

李克亮,周志艳. 水稻氮肥精准管理技术研究进展[J]. 江苏农业科学,2019,47(12):18-25.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.12.004

水稻氮肥精准管理技术研究进展

李克亮^{1,2,3}, 周志艳^{1,2,3}

(1. 华南农业大学工程学院/广东省农业航空应用工程技术研究中心, 广东广州 510642; 2. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广东广州 510642; 3. 南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东广州 510642)

摘要:氮肥施用是水稻生产中比较重要,对水稻增产效益最高的环节,但目前我国水稻氮肥管理形式粗放,过量施用情况时有发生,这不仅增加了生产成本,还对环境造成污染。因此,进行氮肥施用精准管理研究,对水稻生产的提质增效有重要意义。对影响水稻氮肥吸收利用的主要因素进行深入分析,包括水稻品种、土壤理化性质、气候条件、水分管理、氮肥施用技术等 5 个方面;并对基于测土配方、生长模型、实地观测、遥感监测的主流水稻氮肥管理技术进行总结归纳,深入剖析当前我国水稻氮肥精准管理中所存在的主要问题;最后,提出解决我国水稻生产中氮肥过量施用问题的有效方法,并指出在未来水稻氮肥施用中,无人机遥感用于精准施氮决策将是重要的发展方向之一。水稻氮肥精准管理技术的研究对我国农业生产中化肥的减量施用具有重要意义。

关键词:水稻;氮素吸收;水稻生长模型;水稻氮肥管理;精细农业;遥感

中图分类号: S511.06;S143.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2019)12-0018-07

水稻是世界主要的粮食作物之一,在我国 2/3 的人口以水稻作为主食^[1],水稻生产意义重大。目前,我国水稻种植面积与产量分别占总粮食的 34.9%、48.4%^[2],水稻生产对保障我国粮食安全有重要的意义。但是,当前我国水稻生产中存在肥料施用量、总体利用率低的问题。水稻主要的施肥元素为氮、磷、钾,据 2013 年《中国三大粮食作物肥料利用率研究报告》报道,当前我国水稻生产中氮肥、磷肥、钾肥的利用率分别为 35%、25%、41%。而目前美国粮食作物氮肥利用率能够达到 50%,欧洲粮食作物氮肥利用率能达到 65%^[3]。氮是植物蛋白质、叶绿素重要组成元素,直接参与作物的光合作用和物质积累,影响水稻的生长,对水稻产量影响较大。目前,我国水稻种植中施肥量最高的是氮肥,过量施肥不仅增加了生产成本,还会带来一系列环境问题^[4],例如水体中含氧量降低,病虫害发生概率上升,土壤板结酸化、保水保肥能力降低、重金属污染、水体富营养化、温室效应等^[5-6]。因此,在水稻种植管理中,实现氮肥减施,节本增效愈加重要。

水稻氮素占水稻植株干物质的 0.3%~5.0%,其中 20% 被根部吸收利用,其余的氮运往地上部^[7]。在水稻的生殖生长期,水稻 60%~70% 的氮素转移到水稻稻谷中^[8-9]。水稻吸收氮素主要有 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 以及有机氮等形式。水稻是一种喜铵作物,水稻水田种植以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 吸收为主,但在旱作下水稻以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 吸收为主。在氮素胁迫时,会

造成水稻蛋白质、磷脂、核酸、叶绿素等物质合成受阻,使水稻表现出植株矮小、分蘖少、叶片发黄、产量下降等现象^[10]。因此,水稻对氮素的吸收利用对水稻的生长十分重要。

水稻施肥管理是水稻生产中必不可少的环节,其中氮肥施用比例最大,对水稻增产效益最高。目前,我国氮肥管理形式粗放,导致水稻氮肥利用率低、氮肥施用量大。水稻对氮肥的吸收过量会造成水稻根部将 H^+ 转移到土壤中,造成土壤酸化,影响水稻对氮素的吸收作用;当水稻体内氮高于水稻运转能力时,水稻会将多余的氮排入土壤中,造成无效氮循环^[7]。氮肥施用量增加使得水稻生产成本提高,导致稻谷缺乏价格优势。氮肥施用量大会增加病虫害的发生概率,提高管理成本,还会造成水体的富营养化、增加温室气体排放、土壤板结酸化、保水保肥能力降低、重金属污染等环境污染问题^[11-12]。因此,提高氮肥利用率显得尤为重要,水稻氮肥精准管理技术是解决阻碍我国水稻种植管理中肥料用量过量问题的重要方法之一。

本文拟对影响水稻氮肥吸收利用的主要因素进行深入分析,包括水稻品种、土壤理化性质、气候条件、水分管理、氮肥施用方式等 5 个方面,并对现有的主流水稻氮肥管理技术进行总结归纳,深入剖析氮肥管理中所存在的主要问题。在此基础上,提出解决我国水稻生产中氮肥过量施用问题的有效方法,并指出未来水稻氮肥施用技术的发展趋势,以期为我国农业生产中化肥的减量施用提供参考。

1 影响水稻氮肥吸收利用的主要因素研究

研究表明,随着水稻氮素吸收量的增加,氮素转移进稻谷中的量增多,从而导致产量提高^[13]。探明影响水稻氮肥吸收利用的主要因素,可为实施有针对性的氮肥精准管理、提高水稻氮肥利用率提供依据。因此,全面、深入地研究水稻氮肥吸收的影响因素不但可以提高水稻氮肥管理的科学性,更能推动我国水稻种植向精细化发展。

收稿日期:2018-03-05

基金项目:“十二五”国家“863”计划(编号:2013AA102303);国家自然科学基金(编号:31371539)。

作者简介:李克亮(1992—),男,安徽芜湖人,硕士,主要从事农业遥感及精准施肥管理技术研究。E-mail:1218088661@qq.com。

通信作者:周志艳,博士,教授,博士生导师,主要从事农业航空应用技术相关研究。E-mail:zyzhou@scau.edu.cn。

产量是水稻种植追求的主要目标之一,而水稻生长中物质的生产是水稻产量的主要基础。水稻生长中物质的生产包括蛋白质积累、叶绿素合成等,而这些都离不开水稻对氮素的吸收。而水稻光合作用、生长发育的因素对水稻氮素的吸收

利用均有影响;因此,研究水稻氮肥吸收利用率时,通常需要考虑水稻品种、土壤理化性质(pH 值、土壤水分、孔隙度、土壤氮素供应量等)、气候条件(CO₂ 浓度、光照度、降水量、气温)、水分管理、氮肥施用方式等 5 个方面(图 1)。

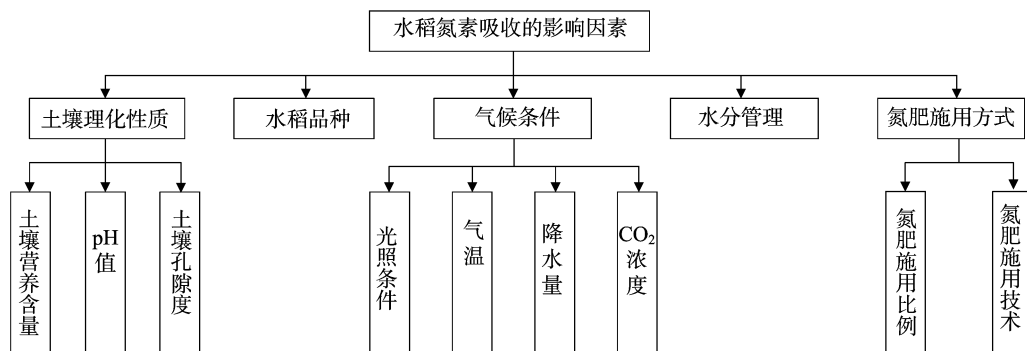


图1 水稻氮素吸收影响因素

1.1 水稻品种与水稻氮肥管理

不同水稻品种间存在产量差异,因此不同水稻品种对氮素的需求量不同。主要原因包括以下几点。

(1)不同品种水稻的基因型不同,造成水稻根系总吸收面积、氧化还原力、氮代谢酶活性等方面存在差异^[9,14-15],这直接影响了水稻对氮肥的吸收效率。

(2)不同水稻品种的遗传物质不同,会导致叶片结构的差异^[16],影响水稻光合作用效率和水稻对 CO₂ 的同化作用,进而影响水稻生长速率;而水稻生长需要合成蛋白质,需要吸收氮元素,间接影响了水稻对氮肥的需求量与吸收效率。

(3)水稻品种不同,其适应的环境也不同,直接影响水稻的生长,影响氮素的吸收。

不同品种对氮肥吸收作用不同,因此,在进行水稻精准施肥管理决策时,必须要考虑不同品种水稻的农艺要求及生长特性,进行区别对待。

1.2 土壤理化性质与水稻氮肥管理

土壤是由固体(土壤矿物质、有机质和微生物等)、液体(土壤水分)和气体(土壤孔隙中的空气类物质)组成的。土壤理化性质是构成土壤肥力的基础。土壤氮素是水稻植株中氮素营养供应的重要来源,例如抽穗期水稻植株约 85% 的氮素来源于土壤^[17]。土壤理化性质中的营养含量、pH 值、孔隙度等对水稻氮素吸收作用影响较大。因此,研究土壤理化性质对水稻氮肥管理的影响主要考虑土壤营养含量、土壤 pH 值、土壤孔隙度等 3 个因素。

1.2.1 土壤营养含量 土壤营养含量能被水稻吸收利用,特别是土壤中的碱解氮含量影响了水稻氮肥用量。研究表明,土壤耕层(0~30 cm)碱解氮含量与产量相关性最大^[18]。随氮素供应量增加,水稻的氮肥利用率减小,土壤氮素含量越高,氮肥施用量虽然减小,但水稻的氮肥利用率降低。土壤中的有效磷、速效钾含量能促进水稻对氮素的吸收作用、增加水稻氮肥利用率。土壤中的其他营养成分的缺失也会对水稻生长造成影响,如土壤中钠镁离子增多会抑制叶绿素合成,更会严重阻碍水稻的正常生长^[19]。因此,精细的氮肥管理须要对土壤营养含量进行检测,合理安排氮肥的施用。

1.2.2 土壤 pH 值 土壤 pH 值也是影响水稻氮肥吸收的重要因素。随土壤 pH 值升高,土壤中的氨态氮增加,稻田中的

NH₃ 挥发量增加,会降低氮肥的利用率^[20-21]。因此,氮肥施用时应避免与碱性肥料一起施用。另外,pH 值高的盐碱土中有机质含量少、肥力低、理化性质差,盐分离子的聚集会引起水稻生理性缺水,进而抑制氮肥吸收利用^[19]。土壤 pH 值偏低,会影响土壤中其他水稻养分的含量,如有效磷含量的降低。因此,土壤 pH 值与水稻氮素的吸收利用关系密切。

1.2.3 土壤孔隙度 土壤的孔隙度与土壤容重呈负相关,孔隙度越大,容重越小,耕层提供的水稻营养就越少。因此,土壤孔隙度影响了耕层土壤的养分供应总量。另外,土壤孔隙度直接关系土壤的透气性,影响了土壤中的空气成分如氧气含量等,含氧量增加能促进土壤硝化作用使 NH₄⁺-N 生成 NO₂⁻、NO₃⁻,有利于氮吸收;当土壤氧气含量不足时会发生反硝化作用,生成 N₂、N₂O^[22],进而造成氮肥吸收利用降低。因此,土壤孔隙度影响了水稻的氮素吸收,合适的稻田整地技术有助于水稻的氮素吸收。

虽然土壤理化性质对水稻氮肥的吸收有较大影响,在实际生产中需要及时获取土壤理化信息,进行精准施肥调控。但在实际应用中,当土样采集点增加,土样采集密度放大时,取土和事后分析化验工作量巨大,因此,通过取土样进行实验室分析化验的方法难以满足水稻精准用肥管理的需要。

1.3 气候因素与水稻氮肥管理

水稻生长与气候条件密不可分。若气候条件不适宜,会影响水稻的正常生长发育,甚至导致水稻植株死亡。气候条件对水稻生长造成影响的表现之一,是影响水稻对氮素的吸收利用。不同播期的气候条件不同,水稻在不同播期的生长期日程、产量、米质等都会存在差异^[23-24]。气候条件中温度、光照条件、CO₂ 浓度、降水量对水稻生长影响较大。

1.3.1 温度 温度在水稻的整个生长发育期中起到至关重要的作用,是影响水稻生长发育的重要因素。温度对水稻植株内的酶活性造成影响,进而影响水稻的氮肥吸收作用及利用率。在水稻的整个生育期中,不同时期对温度的要求有较大差异,水稻种子的萌发依赖一定的温度条件,水稻种子在低于 10~12℃ 时停止萌发;水稻分蘖期最适温度为 30~32℃,此时水稻生长最快;抽穗期最适温度为 25~35℃,低于 20℃ 时会造成结实率低^[25]。高温还会影响水稻生育期,造成水稻生长期缩短^[26]。高温会造成气孔部分闭合减缓蒸腾作用,影

响光合作用,造成水稻生长期缩短,从而减产和水稻氮素利用率下降。因此,美国的 DD50 水稻管理决策系统,把有效积温作为安排水稻种植管理的重要依据。

1.3.2 光照条件 光照条件是影响水稻光合作用的主要因素,不仅对气温影响较大,而且也影响着水稻的光合作用。光强过低会减弱光合作用强度,光强过强会使气孔关闭,叶绿素含量降低^[26],光合作用减弱。光照时间越长,光合作用时间越久,水稻光合产物的积累就越多,有助于提高水稻对氮肥的吸收利用率。

1.3.3 CO₂ 浓度 CO₂ 是水稻光合作用的主要原料。在一定浓度条件下,CO₂ 浓度升高能增加水稻对碳的吸收同化作用,促进水稻生长,从而加强水稻对氮素的吸收。有研究表明,CO₂ 浓度过高会造成气孔部分关闭^[28];随着空气中 CO₂ 浓度的升高,土壤可溶性氮含量下降^[29],造成土壤氮素供应量下降。因此,CO₂ 浓度对水稻氮素吸收的影响是复杂的,需要全方位考虑。

1.3.4 降水量 降水量也是水稻生长的重要影响因素之一。降水量的多少,直接影响到水稻的田间管理策略。降水量适宜的地区,土壤中的液态环境有助于溶解土壤中的营养物质,有利于水稻根部与营养物质接触,增强水稻对氮素的吸收利用。但若降水量过多,则易引发洪涝灾害,受淹水稻生长发育停滞^[30],从而降低水稻对氮素的吸收利用。此外,降水量大的地区通常空气湿度较大,当遇上高温,高温高湿的天气容易引起有害的病菌滋生,诱发水稻病害,影响水稻生长,从而影响水稻对氮素的吸收利用。

1.4 水分管理与水稻氮肥管理

水分管理是水稻高产种植的关键技术之一。有研究表明,轻度水分胁迫会导致水稻气孔部分关闭,从而降低叶肉细胞对 CO₂ 的同化吸收;重度水分胁迫会降低水稻叶肉细胞的光合能力,不利于水稻生长与氮素吸收^[31]。不同时期田间水分对水稻生长影响不同,在水稻苗期,对田间水分要求严格,水层超过 3 cm 则会显著降低出苗率^[32];分蘖盛期,适度的水分胁迫可以控制水稻的无效分蘖,并且适度的水分胁迫有利于诱导根竖直向下生长,有利于增大根的吸收面积,增加了水稻对氮肥的吸收效率^[33-34],并且有利于水稻的抗倒伏。在水稻孕穗期,水稻对水分敏感,水分胁迫会造成结实率的降低,造成减产,影响水稻氮肥利用率。因此,水分管理在保证水稻供水充足的同时,还应与水分胁迫相结合,合理的水分管理可以提高水稻对氮素的吸收利用。

1.5 氮肥的施用方式与水稻氮肥管理

氮肥施用是水稻增产的关键技术。施氮肥与不施氮肥,水稻在产量上存在明显差异。氮肥施用方式直接影响水稻的氮素供应量,影响水稻的生长。氮肥施用方式主要体现在氮肥施用比例与氮肥施用技术 2 个方面。

1.5.1 氮肥的施用比例 氮肥的施用比例是指在氮肥不同生长期的氮肥分配比例。水稻不同时期需氮量不同,氮肥施用比例的不同会造成水稻生长的差异^[35]、影响水稻的氮素吸收。随着水稻的生长发育,水稻的根系密度在拔节期达到峰值^[15],根部对氮肥的吸收作用最强,这很好地解释了水稻拔节期水稻氮肥利用率大于分蘖期的现象。孙永建等研究发现,水田种植模式下氮肥后移比例在 40% 左右为宜(即基肥

与穗肥质量比为 6:4)^[33]。因此,在满足水稻不同生长期的氮肥需求量的同时,须要适度地将氮肥后移才能更好地提高肥料利用率。

氮肥施用比例不仅影响了水稻的氮素吸收,更影响了水稻自身的氮素运转。在分蘖期施用氮肥过多会造成无效分蘖增多,过少会产生分蘖数不足,穗肥使用氮肥过多会造成贪青晚熟,过少会产生结实率低等问题,会对产量产生不利影响。

1.5.2 氮肥的施用技术 氮肥施用技术以施入土壤深度为标准可以分为氮肥表施与深施 2 种。氮肥表施是将氮肥施在土壤表面的技术,氮肥随水流失严重,氮肥容易分解为 NH₃ 等气体逸失;氮肥深施是利用施肥机械将氮肥施入土壤深度为 6~19 cm 处^[36-37],土壤下水的流动性差,氮肥随水流失较少,减少了 NH₃ 的生成与挥发,能增加氮肥利用率。

其他施肥技术如目前国内研究较多的一次性施肥^[38],它将氮肥施用比例和深施肥技术相结合,将配方肥料一次性施入土壤中,利用肥料的缓释效应,达到满足水稻不同生长期肥料需求的目的,增加了氮肥利用率。有研究表明,不同氮素形态的氮肥搭配使用能促进水稻对氮素的吸收,铵态氮、硝态氮搭配使用较单一使用肥料利用率高^[39]。

总体来说,为满足不同生长期水稻氮肥供需平衡,合理安排施肥比例,采用氮肥利用率高的氮肥施用方式,是水稻增产稳产的主要技术和方法。

2 基于测土配方的水稻氮肥管理技术

测土配方施肥技术主要包括测土施肥和配方施肥,主要方法是根据土壤中的养分含量、作物的养分吸收规律,通过试验建立水稻肥效利用函数,结合土壤养分丰缺指标,指导精准施肥管理^[40]。Regar 等研究测土配方法时发现,土壤碱解氮含量与施氮量之间存在一定的关系,获得了在水稻目标产量 4 000、5 000 kg/hm² 条件下氮肥施氮量与土壤碱解氮之间的关系(图 2)^[41]。戢林等研究设计了“3414”试验(指氮、磷、钾 3 个因素、4 个水平、14 个处理;4 个水平的含义:0 水平 = 不施肥,2 水平 = 当地推荐施肥量,1 水平 = 2 水平 × 0.5,3 水平 = 2 水平 × 1.5;14 个处理包括: N₀P₀K₀、N₀P₂K₂、N₁P₂K₂、N₂P₀K₂、N₂P₁K₂、N₂P₂K₂、N₂P₃K₂、N₂P₂K₀、N₂P₂K₁、N₂P₂K₃、N₃P₂K₂、N₁P₁K₂、N₁P₂K₁、N₂P₁K₁, 下标表示养分施用量水平),获得了土壤碱解氮、有效磷、速效钾与水稻产量的关系模型,并采用养分丰缺法将土壤肥力分为 5 个等级,合理安排肥料施用^[42]。张成玉等研究发现,采用测土配方施肥法水稻平均增产 6.51%,纯氮用量减少 31.18 kg/hm²,净收益提高 531.33 元/hm²^[43]。

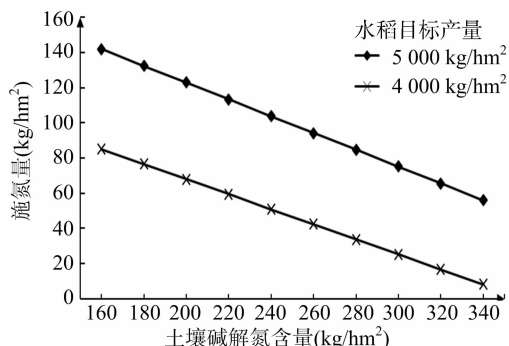


图2 土壤碱解氮含量与施氮量之间的关系

测土配方法的基础是土壤化验测试及肥料的田间施肥试验,结合水稻需肥规律、肥料转化效应,给出肥料的施用量、施肥时期、施用方法等处方指导,施肥更有针对性,可达到减少肥料用量、节省成本和劳动力投入的目的。但在试验生产过程中,土样的采集和化验工作量大、成本高是该方法的瓶颈,主要存在以下问题:(1)测土配方土样化验检测成本较高,不利于高密度、高频率地大范围获取土样,进而造成变量用肥的精度不高,而在实际生产中,每一茬作物生长期结束后,土壤中的肥力都会有变化,并且不同地块的土壤环境及理化性质上的差异,也会影响水稻对氮素的利用率;(2)缺乏气候条件等外界因素的考量,仅仅根据土壤养分平衡法来进行氮肥管理,配方施肥的优越性难以完全体现出来;(3)测土配方施肥通常只用于基肥使用,由于缺乏作物长势的监测,不适合用于制定追肥方案。

3 基于生长模型的水稻氮肥管理技术

水稻生长模型能模拟在气候和其他环境因子(如土壤、水、肥等)影响下的水稻生长过程,从而指导水稻生产管理。目前国内外基于生长模型的水稻氮肥管理模型主要有美国的 CERES-Rice 模型、欧洲的 WOFOST 模型、以及适用于东南亚与中国地区的 ORYZA2000 模型、国内研究的 RCSODS 模型等。

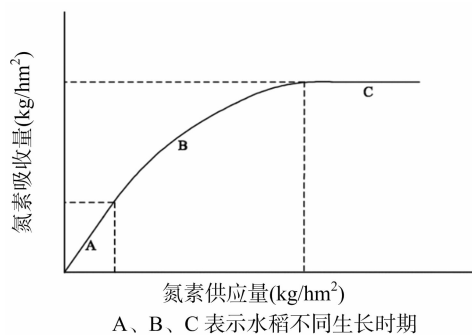
3.1 CERES-Rice 模型

CERES-Rice 模型以水稻有效积温为输入量来模拟水稻生长发育过程,主要包括土壤水分平衡、氮素平衡、生长发育等子模型,通过对不同水稻品种、土壤、气候、水肥管理方案下水稻的生长发育和产量形成过程进行模拟,进行水稻的生产管理的决策^[44]。Miao 等利用 CERES-Rice 模型进行水稻氮肥管理,利用模型预测产量与实际产量相关性系数达 0.73^[45]。Amiri 等在当地进行了 CERES-Rice 模型验证试验,发现 CERES-Rice 模型与产量相关性系数达 0.92^[46]。上述文献报道表明该模型具有较高的产量预测精度。

该模型能与地理信息系统(GIS)结合使用,在用于评价气候对水稻产量的影响方面具有较好的实用价值。但该模型许多参数是经验或正常气候条件下得出的,忽略了其他因素对生长发育的影响,尤其是日长因素;此外,模型还忽略了高温会增加有机物消耗与病虫害对水稻氮肥吸收所产生的影响,也缺少自然灾害(如冰雹、降温、台风)对水稻氮素吸收所产生的影响的评估。

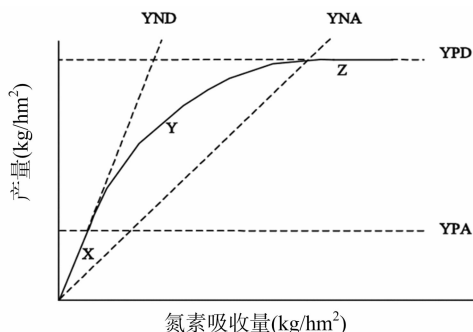
3.2 WOFOST(World food study)模型

WOFOST 模型在气候和其他环境因子(如土壤、水、肥)影响下,以日为步长模拟作物物候发育过程、光合作用、呼吸作用、土壤水平衡、养分吸收以及产量形成等,以此来决策水稻的生产管理^[47]。模型确定了氮素吸收与磷、钾吸收量之间的关系,当磷的吸收量一定时,氮供应量与实际吸收量的关系和氮的实际吸收量与产量的关系分别如图 3、图 4 所示,其中,A、X 段水稻产量和氮素吸收量的主要限制因素是氮供应量;B、Y 段水稻产量和氮素吸收量主要限制因素是氮、磷的供应量;而 C、Z 段水稻产量和氮素吸收量的主要限制因素是磷供应量^[48]。杜春英等对 WOFOST 模型在当地的生应用中进行了验证试验,结果表明,该模型模拟单产的精度高



A、B、C 表示水稻不同生长期

图3 氮供应量与吸收量之间的关系^[48]



X、Y、Z 仅表示水稻不同生长期, YPD 表示最大产量, YPA 表示氮肥最大利用率的产量, YND 表示氮肥最大利用率参考线, YNA 表示氮肥平均平均利用率参考线

图4 氮吸收量与产量之间的关系^[48]

达 90%^[48]。

WOFOST 模型以日为时间段,将有效积温与日长相结合来模拟水稻发育。能够较好地预测水稻生长发育动态与产量,并能与 GIS 系统融合使用,但该模型忽略了 CO₂ 浓度等其他因素对水稻氮肥吸收的影响作用。

3.3 ORYZA2000 模型

ORYZA2000 模型通过模拟水稻生长发育及产量形成、水分、氮素的变化动态及其影响的原理与过程,指导水稻的生产管理。模型确定了水稻氮素吸收量与水稻氮素日吸收效率和氮素供应量之间的关系,建立了水稻氮肥日需求量与水稻茎、叶、贮藏器官的日氮素需水量之间的关系,并确定了水稻氮素最大日吸收速研究,发现 ORYZA2000 模型用于模拟水稻生物量、产量、氮素吸收量的相关系数分别为 0.963 8、0.951 1、0.879 1,该模型具有较好的精度^[50]。

ORYZA2000 模型能很好地模拟水稻的生长和产量,并对水稻水分管理和氮肥施用有很高的应用价值,该模型在水分、氮素限制下的研究较多,但在水氮联合限制条件下的验证研究较少,模型未考虑自然灾害和病虫害的影响;模型参数较多,使用时较复杂,不利于在实际生产中推广应用。

3.4 RCSODS 模型

RCSODS 模型提出了生物钟模型,考虑了“三基点”温度(即上限、最适、下限温度)和日长对水稻发育的影响,利用叶龄来衡量水稻生长发育。通过模拟水稻物候发育、器官形成、光合生产、产量形成过程,结合土壤养分含量、pH 值、施肥比例以及目标产量等因素,采用养分平衡法进行氮肥施肥和种植管理^[51]。

陈家金等对模型的精度进行了研究,结果表明 RCSODS

模型的水稻生育期误差为 0 ~ 5 d, 产量预测的平均误差在 5% 以内, 模型具有较高的精确度^[51]。此外, 模型还可以预测病虫害对水稻生长的影响。但 RCSODS 模型采用养分平衡法进行水稻施肥管理, 缺少对水稻养分吸收机制的研究, 忽略了气候条件等其他因素对水稻氮素吸收作用的影响。

4 基于实地观测的水稻氮肥管理技术

实地观测施肥管理是依据叶片含氮量、光合速率以及干物质生成之间的相关关系, 确定水稻叶片含氮量的施肥阈值, 利用比色卡或叶绿素测定仪观测叶片氮素含量指导施肥管理的技术^[52~54]。Brunetto 等利用 SPAD502 叶绿素仪进行了估测水稻叶片叶绿素含量的研究, 发现水稻叶片氮素与 SPAD 值之间存在显著的正相关关系, 关系模型公式为

$$TLN = 11.408 + 0.453 \times SPADvalue。 \quad (1)$$

式中: TLN 表示叶片氮素总量, 单位为 g/kg; $SPADvalue$ 表示 SPAD 叶绿素仪采集值^[55]。

实地观测施肥管理技术适用于追肥管理, 能够依据水稻叶片氮素含量合理安排水稻施肥管理, 操作简单。但该技术存在以下缺点及问题: (1) 该方法采用以点带面的数据采集方式, 诊断水稻氮素含量容易受光照条件、病虫害等因素影响, 造成施肥管理精度低, 难以满足精准施肥管理的需要。(2) 水稻植株不同位置叶片的氮素含量存在差异^[56], 而且不同生长期相同位置叶片与水稻植株氮素含量相关性不同, 因此容易造成施肥决策上的偏差。(3) 该技术以产量高的田块水稻叶片氮素含量为参考标准, 未考虑到水稻氮素利用率随氮素施用量增加而降低的情况, 因此, 其施肥方案的经济性难以达到最优。(4) 该方法没有考虑自然灾害、气候条件、病虫害等对水稻氮素吸收的影响。

5 基于遥感监测的水稻氮肥管理技术

基于遥感监测的水稻氮肥管理技术是利用遥感技术获取水稻生长指标, 通过构建水稻长势指标(植被指数)与水稻氮素含量、水稻生物量、产量等之间的关系模型, 实现水稻氮肥精准管理的技术。

在遥感监测作物长势的指标中, 归一化植被指数(normalized difference vegetation index, 简称 NDVI) 是进行无损、非接触、大面积监测作物长势的常用指标。研究表明, NDVI 与作物截获的入射光合有效辐射百分比之间有紧密的关系^[57], 且与植物叶片叶绿素含量、叶片氮素含量、水稻氮素吸收量、水稻地上部生物量、产量之间呈正相关关系。因此, NDVI 指数不仅可用于水稻长势的有效检测, 而且可以以此为依据构建水稻氮肥精准施肥决策模型。

Wang 等利用 NDVI 便携式传感器研究水稻叶片氮素含量时发现, NDVI 指数与水稻叶片氮素含量的相关系数为 0.848 ~ 0.917^[58]。Yao 等利用 Greenseeker 手持式光谱仪估计水稻氮素水平时发现, NDVI 指数与水稻地上部生物量、氮素吸收量有较好的相关性, 相关系数分别为 0.76、0.70^[59]。Ali 等研究发现 NDVI 能很好地估计水稻氮素吸收量, 该公式的相关系数为 0.68, 相关性较好; 模型公式如下:

$$\text{Total N uptake} = 236.53 \times NDVI^{2.949}。 \quad (2)$$

式中: Total N uptake 表示氮素吸收量, 单位为 kg/hm²^[60]。

Gnyp 等对 NDVI 指数进行了优化, 利用优化后的 NDVI 指数建立了估计水稻地上部生物量的公式, 该公式相关系数为 0.74, 公式的均方根误差为 1.77, 新模型对水稻地上部生物量的反演具有更好的精度。模型计算公式如下:

$$AB = 0.0109 \times e^{6.3101 \times \frac{R_{1301} - R_{1706}}{R_{1301} + R_{1706}}}。 \quad (3)$$

式中: AB 表示水稻地上部生物量, t/hm²; R_{1301} 表示水稻植株在 1301 nm 波段的光谱反射率; R_{1706} 表示水稻植株在 1706 nm 波段的光谱反射率^[61]。

Ali 等利用 NDVI 进行了水稻施肥决策模型研究, 发现 NDVI 能较好的估计水稻产量, 尤其是在水稻播种后 70 d 的 NDVI 与产量的相关系数最高, R^2 为 0.637, 相比于叶色卡和 SPAD 仪, NDVI 具有更好的相关性; 并利用 NDVI 建立了估计产量的计算公式:

$$Yield = 375.33 \times e^{3.635 \times NDVI}。 \quad (4)$$

式中: $Yield$ 表示水稻产量, 单位为 kg/hm²; $NDVI$ 表示水稻播种后 70 d 采集的 NDVI^[62]。

秦古飞等利用无人机机载高光谱设备在水稻叶片氮素含量研究中发现高光谱遥感能很好地估计水稻叶片氮素含量, 并利用高光谱遥感技术构建了估计水稻叶片氮素含量的公式, 该公式相关系数为 0.614, 均方根误差为 0.386, 模型具有较好的精度; 计算公式如下:

$$LNC = 0.201 \times \frac{D_{738\text{ nm}}}{D_{522\text{ nm}}} + 1.185。 \quad (5)$$

式中: LNC 表示水稻叶片氮素含量, 单位为%; $D_{738\text{ nm}}$ 表示 738 nm 波段光谱反射率的一阶导数; $D_{522\text{ nm}}$ 表示 522 nm 波段光谱反射率的一阶导数^[63]。

通过水稻遥感长势监测, 获取水稻叶片氮素含量、地上部生物量、氮素吸收量等信息, 利用这些信息合理安排氮肥管理能有效提高肥料的利用率。

Ali 等利用 GreenSeeker™ optical sensor 采集田块 NDVI, 建立了氮肥施肥模型, 并利用该模型进行水稻的氮肥管理试验, 发现该模型的氮肥利用率提高了 12%; 模型公式如下:

$$ANF = \frac{120 - (236.53 \times NDVI^{2.949})}{0.6}。 \quad (6)$$

式中: ANF 表示氮肥施用量, 单位为 kg/hm²; 0.6 为肥料的氮素含量^[60]。

基于遥感监测的水稻氮肥管理技术具有以下优势: (1) 遥感监测作物长势可进行大面积、非接触、无损监测, 相较于传统作物长势信息地面人工获取方法, 具有分辨率高、速度快、成本低等优势。(2) 遥感监测数据分辨率高, 包含了作物长势信息的时空数据, 可与 GIS 系统相结合, 利用数学建模将水稻长势指标与水稻氮素需求量联系起来, 水稻长势量化了水稻氮肥的管理, 便于氮肥的变量精准管理。

6 分析与思考

6.1 建立氮肥精准管理决策模型须要考虑的主要因素

影响水稻氮肥营养的吸收利用率主要来自水稻品种、土壤理化性质(pH 值、土壤水分、孔隙度、土壤氮素供应量等)、气候条件(CO₂ 浓度、光照强度、日长、气温等)、水分管理、氮肥施用方式等 5 个方面, 因此, 在进行水稻氮肥精准施用管理时, 必须充分考虑到上述 5 个方面的影响, 才能建立起符合当

地农艺要求和实际生产需要的变量施肥决策模型。

土壤理化性质是水稻精准施肥调控的重要因子,但在实际生产中,由于土样采集和化验的工作量大且时效性差,通常难以直接把土壤理化性质作为变量施肥决策模型的输入量,目前大多采用作物长势反演的推算土壤中养分的分布情况,通过追肥的方式进行调控。水稻品种、气候条件、水分管理、氮肥施用方式等影响因素,可根据种植区及所在季节,作为变量施肥决策模型的其他输入量。

6.2 水稻氮肥精准管理技术的发展趋势

常言道,“知己知彼,百战百胜”,在水稻的精准施肥管理中,准确快速获取水稻长势信息,才能有针对性地进行精准管理。对比前述水稻氮肥精准管理技术,基于遥感监测的方法可进行大面积、非接触、无损监测,具有分辨率高、速度快、成本低等明显优势,目前已越来越在实际生产中得到重视。

从空间尺度来分,目前可用于水稻长势信息遥感获取的平台主要有近地遥感平台、航空遥感平台、航天遥感平台农田长势数据^[64-65]。在上述遥感监测平台中,现有的航天、有人驾驶飞机航空遥感技术存在气象影响因子多、周期长、成本高等缺点,采用地面拖拉机、高架车、微小型无人机等方式进行作物长势信息的近地遥感获取,具有运行成本低、灵活性高、能快速准确地获取高精度遥感数据等特点,可弥补现有航天、航空遥感技术的缺陷。微小型无人机技术近年来发展迅速,操作灵活、对起飞降场地依赖低、飞行成本低,并且获得的数据具有更高的分辨率和质量^[66],且采样的时间尺度更大。随着配套技术的发展,微小型无人机操控性越来越好,成本越来越低,单次遥感图像覆盖面积优于地面机械,效率更高;因此,近年来基于微小型无人机的低空遥感信息获取技术在农业领域的应用范围正逐步扩大,有望成为农田作物信息快速获取的主要方法之一。

基于遥感监测的方法,能精确地获取水稻氮素含量与需求量,适合进行水稻的变量精准追肥管理,但在实际生产应用中,不同品种水稻在不同生长期的氮肥吸收效率有差异,进而在长势的表现上存在显著差异,在光谱指数反演上也存在显著差异^[67],水稻施肥决策模型须要考虑不同品种对模型的影响。据统计,我国经农业农村部审定的水稻品种达 1 115 个。杨肖娥等研究了不同水稻品种对铵态氮和硝态氮吸收的动力学,发现不同水稻品种,由于遗传物质不同,对 NH_4^+ 以及 NO_3^- 的吸收速率不同,从而导致相同生长期不同品种水稻茎叶数、叶片含氮量不同,从而导致长势差异^[68]。目前尚未见适用于所有水稻品种的施肥决策模型,因此,遥感水稻施肥决策模型须要根据特定品种及其配套农艺、当地种植习惯进行研究,构建针对特定品种的水稻施肥决策模型,从而建立起我国不同水稻的低空遥感精准施肥决策模型数据库。

7 结语

由于信息技术、物联网、机械制造领域的发展,现代农业将迎来新的变革,农业自动化、机械化更加普及,精细化作业将是顺势所趋。水稻氮肥精准管理是水稻种植管理、实现水稻增产增收技术的重要部分,水稻氮肥精准管理研究对推动水稻种植管理技术向精细化发展具有重要意义。

本文综合分析了水稻品种、土壤理化性质、气候因素、水

分管理、氮肥施用方式这 5 个因素对水稻氮素吸收利用的影响,可为研究水稻施肥管理技术提供参考。分析对比了现阶段基于测土配方、生长模型、实地观测、遥感监测的水稻氮肥管理技术,指出了基于遥感监测水稻氮肥管理技术具有大面积、非接触、无损监测,分辨率高、速度快、成本低等优势。目前,水稻氮肥施用管理应该是根据全方位的田间信息,制定水稻施肥决策,利用信息化、机械化手段对水稻氮素施用进行自动化、精细化的管理,从而实现氮肥按需供应的目的,这也是水稻氮肥管理技术的一个发展方向。遥感技术是田间信息采集的重要手段,因此,针对基于遥感监测的水稻氮肥管理技术的研究具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 李逸勉,叶延琼,章家恩,等. 广东省水稻产业发展现状与对策分析[J]. 中国农学通报,2013,29(20):73-82.
- [2] 赵 凌,赵春芳,周丽慧,等. 中国水稻生产现状与发展趋势[J]. 江苏农业科学,2015,43(10):105-107.
- [3] 吴向辉,何 难. 农业部首次公布化肥、农药利用率数据[J]. 农化市场十日讯,2016(3):7.
- [4] Canfield D E, Glazer A N, Falkowski P G. The evolution and future of Earth's nitrogen cycle[J]. Science, 2010, 330(6001):192-196.
- [5] 张倩倩. 氮肥对水稻虫害发生的影响[J]. 福建农业, 2015(6):177.
- [6] 孙文涛,肖千明,朱洪国,等. 试论氮肥施用对环境的影响[J]. 杂粮作物,2000(1):38-41.
- [7] 张晓果,王丹英,计成林,等. 水稻氮素吸收利用研究进展[J]. 中国稻米,2015,21(5):13-19.
- [8] 黄见良,邹应斌,彭少兵,等. 水稻对氮素的吸收、分配及其在组织中的挥发损失[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(6):579-583.
- [9] 晏 娟,尹 斌,张绍林,等. 不同施氮量对水稻氮素吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(5):835-839.
- [10] 吴 言,唐 宁,张边江. 缺氮对不同梗稻品种光合特性的影响[J]. 湖北农业科学,2014(8):1762-1764,1828.
- [11] 霍可以,杨俊春,晏 妮. 施用氮肥对环境的影响[J]. 农技服务,2013(8):847-849.
- [12] 张倩倩. 餐厨垃圾发酵制备肥料专利技术分析[J]. 北京农业, 2015(19):95-96.
- [13] Zhang Y H, Fan J B, Zhang Y L, et al. N accumulation and translocation in four japonica rice cultivars at different N rates[J]. Pedosphere, 2007, 17(6):792-800.
- [14] 程建峰,戴廷波,荆 奇,等. 不同水稻基因型的根系形态生理特性与高效氮素吸收[J]. 土壤学报,2007,44(2):266-272.
- [15] 张 耗. 水稻根系形态生理与产量形成的关系及其栽培调控技术[D]. 扬州:扬州大学,2011:230-235.
- [16] 赵黎明,李 明,郑殿峰,等. 水稻光合作用研究进展及其影响因素分析[J]. 北方水稻,2014,44(5):66-71.
- [17] 刘 枫,张辛未,叶舒娅,等. 水稻氮素营养特点与氮肥运筹技术的研究[C]// 中国土壤学会. 青年学者论土壤与植物营养科学——第七届全国青年土壤暨第二届全国青年植物营养科学工作者学术讨论会论文集. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [18] Roberts T L, Ross W J, Norman R J, et al. Predicting nitrogen fertilizer needs for rice in arkansas using alkaline hydrolyzable - nitrogen[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(3):

- 1161.
- [19] 李建国, 濮励杰, 朱 明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233 – 1245.
- [20] 周细红, 曾清如, 蒋朝辉, 等. 尿素施用对土壤 pH 值和模拟温室箱内 NH_3 和 NO_2 浓度的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 374 – 376.
- [21] 张云舒, 徐万里, 刘 骅. 土壤盐渍化特性和施肥方法对氮肥氨挥发影响初步研究[J]. 西北农业学报, 2007, 16(1): 13 – 16.
- [22] 武长宏, 赵孔南. 土壤中的反硝化作用[J]. 核农学通报, 1987(1): 28 – 29.
- [23] 陈跃进. 播种期对水稻米质与产量的影响[J]. 湖北农学院学报, 1992, 12(4): 1 – 7.
- [24] 包灵丰, 林 纲, 赵德明, 等. 不同播期与收获期对水稻灌浆期、产量及米质的影响[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(2): 32 – 37.
- [25] 张秀英. 温度对水稻生长发育各个时期的影响分析[J]. 湖南农机(学术版), 2010, 37(11): 229 – 230.
- [26] 王彤彤, 张凤鸣, 白良明, 等. 温度对水稻生长的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2016(2): 17 – 20.
- [27] 张光飞, 杨 波, 苏文华, 等. 光强对珍稀濒危植物毛果木莲幼苗生长和叶绿素含量的影响[J]. 北方园艺, 2014(17): 80 – 82.
- [28] 杨江龙. 大气 CO_2 与植物氮素营养的关系[J]. 生态环境学报, 2002, 11(2): 163 – 166.
- [29] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 等. 开放式空气 CO_2 浓度升高对水稻土壤可溶性 C、N 和 P 的影响[J]. 土壤, 2004, 36(4): 392 – 397.
- [30] 梅少华, 梅金先, 陈兴国, 等. 洪涝灾害对水稻生产的影响评估及抗灾对策研究[J]. 作物杂志, 2011(2): 89 – 93.
- [31] 卢从明, 张其德, 匡廷云, 等. 水分胁迫抑制水稻光合作用的机理[J]. 作物学报, 1994, 20(5): 601 – 606.
- [32] 金 澈. 直播水稻苗期湿润灌溉壮苗栽培技术研究[J]. 黑龙江农业科学, 1984(5): 62 – 64.
- [33] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 等. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(12): 2221 – 2232.
- [34] 沈阿林, 刘春增, 张付申, 等. 不同水分管理对水稻生长与氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(2): 111 – 116.
- [35] 黄尚宁, 黄 俊, 刘甫清, 等. 水稻不同时期施肥比例与产量比较试验[J]. 广西农学报, 2010, 25(5): 7 – 9.
- [36] 李殿平, 曹海峰, 张俊宝, 等. 全程深施肥对水稻氮素利用率和产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2005, 36(3): 257 – 262.
- [37] 张 令, 王国臣. 水稻深施肥方法的探讨[J]. 农机使用与维修, 2009(2): 35 – 36.
- [38] 朱 艳, 姚 霞, 王 薇, 等. 一种基于三波段光谱指数估测植物氮含量的方法: CN201110278513.5[P]. 2012 – 05 – 02.
- [39] 张亚丽, 董园园, 沈其荣, 等. 不同水稻品种对铵态氮和硝态氮吸收特性的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 918 – 923.
- [40] 陈新平, 张福锁. 通过“3414”试验建立测土配方施肥技术指标体系[J]. 中国农技推广, 2006, 22(4): 36 – 39.
- [41] Regar K L, Singh Y V. Fertilizer recommendation based on soil testing for the targeted yield of rice in eastern plain zone of Uttar Pradesh[J]. The Bioscan, 2014, 9(2): 531 – 534.
- [42] 戴 林, 张锡洲, 李廷轩. 基于“3414”试验的川中丘陵区水稻测土配方施肥指标体系构建[J]. 中国农业科学, 2011, 44(1): 84 – 92.
- [43] 张成玉, 肖海峰. 我国测土配方施肥技术增收节支效果研究——基于江苏、吉林两省的实证分析[J]. 农业技术经济, 2009(3): 44 – 51.
- [44] Jones J W, Tsuji G Y, Hoogenboom G, et al. Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT v3. [M]//Tsuiji G Y, Hoogenboom G, Thornton P K. Understanding options for agricultural production. Berlin: Springer Netherlands, 1998: 157 – 177.
- [45] Miao Y X, Batchelor W, Batchelor W. Evaluation of the CERES – Rice model for precision nitrogen management for rice in Northeast China[J]. Advances in animal biosciences, 2017, 8(2): 328 – 332.
- [46] Amiri E, Rezaei M, Rezaei E E, et al. Evaluation of Ceres – Rice, AquaCrop and Oryza2000 models in simulation of rice yield response to different irrigation and nitrogen management strategies [J]. Journal of Plant Nutrition, 2014, 37(11): 1749 – 1769.
- [47] 杨妍辰, 王建林, 宋迎波. WOFOST 作物模型机理及使用介绍[J]. 气象科技进展, 2013, 3(5): 29 – 35.
- [48] 杜春英, 李秀芬, 王晨轶, 等. 基于 WOFOST 模型的黑龙江省水稻产量动态预报研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(24): 15035 – 15039.
- [49] Li T, Angeles O, Marcaida M, et al. From ORYZA2000 to ORYZA (v3): an improved simulation model for rice in drought and nitrogen – deficient environments [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2017, 237/238: 246 – 256.
- [50] 张 俊, 徐绍辉, 刘建立, 等. 应用 ORYZA2000 模型模拟水稻产量及吸氮量[J]. 土壤, 2007, 39(3): 428 – 432.
- [51] 陈家金, 林 晶, 徐宗焕, 等. 基于 RCSODS 模型的东南沿海双季稻生长发育及产量模拟和验证[J]. 中国农学通报, 2008, 24(4): 455 – 459.
- [52] Surje D. Nitrogen management using Leaf Color Chart (LCC) and nitrogen level in kharif rice [J]. Indian Journal of Applied Research, 2015, 5(2): 818 – 820.
- [53] Pampolino M F, Manguiat I J, Ramanathan S, et al. Environmental impact and economic benefits of site – specific nutrient management (SSNM) in irrigated rice systems[J]. Agricultural Systems, 2007, 93(1/2/3): 1 – 24.
- [54] Singh B, Singh V, Purba J, et al. Site – specific fertilizer nitrogen management in irrigated transplanted rice (*Oryza sativa*) using an optical sensor[J]. Precision Agriculture, 2015, 16(4): 455 – 475.
- [55] Brunetto G, Trentin G, Ceretta C A, et al. Use of the SPAD – 502 in estimating nitrogen content in leaves and grape yield in grapevines in soils with different texture[J]. American Journal of Plant Sciences, 2012, 3(11): 1546 – 1561.
- [56] Hu Y, Yang J P, Lv Y, et al. SPAD values and nitrogen nutrition index for the evaluation of rice nitrogen status[J]. Plant Production Science, 2014, 17(1): 81 – 92.
- [57] Wei X, Lindner S, Nay – Htoon B, et al. Nutritional and developmental influences on components of rice crop light use efficiency [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 223(15): 1 – 16.
- [58] Wang Y, Dunn B L, Arnal D B, et al. Use of an active canopy sensor and SPAD chlorophyll meter to quantify geranium nitrogen status [J]. Hortscience, 2012, 47(1): 45 – 50.
- [59] Yao Y, Miao Y, Cao Q, et al. In – season estimation of rice nitrogen status with an active crop canopy sensor [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing,

刘蕊,王宁宁,王玉康,等.油菜种子含油量影响因素及调控综述[J].江苏农业科学,2019,47(12):25-29.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.12.005

油菜种子含油量影响因素及调控综述

刘蕊¹,王宁宁¹,王玉康¹,李明¹,曹维¹,王政¹,张洁夫²,谭小力¹

(1.江苏大学生命科学研究院,江苏镇江 212013; 2.江苏省农业科学院经济作物研究所,江苏南京 210014)

摘要:作为世界重要油料作物之一的油菜(*Brassica napus*),其种子油不仅在食用植物油领域占据重要地位,在化工产业和生物能源领域也发挥举足轻重的作用。本文主要综述油菜种子含油量影响因素及调控方面的研究进展,提出运用基因工程提高油菜种子油含量的策略,以期为油菜含油量的大幅度提高提供参考依据。

关键词:油菜;含油量;影响因素和调控;基因工程

中图分类号: S565.401 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)12-0025-05

油菜是重要的油料作物,在我国年产量已达 1 400 万 t,其中国民消费量达 600 多万 t,占食用植物油总量的 20% 左右^[1]。油菜成熟种子中大约含 45% 的储藏油,25% 的蛋白质和 10% 的可溶性糖。种子油含量是重要的农艺性状,也是油菜品质的关键决定因素,随着油菜种子油在食品和非食品应用方面需求量的不断增加,如何提高油菜种子油含量受到人们的广泛关注。然而到目前为止,油菜种子油含量影响因素的作用机制以及油份积累的分子调控机制研究得还不够透彻。本文主要针对油菜种子含油量在影响因素和调控方面已取得的研究进展进行综述。

1 油菜种子油生物合成和积累

植物种子油主要以三酰甘油(triacylglycerols,简称 TAG)的形式进行储存,种子油的生物合成可分为脂肪酸(fatty acid,简称 FA)合成和三酰甘油合成两大阶段^[2]。在油菜种子中,三酰甘油的合成量占种子质量的 60%^[3],对种子含油量贡献很大。三酰甘油的合成需要众多亚细胞结构多条途径

共同作用,许多调节基因和酶基因参与这个过程^[4-5],任何一类酶的表达或调控出现问题都会影响种子含油量^[6]。脂肪酸在质体中的合成主要包含饱和脂肪酸从头合成、脂肪酸碳链延长以及不饱和脂肪酸合成^[7],质体 FA 的合成途径决定了种子油中酰基链长度和饱和度水平。脂肪酸合成底物乙酰辅酶 A(acetyl-CoA)经过一系列反应生成含有 12~18 个碳原子的脂肪酸,接着在特异性硫酯酶作用下,催化含有酰基载体蛋白(acyl carrier protein,简称 ACP)的脂肪酸从 ACP 上释放出来,成为游离脂肪酸^[8],其在酰基辅酶 A 合成酶(acyl-CoA synthetase)作用下又转变为酰基辅酶 A(acyl-CoA),之后转运至胞质或内质网^[9-10],胞质内的酰基辅酶 A 通过内质网上 3-磷酸甘油酰基转移酶(glycerol-3-phosphateacyltransferase,简称 GPAT)^[11]、溶血性磷脂酰基转移酶(lyso-phosphatidic acid acyltransferase,简称 LPAAT)^[12]以及二酰甘油酰基转移酶(diacylglycerol acyltransferase,简称 DGAT)^[13]的作用在甘油骨架上连接脂肪酸合成 TAG,储存于亚细胞器油体内。

油菜种子油积累的分子机制目前还不是十分清楚,但种子油积累过程已有研究,其主要与种子形成有关。油菜开花后 25~30 d 种子油积累迟缓,30 d 后高效聚积,40 d 后积累速度减慢,种子成熟时期油含量最高。文均研究了甘蓝型油菜种子发育过程中油脂积累动态变化,结果发现,快速积累时期为油菜种子油累积差异最显著时期,也是不同品种油菜含

收稿日期:2018-03-02

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:31471527)。

作者简介:刘蕊(1991—),女,河南南阳人,硕士研究生,主要从事植物分子生物学研究。E-mail:17788356219@163.com。

通信作者:谭小力,博士,研究员,主要从事植物功能基因组学研究。E-mail:xltan@ujs.edu.cn。

2014,7(11):4403-4413.

[60] Ali A M, Thind H S. A framework for refining nitrogen management in dry direct-seeded rice using GreenSeeker optical sensor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 110: 114-120.

[61] Gnyp M L, Miao Y X, Yuan F, et al. Hyperspectral canopy sensing of paddy rice aboveground biomass at different growth stages[J]. Field Crops Research, 2014, 155: 42-55.

[62] Ali A M, Thind H S, Sharma S, et al. Prediction of dry direct-seeded rice yields using chlorophyll meter, leaf color chart and GreenSeeker optical sensor in northwestern India[J]. Field Crops Research, 2014, 161: 11-15.

[63] 秦占飞,常庆瑞,谢宝妮,等.基于无人机高光谱影像的引黄灌区水稻叶片全氮含量估测[J].农业工程学报,2016,32(23):

77-85.

[64] Goward S N. Satellite bioclimatology[J]. Journal of Climate, 1989, 2(7): 710-720.

[65] Niethammer U, James M R, Rothmund S, et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results[J]. Engineering Geology, 2012, 128: 2-11.

[66] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 92(2): 79-97.

[67] 殷丽萍,邹忠,王冬梅,等.水稻不同品种光谱监测试验研究[J].现代农业科技,2016(19):13-15.

[68] 杨肖娥,孙羲.不同水稻品种 NH_4^+ 和 NO_3^- 吸收的动力学[J].土壤通报,1991,22(5):222-224.