

土地整治项目区耕地资源优化配置研究

韩 博¹, 金晓斌^{1,2,3}, 孙 瑞¹, 项晓敏¹, 刘 晶¹, 曹 帅¹, 周寅康^{1,2,3}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023; 3. 江苏省土地开发整理技术工程中心, 南京 210023)

摘要:耕地细碎化会导致农业生产效率降低、土地利用可持续性下降、耕地撂荒增多等多种农业问题,土地整治是当前中国改善耕地细碎化的重要途径之一。为探索适宜的土地整治计量模型以解决耕地资源优化配置问题,基于多目标线性规划,从工程设计、权属调整、地块分配三方面构建土地整治项目区耕地资源优化配置模型,并选取典型土地整治项目进行案例分析。研究表明:通过模型优化,案例区农业生产消耗降低了20.41%、地块平均规模增大了53.72%、户均地块数降低了34.92%,平均耕作距离减小了68.17%,可促进耕地细碎化问题的改善,有利于农业生产效率的提升。研究对丰富土地整治规划设计方法,推动耕地细碎化问题解决具有参考和借鉴意义。

关键词:土地整治;耕地;多目标线性规划;权属调整;空间优化配置

耕地细碎化是受自然条件、社会、经济等因素长期作用形成的、与土地规模经营相对立的土地利用格局^[1],是世界上许多国家农业生产中面临的普遍性问题^[2]。耕地细碎化是中国农业生产中长期存在的突出特征之一,而家庭联产承包责任制的实行、农村土地平均分配的原则使得农户经营的土地进一步分散化、细碎化^[3]。尽管耕地细碎化现象具有积极和消极两方面的影响^[4],但学术界已形成普遍共识,认为耕地细碎化会导致农业生产效率降低^[5]、土地利用可持续性下降^[1]、耕地撂荒增多^[6]等农业问题,是导致农业地区衰退的重要原因之一^[7]。为有效减轻耕地细碎化现象^[8],提高农业生产能力^[9],缓解土地利用矛盾^[10],许多国家(地区)实施了多种形式的土地整治,并取得积极的效果^[11]。Hara-simowicz等^[12]对波兰Koz'lice村土地整治项目的研究显示,通过整治,研究区地块总数下降了39.14%,户均地块数降低了36.46%,平均田宅距离缩短了32.76%;Demetriou等^[13]对塞浦路斯1970-2010年74个土地整治项目实施效果的分析显示,项目区地块总数下降了54.35%,地块平均规模增加了106.06%,地块道路连通度提高了199.12%,土地整治对改善耕地细碎化取得显著成效。

中国始于20世纪末的新时期土地(农用地)整治,通过调整土地利用结构、完善农田基础设施等途径,在增加有效耕地数量、提高耕地质量、提升农业生产能力、稳定粮食生产等方面取得了积极效果^[14-16],但在优化耕地资源空间配置、促进耕地规模集中从而改善耕地细碎化方面仍有待提升。文高辉等^[11]通过对湖北省江夏、咸安、通山三区(县)土

收稿日期: 2018-08-22; 修订日期: 2019-02-18

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD06B02)

作者简介: 韩博(1995-),男,河南新乡人,硕士,主要从事土地整治相关研究。

E-mail: mg1727028@smail.nju.edu.cn

通讯作者: 金晓斌(1974-),男,甘肃兰州人,博士,副教授,博士生导师,主要从事土地资源管理研究。

E-mail: jinxb@nju.edu.cn

地整治项目的调查分析发现,土地整治实施后项目区耕地细碎化程度仅降低了1.79%;田孟等^[17]也认为当前由政府主导的农用地整治项目,强调以增加耕地为重点目标,偏重采用工程技术手段改变土地物理形态和土壤结构,却忽视了农民地权的整合和地块的调整或置换,以及农户耕作规模的扩大,未能有效地解决耕地产权的细碎化;刘新卫^[18]提出优化土地关系和改善用地条件是土地整治的核心内涵,但行政力量偏好和农村治理弱化导致农村土地整治偏重工程化发展,部分地区不仅未能解决耕地零散细碎问题还使得一些经过整治的土地处于撂荒或丢弃状态。

当前中国土地整治改善耕地细碎化的效果不甚理想,主要由于前期土地整治以实现耕地资源保护和保障国家粮食安全为核心目标,以增加耕地面积、完善农业基础设施为重点任务,以工程建设为主要实施手段^[19]。因为实践中农民主体地位缺失,政府主导的权属调整实施难度较大^[20]。面对耕地后备资源紧缺、耕地保护压力加大的自然资源管理新形势,客观上要求进一步提高耕地利用效率、挖掘农业生产潜能^[21-22]。这也要求土地整治在管理体制、运行模式、技术手段等进行相应调整。

围绕土地整治改善耕地细碎化问题,需综合考虑管理运行机制、技术方法体系等内容。在管理体制方面,国外研究已较为成熟,逐步转向土地整治计量模型的构建^[23],并通过元启发算法^[24]、遗传算法^[25]、模拟退火算法^[23]、模糊逻辑方法^[26]、线性规划方法^[27]等进行模型优化。国内相关研究主要集中在管理体制层面^[28-29],在项目区尺度构建空间计量分析模型辅助土地整治耕地资源优化配置的研究尚不多见。虽有研究提出基于线性规划运输模型的土地整治权属调整方法^[30],但该模型未考虑地块形态这一耕地细碎化重要特征,在分析农民意愿时也未考虑耕地与配套基础设施的关系。有鉴于此,本文以改善耕地细碎化状况、提高农业生产效率、有效发挥耕地潜能为目标,结合农民耕作习惯和地块选择偏好,基于多目标线性规划模型构建结合工程建设与权属调整的土地整治项目区耕地资源空间配置优化模型。希冀为丰富土地整治规划设计方法,探索通过改善耕地细碎化实现农业生产效率提高的途径提供参考和借鉴。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究思路

在项目区尺度,耕地资源的优化配置是指在土地整治中基于既有土地利用格局、土地权属状况和农业生产条件,结合农田水利、田间道路等工程建设,对农户地块(即农户所拥有的,用于农业生产的最小耕作单元。简称地块)进行形态和位置的调整,以实现农业生产成本降低和农业生产效率提高。其优化配置过程可分为三个阶段:(1)工程建设阶段。通过平整土地、配套灌排设施、修建田间道路等工程措施形成耕作田块(由田间灌排渠系、道路、林带等固定工程设施所围成的耕地图斑,是进行田间耕作、管理与建设的最基本单位,包含农户地块。以下简称田块)的初步格局。(2)权属调整阶段。在满足农民意愿的前提下,以降低农业生产消耗为目标,确定项目区内各农户地块所属的田块。(3)地块分配阶段。以挖掘农业生产潜力为目标,确定各田块中地块分配的具体位置,形成耕地资源的空间配置格局。

以此为基础,本文形成技术路线如下:(1)以行政村为单元,根据土地整治项目规划设计,结合田间灌排体系、道路、林带等农田基础设施划分耕作田块;(2)分析耕地

资源空间配置对农业生产效率的影响并进行数学抽象,以农户 i 在田块 j 中分配的耕地面积 X_{ij} 为决策变量,构建多目标线性规划模型,以工程设计标准和农民意愿为基础制定地块分配规则,形成分配结果;(3)根据耕地资源优化目标,从农业生产消耗、形态要素改善、位置要素改善、权属状况改善四个方面将模型优化结果与土地整治前后耕地资源状况进行对比分析,检验模型效果。具体技术流程见图1。

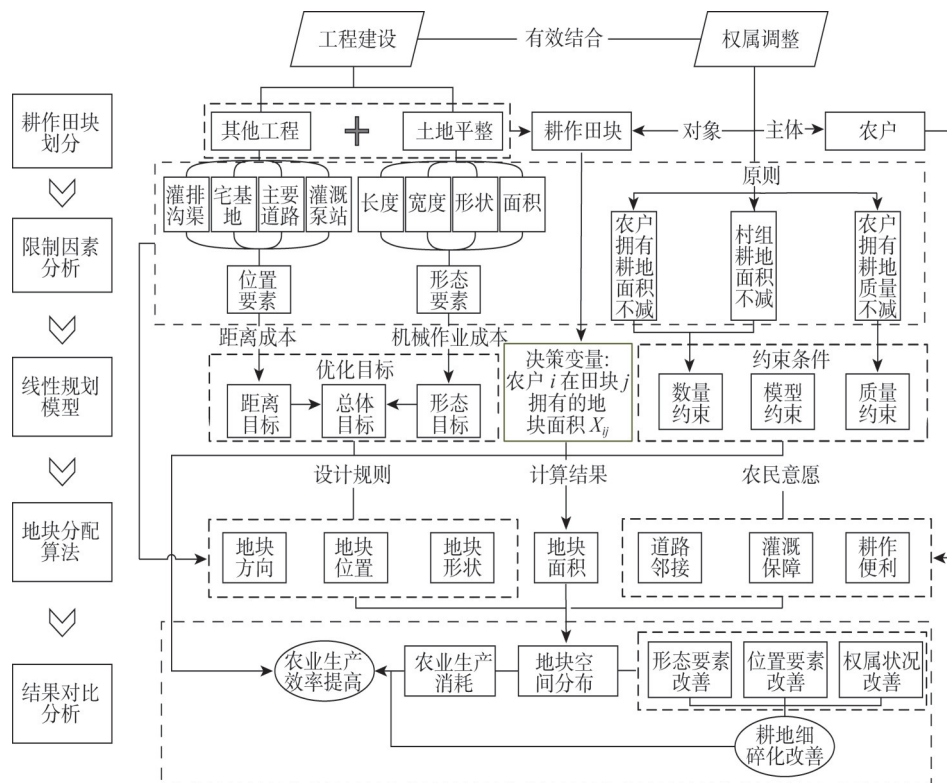


图1 技术路线

Fig. 1 Technology workflow

1.2 多目标线性规划模型

多目标线性规划是解决线性约束条件下线性目标函数极值问题的数学方法,用于多个彼此矛盾的目标下探寻相对最优解,被广泛应用于资源配置^[31-32]、土地利用结构优化^[33]等研究领域。

1.2.1 决策变量

多目标线性规划模型由决策变量、目标函数及约束条件构成。本文决策变量 X_{ij} 为农户 i 在该村田块 j 中拥有的耕地面积,因此模型共有 $i \times j$ 个决策变量。基于这一决策变量设置,意味着农户 i 有在田块 j 中有且仅有一块面积为 X_{ij} 的地块。

1.2.2 目标函数

模型构建的总体目标是通过优化地块的空间配置,实现项目区农业生产效率提升。总体目标由两个单项目标函数组成,即形状目标函数和距离目标函数。为使地块位置和

形状对农业生产效率的影响定量可比,引入“粮食单元”(Grain Units,简称GU。1GU定义为1 t谷物所等量的能量与蛋白质)^[34]。分别将地块的长度、宽度以及面积,地块与权属人宅基地的距离,地块与主要农村道路的距离,地块与泵站的距离换算为机械作业消耗、耕作交通消耗、运输消耗、农业灌溉消耗的GU。设定当总消耗最小时,农业生产效率最高,从而实现优化目标。

具体目标函数如下:

(1) 根据地块几何形态与农业机械作业消耗的关系,构建形状目标函数:

$$\text{Cost1} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\alpha_1 \times W_j + \alpha_2 \times \frac{X_{ij}}{W_j} + \alpha_3 \times X_{ij} \times W_j \right) \quad (1)$$

式中: Cost1 为由地块形状因素产生的农业生产消耗; X_{ij} 为农户 i 在田块 j 中拥有的地块面积; W_j 为将田块 j 视为矩形时的宽度(与线性工程垂直的边视为宽),在地块长边方向与田块长边方向垂直的条件下, W_j 也视为地块的长; m 为农户总户数; n 为田块总数; α_1 、 α_2 、 α_3 分别为地块长度、宽度和面积的消耗系数,根据项目区实际情况确定。

(2) 根据地块与特定地物空间距离产生的消耗情况,构建距离目标函数:

$$\text{Cost2} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\beta_1 \times X_{ij} \times \text{Dist}H_{ij} + \beta_2 \times X_{ij} \times \text{Dist}R_j + \beta_3 \times X_{ij} \times \text{Dist}P_j) \quad (2)$$

式中: Cost2 为由地块位置因素产生的农业生产消耗; $\text{Dist}H_{ij}$ 、 $\text{Dist}R_j$ 、 $\text{Dist}P_j$ 分别为田块 j 到农户 i 宅基地、最近农村公路、最近灌溉泵站的距离,分别近似表示田块内各地块到权属人宅基地、最近农村公路、最近灌溉泵站的距离; β_1 、 β_2 、 β_3 分别为地块到宅基地距离的交通消耗系数、地块到农村公路距离的运输消耗系数、地块到灌溉泵站距离的灌溉消耗系数,根据项目区实际情况确定。

选用线性加权求和法构建总体目标函数,计算方法如下:

$$\text{Minf}(Z(x)) = \sum_{i=1}^r \omega_i Z_i(x) \quad (3)$$

式中: $\text{Minf}(Z(x))$ 为目标总消耗; r 为单目标函数个数,本文中 $r=2$; $Z_i(x)$ 为第 i 个单目标函数; $Z_1(x) = \text{Cost1}$; $Z_2(x) = \text{Cost2}$; ω_i 为第 i 个单目标函数的加权系数,根据实际情况结合专家意见确定。

1.2.3 约束条件

约束条件包括数量约束、质量约束和模型约束。数量约束指各农户在优化后拥有的耕地面积不下降;质量约束指各农户在优化后拥有的耕地质量不下降;模型约束指田块 j 中各地块面积之和不大于田块 j 总面积。具体约束条件如下:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n X_{ij} = \text{Area}_i \\ \sum_{j=1}^n X_{ij} \times Q1_j \geq Q_i \\ \sum_{i=1}^m X_{ij} \leq \text{Area}1_j \end{cases} \quad (4)$$

式中: Area_i 为农户 i 优化前拥有的耕地面积; Q_i 为优化前农户 i 拥有耕地的平均质量等级(利用等); $Q1_j$ 为优化后田块 j 的耕地质量等级; $\text{Area}1_j$ 为田块 j 的面积。

本文构建的多目标线性规划模型由决策变量 X_{ij} 、目标函数及约束变量共同构成。以行政村为计算单元和边界控制,选用Lingo 12.0对模型进行求解,得到村级最小农业生产消耗及决策变量 X_{ij} 。

1.3 多边形拟合矩形算法

耕作田块划分后,由于受地形限制,以及建筑物、林地、水面阻碍等影响,大部分田块的形状是近似于矩形的多边形(图2a),这导致难以有效确定 W_j 。为使计算结果更加科学,需按照一定的几何规则将多边形田块拟合为矩形,再测量其宽度 W_j 。根据相关研究,多边形拟合为矩形需遵循以下规则^[35]:(1)多边形与拟合矩形的形心应重合;(2)两图形的垂直轴及水平轴应重合;(3)两图形面积应相等。为实现田块形状拟合,本文将shp格式的田块图层输出为dwg格式,使用C++语言在CAD平台进行二次开发,基本思路为:(1)形成田块多边形的最小外包矩形(包围原图形且平行于X轴Y轴的最小外接矩形,下面简称矩形);(2)以矩形形心为圆心,采用二分渐进查找算法进行旋转,使矩形垂直轴与Y轴夹角(或水平轴与X轴夹角)逐渐逼近田块多边形垂直轴与Y轴夹角(或水平轴与X轴夹角),当两夹角角度差小于设定的阈值时终止旋转;(3)将矩形以形心为锚点缩放至与田块多边形等面积大小,得到最终拟合矩形。处理过程如图2所示。

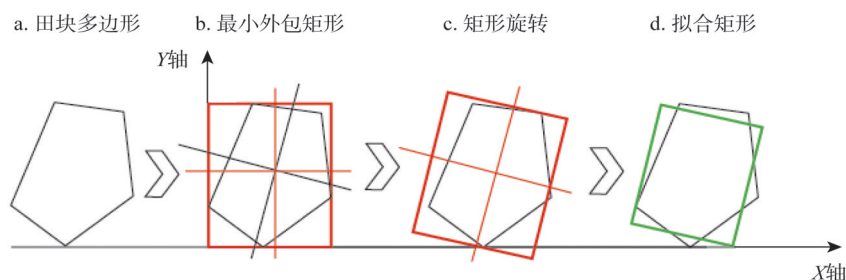


图2 拟合矩形形成过程示意图

Fig. 2 The scheme of the equivalent rectangle forming progress

1.4 地块分配算法

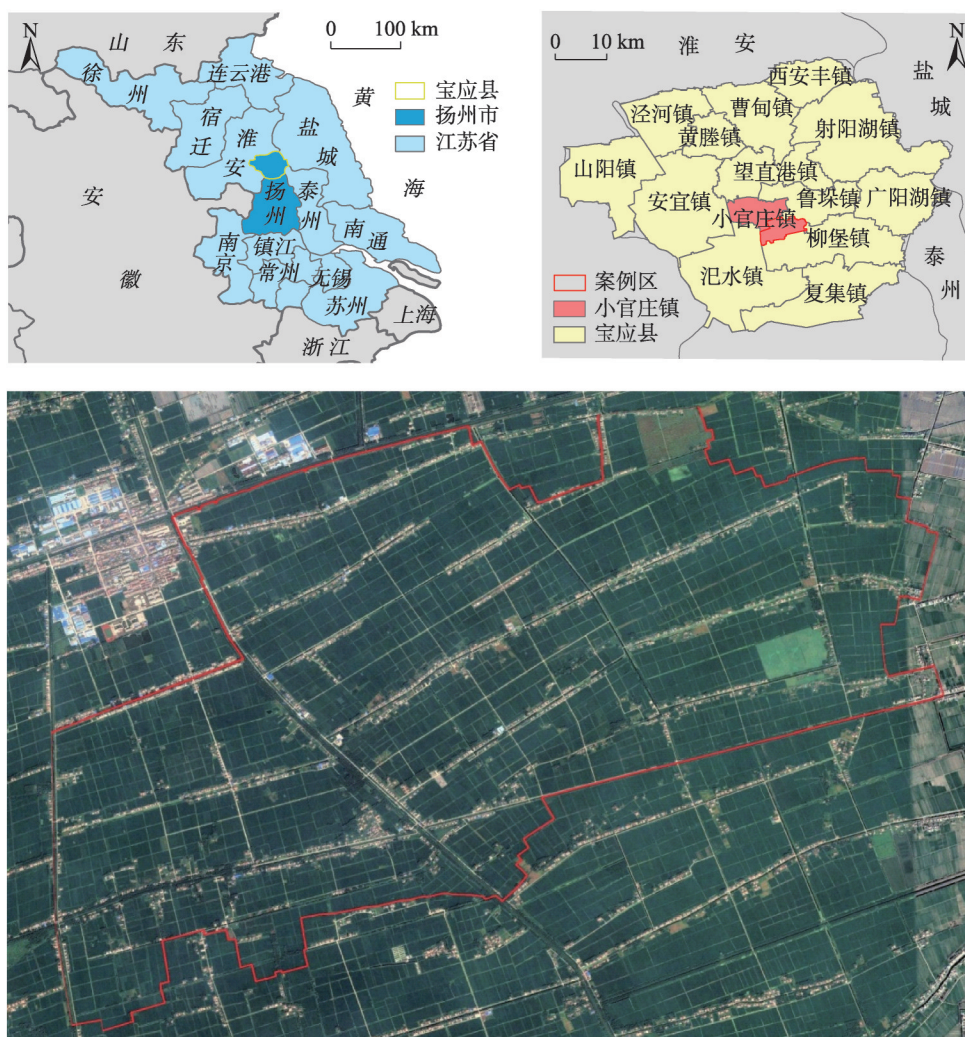
地块分配过程包括四项关键要素,即地块面积、地块长边方向、分配起点和分配顺序^[30]。地块面积通过规划模型求得;地块长边方向为田块邻接灌排沟渠的垂直方向。地块分配方向和分配顺序采用以下思路:(1)将田块 j 中各地块按面积大小排序,假定从大到小依次为地块 i_1 、地块 i_2 、...、地块 i_l ;(2)利用平行于地块长边方向的分割线将田块分为面积相等的左右两部分,并分别计算各权属人宅基地到田块左右两部分的距离并比较;(3)按照面积大小依次确定地块位置,首先确定面积最大的地块 i_1 ,若农户 i_1 的宅基地距离田块左半部分较近,则令田块最左边为分配起点,令地块 i_1 为分配次序1。再确定地块 i_2 的位置,若农户 i_2 的宅基地距离田块右半部分较近,则将地块 i_2 分配至田块最右边,即分配次序为 l 。按此方式依次确定所有地块的分配次序,得到最终该田块中各地块的分配顺序。

按照上述思路,可以保证地块与线性工程尽可能邻接,同时又能使田块中面积较大

的地块占据耕作条件较好的位置,从而提高农业生产效率。在确定田块分配规则后,借助Python编程语言在ArcGIS平台实现地块的自动分配。

1.5 研究区概况

选取江苏省宝应县小官庄镇某高标准基本农田整治项目作为研究案例。项目区位于宝应县小官庄镇南部,地处 $119^{\circ}25'52''\sim 119^{\circ}29'57''\text{E}$, $33^{\circ}8'40''\sim 33^{\circ}11'13''\text{N}$,东与鲁垛镇接壤,南与柳堡镇相连,西与范水镇交界,北至向阳河(图3),属亚热带湿润性季风气候区,气候温和,四季分明,日照充足,雨水适中,无霜期长;区内地势平坦,高程在2.20~3.32 m之间;农业生产以粮食作物为主,以稻麦两熟为优势。项目建设规模 1354.43 hm^2 ,涉及诚忠、范沟、祖全和南场4个行政村,共38个村民小组;项目区内共有农户2571户,人口10283人。项目区内耕地面积 1155.61 hm^2 ,通过整治新增耕地 41.22 hm^2 ,项目实施期为2014-2016年。整治前项目区已具有较好的耕作条件,田块基本集中连片,具有一定的交通及灌排设施基础,但也存在地块布置不合理、田间道路不



注:遥感影像图来自map.google.com,影像拍摄时间为2017年9月17日,拍摄高度为7.23 km。

图3 项目区区位图

Fig. 3 The location of the project area

贯通、配套设施不完善等问题。

1.6 数据来源与数据处理

所收集的数据包括项目建设资料、土地权属资料、社会经济资料和实地调研资料。其中项目建设资料包括项目规划设计报告、竣工验收报告、项目现状图(1:5000)、项目规划图(1:5000)、项目竣工验收图(1:2000)、遥感影像图(IKONOS)等;土地权属资料包括土地变更调查资料、土地确权资料(鱼鳞图,1:500)、宅基地位置图(1:500)等;社会经济资料包括所在乡镇和行政村的人口、经济统计资料;实地调查资料包括无人机航拍、农户访谈、问卷调查等。以土地变更调查(二调变更图)为基础,结合遥感影像、无人机航片和鱼鳞图,在ArcGIS中对各农户拥有的所有地块进行数字化,并添加相应的权属字段。根据村组户籍统计资料,配合宅基地位置图,确定各户宅基地座落。道路、沟渠、泵站等工程数据根据竣工验收图确定。

1.7 耕地资源优化配置

根据项目规划图,项目区共划分为416个耕作田块,其中诚忠村128个,祖全村128个,南场村126个,范沟村34个。田块划分情况见图4b。

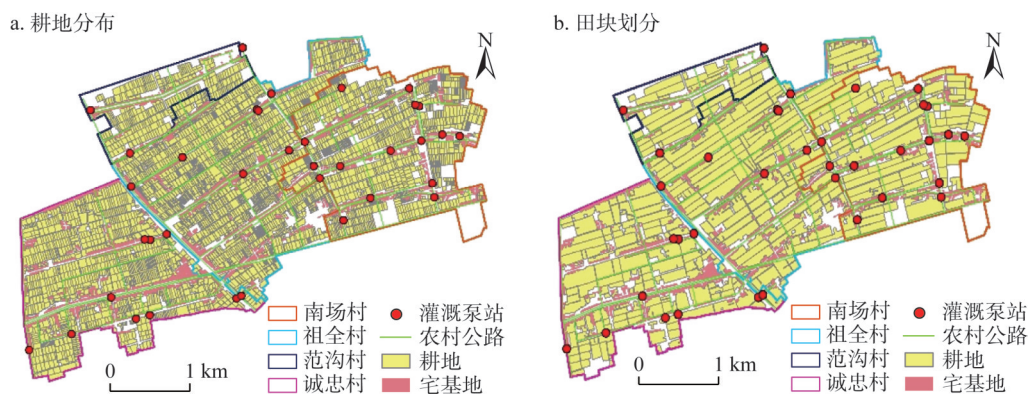


图4 项目区耕作田块分布图

Fig. 4 The distribution of the complex in project area

采用多边形拟合矩形算法将项目区田块进行拟合(图5)。以行政村为计算单元,从项目现状图、项目规划图及项目区田块拟合图中提取所需数据,采用式1~式4构建多目标线性规划模型。根据项目区实际并参考相关研究^[6],取 $\alpha_1=0.49$ GU/100 m, $\alpha_2=4.19$ GU/100 m, $\alpha_3=0.75$ GU/100 m·hm²;取 $\beta_1=0.20$ GU/100 m, $\beta_2=0.22$ GU/100 m, $\beta_3=0.09$ GU/100 m;取 $\omega_1=0.5$, $\omega_2=0.5$ 。使用Lingo 12.0软件分别对4个计算单元(行政村)进行计算。模型运行的基本参数如表1所示。

根据多目标线性规划模型计算结果,使用地块自动分配算法完成各村地块分配,整合后得到项目区耕地资源配置结果,见图6。

2 结果分析

该项目已于2016年底竣工验收。为验证模型方法的有效性,将模型优化、实际整治(未进行权属调整)与整治前的耕地资源空间配置进行对比(图7,为突出结果差异,选

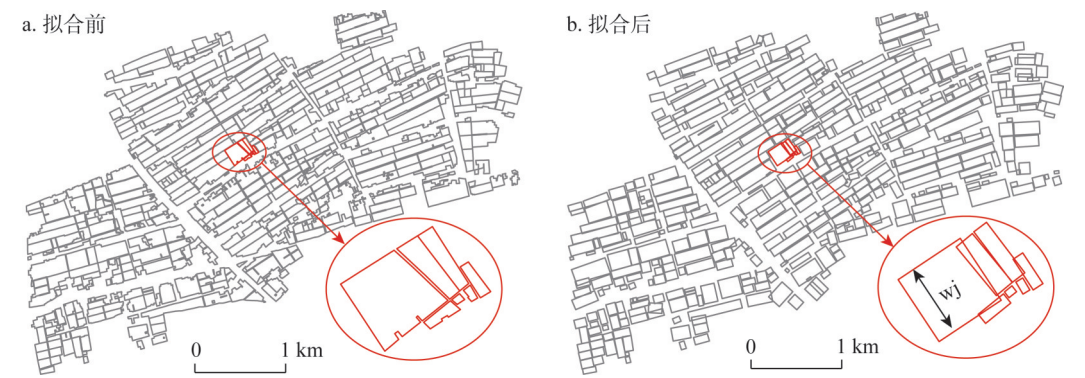


图5 项目区田块拟合示意图

Fig. 5 The schematic of the equivalent rectangles of the complx in project area

表 1 多目标线性规划模型参数表

Table 1 Multi-objective linear programming model parameters table

| 运行参数 | 诚忠村 | 祖全村 | 南场村 | 范沟村 |
|-------------|---------|----------|---------|----------|
| 农户个数 m /户 | 744 | 863 | 634 | 276 |
| 田块个数 n /个 | 128 | 129 | 126 | 34 |
| 决策变量数/个 | 95232 | 111327 | 79884 | 9384 |
| 约束条件数/个 | 1616 | 1855 | 1394 | 586 |
| 迭代次数/次 | 8372506 | 10248749 | 8554171 | 13912027 |
| 运行时间/小时 | 81 | 97 | 82 | 104 |

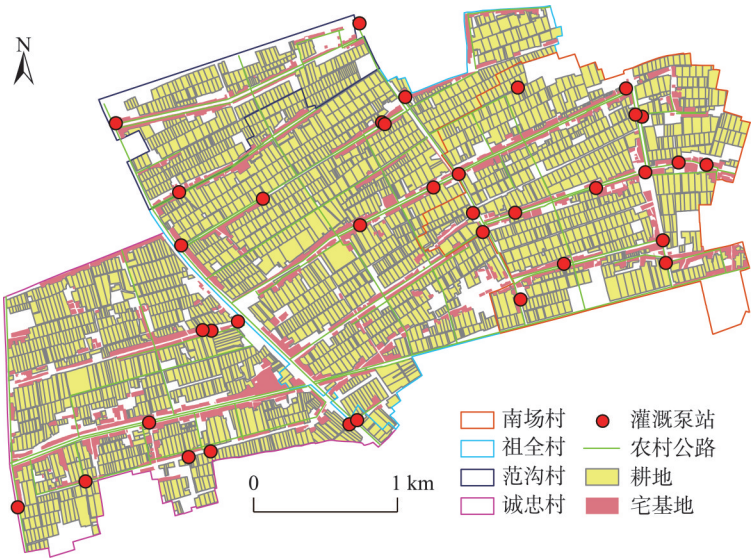


图6 地块空间配置优化结果图

Fig. 6 The result figure of the spatial configuration optimization of plots

择项目区中部分区域作为示例)。根据模型优化目标,从农业生产消耗、形态要素改善、位置要素改善和权属状况改善4个方面进行比较分析。

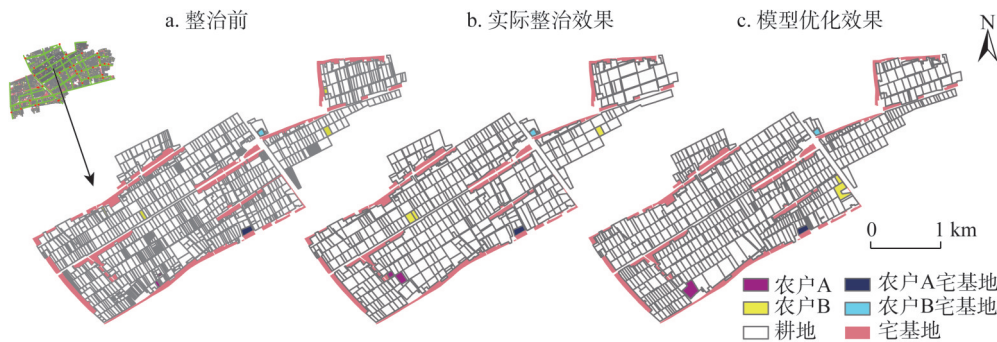


图7 整治前后耕地资源空间配置对比图

Fig. 7 The space configuration of the plots before and after consolidation

2.1 农业生产消耗比较

根据式（1）~式（3），分别计算整治前、整治后和模型优化后项目区地块形状要素和距离要素产生的农业生产消耗和农业生产总消耗，计算结果见表2。

表2 农业生产消耗对比分析

Table 2 Comparison of the cost of cultivation

| 对象 | 土地整治 | | | 模型优化 | | 国外案例 | | |
|--------------------------------|---------|---------|--------|---------|--------|------|------|--------|
| | 整治前 | 整治后 | 变化率/% | 整治后 | 变化率/% | 整治前 | 整治后 | 变化率/% |
| 形状要素消耗/GU | 7212.54 | 6253.78 | -13.29 | 6082.06 | -15.67 | — | — | — |
| 平均形状要素消耗/(GU/hm ²) | 6.47 | 5.41 | -16.38 | 5.26 | -18.70 | 2.25 | 1.60 | -28.89 |
| 距离要素消耗/GU | 1512.20 | 1562.87 | 3.35 | 861.73 | -43.01 | — | — | — |
| 平均距离要素消耗/(GU/hm ²) | 1.36 | 1.35 | -0.74 | 0.75 | -44.85 | — | — | — |
| 总消耗/GU | 8724.74 | 7816.65 | -10.39 | 6943.79 | -20.41 | — | — | — |
| 平均消耗/(GU/ hm ²) | 7.83 | 7.02 | -10.34 | 6.23 | -20.43 | — | — | — |

注：国外案例参考文献[12]。

由表2可知，土地整治后，经过土地平整和地块优化，单位面积耕地的形状要素消耗、距离要素消耗及农业生产总消耗均降低。由于项目实施中未进行土地权属调整，地块位置基本不变，因而整治后的距离要素消耗未发生显著变化。经模型优化后，单位面积耕地产生的各类农业消耗均降低且降低程度大于实际整治结果。尤其是通过权属调整后，地块距离要素消耗大幅降低。

结果分析表明，土地整治或模型优化后地块形状要素优化效果不明显，而形状要素消耗在总消耗中占据更大比重。通过案例对比，国外案例的地块形状要素产生的农业生产消耗从2.25 GU/hm²降低至1.60 GU/hm²，降低了28.89%，相应数值也显著低于模型优化后的结果。其原因可从地块的长度、宽度和面积等方面进行分析：根据式（1），地块的长度取决于地块所在的田块，而田块划分受制于各类线性地物以及宅基地、林地、坑塘水面等，由于模型未考虑耕地以外其他地类的整治，因此分散的宅基地、坑塘水面等导致田块划分不规则，从而造成地块形状不规则；模型中地块的宽度取决于地块的面积，而地块的面积受农户权属面积的约束，因此地块数量越少，总形状要素消耗也越小。研究区人多地少的耕地资源现状，更多的地块数导致了较大的形状要素消耗。

2.2 形态要素改善情况比较

整治前项目区耕地地块较破碎，经过整治和模型优化后，项目区地块数量、规模和形状等方面均得到改善，对比结果见表3。

表3 形态要素整治前后变化对比
Table 3 Comparison of plots in morphological features before and after consolidation

| 对象 | 土地整治 | | | 模型优化 | |
|-----------------------|---------|---------|--------|---------|--------|
| | 整治前 | 整治后 | 变化率/% | 整治后 | 变化率/% |
| 地块个数/个 | 4264 | 2998 | -29.69 | 2775 | -34.92 |
| 地块平均规模/m ² | 2539.99 | 3642.84 | 43.42 | 3904.49 | 53.72 |
| 规模地块数/个 | 1202 | 1406 | 16.97 | 1484 | 23.46 |
| 规模地块比例/% | 28.19 | 46.90 | 79.74 | 53.48 | 75.59 |
| 平均地块形状指数 | 1.59 | 1.17 | -26.42 | 1.30 | -18.24 |
| 平均地块周长/m | 225.11 | 265.28 | 17.84 | 247.34 | 9.88 |
| 平均地块长度/m | 82.95 | 91.38 | 10.16 | 98.73 | 19.02 |
| 平均地块宽度/m | 29.61 | 41.26 | 39.34 | 34.94 | 18.00 |
| 平均地块长宽比 | 4.41 | 2.77 | -37.19 | 5.21 | 27.21 |

注：平均地块长度、平均地块宽度、平均地块长宽比按1.3中方法将田块拟合为矩形后计算得到。

经整治，项目区平均地块规模增加了43.42%；而经模型优化后地块平均规模可增加53.72%。根据区域实际，将面积大于5亩（约3333 m²）的地块定义为规模地块。经整治，规模地块占比为增加18.71%，而经模型优化后规模地块占比增加25.29%。地块形状指数表示地块形状与正方形的接近程度（值为1时表示正方形），一定程度上可以反映地块形状的规则性。整治前项目区平均地块形状指数为1.59，土地整治后为1.17，经过模型优化后平均地块形状指数为1.30。可见模型优化在促进地块规模集中上效果更佳。为便于机械作业，有效的农业生产要求地块具有合理的长宽比，根据实际生产经验及相关研究^[30]，长宽比为2~8：1较为合理。因此整治前后长宽比均在合理范围。

2.3 位置要素改善情况比较

地块位置决定了其灌溉与交通条件，是农民最关心的问题之一。定义地块到最近农村公路的距离为运输距离，地块到最近灌溉泵站的距离为灌溉距离，与农村公路相邻接的地块为临路地块。由表4可知，整治后及通过模型优化，平均运输距离和平均灌溉距离都未发生显著变化，但整治后临路地块比例下降，而经模型优化后临路地块比例可提升20.68%，更贴近农民意愿。

表4 位置要素整治前后变化比较
Table 4 Comparison of plots in location features before and after consolidation

| 对象 | 实际土地整治 | | | 模型优化 | |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 整治前 | 整治后 | 变化率/% | 整治后 | 变化率/% |
| 平均运输距离/m | 79.53 | 82.31 | 3.50 | 78.46 | -1.35 |
| 平均灌溉距离/m | 364.59 | 374.63 | 2.75 | 369.05 | 1.22 |
| 临路地块数/个 | 1858 | 1203 | -35.25 | 1459 | -21.47 |
| 临路地块比例/% | 43.57 | 40.13 | -7.90 | 52.58 | 20.68 |

2.4 耕地权属状况比较

整治前后项目区内农户数量未发生改变。整治前项目区地块权属分割程度较轻，户均地块数整治前为1.66块，整治后降低为1.17块，模型优化后为1.08块。若定义仅有一块耕作地块的农户为集中经营农户，则整治前集中经营农户占总户数的比例为54.18%，整治后提高至64.88%，而经模型优化后可进一步提高至78.84%（表5）。

表5 权属状况整治前后变化比较
Table 5 Comparison of plots in ownership features before and after consolidation

| 对象 | 土地整治 | | | 模型优化 | |
|-------------|---------|---------|--------|--------|--------|
| | 整治前 | 整治后 | 变化率/% | 整治后 | 变化率/% |
| 农户个数/户 | 2571 | 2571 | 0 | 2571 | 0 |
| 户均地块数/(个/户) | 1.66 | 1.17 | -29.52 | 1.08 | -34.94 |
| 集中经营农户个数/个 | 1393 | 1668 | 19.74 | 2027 | 5.51 |
| 集中经营农户比例/% | 54.18 | 64.88 | 19.75 | 78.84 | 45.51 |
| 平均耕作距离/m | 446.57 | 462.09 | 3.48 | 142.14 | -68.17 |
| 累计耕作距离/km | 1904.17 | 1385.35 | -27.24 | 394.44 | -79.29 |

定义地块到权属人宅基地的距离为耕作距离，则所有地块耕作距离的平均值为平均耕作距离，所有地块的耕作距离之和为累计耕作距离。平均耕作距离可反映耕作的便利性，累计耕作距离既可反映耕作便利性，也能体现地块的分散程度。表5结果表明，经整治项目区累计耕作距离有所下降，但平均耕作距离上升，经模型优化后，平均耕作距离下降了68.17%，累计耕作距离下降了79.29%，表明农民耕作便利程度有较大提升，地块权属更加集中。

3 结论与讨论

本文基于多目标线性规划模型，构建了土地整治项目区耕地资源空间配置优化方法，选取典型项目进行实证分析，从农业生产消耗，以及资源层面、权属层面和设施层面进行了对比分析，得到以下主要结论：（1）考虑土地整治的特点，可基于多目标线性规划方法从工程设计、权属调整和地块分配等方面构建土地整治项目区耕地资源优化配置模型，以促进耕地资源优化配置，改善耕地细碎化状况，提高农业生产效率；（2）通过模型优化结果与传统土地整治效果的对比分析，传统土地整治方法在减小农户耕作距离、提高耕地道路邻接性、促进耕地产权集中等方面还有提升空间；（3）模型优化结果表明，结合土地整治进行土地权属调整对降低因地块分散、耕作不便导致的农业生产消耗，改善耕地细碎化状况，提高农业生产效率具有重要作用。为充分地发挥土地整治效果，亟待在土地整治制度设计、管理模式、工程技术等方面积极探索。

受基础数据、建模难度等的影响，本文也存在一些问题有待在后续研究中进一步深入。（1）土地整治中田块的大小、形状等设计要素受地形、水源、权属等客观因素的影响显著，模型抽象难以完全反映现实情况。构建模型重点针对长江中下游平原区（地势平坦、耕地质量较为均质、地表水资源较为充足），为使模型在尽量贴近实际情况的条件下技术实现，模型构建时突出田块间耕地质量等的差异，未考虑田块内部地形、耕地质量等相对次要因素的差异，默认灌溉方式为泵站提水灌溉。（2）为了简化模型，目前模

型中输入的各类距离均采用直线距离,这与实际情况可能存在出入,将导致计算结果出现偏差。(3)在农民意愿方面,目前仅考虑耕作便利、设施完备等因素,后期将考虑结合区域农业生产实际进行补充。(4)目前模型仅对单一要素(耕地)进行了优化,如何将多要素综合整治抽象为数学模型、如何将模型与“土地整治+”“生态整治”等新理念进行结合、如何使模型与当前土地流转形势相适应等问题,还有待进一步思考。

参考文献(References):

- [1] 孙雁,刘友兆.基于细碎化的土地资源可持续利用评价:以江西分宜县为例.自然资源学报,2010,25(5):802-810. [SUN Y, LIU Y Z. Evaluation of land use sustainability based on land fragmentation: A case on Fenxi county, Jiangxi province. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(5): 802-810.]
- [2] LAURE L, LAURENT P. Does land fragmentation affect farm performance? A case study from Brittany, France. *Agricultural Systems*, 2014, 129: 68-80.
- [3] 吕晓,黄贤金,钟太洋,等.中国农地细碎化问题研究进展.自然资源学报,2011,4(3):530-540. [LYU X, HUANG X J, ZHONG T Y, et al. Review on the research of farmland fragmentation in China. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(3): 530-540.]
- [4] THENAIL C, JOANNON A, CAPITAINE M, et al. The contribution of crop-rotation organization in farms to crop-mosaic patterning at local landscape scales. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 131(3): 207-219.
- [5] 王慢慢,刘颖,蒯昊,等.土地细碎化、耕地地力对粮食生产效率的影响:基于江汉平原354个水稻种植户的研究.资源科学,2017,39(8):1488-1496. [WANG M M, LIU Y, KUAI H, et al. The effects of land fragmentation and land quality on the technical efficiency of grain production based on 354 rice planters on the Jiangnan Plain. *Resources Science*, 2017, 39(8): 1488-1496.]
- [6] DEININGER K, SAVASTANO S, CARLETTO C. Land fragmentation, cropland abandonment, and land market operation in Albania. *World Development*, 2012, 40(10): 2108-2122.
- [7] SKLENICKA P. Classification of farmland ownership fragmentation as a cause of land degradation: A review on typology, consequences, and remedies. *Land Use Policy*, 2016, 57: 694-701.
- [8] SONNENBERG J. Fundamentals of land consolidation as an instrument to abolish fragmentation of agricultural holdings. In: *Proceedings of the 22nd International FIG Congress*, Washington. DC, 2002.
- [9] CAY T, AYTEN T, ISCAN F. Effects of different land reallocation models on the success of land consolidation projects: Social and economic approaches. *Land Use Policy*, 2010, 27(2): 262-269.
- [10] KUPIDURA A, LUCZEWSKI M, HOME R, et al. Public perceptions of rural landscapes in land consolidation procedures in Poland. *Land Use Policy*, 2014, 39(3): 313-319.
- [11] 文高辉,杨钢桥,李岩,等.农地整治对耕地细碎化的治理效果及其原因分析:以湖北省江夏、咸安、通山三区(县)为实证.中国土地科学,2016,30(9):82-89. [WEN G H, YANG G Q, LI Y, et al. The governance effect of rural land consolidation on cultivated land fragmentation and its causes: A case study on Jiangxia district, Xian'an district, Tongshan county in Hubei province. *China Land Sciences*, 2016, 30(9): 82-89.]
- [12] HARASIMOWICZ S, JANUS J, BACIOR S, et al. Shape and size of parcels and transport costs as a mixed integer programming problem in optimization of land consolidation. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2017, 140: 113-122.
- [13] DEMETRIOU D, STILLWELL J, SEE L. Land consolidation in Cyprus: Why is an integrated planning and decision support system required?. *Land Use Policy*, 2012, 29(1): 131-142.
- [14] 胡业翠,郑新奇,徐劲原,等.中国土地整治新增耕地面积的区域差异.农业工程学报,2012,28(2):1-6. [HU Y C, ZEHNG X Q, XU J Y, et al. Regional difference for newly increased cultivated land area through land consolidation in China. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(2): 1-6.]
- [15] 徐康,金晓斌,吴定国,等.基于农用地分等修正的土地整治项目耕地质量评价.农业工程学报,2015,31(7):247-255. [XU K, JIN X B, WU D G, et al. Cultivated land quality evaluation of land consolidation project based on agricultural land gradation. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(7): 247-255.]
- [16] JIN X B, YANG S, ZHANG Z H, et al. The evaluation of land consolidation policy in improving agricultural productivi-

- ty in China. *Scientific Reports*, 2017, 7: 2792.
- [17] 田孟, 贺雪峰. 中国的农地细碎化及其治理之道. *江西财经大学学报*, 2015, (2): 88-96. [TIAN M, HE X F. The fragmentation of agricultural land in China and its governance. *Journal of Jiangxi University of Finance and Economics*, 2015, (2): 88-96.]
- [18] 刘新卫, 赵崔莉. 农村土地整治的工程化及其成因. *中国农村经济*, 2017, (7): 15-28. [LIU X W, ZHAO C L. Engineering of rural land renovation and its cause. *Chinese Rural Economy*, 2017, (7): 15-28.]
- [19] 刘彦随. 科学推进中国农村土地整治战略. *中国土地科学*, 2011, 25(4): 3-8. [LIU Y S. Scientifically promoting the strategy of reclamation and readjustment of rural land in China. *China Land Sciences*, 2011, 25(4): 3-8.]
- [20] 刘新卫, 赵崔莉. 土地整合探索与农村土地整治反思: 以广东省清远市为例. *西北农林科技大学学报: 社会科学版*, 2018, 18(1): 18-26. [LIU X W, ZHAO C L. Exploration of land conformity exploration and reflection on rural land consolidation: A case study of Qingyuan, Guangdong province. *Journal of Northwest A&F University: Social Science Edition*, 2018, 18(1): 18-26.]
- [21] 严金明, 夏方舟, 马梅. 中国土地整治转型发展战略导向研究. *中国土地科学*, 2016, 30(2): 3-10. [YAN J M, XIA F Z, MA M. Strategy orientations of transformation development: Land consolidation in the new period of China. *China Land Sciences*, 2016, 30(2): 3-10.]
- [22] 郎宛琪, 朱道林, 汤怀志. 中国土地整治战略重塑与创新. *农业工程学报*, 2016, 32(4): 1-8. [YUN W Q, ZHU D L, TANG H Z. Reshaping and innovation of China land consolidation strategy. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(4): 1-8.]
- [23] DEMETRIOU D, STILLWELL J, SEE L. A framework for developing an integrated planning and decision support system for land consolidation. 2010, <https://www.researchgate.net/publication/228975982>.
- [24] TOURIÃO J, PARAPAR J, DOALLO R, et al. Research article: A GIS-embedded system to support land consolidation plans in Galicia. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2003, 17(4): 377-396.
- [25] AKKUS M A, KARAGOZ O, DULGER O. Automated land reallocation using genetic algorithm//International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications. IEEE, 2012:1-5.
- [26] CAY T, ISCAN F. Fuzzy expert system for land reallocation in land consolidation. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(9): 11055-11071.
- [27] DANTZIG G B. Linear programming under uncertainty. *Management Science*, 1955, 1: 197-207.
- [28] 胡显东, 吴次芳. 我国农村土地整理中土地权属调整问题研究. *西北农林科技大学学报: 社会科学版*, 2009, 9(1): 6-10. [HU Y D, WU C F. Study on the adjustment of land ownership in rural land consolidation in China. *Journal of Northwest A&F University: Social Science Edition*, 2009, 9(1): 6-10.]
- [29] 刘雪冉. 土地整治中承包田块的调整研究. 北京: 中国矿业大学, 2013. [LIU X R. Study on the adjustment of contracted farmland in land reclamation. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013.]
- [30] 张晓滨, 叶艳妹. 基于线性规划运输模型的农地整理权属调整. *农业工程学报*, 2017, 33(7): 227-234. [ZHANG X B, YE Y M. Land reallocation in farmland consolidation based on transportation model of linear programming. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(7): 227-234.]
- [31] 郭贝贝, 杨绪红, 金晓斌, 等. 基于多目标整形规划的黄土台塬区水资源空间优化配置研究. *资源科学*, 2014, 36(9): 1789-1798. [GUO B B, YANG X H, JIN X B, et al. Analysis of water resource space optimization for the loess platform region based on RWRMOA modeling. *Resources Science*, 2014, 36(9): 1789-1798.]
- [32] AERTS J C J H, EISINGER E, HEUVELINK G B M, et al. Using linear integer programming for multi-site land-use allocation. *Geographical Analysis*, 2003, 35(2): 148-169.
- [33] 林忆南, 金晓斌, 李效顺, 等. 渭北黄土台塬区水资源约束下的种植业结构多目标优化研究. *南京大学学报: 自然科学*, 2014, 50(2): 211-218. [LIN Y N, JIN X B, LI X S, et al. Planting structure multi-objective optimization in the Weibei Loess Tableland area with constrained water resource. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2014, 50(2): 211-218.]
- [34] ANDREAE B. Farming, development and space: A world agricultural geography. *Farming, Development and Space*. 1981: e8652.
- [35] KWINTA A, GNIADK J. The description of parcel geometry and its application in terms of land consolidation plan-

ning. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2017, 136: 117-124.

- [36] JANUS J, ZYGMUNT M. MKSCAI-system for land consolidation project based on CAD platform. *Geomatics, Land Management and Landscape*, 2016, 2: 49-59.

Optimized allocation of cultivated land in land consolidation project area based on multi-objective linear programming

HAN Bo¹, JIN Xiao-bin^{1,2,3}, SUN Rui¹, XIANG Xiao-min¹, LIU Jing¹,
CAO Shuai¹, ZHOU Yin-kang^{1,2,3}

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Ministry of Land and Resources Key Laboratory of Coastal Zone Development and Protection, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Province Land Development and Consolidation Center, Nanjing 210023, China)

Abstract: Fragmentation of cultivated land will lead to the reduction of agricultural production efficiency, the decline of land use sustainability and the shortage of cultivated land. Land consolidation is one of the important ways to improve the fragmentation of cultivated land in China. In order to explore suitable land consolidation model to solve the problem of optimal allocation of cultivated land resources, this study constructs a model of optimal allocation of cultivated land resources based on multi-objective linear programming model from three aspects: engineering design, ownership adjustment and plots allocation, and selects a typical land consolidation project for case analysis. Then it compares the model optimization and actual land consolidation results with the pre-consolidation from the aspects of agricultural production consumption, improvement of arable land morphology and location, and ownership status. The results show that: (1) Through the optimization of the model, the agricultural cost in the project area, the average number of plots per farmer, and the average cultivation distance decreased by 20.41%, 34.92%, and 68.17%, respectively, while the average size of the plot increased by 53.72%. The fragmentation of cultivated land is reduced and the agricultural production efficiency is improved. However, compared with the typical foreign land consolidation project, there is still much room for improvement in the allocation of cultivated land. (2) The current land consolidation methods have played a positive role in increasing the average size of plots and improving the shape of plots. However, there are still deficiencies in reducing the farming distance of farmers, increasing the adjacency of cultivated roads, and promoting the concentration of cultivated land property rights. (3) Combining land consolidation with land ownership adjustment plays an important role in reducing the agricultural production consumption caused by land fragmentation and inconvenient farming and improving agricultural production efficiency. The research is of significance for enriching planning and designing methods of land consolidation and promoting the solution to the issue of fragmentation of cultivated land.

Keywords: land consolidation; cultivated land; multi-objective linear programming; ownership adjustment; optimum allocation of space