

# 水稻生产的作物特性与养分管理策略

石义思, 谢 凯, 陈思雨, 何冠谛\*

贵州大学农学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年11月14日; 录用日期: 2025年12月28日; 发布日期: 2026年1月6日

## 摘 要

水稻作为全球过半人口的主食, 其稳定高产与优质生产对于保障粮食安全至关重要。然而, 当前水稻生产面临着产量瓶颈、资源高消耗及环境成本攀升的巨大压力。本文旨在系统综述水稻作物特性与养分管理策略, 以探索实现可持续发展的有效路径。文章首先分析了水稻喜温湿、需水肥的生物学习性及其特定的种植环境需求。进而重点探讨了现代水稻养分管理的核心策略: 其一, 通过轮作、垄作免耕等耕作方式改善土壤微生态环境, 提升地力; 其二科学运用分期施肥、有机无机配施及缓控释肥等技术, 优化养分供应; 其三, 引入基于无人机的多光谱遥感、机器学习与深度学习模型构建营养诊断模型, 实现对氮营养指数(NNI)、叶绿素含量(SPAD)的实时、无损监测与反演, 为变量施肥和精准管理提供决策依据。本文结论认为, 将传统农艺措施与现代智能信息技术深度融合, 通过品种改良、土壤培肥、精准施肥三者的协同, 是突破当前水稻生产瓶颈、实现高产、优质、高效、环保目标的方向。

## 关键词

水稻, 作物特性, 养分管理, 科学施肥

# A Review of Crop Characteristics and Nutrient Management Strategies in Rice Production

Yisi Shi, Kai Xie, Siyu Chen, Guandi He\*

College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: November 14, 2025; accepted: December 28, 2025; published: January 6, 2026

## Abstract

As the staple food for more than half of the world's population, the stable, high-yield, and high-

\*通讯作者。

quality production of rice is crucial for ensuring food security. However, current rice production faces significant pressure from yield bottlenecks, high resource consumption, and rising environmental costs. This paper aims to systematically review rice crop characteristics and nutrient management strategies to explore effective pathways for achieving sustainable development. The article first analyzes rice's biological characteristics, such as its preference for warm, humid conditions, high demand for water and fertilizers, and specific growing environment requirements. It then focuses on core strategies in modern rice nutrient management: firstly, improving the soil micro-ecological environment and enhancing soil fertility through practices like crop rotation and ridge tillage with no-till; secondly, scientifically applying techniques such as split fertilization, combined organic-inorganic fertilization, and slow/controlled-release fertilizers to optimize nutrient supply; thirdly, introducing nutrition diagnosis models based on UAV-based multispectral remote sensing, machine learning, and deep learning to enable real-time, non-destructive monitoring and inversion of the Nitrogen Nutrition Index (NNI) and chlorophyll content (SPAD), providing decision-making support for variable rate fertilization and precision management. The paper concludes that the deep integration of traditional agronomic practices with modern intelligent information technology, coupled with the synergy of variety improvement, soil fertility enhancement, and precision fertilization, is the direction for breaking through the current bottlenecks in rice production and achieving the goals of high yield, quality, efficiency, and environmental friendliness.

## Keywords

Rice, Crop Characteristics, Nutrient Management, Scientific Fertilization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

大米是全球一半以上人口的主食。然而，在过去十年中，水稻产量水平已经趋于稳定，面临着水和化肥高要求以及不断上升的环境成本带来的巨大压力[1]。水稻的高产和质量受到许多因素的影响，其中包括土壤养分管理。养分管理是农业生产中至关重要的一环，它直接影响着作物的生长发育、产量和品质[2]。因此，对水稻的作物特性与养分管理进行深入的综述和研究，对于提高水稻产量和质量，保障粮食安全具有重要的意义。

本综述将对水稻的作物特性和养分管理进行全面的分析和总结，旨在为农业生产者、研究人员和政策制定者提供有益的参考。我们将探讨水稻的生长发育特点、对养分需求的特点、养分吸收和利用的机制，以及养分管理对水稻产量和品质的影响。同时，我们还将讨论不同养分管理策略对水稻生长发育和产量的影响，并提出未来研究的方向和发展趋势。通过对水稻的作物特性与养分管理进行深入的综述和研究，我们有望为提高水稻产量和质量，实现粮食安全做出更加有效的贡献。本综述有望能够为相关领域的研究和实践工作提供有益的参考和指导，促进水稻生产的可持续发展。

## 2. 水稻的作物特性

### 2.1. 水稻的特性

水稻是一种可食用的谷物，一年生草本植物，性喜温湿，南方俗称其为“稻谷”或“谷子”，脱壳的粮食是大米，一年生水生草本，种植技术包括稻田和插秧，稻的耕种除传统的人工耕种方式，亦有高度

机械化的耕种方式[3]。富含水分、碳水化合物、蛋白质、脂类、矿物质和维生素等营养物质[4]。据我国国家标准规定，稻谷按它的生长期、粒形和粒质分为早籼稻谷、晚籼稻谷、粳稻谷、籼糯稻谷、粳糯稻谷五类，是非常重要的粮食作物。

2.2. 水稻的种植条件

首先，水稻需要充足的阳光和温暖的气候。通常来说，水稻生长的最适宜温度范围是 20 摄氏度到 35 摄氏度之间。其次，水稻需要充足的水源，因此通常种植在水田或者容易灌溉的地区。在干旱季节，需要有灌溉系统来保证水稻的生长。此外，水稻需要富含有机质和养分丰富的土壤，通常在肥沃的河流、湖泊周围或者有机质含量高的土地上种植水稻效果更好。最后，水稻生长需要适宜的 pH 值，通常在 5.0 到 7.0 之间[5]。总的来说，水稻的种植条件包括适宜的气候、充足的水源、富含养分的土壤和适宜的 PH 值。这些条件的满足对于水稻的生长和产量有着重要的影响[6]。

3. 水稻的养分管理

3.1. 作物的营养特性

水稻所需最主要的必需元素有氮磷钾。过去解决作物养分缺乏问题，大多从改善土壤环境或增施肥料以增加养分供应来满足作物生长的需要。许多营养学家和遗传学家开展了作物营养基因型差异的研究，并对植物营养特性的遗传规律进行了广泛的研究，企图通过改变作物营养特性以适应养分缺乏的土壤环境，为解决作物养分缺乏开辟一条新的途径。改变水稻的遗传特性是从改变水稻本身的角度出发，传统的方式是控制和改变水稻生长环境，植物需要某种物质或条件或者缺少，就提供或补充。

3.2. 不同的耕作方式

3.2.1. 轮作

稻田轮作可以改善土壤理化性质，增加土壤微生物多样性，提高土壤有机碳，实现稻田可持续发展。轮作会改变土壤特性，影响养分利用和植物生长[7]。大量研究表明冬种绿肥还田能增加水稻产量，培肥稻田土壤，改善土壤微生物群落结构，提高微生物活性，且连续多年种植增产节肥效应显著。有研究表明，稻麦轮作体系秸秆还田可以显著增加水稻产量和稻田活性有机碳含量，增强土壤汇碳功能[8]。

3.2.2. 垄作免耕

试验研究表明，不同耕作处理在水稻、小麦或油菜产量上有一定差异(见表 1)。垄作是一种典型的高畦栽培模式，指在田间通过人为耕作，使土壤形成一系列高低相同、呈垄状的栽培床。通常，较高的部分称为“垄台”，垄台之间的低洼部分称为“垄沟”。这种耕作方式广泛应用于干旱易涝地区、低温地区以及多种作物的种植中。垄作免耕处理的水稻产量最高，依次为冬水免耕、水旱轮作和常规平作[9]。

Table 1. Rice farming methods and their advantages and disadvantages [10]-[12]

表 1. 水稻耕作方式及优缺点[10]-[12]

| 分类   | 耕作方式      | 核心特点      | 主要优点                | 主要缺点               |
|------|-----------|-----------|---------------------|--------------------|
| 水分管理 | 水稻田(淹水栽培) | 建立田埂，保持水层 | 水分充足、稳产高产、抑制杂草、调节地温 | 耗水量巨大、劳动强度大、产生温室气体 |
|      | 陆稻(旱稻)    | 旱地种植，无淹水层 | 极度节水、适应性强(山坡旱地)     | 产量相对较低、草害和虫害威胁大    |

续表

|      |           |           |                            |                        |
|------|-----------|-----------|----------------------------|------------------------|
| 种植方法 | 移栽稻       | 先育苗, 后插秧  | 充分利用土地(提高复种)、易于苗期管理、保证大田苗质 | 费工费时、劳动密集型             |
|      | 直播稻       | 种子直接播于大田  | 省工省力、无缓苗期、生育期短             | 草害严重、易倒伏、出苗风险高(受天气影响大) |
| 生态模式 | 稻渔/稻鸭综合种养 | 水稻与水生动物共养 | 一田多收, 经济效益高; 生态环保, 减少农药化肥  | 管理技术复杂, 要求高            |

3.3. 不同的肥料种类和施肥方式

水稻的产量与品质深受肥料管理和施肥技术的影响[13]。水稻是一种有效利用温度和光资源的种植系统。然而, 通常需要多次施肥才能保持水稻产量稳定。施肥不当不仅对稀缺劳动力资源构成挑战, 还会增加碳足迹(CFs) [14]。为实现高产、优质、高效和环保的生产目标, 需要根据水稻的需肥规律, 科学地选择肥料种类并采用恰当的施肥方式。

3.3.1. 主要肥料种类及其特性

生产中应用的肥料主要可分为以下几类, 其特性对比如下: 1. 化学肥料: 由工业生产, 养分含量高、肥效快, 能满足水稻快速生长的需求。但长期单一使用易导致土壤板结、酸化, 且养分易流失, 利用率较低。2. 有机肥料: 如农家肥、绿肥等, 能改良土壤结构, 提供全面养分, 肥效持久。但其养分含量低、体积大、施用不便, 需腐熟后使用。3. 生物肥料: 含有益微生物(如固氮菌), 通过活化土壤中的养分来减少化肥用量, 但肥效受环境影响较大, 见效慢。4. 缓/控释肥料: 作为新型智能肥料, 能控制养分缓慢释放。其最大优点是大幅提高肥料利用率, 实现一次性施肥, 省工省时, 并减少环境污染; 缺点是成本较高, 且释放速率受温度和水分影响[15]-[17]。

研究表明, 将缓控释肥与速效尿素按比例(如 7:3)配施, 或采用缓控释肥作基肥并配合分蘖期追施尿素, 能更有效地提高水稻产量。特别是在中后期配合钾肥的施用, 能促进茎秆木质化, 增强抗折力和根系发育, 从而显著提升植株的抗逆性与抗倒伏能力。

3.3.2. 关键施肥方式与技术

科学的施肥方式对于发挥肥效至关重要, 核心是遵循水稻“前促、中控、后保”的需肥规律进行分期施肥[18]。

分期施肥: 基肥: 在整地或移栽前施入, 旨在为水稻整个生育期打下养分基础。分蘖肥: 于移栽返青后施用, 以促进有效分蘖, 保证单位面积穗数。穗肥: 在幼穗分化期施用, 对增加每穗粒数、减少颖花退化起决定性作用。粒肥: 在抽穗后施用, 可防止功能叶早衰, 提高灌浆结实率, 增加千粒重。施用方法: 深施: 将肥料施于土壤表层以下, 可大幅减少氮的挥发和随水流失, 显著提高肥料利用率, 但劳动强度较大。表施: 将肥料直接撒施于田面, 操作简单但损失较大。叶面喷施: 将低浓度肥液直接喷于叶片, 养分吸收快, 是补充锌等微量元素的有效手段。研究证实, 叶面喷施微肥对植株干重、千粒重和产量均有显著积极影响[19]-[21]。

水稻施肥是综合应用多种肥料与技术的精细管理过程。肥料种类上, 强调有机肥与化肥配合施用, 以改良土壤并快速补充养分; 施肥方式上, 核心是遵循施足基肥、早施分蘖肥、巧施穗粒肥。为提升效率, 提倡测土配方以精准施肥, 并采用深施、侧深施或使用缓控释肥等技术, 旨在减少养分流失, 提高

肥料利用率，最终实现高产、优质与环保的统一[13]。有机投入和化肥的综合使用可有效刺激农业土壤中的微生物群落[7]。研究表明，有机肥替代不仅能有效减少温室气体排放，还能提高有机碳含量，提高水稻产量。建议采用有机肥与控释肥相结合的综合施肥策略。这种方法促进了更清洁、更可持续的水稻生产[14] (见表 2)。

**Table 2.** Types of fertilizers and fertilization methods [22]-[27]  
**表 2.** 肥料种类与施肥方式[22]-[27]

| 分类     | 类型/方式  | 说明                       | 优点                           | 缺点                          |
|--------|--------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 肥料种类   | 化学肥料   | 工业生产，成分单一或复合。            | 养分含量高、肥效快、价格低、用量明确。          | 长期单一使用易造成土壤板结、酸化；易流失，利用率低。  |
|        | 有机肥料   | 如农家肥(人畜粪便)、绿肥、堆肥等。       | 改良土壤结构，提高肥力；养分全面，肥效持久；环保。    | 养分含量低，肥效慢；体积大，施用不便；需腐熟，费工。  |
|        | 生物肥料   | 含有益微生物菌剂，如固氮菌、解磷菌等。      | 活化土壤养分，减少化肥用量；改善根际环境，促生长。    | 肥效不稳定(受环境影响大)；见效慢；不能完全替代化肥。 |
|        | 缓/控释肥料 | 能缓慢或控制养分释放的智能肥料。         | 提高肥料利用率，省工省时(一次性施肥)；减少流失和污染。 | 价格昂贵；释放速率可能受温度、水分影响。        |
| 施肥方式   | 基肥     | 在整地时或移栽前施入土壤的肥料。         | 为水稻前期生长打下基础，满足整个生育期对养分的需求。   | 在沙质土壤中易流失。                  |
|        | 分蘖肥    | 在移栽返青后(约 7~10 天)为促进分蘖而施。 | 有效增加有效分蘖，保证单位面积穗数，为高产打下基础。   | 施用过量或过晚会导致无效分蘖增多，群体过大。      |
|        | 穗肥     | 在幼穗分化期(抽穗前)施用。           | 增加每穗粒数，减少颖花退化，是决定产量高低的关键肥。   | 施用时机和技术要求高，过早过晚或过量均不利。      |
|        | 粒肥     | 在抽穗后(扬花灌浆期)施用的肥料。        | 防止叶片早衰，提高光合效率，增加千粒重。         | 需谨慎使用，过量易造成贪青晚熟或病虫害加重。      |
|        | 表施     | 直接将肥料撒施于田面水中。            | 操作简单、省工。                     | 肥料易挥发(如氮肥)或随水流失，利用率低。       |
|        | 深施     | 将肥料施于土壤表层以下(如 5~10 厘米)。  | 大幅减少养分流失和挥发，显著提高肥料利用率。       | 劳动强度大，或需要专用机械。              |
|        | 叶面喷施   | 将低浓度肥液直接喷洒在叶片上。          | 养分通过叶片直接吸收，见效极快，用于补充微量元素。    | 肥效短暂，无法满足大量养分需求；浓度过高易烧叶。    |
| 现代施肥理念 | 测土配方施肥 | 先检测土壤养分，再按需配制肥料。         | 精准施肥，避免浪费和污染，实现增产增效。         | 需要技术支持和小规模定制，初期成本较高。        |
|        | 一次性施肥  | 使用缓控释肥，在整地时一次性施入。        | 极大节省人工，适合规模化生产；减少面源污染。       | 对肥料质量要求高，前期投入成本大。           |

3.4. 水稻生长期的营养诊断

3.4.1. 营养诊断时期

水稻生长时期的营养诊断对于确保作物健康生长和高产量至关重要。在不同的生长阶段，水稻对营养元素的需求也会有所不同，因此及时的营养诊断和调整是至关重要的。在水稻的不同生长阶段，需要

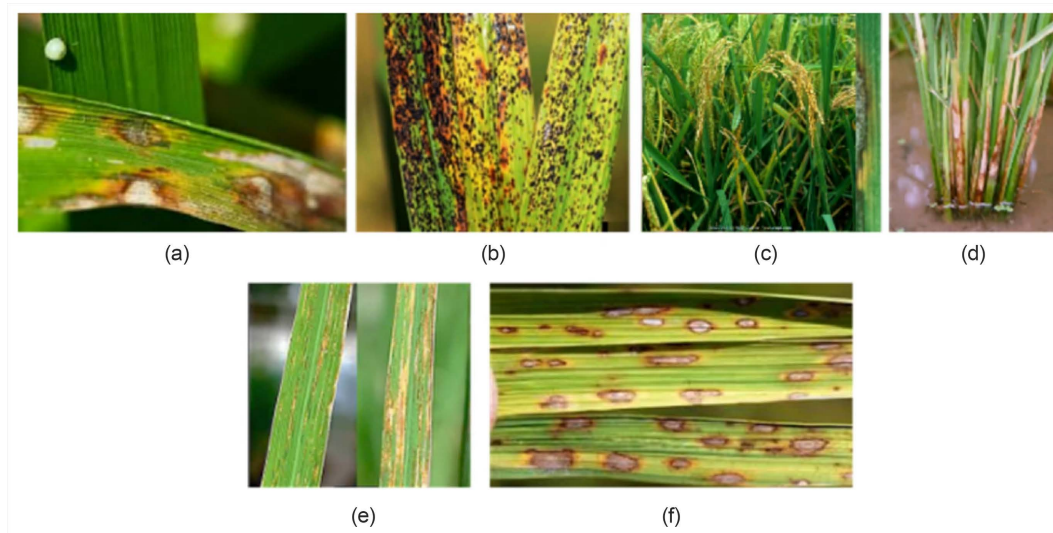


关注的营养元素包括氮、磷、钾、硫、镁、钙、锌、铁、锰、铜和硼等。在水稻的不同生长阶段，营养诊断可以通过土壤检测、植株组织检测和叶片颜色等方式进行。

需要重点关注以下几个生长阶段：1. 生育前期：这个阶段水稻对氮、磷、钾等元素的需求较大，因此需要确保土壤中这些元素的充足。此时可以通过土壤检测和植株组织检测来进行营养诊断，及时调整施肥方案。2. 生育中期：这个阶段水稻对氮、磷、钾的需求逐渐增加，同时对硫、镁、钙等微量元素的需求也增加。通过叶片颜色和植株生长情况来进行营养诊断，及时进行补充施肥。3. 生育后期：这个阶段水稻对氮、磷的需求逐渐减少，但对钾的需求增加。需要关注水稻叶片的颜色和生长情况，及时调整施肥方案，以确保水稻的健康生长和高产量。

### 3.4.2. 水稻营养诊断方法

水稻营养诊断方法主要包括基于叶片特征的传统方法和基于机器/深度学习的现代智能诊断技术。1. 土壤检测：通过对土壤的化学性质进行检测，包括土壤的 pH 值、有机质含量、氮、磷、钾等养分含量。这可以帮助农民了解土壤中各种营养元素的含量，从而制定合理的施肥方案。2. 植株组织检测：通过对水稻植株的根、茎、叶等组织进行化学分析，了解植株吸收的养分含量和植株的营养状况。这可以帮助农民了解植株对各种营养元素的吸收情况，及时调整施肥方案。3. 叶片颜色：通过观察水稻叶片的颜色来判断植株的营养状况。例如，氮缺乏会导致叶片变黄，铁缺乏会导致叶片变白等。通过观察叶片颜色可以初步判断植株的营养状况，及时进行补充施肥。此外，还可以通过监测植株的生长情况、叶片的形态和大小等来进行营养诊断。传统方法依赖叶片颜色、形态和纹理等视觉特征，以及结合 SPAD 仪测定叶绿素含量来间接反映氮素状况[28]。氮营养指数(NNI)和累积氮亏缺(AND)是核心诊断指标，通过临界氮稀释曲线( $N_{crit} = 3.36 \times W^{-0.30}$ )计算，其中 W 为地上部生物量(t/ha)。NNI = 1 表示氮素适宜，<0.95 为缺乏，>1.05 为过剩[29]-[31] (见图 1)。

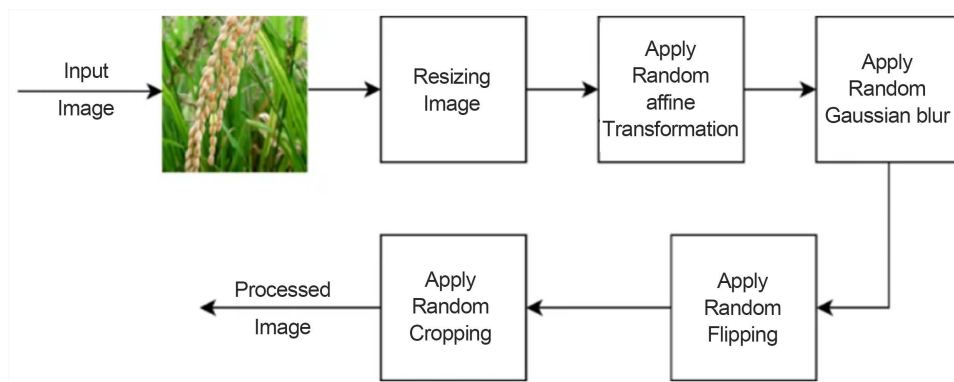


**Figure 1.** Various samples of rice leaf diseases: (a) Rice smut disease; (b) Rice false black stem rot disease; (c) Rice neck smut disease; (d) Sheath blight disease; (e) Rice bacterial stripe disease; (f) Rice brown spot disease [32]

**图 1.** 水稻叶病害的各种样本：(a) 稻瘟病；(b) 水稻假黑穗病；(c) 水稻颈瘟病；(d) 鞘枯病；(e) 水稻细菌条纹；(f) 水稻褐斑病[32]

现代智能方法利用多光谱遥感、无人机(UAV)成像和卷积神经网络(CNN)实现高通量诊断。多光谱影像结合植被指数(如 NDRE、RVI、CIRE、OSAVI)和纹理特征，通过随机森林(RF)、支持向量机(SVM)等

机器学习模型反演 LNC (叶片氮浓度)和 NNI。深度学习方法(如 DenseNet、ResNet、InceptionNet)通过迁移学习提取深层特征,显著提升诊断精度。例如,集成模型(如 RF + DenseNet + EfficientNet)通过加权平均策略,准确率达 95% 以上,有效克服品种、生育期和环境差异的影响[33] [34] (见图 2)。



**Figure 2.** Rice pre-treatment and data augmentation techniques [32]

**图 2.** 水稻预处理和数据增强技术[32]

此外,多叶片 SPAD 值融合统计指标(最大值、中位数、标准差)进一步优化了模型性能。第二完全展开叶(2LFT)的 SPAD 值对 LNC 预测最关键,而第三叶(3LFT)对 NNI 估计更重要。这些方法实现了田间尺度(处方图变量施肥)和区域尺度(多目标优化)的精准氮管理,平衡了农学、经济和环境效益。未来方向包括轻量化模型部署和多元养分(如磷、钾)缺乏的同步诊断[32] [35]。

基于 SPAD 和氮营养指数(NNI)的方法属于间接测量,易受作物品种、其他胁迫因素干扰,且临界氮稀释模型普适性有限,点状测量难以代表田间变异。而无人机遥感与智能模型技术则面临高成本与技术门槛,其模型性能高度依赖训练数据质量,存在过拟合和在未知场景下泛化能力差的风险;同时,影像数据易受环境条件影响,且复杂的深度学习模型如同“黑箱”,决策过程不透明,早期诊断的灵敏度和可靠性仍有挑战。

## 4. 稻养分资源高效利用与精准施肥

### 4.1. 基于测土配方施肥

基于测土配方,全面掌握土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾等主要养分含量及 pH 值等关键指标。结合目标产量下的水稻养分需求规律,制定个性化的施肥计划,确定氮、磷、钾及中微量元素的适宜总量、基追比例,从源头避免盲目施肥,确保养分供应与作物需求在数量和时间上的匹配[36]-[38]。

### 4.2. 肥料选择与施用方式优化

肥料种类选择上,倡导有机无机配合施用。增施有机肥、推行秸秆还田可改善土壤结构,提升保肥供肥能力,减少化肥流失。施用方式上,需综合运用基肥深施、分期追肥、叶面喷施等多种手段。特别是氮肥的使用,减少分蘖后期无效施用,增加穗粒肥比例,以提高肥料向籽实的转化效率[39] [40]。

### 4.3. 基于作物实时需求的变量管理

传统的固定用量施肥难以满足田块内部的空间变异需求。现代精准农业技术,如利用无人机(UAV)多光谱遥感监测作物长势,通过反演氮营养指数(NNI)、叶绿素含量(SPAD 值)等指标,可以实时诊断水稻氮素丰缺,及时补充作物所需要的肥料。

## 5. 结论

本综述系统解析了水稻高产优质生产的作物特性，并深入探讨了现代养分精准管理策略，旨在为应对当前水稻生产面临的产量瓶颈、资源高消耗及环境压力提供理论依据与可行路径。通过综合分析，得出以下核心结论：水稻固有的生物学习性是养分管理的基石。水稻作为喜温好湿的作物，其生长发育对光照、温度、水分及土壤肥力(如 pH 值、有机质含量)有特定要求。深刻理解并满足这些特性，是所有高效养分管理措施制定的根本前提。现代养分管理已从单一肥料投入转向“土壤-作物-环境”系统调控。实践表明，通过轮作休耕、垄作免耕等生态农艺措施，能有效改善土壤理化性质，增加微生物多样性，提升土壤地力与可持续生产能力，为养分高效利用创造良好的根区环境。肥料种类与施用技术的创新是提升利用率的关键。有机无机肥料配合施用、采用缓控释肥料和深施等技术，能显著减少养分损失，实现增产与环保的双重目标。精准农业技术是实现养分管理现代化的核心驱动力。基于无人机多光谱遥感、机器学习和深度学习模型的实时营养诊断技术，能够无损、快速地反演氮营养指数(NNI)、叶绿素含量(SPAD 值)等关键指标。这为生成变量施肥处方图提供了科学依据，极大地提升了肥料利用效率和经济效益。综上所述，实现水稻高产、优质、高效、环保的协同发展，必须依赖于品种遗传改良、健康土壤培育、智能精准施肥三大支柱的深度融合。将传统农艺智慧与现代信息技术有机结合，是突破当前水稻生产瓶颈的必然选择。

## 6. 未来展望

面向未来，为应对全球人口增长、气候变化加剧及资源环境约束趋紧的挑战，水稻养分管理研究与实践需在以下重点方向寻求突破：1、诊断技术的多元化与轻量化。当前研究集中于氮素营养诊断，未来需加强磷、钾及中微量元素缺乏的同步快速诊断技术研发。同时，致力于开发计算需求更低轻量化人工智能模型，推动精准农业技术在资源受限地区和小农户中的普及应用。管理策略的智能化和动态化。2、未来应探索将实时气象数据、土壤传感器信息与遥感影像进行多模态融合，构建更智能的决策支持系统。发展能够动态响应天气变化、作物长势的自适应变量施肥技术，实现全生育期养分供应的最优动态调控。3、育种与管理的协同创新。应深入开展水稻养分高效利用的遗传基础研究，利用基因编辑等现代生物技术，定向培育养分吸收效率高、抗逆性强的绿色超级稻新品种。使作物本身更好地适应中低肥力土壤环境，从源头上减少对外部肥料投入的依赖。4、未来应开发融合高光谱、热红外与基因组信息的多源诊断模型。通过引入基因型数据，可从本质上区分遗传潜力和环境胁迫的影响，从而解耦二者的交互作用，实现对氮营养等状况更精准、普适的监测与预测。5、全产业链的碳中和与可持续发展。未来研究需量化不同养分管理策略的碳足迹，探索如何通过优化施肥、稻田管理等措施，在保障产量的同时，实现水稻生产的碳中和目标。推动构建环境友好、资源节约的稻作生产体系，为全球粮食安全与农业可持续发展作出更大贡献。

## 参考文献

- [1] Yao, W., Yang, Y., Beillouin, D., Zhao, J., Olesen, J.E., Zhou, J., *et al.* (2025) Legume-Rice Rotations Increase Rice Yields and Carbon Sequestration Potential Globally. *One Earth*, **8**, Article ID: 101170. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.12.006>
- [2] Wei, C., Cao, B., Gao, S. and Liang, H. (2025) Co-Incorporation of Green Manure and Rice Straw Increases Rice Yield and Nutrient Utilization. *Plants*, **14**, Article 1678. <https://doi.org/10.3390/plants14111678>
- [3] Yang, T., Zhang, H., Li, F., Yang, T., Shi, Y., Gu, X., *et al.* (2024) Optimized Tillage Method Increased Rice Yield in Rice Ratooning System. *Agriculture*, **14**, Article 1768. <https://doi.org/10.3390/agriculture14101768>
- [4] Liang, X., Zhao, C., Liu, K., Wang, W., Huo, Z., Song, X., *et al.* (2025) Advances in Research on the Biological Characteristics of Weedy Rice. *Plants*, **14**, Article 3188. <https://doi.org/10.3390/plants14203188>



- [5] Fan, Y., Chen, Z., Yang, X., Cui, K., Huang, J., Peng, S., *et al.* (2025) The Race to Flourish: Evaluating Natural Variation of Early Growth Rates in Rice. *Food and Energy Security*, **14**, e70133. <https://doi.org/10.1002/fes3.70133>
- [6] Mohapatra, K.K., Nayak, A.K., Patra, R.K., Tripathi, R., Swain, C.K., Mishra, P., *et al.* (2025) Multi-Criteria Assessment of Climate Smartness in Rice-Based Cropping Systems. *Farming System*, **3**, Article ID: 100135. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100135>
- [7] Rongyan B, Wenlong C, Shang H, *et al.* (2025) Straw Retention and Manure Application Increase the Yield of Rice in Rotation with Rapeseed and Wheat by Improving Soil Fertility. *Land Degradation & Development*.
- [8] 孟秋峰, 张欣洁, 顾洁莹, 等. 稻菜轮作模式研究进展[J]. 长江蔬菜, 2025(20): 40-44.
- [9] 周晶, 陈灿, 隆斌庆, 等. 三种垄栽稻田综合种养模式对水稻产量、品质及土壤养分的影响[J]. 中南农业科技, 2025, 46(9): 32-37.
- [10] Grover, D., Chaudhry, S. and Mishra, A.K. (2025) Evaluating the Influence of Tillage and Residue Management Practices on Soil Quality and Nutrient Dynamics in Rice-Wheat Cropping Systems in Haryana. *Environmental Research Communications*, **7**, Article ID: 075010. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/adea36>
- [11] Zhang, H., Chen, L., Wang, Y., Xu, M., Qiu, W., Liu, W., *et al.* (2025) Straw and Green Manure Return Can Improve Soil Fertility and Rice Yield in Long-Term Cultivation Paddy Fields with High Initial Organic Matter Content. *Plants*, **14**, Article 1967. <https://doi.org/10.3390/plants14131967>
- [12] Pan, Z., Wu, C., Xing, Y., Man, Y., Jiang, T., Ustiatik, R., *et al.* (2025) Mitigating Methylmercury in Rice through Ridge Tillage: A Sustainable Solution for Mercury-Polluted Paddy Fields in Populated Regions. *Environmental Pollution*, **375**, Article ID: 126347. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126347>
- [13] 吴杏梅. 水稻优质高产栽培技术要点[J]. 世界热带农业信息, 2025(10): 127-129.
- [14] Ding, Z., Zeng, J., He, Z., Zhu, B., Nie, J., Zhou, Y., *et al.* (2025) Optimizing Fertilization Strategies to Reduce Carbon Footprints and Enhance Net Ecosystem Economic Benefits in Ratoon Rice Systems. *Agriculture*, **15**, Article 1715. <https://doi.org/10.3390/agriculture15161715>
- [15] Coyle, K., Adjei, J., Abbasi, E., Vargas, P., Slaughter, L., Alvarez-Pugliese, C.E., *et al.* (2024) Novel Slow-Release Fertilizer Promotes Nitrogen Circularity While Increasing Soil Organic Carbon. *Soil Science Society of America Journal*, **89**, e20797. <https://doi.org/10.1002/saj2.20797>
- [16] 高天强, 叶凌凤. 肥料种类和用量对水稻生长及产量的影响[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(17): 22-25.
- [17] 汤强, 赵琼, 寇娜, 等. 不同种类肥料对稻田生态系统碳排放的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2025, 52(5): 885-895.
- [18] 王庆新, 李莹雪. 科学施肥技术在水稻种植中的应用[J]. 河北农业, 2025(10): 92-93.
- [19] 雷文婷. 优化水稻种植技术重要环节及正确施肥方式的运用方法[J]. 种子科技, 2025, 43(17): 222-224.
- [20] 张铭, 沈婷, 俞鹏飞. 不同施肥方式对水稻产量及肥料利用情况的影响[J]. 现代农业科技, 2025(17): 70-72.
- [21] 江红蕾. 有关如何更科学地开展水稻种植与施肥技术实施的研究[J]. 种子世界, 2025(9): 147-149.
- [22] Pei, W., Dai, M., Shi, S., Zhang, Y., Wu, D., Qiao, C., *et al.* (2025) Effects of Foliar Selenium Spraying on the Growth and Selenium Content and Morphology of Rice. *Frontiers in Plant Science*, **16**, Article 1587159. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587159>
- [23] Dun, C., Zhang, Y., Mi, K., Wang, R., Chen, Y., Zhang, H., *et al.* (2025) Impact of Controlled-Release Nitrogen Fertilizer on Rice Selenium Content, Yield and Quality. *Journal of Food Composition and Analysis*, **141**, Article ID: 107379. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107379>
- [24] Ma, X., Ding, Z., Hu, R., Wang, X., Hou, J., Zou, G., *et al.* (2025) Increasing Rice Yield with Low Ammonia Volatilization by Combined Application of Controlled-Release Blended Fertilizer and Densification. *PLOS ONE*, **20**, e0318177. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318177>
- [25] Wu, H., Jin, Y., Qi, Y., Huang, R. and Wang, F. (2025) Combination of Nitrogen and Organic Fertilizer Practices Increased Rice Yields and Quality with Lower CH<sub>4</sub> Emissions in a Subtropical Rice Cropping System. *Frontiers in Plant Science*, **16**, Article 1613163. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1613163>
- [26] Wu, M., Li, L., Wu, G., Meng, X., Wang, Z., Zhang, H., *et al.* (2025) Applying Silicon Fertilizer under Straw Return Can Reduce Nitrogen Application, Increase Rice Yield and Lodging Resistance. *BMC Plant Biology*, **25**, Article No. 1086. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06924-w>
- [27] Sari, S.L., Rahman Djuwansah, M., Trinurani Sofyan, E., Budiarto, R., Nur Istyami, A. and Wibawa Mukti, G. (2025) Shape-adjusted Controlled-Release Fertilizer for Enhancing Nutrient Efficiency and Reducing Residues in Rice Production. *Journal of Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/01904167.2025.2564337>
- [28] Sharma, M., Kumar, C.J. and Bhattacharyya, D.K. (2024) Machine/Deep Learning Techniques for Disease and Nutrient Deficiency Disorder Diagnosis in Rice Crops: A Systematic Review. *Biosystems Engineering*, **244**, 77-92.

- <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.05.014>
- [29] Jia, Y., Zhao, Y., Ma, H., Gong, W., Zou, D., Wang, J., *et al.* (2024) Analysis of the Effects of Population Structure and Environmental Factors on Rice Nitrogen Nutrition Index and Yield Based on Machine Learning. *Agronomy*, **14**, Article 1028. <https://doi.org/10.3390/agronomy14051028>
- [30] R, E. and Manoranjitham, T. (2024) An Artificial Intelligence Ensemble Model for Paddy Leaf Disease Diagnosis Utilizing Deep Transfer Learning. *Multimedia Tools and Applications*, **83**, 79533-79558. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-19987-y>
- [31] Rodriguez, I.M., Lacasa, J., van Versendaal, E., Lemaire, G., Belanger, G., Jégo, G., *et al.* (2024) Revisiting the Relationship between Nitrogen Nutrition Index and Yield across Major Species. *European Journal of Agronomy*, **154**, Article ID: 127079. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127079>
- [32] Pai, P., Amutha, S., Patil, S., Shobha, T., Basthikodi, M., Shafeeq, B.M.A., *et al.* (2025) Deep Learning-Based Automatic Diagnosis of Rice Leaf Diseases Using Ensemble CNN Models. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 27690. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13079-z>
- [33] Yang, J., Jiang, J., Fu, Z., Wang, W., Cao, Q., Tian, Y., *et al.* (2025) Integrating Phenology Information with UAV Multispectral Data for Rice Nitrogen Nutrition Diagnosis. *European Journal of Agronomy*, **169**, Article ID: 127696. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127696>
- [34] Qiu, Z., Ma, F., Zhou, J. and Du, C. (2025) Improving Rice Nitrogen Nutrition Index Estimation Using UAV Images Combined with Meteorological and Fertilization Variables. *Agronomy*, **15**, Article 1946. <https://doi.org/10.3390/agronomy15081946>
- [35] Liao, X. and Yang, H. (2025) Diagnosis of Early Nitrogen, Phosphorus and Potassium Deficiency Categories in Rice Based on Multimodal Integration and Knowledge Distillation. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 13014. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97585-0>
- [36] 徐永娟, 闻惠. 测土配方施肥对水稻产量性状和肥料利用率的影响研究[J]. 北方水稻, 2025, 55(5): 41-44.
- [37] 李婷婷, 黄玉准, 黄泉龙. 水稻测土配方施肥技术及其应用[J]. 农村科学实验, 2025(9): 66-68.
- [38] 何贵宾. 测土配方施肥技术在水稻种植中的应用分析[J]. 南方农机, 2024, 55(16): 75-77.
- [39] 郎川. 水稻施肥中存在的问题及解决对策[J]. 种子科技, 2025, 43(11): 180-182.
- [40] 汪文丽, 周发英, 郑克梅. 水稻种植中科学施肥技术及方法探究[J]. 农村科学实验, 2024(9): 43-45.