

基于 TOPSIS 和 BP 神经网络的高标准农田综合识别

吕雅慧¹ 郎文聚² 张超^{1,2} 朱德海^{1,2} 杨建宇^{1,2} 陈英义¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100035)

摘要: 为提高耕地综合生产能力,适应农业现代化发展需求,我国提出了高标准农田建设的重大战略部署。高标准农田的识别是建设前选址和建设后评价的基础。本文以耕地图斑为基本单元,融合遥感影像等多源数据,从本底条件、空间形态、建设水平、生态防护等方面,构建农田综合质量多特性表征体系,采用逼近理想点排序法(TOPSIS)进行初步评价,再以人机交互的方式选取各质量等级农田的真值样本,进一步采用BP神经网络算法修正各特性权值,得到农田综合质量的精确评价结果,实现高标准农田识别。以吉林省大安市为研究区,研究结果表明:基于多特性表征体系的农田综合质量评价方法精度达到96%以上;研究区高标准农田面积广大,主要分布在耕地集中连片、道路通达、生态防护良好、具有农业现代化生产优势的东北部、中北部、西北部边缘和部分南部区域;当地已备案的高标准农田和未备案、有潜力的高质量农田区域均得到有效识别。

关键词: 高标准农田; 综合识别; 多源数据; TOPSIS; BP神经网络

中图分类号: F301.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0196-09

Multi-characteristic Comprehensive Recognition of Well-facilitied Farmland Based on TOPSIS and BP Neural Network

LÜ Yahui¹ YUN Wenju² ZHANG Chao^{1,2} ZHU Dehai^{1,2} YANG Jianyu^{1,2} CHEN Yingyi¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality Monitoring and Control, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: China puts forward the major strategic deployment of constructing well-facilitied farmland vigorously to improve the overall production capacity of farmland and adapt to the development of agricultural modernization. The recognition of well-facilitied farmland is foundation of site selection before constructing and evaluation after constructing. The well-facilitied farmland was understood from the point of view of production demand and recognized based on the evaluation of farmland comprehensive quality. Firstly, the characteristics of farmland comprehensive quality was analyzed from a lot of angles, such as background condition, spatial shape, construction level, ecological protection and so on, by fusing the multi-source data and taking the farmland patches as the basic units. The description system of farmland comprehensive quality was built by using five characteristics, including soil productivity, land contiguous, field shape, road accessibility and ecological protection. Secondly, it assumed that these five characteristics were the same important for farmland comprehensive quality, so the weights were all made as 0.20 and the preliminary evaluation results were got by TOPSIS method. Thirdly, the true-value samples were acquired by using the combined method of preliminary evaluation results and man-machine interactive optimization. The man-machine interactive optimization was achieved by spatial overlay between the preliminary evaluation results and the farmland utilization grade from the farmland-grading work in China. And then BP neural network was used to fix the feature weights. Fourthly, the final accurate comprehensive quality evaluation results were got and the recognition of the well-facilitied farmland was achieved. Finally, Daan City in Jilin Province was taken as the study area. The research results showed that the accuracy of the method to evaluate farmland comprehensive quality was above 96%, basing on the multi-characteristic description system. The well-facilitied farmland was widely

收稿日期: 2017-07-19 修回日期: 2017-09-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA10230103)

作者简介: 吕雅慧(1993—),女,博士生,主要从事3S在土地和农业领域的应用研究,E-mail: lyh_ald@126.com

通信作者: 张超(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事遥感在土地和农业领域的应用研究,E-mail: zhangchaobj@cau.edu.cn

distributed in the study area. The well-facilitied farmland mainly concentrated in northeast, north, edge of northwest and part of the southern region. These regions had the advantage of agricultural modernization, such as concentrated farmland, villages, roads and forest. The well-facilitied farmland which was registered with the law and the prospective high-quality farmland which was not registered with the law were both recognized effectively. The above result had strong consistency on the spatial distribution with the preliminary evaluation results, but the former refined the comprehensive quality results of partial farmland based on the relative importance of each characteristic. The research result can provide scientific reference and technical support for regulation, protection and construction of well-facilitied farmland.

Key words: well-facilitied farmland; comprehensive recognition; multi-source data; TOPSIS; BP neural network

0 引言

耕地是粮食生产的资源基础,直接影响到国家和区域的粮食安全和生态安全。近年来,面对耕地数量减少和区域耕地质量下降等问题,我国从最严格的耕地保护制度和节约用地制度,发展为耕地数量、质量、生态“三位一体”保护,高标准农田建设是重要举措。高标准农田是指土地平整、土壤肥沃、集中连片、设施完善、农电配套、高产稳产、生态良好、抗灾能力强,与现代农业生产和经营方式相适应的基本农田^[1]。我国长期重视高标准农田建设,2008年首次提出“努力建设一批高标准农田”^[2]，“十二五”规划继续推进“大规模建设旱涝保收高标准农田”^[3],2013年《全国高标准农田建设总体规划》明确指出“‘十二五’期间建成4亿亩,2020年建成8亿亩”的具体要求^[4]，“十三五”规划中强调“持之以恒抓好高标准农田建设”^[5],中发[2017]4号文件则明确了“确保建成8亿亩、力争建成10亿亩高标准农田,稳步提高粮食综合生产能力”的工作目标^[6]。

在实际工作中,我国的高标准农田主要有两种来源:一种是严格按照国标建设而成的高标准农田(进行了整治和改造),另一种则是由生产及生态现状良好的区域直接认定而来的高标准农田(稍加改造或无需改造的高质量农田)。因此,在研究中将高标准农田定义为“综合质量较高的农田”,将建设而成的高标准农田、直接认定而来的高标准农田和最有潜力被建设或认定为高标准农田的区域都包含在内,旨在更加全面地理解高标准农田。利用遥感、空间分析等技术手段实现高标准农田识别,是高标准农田建设、管护的重要基础。

目前,国际上与高标准农田相关的研究主要围绕高质量农田内涵及尺度的统一^[7]、国家政策的制定^[8],多重效益分析^[9]、环境修复与生态建设^[10]以及利用统计学方法实现资源管控^[11-12]等方面展开;

而国内的研究侧重于高标准农田的选址规划^[13-14]、时序确定^[15-16]、潜力评价^[17]、生态服务^[18]和投资预算^[19]等方面,针对高标准农田识别^[20]的研究较少。现有的评价指标体系、综合评价及赋权方法适用条件不同且各有利弊^[21],其中逼近理想点排序法(Technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)具有原理简单、数据利用充分等优点^[22-23],BP(Back propagation)神经网络可以通过客观数据训练实现权值的隐性调整^[24],二者相结合可以互为补充,得到更合理的评价结果。

本文以耕地图斑为基本单元,从本底条件、空间形态、建设水平、生态防护等角度出发,构建土壤生产力、耕地连片性、田块形状度、道路通达度和生态防护水平等农田综合质量的5个特性,利用TOPSIS得到相应的初步评价结果,并通过人机交互选取各等级农田的真值样本,再利用BP神经网络实现高标准农田的最终识别。

1 研究区与数据概况

1.1 研究区概况

选择吉林省大安市为研究区,大安市位于吉林省西北部,地处松嫩平原腹地。东与黑龙江省肇源县隔江相望,西与洮南市、通榆县接壤,南与松原市相邻,北与镇赉县以洮儿河为界,如图1所示。地理范围为123°08'45"~124°21'56"E,44°57'00"~45°45'51"N。东西长95 km,南北宽90 km,总面积为4 879 km²。境内地势平坦,土壤肥沃,主要种植玉米、水稻等农作物。大安市属中温带季风气候,四季分明,全年日照时数平均为3 012.8 h,年平均气温4.3℃,年平均积温2 921.3℃,年平均降雨量413.7 mm,地表水年径流量较大,地下水储量丰富。2016年,按照《吉林省率先实现农业现代化总体规划(2016—2025年)》部署要求,吉林省政府整合发改、国土、农业综合开发、水利、农业等方面资金共计27.621 2亿元,拟建成160.92万亩高标准农田^[25],

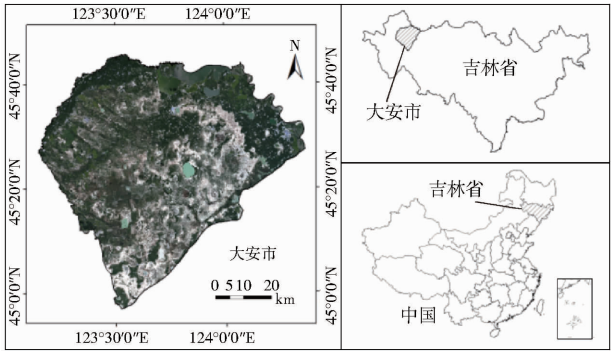


图1 大安市区位图
Fig.1 Location map of Daan City

大安市是吉林省的重点建设区。

1.2 数据及预处理

本文采用的数据包括:2013 年土地利用现状变更调查数据、“全球变化科学研究数据出版系统”提供的中国与东盟地区 2013 年 1 km 分辨率植被净初级生产力 (Net primary productivity, NPP) 数据集、2014 年耕地质量等别年度更新数据、2015 年林业小班数据、大安市 2013—2015 年高标准农田项目区地块边界数据等,以及 8 景 2015 年 3—11 月大安市关键物候期的 16 m 分辨率 GF1—WFV 遥感影像。

对多期遥感影像进行预处理并计算归一化差值植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI),选择 2015 年 9 月 5 日的影像,进行研究区耕地面向对象提取,更新 2013 年土地利用现状变更调查数据中的耕地图斑作为评价单元。根据高标准农田建设对田块面积的基本要求,将 6.67 hm² 以下的评价单元剔除,并以 5 m 为阈值进行连片判断,得到连片耕地区域。叠加中国与东盟地区 2013 年 1 km 分辨率植被净初级生产力数据集,得到全年耕地平均 NPP;从 2013 年土地利用现状变更调查数据和 2015 年林业小班数据中分别提取通达耕地图斑的道路、服务于耕地图斑的林带,通过缓冲区分析和叠加分析等,获得每块耕地图斑的道路通达度和生态防护程度。

2 研究方法

农田综合质量评价和高标准农田识别方法具体流程如图 2 所示。

2.1 多特性表征体系构建

根据耕地的本底条件优良、空间形态规整、建设水平完善、生态防护良好等原则,构建本文的农田综合质量多特性表征体系。

2.1.1 土壤生产力特性 (I1)

土壤生产力特性表征耕地地块的本底条件,由多种土壤理化性质共同决定。已有研究表明^[26-27],

光谱反射特性与土壤内部多种理化性质密切相关,同时王琼^[28]的研究表明,多时相 NDVI 可显著反映作物长势、土壤综合质量等的空间分布规律。本文通过空间分析提取年平均值 NPP 和年多期 NDVI 总值的 2 155 个耕地内部随机样点,对样点进行相关性分析,结果如表 1 所示,在双侧置信度 0.01 的水平上,两者呈显著的中等正相关。因此本文选择全年关键生物期农田的 NDVI 总值来间接反演土壤基础生产力,具体为

$$IND_N = \sum_{k=1}^m NDVI_k \tag{1}$$

式中 IND_N ——土壤生产力特性值,用整年内关键物候期 NDVI 的总和表征

$NDVI_k$ ——第 k 个关键物候期的 NDVI 值

m ——关键物候期个数

2.1.2 耕地连片特性 (I2)

耕地连片特性表征耕地地块间的集中连片程度,影响农业生产的机械化程度及效率。本文采取连接性计算法^[29],以连片耕地的周长密度反映连片情况:值越大,说明耕地被打断或分割的程度越大;反之说明被分割的程度越小,耕地越连片。具体为

$$IND_P = \frac{L}{A} \tag{2}$$

式中 IND_P ——耕地连片特性值

L ——连片耕地周长总和

A ——连片耕地面积总和

2.1.3 田块形状特性 (I3)

田块规整是高标准农田建设的主要目标之一,田块形状特性表征耕地地块形态的规整性。本文选用面积加权平均斑块形状指数度量连片耕地内部田块的平均形状复杂度,值越大,说明形状越复杂、越不规则。具体为

$$IND_S = \sum_{i=1}^N \frac{0.25P_i}{\sqrt{a_i}} \frac{a_i}{A} \tag{3}$$

式中 IND_S ——田块形状特性值

N ——连块耕地内部的田块总数

a_i ——连片耕地内部各田块的面积

P_i ——连片耕地内部各田块的周长

式中,0.25 为正方形校正常数。

2.1.4 道路通达特性 (I4)

道路通达特性表征连片耕地内部田块的通达情况。高标准农田建设要求在田间道路密度与占地面积合理的情况下,确保农机尽可能到达多的田块,值越大,说明连片耕地内部道路能够通达的田块越多,机械化生产成本越小。具体为

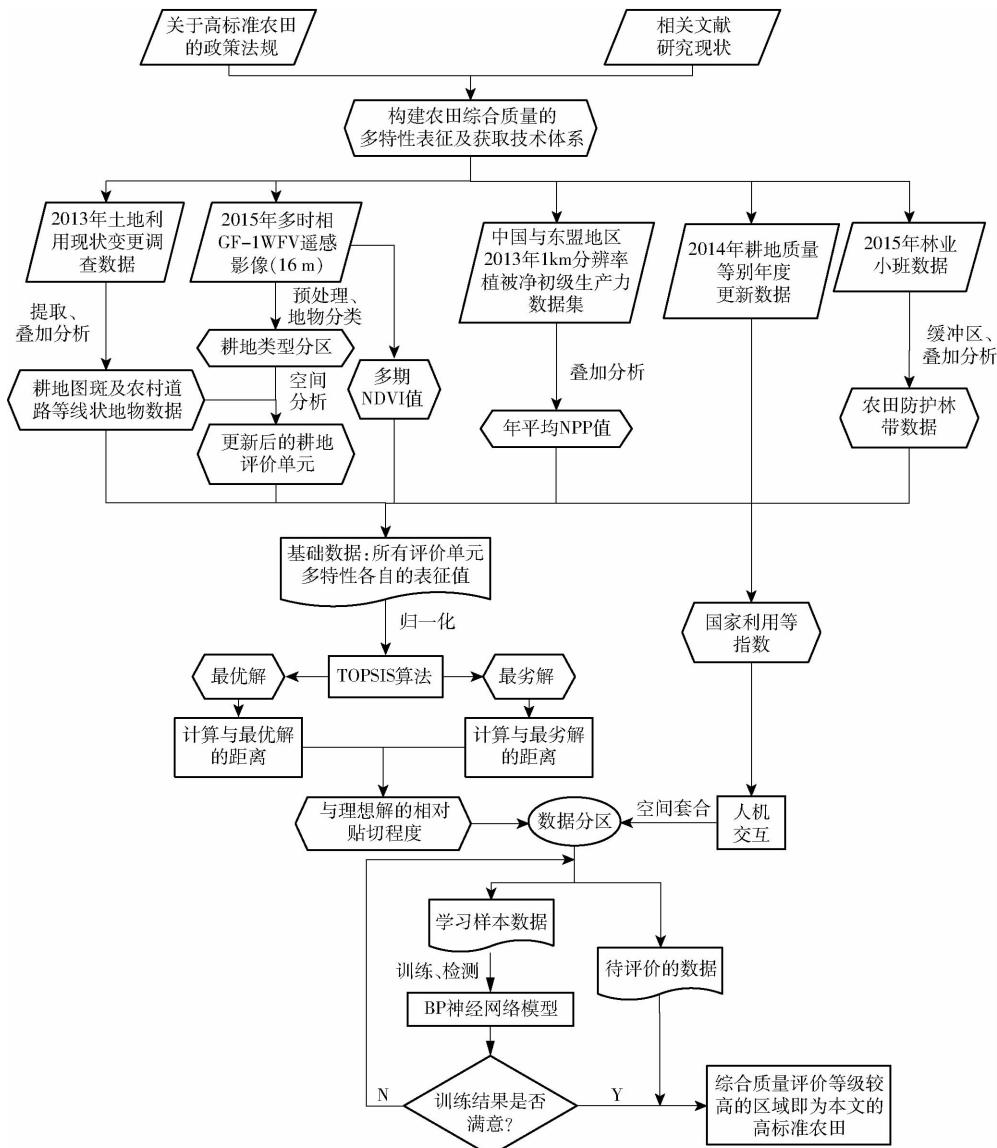


图 2 方法流程图

Fig. 2 Flow chart of method

表 1 相关性分析结果

Tab.1 Correlation analysis results

	年多期 NDVI 总值	
	Pearson 相关性分析	Spearman 相关性分析
相关系数	0.416 **	0.457 **
显著性(双侧)	0	0
年平均值 NPP 平方与叉积的和	228 427. 231	
协方差	106. 048	
样点总数	2 155	2 155

注：**表示在置信度 0.01 水平(双侧)上显著相关。

$$IND_RC = \frac{n}{N}$$

(4)

式中 IND_RC ——连片耕地内部各田块的道路通达度特性值
 n ——连片耕地内部所有道路可通达的田块数

2.1.5 生态防护特性(I5)

生态防护特性表征连片耕地的生态防护水平,高标准农田重视耕地生态改善和可持续发展,防护林是当前农田中最普遍的生态防护措施,本文以林网对连片耕地的防护面积占比定量评价农田生态防护特性,具体为

$$IND_E = \frac{E}{A}$$

(5)

式中 IND_E ——耕地田块生态防护特性值
 E ——覆盖连片耕地的防护林服务带面积,每条防护林的服务带是以防护林为中心,300 m 有效距离范围的缓冲区

2.2 多特性值归一化

为了消除量纲、数量级以及属性导向等对数据分析和决策结果的影响,本文对正相关和负相关指标分别采用归一化方法,将数据映射到 0~1,具体为

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{imin}}{X_{imax} - X_{imin}} \tag{6}$$

$$Y_{ij} = \frac{X_{imax} - X_{ij}}{X_{imax} - X_{imin}} \tag{7}$$

式中 j ——各耕地评价单元的编号
 i ——各特性的编号
 X_{ij} ——原始数据中第 j 个评价单元第 i 个特性的特性值
 X_{imin} ——所有评价单元第 i 个特性的最小值
 X_{imax} ——所有评价单元第 i 个特性的最大值
 Y_{ij} ——第 j 个评价单元第 i 个特性归一化值

2.3 TOPSIS 与 BP 神经网络模型

TOPSIS 是一种实现相对优劣程度评价的方法,通过找到多特性的最优解集和最劣解集,分别检测评价单元与两者的相对贴近程度,从而进行优劣排序并实现综合评价,其中多特性的最优解集由所有特性的最优值组成,最劣解集由所有特性的最差值组成。具体为

$$\begin{cases} Q_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n [w_i (Y_{ij} - Y_{imax})]^2} \\ Q_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n [w_i (Y_{ij} - Y_{imin})]^2} \\ R_j = \frac{Q_j^+}{Q_j^+ + Q_j^-} \end{cases} \tag{8}$$

式中 Q_j^+ ——第 j 个评价单元特性与最优解集的距离
 Q_j^- ——第 j 个评价单元特性与最劣解集的距离
 w_i ——第 i 个特性的权重
 Y_{imax} ——第 i 个特性归一化后的最大值
 Y_{imin} ——第 i 个特性归一化后的最小值
 R_j ——第 j 个评价单元特性与理想最优解集的相对贴切度

R_j 的值越小,表明该评价单元与最优解集越接近,其耕地综合质量应初步被认定为越好。先假设在高标准农田中各特性权重相同,均初步设定为 0.20,据此进行农田综合质量的初步评价。其中对各特性的相对重要性考虑不足,需要与大安市 2014 年耕地质量利用等指数数据进行空间套合,结合人机交互的方式,选取评价合理的各等级农田作为真值样本;进一步通过 BP 神经网络对权值进行隐性调整,获得精确的综合评价结果。BP 神经网络是一种按误差反向传播算法训练的多层前馈网络,适用于各种非线性关系分析^[30]。其结构由输入层(I)、输出层(O)和若干隐含层(H)组成:输入包含输入量和期望输出量的学习样本,实际输出量与期望输出

量之间存在偏差,使用最速下降法和反向传播算法对网络的权值和偏差反复调整,直到实际输出量与期望输出量尽可能地接近时结束训练。原理为

$$\begin{cases} \delta = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p (Z_k - Z'_k)^2 \\ \Delta \omega_{ij} = -\mu \frac{\partial \delta}{\partial \omega_{ij}} = -\mu \frac{\partial \delta}{\partial M_i} \frac{\partial M_i}{\partial \omega_{ij}} \end{cases} \tag{9}$$

式中 δ ——实际输出值与期望值之间的偏差
 p ——输出层的神经元个数
 Z_k ——输出层第 k 个神经元的实际输出量
 Z'_k ——输出层第 k 个神经元的期望输出量
 ω_{ij} ——输入单元 j 到隐含层单元 i 的权重
 $\Delta \omega_{ij}$ ——权重的修正量
 μ ——学习速率
 M_i ——隐含层单元 i 到输出层的传输函数

本文将 5 项特性作为主控因素,即 BP 神经网络的输入层节点数为 5;研究表明,输入节点数为 τ 、隐含层节点数取 $2\tau + 1$ 时,BP 神经网络的学习能力好^[30],故隐含层节点数为 11;此外,3 层结构的 BP 网络具有模拟复杂非线性关系的能力^[31];农田的综合质量等级为输出层节点。综上确定 BP 神经网络结构如图 3 所示。

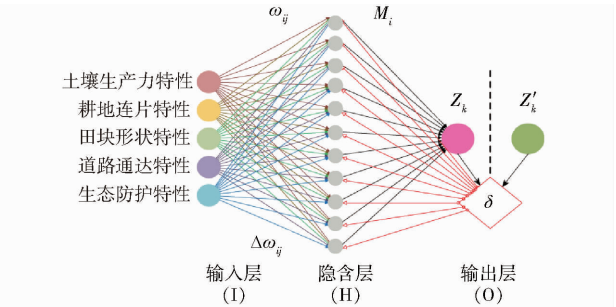


图 3 BP 神经网络结构图

Fig. 3 Construction diagram of BP neural networks model

3 试验结果与分析

3.1 耕地图斑多特性值归一化结果分析

土壤生产力特性(I1)归一化结果如图 4a 所示。大安市耕地的该特性平均水平高且分布均匀,大部分区域特性值高,中南部和东南沿线较高,东北部和南部有极少部分特性值偏低;当地农业生产基础条件好,耕地土质优良,仅有少数盐渍化耕地土壤基础较差。

耕地连片特性(I2)归一化结果如图 4b 所示。大安市耕地的该特性平均水平一般,空间分异明显,东部和南部高,中北部、东北部和西北沿线较高,中西部和中南部偏低;特性值较高的耕地主要分布在田块集中、距离市中心较近的区域,适于农业现代化生产的需求。

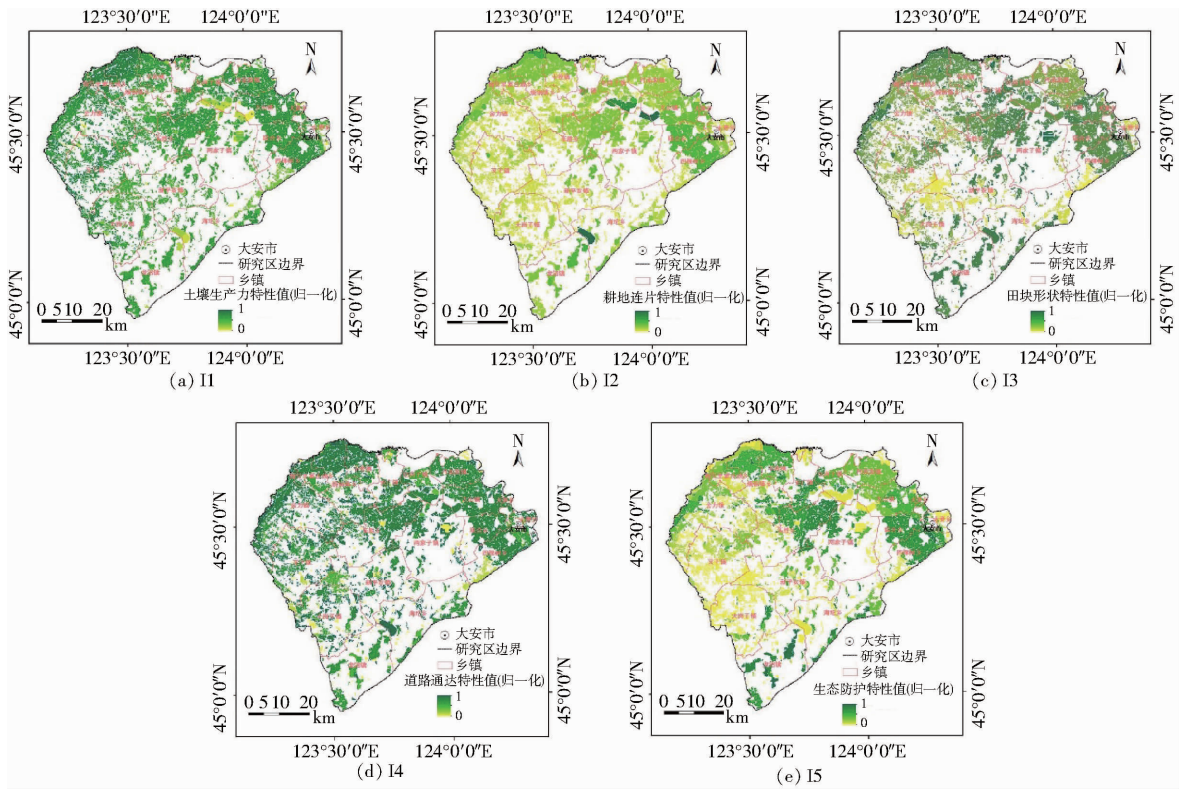


图 4 I1 ~ I5 归一化结果
Fig. 4 Normalization results of I1 ~ I5

田块形状特性 (I3) 归一化结果如图 4c 所示。大安市耕地的该特性平均水平较高且分布较均匀, 东部、中东部和南部高, 东北部和西部较高, 西南部和东南沿线偏低; 特性值较高的耕地主要分布在田块集中的区域, 在分布散乱的区域特性值偏低。

道路通达特性 (I4) 归一化结果如图 4d 所示。大安市耕地的该特性平均水平高, 仅有零星的低值耕地分散在全域各部; 特性值较高的耕地区域田块集中、路网密集, 较低的耕地分布在田块零散且路网稀疏的区域。

生态防护特性 (I5) 归一化结果如图 4e 所示。大安市耕地的该特性平均水平一般, 空间分异明显, 东部、中北部和南部值较高, 东北部和西北沿线值一般, 西部和西南部值偏低, 在东北和西北的边界也有少量低值分布; 田块集中连片区域的防护林建设较为完善, 而分布零散的区域生态防护建设薄弱, 有待加强。

3.2 基于 TOPSIS 的农田质量初步评价

利用式(8)得到各评价单元综合特性与理想最优解集的相对贴切度 (R_j), 作为研究区农田综合质量的初步评价结果。如图 5 所示, 研究区农田的平均质量水平较高, 高质量农田主要分布在中东部、东部、东北部、西北沿线和南部等耕地连片区域, 低质量农田主要在西部和东南部边缘零散分布。

依据 TOPSIS 的结果, 利用自然断点法对研究区

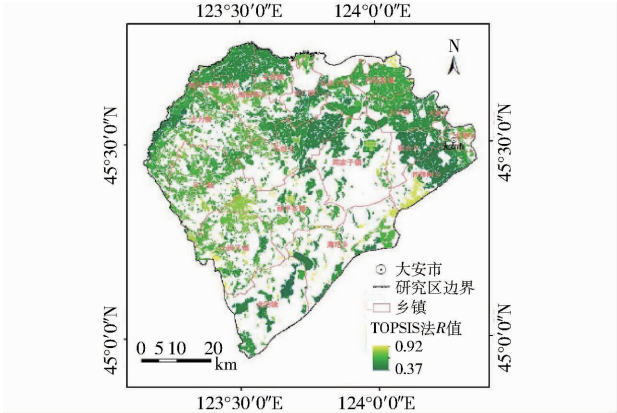


图 5 基于 TOPSIS 的评价结果
Fig. 5 Evaluation results based on TOPSIS

农田质量进行初步等级划分, 并将大安市 2014 年耕地质量等级数据中的国家利用等指数, 通过自然断点法对应分级, 空间叠加分析得到评价一致的耕地图斑, 相应的初步等级划分结果作为该农田的综合质量真值, 从中随机抽取如表 2 所示的 1 096 个样本。

3.3 基于 BP 神经网络的高标准农田最终识别

3.3.1 构建 BP 神经网络

利用 1 096 个真值样本, 通过构建的 BP 神经网络隐性调整各特性的权值大小。其中 80% 的样本用于训练、20% 的样本用于测试, 并采用交叉验证法求取实验均值作为模型参数, 最终各等级的识别精度如图 6 所示, 预测变量中 I5、I2、I4、I3、I1 的权重

表 2 样本选取情况
Tab.2 Sample selection

农田综合质量等级	抽取样本数/个
1	194
2	506
3	190
4	16
总计	1 096

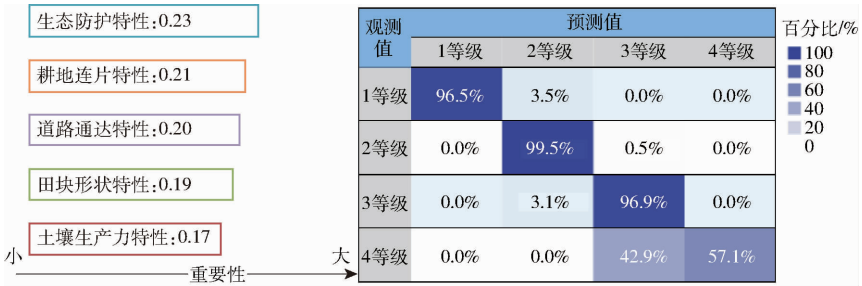


图 6 BP 神经网络运行结果
Fig. 6 BP neural networks results

3.3.2 基于农田质量综合评价的高标准农田识别

将所有评价单元的 BP 网络输出作为农田综合质量的最终评价结果。如图 7 所示,研究区农田的平均综合质量水平较高,1、2 等级农田占到耕地总面积的一半以上,呈现出东北高于西南的特点,与初步评价结果具有空间一致性。

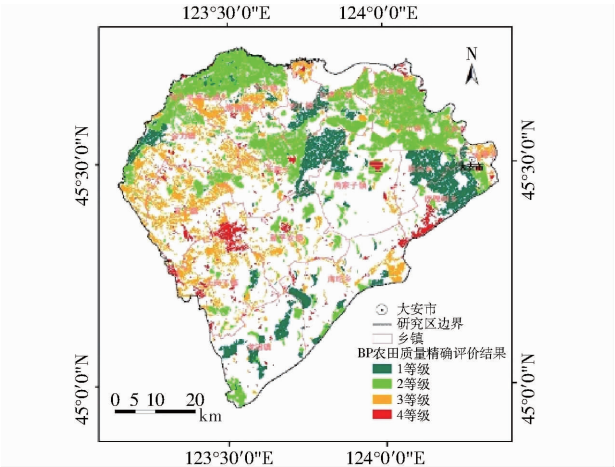


图 7 基于 BP 神经网络的精确综合评价结果
Fig. 7 Accurate comprehensive evaluation results based on BP neural network

将 1、2 等级农田作为高标准农田的识别结果,如图 8 所示。研究区高标准农田面积大,重点分布在耕地集中连片、道路通达且防护林分布密集,具有农业现代化生产优势条件的区域,在南部也有小规模分布;1 等级高标准农田主要分布在东部、中东和南部,应以合理利用为主,辅以可持续监管;2 等级高标准农田主要连片分布在西北部边缘、中西部和东北部,应当管护与利用并重,同时加强薄弱环节的建设。

依次为:0.23、0.21、0.20、0.19、0.17。
综合质量为 1、2、3 等级的农田具有较高的分类准确性,精度均达到 96% 以上;但对于 4 等级农田分类精度不高,原因是研究区农田的平均综合质量较好,较差的 4 等级农田样本数极少,造成了错分现象,但对于本文识别 1、2 等级高标准农田的目标没影响。

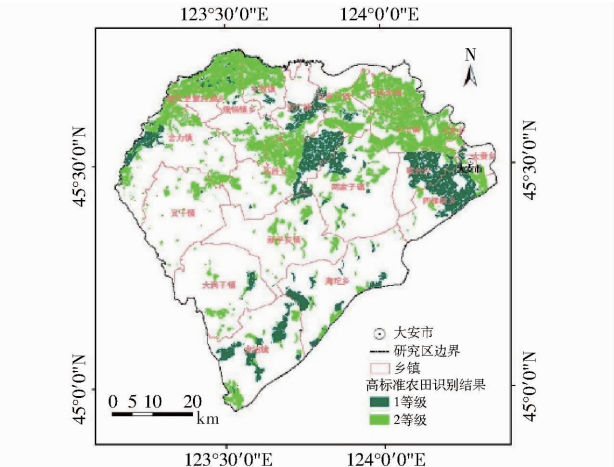


图 8 高标准农田识别结果
Fig. 8 Extraction results of well-facilitated farmland

3.3.3 验证与分析

为了验证识别结果的科学性,将当地已备案的高标准农田区域即大安市 2013—2015 年高标准农田项目区地块边界与之进行套合,同时结合野外调研的实际情况进行分析。如图 9 所示,已备案的高标准农田区域得到了有效识别,主要分布在月亮泡镇、太山镇、联合乡、四棵镇乡、红岗子镇、烧锅镇乡和舍力镇;但在识别结果中,有大片的区域虽未备案为高标准农田,也被识别了出来。

除了生产、生态条件原本较为优越,耕地资源丰富之外,这部分农田被识别主要有两种情况:分布在已备案的高标准农田附近,原因是其周围存在高标准农田整治项目,促进了自身农田综合质量的提升,如舍力镇和月亮泡镇等区域;分布在其他土地整治项目区及周边,原因是通过土地整治提高了相应区域的农田质量,使其具有潜力成为高标准农

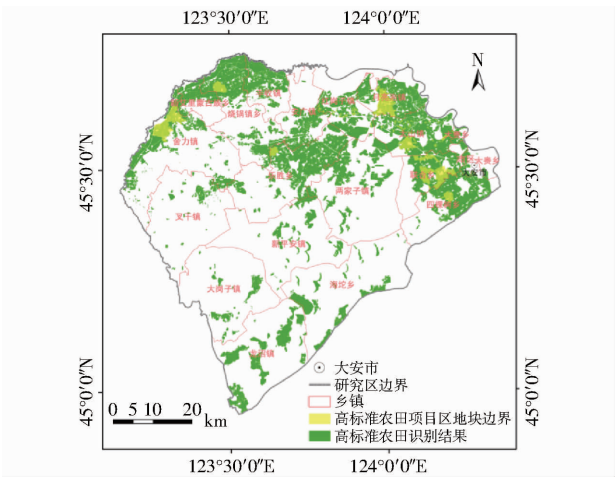


图 9 识别结果检验

Fig. 9 Test of extraction results

田,如叉干镇和龙沼镇等区域。

4 结论

(1)从耕地质量、生态和适应农业现代化生产

需求的角度理解高标准农田,围绕耕地本底条件、空间形态、建设水平、生态防护等方面构建农田综合质量的多特性表征及高标准农田识别的技术方法体系,并利用耕地多期的 NDVI 间接表征耕地土壤生产力特性。

(2)在利用 TOPSIS 实现农田综合质量初步评价的基础上,进一步采用 BP 神经网络识别高标准农田;农田综合质量的评价精度达到 96% 以上,当地高标准农田主要分布在具有农业现代化生产优势的东北部、中北部、西北部边缘和部分南部区域。

(3)通过空间分析和实地调研,验证识别结果的科学性;研究区已备案的高标准农田得到有效识别,可为高标准农田建设后评价和管护提供支撑;研究区未备案的、有潜力的农田得到有效提取,可为高标准农田建设前选址提供依据。

参 考 文 献

1 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 高标准农田建设通则:GB/T 30600—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.

2 中华人民共和国中央人民政府. 2008 年国务院政府工作报告[EB/OL][2008-03-05]. <http://www.gov.cn>.

3 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[EB/OL][2011-03-14]. <http://www.gov.cn>.

4 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 全国高标准农田建设总体规划[EB/OL][2013-12-09]. <http://camn.agri.gov.cn>.

5 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[EB/OL][2016-03-17]. <http://www.gov.cn>.

6 中发[2017]4 号. 中共中央国务院关于加强耕地保护和改进占补平衡的意见[EB/OL][2017-01-09]. <http://www.chinadnid.com>.

7 ANDERSEN E,BALDOCK D,BROUWER F M, et al. Developing a high nature value farming area indicator: final report[R]. FAO,2004.

8 ROSA D L,PRIVITERA R. Characterization of non-urbanized areas for land-use planning of agricultural and green infrastructure in urban contexts[J]. Landscape & Urban Planning,2013,109(1):94-106.

9 PLIENINGER T,BIELING C. Resilience-based perspectives to guiding high nature value farmland through socio-economic change[J]. Ecology & Society,2013,18(4):20.

10 DOXA A,PARACCHINI M L,POINTEREAU P, et al. Preventing biotic homogenization of farmland bird communities: the role of high nature value farmland[J]. Agriculture Ecosystems & Environment,2012,148(7):83-88.

11 POINTEREAU P,PARACCHINI M L,TERRES J M, et al. Identification of high nature value farmland in france through statistical information and farm practice surveys[J]. Dissertations & Theses-Gradworks,2007:22786.

12 HAZEU G,MILENOV P,PEDROLI B, et al. High nature value farmland identification from satellite imagery, a comparison of two methodological approaches[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation,2014,30:98-112.

13 杨建宇,杜贞容,杜振博,等. 基于耕地质量评价和局部空间自相关的高标准农田划定[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(6):109-115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170614&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.014.

YANG Jianyu,DU Zhenrong,DU Zhenbo, et al. Well facilitated capital farmland assignment based on land quality evaluation and LISA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(6):109-115. (in Chinese)

14 杨建宇,赵龙,徐凡,等. 基于耕地连片度的高标准基本农田建设划区[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(4):142-148. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170418&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.018.

YANG Jianyu,ZHAO Long,XU Fan, et al. Zoning of high standard prime farmland construction based on arable lands connectivity[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(4):142-148. (in Chinese)

- 15 赵冬玲,何珊珊,林尚纬,等.基于TOPSIS和热点分析的高标准农田建设优先区选择[J/OL].农业机械学报,2017,48(7):153-158. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170719&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.019.
ZHAO Dongling, HE Shanshan, LIN Shangwei, et al. Layout of high-standard farmland construction priority area based on TOPSIS and hotspot analysis [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 153-158. (in Chinese)
- 16 薛剑,韩娟,张凤荣,等.高标准基本农田建设评价模型的构建及建设时序的确定[J].农业工程学报,2014,30(5):193-203.
XUE Jian, HAN Juan, ZHANG Fengrong, et al. Development of evaluation model and determination of its construction sequence for well-facilitied capital farmland [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 193-203. (in Chinese)
- 17 杨伟,谢德体,廖和平,等.基于高标准基本农田建设模式的农用地整治潜力分析[J].农业工程学报,2013,29(7):219-229.
YANG Wei, XIE Deti, LIAO Heping, et al. Analysis of consolidation potential of agricultural land based on construction mode of high-standard basic farmland [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(7): 219-229. (in Chinese)
- 18 唐秀美,潘瑜春,程晋南,等.高标准基本农田建设对耕地生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2015,35(24):8009-8015.
TANG Xiumei, PAN Yuchun, CHENG Jinnan, et al. Impact of high-standard prime farmland construction on ecosystem service value in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): 8009-8015. (in Chinese)
- 19 刘建生,郎文聚,赵小敏,等.基于差距度与投资度的高标准基本农田建设研究与应用[J].中国人口资源与环境,2014,24(3):47-53.
LIU Jiansheng, YUN Wenju, ZHAO Xiaomin, et al. Theory and application of well-facilitied capital farmland construction: an analysis based on the gap degree and investment intensity [J]. China Population Resources and Environment, 2014, 24(3): 47-53. (in Chinese)
- 20 刘佳佳.基于遥感的高标准农田快速识别研究[D].北京:中国农业大学,2017.
LIU Jiajia. Research on quick identification of high standard farmland based on remote sensing [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 21 王晖,陈丽,陈昱,等.多指标综合评价方法及权重系数的选择[J].广东药学院学报,2007,23(5):583-589.
- 22 刘继斌,曲成毅,王瑞花.基于属性AHM的Topsis综合评价及其应用[J].现代预防医学,2006,33(10):1862-1863.
- 23 杨建宇,徐凡,刘光成,等.基于TOPSIS算法的永久基本农田划定方法[J/OL].农业机械学报,2017,48(8):133-139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170814&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.014.
YANG Jianyu, XU Fan, LIU Guangcheng, et al. Demarcation method of permanent prime cultivated land based on TOPSIS [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 133-139. (in Chinese)
- 24 张宏,马岩,李勇,等.基于遗传BP神经网络的核桃破裂功预测模型[J].农业工程学报,2014,30(18):78-84.
ZHANG Hong, MA Yan, LI Yong, et al. Rupture energy prediction model for walnut shell breaking based on genetic BP neural network [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 78-84. (in Chinese)
- 25 吉林省农委发展计划处.突出抓好“五个结合、五个优先”扎实推进吉林省高标准农田整合建设[J].吉林农业月刊,2017(3):46-47.
- 26 白燕英.基于多时相遥感影像的盐渍化农田表层土壤水分反演研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.
BAI Yanying. Study on surface soil moisture inversion of salinization of farmland based on multi-temporal remote sensing images [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 27 吴嵩.典型黑土区土壤有机质含量反演研究[D].长春:吉林大学,2016.
WU Song. Research on soil organic matter content inversion in typical black soil area [D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- 28 王琼.基于遥感技术的棉田土壤质量评价研究[D].石河子:石河子大学,2013.
WANG Qiong. The assessment of soil quality on cotton field based on remote sensing technology [D]. Shihezi: Shihezi University, 2013. (in Chinese)
- 29 郭姿含,杨永侠.基于GIS的耕地连片性分析方法与系统实现[J].地理与地理信息科学,2010,26(3):59-62.
GUO Zihan, YANG Yongxia. GIS-based farmland connectivity analysis methods research and system implementation [J]. Geography and Geo-information Science, 2010, 26(3): 59-62. (in Chinese)
- 30 孟召平,田永东,雷旸.煤层含气量预测的BP神经网络模型与应用[J].中国矿业大学学报,2008,37(4):456-461.
MENG Zhaoping, TIAN Yongdong, LEI Yang. Prediction models of coal bed gas content based on BP neural networks and its applications [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(4): 456-461. (in Chinese)
- 31 唐万梅.BP神经网络网络结构优化问题的研究[J].系统工程理论与实践,2005,25(10):95-100.
TANG Wanmei. The study of the optimal structure of BP neural network [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2005, 25(10): 95-100. (in Chinese)