中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

基于GIS的村级小麦玉米高产高效管理系统构建与验证

李亚楠, 王昊丹, 屈红蕊, 曹红竹, 佟丙辛, 崔石磊, 韩彦茹, 马文奇

引用本文:
李亚楠, 王昊丹, 屈红蕊, 等. 基于GIS的村级小麦玉米高产高效管理系统构建与验证[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1124−1133.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190144

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于密度联网试验和Hybrid−Maize模型的内蒙古玉米产量差和生产潜力评估

Understanding yield gap and production potential based on networked variety−density tests and Hybrid−Maize model in maize production areas of Inner Mongolia

中国生态农业学报. 2016, 24(7): 935−943 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160159

三大粮食作物产量潜力与产量差研究进展

Research advance in yield potential and yield gap of three major cereal crops

中国生态农业学报. 2015(5): 525−534 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141126

施氮模式对玉−麦周年轮作系统产量和氮吸收利用的影响

Effects of nitrogen application methodologies on yield and nitrogen use efficiencies in a summer maize (Zea mays)−winter wheat (Triticum aestivum)rotation system

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1682−1694 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190223

腐植酸与氮肥配施对冬小麦氮素吸收利用及产量的影响

Effect of combined application of humic acid and nitrogen fertilizer on nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat

中国生态农业学报. 2017, 25(3): 365−372 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160700

养分专家系统推荐施肥对苏北地区水稻产量和肥料利用率的影响

Effect of nutrient expert recommendation fertilization on rice yield and fertilizer use in northern Jiangsu Province

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 68−75 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190506

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190144

李亚楠, 王昊丹, 屈红蕊, 曹红竹, 佟丙辛, 崔石磊, 韩彦茹, 马文奇. 基于 GIS 的村级小麦玉米高产高效管理系统构建与验证[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1124−1133

LI Y N, WANG H D, QU H R, CAO H Z, TONG B X, CUI S L, HAN Y R, MA W Q. Establishment and assessment of management systems for wheat and maize with high yield and nitrogen use efficiency based on GIS at the village level[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 1124−1133

基于 GIS 的村级小麦玉米高产高效管理系统构建与验证*

李亚楠, 王昊丹, 屈红蕊, 曹红竹, 佟丙辛, 崔石磊, 韩彦茹, 马文奇**

(河北农业大学资源与环境学院 保定 071000)

摘 要: 小农户是我国农业生产的主体, 由此导致生产中存在产量和资源利用效率地块间变异大的问题。为了提高作物的产量和氮肥利用效率, 实现小农户地块的精准管理, 本文以 GIS 技术为平台, 利用 C#语言, 建立村级小麦玉米高产高效管理系统, 并通过田间对比试验和农户调研分别进行了系统效果的验证及其可行性评价。结果表明, 该系统以农户地块为单元, 通过信息查询、分析、作物管理决策、系统管理等功能模块, 实现了村域每个农户地块的高产高效(氮肥高效)技术推荐。两年 22 个对比试验结果表明, 与农民习惯相比, 系统推荐的高产高效处理小麦季平均增产 10.8%, 氮肥偏生产力提高 28.5%; 玉米季平均增产 10.3%, 氮肥偏生产力增加 16.9%, 实现小麦玉米产量和氮肥利用效率的同步提高。农户调研结果表明, 农户对推荐系统的认可程度较高, 利用该系统进行技术推荐具有可行性; 农户对小麦玉米的各项推荐技术认知度较高, 但采用率差异较大, 其中小麦优良品种采用率可达 94%, 但小麦精量播种技术的采用率只有 29%, 玉米增密技术和晚收技术的采用率仅仅 2%和 35%; 受科技人员技术推荐影响较大的试验户和辐射户的认知率与采用率均高于普通农户, 说明通过技术服务可以促进小麦玉米高产高效管理技术的应用。总之, 本系统实现了小农户地块作物管理技术的辅助决策, 具有显著增产增效作用, 可以为村级实现大面积的作物高产高效提供支持。

关键词: 小农户; 小麦; 玉米; 高产高效; 管理系统; 氮肥利用效率

中图分类号: S31

文章编号: 2096-6237(2019)07-1124-10 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Establishment and assessment of management systems for wheat and maize with high yield and nitrogen use efficiency based on GIS at the village level*

LI Yanan, WANG Haodan, QU Hongrui, CAO Hongzhu, TONG Bingxin, CUI Shilei, HAN Yanru, MA Wenqi**

(College of Resources and Environmental Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract: Smallholder farmers are the main body of agricultural production in China, but there are big variations in the crop

* “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0200403)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB150405)资助

** 通信作者: 马文奇, 主要从事养分资源管理与利用研究。E-mail: mawq@hebau.edu.cn

李亚楠, 主要从事养分资源管理与利用研究。E-mail: 418740967@qq.com

收稿日期: 2019-02-27 接受日期: 2019-03-13

* The study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0200403) and the National Basic Research Program of China (2015CB150405).

** Corresponding author, E-mail: mawq@hebau.edu.cn

Received Feb. 27, 2019; accepted Mar. 13, 2019

yields and efficiency of resource utilization among these farmers. To increase the yield and nutrient use efficiency of crops and ensure precise management of smallholders' plots, this research established a management system for wheat and maize that produces high yield and nitrogen use efficiency at the village level, based on GIS using C# language. The verification of system effects was carried out through the field comparative test on the farmland and a feasibility evaluation was conducted by investigating farmers. During the farmer survey, the farmers were classified into 3 categories, which included the test farmers in whose fields the comparative test was conducted, radiation farmers who often interacted with researchers, and ordinary farmers who were not influenced by researchers. The results showed that the management system, based on peasant household plots, created high yield and nitrogen use efficiency for each farmer in the village, through information queries, data analyses, management decision making, system management, and other functional modules. The results of 22 comparative experiments in two years showed that, compared with the farmers practice treatment (FP), the treatment with high yield and nitrogen use efficiency (DH), recommended by the system, increased the winter wheat yield and partial nitrogen fertilizer productivity (PFP_N) by 10.8% and 28.5%, respectively. The treatment system (DH) recommended during the maize season increased the yield and PFP_N by 10.3% and 16.9%, respectively. This indicated that, with technological support from the recommendation system, farmers could be increasing their yield and nitrogen use efficiency of the winter wheat and summer maize, simultaneously. The results of the farmers' investigation showed that smallholders had a high degree of recognition for the management system, making it feasible to use the system for technical recommendations. Farmers had a high recognition for the recommended technologies for winter wheat and summer maize, but the adoption rate varied greatly. In particular, the adoption rate of recommended wheat varieties was 94%, but the adoption rate of precision sowing technology for winter wheat was 29%. The adoption rate of densification technology and late harvest technology of summer maize was only 2% and 35%, respectively. The recognition and adoption rates of the test and radiation households, which were greatly influenced by the technical recommendations made by the scientific and technical personnel, were higher than that of the ordinary peasant households. This indicated that it was feasible to popularize the management system to peasant households. In conclusion, the management system of winter wheat and summer maize for high yield and nitrogen use efficiency incorporated the auxiliary decision-making of crop management technology for smallholder plots, and had a significant effect on increasing the yield and nutrient use efficiency, which provided the possibility of achieving high crop yield and nutrient efficiency in large areas.

Keywords: Small holder farmers; Wheat; Maize; High yield and efficiency; Management system; Nitrogen use efficiency

小农户是我国农业生产的主体, 也是实现我国粮食安全和生态环境友好战略的主要贡献力量。探索小农户集约耕作模式下如何实现作物高产与资源高效利用相协调的绿色农业发展道路, 是保障国家粮食安全和生态环境友好的迫切需求[1]。目前, 我国已经有一些研究在试验地上实现了大幅度增产增效[2-4], 然而在小农户生产中仍然面临着作物高产与高效协同实现比例低、产量和资源利用效率地块间变异大、高产高效技术到位率低等难题[5], 限制了区域大面积高产高效的实现[6-7]。因此, 如何在小农户地块上提高作物高产高效技术到位率、缩小产量差和效率差是实现村级大面积高产高效的关键问题, 而精准农业和地理信息系统(GIS)技术的发展为此提供了可能。精准农业是将农学、植物营养学、土壤学等基础学科与"3S"等高新技术结合, 通过对农作物、土壤进行实时监测, 实现作物管理措施和各项农业投入的优化, 从而获得高产和最大经济效益, 同时兼顾自然资源的保护[8]。其核心是利用 GIS 的空间信息功能, 结合作物管理技术的优化, 实现分区精准管理, 其中养分精准管理是研究的热点[9-13]。例如, 燕跃奎等[9]以村级为单位, 利用 GIS 为儋州市民营橡胶[*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Muell. Arg.]等制定施肥配方。许鑫等[10]建立了基于 WebGIS 的小麦(*Triticum aestivum* L.)精准施肥决策系统, 具有信息查询与定位、施肥决策、处方信息发布与共享等功能。危常州等[11]根据土壤养分空间分布规律, 利用 GIS 对棉花(*Gossypium* spp.)进行养分管理和推荐施肥。江厚龙等[12]基于 GIS 技术将平顶山市郏县烤烟(*Nicotiana tabacum* L.)田分区管理, 利用施肥模型对各分区进行推荐施肥, 为烟田分区管理和推荐施肥提供科学依据。柳云龙和姜丽娜[13]基于 GIS 设计和开发了适合南方作物体系的土壤管理和决策信息平台, 对其进行农田养分全程管理。总之, 我国精准农业和作物管理系统的研究已经取得很好的进展, 但比较关注单一的施肥、灌溉、病虫害管理等, 而针对作物整个生育期管理的研究相对较少; 比较重视大区域的系统开发, 而对我国农业基本生产单位——村域和农户地块关注较少; 同时, 这些系统在小农户能否应用鲜见报道。为此, 本文将 GIS 技术与作物高产高效管理体系相结合, 建

立了村级小麦玉米(*Zea mays* L.)高产高效管理系统, 同时验证该系统的效果, 并探讨小农户应用的可能性, 为小农户的施肥和田间管理提供辅助决策的工具, 以期为实现村级大面积的小麦玉米高产高效提供依据。

1 材料与方法

1.1 村级小麦玉米高产高效管理系统的构建

1.1.1 村级 GIS 图的绘制

从 Google Earth 软件上下载村研究区的遥感影像, 利用 ArcGIS10.2.2 进行数字化, 根据 GPS 准确定位地物边界, 生成村级电子地图。其中, 绘制地块分布图时, 精确到每个地块, 为农户档案的建立打下基础。

1.1.2 系统数据库的建立

本系统的数据主要包括: 土壤养分信息、农户种植管理信息、高产高效管理技术等, 具体见表 1。通过农户调研获取数据库中的技术数据。

表 1 村级小麦玉米高产高效管理系统基础数据

Table 1 Basic data of high yield and efficiency management system for wheat and maize at village level

属性数据 Attributive data	调查指标 Survey indicator
农户基本信息 Basic information of farm households	劳动力人口数、户主年龄、受教育程度、联系方式、收入来源、农业及非农业收入状况 Size of labor force, age and education level of householder, contact information, income source, agricultural and non-agricultural income
农田基本信息 Farmland basic information	地块位置、耕地面积、土壤类型、土壤养分含量、承包租赁情况 Plot location, arable land area, soil type, soil nutrients contents, and leasehold status
农户种植结构信息 Planting structure information of farmer	作物种类、近五年种植变化、作物出售比例及价格 Crop varieties, planting changes in recent five years, crop sales proportion and price
作物种植管理信息 Planting management information of crops	品种、播期、播量、肥料养分含量、施肥量、灌溉次数及时期、打药次数及时期、秸秆还田情况、产量 Variety, sowing date, seeding rate, nutrient content of fertilizer, amount of fertilizer applied, number and period of irrigation, number and period of pesticides application, straw returning to field, yield
作物高产高效管理技术 Management techniques for high yield and efficiency of crops	推荐优良品种、适宜播期、播量、施肥量、打药次数及时期、灌溉次数及时期 Recommendation of excellent varieties, suitable sowing time and seeding rate, application amount and times of fertilizer and pesticide, times and period of irrigation

1.1.3 村级农田土壤养分空间分布图的绘制

作物收获后取土。首先在遥感影像图上根据网格均匀布取样点, 至少每 0.67 hm^2 采集 1 个混合样。在 10 m 半径内采用“S”法采集 5 处 0~30 cm 表层土壤, 每个样点采样量保持均匀一致, 最后将每个样点的土样充分混合。同时用 GPS 定位, 记录取土点位置、土壤质地等基本信息。

测定土壤样品的硝态氮、有效磷、速效钾含量。土壤硝态氮采用氯化钾浸提-紫外分光光度法、有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑钪比色法、速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度法进行测定[14]。

将各采样点土壤数据录入 ArcGIS 10.2.2 中利用普通克里金插值法[15]进行插值, 然后将插值图根据村级边界裁剪, 获得研究区土壤养分空间分布图; 进一步将土壤养分空间分布图进行养分分级, 获得土壤养分分级图; 根据小麦玉米的目标产量和氮肥偏生产力目标确定氮肥用量, 根据《中国主要作物施肥指南》[16]确定每一等级推荐的磷、钾肥的施用量, 并得到氮、磷、钾肥的推荐量图; 最后, 利用栅格计算器将推荐量图进行叠加, 得到作物施肥的氮磷钾配方图。

1.1.4 村级小麦玉米高产高效管理系统功能的实现

村级小麦玉米高产高效管理系统在 Win 10 系统的环境下进行操作。ArcGIS 10.2.2 软件是进行数据空间分析、图层绘制和地图输出等的处理平台。系统功能是在 ArcGIS 二次功能开发的基础上, 通过 C#语言编程实现的。数据处理过程还需要 Microsoft Vision、Sigmaplot 10.0、Geodatabas、Microsoft Access 2010 等, 最后用计算机编程语言 C#进行编译发布。

1.2 系统效果的验证试验

1.2.1 研究区概况

研究区为河北省保定市徐水区沿公村, 位于太行山山前平原区, 主要土壤类型为沙壤和轻壤。该地区海拔为 8 m, 暖温带季风型大陆性气候, 水热资源丰富, 全年均温 11.9 ℃, 年均降水量 546.9 mm。现沿公村有住宅户 408 户, 共 1 728 人, 耕地面积约 160 hm^2, 主要种植作物是小麦和玉米。于 2016 年 3 月小麦返青期在沿公村采集有效土壤样品 275 个。

1.2.2 目标产量的确定

本文利用边界线法[7,17]分别分析 2015 年和 2016 年沿公村土壤硝态氮、有效磷和速效钾与当年试验产量间的关系, 将土壤养分含量与产量进行边界线拟合, 得到产量最优方程, 将每个地块的土壤数据, 带入边界线拟合出的方程式, 通过分析比较得到对应土壤养分含量的最高产量, 为该土壤养分含量条件下农户可实现的潜力产量, 即目标产量。

1.2.3 施肥量的确定

在作物生长期间氮肥实行总量控制, 通过目标产量和氮肥偏生产力确定氮肥推荐总量; 磷、钾采用恒量监控技术。根据已有的研究工作, 确定小麦氮肥偏生产力(PFP_N)为 40~60 kg·kg^{-1}, 玉米 PFP_N 为 50~70 kg·kg^{-1}[18-19]。磷肥和钾肥的推荐施肥量根据《中国主要作物施肥指南》[16]确定。

1.2.4 试验方案

为了验证系统的可靠性, 于 2016 年 6 月—2018 年 6 月在沿公村不同地力水平下选取了 11 个农户田块分别进行了两年的小麦、玉米对比试验。试验设农民习惯(FP, farmer practices)和高产高效(DH, high yield and high nitrogen use efficiency)两个处理, 布置在同一农户田块内, 每个处理小区面积为 667 m^2, 不设重复。农民习惯作为对照处理, 其各项田间管理、施肥等活动由农户个人自由决定, 研究人员只是按时记载, 不做任何干涉。高产高效处理的施肥量、品种等由系统推荐给出。其中目标产量是将该农户土壤养分含量带入边界线拟合方程式得到, 结合小麦 PFP_N=50 kg·kg^{-1}、玉米 PFP_N=60 kg·kg^{-1}, 分别确定小麦、玉米氮肥施用量, 按照基追比 2∶3、1∶2 在小麦拔节期、玉米大喇叭口期施用; 磷肥、钾肥采用恒量监控技术确定施肥量[16]; 品种方面, 小麦采用‘石新 733’, 玉米采用‘郑单 958’; 其他管理措施如播种日期、灌水、病虫害防治等均由农户统一进行管理。

1.3 系统应用的可行性评价

2016 年在小麦和玉米收获后, 在沿公村随机选取 65 个农户开展了抽样调查, 包括 11 个试验户、32 个辐射户和 22 个普通户。试验户(TH, test households)是指直接参与小麦、玉米对比试验的农户; 辐射户(RH, radiation households)是指科技小院[5]跟踪监测的农户, 科技小院人员在每个农事操作完成后走访这些农户, 进行面对面访谈, 记载其作物管理情况并进行必要的技术咨询, 该类农户受到科技人员一定程度的影响; 普通户(OH, ordinary households)是指既不参与试验, 也非科技小院跟踪的农户; 所有户(AH, all households)指接受调研的所有农户, 包括试验户、辐射户和普通户。调研的主要内容包括: 1)农户对村级作物高产高效管理系统的认知; 2)农户对系统中小麦关键技术的认知和采纳情况, 包括品种、精量播种、播期技术; 3)农户对系统中玉米关键技术认知和采纳情况, 包括品种、增密技术、晚收技术。调查是由研究人员与调查农户面对面访谈并利用设计好的调查表完成。农户高产高效管理系统及其各项关键技术的认知率、采用率等指标通过以下公式计算：

认知(采用)率(%)=认可(采用)某一技术的人数/本类农户总人数×100　　(1)

1.4 数据统计分析

数据处理分析采用 SPSS 20、Sigmaplot 12.5、ArcGIS10.2.2 地统计分析功能完成。

2 结果与分析

2.1 村级小麦玉米高产高效管理系统的结构和功能

本系统是综合 GIS 技术、数据库、小麦和玉米高产高效技术知识模型以及人机接口等部分, 开发的一套功能实用、操作简单的村级小麦玉米高产高效管理系统。该系统包括小麦高产高效管理系统和玉米高产高效管理系统, 为每个小农户进行田块管理技术推荐。系统主要包括信息查询、分析、管理决策、管理等功能。

2.1.1 信息查询功能

信息查询功能包括农户种植管理查询和技术流程查询。其中, 农户种植管理查询包括农户信息、地块位置、土壤养分含量、作物管理信息等。而技术流程查询则以容易被接受的图的形式向农户展示, 使农户能更直观、清楚地了解作物种植、管理的相关技术。

2.1.2 系统的分析功能

系统的分析功能分为专题图分析和统计图分析。专题图分析主要包括空间插值、作物种植结构专题图和作物施肥的氮磷钾配方图分析。空间插值分析包括土壤养分分布图和土壤养分变化图, 使农户更加直观地了解该村的土壤养分分布以及 2015—2016 年的土壤养分空间变化。作物施肥配方图如图 1 所示, 包括小麦基肥氮磷钾配方图和玉米全生育期氮磷钾配方图, 农户可以根据自家地块所处的空间位置确定施肥量。利用频数分布图、正态 QQ 图、箱线图和条块图等统计图对作物产量、土壤养分含量和种植管理信息进行更加直观明了分析。

2.1.3 系统的管理决策

系统能够针对不同田块的作物生产为农户提供管理决策, 只要用鼠标点击需要进行小麦玉米管理决策的地块, 系统就根据该位置的基础信息给出相关的管理决策信息。该管理决策分为 3 个环节: 播种环节、施肥环节、生育期间管理环节。

根据地块信息, 用户可以选择适宜的品种, 然后系统提供最佳播种量与播期, 完成播种环节的技术推荐。施肥环节是整个系统管理决策中最重要的

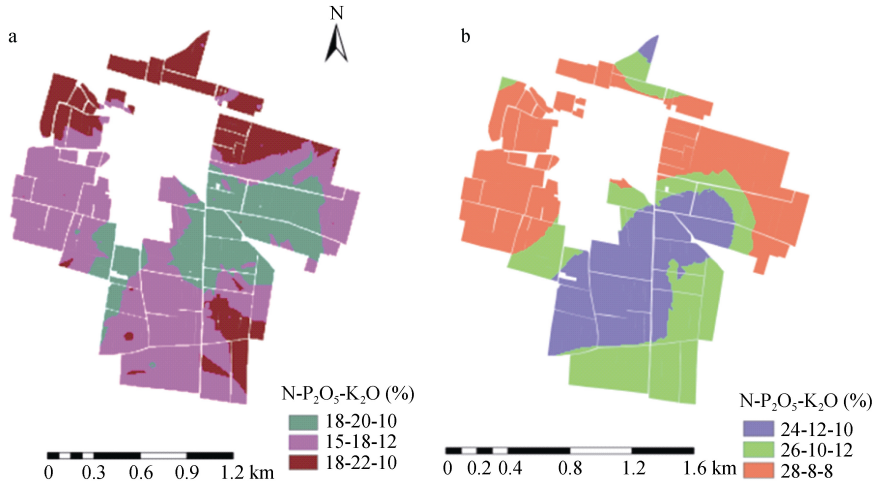

图 1 小麦基肥**(a)**和玉米**(b)**施肥的氮磷钾配方图

Fig. 1 Fertilization formulas of basal fertilizer for wheat (a) and total fertilizer for maize (b) in Yangong Village

环节，单击某地块，则弹出该地块的基本信息，然后根据该地块的养分含量、作物的目标产量和 PFP_N 进行推荐施肥。生育期间管理环节包括灌溉时期与用量、病虫草害防治及对策等，在作物不同生长阶段遇到病、虫、草害等情况，系统会给出相应的解决方案。例如，当输入某种病害或描述症状时，内容会从数据库中调取出来，显示出相应防治对策。同时，各环节都有相应的农业技术知识及注意事项，为农民提供最佳的技术指导。

2.1.4 系统管理功能

图层管理功能包括 4 部分：加载图层、移动图层、删除图层与标注更改，其中标注更改有点、直线、面域、文字的样式的更改。数据库管理模块可以浏览、添加、修改、删除和查询村级田块信息。在系统管理方面，系统设置两种用户登录方式，分别是管理员和普通用户。而系统管理功能只有管理员才能进行操作，包括管理用户的权限，查询用户数量，帮助用户找回、修改密码等。

2.2 村级小麦玉米高产高效管理系统应用效果分析

2.2.1 小麦玉米产量效果分析

小麦两年对比试验产量结果(图 2A)表明，农户习惯处理(FP)产量变化范围为 5 992~10 053 kg·hm^{-2}，平均产量为 7 948 kg·hm^{-2}；高产高效处理(DH)产量变化范围为 5 994~12 437 kg·hm^{-2}，平均产量为 8 752 kg·hm^{-2}。相对于 FP 处理，DH 处理平均增产 10.8%。玉米两年试验产量对比如图 2B 所示。FP 处理的产量变化范围为 7 384~10 794 kg·hm^{-2}，平均产量为 9 247 kg·hm^{-2}；DH 处理的产量变化范围为 8 459~12 426 kg·hm^{-2}，平均产量为 10 121 kg·hm^{-2}。相对于 FP 处理，DH 处理增产显著，平均增产 10.3%。说明应用村级高产高效管理系统能够显著提高小麦和玉米产量。

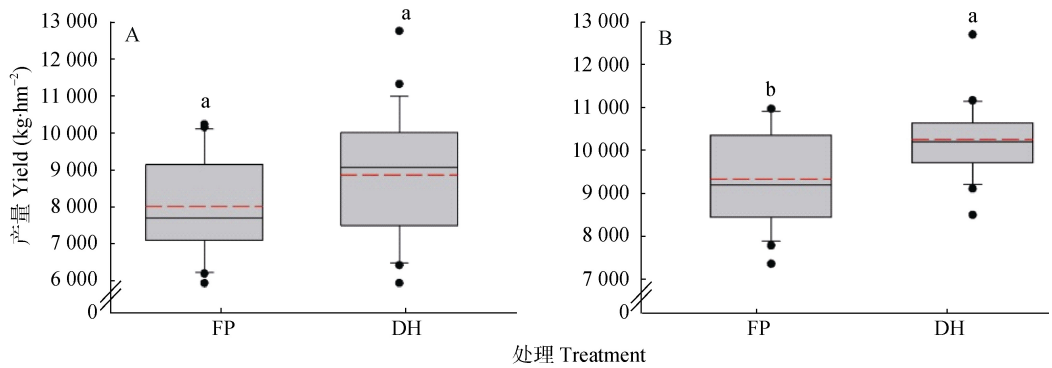

图 2 不同管理方式下小麦**(A)**和玉米**(B)**的产量对比

Fig. 2 Yield comparison of wheat (A) and maize (B) under different treatments of management

FP: 农民习惯处理; DH: 高产高效处理。不同小写字母表示处理间在 5%水平上差异显著。图中箱式图框内的上中下 3 条黑色实线分别代表 75%分位、50%分位和 25%分位，框外的上下两条横线分别代表 90%分位和 10%分位，框内的虚线为平均值。FP means farmer practices; DH means practice of high yield and nitrogen use efficiency of crops. Different lowercase letters indicate significant differences between two treatments at 5% level. The upper, middle and lower black solid lines in the box chart represent 75%, 50% and 25% quantiles, respectively. The upper and lower horizontal lines outside the box represent 90% and 10% quantiles, respectively. The dotted line in the box is the average.

2.2.2　小麦玉米养分效率的效果分析

不同处理的小麦氮肥偏生产力(PFP_N)如图 3A 所示。农民习惯处理(FP)PFP_N 变化范围为 24.7~70.0 $kg·kg^{-1}$, 平均 PFP_N 为 43.4 $kg·kg^{-1}$; 高产高效处理(DH)PFP_N 变化范围为 36.0~71.5 $kg·kg^{-1}$, 平均 PFP_N 为 50.3 $kg·kg^{-1}$。DH 处理的平均 PFP_N 高于 FP 处理, 相对于 FP 处理平均提高 28.5%。不同处理的玉米 PFP_N 如图 3B 所示。FP 处理的 PFP_N 变化范围是 43.1~78.7 $kg·kg^{-1}$, 平均 PFP_N 为 55.6 $kg·kg^{-1}$; DH 处理的 PFP_N 变化范围是 39.1~94.5 $kg·kg^{-1}$, 平均 PFP_N 为 64.6 $kg·kg^{-1}$。DH 处理的 PFP_N 显著高于 FP 处理, 平均提高 PFP_N16.9%。说明应用村级高产高效管理系统能够大幅度提高小麦和玉米的氮肥利用效率。

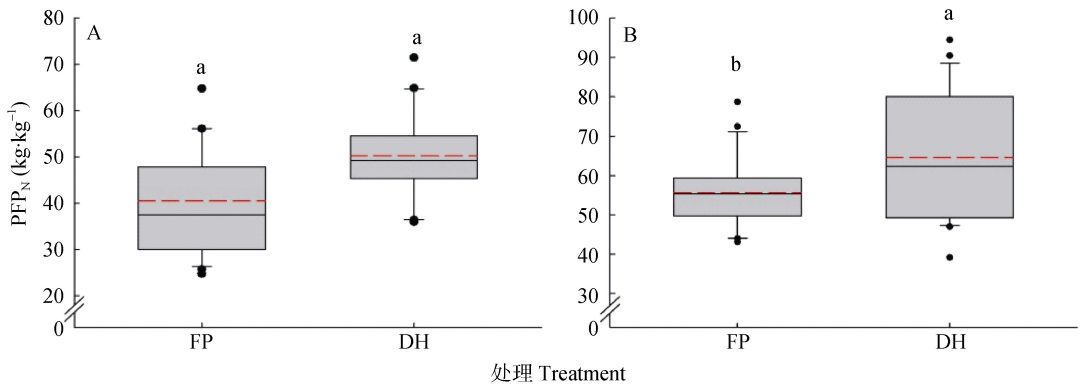

图 3　不同管理方式下小麦(A)和玉米(B)的氮肥偏生产力(PFP_N)对比

Fig. 3　Comparison of nitrogen partial productivities (PFP_N) of wheat (A) and maize (B) under different treatments of management

FP: 农民习惯处理; DH: 高产高效处理。不同小写字母表示处理间在 5%水平上差异显著。图中箱式图框内的上中下 3 条黑色实线分别代表 75%分位、50%分位和 25%分位, 框外的上下两条横线分别代表 90%分位和 10%分位, 框内的虚线为平均值。FP means farmer practices; DH means practice of high yield and nitrogen use efficiency of crops. Different lowercase letters indicate significant differences between two treatments at 5% level. The upper, middle and lower black solid lines in the box chart represent 75%, 50% and 25% quantiles, respectively. The upper and lower horizontal lines outside the box represent 90% and 10% quantiles, respectively. The dotted line in the box is the average.

2.3　村级小麦玉米高产高效管理系统应用的可行性分析

2.3.1　农户对村级小麦玉米高产高效管理系统的认知

在调研中, 科技小院人员向农户介绍了村级小麦玉米高产高效管理系统、电子档案和养分分级图的相关知识。通过调研发现(图 4), 接受调研的所有户对整体管理系统、电子档案和养分插值图的认可程度分别为 62%、88%和 88%。从不同类型农户来看, 试验户在参与田间对比试验过程中与系统有所接触, 对系统比较了解, 容易接受; 辐射户通过与科技小院人员交流等方式了解系统, 所以比较认可; 普通户相对于试验户和辐射户来说, 认可程度较低。分析农户不认可的原因, 可能是现在种地的农户大多年纪较大, 对新事物接受较困难, 更愿意相信自己的经验; 另外, 农户因自身文化水平有限, 对先进技术了解少, 接受起来比较困难。

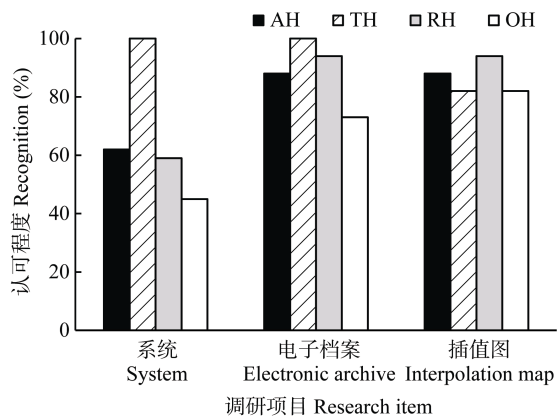

图 4　农户对村级高产高效管理系统的认可程度

Fig. 4　Farm households' recognition of the crop management system with high yield and nitrogen use efficiency at village level

AH: 所有户; TH: 试验户; RH: 辐射户; OH: 普通户。AH: all investigated households; TH: test households; RH: radiation households; OH: ordinary households.

2.3.2　农户对系统中小麦关键技术的认知和采纳

通过图 5 可以发现, 在接受调研的所有户中, 100%的农户都认可小麦优良品种, 并且有 94%农户采用了系统推荐的品种, 说明农户十分重视小麦品种的选择, 也容易接受优良品种。在对系统推荐的精量播种和播期技术的认知方面, 试验户的认知度较高, 辐射户和普通户的认知度较低; 但采用率普遍较低, 尤其是精量播种技术, 在接受调研所有户中只有 29%的采用率。调查中发现, 农民一般倾向于采用大播量, 主要包括以下原因: 首先是农户认知, 认为播种多, 出苗多, 穗多, 产量高; 其次农户

存在跟风现象，易受其他农户影响；三是农户担心低温影响出苗率，所以增大播量；四是农户因土壤地力较差而加大播种量；最后，旋耕机粉碎秸秆质量差、播种机的播量调节不准确等机械问题。因为这些原因，影响了农户对精量播种技术的采用。在播期的选择上，多数农户认可系统推荐的最佳播期，但受机械、个人经验和劳动力影响，具体采用时会有所改动，但采用率也能达 70%以上。

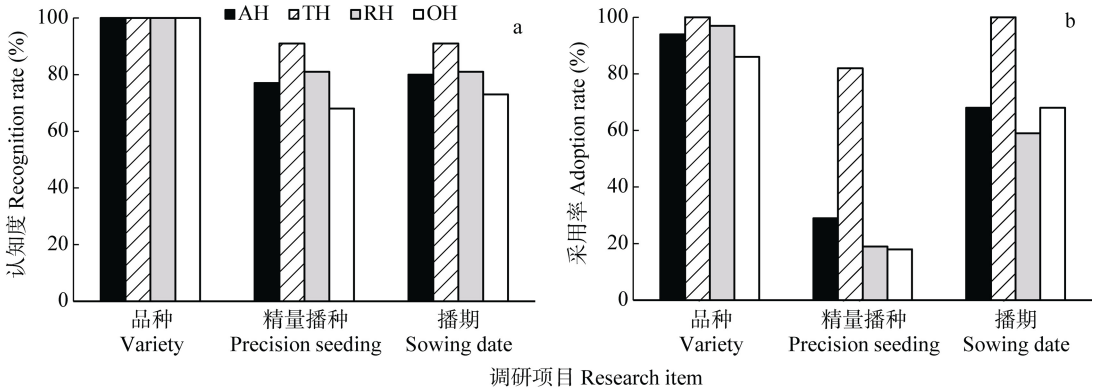

图 5 农户对小麦关键技术的认知度**(a)**和采用率**(b)**

Fig. 5 Farm households' recognition (a) and adoption rate (b) of key technologies in wheat

AH: 所有户; TH: 试验户; RH: 辐射户; OH: 普通户。AH: all investigated households; TH: test households; RH: radiation households; OH: ordinary households.

2.3.3 农户对系统中玉米关键技术的认知和采纳

农户对玉米关键技术的认知度和采用率如图 6 所示。所有户中，有 29%的农户对当地优良品种比较了解，但只有 22%的农户采用，这主要是由于当地玉米品种繁杂，给农户的选择带来困难；在增密技术方面，只有 58%的农户了解到玉米每公顷增密至 75 000 株，可以提高产量，其中试验户、辐射户和普通户的认知度分别为 82%、66%和 32%。但是采用增密技术的农户只有 2%，辐射户和普通户均没有采用。农户不采用增密技术主要包括以下原因：一是担心倒伏问题；二是农户喜欢饱满穗大的玉米；三是播种机达不到密植的要求。在玉米晚收技术方面，80%的农户了解玉米适时晚收增加灌浆时间，提高产量，但采用率只有 35%，其最主要的原因与当地收割机较少、农时紧等有关。

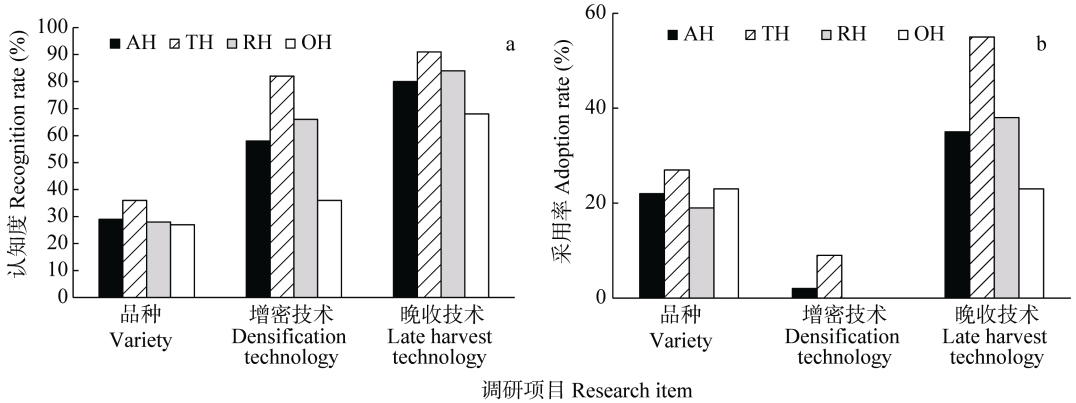

图 6 农户对玉米关键技术的认知度(a)和采用率(b)

Fig. 6 Farm households' recognition (a) and adoption rate (b) of key technologies in maize

AH:所有户; TH: 试验户; RH: 辐射户; OH: 普通户。AH: all investigated households; TH: test households; RH: radiation households; OH: ordinary households.

3 讨论

随着信息技术的不断发展，GIS 技术在农业中的应用越来越广泛，从经济作物到粮食作物，从田块尺度到大区域尺度都已经涉及。与已有的作物精准管理专家系统与决策支持系统[10-13,20-21]不同，本系统借鉴前人研究，应用本课题组前期进行的大量农户跟踪调研和田间试验所设计出的小麦玉米高产高效管理技术体系，结合 ArcGIS 二次开发，建立了针对农户田块的村级小麦玉米高产高效管理系统。该系统以农户为服务对象，以农户地块为操作单元，能够很好地指导农户进行合理施肥和科学管理，并为每家每户建立电子档案，提供个性化服务。施肥

环节是整个系统管理决策中最重要的环节之一, 本系统对目标产量确定和施肥量推荐方面做了改进。其中, 目标产量的确定方法由以往的前 3 年平均产量[22-23]等方法改为边界线法[16], 考虑土壤因素对小农户的作物产量差的影响, 将每户土壤养分含量代入由土壤养分含量与产量拟合的最优产量的边界线方程中, 得到最优产量, 即为目标产量[24]。边界线法考虑了土壤养分对作物产量的影响和田块具有的实现目标产量的潜力, 有利于大面积高产高效的实现。而在施肥量推荐方面, 氮肥推荐是比较难的, 本系统围绕高效目标, 在确定目标产量基础上, 利用氮肥偏生产力目标推荐, 简化了氮肥推荐程序。

本文构建村级小麦玉米高产高效管理系统之后, 对系统进行对比试验验证了系统的可靠性。两年结果表明, 该系统可以实现小麦玉米的产量和氮肥利用效率同步提高, 增产增效达到 10%以上, 这一幅度与国内现有作物支持决策系统的结果一致[25-26]。这一结果也说明, 本系统在小农户地块上提高了作物高产高效技术到位率、缩小了产量差和效率差, 可以为实现高产高效技术的大面积应用提供支撑。同时, 本系统简单易懂, 易于操作, 农户对系统的认可程度也较高, 对解决小农户地块作物精准管理具有可行性和一定的应用前景。

农户调查结果也表明, 农户虽然对于系统推荐的高产高效关键技术的认可程度较高, 但在各种技术的采用上存在较大差异。在品种选择上, 农户对小麦玉米品种认知和采用存在很大差异, 农户对小麦品种的认知度和采用率总体上均高于玉米。经调研发现, 当地小麦品种更新换代比较慢, 相对比较单一, 系统推荐的优良品种也是经过当地多年种植证明比较适宜的品种, 所以农户容易接受。而玉米品种较为复杂, 种类繁多, 新品种不断涌现, 再加上新品种价格高、假冒伪劣种子的存在, 均给农户品种选择带来一定困扰, 因此, 农户对系统推荐的玉米品种采用率相对较低。在高产高效关键技术的认知和采用上, 虽然研究表明小麦精量播种技术、小麦适宜播期的选择、玉米增密技术、玉米晚收技术均有显著的增产作用[3,27-29], 如玉米在单位面积上增产, 主要是由于适宜地提高密度而不是提高单株玉米产量, 所以玉米增密技术普遍在学术界得到认可。但农户由于自身原因或机械、气候等外部因素, 选择比较保守, 对这些技术的采用率也比较低。对于此类技术的推广, 可以采取逐步推进的方式, 通过示范田逐渐影响农户, 打破其固有观念, 让农户逐步改变。同时, 本文结果表明, 受到科技人员影响较多的试验户和辐射户对各项技术的认知和采用率相对较高, 尤其在小麦精量播种技术和玉米增密技术上, 说明通过技术服务和示范带动等途径, 可以推动本系统的应用, 提高推荐技术的采用率, 实现高产高效技术的大面积应用。

此外, 本系统虽然已具备基本功能, 但还需要进行深入研究和扩展, 主要体现在: 1)系统要实现 GIS 系统的智能化, 与计算机网络相结合; 2)本系统中只涉及小麦、玉米两种粮食作物, 应扩充到其他大田作物和经济作物。

4　结论

村级小麦玉米高产高效管理系统具有信息查询、分析、管理决策、管理等功能, 并实现了针对小农户地块的作物种植管理决策和养分管理, 达到了个性化服务和农户地块的精准管理; 系统推荐的高产高效处理与农民习惯处理相比, 小麦季平均增产 10.8%, 氮肥偏生产力提高 28.5%; 玉米季平均增产 10.3%, 氮肥偏生产力提高 16.9%, 实现小麦玉米产量与氮肥利用效率同步提高。系统简单易懂, 易于操作, 农户认可程度也较高, 具有可行性和一定的应用前景。调研中也发现, 农户在各种推荐技术的采用上存在较大差异, 有些技术如小麦精播、玉米增密和晚收等农户采用率仍然较低; 而通过技术服务和示范带动等途径, 可以推动本系统的应用, 提高推荐技术的采用率。总之, 本系统实现了小农户地块作物管理技术的辅助决策, 具有显著的增产增效作用, 可以为实现大面积的作物高产高效提供支持。

参考文献 References

[1] CUI Z L, ZHANG H Y, CHEN X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. Nature, 2018, 555(7696): 363–366

[2] FAN M S, SHEN J B, YUAN L X, et al. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(1): 13–24

[3] CHEN X P, CUI Z L, VITOUSEK P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(16): 6399–6404

[4] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486–489

[5] ZHANG W F, CAO G X, LI X L, et al. Closing yield gaps in

China by empowering smallholder farmers[J]. Nature, 2016, 537(7622): 671–674

[6] 吴良泉, 陈新平, 石孝均, 等. “大配方、小调整”区域配肥技术的应用[J]. 磷肥与复肥, 2013, 28(3): 68–70
WU L Q, CHEN X P, SHI X J, et al. Application of region formulation fertilizer technology based on “Regional Fertilizer Formula and Site Specific Adjustment”[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2013, 28(3): 68–70

[7] CHEN G F, CAO H Z, LIANG J, et al. Factors affecting nitrogen use efficiency and grain yield of summer maize on smallholder farms in the North China plain[J]. Sustainability, 2018, 10(2): 363

[8] 武军, 谢英丽, 安丙俭. 我国精准农业的研究现状与发展对策[J]. 山东农业科学, 2013, 45(9): 118–121
WU J, XIE Y L, AN B J. Research status and development countermeasures of precision agriculture in China[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013, 45(9): 118–121

[9] 燕跃奎, 郭澎涛, 罗微. 基于 GIS 的儋州民营胶园精细化施肥配方制定研究[J]. 热带作物学报, 2014, 35(10): 2050–2058
YAN Y K, GUO P T, LUO W. Establishing precision fertilization formulas for private rubber plantations of Danzhou County based on geographic information system (GIS)[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, 35(10): 2050–2058

[10] 许鑫, 张浩, 席磊, 等. 基于 WebGIS 的小麦精准施肥决策系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S2): 94–98
XU X, ZHANG H, XI L, et al. Decision-making system for wheat precision fertilization based on WebGIS[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(S2): 94–98

[11] 危常州, 侯振安, 朱和明, 等. 基于 GIS 的棉田精准施肥和土壤养分管理系统的研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(6): 678–685
WEI C Z, HOU Z A, ZHU H M, et al. Study on precision fertilizer recommendation and soil nutrition management in cotton land based on GIS system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(6): 678–685

[12] 江厚龙, 刘国顺, 杨超, 等. 基于 GIS 丘陵土壤分区与烤烟推荐施肥研究[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(2): 10–17
JIANG H L, LIU G S, YANG C, et al. Flue-cured tobacco fertilizer recommendations based on GIS soil delineation at hilly areas[J]. Chinese Tobacco Science, 2013, 34(2): 10–17

[13] 柳云龙, 姜丽娜. 基于 GIS 的农田养分管理与推荐施肥系统设计与开发[J]. 农业网络信息, 2007, (8): 23–26
LIU Y L, JIANG L N. Research on recommended fertilization system and farmland nutrient management based on GIS[J]. Agriculture Network Information, 2007, (8): 23–26

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005
BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005

[15] 池建. 精通 ArcGIS 地理信息系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 303–306
CHI J. Proficient in ArcGIS Geographic Information System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 303–306

[16] 张福锁, 陈新平, 陈清, 等. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009: 10–15
ZHANG F S, CHEN X P, CHEN Q, et al. Guidelines for Fertilization of Major Crops in China[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009: 10–15

[17] WEBB R A. Use of the boundary line in the analysis of biological data[J]. Journal of Horticultural Science, 1972, 47(3): 309–319

[18] DOBERMANN A R. Nitrogen Use Efficiency — State of the Art[R]. Frankfurt, Germany: Paper presented at the IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, 2005: 28–30

[19] 屈红蕊. 基于 GIS 的村级作物高产高效管理系统的优化与应用[D]. 保定: 河北农业大学, 2017
QU H R. Optimization and application of the crop management system with high crop yield and high nitrogen use efficiency based on GIS at village level[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2017

[20] 王昊丹. 基于 GIS 的村级玉米高产高效管理系统的构建与验证[D]. 保定: 河北农业大学, 2016
WANG H D. Establish and assess the planting system with high maize yield and high nitrogen use efficiency based on GIS at village level[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2016

[21] 袁学敏. 基于模型与 GIS 的小麦精确栽培方案生成技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012
YUAN X M. Model and GIS-based on precise cultivation prescription generation technology in wheat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012

[22] 巨晓棠, 何忠俊. 加拿大 Alberta 省的以水定产测土施肥技术体系[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1): 84–89
JU X T, HE Z J. Technical system of soil test and fertilizer recommendation based on the available water for crops in Alberta, Canada[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16(1): 84–89

[23] 邹宗杰. 目标产量法经验公式计算问题初探[J]. 青海农林科技, 1987, (4): 38–41
ZOU Z J. A preliminary study on the empirical formula of target production method[J]. Agricultural Science and Technology of Qinghai Province, 1987, (4): 38–41

[24] 陈冬冬. 冬小麦-夏玉米大面积高产高效的限制因素与技术途径研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2016
CHEN D D. Study on limiting factors and technical approaches for high-yield and high-efficiency of winter wheat and summer corn[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2016

[25] 李国强, 王猛, 胡峰, 等. 基于 GIS 的夏玉米氮肥精确管理系统设计与实现[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(2): 186–189
LI G Q, WANG M, HU F, et al. Design and implement of GIS-based precision nitrogen management system in summer maize[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2016, 44(2): 186–189

[26] 刘小军, 曹静, 汤亮, 等. 基于模型和 GIS 的水稻生产管理决策支持系统构建与应用[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(3): 297–302
LIU X J, CAO J, TANG L, et al. Development and application of a model and GIS-based decision support system for

rice production management[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2010, 24(3): 297–302

[27] 李向岭, 李丛锋, 葛均筑, 等. 播期和种植密度对玉米产量性能的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(2): 95–100
LI X L, LI C F, GE J Z, et al. Effects of planting date and planting density on yield performance of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(2): 95–100

[28] 张福锁, 陈新平, 崔振岭, 等. 主要作物高产高效技术规程[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2010
ZHANG F S, CHEN X P, CUI Z L, et al. Technical Regulations for High Yield and High Efficiency of Main Crops[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2010

[29] 张福锁, 张朝春. 高产高效养分管理技术创新与应用[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2017
ZHANG F S, ZHANG C C. Innovation and Application of Nutrient Management Technology for Double High Agriculture[J]. Beijing: China Agricultural University Press, 2017