

作物根活性格局及其在农田科学管理中的应用²⁰

孙自永¹, 徐恒力¹, 朱锦旗^{1, 2}

(¹ 中国地质大学环境学院, 湖北 武汉 430074;

² 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018)

摘要: 综述了根活性格局的概念、测定方法及其在农田科学管理中的应用, 并对相关研究进行了展望。根的活性格局是根的功能学指标, 反映根系各个部位对其总体吸收能力的贡献大小; 它与活性根的格局在本质上存在着区别, 与根的形态格局常具有不一致性。在根活性格局测定方法中, ³²P 土壤注入法应用最为广泛, 土壤水分消耗法主要限于干旱半干旱地区。根活性格局在农田科学管理中的应用主要表现在: 在土壤-植物水分运移模拟中, 根活性格局对根系吸水能力的描述更为真实; 通过调查作物根活性的高值区和高峰期, 可确定施肥的最佳位置和时间; 利用不同作物根活性时空分布特点指导物种和种植方式的选择, 可实现作物在资源利用上的互补性, 发挥某些作物的安全网和营养泵功能。进行作物根活性格局的不同同位素示踪研究、建立各种常见作物物种的根活性格局数据库等工作还需进一步加强。

关键词: 根活性格局; 有效吸收空间; 土壤水分平衡; 施肥位置; 养分循环利用

中图分类号: S 36 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006) 01-0192-07

研究作物对资源的消耗规律, 制定合理的施肥和供水制度或种植方式, 进行农田的科学管理, 是实现精细农业和高效农业的必然途径^[1]。由于根系是养分和水分吸收的主要器官, 因此作物根系研究是实现农田科学管理的重要基础。但长期以来, 由于研究方法和工作条件的限制, 作物研究更多是集中在地上部分器官的发育和调控机制上, 对地下部分的研究远远落后于地上部分^[1, 2]。近年来, 随着根系研究方法的不断发展及高新技术在根系研究中的应用^[3~5], 对作物根系的研究也在不断深入。这些研究涉及到根系特征、分布、动态变化、竞争、环境因素对根系生长的影响、根系吸收水分和养分的模拟等^[6~8], 但总的来说多集中在根的形态学研究上^[2, 7], 对于根的活性及活性格局等功能学指标的研究相对较少。由于国内对于根活性格局及其研究方法的介绍极少, 本文在对国内外研究进行重点综述的基础上, 讨论了根的活性格局及相关概念, 总结了根活性格局的测定方法, 对其在农田科学管理中的应用进行了介绍和评述, 并提出了将来需要开展或进一步加强的工作。

1 根的活性与根的活性格局

根的活性(root activity) 是反映根吸收养分和

水分能力大小的一个指标; 与根的活性相对应的一个指标是根的活性比(root activity ratio), 即同一根系中两个不同部位所吸收的养分或水分数量的比值; 如果将根系任一部位所吸收的养分或水分数量都与根系某一部位或整个根系所吸收的养分或水分数量相比, 则可得到同一标准下根的活性比分布形式, 即为根的活性格局(root activity pattern)^[9]; 某株植物根活性高值区所处的三维土体空间则称为植物的“有效吸收空间”(effective foraging space, ETS)^[9]或“根的吸收区”(absorption zone of roots)^[10], 在该空间中, 植物能获得它所需要的绝大部分养分和水分。根的活性和根的活性格局是综合性指标, 本身并不反映造成根吸收能力不同的原因, 而是反映根的类型、数量和根际微环境等各种因素造成的综合结果——根吸收能力的大小及差异。根的活性与活性格局也是根的功能学指标, 其中根的活性格局反映了根系各个部位对其总体吸收能力的贡献大小。

根的活性这一术语虽然被频繁使用, 但在测定时往往又以根的丰度指标(如细根的根长密度、活性根的数量等)来代替它^[11]; 根的活性格局也常常被等同于活性根的格局(pattern of active roots)^[9]。事实上, 尽管根的活性来源于活性根(active root)或吸

²⁰收稿日期: 2005-01-17

基金项目: 国土资源部 2000 年科技专项计划“西北地区水资源与可持续利用”(200010303)

作者简介: 孙自永(1978—), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 主要研究方向为生态地质学与根生态学。E-mail: zysun@2003.cug.edu.cn

收根(又称营养根, feeder root), 其大小与细根的生产量、周转率和代谢能力有一定相关性^[9], 但它反映的是根实际吸收养分或水分的能力大小^[12], 而根实际吸收养分或水分的能力不仅取决于有吸收能力的根的数量, 而且与这些根的类型和根际微环境有关, 因为不同类型的活性根吸收能力常常存在着差异, 甚至同一类型的活性根在不同的土壤微环境下吸收能力也可能各不相同^[13], 这就造成了根活性格局与根形态(如细根的根长密度或生物量)格局的不一致性^[12]。

2 根活性格局的测定方法

2.1 同位素示踪法

应用最广泛的同位素示踪剂是放射性同位素, 如³²P、³³P 和³⁵S 等^[4, 5, 14], 部分研究也使用在土壤中天然背景值较低的稳定同位素或稀有元素, 如¹⁵N、³⁴S、¹⁸O、⁸⁶Rb、Sr、Cs、Li 等^[5, 14~18]。

放射性同位素示踪法可分为植物注入法(plant injection method)和土壤注入法(soil-injection method)。植物注入法最早由 Racz 等提出^[4, 9], 原理是将放射性核素注入到植物体内, 待放射性标记物转移到根系后, 从植物周围不同侧向距离和深度处取出根-土样, 测定其中的放射性强度, 用各个位置所测强度的比值指示根活性比率。该方法只需对一株植物施用同位素就可获得任意位置处的根活性特征, 但由于标记物在植物体内的运移是非定向的, 实际分配到根系中只占一小部分, 有时标记物甚至只向上运输, 在根-土样中检测不到放射性^[4, 9], 这一缺点限制了植物注入法的应用。

土壤注入法由 Hall 等提出^[9], 现已广泛用于农作物和果树的根活性格局研究。该方法是一种无损伤方法, 其原理是选择生境条件和生长状况相似的多株同种植物, 对不同植物在其周围不同位置(垂向深度和侧向距离的组合)注入放射性标记物, 一段时间后取各植株地表器官(如新生叶片), 检测其中的放射性强度, 将各植株检测出的强度进行比较, 从而得出根的活性格局^[4, 9]。放射性同位素的选择对实验结果影响较大, 理想的示踪剂应该在土壤中迁移较慢, 以准确指示注入位置的根活性; 在植物体内的转移应较快, 以缩短试验周期和提高检测次数; 半衰期不能太短也不能太长, 否则都会影响检出率。³²P 是最符合上述条件的同位素, 所以其应用最为广泛^[19]。由于一棵植株只能用来检测一个深度的根吸收活性, 所以根活性格局研究需要用到多株试验植物, 即使能保证各试验植株的年龄、生长状况、生境

基本相似, 其根活性格局也存在着差异, 会对试验结果造成影响^[9], 为此, IAEA 提出了³²P/³³P 联合标记法: 对于所有试验植株, 在不同位置处放置³²P 示踪剂, 而在同一位置处放置³³P 示踪剂, 以植物叶片中³²P 与³³P 放射强度的比值指示³²P 注入位置处的根活性, 从而用³³P 对因植株差异而造成的试验误差进行统一校正^[9]。在该方法中, 同位素的放置方法、施放量、植物的取样、放射强度的检测方法、放射安全性等问题也都十分重要, IAEA 曾专门对这些问题进行过试验研究^[9], Wahid 也对这些问题进行了详细综述^[9]。

稳定同位素测定根活性格局的原理和方法与放射性同位素法类似^[5, 14~18]。尽管¹⁵N 检测精度较低、标记物昂贵而在试验中需求量又大^[4, 19], 但却适宜于长期试验且可指示作物根对氮肥的吸收活性^[18, 20]。Sr 的化学行为和吸收格局都与 Ca 非常相似, 常用来指示作物的根对钙的吸收活性^[15, 21]。由于作物对 Rb 与 K 在吸收途径上的相似性, 常用 Rb 来指示作物的根对钾肥的吸收活性^[22]。

2.2 土壤水分消耗法

作物对土壤养分的消耗量与根的活性是成正比的, 因此从理论上讲, 可根据不同土壤剖面上作物对养分的消耗规律推断根的活性格局^[23]。但在田间一般只能测得某一位置土壤养分的总变化量, 这一变化量是各种输出作用(处于该位置的根的消耗、向其它位置的渗漏、矿化转化等)和输入作用(其它位置向该处的渗漏、基岩风化、微生物分解等)的综合结果, 涉及到物理、化学和生化作用过程, 难以控制, 也很难将作物的消耗量单独分出, 因此用总养分或有效养分的消耗量确定根活性格局的研究很少^[12]。利用土壤水分的消耗量评价根活性格局也存在类似问题, 但土壤中水分的输入与输出易于控制和判断, 因此在一定条件下土壤水分消耗法可用来测定根的活性格局^[12, 24]。

依试验设计方式不同, 土壤水分消耗法又可分为两类: (1) 对于单种作物系统, 测定不同时期土壤各位置的水分含量, 据此计算某一时段内各位置土壤水分的消耗量, 将不同位置的消耗量相比较, 估计作物的根活性格局^[2, 4]。Kirkham 等使用中子仪和双探头热脉冲探测器(the dual probe heat pulse sensor)对美国堪萨斯州西南部玉米田和大豆田的土壤水分变化进行了连续监测, 推算出玉米和大豆的主吸收区, 发现与用小型根镜测得的根长密度高值区的时空分布是一致的^[23]。(2) 将指示物种单独栽培和与所研究物种混合栽培, 一定时间后测定两

种植方式下土壤含水量的分布形式,将其差值视为所研究物种的消耗量,推断其根活性格局^[25]。Dodd 等在美国科罗拉达州东北部矮草干草原上设计了 4 种样地:木本植物+草本植物、草本植物、木本植物、裸地,用中子仪对各组样地 0~1.8m 深度内的土壤含水量进行了长达两年的监测,通过对比确定了两种植物生活型的主吸收区,并用植物茎流水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的分析结果进行了验证^[26]。

许多学者曾对土壤水分消耗法的使用条件进行过讨论^[2, 4, 23, 27]。对于第一种方法,Blum 提出下述限制条件:除植物蒸腾以外,土壤水分基本没有任何损失;在两次测定之间基本无土壤水分的补给;土壤水分含量应保持在一定范围之内;土壤剖面应相对均匀,不能出现分层^[9]。对于第二种方法,在使用时应尽量保证对比样地间环境因子(如风速、空气湿度、温度等)和土壤剖面特征的一致性,以避免入渗率、蒸发率、排水率、土壤通气性和盐分含量等因子在不同样地间的差异而造成的试验误差^[9]。可以看出,这些限定是为了减少其它输入输出形式对土壤水分变动的干扰,使土壤水分的变动值接近于该处作物根系的消耗量。这些条件使得土壤水分消耗法多应用于干旱、半干旱地区^[23, 27, 28]。在干旱、半干旱区,地表如果有植被覆盖,水分蒸发损失远小于蒸腾量,即使没有植被覆盖,土壤表层往往形成干土层,可防止水分的进一步蒸发^[27];由于降水稀少,可以保证两次测定之间基本无土壤水分补给;使用中子仪和时域反射仪等土壤水分精密测定仪器,即使水分含量较低也能保证测定结果的灵敏性;至于土壤剖面的均匀性,Stone 等认为,当土壤含水量较低时,根对水分的吸收量远大于水分在不同层次间的运移量^[29],Kirkham 等也证明,在干旱条件下,如果是用于确定根的活性格局和主吸收区,而不是测定根的分布,则土壤剖面的非均匀性对土壤水分消耗法影响不大^[23]。

3 根活性格局研究在农田科学管理中的应用

3.1 土壤-植物水分、盐分运移模拟

在农田管理中,作物根的水分吸收是土壤水分平衡的一个主要方面,科研工作者已建立了大量的数学模型定量描述水分在土壤-植物中的运移规律^[1]。这些模型可分为两大类,第一类是 Gardner 提出的基于单根根系吸水的“微观模型”^[29];第二类是宏观模型,认为根系对土壤水分的吸收是由根区的各个点来完成的,忽略水分向单个根流动,避免了

几何学上的复杂性^[29]。无论哪一种模型,对于根系吸水项的处理都是模拟的关键^[30]。

现有的大多数应用模型,如 WaNuLCAS、Hypar 和 WIMISA,都假设细根的密度对水分的吸收起控制作用,用根长密度描述根的吸水能力^[31]。很多研究都已证明这种处理方法的不足^[32~36]。Clothier 等曾观察到成年苹果树能够根据环境变化调整自己的吸水策略:当表层水分的有效性降低时,对水分的吸收由近地表的根转向深层的根。Clothier 等据此指出,即使在根长密度不变的情况下,根的吸水能力也可能发生变异,并推断根对水分的吸收与其根长密度成正比有时是不可靠的^[33]。Hainsworth 和 Aylmore 也曾提到,随着距树干距离的增大,根-土间水势梯度逐渐减小,单位根长所吸收的水分将会减小^[34]。Green 和 Clothier 在对比土壤水分含量和根密度分布图时发现,虽然根密度随着离树干水平距离的增大并没有较大变化,但水分吸收量最大的地方却在树干周边^[35]。事实上,仅仅依靠根的形态分布来判断其吸水能力的分布格局在操作上也具有很大的局限性,因为根系形态分布的调查本身就是一件费时费力且破坏性较大的工作,不利于连续监测,而且目前还缺少有关不同类型的根吸收能力大小的资料,此外,从混合的根样中区分出某一物种的根,特别是草本植物的根通常是不可能的^[15]。

鉴于此,许多研究者都指出,田间水分模型的模拟精度与其对根系吸水能力描述的真实性和准确性密切相关^[34, 36, 37]。而根活性格局则描述了根系真实吸水能力的分布规律,为土壤-植物水分运移的准确模拟提供了可能:由实测的根活性格局可了解根系不同部位吸水量的相对值,与植物的蒸腾总量相结合,即可计算出根系不同部位实际吸收的水量。Jamieson 和 Ewert 在使用 AFRCWHEAT 2 模型对小麦需水量进行模拟时就没有对根长密度进行测量,而是用实测的水分吸收量来指示根的吸水活性^[37]。

另外,为了进行田间养分管理已发展了许多生物地球化学循环模型,这些模型在评价养分吸收时的精度与对根活性格局的真实描述也密切相关^[38]。

3.2 精确施肥和灌溉

确定不同作物的最佳施肥位置和施肥时间不仅能提高化肥的利用效率,减少资源浪费^[3],还可避免养分的渗漏和流失等造成的土壤、地下水以及湖泊、水库环境的污染^[39],因此始终是农田科学管理的重要研究内容^[40]。

精确施肥的传统研究方法是对比不同施肥方式

下作物的产量,从而推断最佳施肥方式^[9]。这种方法不但费时费力(对于果树几乎不可行),而且很难区分作物的高产究竟是所施化肥还是天然土壤养分的作用结果。随着根系研究方法的发展,由根的结果直接决定施肥方式已代替了传统方法。在同位素示踪技术应用于根系研究之前,通常是调查作物根系的分布形式,将根最密集的部分作为施肥区^[9]。

同位素示踪技术在根系研究中的应用使得作物根活性格局调查成为确定最佳施肥方式的主要方法^[5, 9, 41~49]。通过作物根活性格局研究可确定其有效吸收空间,由于作物对养分的吸收大部分在该空间内完成,在有效吸收空间内施肥可以实现资源的高效利用^[9],Zinati 曾用¹⁵N 示踪法研究甜菜的根活性格局,确定了对其施肥的最佳深度^[49]。不同物种不仅其有效吸收空间的位置不同,而且吸收的高峰期在时间上也可能各不相同,通过根活性格局动态变化的研究,可判断植物吸收的高峰期,确定出施肥的最佳时间^[41, 49]。基于根活性格局确定最佳施肥方式已发展到利用不同的同位素来确定不同肥料的施放位置和施放时间,如用相应的¹⁵N 标记物来研究氮肥的施放方式^[16, 20, 42, 43],用对应的³²P 或(和)³³P 标记物确定磷肥的施放方式^[9],用 Rb 或 Sr 确定钾肥或钙肥的最佳施放方式^[21, 22]。最有代表性的研究当属联合国农业组织(FAO)与国际原子能机构(IAEA)下属部门"Atomic Energy in Food and Agriculture"联合开展的国际研究计划"Root Activity Patterns of Some Tree Crops"(1975)。在这个由哥伦比亚、加纳、马来西亚、中国台湾地区等 10 个国家和地区参加、历时 5 年的研究计划中,IAEA 使用³²P、³³P、⁸⁶Rb、¹⁵N 4 种同位素,利用土壤注射法和首创的³²P/³³P 联合标记法,对不同生境条件下香蕉、可可树、咖啡树、椰子树和油椰五种木本作物(tree crop)的根活性格局进行了系统研究,并根据根活性格局研究结果对各物种的施肥位置(深度和距基干的距离)和施肥时间给出了具体建议^[9]。

在水资源匮乏的干旱、半干旱地区,渗灌或地下滴灌等精确灌溉技术是实现农业节水的重要手段,同时也是实现定深定时施肥的一种有效方法^[49]。作物根活性格局研究对于渗水管或毛管埋设深度和供水时间的确定同样具有指导意义^[41]。

3.3 复合种植系统中物种的选择与种植间距的确定

复合种植系统(特别是农林复合系统)能够在减少或维持原有资源投入的情况下提高农田的总产出,提高资源的利用效率,促进养分和水分的循环利用,

因此已成为实现土地资源可持续利用的重要选择^[49]。上述功能的实现主要基于物种的合理选择和组合,使其满足以下条件:(1)系统中不同物种在资源利用上存在着差异和互补性(complementarity),这种互补性包括不同植物生活型利用不同深度的资源,或者同一生活型的不同物种利用资源的高峰期在时间上错开^[47, 48];(2)某些物种能够吸收由于渗漏作用而流失到其它作物根范围之外的养分,即具有"安全网"(safety net)功能^[49];(3)如果深层土中有充足的养分贮备,某些物种应能起到"营养泵"(nutrient pump)的作用,将这些营养物质吸收上来,并通过其凋落物将养分带到地表^[50]。在这三个条件中,物种在资源利用上的互补性是基于生态学中的生态位理论,使不同作物的生态位在时间和空间(主要是垂向上)上产生分化^[51],它不仅是实现复合种植系统资源充分利用和避免过激竞争的有效手段,而且是物种的安全网和营养泵功能得以发挥的基础。只有那些利用深层资源的物种才有防止资源渗漏和实现资源提升的可能;植物的安全网功能能够防止资源的流失,提高资源的利用效率;某些物种的营养泵功能则能实现养分的循环利用。

在复合种植系统中,物种根活性格局的研究对于物种的选择具有重要的指导意义,因为不同物种生态位的空间分离实际上是通过其有效吸收空间所处位置的不同来实现的^[15, 19, 51~53],生态位的时间分离则是通过根活性高峰期所处时段的不同来实现的^[51~53];具营养泵功能的物种,其有效吸收空间必须分布在土壤深层^[54];具安全网功能的物种,其有效吸收空间不仅要分布在土壤深层,而且侧向伸展范围要较大,才能组成侧向网络并有效吸收从上层漏失的养分^[55]。随着复合种植系统在世界范围内的推广,根活性格局测定用于植物物种选择的研究正在逐渐增多^[7, 9]。如 Lehmann 等在亚马逊中部的一农林复合系统中,用³²P、³³P 和¹⁵N 三种同位素测定了不同果树和一种豆荚作物的根活性格局,发现除棕榈树 *Bactris gasipaes* Kunth 以外,其余果树根活性的 80% 都集中在土壤表层,会与豆荚作物(根活性也集中在表层)产生强烈竞争,因此不宜与豆荚复合种植^[56];Rowe 等用¹⁵N 同位素测定并比较了印度尼西亚一农田中 *Peltophorum dasyrrhachis* 与 *Gliricidia sepium* 两种灌木的根活性格局,认为如果与落花生复合种植,*Peltophorum* 在资源利用上的互补性和所起的安全网作用都将优于 *Gliricidia*,因此是落花生+灌木篱墙复合系统的较佳选择^[57]。Dinkelmeyer 等也在亚马逊中部丘陵区用¹⁵N 示踪

剂测定了 4 种木本作物的根活性格局及其动态变化, 比较了它们在防止养分渗漏和与玉米等一年生作物竞争方面的差异^[57]。Wahid 提出设想, 可依据木本植物有效吸收空间的侧向和垂向范围对其进行分类, 以供不同土地利用系统进行物种选择, 还提出了分类标准, 建议分为从“侧向范围极小+根活性极浅”(EFS: 侧向 < 1.0 m, 深度 < 0.3 m) 到“侧向范围极大+根活性极深”(EFS: 侧向 > 3.0 m, 深度 > 0.9 m) 的 16 类, 并选择了 17 种广泛种植の木本植物, 依据前人对其根活性格局的研究结果, 确定了其类别^[9]。

对于同一物种的不同个体或有效吸收空间的位置和根活性的高峰期都比较相似的不同物种, 实现生态位分离的有效措施是控制种植间距。间距的确定要基于其根活性格局的研究结果, 既要使它们的有效吸收空间在水平方向上分开, 以避免过激竞争, 也不能使间距过大, 以避免养分或水分漏失, 实现资源的充分利用^[9]。另外, Korwar 和 Radder 基于植物根活性格局的可塑性, 提出通过定期耕作进行“根的修剪”(root pruning) 或通过地表枝叶的修剪来控制作物有效吸收空间的分布, 避免作物对地下资源的过激竞争^[58]。

4 相关研究工作展望

纵观作物根活性格局研究现状及其在农田管理中的应用进展, 以下工作需要开展或进一步加强。

1) 作物根活性格局的不同同位素示踪研究。已有的同位素示踪研究多假设某一元素指示得出的根活性格局与用其它元素得出的根活性格局一致, 即作物根对水分和各种营养物质的吸收活性格局是相同的^[9], 少数研究曾对不同同位素指示得出的根活性格局进行过比较, 但将其差异归因于这些元素在土壤中迁移速度的不同^[59]。因此, 目前有关同一作物对不同养分的吸收高值区或高峰期是否相同还不甚清楚, 对不同肥料是否需在不同位置或不同时间施放也未给出明确的解答, 所以有必要在排除土壤干扰的控制性试验条件下, 用不同的同位素对作物根活性格局进行比较研究。

2) 土壤水分消耗法在干旱、半干旱地区作物根活性格局测定中的推广。尽管测定精度不如同位素示踪法, 但土壤水分消耗法对土壤的扰动和根的损伤也都比较小, 也能获取根活性格局的动态资料。如果与现已建立的田间土壤水分监测系统相结合, 则用土壤水分消耗法测定作物根的活性格局不需要额外的成本^[23], 因此可在干旱、半干旱地区进行推广。

3) 作物根活性格局研究在土壤-植物水分、盐分运移模型中的应用。尽管许多研究者已意识到根长密度在指示根系吸收强度上的不足, 但将作物根活性格局用于土壤-植物水、盐运移模拟的研究仍然极少, 需要进一步加强。

4) 作物根活性格局动态变化规律在复合种植系统管理中的应用。作物根活性格局的动态变化规律对于复合系统科学管理的重要性虽然已被广泛接受, 但其应用研究仍然较少, 需要进一步加强。

5) 建立各种常见作物物种的根活性格局(四维: 空间+时间) 数据库。建立该数据库可为农田科学管理的各个方面, 包括最佳施肥(水) 位置和时间的确定、作物物种的选择与组合、种植间距的确定、耕作方式的选择等提供决策依据, 是作物根活性格局研究的主要应用方向。

参考文献:

- [1] 张喜英. 作物根系与土壤水利用[M]. 北京: 气象出版社, 1999. 154-167.
- [2] Böhm W. Methods of studying root systems[M]. New York: Springer Verlag, 1979. 3-5, 99-101, 103-113.
- [3] 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.
- [4] Wahid P A. Radioisotope studies of root activity and root level interactions in tree based production systems: a review [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2001, 54(5): 715-736.
- [5] IAEA. Root Activity Patterns of Some Tree Crops (Technical Reports Series No. 170) [M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1975.
- [6] Atkinson D. The distribution and effectiveness of the roots of tree crops [A]. Janick J. Horticultural Reviews (Volume 3) [C]. Portland: Timber Press, 1980. 424-490.
- [7] Schroth G. Tree root characteristics as criteria for species selection and systems design in agroforestry [J]. Agroforestry Systems, 1995, 30(2): 125-143.
- [8] Gregory P J. Approaches to modelling the uptake of water and nutrients in agroforestry systems [J]. Agroforestry Systems, 1996, 34(1), 51-65.
- [9] Wahid P A. A system of classification of woody perennials based on their root activity patterns [J]. Agroforestry Systems, 2000, 49(2): 123-130.
- [10] Pecháčková S, Albrechtová M, Hadincová V, et al. Horizontal and vertical distribution of root absorption zones of four common grass species in a mountain grassland [J]. New Phytologist, 2004, 161(3): 303-312.
- [11] Schroth G. A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options [J]. Agroforestry Systems, 1999, 43(1): 5-34.
- [12] Lehmann J. Subsoil root activity in tree based cropping systems [J]. Plant and Soil, 2003, 255(1): 319-331.
- [13] Caldwell M M. Exploiting nutrients in fertile soil microsites [A]. Caldwell M M, Percy R W. Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants [C]. San Diego:

- Academic Press, 1994 325- 347.
- [14] Lehmann J, Muraoka T. Tracer methods to assess nutrient uptake distribution in multi-strata agroforestry systems[J]. *Agroforestry Systems*, 2001, 53(3): 133- 140
- [15] Mamolos A P, Elisseeu G K, Veresoglou D S. Depth of root activity of coexisting grassland species in relation to N and P additions, measured using nonradioactive tracers[J]. *Journal of Ecology*, 1995, 83(4): 643- 652
- [16] Lehmann J, da Silva Jr. J P, Schroth G, et al. Nitrogen use in mixed tree crop plantations with a legume cover crop[J]. *Plant and Soil*, 2000, 225(1): 63- 72
- [17] Dambrine E, Loubet M, Vega J A, et al. Localization of mineral uptake by roots using Sr isotopes[J]. *Plant and Soil*, 1997, 192(1): 129- 132
- [18] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, et al. Stable isotopes in plant ecology[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33(1): 507- 559
- [19] Di H J, Condron L M, Frossard E. Isotope techniques to study phosphorus cycling in agricultural and forest soils: a review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 24(1): 1- 12
- [20] McKane R B, Grigal D F, Russelle M P. Spatiotemporal differences in ^{15}N uptake and the organization of an old-field plant community[J]. *Ecology*, 1990, 71(3): 1126- 1132
- [21] Clarkson D T, Hanson J B. The mineral nutrition of higher plants[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1980, 31(1): 239- 298
- [22] Hawkes C V, Casper B B. Lateral root function and root overlap among mycorrhizal and nonmycorrhizal herbs in a Florida shrubland, measured using rubidium as a nutrient analog[J]. *American Journal of Botany*, 2002, 89(8): 1289- 1294
- [23] Kirkham M B, Grecu S J, Kanemasu E T. Comparison of minirhizotrons and the soil water depletion method to determine maize and soybean root length and depth[J]. *European Journal of Agronomy*, 1998, 8(1): 117- 125
- [24] Schroth G, Rodrigues M R L, D'Angelo S A. Spatial patterns of nitrogen mineralization, fertilizer distribution and roots explain nitrate leaching from mature Amazonian oil palm plantation[J]. *Soil Use and Management*, 2000, 16(3): 222- 229
- [25] Eissenstat D M, Caldwell M M. Competitive ability is linked to rates of water extraction: a field study of two aridland tussock grasses[J]. *Oecologia*, 1988, 75(1): 1- 7
- [26] Dodd M B, Lauenroth W K, Welker J M. Differential water resource use by herbaceous and woody plant life forms in a shortgrass steppe community[J]. *Oecologia*, 1998, 117(4): 504- 512
- [27] Davis S D, Mooney H A. Water use patterns of four co-occurring chaparral shrubs[J]. *Oecologia*, 1986, 70(2): 172- 177
- [28] Stone L R, Goodrum D E, Schlegel A J, et al. Water Depletion Depth of Grain Sorghum and Sunflower in the Central High Plains[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(4): 936- 943
- [29] Zhuang J, Nakayama K, Yu G R, et al. Estimation of root water uptake of maize: an ecophysiological perspective[J]. *Field Crops Research*, 2001, 69(3): 201- 213
- [30] Molz F J. Models of water transport in the soil-plant system: a review[J]. *Water Resource Research*, 1981, 17(5): 1245- 1260
- [31] Jamieson P D, Porter J R, Goudriaan J, et al. A comparison of the models AFRCWHEAT 2 CERES Wheat, Sirius, SUCROS 2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought[J]. *Field Crops Research*, 1998, 55(1): 23- 44
- [32] Radersma S, Ongc C K. Spatial distribution of root length density and soil water of linear agroforestry systems in sub-humid Kenya: implications for agroforestry models[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 188(1): 77- 89
- [33] Clothier B E, Smettem K R J, Rahardjo P. Sprinkler irrigation, roots and the uptake of water[A]. Roth K, Flüher H, Jury W A, et al. *Field scale Water and Solute Flux in Soils (Monte Verita)* [C]. Basel: Birkhäuser verlag, 1990 101- 108
- [34] Hainsworth J M, Aylmore L A G. Non uniform soil water extraction by plant roots[J]. *Plant and Soil*, 1989, 113(1): 121- 124
- [35] Green S, Clothier B. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree[J]. *Plant and Soil*, 1999, 209(1): 61- 77
- [36] Bruckler L, Lafolie F, Tardieu F. Modeling root water potential and soil root water transport. II. Field comparisons[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(5): 1213- 1220
- [37] Jamieson P D, Ewert F. The role of roots in controlling soil water extraction during drought: an analysis by simulation[J]. *Field Crops Research*, 1999, 60(3): 267- 280
- [38] Bouillet J P, Laclau J P, Arnaud M, et al. Changes with age in the spatial distribution of roots of Eucalyptus clone in Congo Impact on water and nutrient uptake[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 171(1): 43- 57
- [39] 崔玉亭. 化肥与生态环境保护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000 92- 98
- [40] FAO. Maximizing the efficiency of fertilizer use by grain crops [R]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1980
- [41] 李京淑. 同位素示踪技术在农业科学中的应用[J]. *物理*, 1987, 16(6): 357- 360
- [42] Zinati G M, Christenson D R, Harris D. Spatial and temporal distribution of ^{15}N tracer and temporal pattern of N uptake from various depths by sugarbeet [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(9&10): 1445- 1456
- [43] Priha O, Smolander A. Short term uptake of $^{15}\text{NH}_4^+$ into soil microbes and seedlings of pine, spruce and birch in potted soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(5): 324- 327
- [44] Veresoglou D S, Fitter A H. Spatial and temporal patterns of growth and nutrient uptake of five co-existing grasses[J]. *Journal of Ecology*, 1984, 72(1): 259- 272
- [45] 牛西午, 周克义, 王俊兰. 旱地苹果园渗灌补水加覆盖技术研究与应用[J]. *干旱地区农业研究*, 1996, 14(4): 52- 55
- [46] Kidd C V, Pimental D. *Integrated Resource Management:*

- Agroforestry for Development [M]. San Diego: Academic Press, 1992
- [47] Young A. Agroforestry for Soil Management (2nd. Ed) [M]. Wallingford: CAB International, 1997.
- [48] Schroth G, Lehmann J, Rodrigues M R L, et al. Plant soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropics [J]. *Agroforestry Systems*, 2001, 53(3): 85–102
- [49] Van Noordwijk M, Lawson G, Groot J J R, et al. Root distribution in relation to nutrients and competition [A]. Ong C K, Huxley P A. *Tree Crop Interactions: a Physiological Approach* [C]. Wallingford: CAB International, 1997. 319–364
- [50] Cannell M G R, Van Noordwijk M, Ong C K. The central agroforestry hypothesis: the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire [J]. *Agroforestry Systems*, 1996, 34(1): 27–31
- [51] Hauggaard Nielsen H, Ambus P, Jensen E S. Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea barley intercrops: a field study employing ^{32}P technique [J]. *Plant and Soil*, 2001, 236(1): 63–74
- [52] Fitter A H. Spatial and temporal patterns of root activity in a species rich alluvial grassland [J]. *Oecologia*, 1986, 69(4): 594–599
- [53] Ofori F, Stern W R. Cereal legume intercropping systems [J]. *Advances in Agronomy*, 1987, 41(1): 41–90
- [54] Van Noordwijk M, Purnomosidhi P. Root architecture in relation to tree soil crop interactions and shoot pruning in agroforestry [J]. *Agroforestry Systems*, 1995, 30(3): 161–173
- [55] Rowe E C, Hairiah K, Giller K E, et al. Testing the safety-net role of hedgerow tree roots by ^{15}N placement at different soil depths [J]. *Agroforestry Systems*, 1999, 43(1–3): 81–93
- [56] Lehmann J, Muraoka T, Zech W. Root activity patterns in an Amazonian agroforest with fruit trees determined by ^{32}P , ^{33}P and ^{15}N applications [J]. *Agroforestry Systems*, 2001, 52(3): 185–197
- [57] Dinkelmeyer H, Lehmann J, Renck A, et al. Nitrogen uptake from ^{15}N -enriched fertilizer by four tree crops in an Amazonian agroforest [J]. *Agroforestry Systems*, 2003, 57(3): 213–224
- [58] Korwar G R, Radder G D. Influence of root pruning and cutting interval of *Leucaena* hedgerows on performance of alley cropped rabi sorghum [J]. *Agroforestry Systems*, 1994, 25(3): 95–109

Root activity patterns of crops and their applications in cropland scientific management

SUN Zi yong¹, XU Heng ti¹, ZHU Jin qi^{1,2}

(¹ *School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;*

² *Jiangsu Institute of Geological Survey, Nanjing 210018, China)*

Abstract: This review focused on the concept and studying methods of root activity patterns and their applications in cropland scientific management. Root activity pattern reflects the contribution of different parts of a root system to the total amount of nutrients absorbed by plants, and is used to indicate the functional variation in root system. Accordingly, root activity pattern is different from pattern of active roots. This challenges the widely accepted hypotheses that nutrient/water uptake is closely related to relative root length density. ^{32}P soil injection is by far the most widely used method of studying root activity patterns, while soil water depletion method is mainly focalized in arid and semiarid regions. Root activity pattern is a more accurate parameter than pattern of active roots in delineating the spatiotemporal distribution of soil water uptake by plant. It makes potential use of root activity patterns in simulating water transfer from soil to crops and facilitate water management in field situation. Root activity patterns of crops and their changes with time give important hints in several situations such as deciding the zones and periods of fertilizer placement, choosing the most appropriate crop combination and spacing them properly in mixed cropping system for complementary exploitation of below ground resources, selecting the plant species with safety net or nutrient pump functions in agroforestry, deciding the planting geometry, etc. In addition, the paper suggests that further research should focus on the comparison of root activity patterns measured by using different isotopes, the establishment of database of root activity spatiotemporal patterns for the common crops, etc.

Key words: root activity pattern; effective foraging space (EFS); soil water balance; placement of fertilizer; recycling of nutrients