

# 松嫩高平原黑土区耕地资源安全的驱动机制分析

宋戈<sup>1,2</sup>, 王越<sup>1</sup>, 雷国平<sup>2</sup>, 王盼盼<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北大学土地管理研究所, 沈阳 110819)

**摘要:** 为了深入剖析影响区域耕地资源安全驱动因子的作用机理, 研究区域耕地资源安全驱动机制。该文以松嫩高平原黑土区巴彦县为例, 运用 Matlab 编程, 采用遗传算法对神经网络模型进行改进, 结合相关分析法, 识别影响耕地资源安全的关键性因子及其与之相关的因子, 应用多元回归分析和完全二次回归分析方法, 阐明影响因子间的协同作用关系, 进而揭示其对耕地资源安全影响的作用机理和驱动机制。结果表明: 1) 影响研究区耕地资源安全的协同作用关系中, 不同影响因子间的协同作用正向和负向交互进行, 且不同因子间协同作用大小也不尽相同; 2) 影响研究区耕地资源安全的自然因素、社会经济因素、生态因素中, 自然因素对研究区耕地资源安全起促进作用, 社会经济因素和生态因素起抑制作用, 且社会经济因素对研究区耕地资源安全的抑制作用最强, 生态因素的抑制作用次之; 3) 在主要影响因子中, 土壤质地对耕地资源安全的促进作用最强, pH 值次之, 黑土层厚度的促进作用最弱, 而高程对耕地资源安全抑制作用最强, 水土流失量仅次之, 氟的抑制作用最弱。该研究成果可为黑土区耕地资源保护及耕地资源的合理利用提供参考。

**关键词:** 土地利用, 模型, 遗传算法, 松嫩高平原黑土区, 耕地资源安全, 协同作用, GA-BP 因子降维模型

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.21.030

中图分类号: F301.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-21-0241-08

宋戈, 王越, 雷国平, 等. 松嫩高平原黑土区耕地资源安全的驱动机制分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 241—248.

Song Ge, Wang Yue, Lei Guoping, et al. Analysis of driving mechanism of cultivated land resources security of black soil region in Songnen high plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 241—248. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

耕地资源是最重要的农业生产资料, 也是最基本的国家战略资源之一<sup>[1]</sup>, 耕地资源安全关乎国家粮食安全和社会稳定<sup>[2]</sup>, 随着经济发展和新型城镇化推进, 耕地资源状况不容乐观, 因此, 耕地资源安全成为政府和众多学者关注的焦点<sup>[3-11]</sup>。目前, 国外学者主要从土壤养分和土壤侵蚀的角度研究耕地资源利用问题<sup>[12-16]</sup>, 国内已有的相关研究主要集中在耕地安全评价、耕地安全预警和耕地安全保障等<sup>[1,17-20]</sup>, 也有学者从耕地的数量、质量和生态等方面进行研究<sup>[21-23]</sup>, 或从耕地的自然安全、经济安全、社会安全和生态安全方面进行探讨<sup>[24-25]</sup>, 研究多限于对耕地资源安全成因的定性分析, 定量分析则多从影响耕地资源安全的气候、水文、土壤、生物等单一要素进行研究<sup>[26-28]</sup>, 但对多因素综合作用的研究尚少见报导, 影响因子之间协同作用及其

对耕地资源安全的影响机制的研究则更少。

本文以松嫩高平原黑土区—巴彦县为研究区, 从影响耕地资源安全的自然、社会经济和生态三方面, 采用遗传算法(GA 模型)对神经网络模型(BP 模型)进行修正和改进, 结合相关分析法, 识别影响耕地资源安全关键性因子及其与之相关的因子。采用多元回归分析和完全二次回归分析法, 明确关键性影响因子及其与之相关的因子间的协同作用关系, 进而揭示耕地资源安全关键性影响因子的作用机理和驱动机制, 以期合理利用耕地资源、提高耕地的综合生产力提供参考。

## 1 研究区概况

巴彦县位于 126°45'53"~127°42'16"N, 45°54'28"~46°40'18"E, 地处黑龙江省中部偏南、松嫩高平原黑土区。巴彦县辖 10 镇、8 乡、116 个行政村, 2009 年总人口为 70.65 万人, 其中农业人口 59.01 万人。县域总土地面积 31.39 万  $\text{hm}^2$ , 其中耕地面积为 22.71 万  $\text{hm}^2$ , 占 72.35%, 粮食总产量达  $2.08 \times 10^6 \text{ t}$ , 是黑龙江省粮食主产区和国家重要粮食生产基地。巴彦县地势东高西低、北岗南平、中部多丘陵、漫岗区, 属于中温带大陆性季风气候,

收稿日期: 2013-03-31 修订日期: 2013-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(41071346); 教育部博士学科点基金博导类(20112325110007)

作者简介: 宋戈(1969—), 女, 黑龙江庆安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为土地利用。哈尔滨 东北农业大学资源与环境学院, 150030。Email: songgelaoshi@163.com

夏季温暖多雨, 冬季寒冷干燥, 雨热同季, 土壤类型多样, 其中以黑土分布最广, 占土地总面积的 53.5%, 是典型波状缓坡漫岗平原。多年来人类经济社会活动的干扰对自然生态环境造成了一定的破坏, 严重影响着巴彦县耕地资源安全。

## 2 数据来源与处理

采用 GPS 对研究区 2009 年实地样点进行定位, 布设耕地采样点共 661 个, 点间距为 2 000 m, 每个样点均在直径 100 m 圆范围内选择 3~5 个点, 记录样点实际经纬度坐标、灌溉条件及农田设施等情况, 通过观察、记载定位点的土壤剖面情况, 按照四分法混合采集样品, 记录样点的土壤类型、土壤质地、黑土层厚度和地貌类型的情况, 对采集的土壤样品进行理化性质分析, 得到土壤全氮、速效磷、速效钾、交换性钙、有机质、土壤重金属污染元素(铬、铅、铜、锌、镉、砷、镍、汞)、氟、氯的含量及 pH 值等数据(数据来源于作者课题“黑龙江省松嫩平原南部地球化学质量评价”的成果); 解译 2009 年研究区遥感影像, 获取土地利用数据; 以研究区 1:5 万数字化地形图数据源获取高程数据, 在 ArcGIS 平台下生成 DEM 获取坡度数据; 运用 ArcGIS 手段将坡度数据分为 3 个等级, 确定排涝能力; 以 2009 年 SPOT5 遥感影像为数据源, 运用 ENVI4.7 软件计算研究区的归一化植被指数 NDVI、差值植被指数 DVI 和比值植被指数 RVI; 运用 ArcGIS9.3 软件, 将土地利用现状图由矢量图斑转换为栅格图斑, 计算每个栅格到水域的成本距离与坡度图层叠加来确定灌溉指数, 到道路的成本距离来确定交通便捷度, 到居民点的成本距离来确定耕作便利度; 运用水土流失方程<sup>[29]</sup>计算得出研究区水土流失量; 社会经济数据来源于巴彦县土壤志、巴彦年鉴(2010)和巴彦县志(1986-2005)。运用 ArcGIS9.3 软件将各类数据匹配到 661 个耕地采样点上。

## 3 研究方法

### 3.1 耕地资源安全的内涵及其指标体系的构建

耕地资源安全是指一定区域在一定时期内能够实现耕地资源的持续有效供给, 满足人口对耕地需求的状态。本文从因子作用角度出发, 将耕地资源安全界定为在各影响因子的协同作用和影响下, 仍然能保障耕地资源的持续有效供给、社会稳定和生态平衡<sup>[25]</sup>, 并满足区域人口对耕地需求的状态。本文从自然因素、社会经济因素、生态因素三方面, 以因子协同作用对耕地利用安全影响分析为切入点, 突破传统研究偏重于耕地数量安全、质量安全

和生态安全等, 结合研究区耕地资源的现状, 遵循科学性、可操作性和动态性等原则, 筛选影响研究区耕地资源安全的 31 个因子构建指标体系(表 1)。

表 1 研究区耕地资源安全指标体系

Table 1 Index of cultivated land resources security in study area

目标层 Target layer	要素层 Feature layers	影响因子 Impact factors
耕地资源安全	自然因素	归一化植被指数 NDVI <sub>1</sub> 、差值植被指数 DVIX <sub>2</sub> 、比值植被指数 RVIX <sub>3</sub> 、地貌类型 X <sub>4</sub> 、高程 X <sub>5</sub> 、坡度 X <sub>6</sub> 、土壤质地 X <sub>7</sub> 、黑土层厚度 X <sub>8</sub> 、土壤类型 X <sub>9</sub>
	社会经济因素	人口密度 X <sub>10</sub> 、灌溉指数 X <sub>11</sub> 、排涝能力 X <sub>12</sub> 、交通便捷度 X <sub>13</sub> 、耕作便利度 X <sub>14</sub>
	生态因素	全氮 X <sub>15</sub> 、速效磷 X <sub>16</sub> 、速效钾 X <sub>17</sub> 、钙 X <sub>18</sub> 、有机质 X <sub>19</sub> 、pH 值 X <sub>20</sub> 、水土流失量 X <sub>21</sub> 、铬 X <sub>22</sub> 、铅 X <sub>23</sub> 、铜 X <sub>24</sub> 、锌 X <sub>25</sub> 、镉 X <sub>26</sub> 、砷 X <sub>27</sub> 、镍 X <sub>28</sub> 、汞 X <sub>29</sub> 、氟 X <sub>30</sub> 、氯 X <sub>31</sub>

### 3.2 关键性影响因子的识别方法

本文运用 Matlab7.13 软件进行编程, 采用遗传算法(GA 模型)对神经网络模型(BP 模型)进行修正和改进, 这里称之为 GA-BP 因子降维模型。该方法是本文在传统 BP 模型的基础上进行了 2 次优化, 第 1 次是对 GA 模型中的适应度函数和编解码函数进行优化和改进, 第 2 次是利用改进后的 GA 模型对 BP 模型的权值和阈值进行优化。通过安装并调用遗传算法工具箱(GAOT)<sup>[30]</sup>, 建立 GA-BP 因子降维模型(图 1)。

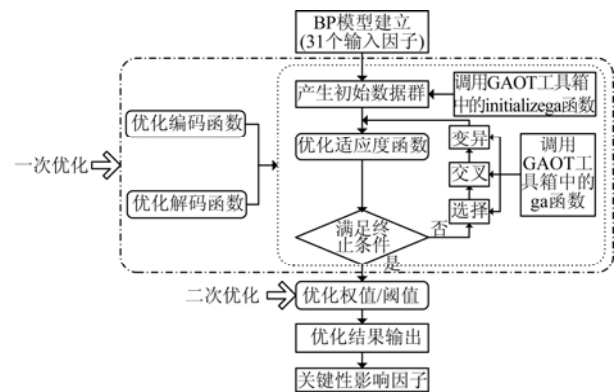


图 1 模型改进及其关键性影响因子识别过程

Fig.1 Model improvement and identification process of prime factors

GA-BP 因子降维模型, 选择因子是通过神经网络的识别正确率来确定的, 将随机生成只有{1,2}2 值的研究区采样点 661 个元素的向量作为因子识别的结果变量, 遗传算法在这些因子中随机的选择因子, 直到识别正确率最高, 在编解码子函数中设定最优解 X 包含{0,1}2 值变量, 值为 1 表明选取该因子参与建模, 否则不选, 选取测试集数据均方误差的倒数作为遗传算法的适应度函数, 经过不断迭代进化, 最终筛选出最具代表性的输入因子参与建

模。经过本文的改进, GA-BP 因子降维模型与传统的 BP 模型或其它的统计分析模型相比, 可以提取出具体的影响因子来反映耕地利用系统安全的信息, 避免了传统的 BP 模型或其它的统计分析模型只能提取出虚拟主成分的缺陷。

### 3.3 影响因子间协同作用关系模型构建

运用多元回归分析和完全二次回归分析对耕地资源安全关键性影响因子及其与之相关因子间的协同作用关系进行分析。结合识别后的影响因子, 利用 `corrcoef` 函数极差标准化数据得到关键性影响因子及其与之相关因子间的相关系数矩阵, 明确其相关度, 将相关性大的因子划分为一组, 对每组关键性影响因子及其与之相关因子进行多元回归分析并检验; 1) 若检验通过, 且无不显著因子, 则确定关键性影响因子及其与之相关因子的协同关系; 2) 若检验未通过, 则进行完全二次回归分析, 若因子  $X_n$  具有一次项, 则运用其系数的大小及正负分别体现该因子的作用强度和方向, 其二次项的系数则作为该因子作用大小和方向的验证; 若因子  $X_m$  ( $m \neq n$ ) 无一次项, 则运用二次项因子  $X_n \times X_m$  系数作为分子, 因子  $X_n$  的一次项系数作为分母, 二者相除得到因子  $X_m$  的作用强度及方向; 若因子  $X_m$  ( $m = n$ ) 无一次项, 则运用二次项因子  $X_m^2$  的平方系数作为因子  $X_m$  的作用强度及方向, 得出理论方程再解释关键性影响因子及其与之相关因子的协同作用关系。

### 3.4 影响耕地资源安全的驱动机制模型构建

1) 耕地资源安全度的计算公式为

$$Y = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot X_i \quad (1)$$

式中,  $Y$  为耕地资源安全度;  $\omega$  为影响因子权重 (运用层次分析法和熵权法相结合确定权重);  $X_i$  为影响因子,  $n$  为采样点个数, 且  $n$  不大于 661;

2) 运用 `matlab` 软件, 调用 `linkage` 函数, 采用类平均法创建系统聚类树, 在关键性影响因子及其与之相关因子协同作用关系的基础上, 对关键性影响因子进行  $R$  型聚类分析, 其中, 关键性影响因子及其与之相关因子是由其协同关系方程计算求得;

3) 对聚类后的关键性影响因子与耕地资源安全度分别进行多元回归分析并检验, 若检验通过且无不显著因子, 得出理论方程解释关键性影响因子对耕地资源安全的作用机制; 若检验未通过, 则进行完全二次回归分析, 得出理论方程再解释关键性影响因子对耕地资源安全的作用机理和作用机制, 进而对各要素层关键性影响因子的作用强度求和, 得到自然因素、社会经济因素、生态因素 3 个要素层对研究区耕地资源安全的驱动机制。

## 4 结果与分析

### 4.1 影响因子识别结果

运用 GA-BP 因子降维模型, 通过设定 3 种不同参数, 得到研究区耕地资源安全识别正确率, 其中每种参数的安全正确率依次为 97.6351%、89.3369%、82.7324%, 每种参数的不安全正确率依次为 91.7365%、93.5691%、97.6523%, 3 次的建模时间分别为: 4.1787、8.7546、11.5417 s, 平均适应度函数逐步逼近最佳适应度函数, 建模结果可靠。优化识别后的影响因子有 14 个, 分别是归一化植被指数  $NDVIX_1$ 、地貌类型  $X_4$ 、高程  $X_5$ 、土壤质地  $X_7$ 、黑土层厚度  $X_8$ 、土壤类型  $X_9$ 、人口密度  $X_{10}$ 、灌溉指数  $X_{11}$ 、全氮  $X_{15}$ 、pH 值  $X_{20}$ 、水土流失量  $X_{21}$ 、铬  $X_{22}$ 、铅  $X_{23}$ 、氟  $X_{30}$ 。

结合相关系数矩阵, 通过对优化识别后的 14 个影响因子及其与之相关影响因子间的相关关系分析, 耕地资源安全中地貌类型  $X_4$ 、土壤质地  $X_7$ 、黑土层厚度  $X_8$ 、土壤类型  $X_9$ 、人口密度  $X_{10}$ 、灌溉指数  $X_{11}$ 、铅  $X_{23}$ 、氟  $X_{30}$  等 8 个影响因子对研究区耕地资源安全的协同作用不显著, 不参与协同作用; 耕地资源安全中归一化植被指数  $NDVIX_1$ 、高程  $X_5$ 、全氮  $X_{15}$ 、pH 值  $X_{20}$ 、水土流失量  $X_{21}$ 、铬  $X_{22}$  等 6 个影响因子对耕地资源安全的协同作用显著是关键性影响因子, 与 6 个关键性影响因子相关性大的因子参与协同作用 (表 2)。

表 2 研究区耕地资源安全关键性影响因子与协同因子分组  
Table 2 Grouping prime influencing and synergistic factors of cultivated land resources security in study area

关键性影响因子 Prime factors	协同因子 Synergistic factors
归一化植被指数 $NDVI$ $X_1$	差值植被指数 $DVIX_2$ 、 比值植被指数 $RVIX_3$
高程 $X_5$	坡度 $X_6$ 、排涝能力 $X_{12}$ 、交通便捷度 $X_{13}$
全氮 $X_{15}$	耕作便利度 $X_{14}$ 、速效磷 $X_{16}$ 、速效钾 $X_{17}$ 、 有机质 $X_{19}$ 、铜 $X_{24}$
pH 值 $X_{20}$	钙 $X_{18}$ 、氯 $X_{31}$
水土流失量 $X_{21}$	锌 $X_{25}$ 、砷 $X_{27}$ 、汞 $X_{29}$
铬 $X_{22}$	镉 $X_{26}$ 、镍 $X_{28}$

### 4.2 影响因子间协同作用关系分析

由多元回归和完全二次回归分析可知, 6 组影响因子协同作用关系的回归方程如下:

1) 归一化植被指数  $NDVIX_1$ 、差值植被指数  $DVIX_2$ 、比值植被指数  $RVIX_3$  间协同作用关系为

$$X_1 = 0.0004X_2 + 0.0614X_3 + 0.3034 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.7981$$

由式 (2) 可知, 3 者对耕地资源安全有同向的交互作用关系, 且归一化植被指数  $NDVI X_1$  与差值植被指数  $DVIX_2$  作用强度为 0.0004、归一化植被指

数 NDVI  $X_1$  与比值植被指数 RVIX<sub>3</sub> 作用强度为 0.0614。

2) 高程  $X_5$ 、坡度  $X_6$ 、排涝能力  $X_{12}$ 、交通便捷度  $X_{13}$  间协同作用关系为

$$X_5 = 0.3637X_6 - 0.2205X_{12} + 0.2681X_{13} - 0.0342 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.8256$$

由式 (3) 可知, 高程  $X_5$  与坡度  $X_6$ 、交通便捷度  $X_{13}$  对耕地资源安全有同向的交互作用关系, 且高程  $X_5$  与坡度  $X_6$  作用强度为 0.3637, 与交通便捷度  $X_{13}$  作用强度为 0.2681; 而高程  $X_5$  与排涝能力  $X_{12}$  对耕地资源安全有相反的交互作用关系, 且高程  $X_5$  与排涝能力  $X_{12}$  作用强度为 0.2205。

3) 全氮  $X_{15}$ 、耕作便利度  $X_{14}$ 、速效磷  $X_{16}$ 、速效钾  $X_{17}$ 、有机质  $X_{19}$ 、铜  $X_{24}$  之间的多元回归分析未通过检验, 需进行完全二次回归分析, 其协同作用关系为

$$X_{15} = 0.0390X_{14} + 0.1541X_{16} + 0.8435X_{19} - 0.0637X_{24} + 0.1249X_{17} \cdot X_{19} + 0.0256X_{17}^2 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.6791$$

由式 (4) 可知, 全氮  $X_{15}$  与耕作便利度  $X_{14}$ 、速效磷  $X_{16}$ 、速效钾  $X_{17}$ 、有机质  $X_{19}$  对耕地资源安全有同向的交互作用关系, 且全氮  $X_{15}$  与耕作便利度  $X_{14}$  作用强度为 0.0390, 全氮  $X_{15}$  与速效磷  $X_{16}$  作用强度为 0.1541, 全氮  $X_{15}$  与速效钾  $X_{17}$  作用强度为 0.1481, 全氮  $X_{15}$  与有机质  $X_{19}$  作用强度为 0.8435; 而全氮  $X_{15}$  与铜  $X_{24}$  对耕地资源安全有反向的交互作用关系, 且全氮  $X_{15}$  与铜  $X_{24}$  作用强度为 0.0637。

4) pH 值  $X_{20}$ 、钙  $X_{18}$ 、氯  $X_{31}$  间协同作用关系为

$$X_{20} = 0.4675X_{18} + 0.0995X_{31} + 0.001 \quad (5)$$

$$R^2 = 0.8442$$

由式 (5) 可知, pH 值  $X_{20}$  与钙  $X_{18}$ 、氯  $X_{31}$  对耕地资源安全有同向的交互作用关系, 且 pH 值  $X_{20}$  与钙  $X_{18}$  作用强度为 0.4675, pH 值  $X_{20}$  与氯  $X_{31}$  作用强度为 0.0995。

5) 水土流失量  $X_{21}$ 、锌  $X_{25}$ 、砷  $X_{27}$ 、汞  $X_{29}$  之间的多元回归分析未通过检验, 需进行完全二次回归分析, 其协同作用关系为

$$X_{21} = 0.2062X_{25} + 0.0882X_{27} + 0.0271X_{29} + 0.1699X_{25}^2 - 0.1237 \quad (6)$$

$$R^2 = 0.5630$$

由式 (6) 可知, 水土流失量  $X_{21}$  与锌  $X_{25}$ 、砷  $X_{27}$ 、汞  $X_{29}$  对耕地资源安全有同向交互作用关系, 且水土流失量  $X_{21}$  与锌  $X_{25}$  作用强度为 0.2062, 水土流失量  $X_{21}$  与砷  $X_{27}$  作用强度为 0.0882, 水土流失量  $X_{21}$  与汞  $X_{29}$  作用强度为 0.0271。

6) 铬  $X_{22}$ 、镉  $X_{26}$ 、镍  $X_{28}$  之间的多元回归分析

未通过检验, 需进行完全二次回归分析。其协同作用关系为

$$X_{22} = 0.2896X_{26} + 0.6764X_{28} + 0.0209X_{26}^2 - 0.0191 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.6912$$

由式 (7) 可知, 铬  $X_{22}$  与镉  $X_{26}$ 、镍  $X_{28}$  对耕地资源安全有同向交互作用关系, 且铬  $X_{22}$  与镉  $X_{26}$  作用强度为 0.2896, 铬  $X_{22}$  与镍  $X_{28}$  作用强度为 0.6764。

#### 4.3 研究区耕地资源安全的驱动机制

由  $R$  型聚类分析可知 (图 2), 在因子间协同作用关系的基础上, 将关键性的影响因子及未参与协同作用的影响因子进行聚类, 第一大类包含的因子: 地貌类型  $X_4$ 、高程  $X_5$ 、土壤质地  $X_7$ 、灌溉指数  $X_{11}$ 、全氮  $X_{15}$ 、pH 值  $X_{20}$ ; 第二大类包含的因子: 归一化植被指数 NDVI  $X_1$ 、黑土层厚度  $X_8$ 、土壤类型  $X_9$ 、人口密度  $X_{10}$ ; 第三大类包含的因子: 水土流失量  $X_{21}$ 、铬  $X_{22}$ 、铅  $X_{23}$ 、氟  $X_{30}$ 。

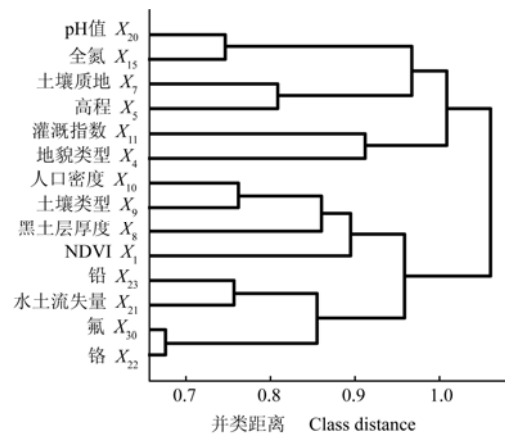


图 2 聚类分析结果

Fig.2 Cluster analysis results

应用多元回归分析和完全二次回归分析, 对耕地资源安全度与三大类因子分别进行回归分析, 得到回归方程如下:

1) 第一大类因子经验回归方程为

$$Y_1 = 0.1672X_4 - 0.3721X_5 - 0.3142X_{11} + 0.2563X_{20} + 0.3197X_7^2 + 0.0331X_{15}^2 + 0.7429 \quad (8)$$

$$R^2 = 0.6742$$

式中,  $Y_1$  表示第一大类因子对耕地资源安全影响程度的回归结果。其中, 高程  $X_5$  和灌溉指数  $X_{11}$  对耕地资源安全有抑制作用, 且其作用强度大小分别为 0.3721 和 0.3142, 而地貌类型  $X_4$ 、土壤质地  $X_7$ 、全氮  $X_{15}$  和 pH 值  $X_{20}$  对耕地资源安全有促进作用, 且其作用强度大小分别为 0.1672、0.5654、0.1819 和 0.2563。

2) 第二大类因子经验回归方程为

$$Y_2 = -0.1192X_1 + 0.0662X_8 + 0.1219X_9 - 0.2034X_{10} - 0.0227X_9 \cdot X_{10} + 0.1732 \quad (9)$$

$$R^2 = 0.5726$$

式中,  $Y_2$  表示第二大类因子对耕地资源安全影响程度的回归结果。其中, 归一化植被指数 NDVI  $X_1$  和人口密度  $X_{10}$  对耕地资源安全有抑制作用, 且其作用强度大小分别为 0.1192 和 0.2034, 而黑土层厚度  $X_8$  和土壤类型  $X_9$  对耕地资源安全有促进作用, 且其作用强度大小分别为 0.0662 和 0.1219。

3) 第三大类因子经验回归方程为

$$Y_3 = -0.3580X_{21} - 0.1519X_{22} - 0.1557X_{23} - 0.0131X_{30} + 0.0347X_{21} \cdot X_{22} - 0.0141 \quad (10)$$

$$R^2 = 0.5211$$

式中,  $Y_3$  表示第三大类因子对耕地资源安全影响程度的回归结果。其中, 水土流失量  $X_{21}$ 、铬  $X_{22}$ 、铅  $X_{23}$ 、氟  $X_{30}$  对耕地资源安全有抑制作用, 且其作用强度大小分别为 0.3580、0.1519、0.1557 和 0.0131。

通过计算和分析 (表 3), 研究区自然因素、社会经济因素、生态因素中各影响因子交互协同作用对耕地资源安全产生重要影响。自然因素对耕地资源安全起促进作用, 其强度为 0.4294, 其中土壤质地  $X_7$ 、地貌类型  $X_4$ 、土壤类型  $X_9$ 、黑土层厚度  $X_8$  对耕地资源安全起促进作用, 且影响强度依次减弱, 而高程  $X_5$ 、归一化植被指数 NDVI  $X_1$  对耕地资源安全则起抑制作用, 且高程  $X_5$  抑制作用较大, 归一化植被指数 NDVI  $X_1$  次之。社会经济因素对研究区耕地资源安全起到明显的抑制作用, 其强度为 0.5176, 其中抑制强度大小为灌溉指数  $X_{11}$  最强, 人口密度  $X_{10}$  次之。生态因素对耕地资源安全起抑制作用, 其强度为 0.2405, 其中水土流失量  $X_{21}$ 、铅  $X_{23}$ 、铬  $X_{22}$  和氟  $X_{30}$  起抑制作用, 其影响强度大小依次减弱, 而 pH 值  $X_{20}$  的促进作用最大, 全氮  $X_{15}$  次之; 影响研究区耕地资源安全的主要因子对其影响的作用强度大小和方向均不同。土壤质地  $X_7$ 、pH 值  $X_{20}$ 、全氮  $X_{15}$ 、地貌类型  $X_4$ 、土壤类型  $X_9$ 、黑土层厚度  $X_8$  对耕地资源安全的促进作用依次减弱, 而高程  $X_5$ 、水土流失量  $X_{21}$ 、灌溉指数  $X_{11}$ 、人口密度  $X_{10}$ 、铅  $X_{23}$ 、铬  $X_{22}$  对耕地资源安全的抑制作用依次减弱。作用方向为正的关键性影响因子促使耕地资源安全朝更加安全的方向转变, 而作用方向为负的关键性影响因子限制耕地资源安全朝更加安全的方向发展。

表 3 研究区耕地资源安全影响因素作用关系  
Table 3 Factors affecting relations of cultivated land resources security in study area

目标层 Target layer	要素层 Feature layers	作用强度 Intensity	影响因子 Impact factors	作用强度 Intensity
耕地资源安全	自然因素	0.4294	归一化植被指数 NDVI $X_1$	-0.1192
			地貌类型 $X_4$	0.1672
			高程 $X_5$	-0.3721
			土壤质地 $X_7$	0.5654
			黑土层厚度 $X_8$	0.0662
			土壤类型 $X_9$	0.1219
	社会经济因素	-0.5176	人口密度 $X_{10}$	-0.2034
			灌溉指数 $X_{11}$	-0.3142
			全氮 $X_{15}$	0.1819
	生态因素	-0.2405	pH 值 $X_{20}$	0.2563
			水土流失量 $X_{21}$	-0.3580
			铬 $X_{22}$	-0.1519
			铅 $X_{23}$	-0.1557
			氟 $X_{30}$	-0.0131

## 5 结论与讨论

1) 研究区 31 个影响因子中有 14 个因子对研究区耕地资源安全贡献极大, 是影响耕地资源安全的主要驱动因子, 这 14 个因子分别为: 归一化植被指数 NDVI  $X_1$ 、地貌类型  $X_4$ 、高程  $X_5$ 、土壤质地  $X_7$ 、黑土层厚度  $X_8$ 、土壤类型  $X_9$ 、人口密度  $X_{10}$ 、灌溉指数  $X_{11}$ 、全氮  $X_{15}$ 、pH 值  $X_{20}$ 、水土流失量  $X_{21}$ 、铬  $X_{22}$ 、铅  $X_{23}$ 、氟  $X_{30}$ 。

2) 研究区耕地资源安全受自然因素、社会经济因素、生态因素的共同驱动, 其中自然因素对研究区耕地资源安全起促进作用, 社会经济因素和生态因素起抑制作用, 且社会经济因素对研究区耕地资源安全的抑制作用最强, 生态因素的抑制作用次之。

3) 14 个主要影响因子对研究区耕地资源安全的促进和抑制作用不同。在起促进作用的主要影响因子中, 土壤质地  $X_7$  对耕地资源安全作用大小为 0.5654 促进作用最强, pH 值作用大小为 0.2563 促进作用次之, 黑土层厚度  $X_8$  作用大小为 0.0662 则促进作用最弱; 在起抑制作用的关键性影响因子中, 高程对耕地资源安全作用大小为 0.3721 抑制作用最强, 水土流失量作用大小为 0.3580 抑制作用次之, 氟最弱, 其作用大小为 0.0131。

4) 耕地资源安全各影响因子协同作用关系复杂, 在关键性影响因子及其与之相关因子间的协同作用关系中, 不同关键性影响因子及其与之相关的因子间的协同作用大小不尽相同, 全氮  $X_{15}$ 、pH 值  $X_{20}$  及其与之相关因子的协同作用促使耕地资源安全朝更加安全的方向转变, 归一化植被指数 NDVI

$X_1$ 、高程  $X_5$ 、水土流失量  $X_{21}$ 、铬  $X_{22}$  及其与之相关因子的协同作用限制耕地资源安全朝更加安全的方向发展。

本文所得出的结论为区域耕地资源安全调控提供一定思路。但影响区域耕地资源安全的因子众多,各因子之间的作用关系复杂,众多因子与耕地安全的关系并非简单的逻辑关系,探索定量化非线性模型,政策法规、耕作方式和种植习惯等人文因子对区域耕地资源安全的影响的量化方式将是下一步研究的方向。

#### [参 考 文 献]

- [1] 王枫, 汤惠君. 中国耕地资源安全研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 471—475.  
Wang Feng, Tang Huijun. Research progress of cultivated land resource security in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(3): 471—475. (in Chinese with English abstract)
- [2] 文森, 邱道持, 杨庆媛, 等. 耕地资源安全评价指标体系研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(8): 466—470.  
Wen Sen, Qiu Daochi, Yang Qingyuan, et al. Study on the index system of infield resources safety estimation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(8): 466—470. (in Chinese with English abstract)
- [3] 宋戈, 连臣. 黑龙江省耕地资源安全预警分析及预警系统的构建[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 247—252.  
Song Ge, Lian Chen. Analysis and system construction of safety early warning for cultivated land resources in Heilongjiang province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 247—252. (in Chinese with English abstract)
- [4] 宋伟, 陈百明, 史文娇, 等. 2007 年中国耕地资源安全评价[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1449—1455.  
Song Wei, Chen Baiming, Shi Wenjiao, et al. Evaluation for cultivated land resources security of China in 2007[J]. Progress in Geography, 2011, 30(11): 1449—1455. (in Chinese with English abstract)
- [5] 门明新, 张俊梅, 刘玉, 等. 基于综合生产能力核算的河北省耕地重点保护区划定[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 264—271.  
Men Mingxin, Zhang Junmei, Liu Yu, et al. Division of key cultivated land regions based on calculation of comprehensive productivity in Hebei province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(10): 264—271. (in Chinese with English abstract)
- [6] 袁顺全, 刘殿成, 赵焯, 等. 山东省耕地资源安全问题研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(1): 55—58.
- [7] Yuan Shunquan, Liu Diancheng, Zhao Ye, et al. Study on cultivated land resource security in Shandong province[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(1): 55—58. (in Chinese with English abstract)
- [8] 宋戈, 李晓静, 向长玉, 等. 松嫩高平原黑土区耕地资源安全及其驱动力分析: 以黑龙江省巴彦县为例[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 213—218.  
Song Ge, Li Xiaojing, Xiang Changyu, et al. Driving forces and security of cultivated land resource in black soil zone of Songnen high plain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(4): 231—218. (in Chinese with English abstract)
- [9] 朱洪波. 我国耕地资源安全保障主体的行为倾向与博弈关系[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(1): 82—87.  
Zhu Hongbo. The behavior tendency and game relation about protectors of cultivated land resource security in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2009, 19(1): 82—87. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨齐, 于晓宇, 李建龙, 等. 张家港市耕地资源安全与城市化时空动态分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1274—1283.  
Yang Qi, Yu Xiaoyu, Li Jianlong, et al. Cultivated land resources security and Spatial-temporal dynamics of urbanization in Zhangjiagang Jiangsu[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(8): 1274—1283. (in Chinese with English abstract)
- [11] 相慧, 孔祥斌, 武兆坤, 等. 中国粮食主产区耕地生产能力空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 235—244.  
Xiang Hui, Kong Xiangbin, Wu Zhaokun, et al. Spatial distribution characteristics of potential productivity of arable land in main crop production area in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(24): 235—244. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王志强, 于磊, 张柏, 等. 吉林省西部土地利用变化及其农业生态安全响应[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 58—64.  
Wang Zhiqiang, Yu Lei, Zhang Bo, et al. Land use/cover change and responses of agricultural eco-security in west Jilin province[J]. Resources Science, 2006, 28(4): 58—64. (in Chinese with English abstract)
- [13] Lipiec J, Stepniewski W. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 35(2): 37—52.
- [14] Souchère V, Cerdan O, Dubreuil N, et al. Modelling the impact of agri-environmental scenarios on runoff in a

- cultivated catchment (Normandy, France)[J]. CATENA, 2005, 61(2): 229—240.
- [14] Gardner R A M, Gerrard A J. Runoff and soil erosion on cultivated rained terraces in the Middle Hills of Nepal[J]. Applied Geography, 2003, 23(1): 23—45.
- [15] Yves Le Bissonnais, Cécile Montier, Marcel Jamagne, et al. Mapping erosion risk for cultivated soil in France[J]. CATENA, 2002, 46(3): 207—220.
- [16] O Cerdan, Y Le Bissonnais, A Couturier, et al. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 67(1): 99—108.
- [17] 陈百明, 周小萍. 中国粮食自给率与耕地资源安全底线的探讨[J]. 经济地理, 2005, 25(2): 372—375.  
Chen Baiming, Zhou Xiaoping. Analysis on grain self-Sufficient ratio and the safe baseline of cultivated land in China[J]. Economic Geography, 2005, 25(2): 145—148. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘友兆, 马欣, 徐茂. 耕地质量预警[J]. 中国土地科学, 2003, 17(6): 9—12.  
Liu Youzhao, Ma Xin, Xu Mao. Preliminary study on the early warning of cultivated land quality[J]. China Land Science, 2003, 17(6): 9—12. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张鸿辉, 刘友兆, 曾永年, 等. 耕地质量预警系统设计及实证[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 74—79.  
Zhang Honghui, Liu Youzhao, Zeng Yongnian, et al. Design and empirical research of cultivated land quality early-warning system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(8): 74—79. (in Chinese with English abstract)
- [20] 黄贤金, 曲福田. 耕地生态经济预警的理论与方法[J]. 生态经济, 1998(5): 14—17.  
Huang Xianjin, Qu Futian. The theory and methods for early warning system of cultivated land eco-economy[J]. Ecological Economic, 1998(5): 14—17. (in Chinese with English abstract)
- [21] 何国松, 钟儒刚, 刘成武, 等. 2001—2007 年湖北省耕地安全演化分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 476—480.  
He Guosong, Zhong Rugang, Liu Chengwu, et al. Evolution of cultivated land security system in Hubei province from 2001 to 2007[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(3): 476—480. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李春华, 李宁, 石岳, 等. 两型社会建设背景下长株潭城市群耕地安全性评价[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 301—308.
- Li Chunhua, Li Ning, Shi Yue, et al. An analysis on the security of cultivated land resources in Chang-Zhu-Tan city cluster based on two-oriented society[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(15): 301—308. (in Chinese with English abstract)
- [23] 何蓓蓓, 何兵. 安徽省耕地资源安全保障与对策研究[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(2): 157—160.  
He Beibei, He Bing. Study on cultivated land resource security and strategy in Anhui province[J]. Research of Agricultural Modernization, 2011, 32(2): 157—160. (in Chinese with English abstract)
- [24] 倪绍祥, 谭少华. 江苏省耕地安全问题探讨[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 307—312.  
Ni Shaoxiang, Tan Shaohua. On the cultivated land security of Jiangsu province[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 307—312. (in Chinese with English abstract)
- [25] 高楠, 宋戈. 黑龙江省耕地资源安全综合评价研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 250—254.  
Gao Nan, Song Ge. Comprehensive evaluation on security of cultivated land resources of Heilongjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(4): 250—254. (in Chinese with English abstract)
- [26] 郝汉舟, 靳孟贵, 李瑞敏, 等. 耕地土壤铜、镉、锌形态及生物有效性研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 92—96.  
Hao Hanzhou, Jin Menggui, Li Ruimin, et al. Fractionations and bioavailability of Cu, Cd and Zn in cultivated land[J]. Ecology and Environment Sciences, 2010, 19(1): 92—96. (in Chinese with English abstract)
- [27] 石瑞香, 杨小唤. 中国耕地变化区的气候北京对比分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(3): 309—314.  
Shi Ruixiang, Yang Xiaohuan. Research on the climate background in arable land changed areas of China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2010, 12(3): 309—314. (in Chinese with English abstract)
- [28] 蒲金涌, 张梦兰. 甘肃省天水市粮食供需特征及耕地安全性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(5): 177—182.  
Pu Jinyong, Zhang Menglan. Characteristics of grain supply and demand and safety of cultivated land at Tianshui city in Gansu province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(5): 177—182. (in Chinese with English abstract)
- [29] 卜坤, 张树文, 闫业超, 等. 三江平原不同流域水土流失变化特征分析[J]. 地理科学, 2008, 28(3): 361—368.  
Bu Kun, Zhang Shuwen, Yan Yechao, et al. Soil erosion change characteristic of different watersheds of Sanjiang

plain during the past 50 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(3): 361—368. (in Chinese with English abstract)

[30] 史峰, 王小川, 郁磊, 等. MATLAB 神经网络 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 247—256.

## Analysis of driving mechanism of cultivated land resources security of black soil region in Songnen high plain

Song Ge<sup>1,2</sup>, Wang Yue<sup>1</sup>, Lei Guoping<sup>2</sup>, Wang Panpan<sup>1</sup>

(1. *School of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;*

2. *Institute of Land Management, Northeast University, Shenyang 110819, China*)

**Abstract:** For profoundly anatomizing the effect mechanism of driving factors which affecting cultivated land resources security in study area, studying the driving mechanism of cultivated land resources security in study area, providing scientific basis to ensure the health of cultivated land and to protect the national food security. This paper takes black soil region of Bayan county in Songnen high plain as study area, using Matlab programming, adopting Genetic Algorithm to improve Neural Networks and combining correlation analysis, recognizing the prime factors and getting the related to the sensitive influential factors of cultivated land resources security, clarifying the effect mechanism and driving synergistic of influential factors and revealing the driving mechanism of the cultivated land resources security through multiple regression analysis and complete quadratic regression analysis. It turns out: The synergistic effect relations of cultivated land resources security in study area. The factors play a significant impact to the cultivated land resources security, and they have different synergistic effects in different influential factors. The synergistic effects get positive and negative interactions and have variants strength of different influential factors. The natural factors play a catalytic role in the security of cultivated land resources in study area. The socio-economic factors and ecological factors play an inhibition role in the security of cultivated land resources in study area, and socio-economic factors play inhibition strongest, followed by ecological factors. Effects of socio-economic factors play the most remarkable role on cultivated land resources security, natural factors secondly, the role of ecological factors not obvious. Among the main factors, soil texture plays the strongest role in promoting cultivated land resources security, the strength is 0.5654, next is pH value, the strength is 0.2563, while black soil thickness plays the weakest role, the strength is 0.0662. Altitude plays the strongest role in inhibiting cultivated land resources security, the strength is 0.3721, next is water and soil erosion, the strength is 0.3580, while fluorine plays the weakest role, the strength is 0.0131. The results provide a reference to protect cultivated land resources of black soil area and to rational use cultivated land resources.

**Key words:** land use, models, genetic algorithms, black soil region in Songnen high plain, cultivated land resources security, synergistic effect, GA-BP dimensionality reduction model

(责任编辑: 张俊芳)