

冬枣精准施肥专家系统的建立与应用*

宋世龙¹ 潘梦雨¹ 郑险峰¹ 石倩倩² 张晓² 李新岗²

(1.西北农林科技大学 杨凌 邮编: 712100 2. 西北农林科技大学 杨凌 邮编: 712100)

摘要:【目的】为枣农制定科学合理的施肥方案以及提供简便、快捷、科学的施肥指导。【方法】利用土壤养分数据库和养分平衡法开发精准施肥专家系统(手机 App 安卓版本和苹果版本),逐户提供精准施肥方案。【结果】在保证产量与品质的基础上,与农户传统施肥相比,使用 App 推荐方案进行施肥:氮、磷和钾肥施用量分别减少 14%~20%、35%~41%和 43%~52%。【结论】冬枣精准施肥专家系统设计合理,操作简便,既能为用户提供施肥方案,同时提供了交流的平台。该系统的推广对于提高肥料利用率,改善枣园土壤质量和冬枣品质具有重要意义。

关键词: 养分平衡法、系统构成、系统功能、应用与推广

Establishment and Application of Expert System for Precise Fertilisation of Jujubes

Song Shilong¹ Pan Meng Yu¹ Zheng Xianfeng¹ Zhang Xiao² Li Xingang²

(1. Northwest A&F University Yangling, Shaanxi 712100 2. Northwest A&F University Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: 【Objective】 Developing scientifically rational fertiliser programmes for jujube farmers as well as providing easy, quick and scientific guidance on fertiliser application. 【Method】 Developing an expert system for precision fertiliser application using the soil nutrient database and the nutrient balance method (mobile app Android and Apple versions) to provide precise fertiliser application programmes on a household-by-household basis. 【Result】 On the basis of guaranteeing yield and quality, compared with traditional fertiliser application by farmers, fertiliser is applied using the App's recommended programme: Nitrogen, phosphorus and potash applications are reduced by 14% to 20%, 35% to 41% and 43% to 52%, respectively. 【Conclusion】 The winter jujube precise fertiliser application expert system is reasonably designed and easy to operate, providing users with fertiliser application solutions and a platform for communication at the same time. The promotion of this system is of great significance for improving the fertiliser utilisation rate, the soil quality of jujube orchards and the quality of winter jujube.

Key words: Nutrient Balance Method; system composition; system function; Application and promotion

目前,中国化肥生产和消费均为世界第一,化肥的广泛应用一方面促进了农作物的生长,另一方面盲目的过量施肥又对农作物品质及环境造成了威胁(CHEN, X *et al.*, 2022)。所以如何做到减量施肥、精准施肥变的尤为重要(NUNEZ-CARDENAS, P *et al.*, 2022)。近年来,测土配方施肥有效地解决了在不减少农产品产量的前提下,提供最合理的施肥方案(徐强, 2024)。前人采用大数据和 Web GIS 技术,开发应用平台施肥数据可视化系统,并在广东省展开应用示范(荆旭全等, 2018)。利用土壤养分系统平衡原理、应用移动通信技术和数据存储等现代科学技术,研发蔬菜简便快速推荐施肥系统 APP(张怀志等, 2018)。随着大荔冬枣产业的发展,化肥过量施用现象较为普遍,化肥施用结构不合理,化肥利用率不高,肥料投入地区之间不平衡问题突出,致使一系列农业环境质量问题日益凸现(XU, X *et al.*, 2023)。为此本研究利用 C#语言结合 ArcGIS 分析,采用养分平衡法的原理进行设计冬枣精准施肥专家系统,系统通过 C#语言编辑调配,分别计算作物土壤供肥量参数、有效养分校正参数、肥料利用率参数、所用肥料有效养分含量参数和作物需肥量参数,最终计算作物各施肥量,以期保证植物正常生长发育需要,减少肥料用量,节本增效。

1、养分平衡法

1.1 基本概念

养分平衡法是一种科学的农业管理技术，主要用于估算作物施肥量，确保作物能够获得实现目标产量所需的养分，同时维持土壤养分的平衡状态(杜君等, 2012)。这种方法基于作物养分需求与土壤养分供应之间的差额来决定施肥策略，以补充土壤中不足以支持目标产量的部分养分。其优点在于其概念清晰，理论上容易掌握且有助于精准施肥，减少过度施肥导致的环境问题（如水体富营养化），节约成本，提高资源利用效率，并促进作物产量和品质的提升(ZHU, W *et al.*, 2023)。通过合理平衡土壤养分，还可以维持和提升土壤健康，实现农业生产的可持续发展(张延春等, 2008)。

1.2 养分平衡法公式

实现目标产量所需某种养分的施肥量可用公式表达为:

$$F = \frac{(Y \times Ny) - Ns}{Nf \times Ef}$$

式中: F- 施肥量(kg/ha);

Y- 目标产量(kg/ha);

Ny- 单位产量的养分吸收量(kg);

Ns- 土壤养分供应量(kg/ha);

Nf- 所用肥料的养分含量(%);

Ef- 当季肥料利用率(%)。

1.3 养分平衡法的五个重要参数

(1) 目标产量：目标产量即计划产量。目标产量根据温室条件、栽培品种、管理水平及栽培者预期目标而定。目标产量可采用平均单产法来确定(王囡囡等, 2021)。平均单产法是利用施肥区前3年平均单产和年递增率为基础确定目标产量,其计算公式如下:

$$\text{目标产量(kg/666.67 m}^2\text{)} = (1 + \text{递增率}) \times \text{前3年平均单产(kg/666.67 m}^2\text{)}$$

一般粮食作物的递增率为10%~15%,露地蔬菜为20%，设施蔬菜为30%。结合大荔实际情况,中低产地块增加15%-20%,高产地块增加5%-15%作为目标产量较为适宜。

(2) 养分携出量：在作物成熟后将全株收获,经过化学分析测得作物各养分含量,测定某一作物每千克经济产量的养分消耗量与作物目标产量的积,即作物需肥量。通过对有关资料分析(闫鹏科等, 2020)以及大量分析验证(陆亚楠, 2021; 王文放, 2019): 冬枣每百公斤需要养分 N: 1.5kg、P: 0.8kg、K: 1.3kg。

(3) 土壤养分供应量:

(3.1) 通过土壤测试评估土壤中可供作物吸收利用的有效养分含量(碱解氮、速效磷、速效钾), 考虑土壤类型、肥力水平和土层深度等因素。土壤取样化验来估算:土壤供肥量(kg)=土壤养分测试值(mg/kg)×土壤养分利用系数×0.15

(3.2) 土壤养分利用系数: 通过对有关资料分析(齐振兴, 2007) 以及大量分析验证(史发猛, 2013; 李韵珠王凤仙黄元仿, 2000): 冬枣的氮、磷、钾的土壤养分利用系数分别为0.55~1.2、0.6~1.5、0.26~0.7(养分利用系数的高低取决于土壤中所含养分的盈余, 若取样土壤中含有有效养分含量低, 其土壤利用系数相对高, 相反, 则土壤利用系数偏低, 运用此系数推荐的施肥结果符合大荔县冬枣推荐施肥量, 达到了节本增效的好效果)。

(4) 肥料有效养分含量: 肥料氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)等元素的百分比含量。如尿素含氮量46%以上, 过磷酸钙含磷量15%以上, 硫酸钾含钾量52%以上

(5) 肥料利用率: 是作物所能吸收肥料养分的比率, 用以反映肥料的利用程度(孙洪仁等, 2014)。一般而言, 肥料利用率越高, 技术经济效果就越大, 其经济效益也就越大。任何肥料施入土壤能被当季作物

利用的只是其中一部分,余者经淋溶和挥发损失或被土壤固定成不可利用的状态(吴金芝等, 2023; 孙继梅, 2019)。影响肥料利用率的因素很多,如作物品种、施肥量,养分配比、土壤肥力、施肥方法及气候条件等,所以肥料利用率不是固定不变的(金凤霞, 2024; 张阳等, 2023)。我们研究小组得出大荔设施冬枣园氮、磷、钾肥料的利用率(金晓艳, 2022) 分别为 13.78%~50.87、6.29%~18.27%、30.61%~68.27% (肥料利用率的高低与土壤养分利用系数同理)。

2、系统构成

2.1 C#语言与 ArcGIS

C#(发音为“C Sharp”)是一种由微软开发的现代、面向对象的编程语言(马强等, 2024)。

C#具有以下重要特点:

- (1) 类型安全: 在编译时会进行严格的类型检查,有助于减少运行时的错误。
- (2) 面向对象: 支持类、对象、继承、多态和封装等面向对象的特性,使代码具有良好的结构和可维护性。
- (3) 语法简洁: 语法清晰、简洁,易于理解和编写。
- (4) 丰富的库支持: .NET 框架提供了大量的类库,涵盖了众多领域,如文件操作、网络通信、图形界面等。

C#广泛应用于以下领域:

- (1) Windows 桌面应用程序开发: 可用于创建功能强大的 Windows 桌面软件。
- (2) Web 应用开发: 如 ASP.NET 框架中的 Web 应用。
- (3) 游戏开发: 特别是使用 Unity 游戏引擎时。
- (4) 移动应用开发: 通过 Xamarin 等技术开发跨平台的移动应用。

总之,C#是一种功能强大且广泛应用的编程语言,在企业级应用开发和各种软件项目中发挥着重要作用。

ArcGIS 是由 Esri 公司开发的一套地理信息系统(GIS)软件(王彩芬, 2016)。

它具有以下主要特点和功能:

- (1) 强大的地图绘制和可视化: 能够创建精美的地图,支持多种地图类型和符号化方式。
- (2) 空间数据分析: 包括缓冲区分析、叠加分析、网络分析等多种分析工具。
- (3) 数据管理: 有效管理地理数据,支持多种数据源的导入和导出。
- (4) 三维可视化: 展示三维地理场景,提供更直观的空间认知。
- (5) 定制和扩展: 允许通过编程进行定制开发,满足特定的业务需求。

ArcGIS 广泛应用于城市规划、资源管理、环境保护、交通运输等众多领域,帮助用户更好地理解、分析和解决与地理空间相关的问题(CONG, P *et al.*, 2023)。

本系统将 C#语言与 ArcGIS 结合,基于养分平衡法原理可分为 5 部分,大荔县养分空间分布图、作物需肥量参数计算、所施肥料有效养分含量参数计算、土壤供肥量参数计算、当年肥料利用率参数的计算,将各参数输入系统程序,即可计算生成施肥报告单。

2.2 系统构架

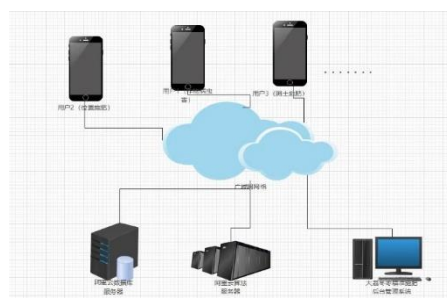


图 1 专家系统软件构架

前端构建使用的是 Web App，Web App 是基于 HTML5 新标准的网站新技术，专门针对于手机移动互联网的 Web 项目开发，具有跨平台的优势，App 应用客户端只需安装应用的框架部份，而应用的数据则是每次打开 App 的时候，通过云端获取数据进行呈现。

后端开发通过 WebAPI 进行数据交互，WebAPI 是一种可以构建面向各种客户端服务的技术。与 WCF 和 Webservice 相比，WebAPI 更适合进行 http 的请求，它是利用 http 协议的各个方面来表达服务，更轻量、更灵活，可通过 Josn、XML 等多种格式进行数据的传递。

3、系统功能

系统功能主要包括如下功能模块：

(1) 用户登录模块

可根据用户输入的手机号码，系统会自动发送验证码到用户手机，用户输入验证码后即可完成登录认证。这个过程中，系统会调用后台的短信平台来发送验证码。



图 2 测土施肥登录首页



图 3 位置施肥登录首页

(2) 测土施肥合理化建议方案模块

系统根据农户的测土数据和冬枣目标产量以及科学的施肥算法（结合土壤养分含量、作物需求和施肥效果等因素），推荐最适合的施肥方案于农户，避免了过度施肥的情况（精准施肥），从而提高了施肥效果和冬枣的产量与品质。



图 4 测土施肥合理化建议

(3) 位置施肥合理化建议方案模块

App 调用手机 GPS 的定位功能，获取用户当前地块的经纬度信息，并根据算法从氮磷钾分布图中抽取该地块的碱解氮、有效磷、速效钾的值。然后，根据推荐配方算法，为该地块提供最佳的施肥方案。



图 5 位置施肥合理化建议

(4) 施肥建议作物病害知识库模块

施肥建议、作物病害知识库是指我们将该领域的知识、经验和进行总结，然后通过后台管理模块录入系统中，以便农户和我们可随时通过手机 APP 进行查看学习。

(5) 消息模块

消息模块主要用于向农户发送通知、提醒等信息。通过后台消息管理模块，管理员可以新建消息，并根据需要将其推送给不同的农户。农户可以通过手机 APP 接收并查看这些消息。

(6) 个人历史施肥合理化建议模块

该模块是指对于测土施肥和位置施肥给出的个人合理化施肥方案进行保存后，可在此处查看展示。以便农户把系统推荐的施肥方案提供给肥料销售者，满足自己用肥需求。

(7) 下载方式

目前，大荔县枣农可以下载安装免费软件“精准施肥手机 App”，能根据智能手机所在枣园（打开手机定位权限）和输入的目标产量，取得不同枣园的推荐施肥量。苹果手机用户可在应用程序商店（App Store）中搜索“大荔冬枣精准施肥专家系统”下载安装，安卓手机用户可扫码下载“精准施肥手机 App”后用手机 QQ 浏览器安装。



图 6 安卓手机下载二维码



图 7 苹果手机下载界面

4、使用案例与推广

4.1 使用案例

在安仁镇新华村史群利家和步昌村马涛家枣园中进行土壤检测，检测结果如下：

表 1 用户枣园土壤测定结果

检测项目	史群利枣园检测	分级	马涛枣园检测结	分级
	结果		果	
PH	9.12	强碱性	8.77	强碱性
速效氮含量（mg/kg）	88.90	较高	104.65	较高
速效磷含量（mg/kg）	16.94	较低	21.96	适中
速效钾含量（mg/kg）	330.44	极高	336.76	极高
有机质（g/kg）	11.49	适中	9.55	较低

根据史群利家枣园测土结果（速效氮含量：88.90mg/kg 较高水平、速效磷含量 16.94mg/kg 较低水平速效钾含量 330.44mg/kg 极高水平），我们使用精准施肥 App 得到推荐施肥方案为

基肥:每亩使用尿素 36 千克;磷酸二铵 35 千克;硫酸钾 12 千克。追肥：每亩使用尿素 9 千克;磷酸二铵 9 千克;硫酸钾 5 千克。“或者”复合肥方案为基肥：每亩可使用养分含量接近 27-19-7 的肥料 83 千克，追肥：每亩可使用养分含量接近 25-17-11 的肥料 23 千克。

农户施肥方案为：1.复合肥（15-15-15）200kg/667m² 2.有机肥（50kg/667m²）3.高磷肥（50kg/667m²）。与农户传统施肥相比，使用 App 推荐方案进行施肥:氮、磷和钾肥施用量分别减少 20%、35%和 43%。

根据马涛家枣园测土结果（速效氮含量：104.65mg/kg 较高水平、速效磷含量 21.96mg/kg 适中水平速效钾含量 336.76mg/kg 极高水平），我们使用精准施肥 App 得到推荐施肥方案为

基肥:每亩使用尿素 41 千克;磷酸二铵 26 千克;硫酸钾 12 千克。追肥：每亩使用尿素 10 千克;磷酸二铵 7 千克;硫酸钾 5 千克。“或者”复合肥方案为基肥：每亩可使用养分含量接近 30-15-8 的肥料 79 千克，追肥：每亩可使用养分含量接近 27-14-12 的肥料 22 千克。

农户施肥方案为：1.复合肥（19-19-19）150kg/667m² 2.高钾肥（30kg/667m²） 3.高磷肥（15kg/667m²）。与农户传统施肥相比，使用 App 推荐方案进行施肥:氮、磷和钾肥施用量分别减少 14%、41% 和 52%。

4.2 成果展示

- （1）目前在精准施肥手机 App 软件后台中录入了近年来共采集分析的 1000 多家枣园的土壤数据。随着土壤测定数据量越大，手机 App 推荐施肥越精准。
- （2）成为基层农技工作者推荐施肥的好帮手。
- （3）在 2023 年 11 月和 2024 年 1 月分别获得安卓版与苹果版软件著作权。

5.结论与讨论

- （1）科技创新在农业领域的应用具有巨大潜力，可以帮助农民提高生产效率和经济效益。

(2) 冬枣精准施肥专家系统 App 为农业可持续发展提供了一种有效的解决方案, 促进了资源的合理利用和环境保护。

(3) 与高校合作和提供专家支持是确保 App 准确性和可靠性的重要因素。

参考文献

- CHEN X, YAN X, WANG M, *et al.* 2022. Long-Term Excessive Phosphorus Fertilization Alters Soil Phosphorus Fractions in the Acidic Soil of Pomelo Orchards. *Soil & Tillage Research*, 215.
- CONG P, ZHANG D, YI M. 2023. Application of ArcGIS 3D Modeling Technology in the Study of Land Use Policy Decision Making in China. *Scientific Reports*, 13(1).
- NUNEZ-CARDENAS P, DIEZMA B, MIGUEL G S, *et al.* 2022. Environmental LCA of Precision Agriculture for Stone Fruit Production. *Agronomy-Basel*, 12(7).
- XU X, WANG C, WANG H, *et al.* 2023. Development and Performance Evaluation of an APP for Vegetable Fertilization and Irrigation Management Originated From EU-Rotate_N. *Agricultural Water Management*, 289.
- ZHU W, ZENG K, TIAN Y, *et al.* 2023. Achieving the Simultaneous Improvement of Rice Yield and Quality Using an Improved Fertilization Method in Southern China. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(2): 2053-2065.
- 杜君, 白由路, 杨俐苹, 等. 2012. 养分平衡法在冬小麦测土推荐施肥中的应用研究. *中国土壤与肥料*(01): 7-13.
- 金风霞. 2024. 优化施肥方式对玉米产量及肥料利用效率的影响. *种子科技*, 42(09): 149-151.
- 金晓艳. 2022. 土壤健康状况评价及不同肥料配比对冬枣生长和品质的影响. *西北农林科技大学*, 92.
- 荆旭全, 蔡德楠, 丁文翰, 等. 2018. 精准施肥大数据系统的研究与应用. *江苏农业科学*, 46(24): 256-262.
- 李韵珠王凤仙黄元仿. 2000. 土壤水分和养分利用效率几种定义的比较. *土壤通报*(04): 150-155.
- 陆亚楠. 2021. 灵武长枣营养元素含量动态变化及需求规律研究. *宁夏大学*, 60.
- 马强, 倪红红, 刘吉凯, 等. 2024. C#程序设计课程思政教学实践研究. *电脑知识与技术*, 20(14): 132-134.
- 齐振兴. 2007. 红壤、潮土、黑土中磷钾有效养分利用系数研究. *东北农业大学*, 41.
- 史发猛. 2013. 不同养分土壤条件下初选橡胶树优株的生长及对土壤养分利用的研究. *海南大学*, 73.
- 孙洪仁, 曹影, 刘琳, 等. 2014. “养分平衡—地力差减法”确定适宜施肥量的新应用公式. *黑龙江畜牧兽医*(07): 1-4.
- 孙继梅. 2019. 有机-无机肥配施提高肥料利用效率探究. *南方农业*, 13(23): 188-189.
- 王彩芬. 2016. 基于Webgis的县域果园土壤养分信息系统的构建与应用. *西北农林科技大学*, 62.
- 王囡囡, 张春峰, 孟庆英, 等. 2021. 基于养分平衡施肥法的配方施肥系统设计. *农学学报*, 11(07): 92-94.
- 王文放. 2019. 灵武长枣养分需求规律与配方施肥研究. *宁夏大学*, 55.
- 吴金芝, 肖慧淑, 郭锦花, 等. 2023. 秸秆还田和有机肥配合替代1/3化肥对旱地玉米产量、蛋白质含量和化肥利用效率影响. *水土保持学报*, 37(04): 319-326.
- 徐强. 2024. 测土配方施肥云平台设计与实现. *江西测绘*(01): 39-42.
- 闫鹏科, 于茹, 王丹青, 等. 2020. ‘同心圆枣’树氮、磷、钾含量及需肥规律年动态变化. *果树学报*, 37(01): 77-87.
- 张延春, 陈忠宪, 李玉琴, 等. 2008. 测土配方施肥技术. *中国新技术新产品*(17): 159.
- 张阳, 黄琼慧, 谢会雅, 等. 2023. 长叶龄烟苗培育措施对大田烤烟干物质和养分积累及肥料利用效率的影响. *华北农学报*, 38(S1): 280-291.
- 张怀志, 黄绍文, 冀宏杰, 等. 2018. 蔬菜施肥量简便快速推荐系统App实现与应用. *中国农业信息*, 30(5): 68-75.

NE.Bib