

主要粮食作物耐氮低应力育种研究进展

莱米·亚德萨

埃塞俄比亚 巴科 埃塞俄比亚农业研究所, 巴科国家玉米研究中心

摘要: 植物的生长发育依赖于氮。谷类作物的发育受土壤氮含量的影响很大, 而热带土壤的氮含量较低。有机废物会将氮截留在土壤中, 使植物无法获得氮。另一方面, 低投入农业是指以较少的投入维持的系统, 导致系统紧张, 通常是由氮和磷酸盐短缺或缺水造成的, 这会导致产量损失。在发达国家, 它经常与有机农业有关, 并被用作有机农业的同义词。一种具有耐受性的植物在疾病发生后再也无法抵御或控制疾病的传播。因此, 迫切需要找到增加粮食生产的方法, 特别是在世界上最贫穷的地区。在当代的改良尝试中, 基于更高产量表现的基因型选择通常是在每种类型的胁迫的最佳条件下进行的。为了解决这些情况, 必须创建着眼于潜在低产品种的育种课程。在这些课程中, 选择了具有更好抗逆性的品种, 如延迟叶片衰老、改善营养经济性、当地环境适应性、持续产量和抗病性, 从而提高了低投入系统的可持续性。因此, 来自世界各地的研究人员正在投入大量精力来创造改良品种和杂交种。可以通过引进、选择、杂交和突变技术创造出非生物和耐生物的作物品种。使用系谱、改良的大宗系谱和另一种培养方法来生产能够耐受盐度的品种。为了通过传统育种或生物技术方法创造出优良的基因型, 遗传学家必须了解作物中生物和生物耐受性的遗传基础。由于作物科学和遗传技术的快速进步, 育种家必须不断更新他们的知识和能力, 以保持最新。

关键词: 氮气; 有机的; 经济; 表演

Review on Breeding Cultivars for N-Low Stress Tolerance in Major Food Crops

Lemi Yadesa

Ethiopian Institute of Agricultural Research, Bako National Maize Research Center, Bako, Ethiopia

Abstract: The growth and development of plants depend on nitrogen. Cereal crop development is greatly influenced by soil nitrogen content, and tropical soils have low nitrogen contents. Organic waste can trap nitrogen in the soil, making it unavailable to plants. On the other hand, low-input farming refers to systems that are maintained with less inputs, leading to a stressed system, typically caused by a scarcity of nitrogen and phosphate or a lack of water, which results in output losses. It is frequently related to and used as a synonym for organic farming in developed nations. A tolerant plant can no longer fend off or control the spread of a disease after it has taken hold. Finding ways to increase food production is therefore urgently needed, especially in the world's poorest areas. In contemporary improvement attempts, genotypic selection based on higher yield performance is typically carried out under optimal circumstances for each type of stress. To address these situations, breeding curricula that look at potential low-yielding varieties must be created. In these curricula, varieties with better stress tolerances such as delayed leaf senescence, improved nutrient economy, local environmental fitness, consistent yield, and disease resistance are chosen, increasing the sustainability of low-input systems. As a result, researchers from all around the world are putting in a lot of effort to create improved varieties and hybrids. Crop cultivars that are abiotic and biotic-tolerant can be created through introduction, selection, hybridization, and mutation techniques. Pedigree, modified bulk pedigree, and another culture method were used to produce a cultivar that can withstand salinity. In order to create superior genotypes by conventional breeding or biotechnological methods, a geneticist must comprehend the genetic foundation of biotic and a biotic tolerance in crop plants. Breeders must continuously update their knowledge and abilities to keep current due to the quick advancements in crop science and genetic technologies.

Keywords: Nitrogen; Organic; Economy; Performance

1. 引言

氮(N)是作物发育和生长最重要的组成部分之一,

在现代农业中被广泛用于提高产量。粮食生产的全球氮利用效率(NUE)约为33%^[93]。氮是植物生长发育的重

要组成部分。玉米的发育在很大程度上受到土壤氮水平的影响,而热带土壤的氮水平较低^[12]。氮胁迫导致叶片叶绿素、叶面积减少,衰老速度加快,所有这些都降低了叶片的光同化物产量。氮对叶片叶绿素的产生至关重要,叶绿素控制着植物的光合效率。这表明氮是作物产量的一个因素^[15]。

尽管氮对玉米很重要,但它在土壤中的可用性受到各种情况的影响,而且它并不总是可供植物吸收。例如,氮可能被截留在土壤有机质中,使其无法用于植物用途^[15]。事实上,谷物只储存了大约三分之一的施氮^[110]。由于农业中的活性氮在大气、土壤和水中富集,集约农业地区,特别是玉米主产区的过量施氮导致了严重的环境问题^[61]。玉米生产取决于肥料捕获的效率和在缺氮时适应低氮胁迫的能力^[111]。提高氮利用效率(NUE)和低氮耐受性已成为作物生产中一个理想的育种目标,以降低施肥成本和过量氮对环境的不利影响。因此,提高NUE和低氮耐受性对农业可持续性和环境效益都至关重要。在进行高NUE和低N胁迫耐受性育种时,需要目标性状具有足够的遗传变异性。

玉米、小麦、水稻和春大麦材料氮利用特征的遗传变异或异质性已被研究为提高谷物NUE的要求^[28]。如^[47]所述,已经建立了许多用于评估作物NUE的指标^[27]。当必须检查大量材料时,N生长效率(NAE),即将施氮转化为粮食产量的效率,要实用得多,因为不需要劳动密集或耗时的化学分析,也不需要施氮^[27]。目前,高NUE育种的目的是保持或提高生产力,同时使用更少的氮^[47]。耐受性是指植物在表现出易感宿主症状的情况下仍能有效运作的的能力。耐受性植物在建立自身后缺乏抵抗或减缓病原体传播的能力。根据症状的视觉评估,耐受性植物将被归类为脆弱植物,就像不耐受性植物一样。尽管存在疾病症状,但耐受植物的表现与未受感染的植物相当。有些人将耐受性与田间抗性和其他短语混淆,这些短语指的是已确定的感染的进展。其他人可能不认为容忍是一种抵抗^[91]。本综述的目的是研究适合N低持久性的作物育种技术。

2. 文献综述

2.1 高氮和低氮输入对作物-植物反应的影响

依赖重型机械、高产品种、合成和天然肥料、常规农药施用和灌溉的大面积单一种植都是高投入系统的例子。为了实现一致性,在连续几代中采摘最有效的单株^[39]。在今天的改良项目中,基于更高产量表现的基因型选择通常是在理想条件下进行的。这种人工选择的方法产生的作物始终是同质的,遗传变异性有限。由于缺乏天然遗传多样性,在高投入环境中选择的高性能基因型在胁迫条件下不太可能维持同样的高产^[84]。低投入农业可以被描述为投入较少的系统管理,导致系统受到压力,通常是由于氮和磷缺乏或水资源不足,导致产量损失。它经常与有机农业联系在一起,并被用作有机农业的同

义词,尤其是在发达国家^[84]。资源匮乏的农业生产者占世界人口的一半,提供了世界20%的粮食供应^[106]。尽管这些资源匮乏的农民数量众多,但当代的育种工作并没有让他们受益匪浅。改良品种是在不典型的边缘环境中创造出来的^[1]。

目前的低投入品种主要是利用当地种质产生的,增强了(GxE)相互作用、适应性和作物性能^[124]。已经证明,在低投入或胁迫情况下选择品种是提高产量的最有效方法^[85]。必须制定育种计划,研究更适合低产条件的潜在品种,选择在胁迫条件下具有更有利适应能力的品种,如延迟叶片衰老、改善营养经济性、当地环境适应性、持续产量和抗病性,从而提高低投入系统的可持续性。随着人口的增长,需要将当前农业的高投入模式转变为低投入模式。在低产和不断变化的压力条件下进行育种比在同质、调节、高产的系统中进行育种更困难,但在保护全球资源的同时养活世界上不断增长的人口至关重要^[39]。当表型选择变得不可靠时,使用遗传标记被认为是培育基因型改良变体的可行选择^[43]。

2.2. 通过提高氮利用效率和选择耐氮低的作物来发展作物

利用低氮改良地方品种,特别是关键的谷类食品作物的有机育种被称为低氮育种(玉米、小麦和水稻)。在进行高NUE和低N胁迫耐受性育种时,需要目标性状具有足够的遗传变异性。玉米、小麦、水稻和春大麦材料氮利用特征的遗传异质性已被探索为提高谷物NUE的必要条件^[27]。在不影响生产力和粮食质量的情况下,减少氮肥过度使用的最环保、最具成本效益的方法是使用基因干预来开发更多的作物,这将需要更少的氮肥,而不会造成产量损失^[65]。NUE是一种复杂的特征,需要对参与植物许多部分氮吸收、分布和积累增强的基因/QTL进行遗传鉴定。已经发现了与基因相关的标记,并可用于标记辅助选择(MAS),以选择在低氮环境中表现更好的基因型^[122]。

NUE是吸收效率(吸收的氮量/可获得的氮量)和利用效率(产量/吸收的氮)的乘积,或氮吸收效率,通过将收获时地上植物的氮总量除以土壤中的有效氮量来计算。大量作物的氮吸收效率和氮利用效率存在遗传异质性^[30]。低氮耐受指数(LNTI)被定义为与同一实验中的最佳条件下相比,低氮胁迫下的谷物产量降低,并计算为 $(1 - (GLN/GOP) \times 100\%)$,其中GLN=低氮条件下的谷物产率,GOP=最佳条件下的粮食产量^[131]。

2.3. 氮利用效率和作物反应及生理过程

根在植物生产力中发挥着一系列作用,包括水分和养分的摄入,与根际各种微生物发展共生关系,将植物固定在土壤上,并充当储存器官。从细胞到整个植物水平,根系与其环境的各种相互作用都是由其组织和结构决定的。使用随后的标记辅助选择来寻找与根系发育和氮吸收相关的基因是一种重要的育种策略。一旦确定了

根系表型多样性和根系基因序列多样性,就可以使用基于基因的关联图谱来寻找对根系性状具有因果遗传影响的数量性状多态性(QTP)。对于QTP的发现,不相关玉米自交系的祖先重组和候选基因座的连锁不平衡被用于关联作图^[129]。通过关联研究发现的QTP可作为诊断功能标记,有助于种质选择^[4]。其他根系品质与根系DW基本相关,这表明基于根系DW的直接选择可能足以改善其他根系性状^[21]。具有长而扩大的根系的玉米品系对于培育耐旱性和肥料使用效率以及确定影响这些性状的遗传区域是理想的。根据研究^[78],少数玉米品系在植物生长的各个阶段都有根系特征的变异性。

根据玉米研究^[114],耐旱基因型在苗期具有较低的地上部干重、强健的根系和较高的根冠比。因为纤维根系统可以在干旱前更好、更快地发育植物,并加快水分提取,在幼苗期逐渐适应干旱条件;由于自然界的可塑性,根系将暴露在更多的土壤体积中,从而促进养分吸收;因此,因为根系将暴露在更多的土壤体积中,从而增加养分吸收;因为根系将获得更多的土壤体积,从而增加养分吸收;因此根系将暴露在更多的土壤体积中^[62]。

2.4. 根系结构系统与N应力迹象之间的联系

作物对非生物胁迫的反应在很大程度上取决于根系结构。根是第一个发现非生物挑战的,因为它们生长在地下,并且它们调整了胚胎后发育的基因程序,以在压力下生存。土壤是一个具有内在特征、非生物和生物相互作用的复杂系统,为植物根系提供水分和养分。随着时间的推移,当植物营养状况和外部营养供应的变化被感知并整合到内在根系发育程序中时,RSA就会被调节。不同根系成分的数量、延伸、定位和发育方向的变化决定了根系可塑性的程度^[89]。RSA的改变通过影响对枝条的碳分配和/或启动涉及激素、蛋白质和RNA等的信号通路,影响地上生物量的生长和发育。当面临非生物胁迫时,根系间接调节叶片气孔导度,影响叶片姿态和光合速率^[130]。即使根特征的育种很困难,标记辅助选择也可能特别有助于聚合与小麦数量性状基因座(QTL)的主要影响相关的许多表型,如根角、根长、根重和根冠比^[7]。

在小麦中,直接选择根系结构特征(长度、生物量、密度和侧根分散度)与增加水分和养分吸收有关。较低的冠层温度可以被解释为根系吸收能力增强的迹象,但较高的气孔传导率将提供类似的信号^[96]。^[118]发现,核心断裂方法可以直接识别深根性状的变异,以加快澳大利亚多种基因型(品种、近等基因系和重组自交系)的选择。从野外采集的冠根被挖掘出来,并进行目测评分。玉米结果显示,总植物深度和根系总长度高度相关^[112]。由于根系较深的作物能够更好地获得储存的水分和氮等营养物质,氮是一种可溶性营养物质,往往会渗入土壤的深层,因此根系深度是最常研究的特征之一^[117]。由于硝酸盐很容易从土壤剖面中浸出,为了提高氮的捕获,

需要优化的主要根系质量是生根深度和生根密度,特别是花后氮的吸收^[41]。根系结构的进一步进展可能集中在小麦深层的根系增殖上,根系更深的相对分布可能是增加氮捕获的理想类型的一部分^[25]。侧根增加了根系的总生物量、总根长和根表面积。更多的营养和水分摄入与侧根密度的增加有关^[107]。

根据最近的研究,在氮缺乏的土壤中,侧根长且少的玉米品系比侧根短的玉米品系产量高30%。具有较少侧根的根系降低了与维持复杂根系结构相关的代谢成本,允许将更多资源分配给更深的根系以获得N^[126]。许多作物,如玉米,有各种各样的根,包括簇根、支架根和冠根,每种根在生长的节点上都有自己的母根。根据环境条件,具有这些根系的植物可以产生陡峭的主根和浅的不定根,以便更有效地探索其周围环境。水力模式是一种发生在各种植物根部的现象,其中侧根从与潮湿土壤接触的根部生长^[119]。

根毛是增加氮捕获的另一个潜在途径,在玉米中发现了两个根毛伸长基因,RTH1和RTH3^[57]。根的结构和功能可能是多基因的,这使得选择更具挑战性(霍尔和理查兹,2013)。单细胞突起从根表皮细胞发育形成根毛。由于根毛在整个根表面积中占很大比例,因此它们几乎占植物吸水量的一半也就不足为奇了。当将野生型拟南芥植物与无根毛突变体进行比较时,确定了根毛与水分吸收的相关性。根无毛突变体更容易受到干旱、盐和热胁迫的影响,因为它们吸收水分的能力减弱^[109]。植物根系的大小是影响土壤资源吸收的一个重要因素,应将其与地上植物部分的大小进行比较。对于各种物种,已经描述了深层和强壮的根系对增加产量的重要性^[115]。

2.5. 使用最佳育种技术选择耐氮作物

在为任何作物选择任何繁殖方法时,应考虑物种的繁殖类型,无论是自花授粉、异花授粉还是无性繁殖。品种类型与性状的遗传调控有关。由于单个植物对类似的非生物胁迫条件的反应如此不同,很难一次培育出一个具有多个健壮特征的物种,但这正是植物育种家的目标。抗旱性的培育方式与产量和其他收入水平相同。对于自花授粉作物,可以使用系谱和批量方法,而对于异花授粉作物可以使用重复选择。然而,如果目标是将一些抗旱特性转移到高产基因型上,则可以使用反向杂交。另一方面,双亲交配(半同胞和全同胞)保留了广泛的遗传基础,同时也允许所需抗旱基因型的进化^[125]。耐旱作物品种可以通过多种方法创造,包括引进、选择、杂交和突变。使用系谱、改良的大宗系谱和另一种培养技术来培育耐盐品种。由于植物中非生物胁迫发生的复杂特征,很难对植物进行有效胁迫耐受性的遗传修饰^[116]。^[26]所有人都讨论了抗旱性的育种方法。非生物胁迫育种是抵消产量损失的重要途径。来自世界各地的科学家正在努力开发在易受压力的条件下具有更好杂种优势的品种和杂交种。最有希望、资源密集度较低、经济

上可行、社会上可接受的解决方案是开发具有内在耐盐、耐旱和耐热性的作物品种。

2.6. 低氮育种策略

许多小农户由于无机氮的高成本而买不起,或者由于其稀缺性而无法获得,或者认为氮使用的回报不足以证明其成本合理。此外,对于这些农民来说,生产有机氮源(粪肥)效率低下。选育具有高产潜力和高氮效率的玉米基因型是小农户节省化肥费用的绝佳途径^[82]。根据研究结果^[97],玉米基因型的表现随着土壤肥力水平和植物的氮消耗效率而变化。热带地区旨在提高产量的商业玉米品种是在理想的氮肥力条件下选择的,这可能不适合资源有限、无法购买无机肥料的农民的需求。因此,需要对氮胁迫具有抗性的玉米品种。建立对氮胁迫耐受能力的最大障碍是成功选择。对于育种家来说,获得正确的种质资源是至关重要的。接下来是在目标区域和选择强度的相关条件下适当估计对N的容忍度的能力。为了实现这一点,需要更好地了解作物在低氮环境中的行为,施加适当水平胁迫的能力,一组与氮胁迫下产量相关的次要性状,使用适当的实验设计,以及适当的种质选择和育种策略^[15]。

与提高耐旱性相比,提高耐低氮基因型需要更少的育种胁迫,因为氮胁迫比干旱胁迫更均匀地影响植物生长^[15]。因此,在单一水平的严重氮缺乏下评估基因型足以评估不同水平的土壤氮缺乏对低氮胁迫的耐受性。根据^[9],具有耐旱性的基因型对低土壤氮胁迫也表现出显著的耐受性。根据^[14],使用重复选择来提高耐旱性会导致低氮耐受性的相关提高。减少氮胁迫对玉米生产力影响的一种策略是选择更有效地利用可用氮的品种,因为它们的吸收能力和粮食产量都有所提高^[67]。

与其他有益的分子和生理特征相比,遗传控制是最有力的。通过增加根毛和不定根的产生来改善根系结构,如长度、厚度和密度,是提高作物获取和吸收土壤养分能力的有效途径^[33]。将育种和选择方法转向低氮条件,更好地利用当地的自然遗传变异性,即最适合遗传并能够在暴露于压力条件下做出适当反应的品种,可以改善对宝贵、有限资源的管理,以及可能减少为世界各地的人们生产足够优质食物所需的能源^[29]。

2.7.N- 低胁迫下的反应育种方法

育种家在育种改良基因型时,主要关注提高粮食产量的选择,但在胁迫条件下选择粮食产量可能会引入一些偏差,因为决定选择下遗传进展的遗传力会随着胁迫模式和严重程度的变化而变化^[15]。同样,^[22]发现,单独使用粮食产量作为衡量耐逆性基因型改善的指标是低效的,但使用与粮食高度相关且具有高遗传力的次要性状将有助于提高选择效率。

次要性状是有利的,因为它们提高了识别具有抵抗干旱和/或低氮胁迫的遗传潜力的基因型的能力。这之所以成为可能,是因为即使在粮食产量无法忍受的胁迫

条件下,一些次要性状的遗传力仍然很高^[13]。^[15]确定了一些次要性状,除了粮食产量外,这些性状还可以指导干旱和低氮耐受性的选择。其中一些性状,如开花吐丝间隔、叶片衰老和单株穗数,是干旱和低氮胁迫共同的。一般来说,次要性状可以用来创建一个选择指数,以改善玉米在干旱和/或低氮胁迫下的基因型。

2.8 使用基因作用方法选择氮低耐受品种

简单地说,它指的是基因(遗传单位)如何决定一个角色的表型表达。基因作用可以是加性的,也可以是非加性的。育种者更喜欢加性基因作用而不是非加性基因动作,因为它负责从父母到后代的性格转移。许多遗传学研究已经报道了在对于干旱和低氮胁迫的耐受性方面控制产量的基因作用,但这些报道并不一致。举几个例子,^[19]发现非加性基因作用在低氮条件下主导杂交玉米产量,而加性基因效应在高氮条件下占主导地位。相反,^[18]发现加性基因在低氮环境下占主导,非加性遗传作用在高氮环境下居主导地位。^[51]在他们的研究中发现,在干旱条件下,非加性基因作用对杂交玉米的产量占主导地位,但^[44]发现加性基因的作用对于干旱条件下的产量占优势。一般和特定配合力的变化用于推断基因作用^[103]。假设存在上位性,GCA均方表示加性方差,而SCA均方表示非加性方差。该方差包括显性以及所有形式的上位性相互作用成分。

杂种中的杂种优势可能是由上位性和基因的显性效应引起的。因此,宽交未能表现出杂种优势,这可能在很大程度上归因于低氮耐受基因育种中基因作用的上位性相互作用^[48]。^[48]将上位性定义为一种情况,即一个基因掩盖了另一个基因对表达的影响。选择在次优氮条件下表现良好的品种是提高玉米生产力的一种策略。这可以通过提高有效氮的利用率来实现,既可以通过具有高的氮吸收能力,也可以通过在粮食生产中更好地利用吸收的氮来实现^[67]。已经确定了对施氮反应较低的品种,它们有时在低氮水平下优于氮反应杂交种或品种^[113]。

在干旱条件下开发高产稳定的玉米基因型至关重要,因为获得适应干旱的基因型可能是许多小规模农民的唯一选择。因此,在国际热带农业研究所,提高对于干旱胁迫的耐受性和次优氮条件是重要的育种目标(IITA)。在几内亚大草原,正在独立进行研究,以确定或开发耐干旱或低土壤氮的玉米基因型。尽管^[10]发现耐干旱基因型在缺氮条件下表现良好,目前还没有关于西非大草原上形成的对其中一种胁迫耐受的基因型是否也对其他胁迫耐受的信息。这些信息将有助于制定西非和中非大草原耐应激品种的未来战略。

2.9. 组合能力评估的重要性使用该方法选择耐氮低的作物

为了加快和提高低氮环境的选择效率,更好地了解低氮条件下玉米发育和生产的遗传基础至关重要^[13]。自交系在杂交玉米育种中的价值取决于它们的组合能力。

^[105] 确立了一般配合力和专门配合力的原则。^[54] 将一般配合力 (GCA) 定义为一条线在其所有杂交中的平均表现, 作为与所有杂交平均值的偏差。当与同一系列杂交组合中的其他自交系相比时, 它是一个自交系对一系列混合组合中的杂交性能的平均贡献, 而比配合力 (SCA) 是指当与其他各种自交系的贡献相比时, 自交系对与特定其他自交系的杂交性能所作的贡献。SCA 也被定义为两个自交系相互补充并创造更好的杂交性能的能力。

GCA 的影响可以用来评估性状基因的作用。从统计学角度来看, GCA 效应在很大程度上表明了基因的加性作用。特定的配合力与不可预测和短暂的非加性遗传效应有关, 这使得统计模型难以预测^[37]。给定性状在亲本中的强 GCA 效应意味着该性状在该亲本中存在加性基因效应。当具有强 GCA 效应的亲本杂交时, 预计相当大比例的后代将对所述性状具有高价值, 有助于该性状的选择^[38]。在低氮环境下, GCA 的作用可以用来选择优良的基因型。在氮耐受性差的情况下, 高 GCA 效应可能表明所需性状的存在。

当涉及到确定杂交计划的最佳亲本或亲本组合时, 结合能力分析至关重要^[108]。为了测量亲本的育种价值和转移性状的遗传学, 可以使用各种生物识别技术。GCA 和 SCA 效应及其在育种中的后果, 使用双列杂交分析进行估计^[11, 50]。^[50] 提出了一种在双列交配系统中估计品系和杂交种的一般和特定配合力的方法。另一种经常使用的方法是线路 x 测试仪分析^[64]。进行了几项实验, 以评估在最佳氮和受控低氮胁迫以及最佳水分和受控干旱胁迫下性状的基因型表现和基因作用^[20]。然而, 这项研究的大部分内容一次只关注一种类型的压力。在农民的管理环境下, SSA 的多种压力源, 特别是干旱和土壤氮含量低, 同时发生或同一生长季节的不同时期发生。

长期以来, SSA 的育种家们一直认识到将小麦品种的抗旱性和低氮耐受性结合起来的必要性。^[75] 在最佳水分和氮、水分胁迫和低氮环境下, 对玉米自交系的双列杂交进行了研究, 以寻找具有高 GCA 的自交系。科学家们表示, 在不同的管理环境下, 不同的基因作用也被记录在粮食产量控制中。^[82] 用不同剂量的耐旱亲本测试了耐旱杂交种, 发现大多数含有至少一个耐旱亲本的杂交种在低氮胁迫下产量更高。^[19] 研究发现, 在干旱条件下, 加性基因效应对粮食产量很重要, 在低氮条件下, 非加性基因作用很重要, 而在最佳水分和氮素条件下, 添加性和非添加性基因效应都很重要。^[31] 发现了干旱期间对粮食产量的加性基因作用, 而加性和非加性基因在理想条件下都是活跃的。

尽管之前的研究使用了通过系谱育种过程创建的品系, 但本研究的目的是寻找在干旱和低氮条件下表现良好, 同时在最佳条件下也能高产的新品系和杂交种。非洲耐旱玉米 (DTMA)、非洲节水玉米 (WEMA) 和非洲土壤改良玉米 (IMAS) 倡议利用了 SSA 生产的新品系和试验, 利用了传统谱系育种、双单倍体技术和分子育种^[20]。

2.10. 杂种优势分析方法已被提出作为开发耐氮作物的工具

杂种优势是指后代的表现 (大小和生长速度) 比亲本基因型有所提高。可以观察到作物产量增加、开花期缩短和其他杂种优势特征^[34]。根据^[100], 杂交可以提高大小、活力、生产力和发育速度, 以及对病虫害的抵抗力和对气候压力的耐受力。根据杂种性能标准, 杂种优势可分为中亲杂种优势和优亲杂种优势两类。^[37] 声称, 与亲本系的中期表现相比, 亲本中期杂种优势解释了杂交种的表现。

更好的亲本杂种优势, 也称为异带杂种优势, 描述了一个杂交种与更好的亲本相比的表现。为了满足日益增长的需求, 由于杂种优势, 世界各地的杂交玉米产量都有所增加。在四个地点,^[8] 在干旱胁迫、低氮和理想环境下测试了几种超早期自交和单交基因型。随着干旱强度和耐氮性的增加, 单交种与亲本自交系之间的产量差异增加, 表现出杂种优势。根据^[2], 自交系的产量低于杂交系, 因为杂交基因型在产量方面具有更高水平的杂种优势。杂交种的产量最高可达其母系近交系的三倍, 尽管从农民的角度来看, 优越的杂交基因型不一定具有高杂种优势的基因分型^[34]。

3. 育种方法

3.1. 为了找到耐氮性低的作物, 研究人员使用了遗传力分析

戈麦斯和卡拉马尼^[46]发现, 单株生物产量、株高和单株穗数具有显著的遗传力和遗传进展, 这表明在水稻抗旱和耐氮性选择时应考虑这些性状。对于水稻 9 x 9 双列的低 Na^+/K^+ 比例,^[49] 观察到了具有低狭义遗传力估计的显著环境影响。^[52] 在盐碱地和盐碱地中, Na^+/K^+ 比值和粮食产量的狭义遗传力都很高。

IRRI 最近的研究表明, 干旱条件下的粮食产量具有中等至高的遗传力^[66]。^[127] 报道了小麦叶绿素 a 和 b 的高广义遗传力。 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和胁迫耐受指数均具有较高的狭义遗传力值, 表明加性效应在其对甘蓝型油菜的遗传调控中具有相关性^[96]。如果狭义遗传力较低, 则初代群体规模应较大; 如果可能的话, 应在数年内扩大复制和定位, 以筛选合适的基因型; 并且应该在后代中进行选择。

3.2. 使用常规育种方法估算耐氮作物

多种因素影响选择合适的育种方案, 以培育对特定非生物胁迫具有耐受性的品种, 包括筛选程序、耐受性的来源和机制、基因作用和遗传, 以及它们与农艺性状的联系。胁迫的时间、持续时间和强度是抗旱育种成功的三个关键方面。利用传统的育种程序, 已经建立了花生、普通豆、红花、鹰嘴豆、小麦、高羊茅、大豆、麦草、

大麦和玉米等作物的耐旱品系。识别与干旱 N 低耐受性良好相关的性状是该技术的一个问题。很久以前,循环选择被报道为培育耐盐异花授粉物种的一种策略^[31]。为了帮助自花授粉物种进行杂交,同样的技术也需要引入雄性不育系^[92]。这些方法依赖于整体性状的遗传力,这已在野草^[6]、高粱^[73]、玉米^[74]和番茄^[74]中得到证明。

3.3. 鉴定最佳耐氮低耐性品种的方法(选择和引进)

通过收集和评估可获得的种质来分析遗传变异是任何性状育种的第一步。如果一个地方或物种缺乏所需的变异性,可以引入外来种质。在所有的繁殖策略中,这种传统的方法仍然非常有用。通过选择和引进的方法,世界各地已经培育出了一些耐盐品种。改善雨水灌溉低地生态系统品种多样性的第一步是通过纯品系选择来净化地方品种^[77]。在当地地方种族中选择优良谱系是这种育种努力的开始。这些品种可能是高大、对光周期敏感的品种,具有不同程度的耐淹性^[76]。

3.4. MAS 补充拨号选择性交配系统

由此产生的后代的小遗传背景是自花授粉作物育种的主要瓶颈,因为育种者只能对单交、三交和四交的两个个体进行亲本控制,而双交最多只能对四个个体进行。IRRI 正在使用二烯丙基选择性交配系统(DSMS),这是詹森的 DSMs 的修改版本,以加强父母的控制,拓宽遗传基础,并打破连锁块。这种重新设计的 DSMs 将在未来用于生产许多具有更大适应性的非生物胁迫耐受基因型。这是一种反复选择方法,只有理想的等位基因(选定的基因型)才能进行选择性的间交配。该系统基于“所需基因型的反复选择”和“所选基因型之间的强烈杂交”,目的是增加获得预期重组基因型的可能性。这种长期育种策略的主要目标是开发具有多种非生物胁迫耐受性的遗传材料,打破水稻等自花授粉作物中常见的非常紧密的连锁块,并最大限度地提高只有所需基因频率被转发给后代的机会,从不同的地理位点中挖掘 IRRI 可用的种质供体,并能够在组合育种中大规模验证和使用标记辅助选择(MAS)。易淹没的沿海盐渍土、内陆受盐影响的土壤、耐氮性低和干旱、铁中毒土壤和缺锌土壤是产生材料的目标区域^[101]。对于盐度(SALTOL 基因座)和淹没(SUB 1 基因座)耐受性,该方法使用标记辅助选择(MAS),而表型选择用于其他变量^[102]。

3.5. 后交叉的方法

回交是一种重复杂交,将所需性状的基因添加到所需品种中。回交育种方法非常适合将耐旱特性转移到高产品种上^[35]。然而,由于缺乏对高产基因型耐旱性的生理和遗传基础的了解,很难在高产基因型中转移耐旱性。利用循环选择程序^[90],提出了一种全面的耐氮、抗旱和高产潜力育种方法。所需回交的数量由供体与复发亲本相比的相对表现决定。根据^[32],如果一个亲本比另一个亲本含有更多具有有利等位基因的基因座,如果亲本是多样的,或者如果显性水平很高,则回交可能是有利

的。在澳大利亚^[40],成功地将一个耐铝的关键基因从卡拉齐尼奥小麦品种转移到了 Egret 小麦品种。^[23]还提出,在理想条件下,将相关抗旱性状选择性地纳入具有优异产量的品种中,使其更适应恶劣环境。国际水稻研究所(IRRI)目前正在使用这种育种方法来提高水稻的抗旱性^[69]。在一个大型回交育种计划中,使用了三个轮回亲本和 203 个对水稻多种非生物胁迫具有耐受性的供体系,产生了大量非生物胁迫耐受性增强的渗入系^[3]。

3.6. 标记辅助选择分子方法

氮通过改善其他与产量相关的特性,如穗数、千粒重和小穗肥力,提高水稻产量^[36]。此外,氮缺乏会导致植物生长放缓,导致产量下降^[128]。对低氮胁迫的耐受性是水稻长期生产的关键品质。根对于各种任务至关重要,包括吸水和营养效率、生理功能、锚定和机械支撑,它们是植物与土壤环境中许多生物和非生物挑战之间的主要联系^[104]。根系对氮缺乏的反应似乎高度依赖于当前的环境、植物物种和谷类作物的个体差异^[56]。在水稻育种计划中,根的特征,如长度、总数、根冠干重和总干重都是显著的^[63]。定量基因诱导的表型变异可能因不同的等位基因组合而异,可能导致重要特征的持续变异。这些多基因性状是通过数量性状基因座(QTL)定位进行研究的。QTL 分析的优点是让研究人员能够同时观察大量的遗传成分和基因座之间的相互作用。这与生长相关成分尤其相关,这些成分主要受大量基因的影响^[94]。QTL 只能在一种条件下表达,但当条件改变时,它们会产生影响。自然变异有可能鉴定出营养吸收和利用效率提高的遗传物质,利用自然变异进行的 QTL 分析已经揭示了与营养缺乏有关的基因^[95]。在另一项研究中,从“Shenzhen 97”/“Minguk 63”的重组自交系(RIL)群体中定位了一些耐 LN 的 QTL,并发现了一些与负责 N 组装和分配的基因座平行的 QTL 的位置,如 NADH-GOGAT、GS 和 GDH2^[70]。

根的形态和生理特征受 QTL 控制。初生根、不定根和侧根的根长、重量、总数、厚度和密度都是根结构系统的一部分^[86]。另一方面,根系结构系统的研究很难在土壤条件下进行。为了克服这些限制,已经进行了许多研究,通过使用各种映射种群在水培环境中种植水稻幼苗来研究根系结构^[88]。水培实验中发现的根长 QTL 有助于提高田间粮食产量^[87]。在正常和应力场条件下,使用类似的技术来识别负责更好根系结构的 QTL^[98]。目前的研究旨在表征不同氮水平下水稻幼苗根系结构和发育的遗传基础,将有助于对具有优良根系结构和发展系统的水稻品系进行分类,以及使用分子辅助标记培育具有低氮耐受性的水稻种质。

由于 NUE 成分的筛选既复杂又耗时,因此提高 NUE 是通过传统的植物育种程序提高粮食产量。根系与 AMF 的联系,以及根系结构及其与氮供应的相互作用^[72],对于 NUE 的增强至关重要。然而,在田间对小麦

根系进行表型分析是一项艰巨的任务^[79]。

3.7. 转基因谷物作物中的 NUE 植物

参与转基因过程的 25 个基因包括氨基酸生物合成、易位、氮再活化和衰老、信号传导和氮调节蛋白以及 C/N 储存蛋白。主要氮代谢的基因包括在该转基因中 (NR、GS 和 GOGAT 酶的基因, 即 Fad-GOGAT 和 NADH-GOGAT)。在改善 NUE 方面, 这些转基因产生了相互矛盾的结果^[81]。另一方面, OsNADHGOGAT 在水稻中在其自身启动子的指导下过度表达, 导致小穗重量显著增加 (高达 80%), 而株高或小穗数量没有变化^[123]。根据这项研究, NADH-GOGAT 的过度表达可以作为水稻和其他谷物作物氮利用和籽粒灌浆的关键步骤。因此, 次生氮同化基因似乎是提高包括小麦在内的谷物 NUE 的有前途的选择。

还利用转基因产生了许多其他酶的转基因, 包括 (1) 参与 NH₄⁺ 同化的 GDH^[71] (2) 参与氨基酸再活化和易位的 AS^[80]、(3) AS-pat 和 (4) Aliant^[24]。用组成型启动子过表达 ASN1 的拟南芥植物在种子蛋白和对氮的耐受性方面显示出幼苗中 NUE 的增加短缺^[68]。

由组织特异性 OsAnt1 启动子驱动的大麦阿利安特互补 DNA (cDNA) 的引入产生了转基因水稻^[99]。生物量和粮食产量的增加, 以及这些植物中关键代谢产物和硝酸盐水平的显著变化, 都证实了 NUE 的增加。然而, 无论是在低氮还是高氮环境下, 利用组成型或组织特异性启动子在甘蓝型油菜中过度表达 AspAT 对 NUE 都没有任何优势^[120]。

然而, 在田间和 / 或实验室研究中, AlaAT 过表达的转基因甘蓝型油菜和水稻植物在低氮条件下表现出生物量和种子产量的增加^[99]。根据^[17], 在组织特异性启动子的指导下过度表达 AlaAT 的转基因水稻提高了 NUE。

由于植物对氮的吸收、运输和消化固有的复杂性, 针对 NUE 和相关性状的特定途径进行转基因的转基因作物的成功率有限。转基因沉默也限制了转基因的潜在效用。根据最近的发现, 精确修饰内源性 RNA 调控网络有可能提高作物的 NUE。现在人们普遍认为, 一种或多种 miRNA 或其 TM 可用于控制各种特征^[53]。

3.8 低氮胁迫下不同作物的育种重要性

已经发现小麦在 NUpE 和 NUtE 方面都具有遗传多样性: 在 20 个优质冬小麦品种中也发现了氮相关植物指标 (籽粒产量、籽粒氮百分比、总氮吸收和花后氮吸收) 的遗传变异^[16]。施氮速率, 其次是生长阶段, 最后是基因型, 是影响植物和作物性能的最重要因素。此外, N 从所有品种的所有营养器官中被再活化, 效率在 80%-85% 之间; 在另一项涉及 16 个不同小麦品种的研究中, 在高氮条件和轻度氮胁迫下, 论文前氮积累而不是论文后氮再活化影响了籽粒产量和籽粒氮含量的遗传变异^[42]。

最近一项涉及 250 个欧洲优质小麦品种的研究发现, 基因型与 N 水平的相互作用、N_{ut}E 的遗传力、N 收获指数 (NHI) 和 NUE 都是高度可遗传的^[55]。土壤中的氮含量对于揭示小麦吸收和利用效率的遗传表达至关重要。在低氮水平下, NUE 的吸收和总体上升表现更强^[59]。NHI 评估的利用效率在土壤中的高氮水平下、在高氮供应下进行的育种计划中表现得更好, 在低氮条件下获得更好作物性能的独特遗传变异可以用来产生即使在低氮供应条件下也具有优异作物性能的基因型^[83]。

水稻是世界上约一半人口的主要粮食作物, 到 2050 年, 水稻产量必须增长 70%, 以满足世界不断增长的人口需求^[45]。使用氮肥可以显著提高水稻产量^[5]。培育改良 NUE 水稻品种可能是减少水稻种植中氮肥使用的一种方法^[58]。在低氮输入条件下,^[60] 评估了两个氮高效品种和两个氮低效品种的粮食产量, 报告称低氮率下的高粮食产量与更深的根系、增强的根系氧化活性、更高的粮食产量和更高的光合 NUE 有关。

根据^[121], 我国不同品种在抽穗期总氮吸收 (TNHD)、灌浆期总氮摄取 (TNGF)、成熟期总氮摄入 (TNPM)、粮食生产氮利用效率 (NUEg)、粮食产量氮利用率 (NUEb) 和 NHI 方面存在显著差异。根据^[121]的研究结果, NUEg 与 NUEb 和 NHI 显著正相关, 而与籽粒、叶片和茎中的 N 浓度呈负相关。NUEg 与叶片和茎中氮浓度之间的二次关联表明, 当 NUEg 增加时, NUEg 的改善依赖于较低的叶片氮浓度。籽粒灌浆期的 NUEg、生物量、每穗小穗数和日产量均呈强正相关。NUEb 或 NHI 受大多数生长特征的影响。TNPM 和 NUEg 的遗传育种都取得了相当大的进步。

^[121] TNPM 和 NUEg 的研究与以下植物性状有关: 主要植物参数可用于计算 TNPM: 总生长持续时间、抽穗时株高、抽穗时叶面积指数、抽穗前作物生长速率、抽穗时生物量和籽粒灌浆百分比均与 TNPM 显著正相关, 但灌浆期的生物量积累与抽穗期的穗氮浓度呈负相关。在低氮率下, TNPM 的改善需要在抽穗前通过基因刺激植物发育。氮对碳水化合物分配、硝酸盐还原效率以及衰老组织和储存功能中氮的再活化的影响都会影响氮的利用效率^[41]。在低 NUEg 水平下, NUEg 的变化是由成熟时叶氮浓度的变化引起的, 而 NUEg 额外增加是由茎氮浓度的降低引起的。NUEg 与小麦整个灌浆期的生物量积累、每穗小穗数和每日粮食产量显著正相关, 表明延迟叶片衰老是在低氮供应下提高 NUEg 的关键特征^[41]。与抽穗前作物快速发育相关的植物特征可以用来提高 TNPM, 但 NUEg 的增加需要生物量的积累和大穗^[121]。

4. 总结与结论

大部分作物损失是由非生物胁迫引起的, 占有收获损失的一半以上。根据几项研究发现, 盐和干旱胁迫对植物的生长、发育、生理和生产有不利影响。在上个世纪, 传统的植物育种不仅在提高作物质量和产量方面

发挥了重要作用, 而且在增强非生物胁迫抗性方面也发挥了重要的作用, 如低氮、耐旱和耐盐性。然而, 建立耐非生物胁迫的品种 / 杂交种需要更长的时间。正在开发对低氮、干旱、盐碱、高温和营养缺乏具有更好抵抗力的作物品种 / 系 / 杂交种, 用更少的水来满足全球粮食需求的一个关键选择是使用传统和分子育种技术以及基因工程。传统育种知识与标记辅助选择相结合, 使利用基因型数据在易干旱环境中提高和维持生产力, 从而更容易、更有效地诱导作物的耐旱性。未来的植物育种家需要在植物育种、遗传学、基因组学、统计学、实验设计、遗传多样性和种质管理方面的知识、能力和经验才能取得成功。

他们必须是优秀的沟通者, 并且能够在多学科团队中很好地工作。要想利用传统育种或生物技术方法产生改良的基因型, 就需要了解作物耐旱和耐盐的遗传基础。由于作物科学和遗传技术的快速发展, 育种家必须不断更新他们的知识和技能, 以保持最新水平。尽管科学家们正在努力提高各种具有商业意义的作物的平均产量, 但由于非生物和生物压力的加剧, 进展甚微。因此, 迫切需要制定提高粮食产量的方法, 特别是在世界上面临挑战的地区。目前的目标是创建 MAS 程序, 以加快育种过程, 提高选择效率, 并使国家农业研究和推广系统 (NARES) 的合作伙伴能够负担得起。

参考文献

- [1] Abay, F.; Bjorn tad, A. Specific adaptation of barley varieties in different locations in Ethiopia. *Euphytica* 2009, 167, 181-195.
- [2] Alam, A. K. M. M., Ahmed, S., Begum, M. And Sultan, M. K. (2008). Heterosis and Combining.
- [3] Ali, A. J., Xu, J. L., Ismail, A. M., Fu, B. Y., Vijayakumar, C. H. M., Gao, Y. M., Domingo, J., Maghirang, R., Yu, S. B., Gregorio, G., Yanagihara, S., Cohen, M., Carmen, B., Mackill, D. and Li, Z. K., 2006. Hidden diversity for abiotic and biotic stress tolerances in the primary gene pool of rice revealed by a large backcross breeding program. *Field Crops Res.*, 97: 66-76.
- [4] Andersen, J. R. and Lübberstedt, T., 2003. Functional markers in plants. *Trends in plant science*, 8 (11), pp. 554-560.
- [5] Andrews, R. W., Pollard, A. and Pearce, J. M., 2013. The effects of snowfall on solar photovoltaic performance. *Solar Energy*, 92, pp. 84-97.
- [6] Ashraf, M. and McNeilly, T., 1988. Variability in salt tolerance of nine spring wheat cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 160 (1), pp. 14-21.
- [7] Atkinson, J. A., L. U. Wingen, M. Griffiths, M. P. Pound, O.Gaju, M. J. Foulkes, J. Le Gouis, S. Griffiths, M. J. Bennett, J. King, and D. M. Wells, 2015: Phenotyping pipeline reveals major seedling root growth QTL in hexaploid wheat. *J. Exp. Bot.* 66, 2283-2292.
- [8] Badu-Apraku, B., Fakorede, M. A. B., Oyekunle, M. And Akinwale, R. O. (2011b). Selection and exploitation of heterosis in crops. *An International Symposium, Mexico*. Pp 11.
- [9] Badu-Apraku, B., Oyekunle, M., Fakorede, M. A. B., Vroh, I., O Akinwale, R. and Aderounmu, M., 2013. Combining ability, heterotic patterns and genetic diversity of extra-early yellow inbreds under contrasting environments. *Euphytica*, 192 (3), pp. 413-433.
- [10] Baenziger, M. And Lafitte, H. R. (1997). Efficiency of secondary traits for improving maize for low-nitrogen target environments. *Crop Science* 37: 1110-1117.
- [11] Baker, H. G., Opler, P. A. and Baker, I., 1978. A comparison of the amino acid complements of floral and extra floral nectars. *Botanical Gazette*, 139 (3), pp. 322-332.
- [12] Banziger, M. and Diallo, A. O., 2004. Progress in developing drought and N stress tolerant maize cultivars for eastern and southern Africa. In *Integrated approaches to higher maize productivity in the new millennium. Proceedings of the 7th eastern and southern Africa regional maize conference, CIMMYT/KARI, Nairobi, Kenya* (pp. 189-194).
- [13] Bänziger, M., Betrán, F. J. and Lafitte, H. R., 1997. Efficiency of high-nitrogen selection environments for improving maize for low-nitrogen target environments. *Crop Science*, 37 (4), pp. 1103-1109.
- [14] Edmeades, G. O., Bolaños, J., Chapman, S. C., Lafitte, H. R. and Bänziger, M., 1999. Selection improves drought tolerance in tropical maize populations: I. Gains in biomass, grain yield, and harvest index. *Crop science*, 39 (5), pp. 1306-1315.
- [15] Bänziger, M. and Long, J., 2000. The potential for increasing the iron and zinc density of maize through plant-breeding. *Food and Nutrition Bulletin*, 21 (4), pp. 397-400.
- [16] Barraclough, P. B., Lopez-Bellido, R. and Hawkesford, M. J., 2014. Genotypic variation in the uptake, partitioning and remobilization of nitrogen during grain-filling in wheat. *Field Crops Research*, 156, pp. 242-248.
- [17] Beatty, I. D. and Gerace, W. J., 2009. Technologyenhanced formative assessment: A research-based pedagogy for teaching science with classroom response technology. *Journal of Science Education and Technology*, 18 (2), pp. 146-162.
- [18] Hemmerle, H., Burger, H. J., Below, P., Schubert, G., Rippel, R., Schindler, P. W., Paulus, E. and Herling, A. W., 1997. Chlorogenic acid and synthetic chlorogenic acid

derivatives: novel inhibitors of hepatic glucose-6-phosphate translocase. *Journal of medicinal chemistry*, 40 (2), pp. 137-145.

[19] Betrán, F. J., Ribaut, J. M., Beck, D. and De León, D. G., 2003. Genetic diversity, specific combining ability, and heterosis in tropical maize under stress and nonstress environments. *Crop Science*, 43 (3), pp. 797-806.

[20] Beyene, Y., Katoh, S., WoldeGabriel, G., Hart, W. K., Uto, K., Sudo, M., Kondo, M., Hyodo, M., Renne, P. R., Suwa, G. and Asfaw, B., 2013. The characteristics and chronology of the earliest Acheulean at Konso, Ethiopia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (5), pp. 1584-1591.

[21] Bharath, S. T., Jayaraman, S. and Nagar, V., 2013. Exit as governance: An empirical analysis. *The Journal of Finance*, 68 (6), pp. 2515-2547.

[22] Blum, L. and Stell, G., 1979. Polydisperse systems. I. Scattering function for polydisperse fluids of hard or permeable spheres. *The Journal of Chemical Physics*, 71 (1), pp. 42-46.

[23] Cañas, A. I. and Camarero, S., 2010. Laccases and their natural mediators: biotechnological tools for sustainable ecofriendly processes. *Biotechnology advances*, 28 (6), pp. 694-705.

[24] Berry, P., Foulkes, J., Carvalho, P., Teakle, G., White, P., White, C. and Roques, S., 2011. Breeding oilseed rape with a low requirement for nitrogen fertiliser. HGCA Project Report, (479).

[25] Chang, M. M., Leeman, S. E. and NIAL, H. D., 1971. Amino-acid sequence of substance P. *Nature New Biology*, 232 (29), pp. 86-87.

[26] Craswell, E. T. and Godwin, D. C., 1984. The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals in different climates. *Advances in plant nutrition (USA)*.

[27] Cui, J., Chi, X. Z., Ding, H. T., Lin, L. T., Yang, Z. C. and Yan, G. Z., 2009. Transient response and stability of the AGCPI closed-loop controlled MEMS vibratory gyroscopes. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19 (12), p. 125015.

[28] Dawson, J. C., Huggins, D. R. and Jones, S. S., 2008. Characterizing nitrogen use efficiency in natural and agricultural ecosystems to improve the performance of cereal crops in low-input and organic agricultural systems. *Field Crops Research*, 107 (2), pp. 89-101.

[29] De Fraiture, C., Molden, D. and Wichelns, D., 2010. Investing in water for food, ecosystems, and livelihoods: An overview of the comprehensive assessment of water management in agriculture. *Agricultural Water*

Management, 97 (4), pp. 495-501.

[30] Derera, J., Tongoona, P., Vivek, B. S. and Laing, M. D., 2008. Gene action controlling grain yield and secondary traits in southern African maize hybrids under drought and nondrought environments. *Euphytica*, 162 (3), pp. 411-422.

[31] Dewey, O. R., Hartley, G. S. and MacLauchlan, J. W. G., 1962. External leaf waxes and their modification by root treatment of plants with trichloroacetate. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 155(961), pp. 532-550.

[32] Meena, H. P., Bainsla, N. K. and Yadav, D. K., 2016. Breeding for abiotic stress tolerance in crop plants. *Recent advances in plant stress physiology*. Daya Publishing House, New Delhi, pp. 329-378.

[33] Raju, P. S., Clark, R. B., Ellis, J. R., Duncan, R. R. and Maranville, J. W., 1990. Benefit and cost analysis and phosphorus efficiency of VA mycorrhizal fungi colonizations with sorghum (*Sorghum bicolor*) genotypes grown at varied phosphorus levels. In *Plant Nutrition—Physiology and Applications* (pp. 165-170). Springer, Dordrecht.

[34] Duvick, D. N., 1997. What is yield. *Developing drought and low N-tolerant maize*. CIMMYT, El Batán, Mexico, pp. 332-335.

[35] Wheeler, D. M., Edmeades, D. C., Christie, R. A. and Gardner, R., 1992. Effect of aluminium on the growth of 34 plant species: a summary of results obtained in low ionic strength solution culture. *Plant and Soil*, 146 (1), pp. 61-66.

[36] Fageria, N. K., Baligar, V. C. and Zobel, R. W., 2007. Yield, nutrient uptake, and soil chemical properties as influenced by liming and boron application in common bean in a no-tillage system. *Communications in soil science and plant analysis*, 38 (11-12), pp. 1637-1653.

[37] Hill, W. G. and Mackay, T. F., 2004. *DS Falconer and Introduction to quantitative genetics*. *Genetics*, 167 (4), pp. 1529-1536.

[38] Cheverud, J. M., 1984. Quantitative genetics and developmental constraints on evolution by selection. *Journal of theoretical biology*, 110 (2), pp. 155-171.

[39] Fess, T. L., Kotcon, J. B. and Benedito, V. A., 2011. Crop breeding for low input agriculture: a sustainable response to feed a growing world population. *Sustainability*, 3 (10), pp. 1742-1772.

[40] Fisher, S. S., McGreevy, M., Humphries, J. and Robinett, W., 1987, January. Virtual environment display system. In *Proceedings of the 1986 workshop on Interactive 3D graphics*(pp. 77-87).

[41] Foulkes, M. J., Hawkesford, M. J., Barraclough, P. B., Holdsworth, M. J., Kerr, S., Kightley, S. and Shewry, P.

R., 2009. Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects. *Field Crops Research*, 114 (3), pp. 329-342.

[42] Gaju, O., Allard, V., Martre, P., Le Gouis, J., Moreau, D., Bogard, M., Hubbart, S. and Foulkes, M. J., 2014. Nitrogen partitioning and remobilization in relation to leaf senescence, grain yield and grain nitrogen concentration in wheat cultivars. *Field Crops Research*, 155, pp. 213-223.

[43] Gallais, A. and Hirel, B., 2004. An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in maize. *Journal of experimental botany*, 55 (396), pp. 295-306.

[44] Gethi, J. G. and Smith, M. E., 2004. Genetic responses of single crosses of maize to *Striga hermonthica* (Del.) Benth. and *Striga asiatica* (L.) Kuntze. *Crop science*, 44 (6), pp. 2068-2077.

[45] Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M. and Toulmin, C., 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *science*, 327 (5967), pp. 812-818.

[46] Pradheep, K., Gomez, S. M. and Kalamani, A., 2003. Possibilities of Broadening the Plant Wealth of Horticulture from Existing. *Asian Journal of Plant Science*, 2 (9), pp. 719-730.

[47] Good, A. G., Shrawat, A. K. and Muench, D. G., 2004. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? *Trends in plant science*, 9 (12), pp. 597-605.

[48] Goodnight, T. M., 1997. Perceptions and attitudes of selected swine producers and non-swine producers concerning certain social and environmental issues (Doctoral dissertation, Oklahoma State University).

[49] Gregorio, G. B. and Senadhira, D., 1993. Genetic analysis of salinity tolerance in rice (*Oryza sativa* L.). *Theoretical and applied Genetics*, 86 (2), pp. 333-338.

[50] Griffing, B. R. U. C. E., 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian journal of biological sciences*, 9 (4), pp. 463-493.

[51] Guei, R. G. and Wassom, C. E., 1992. Inheritance of some drought adaptive traits in maize. I: Interrelationships between yield, flowering, and ears per plant. *Maydica*, 37 (2), pp. 157-164.

[52] Waddell, J. T., Gupta, S. C., Moncrief, J. F., Rosen, C. J. and Steele, D. D., 1999. Irrigation and nitrogen management effects on potato yield, tuber quality, and nitrogen uptake. *Agronomy Journal*, 91 (6), pp. 991-997.

[53] Purba, J., Sharma, R. K., Jat, M. L., Thind, H.

S., Gupta, R. K., Chaudhary, O. P., Chandna, P., Khurana, H. S., Kumar, A., Uppal, H. S. and Uppal, R. K., 2015. Site-specific fertilizer nitrogen management in irrigated transplanted rice (*Oryza sativa*) using an optical sensor. *Precision Agriculture*, 16 (4), pp. 455-475.

[54] Hallauer, A. R., Russell, W. A. and Lamkey, K. R., 1988. Corn breeding. *Corn and corn improvement*, 18, pp. 463-564.

[55] Kopke, U., Athmann, M., Han, E. and Kautz, T., 2015. Optimising cropping techniques for nutrient and environmental management in organic agriculture. *Sustainable Agriculture Research*, 4 (526-2016-37934).

[56] Bruun, S., Luxhøi, J., Magid, J., de Neergaard, A. and Jensen, L. S., 2006. A nitrogen mineralization model based on relationships for gross mineralization and immobilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 38 (9), pp. 2712-2721.

[57] Hochholdinger, F., and R. Tuberosa, 2009: Genetic and genomic dissection of maize root development and architecture. *Curr. Opin. Plant Biol.* 12, 172—177.

[58] Cai, C., Hu, S., Guo, J., Shi, Y., Xie, G. J. and Yuan, Z., 2015. Nitrate reduction by denitrifying anaerobic methane oxidizing microorganisms can reach a practically useful rate. *Water Research*, 87, pp. 211-217.

[59] Huggins, D. R. and Pan, W. L., 2003. Key indicators for assessing nitrogen use efficiency in cereal-based agroecosystems. *Journal of crop production*, 8 (1-2), pp. 157-185.

[60] Ju XT, Xing GX, Chen XP, Zhang SL, Zhang LJ, Liu XJ, Cui ZL, Christie P, Zhang FS (2009) Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proc Natl Acad Sci USA* 106: 3041–3046.

[61] Ju, C., Buresh, R. J., Wang, Z., Zhang, H., Liu, L., Yang, J., et al. (2015). Root and shoot traits for rice varieties with higher grain yield and higher nitrogen use efficiency at lower nitrogen rates application. *Field Crops Res.* 175, 47–55. doi: 10.1016/j.fcr.2015.02.007.

[62] Kamoshita, A., Rodriguez, R., Yamauchi, A. and Wade, L., 2004. Genotypic variation in response of rainfed lowland rice to prolonged drought and rewetting. *Plant Production Science*, 7 (4), pp. 406-420.

[63] Kanbar, A., Toorchi, M. and Shashidhar, H., 2009. Relationship between root and yield morphological characters in rainfed low land rice (*Oryza sativa* L.). *Cereal Research Communications*, 37 (2), pp. 261-268.

[64] Kempthorne, O., 1957. An introduction to genetic statistics.

- [65] Kochian, L. V., 2012. Rooting for more phosphorus. *Nature*, 488 (7412), pp. 466-467.
- [66] Thind, H. S., Kumar, A., Gupta, R. K., Kaul, A. and Vashistha, M., 2012. Fixed-time adjustable dose site-specific fertilizer nitrogen management in transplanted irrigated rice (*Oryza sativa* L.) in South Asia. *Field Crops Research*, 126, pp. 63-69.
- [67] Lafitte, H. R. and Edmeades, G. O., 1994. Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize I. Selection criteria. *Field Crops Research*, 39 (1), pp. 1-14.
- [68] Lam, H. M., Wong, P., Chan, H. K., Yam, K. M., Chen, L., Chow, C. M. and Coruzzi, G. M., 2003. Overexpression of the *ASN1* gene enhances nitrogen status in seeds of *Arabidopsis*. *Plant physiology*, 132 (2), pp. 926-935.
- [69] Hardgrove, S. J. and Livesley, S. J., 2016. Applying spent coffee grounds directly to urban agriculture soils greatly reduces plant growth. *Urban forestry & urban greening*, 18, pp. 1-8.
- [70] Lian, X., Xing, Y., Yan, H., Xu, C., Li, X. and Zhang, Q., 2005. QTLs for low nitrogen tolerance at seedling stage identified using a recombinant inbred line population derived from an elite rice hybrid. *Theoretical and Applied Genetics*, 112 (1), pp. 85-96.
- [71] Gilbody, S., Lewis, S. and Lightfoot, T., 2007. Methylene tetrahydrofolate reductase (*MTHFR*) genetic polymorphisms and psychiatric disorders: a HuGE review. *American journal of epidemiology*, 165 (1), pp. 1-13.
- [72] Liu, M., Liu, R. and Chen, W., 2013. Graphene wrapped Cu₂O nanocubes: non-enzymatic electrochemical sensors for the detection of glucose and hydrogen peroxide with enhanced stability. *Biosensors and Bioelectronics*, 45, pp. 206-212.
- [73] Maiti, R. K., Amaya, L. E. D., Cardona, S. I., Dimas, A. M. O., de la rosaibarra, M. And Castillo, H. D., 1996. Genotypic variability in maize cultivars (*Zea mays* L.) For resistance to drought and salinity at the seedling stage. *Journal of Plant Physiology*, 148: 741-744.
- [74] Maiti, R. K., dela Rosa-Ibarra, M. And Sandoval, N. D., 1994. Genotypic variability in glossy sorghum lines for resistance to drought, salinity and temperature stress at the seedling stage. *Journal of Plant Physiology*, 143: 211-244.
- [75] Makumbi, D., Betrán, J. F., Bänziger, M. and Ribaut, J. M., 2011. Combining ability, heterosis and genetic diversity in tropical maize (*Zea mays* L.) under stress and non-stress conditions. *Euphytica*, 180 (2), pp. 143-162.
- [76] Mallik, S., 1995. Rice germplasm evaluation and improvement for stagnant flooding. KT, editor. *Rainfed lowland rice: agricultural research for high-risk environments*, Manila (Philip pines): International Rice Research Institute. p 97-109.
- [77] Mallik, S., Mandal, B. K., Sen, S. N. and Sarkarung, S., 2002. Shuttle Breeding: an effective tool for rice varietal improvement in rainfed lowland ecosystem in eastern India. *Curr. Sci.*, 83 (9): 1097-1102.
- [78] Manavalan, L. K., T. Musket, and H. T. Nguyen, 2011: Natural genetic variation for root traits among diversity lines of maize (*Zea mays* L.). *Maydica* 56, 1-10.
- [79] Manske, G. G. B., I. J. Ortoz-Monasterio, and P. L. G. Vlek. 2001. Techniques for measuring genetic diversity in roots. p. 208-218. In: M. P. Reynolds, J. I. Ortiz-Monasterio, and A. MacNab (eds), *Application of physiology in wheat breeding*. CIMMYT, Mexico, DF.
- [80] Masclaux-Daubresse, C., Reisdorf-Cren, M., Pageau, K., Lelandais, M., Grandjean, O., Kronenberger, J., Valadier, M. H., Feraud, M., Jouglet, T. and Suzuki, A., 2006. Glutamine synthetase-glutamate synthase pathway and glutamate dehydrogenase play distinct roles in the sink-source nitrogen cycle in tobacco. *Plant physiology*, 140 (2), pp. 444-456.
- [81] Masclaux-Daubresse, C., Daniel-Vedele, F., Dechorgnat, J., Chardon, F., Gauffichon, L. and Suzuki, A., 2010. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of botany*, 105 (7), pp. 1141-1157.
- [82] Meseka, S. K., Menkir, A. And Ibrahim, A. E. S. (2006). Genetic analysis of performance of Nitrogen use in maize. Pp. 316-319.
- [83] Muellner, A. E., Mascher, F., Schneider, D., Ittu, G., Toncea, I., Rolland, B. and Löschenberger, F., 2014. Refining breeding methods for organic and low-input agriculture: analysis of an international winter wheat ring test. *Euphytica*, 199 (1), pp. 81-95.
- [84] Murphy, K., Lammer, D., Lyon, S., Carter, B. and Jones, S. S., 2005. Breeding for organic and low-input farming systems: An evolutionary-participatory breeding method for inbred cereal grains. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 20 (1), pp. 48-55.
- [85] Murphy, K. M., Campbell, K. G., Lyon, S. R. and Jones, S. S., 2007. Evidence of varietal adaptation to organic farming systems. *Field Crops Research*, 102 (3), pp. 172-177.
- [86] Obara, M., W. Tamura, T. Ebitani, M. Yano, T. Sato and T. Yamaya. 2010. Fine mapping of *qrl6. 1*, a major QTL for root length of rice seedlings grown under a wide range of

- NH₄⁺ concentrations in hydroponic conditions. *Theor. Appl. Genet.*, 21: 535-547.
- [87] Obara, M., T. Takeda, T. Hayakawa and T. Yamaya. 2011. Mapping quantitative trait loci controlling root length in rice seedlings grown with low or sufficient supply using backcross recombinant lines derived from a cross between *Oryza sativa* L. And *Oryza glaberrima* Steud. *Soil Sci. And Plant Nutr.*, 57: 80-92.
- [88] Ogawa, S., M. O. Valencia, M. Ishitani and M. G. Selvaraj. 2014. Root system architecture variation in response to different NH₄⁺ concentrations and its association with nitrogen deficient tolerance traits in rice. *Acta Phys. Plantarum.*, 36: 2361-2372.
- [89] Paez-Garcia, A., Motes, C. M., Scheible, W. R., Chen, R., Blancaflor, E. B. and Monteros, M. J., 2015. Root traits and phenotyping strategies for plant improvement. *Plants*, 4 (2), pp. 334-355.
- [90] Paroda, R. S. and Arora, R. K., 1986. and their Conservation: Indian Perspective. *Conservation for Productive Agriculture: Commemorative Volume Released on the Eightieth Birthday of Dr. BP Pal*, p. 73.
- [91] Quarrie, s. a., 1996. New molecular tools to improve the efficiency of breeding for increased drought resistance. *Plant growth regulators*, 20: 167-178.
- [92] Ramage, R. T., 1980. Genetic methods to breed salt tolerance in plants. In *Genetic engineering of osmoregulation* (pp. 311-318). Springer, Boston, MA.
- [93] Raun, W. R. and Johnson, G. V., 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy journal*, 91 (3), pp. 357-363.
- [94] Rebouillat, P., Vidal, R., Cravedi, J. P., Taupier-Letage, B., Debrauwer, L., Gamet-Payraastre, L., Touvier, M., Herberg, S., Lairon, D., Baudry, J. and Kesse-Guyot, E., 2021. Estimated dietary pesticide exposure from plant-based foods using NMF-derived profiles in a large sample of French adults. *European Journal of Nutrition*, 60 (3), pp. 1475-1488.
- [95] Rengel, Z. And P. Marschner. 2005. Nutrient availability and management in the rhizosphere: exploiting genotypic differences. *New Phytol.*, 168: 305-312.
- [96] Saito, R., Cranmer, B. K., Tessari, J. D., Larsson, L., Mehaffy, J. M., Keefe, T. J. and Reynolds, S. J., 2009. Recombinant factor C (rFC) assay and gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) analysis of endotoxin variability in four agricultural dusts. *Annals of occupational hygiene*, 53 (7), pp. 713-722.
- [97] Scharf, P. C., Schmidt, J. P., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Hong, S. Y., Lory, J. A. and Davis, J. G., 2002. Remote sensing for nitrogen management. *Journal of soil and water conservation*, 57 (6), pp. 518-524.
- [98] Nobuhiro, T., Shimizu, A., Kabeya, N., Tsuboyama, Y., Kubota, T., Abe, T., Araki, M., Tamai, K., Chann, S. and Keth, N., 2007. Year-round observation of evapotranspiration in an evergreen broadleaf forest in Cambodia. In *Forest environments in the Mekong river basin* (pp. 75-86). Springer, Tokyo.
- [99] Shrawat, A. K., R. T. Carroll, M. DePauw, G. Taylor, and A. G. Good. 2008. Genetic engineering of improved nitrogen use efficiency in rice by the tissue specific expression of alanine amino transferase. *Plant Biotechnol. J.* 6: 722-732.
- [100] Shull, G. H. "Beginning of the heterosis concept in heterosis. Iowa State." (1952): 419-428.
- [101] Singh, K. K., Talat, M. and Hasan, S. H., 2006. Removal of lead from aqueous solutions by agricultural waste maize bran. *Bioresource Technology*, 97 (16), pp. 2124-2130.
- [102] Singh, RK., Gregrio, G. B. and Ismail, A. M., 2008. Breeding rice varieties with tolerance to salt stress. *J. Indian Soc. Coastal Agric. Res.*, 26 (1): 16-21.
- [103] Singh, B. D. (2003). *Plant Breeding, Principles and Methods*. Kalyani Publishers. New Delhi.
- [104] Smith, S. And I. D. Smet. 2012. Root system architecture: insights from Arabidopsis and cereal crops. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, 367 (1595): 1441-1452.
- [105] Machikowa, T., Saetang, C. and Funpeng, K., 2011. General and specific combining ability for quantitative characters in sunflower. *Journal of Agricultural Science*, 3 (1), p. 91.
- [106] Sthapit, B., Rana, R., Eyzaguirre, P. and Jarvis, D., 2008. The value of plant genetic diversity to resource-poor farmers in Nepal and Vietnam. *International journal of agricultural sustainability*, 6 (2), pp. 148-166.
- [107] Song, Y., Sun, H., Li, M. and Zhang, Q., 2015. Technology application of smart spray in agriculture: A review. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 21 (3), pp. 319-333.
- [108] Tamilarasi, P. M., Arumugachamy, S., Anantha, M. S. and Utharasu, S., 2010. Identification of nitrogen (N) stress tolerant maize (*Zea mays* L.) inbred lines for low nitrogen input condition. *Indian Journal of Agricultural Research*, 44 (11), pp. 53-57.
- [109] Dublin, D. R. and Tanaka, N., 2014. Indigenous agricultural development for sustainability and "Satoyama". *Geography, Environment, Sustainability*, 7 (2), pp. 86-95.

- [110] Tilman DG, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S(2002) Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418: 671–677.
- [111] Tokatlidis IS, Koutroubas SD (2004) A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability. *Field Crops Res* 88: 103–114.
- [112] Trachsel, S., S. Kaeppler, K. Brown, and J. Lynch, 2011: Shovelomics: high throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. *Plant Soil* 341, 75–87.
- [113] Tsai, W. T., Chang, C. Y. and Lee, S. L., 1998. A low cost adsorbent from agricultural waste corn cob by zinc chloride activation. *Bioresource Technology*, 64 (3), pp. 211–217.
- [114] Collins, N. C., Tardieu, F. and Tuberosa, R., 2008. Quantitative trait loci and crop performance under abiotic stress: where do we stand? *Plant physiology*, 147 (2), pp. 469–486.
- [115] Tuberosa, R., 2012. Phenotyping for drought tolerance of crops in the genomics era. *Frontiers in physiology*, 3, p. 347.
- [116] Wang, Q., Wang, Y., Wang, Q. and Liu, J., 2014. Impacts of 9 years of a new conservational agricultural management on soil organic carbon fractions. *Soil and Tillage Research*, 143, pp. 1–6.
- [117] Wasson, A.; Richards, R.; Chatrath, R.; Misra, S.; Prasad, S. S.; Rebetzke, G.; Kirkegaard, J.; Christopher, J.; Watt, M. Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *J. Exp. Bot.* 2012, 63, 3485–3498.
- [118] Wasson, A. P., G. J. Rebetzke, J. A. Kirkegaard, J. Christopher, R. A. Richards, and M. Watt, 2014: Soil coring at multiple field environments can directly quantify variation in deep root traits to select wheat genotypes for breeding. *J. Exp. Bot.* 65, 6231–6249.
- [119] Watt, M.; Schneebeil, K.; Dong, P.; Wilson, I. W. The shoot and root growth of *Brachypodium* and its potential as a model for wheat and other cereal crops. *Funct. Plant Biol.* 2009, 36, 960–969.
- [120] Wolansky, M. A. 2005. Genetic manipulation of aspartate amino transferase levels in *Brassica napus*: Effects on nitrogen use efficiency. M. Sc. Thesis, University of Albert.
- [121] Wu, H., Zhang, Y., Yuan, Z. and Gao, L., 2016. A review of phosphorus management through the food system: identifying the roadmap to ecological agriculture. *Journal of cleaner production*, 114, pp. 45–54.
- [122] Xu, Y., R. Wang, Y. Tong, H. Zhao, Q. Xie, D. Liu, A. Zhang, B. Li, H. Xu, and D. An. 2014. Mapping QTLs for yield and nitrogen-related traits in wheat: Influence of nitrogen and phosphorus fertilization on QTL expression. *Theor. Appl. Genet.* 127: 59–72.
- [123] Yamaya T. M. Obara, H. Nakajima, S. Sasaki, T. Hayakawa, and T. Sato. 2002. Genetic manipulation and quantitative-trait loci mapping for nitrogen recycling in rice. *J. Expt. Bot.* 53: 917–25.
- [124] Yapi, A. M.; Kergna, A. O.; Debrah, S. K.; Sidibe, A.; Sanogo, O. Analysis of the Economic Impact of Sorghum and Millet Research in Mali; International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics: Andhra Pradesh, India, 2000.
- [125] Srivastava, R. B., Paroda, R. S., Sharma, S. C. and Yunus, M. D., 1989. Genetic variability and advance under four selection procedures in wheat pedigree breeding programme. *Theoretical and applied genetics*, 77 (4), pp. 516–520.
- [126] Zhan, A.; Lynch, J. P. Reduced frequency of lateral root branching improves N capture from Low-N soils in maize. *J. Exp. Bot.* 2015, doi: 10.1093/jxb/erv007.
- [127] Ju, X. T., Xing, G. X., Chen, X. P., Zhang, S. L., Zhang, L. J., Liu, X. J., Cui, Z. L., Yin, B., Christie, P., Zhu, Z. L. and Zhang, F. S., 2009. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (9), pp. 3041–3046.
- [128] Zhao, Y., Y. He, J. Sun, J. Zhang and Y. Zhan. 2018. Effects of nitrogen deficiency on physiology and growth of *Fraxinus mandshurica*. *Pak. J. Bot.*, 50 (1): 179–187.
- [129] Restuccia, D., Yang, D. T. and Zhu, X., 2008. Agriculture and aggregate productivity: A quantitative cross-country analysis. *Journal of monetary economics*, 55 (2), pp. 234–250.
- [130] DoVale, J. C. and Fritsche-Neto, R., 2015. Root phenomics. In *Phenomics* (pp. 49–66). Springer, Cham.
- [131] Cartea, M. E., Francisco, M., Lema, M., Soengas, P. and Velasco, P., 2010. Resistance of cabbage (*Brassica oleracea capitata* group) crops to *Mamestra brassicae*. *Journal of economic entomology*, 103 (5), pp. 1866–1874.