设计基于线阵CCD^[19]的便携式微根系微根管监测分析系统,实现了计算机控制观测深度、环管壁全景观测图像自动采集。2005年,中国科学院植物研究所的白文明等^[20]从微根窗系统的组成、微根窗管的安装、微根窗图像的收集及微根窗数据的利用等几个方面进行了概述,阐述了在微根窗使用和操作过程中需要注意的几个问题。2006年,东北林业大学的史建伟等^[21]对微根管进行实际操作,并通过水曲柳和落叶松细根观测的实例介绍了使用微根管在细根周转过程研究中的应用。向子云等^[22]借鉴多层螺旋CT技术,利用多层螺旋CT机对植物根系进行扫描和三维成像,并对获得的植物根系图像进行对比分析。张志山等^[23]用微根管观测柠条根系生长动态,并与土钻法进行比较,发现了微根管观测根系具有明显的优势。2007年,周本智等^[24]介绍了微根管技术的诞生和应用,认为微根管技术是观测研究植物根系较为理想的工具。

2 根系形态观测方法

现有的根系观测方法通常分成取样和测量两步进行^[16]。要求取得的根系是完整的,至少涉及研究目的的主要根系不能残缺;还应保持其在土壤环境中的原状不变形,要求采样工作快速而准确;根系研究中另外一个关键性的工作就是对根系的有关参数进行准确的测定。

近几十年来,为了弄清植物根系在土壤中生长与分布的真实情况,人们研究出了多种根系的观测

方法。这些方法归结为:①田间直接取样方法^[25],如挖掘法^[4]、整段标本法^[26]、土钻法^[27,28]、剖面法^[25]等;②直接观察法,如装有玻璃壁的剖面^[1]、根系室^[29]、微根管观测^[4]、分根移位法^[1]等;③间接观测方法,如土壤水含量的变化法^[25]、染色技术法^[25]、非放射性示踪物吸收法^[30]、放射性示踪法^[25]、土壤注射法^[31]、植株注射法^[30]、同位素测定法^[25]等;④其他方法,如容器法、多孔膜技术、钉板法、雾培法、管栽法、网袋法等^[32~34]。

2.1 田间直接取样方法——挖掘法

挖掘法又称为脉络法^[25],是将用于研究的作物根系直接从土壤中挖出,然后将其洗净,选择需要的部分,最后进行测量。这种方法因为简单、易行、直观性强,所以得到了广泛应用。但是其对根系的损伤特别大,据统计有30%的根系在清洗的过程中脱落,这样就降低了实际测量的精度和可靠性,而且在每次测量时都必须将根系挖出,既损伤了作物,又限制了研究内容和范围,使得同一作物生长全过程观测无法成为现实。

2.2 直接观察法——分根移位法

分根移位法^[1]是以保证作物地上部分的稳定生长为前提条件,将不同类型根或不同节位根与其它根分开并引到别处培养,从而观察局部根与整体植株之间的关系。这种方法便于清楚地观察分离出的根系,能分期分时研究根系的数量变化,可以获得准确的根系信息。但是其丧失了自然环境的试验条件,而且容器壁处影响了根系的生长,同时需要查验初、次生根发展及作用的动态变化,对水肥等条件依赖较大,操作费时费力。

2.3 间接观测方法

2.3.1 同位素¹⁴C研究根系

同位素¹⁴C应用于根系是生态学研究比较新的方法^[25],它是通过在密闭空间内对植物叶片提供¹⁴CO₂,让植物进行光合作用,经过一段时间后,再制取土柱原状样品,将冲洗后得到的根系样品进行X光放射性显影,得到完整的根系分布影像,最后对得到的影像进行分析,并通过测得的根系长度与显影测得的长度进行比较,以计算样品中的活根百分率。这种方法具有灵敏度高、样品制备简单、测定方便、可靠易行、费用低等优点,也可以区分活根和死根。但是根系在显影板上平放时的分布不均匀,交叉过多会降低测量的准确性^[1]。

2.3.2 植株注射法

植株注射法主要是从作物茎基部注入放射性元素(如³²P、⁸⁶Rb),经过一定时间,在根系分布区的一定部位,制取土壤根系样品,并对根系样品进行示踪物检测,可分析根系的放射性元素含量并作为土壤中活根群数量的指标。这种方法通常适用于一年生作物。⁸⁶Rb要放射 γ 射线,应用时无需对土壤根系混合样品进行500℃条件下的灰化,而应用³²P却相反。⁸⁶Rb的半衰期18.7天,³²P的半衰期14.3天,它们的衰变速度较快,对大田的危害性较小。但此方法不能反映根系在特定时间内从土壤剖面吸取营养物质的能力,应用不当会对环境造成污染^[25,34]。

2.4 其他方法

2.4.1 容器法

容器法是在根箱法的基础上,根据多年的根系研究而研制的一种根系研究法^[34]。具体操作是将作物限制在较小的范围内生长,从而保持根系的完整性,主要用来研究根系形态学、生物化学、生理学、根系生态学。它可以通过各种因素的不同配合,获得有关单个环境因素或多个环境因素对根系生长的影响,容器大小可以根据试验目的来决定。这种方法对试验中的生长条件易于控制,便于生长条件一致的重复试验,能迅速获得相关的特殊研究资料,操作方便,是禾本科作物的重要研究手段。但是其失掉了自然环境的试验条件,而且容器壁处根系密集,影响了根系的生长^[32]。

2.4.2 网袋法

网袋法是1991年Steen^[35]首先采用的,它是在每个小区内按试验要求依对角线设置样点,在点上先插入外筒,挖去筒内泥土,然后将套有尼龙网袋的内筒插入外筒中,将内筒填满泥土,最后依次抽出内筒和外筒。每点按规格种植作物,并竖杆标记。取样时先将地上部收割,然后从设置的样点上相间地将尼龙袋连同作物根系带土取出,冲净泥土,获得较完整的根系,最后进行根系参数测定。这种方法的优点是可以直接在大田里进行试验操作,所获取的根系样本具有较好的普遍性和代表性。

3 微根管系统

微根管法于1937年首次由Bates^[7]提出应用于微根系生长研究,并在土壤中真实地或通过图像

记录一般难以接近的植物根系生长情况^[36]。目前,一个典型的微根管系统是由一个插入土壤中的微根管、摄像机、标定手柄、控制装置和一台计算机组成^[37~39]。

微根管是一种破坏性较小、定点原位野外观察细根生长动态状况的方法^[39],利用微根管方法可以在多个时段对根系进行原位重复观测^[40,41],克服了仅依靠对根系进行物理取样所带来的诸多缺陷^[42,43],其最大优点是在不影响根系生长过程的前提下,长期监测某个根系片断或单个根系生长发育的变化趋势;用来详细研究根系的生长、死亡和物候等特征,对生态系统地下部分生产力估计及根系吸水模型的建立非常有效^[44,45],是估计生态系统地下碳分配和碳平衡研究的有效方法^[46]。这项技术目前已广泛地应用于草地、农作物、果园、沙漠植物和森林等人工或自然植物群落的根系研究中,因而被认为是作物根系观测研究进程中的一个重要里程碑^[36]。

(1)微根管的安装。微根管观察根的部分一般由插入根区中的透明玻璃或塑料管组成。常用的有圆形管、方形管、膨胀管和压力板管,并且不同材料的管对根系的生长状况影响是不同的^[21]。微根管一般由树脂玻璃、丁酸盐纤维素(CAB)、聚碳酸脂、丙烯酸树脂或玻璃制成,其材料的选择主要基于成本和实用性来考虑^[22]。常用的安装方法是用钢钻挖一个与微根管直径接近的洞,并钻到需要的深度后,然后将微根管插入洞中。微根管安装的角度范围比较大,可水平、垂直或与水平地面成 10° 、 15° 、 22° 、 30° 、 35° 、 45° 、 60° 等角度放置在土壤中,根据文献资料统计,大多数微根管安装是与土壤垂直方向成 30° 或 45° 角^[20]。最后,安装的微根管还必需固定。微根管安装完成以后,管与土壤之间需要一段时间的平衡期,以减少管对观测数据的影响。

(2)根系图像采集。早期的微根管观测系统只能实现肉眼观察。研究者采用事先安装于微根管中的潜望镜来观察土壤中微根系生长的动态过程,后来经逐渐改进,又安装袖珍放大镜以放大微根系图像,配以袖珍相机,拍照记录微根系的生长动态过程。在此基础上已开发出的观测手段包括根系潜望镜^[47]、根系内窥镜^[48]、光学孔径检查仪^[49]、光学照相机^[8]、照明镜^[50]和小型彩色摄像机^[51],并配备录像带或计算机进行自动摄像以观察微根系生长的动

态过程。图像采集的时间间隔需要针对不同的试验目的来确定,间隔范围包括1周、2周、4周、6~16周或更长的时间,选择合适的采样间隔对于研究目的的精确性非常重要。土壤温度的变化将影响根系的生长发育状况^[52],过慢的图像采集速度会造成管内温度升高,改变根系生长状况。因此,减少摄像头在管中的观测时间,有利于提高测量的精度。

4 数据利用与分析

(1)根长。交叉法^[1]测量根长具体计算公式为: $R = \pi NA / 2H$ ^[1],式中 R 是总根长(cm), N 是根系与非常纤细的线段之间的交点, A 是矩形面积(cm^2), H 是在矩形面上所有线段的总长度(cm)。另一种表达式: $R = 11/14 \times N \times \text{网格单位}$ ^[25],式中 N 是根系与垂直和水平直线的交叉点数,直线之间的间距为网格单位。

(2)根长密度。运用观测到的根数量(包括与观测窗相交而不能测量根长的根)来计算微根管所占据单位土壤体积内的根长期望值: $R_v = E_f N_a / A_a$ ^[53],式中 R_v 为单位体积根长密度($\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$), N_a 为观察到的根数, A_a 为观察到的微根管图片面积(m^2), E_f 为理论转换系数($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$),不同植物转换系数不同。或运用观察到的根长除以微根管图片面积与微根管到周围土壤的距离的乘积: $R_v = L / (AD)$ ^[54],式中 L 为在微根管图片中观察到的根长(m), D 是微根管到周围土壤的距离(m), A 为观察微根管图片面积(m^2)。

(3)生物量密度。如果知道确切的根长或每克根系生物量的根长,那么按体积计算的根长密度可以转换成生物量密度: $B_v = \sum (R_{vi} / S_i)$ ^[39],这里 B_v 是按体积计算的根系生物量密度($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), R_{vi} 指第 i 级根系直径的体积根长密度($\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$), S_i 指第 i 级根系直径的根长($\text{m} \cdot \text{g}^{-1}$)。

(4)周转率。体积根长密度(R_v)或根生物量密度(B_v)在每次微根管取样时能够作为细根现存量的估计值,所以每次取样得到的根长密度的差值总和用于估计细根的生产或周转,也可以转换为根生物量密度来表示。

地下生物量周转率的计算主要有以下两种方法^[55]:①在掌握较多数据的情况下,可用公式: $D_j = Y_j [1 - \exp(-K_j T_j)]$, $M_j = Y_j + 1 - Y_j + D_j$, $P_j = X_j + 1 - X_j + M_j$,其中 Y_j 为 j 间隔开始时死根生

物量, Y_{j+1} 为 j 间隔结束时死根生物量, X_j 为 j 间隔开始时活根生物量, X_{j+1} 为 j 间隔结束时活根生物量, D_j 为 j 间隔的根分解量, M_j 为 j 间隔的根死亡量, P_j 为 j 间隔的根生产量, K_j 为 j 间隔的根分解速率常数, T_j 为间隔的时间。 $P = \sum_{j=1}^n P_j$, $M = \sum_{j=1}^n M_j$, $D = \sum_{j=1}^n D_j$, $R = P/M$, P 为根年生产量, M 为根年死亡量, D 为根年分解量, R 为地下生物量的周转率。也可用公式: $T = P/Y^{[21]}$, 式中 T 为细根周转率(次/年), P 为细根年产量(年长度产量或年生物量产量), Y 为活细根现存量的平均值(平均长度或平均生物量)。②如果获取的数据较少,则可用以下公式:地下生物量周转率=(地下生物量年内最大值-一年内最小值)/地下生物量年内最大值。

5 根系观测技术分析讨论

本文对于作物根系观测研究所需的技术方法进行了讨论,并对国内外一些根系观测的研究情况进行了回顾与分析,可以为以后类似的研究提供一个基础的技术框架。

通过根系观测方法对作物根系的观测研究,可以了解根系的形态特征、生理功能、生长发育规律,获取根系调控技术,是具有重大的理论和生产实践意义的。开展根系观测研究,并结合气压、温度、湿度、风速的同期数据,一方面可以填补陆面过程模式中对下垫面状况有影响的地下基本参数的空白,订正由于缺乏基本资料对区域小气候预测造成误差;另一方面可以为栽培技术的创新提供某些技术储备和理论依据,通过采取相应的技术措施,可以培育出健壮、适宜的作物地下系统,从而促进地上部分健壮生长,最终为实现作物优质、高产、高效奠定坚实基础。同时,根系生态研究对于节水农业也具有重要的现实意义。

各种根系观测方法都有其优缺点,选择适合研究的方法可以使试验做得更为精确。从目前研究中的使用情况分析,根系生长发育情况的观测主要采用挖掘法和微根管法观测,而从观测方法的精确性、便利性分析,微根管法被认为是目前观察根系功能和生长发育动态情况的较好方法。随着根系研究的进一步深入,微根管观测技术的不断改进,此种方法将成为获得作物根系物候学知识最合适的研究方

法,它能够长期监测某个根系片断或单个根系生长发育的变化趋势,可以用来详细研究根系的生长、死亡和分解等特征。它具有的优势:①这种方法对根系的损伤相对其它方法是最小的;②利用这种方法可以实时并长期监测根系的生长发育状况;③可以准确估计出根的长度、根的分布密度以及根的动态参数特性;④在研究根系周转率、生命周期和分解速率等方面也具有优势。

6 前景展望

作物根系观测是需要继续发展且具有广阔前景的课题。依靠根系观测获得的作物根系参数信息,经过数值化处理,可以建立作物根系的三维立体化模型。借助于根系形态观测系统对植物根系进行的定性观察和定量研究,可以构建植物根系图像分析系统,在农业气象科研领域具有重要意义。微根管法或CT成像法获得的根系图像,通过运用植物根系图像分析系统进行分析,提取图像中的根系参数信息,并总结已有的根系建模经验,结合长时间的连续动态信息,所得出的根系模拟结果会更加符合实际根系生长发育的动态变化情况,其成果能广泛运用于业务、研究。

随着全球气候变化研究的深入开展,植被群落的根深和分布是区域尺度和全球尺度气候模型中的必要参数,植被根系与土壤耦合,水量与能量耦合,可以从物理基础上去描述蒸散发、土壤水传输、产汇流等陆面水文过程,以减少参数率定所带来的不确定性^[2]。根系观测所获取的资料,可以提高水文循环的蒸发、土壤含水量、径流深等数据的准确性,在陆面过程模式当中,虽已考虑到了根系对模式的影响,但由于根系观测模拟技术的滞后性,多采用浅层的根系模拟技术代入土壤模式中,对土壤及植被的变化产生的入渗能力的变化考虑较少,导致蒸散发等参量的计算不准确。因此,准确观测并模拟更深层次根系的技术成为当前根系研究的重要问题。提高陆面过程模式考虑下垫面参数时的精度,有助于进一步改进传统模式,提高天气、气候的预测准确率。

本文介绍的观测方法很难完全满足某些具体研究的需要,故只能作为备选参考。最优的观测方法要根据研究目的和研究条件来确定。对于具体的研究,往往需要采用不只一种方法,选择最适合当前情

况的方法组合,才能得到最佳的试验结果。

我国应用根系观测法研究作物根系正逐步深入,希望研究者能从国内外的研究经验中得到启发,避免根系研究过程中的失误,从而进一步推动我国作物根系生态系统的研究向前发展,为气象、农业、水文、生态等科研领域做出贡献。

参考文献

- [1] 马元喜. 小麦的根[M]. 北京:农业出版社,1999.
- [2] 曹丽娟,刘晶森. 陆面水文过程研究进展[J]. 气象科技, 2005, 33(2):97-103.
- [3] 娄德君,李治民,孙卫国. 夏季不同下垫面气象要素的对比分析[J]. 气象科技,2006,34(2):166-169.
- [4] Weaver J E. Root Development of Field Crops[M]. New York: McGraw-Hill Book Company,1926.
- [5] Johnson M G, Meyer P. Mechanical advancing handle that simplifies minirhizotron camera registration and image collection [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27: 710-714.
- [6] 杨国梁,张光年,葛庆平,等. 计算机视觉技术在植物根系形态研究中的应用[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2006,27(1):18-23.
- [7] Bates G H. A device for the observation of root growth in the soil [J]. Nature, 1937, 139:966-967.
- [8] Sanders J L, Brown D A. A new fiber optic technique for measuring root growth of soybeans under field conditions [J]. Agronomy Journal,1978,70:1073-1076.
- [9] Upchurch D R, Ritchie J T. Root observation using a video recording system in Minirhizotron [J]. Agronomy Journal, 1983,75:1009-1015.
- [10] Bauhus J, Messier C. Evaluation of fine root length and diameter measurements obtained using RHIZO image analysis [J]. Agronomy Journal, 1999,91:142-147.
- [11] Patea G, Ingram K T. Digital acquisition and measurement of peanut root minirhizotron images [J]. Agronomy Journal, 2000,84:78-86.
- [12] Costa C, Dwyer L M, Hamilton R I. A sampling method for measurement of large root systems with scanner-based image analysis [J]. Agronomy Journal,2000,92:621-627.
- [13] 吴长高,罗锡文. 计算机视觉技术在根系形态和构型分析中的应用[J]. 农业机械学报, 2000, 31(3):156-160.
- [14] Ingram K T, Leers G A. Software for measuring root characters from digital images [J]. Agronomy Journal, 2001,93:918-927.
- [15] 周本智, Sword M A, Chamber J L, 等. 利用 Minirhizotron 技术监测火炬松新根系的生长动态[J]. 林业科学研究, 2002,15(3):276-284.
- [16] 胡秀娟,汤晓华. 植物根系图像监测分析系统的设计[J]. 林业机械与木工设备,2003,11(2):24-25,28.
- [17] 罗锡文,周学成,严小龙,等. 基于 XCT 技术的植物根系原位形态可视化研究[J]. 农业机械学报,2004,35(4):104-106,133.
- [18] 刘九庆. 植物根系图像监测分析系统的设计[J]. 东北林业大学学报,2004,32(4):78-79.
- [19] 刘九庆,汤晓华,陈健,等. 基于线阵 CCD 植物微根系图像监测分析系统[J]. 林业科学,2005,41(3):121-124.
- [20] 白文明,程维信,李凌浩. 微根窗技术及其在植物根系研究中的应用[J]. 生态学报,2005,25(11):3076-3081.
- [21] 史建伟,于水强,于立忠,等. 微根管在细根研究中的应用[J]. 应用生态学报,2006,17(4):715-719.
- [22] 向子云,罗锡文,周学成,等. 多层螺旋 CT 三维成像技术观测植物根系的实验研究[J]. CT 理论与应用研究,2006,15(3):1-5.
- [23] 张志山,李新荣,张景光,等. 用 Minirhizotron 观测柠条根系生长动态[J]. 植物生态学报,2006,30(3):457-464.
- [24] 周本智,张守攻,傅懋毅. 植物根系研究新技术 Minirhizotron 的起源、发展和应用[J]. 生态学杂志,2007,26(2):253-260.
- [25] 张喜英. 作物根系与土壤水利用[M]. 北京:气象出版社,1999.
- [26] Hamilton D, Clum G. Crown and root development in oats as related to lodging [J]. Agricultural Science, 1951, 65: 307-310.
- [27] Welbank P J. Root growth of cereal crops [R]. Rothamsted Report for 1973, part 3:26-65.
- [28] Drew M C, Saker L R. Assessment of a rapid method, using soil cores, for estimating the amount and distribution of crop roots in the field [J]. Plant and Soil,1980,55:297-305.
- [29] Taylor H M, Wilatt S T. Utilization of rhizotron in root research [C]. Journal paper J-9770 of the Iowa Agriculture and Home Economics Experiment Station, 1970:447-457.
- [30] Fox R L, Lipps R C. A comparison of stable strontium and ^{32}P as tracers for estimating alfalfa root activity [J]. Plant and Soil, 1964,30:205-214.
- [31] Pearson R W. Significance of rooting pattern to crop production and some problem of root research [C]// Carson E W. Plant Root and Its Environment, Charlottesville. USA,1974: 247-270.
- [32] 伯姆. 根系研究法[M]. 北京:科学出版社,1985.
- [33] 毛达如. 植物营养研究方法[M]. 北京:中国农业大学出版社,1994.
- [34] 程建峰,潘晓云,刘宜柏. 作物根系研究法最新进展[J]. 江西农业学报,1999,11(4):55-59.
- [35] Steen E. Usefulness of the mesh bag method in quantitative root studies [M]// Atkinson, D. Plant Root Growth: an Ecological Perspective. Cambridge: Cambridge University Press,1991:75-86.
- [36] Brown D A, Upchurch D R. Minirhizotron: A summary of

- methods and instruments in current use [M]// Taylor H M. Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics. Wisconsin, American Society of Agronomy Inc, 1987: 15 - 30.
- [37] Vamerali T, Ganis A, Bona S, et al. An approach to minirhizotron root image analysis [J]. *Plant and Soil*, 1999, 217:183 - 193.
- [38] Patena G, Ingram K T. Digital acquisition and measurement of peanut root minirhizotron images [J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92:541 - 544.
- [39] Johnson M G, Tingey D T, Phillips D L, et al. Advancing fine root research with minirhizotrons [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 45:263 - 289.
- [40] Cheng W, Coleman D C, Box J E. Root dynamics, production and distribution in agroecosystems on the Georgia Piedmont using minirhizotrons [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1990, 27:592 - 604.
- [41] Crocker T L, Hendrick R L, Ruess R W, et al. Substituting root numbers for length; improving the use of minirhizotrons to study fine root dynamics [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23:127 - 135.
- [42] Fogel R. Root turnover and production in forest trees [J]. *Hort Science*, 1990, 25:270 - 273.
- [43] Hendrick R L, Pregitzer K S. The demography of fine roots in a northern hardwood forests [J]. *Ecology*, 1992, 73: 1094 - 1104.
- [44] Kage H, Kochler M, Stützel H. Root growth and dry matter partitioning of cauliflower under drought stress conditions; measurement and simulation [J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20:379 - 394.
- [45] Majdi H. Root sampling methods-applications and limitations of minirhizotron technique [J]. *Plant and Soil*, 1996, 185:255 - 258.
- [46] Hendrick R L, Pregitzer K S. Applications of minirhizotrons to understand root function in forests and other natural ecosystems [J]. *Plant and Soil*, 1996, 185:293 - 304.
- [47] Richards J H. Root growth response to defoliation in two A gropyron bunchgrasses: Field observations with an improved root periscope [J]. *Ecology*, 1984, 64:21 - 25.
- [48] Van Noordwijk M, de Jager A, Floris J. A new dimension to observations in minirhizotrons: A stereoscopic view on root photographs [J]. *Plant and Soil*, 1985, 86:447 - 453.
- [49] Withington J M, Elkin A D, Bula j B, et al. The impact of material used for minirhizotron tubes for root research [J]. *New Physiologist*, 2003, 160:533 - 544.
- [50] Bragg P L, Govi G, Cannell R Q. A comparison of methods, including angled and vertical minirhizotrons, for studying root growth and distribution in a spring oat crop [J]. *Plant and soil*, 1983, 73:435 - 440.
- [51] Hendrick R L, Pregitzer K S. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forests [J]. *Nature*, 1993, 361:59 - 61.
- [52] McMichael B L, Burke J J. Temperature effect on root growth [C]// Waisel Y. *Plant Roots: The Hidden Half*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker. 1996:383 - 396.
- [53] Merrill S D, Upchurch D R. Converting root numbers observed at minirhizotrons to equivalent root length density [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58:1061 - 1067.
- [54] Taylor H M, Huck M G, Klepper B, et al. Measurement of soil-grown roots in a rhizotron [J]. *Agronomy Journal*, 1970, 62:807 - 809.
- [55] 宇万太, 于永强. 植物地下生物量研究进展[J]. *应用生态学报*, 2001, 12 (6): 927 - 932.

Progresses in Methods for Observing Crop Root Pattern System

Liao Rongwei Liu Jingmiao

(Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081)

Abstract: A review is made of the main methods for observing root systems, with emphasis on the minirhizotron method used widely, and the relative merits are discussed. It is pointed out that from the needs of weather forecasting, root system observation can be used to correct the errors in land surface models resulted from the lack of the essential parameters of land processes, to improve the accuracy of regional microclimate prediction, study air-ground interaction, and grasp the regularity of weather variation. The research achievements at home and abroad are reviewed, and it is pointed that while selecting observation methods, the purposes and scope of a study should be considered fully, and any method has its own limitations. Before making a decision, it is necessary to understand the applicable conditions of a method, and made comparison carefully. Maybe the optimum solution is to use more than one methods.

Key words: root system, observation methods, minirhizotron