

基于 QCA 和遥感技术研究田间道路对于耕地生产力的影响和优化方案——以南京农业大学白马基地为例

薛淇文

南京农业大学 公共管理学院 江苏南京 210095

DOI:10.12238/ems.v7i7.14306

[摘要] 本研究以南京农业大学白马基地为实证区域，融合 QCA（定性比较分析）与遥感技术，系统探究田间道路的空间属性（曲率、宽度、坡度、材质及区位）对耕地生产力的影响机制。基于 2016 - 2024 年 Sentinel-2 影像的 NDVI 时序分析，结合 fsQCA 方法识别出三类驱动生产力提升的组态模式：几何要素主导型（宽直道路提升农机效率）、全要素协同型（几何与物理属性协同保障管理持续性）、物理要素主导型（区位与材质优化减少管理障碍）。研究表明，道路属性通过增强“空间适配性”间接推动 NDVI 年均增长 0.059/9a，其中区位为单一必要条件，并据此提出覆盖规划布局差异化、建设参数标准化、动态维护机制化及功能区协同化的全流程优化方案，为高标准农田建设提供科学路径。

[关键词] 田间道路；耕地生产力；NDVI；fsQCA；空间适配性；白马基地

1 引言

田间道路作为农业基础设施的关键环节，其空间属性（如曲率、宽度、坡度、材质及区位条件）直接影响农机作业效率、资源流通成本及农田管理效能，进而制约耕地生产力的持续提升。当前高标准农田建设中普遍存在道路密度分布不均、材质与需求错配、功能区衔接低效等问题，而既有研究多局限于单一道路属性的独立效应，缺乏对多要素协同机制的深入解析。

2 数据准备

2.1 研究区域概况

研究区域为南京农业大学白马教学科研基地，位于南京市溧水区白马镇茶兴路 1 号，中心点坐标为北纬 31° 36′ 49.60″ 东经 119° 10′ 50.50″。基地东至白马大道、西至革新线、南至溧白路、北至纬一路，区内总面积约为 333.71 公顷

2.2 研究区域田块划分

为便于对研究区域内不同地块田间道路情况进行分析和评价，有必要对研究区域进行进一步划分，并在后续研究中加以使用。首先剔除非农业性质的土地，在后续计算中不考

虑在内。进而根据研究区内不同地块的地理位置、土壤质地、种植作物（一致）、和田间道路设置等情况，选取并划定南京农业大学白马基地内的 5 个区块，以此为分析单位对田间道路的具体情况进行评估。

2.3 数据来源和处理

2.3.1 田间道路概况

研究区内高标准农田基础设施主要由干排沟、支排沟、斗排沟、跨沟涵桥、节制闸、过路拉管以及田间道路组成。其中针对于本研究涉及到的田间道路，经实地勘察测量，区内所有道路总长约为 54.92km，其中主路（含部分田间路）约 18.95km，基本为沥青混凝土材质；支路（含田间路、生产路）约 35.97km，主要为水泥材质，少数为非硬化道路，使用 ArcGIS 对各区域面积及区内田间道路长度进行计算，可进一步得出区内道路密度，计算结果如表 1 所示。由表可见，各区域道路长度分布不均匀，02#区域道路最长，为 3475.95m；04#最短，为 1776.23m。道路宽度反映了道路在农业运作中的使用条件，01#区域道路平均宽度最大，为 4.8m，02#最小为 3.1m。

表 1 研究区域田间道路概况

区域编号	道路面积 (RS)	道路宽度 (RW)	路面坡度	道路长度 (RL)
	单位：公顷	单位：m	(RG)	单位：m
田块 01	17.2784	4.8	0.015	2808.23
田块 02	16.7791	3.1	0.025	3475.95
田块 03	12.4347	3.3	0.02	2140.59
田块 04	11.0913	2.5	0.04	1776.23

田块 05 13.4460 3.2 0.035 2469.94

3 研究方法

3.1 NDVI 提取与时序分析

本文选取 Sentinel-2L1c（经过正射校正和几何精校正大气表观反射率），并利用 ENVI 对数据进行辐射定标、波段提取、大气校正、投影转换、剪裁等预处理，获得月尺度的 NDVI 时间序列数据集，再生成 2016—2024 逐年均值 NDVI 数

据集（图 1）。最后将 2016–2024 逐年均值 NDVI 数据集导入到 GIS 中，用栅格计算器进行加法计算，最终求得平均值（Mean）。

时间尺度上，南京农业大学白马基地 2016–2024 年 NDVI 呈现波动增加趋势，年增长率 0.059/9a。年均值，于 2024 年值最大为 0.730。总体看，植被覆盖呈增加趋势，表明植被覆盖度在逐年增加，作物长势良好，耕地生产力逐年提高。

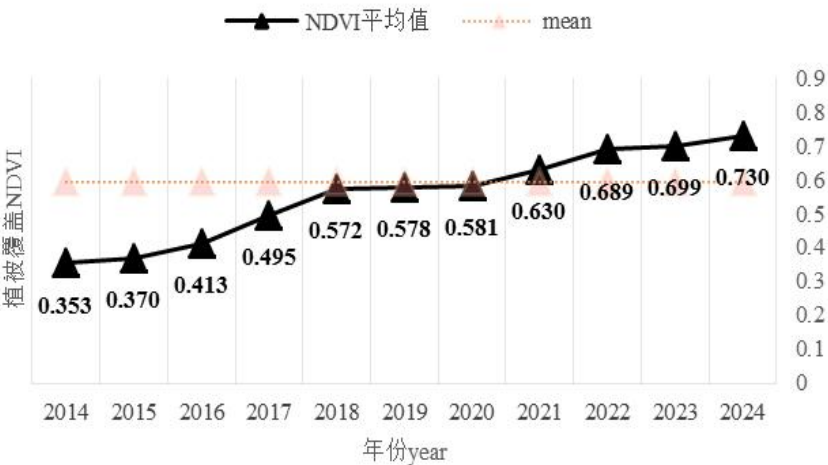


图 1 NDVI 时间序列变化

3.2 田间道路空间特征分析

3.2.1 fsQCA 影响因素分析

fsQCA 方法是针对连续变量样本而产生的一种定性比较分析方法，可以解释因果关系复杂的现象和问题。该方法认为解释变量之间不是独立的，而是具有互动协同关系，强调解释变量的整体性和系统性。fsQCA 方法是组态分析的核心研究方法，实证结果以组态形式出现，即影响特定结果的因素是多个因素组成的集合。fsQCA 方法的优势在于适用仅包含截面数据的样本研究，理想的条件变量数量在 4 至 7 个之间。

3.2.2 指标选取和数据来源

A. 结果变量选取及定义：NDVI 归一化植被指数。

NDVI 通过近红外与红光波段反射率的差值与和的比值，即 $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ ，能够量化植被覆盖度和生长状态。并且本文通过阅读文献，基于已有研究（王蕊，2011）验证了 NDVI 与农田生产力的关联性；通过多年 NDVI 分级分析区域农田生产力的空间变异，结果显示 NDVI 的高低级别可有效评估区域耕地生产力的差异，为耕地生产力评价提供了实证支持。

B. 条件变量赋值：

（1）道路曲率（RC）：曲率（K）即 $K = 1/R$ ，数值越大，

弯曲程度越显著。本研究依据按照道路转折角度即曲率半径以及通达状况，参考《田间道路设计标准》内容，抽样选取每一田块道路计算曲率并求平均值进行赋值，以此评估每一田块内部各道路通达状况。

（2）路面坡度（RG）。坡度通常用百分比法（ $i = h/l \times 100\%$ ）。本文同样从每一田块内部抽取部分道路进行坡度计算并进行加权平均从而完成赋值。

（3）区位条件（RLC）：本研究通过绘制南京农业大学功能图并结合实际功能区应用，综合通过 3 点计分法来衡量区位条件优越程度，其中田块附近半径 1000m 外设有实验室或服务站点则赋值为 1、区块 1000m 到 500m 内设有试验基地赋值为 2、区块 500m 内以及内部设有试验基地的赋值为 3。

表 2 3 点计分法赋值

据服务区距离	3 点计分法	区位条件
≤500m	3	高
500m≤a≤1000m	2	中
≤1000m	1	低

（4）道路宽度（RW）：本研究区域内田块内部主要为生产路，利用 gis 统计数据，采用抽样方式计算田块道路宽度。

（5）路面材质（PM）：结合实际调查，设计六值模糊集对路面材质状况进行评估。

根据以上定义得到各个田块指标赋值如下表:

表 3 田块变量赋值

赋值	道路曲率 (RC)	道路宽度 (RW)	路面坡度 (RG)	路面材质 (PM)	区位条件 (RLC)	NDVI
田块划分 01	0.01	4.8	0.015	0.4	2	0.712
田块划分 02	0.00833	3.1	0.025	0.6	3	0.677
田块划分 03	0.00667	3.3	0.02	0.2	1	0.582
田块划分 04	0.0125	2.5	0.04	0.6	3	0.481
田块划分 05	0.01429	3.2	0.035	0.4	2	0.775

3.2.2 数据校准

进行实证分析之前,需要对变量进行校准。在 fsQCA 中,数据校准的目标是将原始数据转化为反映变量隶属程度的模糊集合。由于目前没有明确的外部标准对田间道路质量以及植被覆盖水平进行评判,因而采用直接校准法进

行校准。本研究依据 Ragin 提出的直接校准法,将各变量转换为模糊集隶属分数,将交叉点校准标准设为 50%分位点,完全不隶属校准标准为 5%分位点,完全隶属的校准标准为 95%分位点,最终结果变量与条件变量的校准结果如表 5 所示。

表 4 结果变量与条件变量的校准

三级模糊值	道路曲率 (RC)	道路宽度 (RW)	路面坡度 (RG)	路面材质 (PM)	区位条件 (RLC)	NDVI
完全隶属 0.95	0.013932	4.5	0.039	0.6	3	0.7624
交叉隶属 0.5	0.01	3.2	0.025	0.4	2	0.677
完全不隶属 0.01	0.006736	2.524	0.0152	0.208	1.04	0.48504

4研究结论

4.1 田间道路对耕地生产力的时空特征分析

A. 时间特征

2016–2024 年,南京农业大学白马基地 NDVI 呈现显著波动增加趋势 (年增长率 0.059/9a),2024 年 NDVI 均值达 0.730,表明耕地生产力随时间推移持续提升。这一趋势与研究区田间道路的逐步完善密切相关:2018 年后基地启动高标准农田改造,新增硬化道路 12.3km,道路密度由 0.16km/ha 提升至 0.19km/ha,有效改善了农机通行条件,促进了作物生长周期的完整性(如播种、收割效率提升),从而推动 NDVI 持续增长。

B. 空间属性的“核心–辅助”驱动逻辑

几何要素主导型(组态 1):通过“宽直道路”直接提升农机作业效率,适用于高效集约化生产作业的田块;

全要素协同型(组态 2):通过“几何+物理”组合稳定管理持续性,适用于需长期精细管理的田块;

物理要素主导型(组态 3):通过“区位材质保障”减少管理障碍,适用于高频跨区实验作业管理为主的田块。

综上,无论哪种组态,最终均通过道路属性对田间作业管理的“空间适配性”,间接提升了耕地生产力(NDVI),体现了 fsQCA 方法中“多条件组态协同”的核心逻辑。

结语:

综上所述,田间道路对耕地生产力的提升是多属性协同、全流程作用的结果。通过构建“规划布局–建设标准–动态维护–功能联动”的优化方案体系,可系统解决当前道路密度不均、材质错配、区位连接低效等问题,最终实现田间道路从“基础通行”到“生产力驱动”的功能升级,为白马基地及同类农业园区的高标准农田建设提供可复制的实践路径。

[参考文献]

[1]王蕊,李红军,雷玉平.基于多年 MODIS NDVI 分级的河北平原农田生产力评价[J].中国生态农业学报,2011,19(05):1175–1181.

[2]Ragin C C,Fiss P C. Redesigning Social Inquiry: Fuzzy Sets and Beyond[M]. Chicago: University of Chicago Press,2008:190–212.

[3]张明,杜运周.组织与管理研究中 QCA 方法的应用:定位、策略和方向[J].管理学报,2019,16(9):1312–1323

[4]Dong X,Zhang S,Zhou J,et al.Magnitude and frequency of temperature and precipitation extremes and the associated atmospheric circulation patterns in the Yellow River Basin (1960–2017),China[J].Water,2019,11(11):2334.