

利用 IANN 建立县域种植业可持续发展预警模型

张金萍^{1,2}, 秦耀辰^{1*}, 艾少伟¹

(1. 河南大学黄河文明与可持续发展研究中心/环境与规划学院, 开封 475004;

2. 聊城大学环境与规划学院, 聊城 252059)

摘要: 区域种植业系统的生存和发展易受到来自种植业经济社会、资源和环境等因素的干扰, 使其可能偏离正常的运行轨道, 产生各种警情。该文基于加权主成分分析算法, 从优化网络初始权值入手, 对误差反传 BP 算法进行改良, 形成快速收敛和高精度的加权主成分网络模型 WPCA-NN。从而将黄色预警法与非线性模拟方法巧妙结合, 建立了科学合理的短期县域种植业可持续性预警指标体系和模型体系, 并以黄河下游沿岸典型县市垦利和封丘为案例进行了实证研究。研究表明: 1) 种植业可持续性的空间尺度属性非常重要, 以改进人工神经网络 (IANN) 为核心的县域种植业可持续性预警模型体系具有良好的可操作性。2) WPCA-NN 既能反映决策者对各指标的偏好程度, 又能规避经典 BP 算法学习速度慢和易陷入局部极小的缺陷。3) 县域种植业可持续性预警实证分析达到预期结果并符合实际。2010—2014 年两县警情以轻警和中警为主, 资源和环境方面警兆的异常波动, 尤其是权重较大的警兆指标对警情有更为直接的影响。

关键词: 神经网络, 模型, 算法, 种植业可持续性, 黄色预警法, 黄河下游

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.09.036

中图分类号: S-03, F307.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-09-0213-09

张金萍, 秦耀辰, 艾少伟. 利用 IANN 建立县域种植业可持续发展预警模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 213—221.
Zhang Jinping, Qin Yaochen, Ai Shaowei. Early warning model of farming sustainability in counties based on improved artificial neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(9): 213—221. (in Chinese with English abstract)

0 引言

种植业可持续性就是种植业发展的可持续性, 是一个全球性论题。自近代以来, 作物的大幅增产主要得益于农药和化肥的使用。然而, 全球气候变化背景下, 各种气象灾害频发, 农药、化肥与工业污染等协同作用, 导致愈演愈烈的农产品污染、土壤退化、土地贫瘠化等生态问题, 农作物减产甚至绝收的风险不容忽视。随着“可持续发展”理念被广泛接受, 在种植业领域, 对其“可持续性”进行量化的精确研究不断拓展^[1-5], 而近年来更偏重于对干旱、病虫害等灾害的预防和监测^[6-7], 以及单一与多灾种综合监测预警系统的研发^[8-9]。但缘于“种植业可持续性”概念与内涵的复杂性, 越来越多的属性被识别出来并用相关指标进行测度, 逐渐被归结为普遍得以认同的三个维度: 生态可持续性、经济可持续性和社会可持续性^[10], 尤其前者被给予了更多的关注^[11-13]。另一方面, 已有的种植业可持续性评价模型及指标体系均

注重对替代方法和策略以及指标之间的相互作用研究, 也比较注重模型的应用^[14-15], 而相对忽视了指标所应该具有的预警功能^[16], 因此本文的种植业可持续性预警及其模型化研究具有重要的意义。

以西方经济周期理论和经济波动景气分析等理论为源头, 中国 20 世纪 90 年代以来逐渐形成了以系统理论为基础的新预警学派, 其中时间序列分析、因子分析、灰色系统模型 GM(1,1)、回归分析等是区域种植业可持续性预警定量研究最为常用的方法。然而, 传统的预警建模对数据质量有较高的要求, 数据必须满足不同的模型适用条件, 很小的扰动往往会引起预测结果较大的变化, 因而外推预测精度通常不甚理想。预警系统所具有的非线性、不确定性和自组织性很难用传统的线性模型和结构依存型模型来表达, 从而使善于处理复杂非线性问题的人工神经网络成为区域可持续发展预警建模新的选择。人工神经网络法的劣势在于独立使用时对系统机理的解释力不强, 鉴于其在预警领域的应用刚刚起步, 如何与传统预警法紧密结合, 并从种植业可持续性预警的实际出发进行算法改进, 从而较好的反映警情的变动趋势, 是需要不断探索和深入研究的问题。

现有研究表明, 当前区域种植业可持续性预警模型均是其他领域预警模型的简单借用, 模型多样化导致相似研究缺乏可比性; 可靠的预警指标体系尚未系统建立, 研究缺乏连续性, 严重阻碍了预警、规划和调控的实践。从研究尺度看, 理论及实证限于宏观、中观的国家、省域层面, 县域研究少有涉及并相对忽略了不同时

收稿日期: 2011-10-27 修订日期: 2012-04-10

基金项目: 国家教育部人文社会科学重点研究基地重大项目 (10JJDZONGHE015); 国家自然科学基金面上项目 (41171438)。

作者简介: 张金萍 (1977—), 女, 山东招远人, 讲师, 博士, 聊城大学环境与规划学院, 主要研究空间分析与区域系统建模。开封 河南大学黄河文明与可持续发展研究中心/环境与规划学院, 475004。Email: maryzhjp@126.com
*通信作者: 秦耀辰 (1959—), 男, 河南大学环境与规划学院教授, 博士生导师, 主要从事区域可持续发展理论、模型与信息系统的研究。开封 河南大学黄河文明与可持续发展研究中心/环境与规划学院, 475004。

Email: qincy@henu.edu.cn

空尺度种植业可持续性的内涵，特别是忽视了更小尺度上的县级行政区作为“种植业可持续发展战略得以贯彻执行的基本组织和管理者”所起的关键作用。黄淮海平原等粮食主产区，尤其是种植业生产条件最好的黄河下游沿岸区，在国家粮食安全中的战略地位日益突显。强烈的经济和工业发展诉求使各县域构建种植业可持续性预警模型的尝试具有十分重要的政策实践意义。本文以黄色预警法的“明确警情—寻找警源—分析警兆—预报警度”为基本框架，通过与非线性方法和系统综合评价法的有机集成，试图建立实现系统功能自适应调整和处理的县域种植业可持续性综合预警模型，可为地方政府综合调控种植业发展提供重要的理论和方法依据。

表 1 种植业可持续性测度的不同时空尺度

Table 1 Different spatial and temporal scales for measure of farming sustainability

层次	空间尺度	实施主体	时间尺度	功能	子系统测度指标	测度重点
宏观	国家、省域	宏观决策者（政府）	中长期	宏观调控	单项综合指标	子系统之间的协调性测度
中观	地市、县域	组织者（相应种植业发展的主管部门）	五年或十年规划期	种植业生产的组织与实施	综合持续指数（层次结构指标体系）	种植业经济发展、资源利用与环境保护
微观	乡镇、村域	直接参与者（单位、农户）	五年或十年规划期	利益最大化目标下具体的生产与经营	投入、经济效益、经营水平等指标的综合	衡量种植业生产的运作效果与水平

依据世界粮农组织和“中国 21 世纪议程”中的相关概念，从可操作的角度狭义界定县域尺度种植业可持续性的内涵。县域种植业可持续性是指县域种植业系统在未来特定时期（可参考所属地市或省域的规划期）对指定准则的满足程度，是种植业经济-社会可持续性、种植业资源可持续性和种植业环境可持续性 3 个维度的统一。种植业经济-社会可持续性是指在一定的时期内维持较高的产出水平，即产出水平不下降，实现种植业经济的稳步发展；种植业资源可持续性要求维护一定时期内种植业生态资源的永续生产能力和功能，即资源存量不减少，实现自然资源的集约利用；种植业环境可持续性是指工业和现代种植业对种植业资源的污染和负面影响不恶化，从而维护良好的种植业生产环境。

1.2 县域种植业可持续性预警模型

1.2.1 预警建模前提、流程及指标体系

模型成立有 3 个重要前提条件：1) 县域种植业发展系统在其研究期及预测期内为相对稳定的系统，不受市场、政策等因素变动的制约。2) 县域种植业发展系统在研究期内视为封闭系统，不存在区域之间各种物质的输入、输出以及人口等要素的流动。3) 在进行警情评判时，3 个子系统在研究期内均视为线性系统，指标具有可加性是加权法应用的重要前提。

基于改进人工神经网络（improved artificial neural network, IANN）的预警过程环环相扣（图 1），当对表征县域种植业可持续性的综合指标进行分析时，发现某个县域的种植业发展呈现出某种异常的态势（明确警情），就要及时地分析引起可持续性异常变动的原因（寻找警源），给出未来若干年内县域种植业可持续性预测

1 预警模型框架的构建

1.1 县域尺度种植业可持续性的内涵

种植业发展具有非常强的地域性，同时又具有尺度层级性，因此，构建种植业可持续性预警模型必须考虑其区域尺度约束。考虑种植业发展的目标任务以及实施主体的时空秩序性，宏观、中观和微观 3 个层次^[17]的种植业可持续性测度（表 1）本质上相互联系、相互制约。中观层次的重要意义在于通过合理的组织，使微观种植业生产、资源利用与环境保护等与宏观发展政策有效结合。其中的县域在国民经济社会中处于承上启下的关键地位，不仅是资源和环境的主要载体^[18]，也是中国政治经济系统中最基本的层次与最完整的经济单元，从而是种植业可持续性预警研究较为合理的地域空间尺度。

指标变动的具体额度（分析警兆）和县域种植业发展所处的具体状态（预报警度），为避免县域种植业与社会经济发展出现大的波动或倒退提供理论依据。预警模型的输入为种植业可持续性警情和警兆指标值，输出为种植业可持续性警度。

警情指标体系采用包括目标层、准则层 1、准则层 2（警源）和指标层的 4 层结构，主要通过频度统计法、相关分析法等从影响县域种植业发展的经济、资源和环境等诸要素中筛选“少而精”的特殊警情指标，摒弃以往“大而全”的一般指标体系，以提高可操作性和指标的独立性，突出县域种植业发展的差异。警兆指标体系采用 3 层结构，依次为目标层、准则层和指标层，需要涵盖尽量完备的与种植业生产的组织和实施直接相关的指标，指标间不需要相互独立，从而在筛选直接导致警情的警兆时不致遗漏重要的指标。

1.2.2 明确警情

用指标的实际值与参考值之比（负方向作用指标取倒数）进行量化，若实际值超过参考值则量化为 1。根据多目标线性加权函数法，把种植业经济-社会发展与资源、环境 3 个子系统视为同等重要，警情即为种植业发展系统在三维空间（图 2）中所处的几何位置的描述。对于各子系统持续指数 S_i ，如果 $S_{i,t+1} \geq S_{i,t}$ （ t 表示时间），表明该子系统发展的是可持续的，否则即为不可持续。原点 O 表示最不可持续，即警情最大的状态， R 代表理想情形，即警情最小的状态。对任意状态 M ，警情越严重，在该三维空间中表现为 OM 缩短，或者 OM 与对角线 OR 的夹角 θ 增大，或表现为距离缩短和夹角增大的同时作用，三者均可用 OM 在 OR 上的投影 OP 来体现，即警情综合持续指数 I 为

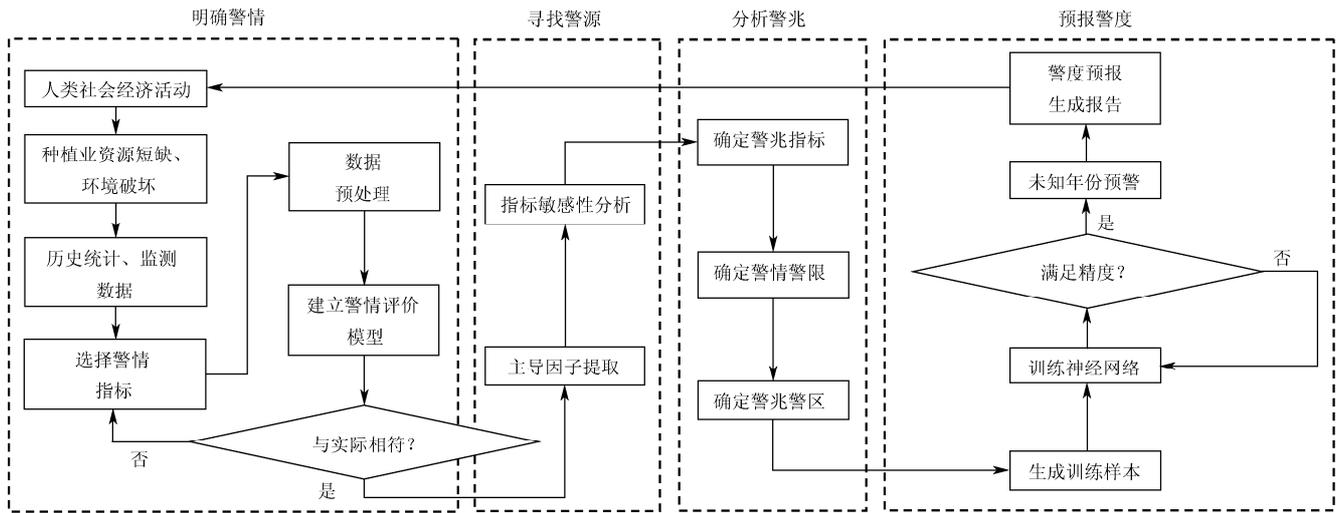
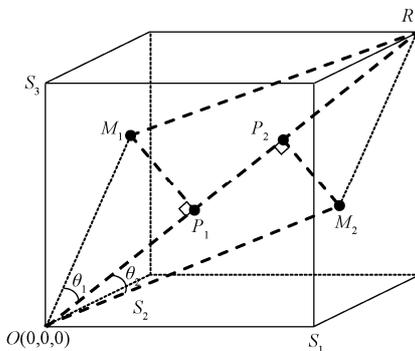


图 1 基于改进人工神经网络的县域种植业可持续性预警流程设计

Fig.1 Design of early-warning processes for farming sustainability of county based on IANN



注：O 为最不可持续状态，R 表示理想的可持续状态，S₁、S₂、S₃ 分别为经济-社会、资源、环境子系统持续指数，M₁、M₂ 为 2 个不同种植业发展状态，P₁、P₂ 为 M₁、M₂ 在对角线 OR 上的投影。

图 2 警情三维空间示意图

Fig.2 Three-dimensional space of warning conditions

$$I = (S_1 + S_2 + S_3) / \sqrt{3} \quad (1)$$

0 ≤ I ≤ 1.732，I 越小，县域种植业发展的状态越差，警情越严重；I 越大，县域种植业发展的状态越好，警情越轻。对于任何时间 t，如果 I_{t+1} ≥ I_t，则表明该县种植业发展是可持续的，否则即为不可持续。

1.2.3 寻找警源

警源的质变与量变过程就是警情的孕育过程。通过对警情的逐步回归分析以确定主导因子 (α=0.01)，进一步建立神经网络模型对指标进行敏感性分析从而确定警源。将主导因子加权处理作为网络的输入，警情综合持续指数 I 作为输出，以某一县域种植业指标的多年历史数据作为训练样本，通过轮训优化网络结构及参数。指标的敏感性分析是将每个自变量的值增加或减少 5%，保持其余自变量的值不变，观察 I 产生的波动。通过对比不同自变量增减所引起的 I 变化率，找出与警情关系最为密切的指标，进行重要性排序。

1.2.4 分析警兆

分析警兆是预警的关键环节，识别警兆及其报警区

间便可预测预报警情。首先依据负数原则、中数原则、少数原则等客观原则，并结合定性分析及当前实际对 I 的年度增长率 ΔI 设置警限 H。将警情警度设置为 5 级，分别为无警、轻警、中警、重警和剧警。其次取原始警兆指标的变化率，进行 ΔI 与新警兆指标的相关分析 (α 为 0.05) 以及新警兆指标的独立性分析。根据警情警限 H 来确定对应警兆变量无警、轻警、中警、重警、剧警的警区 L^[19-20]。

1.2.5 预警警度

预警警度就是根据警兆的警区来判断警情的轻重，是预警的最终目的。首先将警兆指标数据初始化至 [0.1, 0.9] 之间，采用 BP 神经网络的滚动预测法，用第 t 年的警兆指标数据作为输入，第 t+1 年的警兆指标数据作为输出，预测单项警兆指标未来 5 a 的值，以此为基础进行警度的预报。

调用 Matlab 7.0 工具箱中的均匀分布随机数发生器函数 UNIFRND，对警兆指标的报警区间 (<l₁, l₁-l₂, l₂-l₃, l₃-l₄, >l₄) 每级均线性插值生成 100 个样本，加上由各级警兆分界值所形成的 4 个样本，共形成 504 个训练样本和同法生成的 5 级共 180 个检测样本供神经网络学习。把警兆指标的标准化值经过加权处理作为输入，输入层的神经元数为警兆变量的数目。5 级警度值作为相应的输出，目标输出采用基向量的形式表示 [(1,0,0,0,0)、(0,1,0,0,0)、(0,0,1,0,0)、(0,0,0,1,0)、(0,0,0,0,1)]。如果预警有效年占该县预警所有年份的 3/4 以上 (即验证误差的阈值为 25%)，说明神经网络模型是有效的，该警兆变量可用于外推对警情进行预警。输入未来年份警兆指标的数值，进行警度评判和预报。

2 BP 神经网络算法改进

2.1 算法改进原理

标准 BP (back-propagation) 神经网络算法本身固有的缺陷使之无法保证网络能快速收敛至全局极小点，而初始权值对于学习是否达到局部极小，是否能够收敛以

及训练时间长短的关系很大,采用(-1,1)之间的随机数来设置网络初始权值是导致BP网络每次运行结果差异很大的直接原因。所以,寻找一种确定BP神经网络初始权值的有效方法,使之唯一决定网络收敛的方向,成为本文算法改进的焦点。Oja和Sanger等严格证明了Oja网络模型从许多初始向量出发的解都收敛于最大特征值对应的特征向量,提出用主成分法的自变量中方差最大主成分的特征向量确定初始权值^[21-22]。县域种植业可持续性预警的各项警情、警兆指标对于待评价的问题均存在主观重要性上的差异,然而最为重要的指标在传统主成分分析中未必能获得最大的权数。因此,本文基于Oja-NN模型,通过加权主成分分析改变BP神经网络初始权向量的取值,形成加权主成分单隐层前馈神经网络(WPCA-NN)来完成种植业可持续性警情的短期预测,使之既能反映决策者对各指标的偏好程度,又能获得一个快速收敛和高精度的模拟和预测模型。

2.2 基于WPCA的BP权值学习

输入层到隐层采用改进的Oja规则,即无监督学习的加权主成分分析算法进行权值学习。对原始数据每一个指标赋予一个重要性权数,相当于将原始数据矩阵 X 乘上一个指标重要性权数矩阵 G ,但这并不会改变其特征向量的数学性质。也就是说,采用加权主成分分析法改进的Oja规则仍使网络的权向量收敛于一组正交基向量,且与输入样本矩阵分布的前 m 个主特征分量展开相同的子空间,即,改进的Oja规则使该网络的权矢量收敛于输入样本相关矩阵的主特征矢量 c^* (最多相差一个负号),条件是初始权 $V_{j0}, j=1, 2, \dots, m$,与 c^* 正交^[23-24]。由于隐层有 m 个节点,因此能抽取 m 个主成分。隐层到输出层利用线性有导师的 δ 学习规则,即梯度法完成权值学习。输入层到隐层、隐层到输出层的权值向量按照逐个输入样本来进行调整的公式参考文献[24-25]。输入层到隐层权值学习结束与否采用式(2)定义的误差和衰减率来判断。误差为

$$E_v^{q_1} = \sum_{p=1}^N \left\| x_p - \sum_{j=1}^m f(\text{net}_{j,p}) v_j \right\|^2 \quad (2a)$$

收敛的判据为

$$E_v^S = \left| (E_v^{q_1} - E_v^{q_1+1}) / E_v^{q_1} \right| \quad (2b)$$

式中, $E_v^{q_1}$ 为误差, q_1 为迭代次数。如果 E_v^S 小于事先设定的阈值(正数) $er1$,则学习结束。隐层到输出层的权值学习结束标准采用最速下降的误差 $E_w^{q_2}$ (q_2 为迭代次数)来判断。基于WPCA的改进BP神经网络算法在MATLAB 7.0环境中编程实现。

3 应用实例

3.1 研究区域与数据

黄河下游沿岸区是指黄河下游(桃花峪以下)引黄灌区所覆盖的县域范围(图3),总面积10.3万 km^2 ,共涉及河南、山东、河北3个省份,19个地级市,覆盖109个县(市、区)。该区域地貌类型主要为黄泛冲积平原,

土壤主要为地域性盐碱性潮土,气候属半干旱季风气候区,多年平均降水量为550~730 mm,但降水与作物需水过程不一致,县域种植业发展对引黄灌溉的依赖性较大,环境较为脆弱,同时亦受到水资源供需失衡、补源区超采地下水、用水机制不完善、人口增长快和污染加剧等人为因素的制约。因此,黄河下游沿岸县域种植业发展的自然和人文要素差异不大,从中选取经济实力差异较大的县域进行种植业可持续性预警研究,一是预警指标体系和结果均具有可比性,二是可以探讨地方经济实力与种植业可持续性之间是否存在必然的联系,便于把握和推演模型参数的一般性规律。基于此,本文根据加权主成分综合评价法和自组织特征映射神经网络对109个县域进行经济实力分类,选取垦利县和封丘县作为典型县,根据1989—2009年的种植业发展状况预报2010—2014年的种植业可持续性警度。垦利县是该区经济实力最为雄厚的县域,土地后备资源最多,种植业开发潜力巨大,但土地利用方式变化频繁且生态环境脆弱;封丘县为全国优质小麦基地县和100个重要商品粮生产县之一,是经济实力最弱的县域,面对的是脱贫致富和种植业现代化的诉求。

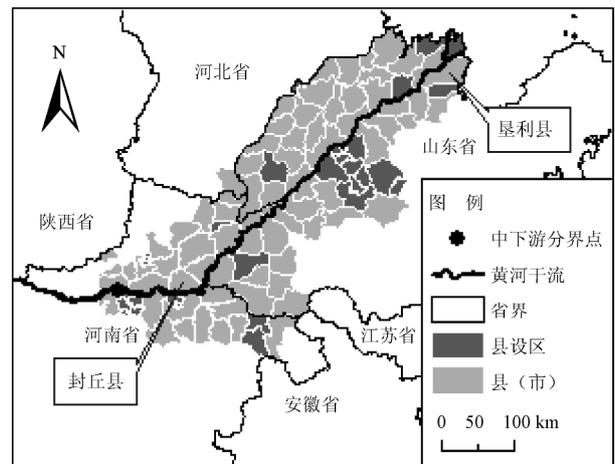


图3 黄河下游沿岸区界定及典型县位置

Fig.3 Downstream region along Yellow River and location of typical counties

数据主要来源于1990—2010年的东营和新乡统计年鉴,少部分来源于多年的《河南农村统计年鉴》和《河南调查年鉴》以及历年的《河南统计年鉴》和《山东统计年鉴》。县域种植业可持续性警情评判中指标的参考值主要参照《中国21世纪议程》、河南和山东两省“十二五”规划^[26-27]及2020年远景规划^[28]、“生态省”规划^[29]以及CNKI期刊文章等文献资料制定。

3.2 警情

3.2.1 建立警情指标体系

采用频度统计法和专家咨询法提出了用于支撑3个子系统的一系列单项评价指标。广泛征询相关领域20位专家的意见,根据专家打分表制定各指标相对于所属子系统的权重,充分考虑指标数据的可得性,对同类指标进行

Pearson 相关分析，剔除相关性较大和权重较小的指标，筛选出 13 项评价指标，建立特殊警情指标体系，各项指标的计算方法、权重及 2020 年参考值见表 2。反映种植业生产自然环境方面的指标，如气温、降水、土壤养分含量等未纳入指标体系。这是由于种植业生产过程中各种要素的投入（如灌溉）经过种植业系统的复杂作用，使得像干旱

等不利的自然环境约束对种植业生产的影响大大弱化。如 2009 年河南省经历了 50 a 一遇的特大干旱，在气候变化异常、灾害多发、频发、重发的情况下依然获得粮食总产量比上年增产 24 万 t 的实例就是最有力的证明。因此，人为和投入因素对种植业可持续性的影响是本文设计县域种植业可持续性预警指标体系的重要出发点。

表 2 种植业可持续性警情评判指标体系
Table 2 Index system of warning conditions evaluation for farming sustainability

目标层（警情）	准则层	准则层（警源）	指标层	指标计算方法	权重	2020 年参考值
黄河下游沿岸县域种植业可持续性警情评判	种植业经济-社会子系统	人口城镇化	x_1 非农人口比重/%+	非种植业人口/总人口 $\times 100\%$	0.1939	60
		耕地利用效果及投资潜力	x_2 人均粮食产量/($\text{kg}\cdot\text{人}^{-1}$)+	粮食总产量/总人口	0.3129	800
			x_3 地均农产品产量/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)+	农产品总量/耕地面积	0.2803	12
			x_4 地均农机总动力/($\text{kW}\cdot\text{hm}^{-2}$)+	农机总动力/耕地面积	0.2129	16
	种植业资源子系统	耕地保有水平	x_5 人均耕地面积/($\text{hm}^2\cdot\text{人}^{-1}$)+	年末耕地面积/总人口	0.2921	0.1
		种植业生产物资条件及基础措施	x_6 耕地有效灌溉率/%+	耕地有效灌溉面积/耕地面积 $\times 100\%$	0.2728	85
			x_7 人均农村用电量/($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{人}^{-1}$)+	农村用电量/种植业从业人数	0.2056	1500
		耕地利用投入水平	x_8 土地复种指数/%+	全年播种（或移栽）作物的总面积/耕地面积 $\times 100\%$	0.2295	200
		种植业环境子系统	种植业生产的环境背景	x_9 废水排放密度/($10^4\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$)-	废水排放量/土地面积	0.2620
	x_{10} 农药使用强度/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)-			农药用量/耕地面积	0.2642	16
	x_{11} 化肥使用强度/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)-			化肥施用量/耕地面积	0.2707	250
	x_{12} 地膜使用强度/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)-			地膜施用量/耕地面积	0.2031	14

注：“+”号表示正向作用指标，“-”号表示负向作用指标

3.2.2 综合持续指数

1989—2009 年各子系统持续指数变化态势总体上相似，但又存在一定的差异（图 4）。2 个县种植业经济-社会持续指数整体上呈增大趋势。地方种植业经济稳步攀升，是带动种植业可持续性综合持续指数总体增长的主要原因。种植业资源持续指数绝对值更高，体现出 2 个县具备种植业发展的资源优势，但近 10 a 的增长趋于停滞，表明尽管地方经济发展对资源的占用尚处于可承受的限度之内，但应警惕资源存量的相对减少给种植业

发展带来的潜在不利影响，特别是垦利县自 2000 年以来已有 6 年呈现出微弱的不可持续状态。值得注意的是，种植业环境持续指数均呈现出较大程度的下降，因而在大多数年份环境子系统均是不可持续的，特别是近年来，环境持续指数的下降呈加快趋势，表明种植业发展呈现出重经济增长、轻环境保护的态势，这将为种植业可持续发展的愿景埋下隐患。

2000 年前垦利县由较高的环境和资源持续指数驱动，警情综合持续指数 I 远高于封丘，2000 年后则由于环境持续指数的迅速降低，使 I 大幅下降，至 2009 年方回升至接近 2003 年的水平。封丘 2004 年前种植业可持续性不断改善，但之后由于环境指数的下挫，演变为总体不可持续的种植业发展态势。

3.3 警源

逐步回归分析得出影响垦利县和封丘县警情综合持续指数 I 的主导因子分别为 x_1 、 x_2 、 x_6 、 x_8 、 x_{11} 和 x_1 、 x_3 、 x_5 、 x_6 、 x_8 、 x_{10} 、 x_{11} 。以每县 1989-2007 年的主导因子数据集作为训练样本的输入， I 作为目标输出。以 2002—2007 年数据作为测试样本，2008—2009 年数据作为验证样本。输入层到隐层和隐层到输出层的阈值 $er1$ 和 $er2$ 均设定为 0.001，学习率 η 分别为 0.001 和 0.01，最大迭代次数均为 500。网络检测误差阈值为 0.01，验证误差的阈值均为 5%。经过轮训和测试，隐节点数目分别为 7 和 12。观察网络的性能和参数（表 3），发现 WPCA 神经网络在训练时均迭代较少的次数后达到收敛，检测和验证样本的误差均满足精度要求。

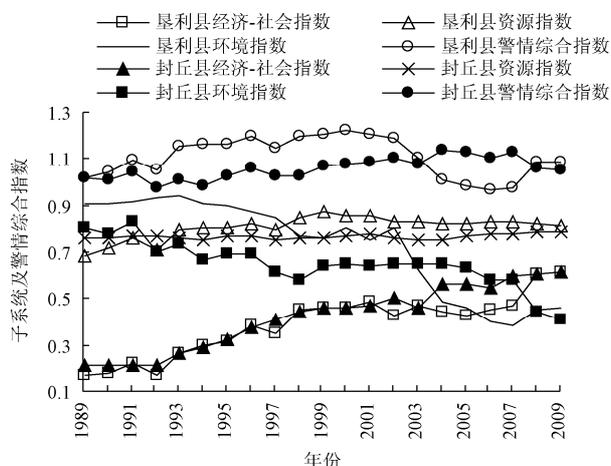


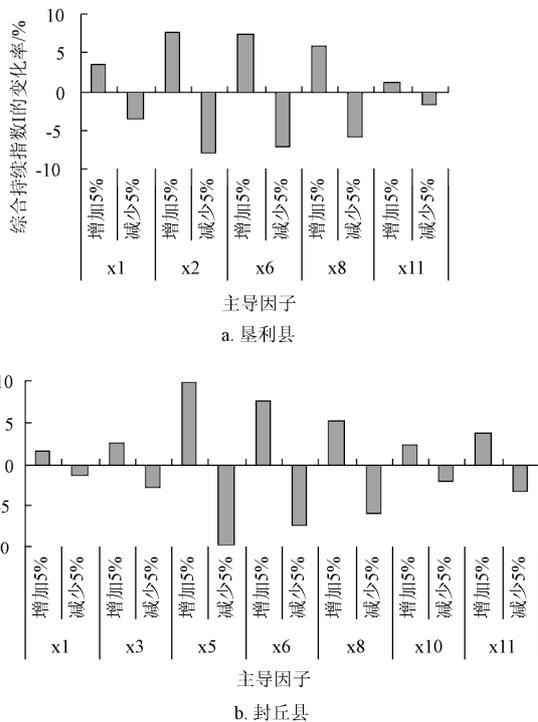
图 4 1989—2009 年垦利县、封丘县子系统及警情综合持续指数变动

Fig.4 Changes of integrated index of two subsystems and multiple warning condition system

表 3 改进 BP 神经网络的性能和参数
Table 3 Performance and parameters of improved back-propagation neural network

地区	迭代次数		检测误差/%	检测样本平均估计误差/%	验证误差/%
	输入层到隐层	隐层到输出层			
垦利县	16	19	0.084977	2.00	0.26
封丘县	11	12	0.051721	2.02	0.57

进一步的指标敏感性分析(图 5)表明, 垦利县人均粮食产量(x_2)、耕地有效灌溉率(x_6)和土地复种指数(x_8)分别增加 5%将导致 I 增加 7.65%、7.46%和 5.84%; 封丘县人均耕地面积(x_5)、耕地有效灌溉率(x_6)和土地复种指数(x_8)分别增加 5%将导致 I 增加 9.66%、7.48%和 5.19%, 而这些均是种植业资源和环境子系统中权重较大的指标。



注: x_1, x_2, \dots, x_{11} 为指标层变量, 具体含义见表 2。

图 5 警情综合持续指数 I 与主导因子的敏感性分析结果
Fig.5 Results of sensitivity analysis for index I and dominant factors

因此, 从警源来看, 要实现 2 个县种植业的可持续发展, 关键要从改善种植业生产物资条件及基础设施状况、增加耕地利用投入水平和改善种植业生产的环境背景等方面入手。所建立的模型不仅可用作指标的敏感性分析, 还可被视为未来 2 个县警情综合持续指数的短期经验模型, 从而辅助政府部门在短期种植业发展和规划中及时制定调整策略。

3.4 警兆

3.4.1 警情警限设置

取黄河下游沿岸县域各子系统持续指数多年平均增

长率的最小值(种植业经济指数为 4.55%、种植业资源指数为 0.19%、种植业环境指数为-4.00%), 以 2009 年为基数, 分别计算各县警情综合持续指数 I 及其增长率 ΔI 。以最小的 ΔI 值 0.53%作为无警警限 h_1 , 根据中数原则将中位数-1.45%作为轻警警限 h_2 , 出于可操作性分别调整为 0.50%、-1.50%。该区尽管出现了种植业种植环境不同程度的退化, 但大多数年份地方种植业产值仍在不断加速提高, 通过经济增长的反哺作用可以减缓环境退化的影响。因而各地重警和剧警的年份应占少数, 故将数列约 1/3 处的数值-4.00%定为中警警限 h_3 , 将-8.00%作为重警警限 h_4 , 警度划分方案见表 4。可以看出, 垦利县出现中警以上警情的年份多于封丘县, 特别是 2001—2004 年, 中、重、剧警连续出现, 至 2008 年警情才逐渐解除。封丘县警情略好, 1999—2002 年均均为无警, 且少有中警以上警情连续出现的情况。

表 4 种植业可持续性警情的警度划分方案及警度分布
Table 4 Division program for the warning degrees and their distribution

指标(地区)	警情综合持续指数 I 的变化率/%	警度出现的年数	
		垦利县	封丘县
无警警区	>0.50	9	10
轻警警区	-1.49~0.50	3	3
中警警区	-3.99~-1.50	4	5
重警警区	-7.99~-4.00	3	2
剧警警区	≤ -8.00	1	0

3.4.2 警兆指标警区的确定

从经济、主要物资消耗、耕地面积、机械拥有量、主要农产品播种面积及产量、农机化作业情况、水利情况、污染情况和农民人均收入等方面共搜集了 43 个指标, 计算其年变化率形成警兆指标体系。进行警情综合持续指数变化率 ΔI 与警兆指标 y_i 的相关分析 (α 为 0.05), 根据相关系数的大小, 删掉与 ΔI 相关性相对较弱, 又与其余警兆变量存在显著相关性的指标, 从而保证所筛选出的警兆变量彼此之间是独立的。最终各选定 3 个指标作为垦利县和封丘县种植业可持续性预警的警兆指标, 其警度划分方案见表 5。

3.5 警度

3.5.1 单项警兆指标预测

经过训练, 垦利县 BP 输入和输出层皆为 3 个神经元, 隐层为 4 个神经元, 而封丘县输入和输出层皆为 3 个神经元, 隐层为 5 个神经元时测试样本的误差最小(均方误差 MSE 分别为 0.036 和 0.055)。检测样本的网络输出值与实际值(表 6)十分接近, 说明该模型计算精度较高, BP 神经网络追踪各指标变化趋势的能力较强。对 BP 网络滚动预测结果进行反归一化, 即可得出 2010-2014 年各指标的预测值。

表 5 种植业可持续性预警的警兆警区划分方案
Table 5 Division program for interval of warning signs

县域	警兆指标/%	r	无警警区	轻警警区	中警警区	重警警区	剧警警区
垦利县	农作物总播种面积变化率 y_1	0.715	>1.84	-4.98~1.84	-9.81~-4.99	-12.20~-9.82	≤ -12.21
	乡村从业人数变化率 y_2	0.624	>0	-1.49~1	-3.18~-1.50	-5.31~-3.19	≤ -5.32
	农林牧渔业总产值变化率 y_3	0.475	>12.08	5.64~12.08	-8.74~5.63	-15.42~-8.75	≤ -15.43
封丘县	化肥施用量(折纯)变化率 y_1	0.706	>-16.04	-21.95~-16.04	-28.38~-21.96	-34.63~-28.39	≤ -34.64
	蔬菜播种面积变化率 y_2	0.557	>7.99	1.93~7.99	-8.15~1.92	-20.54~-8.16	≤ -20.55
	农药使用量变化率 y_3	0.488	>-4.40	-20.51~-4.40	-32.63~-20.52	-50.65~-32.64	≤ -50.66

注：r 为警情综合持续指数 I 的变化率与各警兆指标 y_i 的相关系数。

表 6 BP 网络检测样本的输出值与实际值
Table 6 BP network output and actual values of detected samples

县域	指标	2006 年		2007 年		2008 年		2009 年	
		实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值
垦利县	y_1	0.3718	0.3490	0.4631	0.3956	0.3694	0.3677	0.3972	0.4491
	y_2	0.3151	0.2652	0.2538	0.2962	0.2887	0.3693	0.9000	0.7887
	y_3	0.2974	0.3051	0.3313	0.3167	0.3148	0.2796	0.3557	0.4206
封丘县	y_1	0.8000	0.7046	0.7187	0.6920	0.8177	0.7124	0.5283	0.6444
	y_2	0.6978	0.6571	0.6947	0.6719	0.6727	0.7148	0.1178	0.1325
	y_3	0.3102	0.3463	0.2866	0.3159	0.2653	0.3670	0.1980	0.1371

注： y_1 、 y_2 、 y_3 见表 5。

3.5.2 警度预报

将 er1、er2 均设定为 0.001，学习速率分别为 0.001 和 0.01，最大迭代次数均为 8000，检测误差阈值为 0.01，建立 WPCA-NN 模型。2 个县的 WPCA 神经网络输入与输出层均为 5 个神经元，隐层均为 6 个神经元，基本性能和参数（表 7）说明预测误差在可控制的范围 25% 之内，网络具有良好的泛化能力，可以用于未知样本的评价和预测。

表 7 WPCA 神经网络的性能和参数

Table 7 Performance and parameters of WPCA neural network

县域	迭代次数		检测误差/%	验证误差/%
	输入层到隐层	隐层到输出层		
垦利县	113	662	0.020172	10.5
封丘县	117	523	0.029333	15.8

从预警结果（表 8）看，2010—2014 年两县种植业可持续性变化态势在轻警和中警间波动，说明种植业可持续性下降趋势较为明显。与 2 个县种植业可持续性警度变化趋势基本相符的警兆警度分别为农作物总播种面积变化率 (y_3) 和农药使用量变化率 (y_1)，体现了 WPCA 神经网络用于警度预报的效果。

表 8 种植业可持续性预警结果与警兆警度

Table 8 Early-warning results of farming sustainability and degree of warning signs

年份	垦利县警度	垦利县警兆警度			封丘县警度	封丘县警兆警度		
		y_1	y_2	y_3		y_1	y_2	y_3
2010	3	3	1	3	3	3	2	2
2011	3	2	1	3	2	2	1	2
2012	2	1	2	2	1	2	1	1
2013	1	1	1	2	2	2	1	2
2014	2	2	1	2	2	2	2	1

注：用数字 1~5 依次表示无警、轻警、中警、重警和剧警。 y_1 、 y_2 、 y_3 见表 5。垦利县 y_1 、 y_2 、 y_3 权重分别为 0.3440、0.2619 和 0.3941；封丘县 y_1 、 y_2 、 y_3 权重分别为 0.4032、0.3181 和 0.2787。

3.6 改进 BP 算法用于警度预报的效果

采用经典 BP 算法、带动量的自适应学习速率梯度下降算法[BP(η , m)](样本、网络结构及参数设置均与 WPCA 神经网络相同) 分别进行垦利县警度预报，验证 WPCA 神经网络用于种植业可持续性预警的效果。算法关键性能和参数（表 9）表明，经过 10^5 次迭代，BP 和 BP(η , m) 网络仍没有达到设定的均方误差 0.001，与 WPCA 网络无论在学习速度还是拟合的准确性上均存在较大差距，因而外推预测结果的可靠性相对较低。

表 9 垦利县不同预警算法的性能和参数

Table 9 Performance and parameters of different algorithms or models in Kenli

算法/模型	学习率	训练误差	迭代次数	检测误差/%	验证误差/%
WPCA-BP	$\eta_1=0.001$, $\eta_2=0.01$	$E_v^s=0.001$, $E_w^g=0.0007462$	$q_1=113$, $q_2=662$	0.02017	10
BP	0.001	0.0937742	100 000	9.55	25
BP(η , m)	0.001	0.0044609	100 000	0.33	15

4 结论

对种植业可持续性的准确测度是一个非常复杂的论题。本文基于可持续发展理论和预警理论，对区域种植业可持续性预警模型进行了尝试性和开拓性的研究，在县域尺度上建立灵敏而准确的短期预警模型，通过对警源的寻找和警兆的分析，从而有助于决策者能够及时发现和排除警情。主要结论如下：

1) 在狭义层面界定了县域这一更小尺度上种植业可持续性的内涵，基于此提出了警情和警兆指标体系，建立了预警模型的结构。基于 IANN 的预警模型以黄色预警法为基础，使预警系统中被赋予更大权数的变量得到了更多的重视，有效提高了县域种植业可持续性预警结果的精度和可靠性。

2) 从县域种植业可持续性预警涉及的具体环节入

手, 在 Oja-NN 模型的基础上, 采用加权主成分法改进 BP 神经网络算法, 形成 WPCA-NN 模型, 使之既能反映决策者对各指标的偏好程度, 又能获得一个快速收敛和高精度的神经网络模型, 为符合内在机理不明、但指标存在主观重要性差异特征的其他领域非线性系统模拟研究提供了有益的借鉴。

3) 黄河下游沿岸区垦利县和封丘县种植业可持续性警情以轻警和中警为主, 但未来 5 年内警情趋于严重的总体态势值得重视。农作物总播种面积和农药使用量变化分别是两县警情变动的主要原因。垦利县经济实力较封丘县更为雄厚, 但警情却严重得多, 因而县域经济实力强弱与种植业可持续性之间并无绝对关联。

4) 预警结果及参数可为地方政府制定种植业的短期发展规划提供依据, 也可为中长期规划的制定提供参考。进一步的深入研究一是通过定性定量综合集成法增强模型参数的通用性, 二是研发基于 IANN 的县域种植业可持续性预警决策支持系统, 实现预警的实时化和智能化。

[参 考 文 献]

- [1] Garcia S M, Staples D J, Chesson J. The FAO guidelines for the development and use of indicators for sustainable development of marine capture sheries and an Australian example of their application[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2000, 43(7): 537—556.
- [2] 张忠根, 应凤其. 农业可持续发展评估理论、方法与应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003, 45—93.
- [3] Gustavson K R, Lonergan S C, Ruitenbeek H J. Selection and modeling of sustainable development indicators: a case study of the Fraser river basin, British Columbia[J]. *Ecological Economics*, 1999, 28(1): 117—132.
- [4] Stevenson M, Lee H. Indicators of sustainability as a tool in agricultural development: partitioning scientific and participatory processes[J]. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2001, 8(1): 57—65.
- [5] Smith C S, McDonald G T, Thwaites R N. TIM: assessing the sustainability of agricultural land management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2000, 60(4): 267—288.
- [6] Smith B A, Hoogenboom G, McClendon R W. Artificial neural networks for automated year-round temperature prediction[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 68(1): 52—61.
- [7] Mkhabela M, Bullock P, Gervais M, et al. Assessing indicators of agricultural drought impacts on spring wheat yield and quality on the Canadian prairies[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(3): 399—410.
- [8] Li M, Qian J P, Yang X T, et al. A PDA-based record-keeping and decision-support system for traceability in cucumber production[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 70(1): 69—77.
- [9] Bhaskaranarayana A, Varadarajan C, Hegde V S. Space-based societal applications: Relevance in developing countries[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 65(9/10): 1479—1486.
- [10] Van Calker K, Berentsen P, Giesen G, et al. Identifying and ranking attributes that determine sustainability in Dutch dairy farming[J]. *Agriculture and Human Values*, 2005, 22(1): 53—63.
- [11] Praneetvatakul S, Janekarnkij P, Potchanasin C, et al. Assessing the sustainability of agriculture, a case of mae chaem catchment, northern thailand[J]. *Environment International*, 2001, 27(2/3): 103—109.
- [12] Rasul G, Thapa G B. Sustainability of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh: an assessment based on environmental, economic and social perspectives[J]. *Agricultural Systems*, 2004, 79(3): 327—351.
- [13] 邓楚雄, 谢炳庚, 吴永兴, 等. 上海都市农业生态安全定量综合评价[J]. *地理研究*, 2011, 30(4): 645—654.
- [14] Deng Chuxiong, Xie Binggeng, Wu Yongxing, et al. Quantitative and comprehensive evaluation of ecological security of urban agriculture in Shanghai[J]. *Geographical Research*, 2011, 30(4): 645—654. (in Chinese with English abstract)
- [15] Stoorvogel J J, Antle J M, Crissman C C, et al. The trade-off analysis model: integrated bio-physical and economic modeling of agricultural production systems [J]. *Agricultural Systems*, 2004, 80(1): 43—66.
- [16] Van Der Werf M G, Petit J. Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 93(1/3): 131—145.
- [17] Rigby D, Woodhouse P, Young T, et al. Constructing a farm level indicator of sustainable agricultural practice[J]. *Ecological Economics*, 2001, 39(3): 463—478.
- [18] 周小萍, 陈百明. 农业资源可持续利用模式及案例分析——以冀中南平原为例[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(4): 417—425.
- [19] Zhou Xiaoping, Chen Baiming. The research of agriculture resources sustainable utilization pattern and case analysis[J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(4): 417—425. (in Chinese with English abstract)
- [20] 毛汉英. 县域经济和社会同人口资源、环境协调发展研究[J]. *地理学报*, 1991, 46(4): 385—394.
- [21] Mao Hanying. Study on coordinating development of economic, social growth with population, resources and environment at county level[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1991, 46(4): 385—394. (in Chinese with English abstract)
- [22] 彭补拙, 魏金悌, 张燕. 城市边缘区耕地预警系统的研究——以温州市为例[J]. *经济地理*, 2001, 21(6): 714—718.
- [23] Peng Buzhuo, Wei Jindi, Zhang Yan. Study on system of arable land forewarning in urbanfringe: A case of Wenzhou city[J]. *Economic Geography*, 2001, 21(6): 714—718. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张鸿辉, 刘友兆, 曾永年, 等. 耕地质量预警系统设计与实证[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(8): 74—79.
- [25] 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)

- [21] Oja E, Karhunen J. On stochastic approximation of eigenvectors and eigenvalues of the expectation of a random matrix[J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 1985, 106(1): 69—84.
- [22] Sanger T D. Optimal unsupervised learning in a single-layer linear feedforward neural network[J]. *Neural Network*, 1989, 2(6): 459—473.
- [23] 余英林, 李海洲. 神经网络与信号分析[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1996, 252—282.
- [24] 朱明星, 方斌, 张德龙. 前馈神经网络快速算法及其应用[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2000, 23(5): 735—739. Zhu Mingxing, Fang Bin, Zhang Delong. A fast learning algorithm of feedforward neural networks and its application to system identification[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2000, 23(5): 735—739. (in Chinese with English abstract)
- [25] Karayiannis N B. Accelerating the training of feedforward neural networks using generalized Hebbian rules for initializing the internal representations [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1996, 7(2): 419—426.
- [26] 河南省人民政府办公厅. 河南省农业和农村经济发展“十二五”规划[EB/OL]. <http://www.henan.gov.cn/zwgk/system/2011/08/03/010261061.shtml>, 2011-08-03.
- [27] 山东省农业信息中心. 山东省农业农村经济发展“十二五”规划 [EB/OL]. http://www.sdney.gov.cn/art/2011/8/4/art_767_276915.html, 2011-08-04.
- [28] 杨屹. 对河南新农村建设进程的量化分析[EB/OL]. <http://www.ha.stats.gov.cn/hntj/tjfw/tjfx/qsfx/ztfx/webinfo/2009/12/1259834805638825.htm>, 2009-12-15.
- [29] 车纯滨. 生态文明建设的实践: 山东生态省建设[M]. 中国标准出版社, 2009, 47—73.

Early warning model of farming sustainability in counties based on improved artificial neural network

Zhang Jinping^{1,2}, Qin Yaochen^{1*}, Ai Shaowei¹

(1. Center for Yellow River Civilization and Sustainable Development/College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475001, China; 2. College of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract: Vulnerable to the fluctuations of economy, resource and environment, the development of regional agricultural system may deviate from the normal orbit and result in a variety of warning conditions. In this paper, scientific early-warning model system for short-term county-scale sustainability of farming measure was established with the improved artificial neural network model as a core by combining skillfully with the “yellow” warning method and the traditional systematic approach. The BP neural network model was improved by the weighted principal component analysis method to optimize the initial weights of network. In the downstream region along Yellow River, two typical counties, Kenli and Fengqiu, were selected as the main study areas to complete the four key steps of early-warning. The results showed that, primarily, the county-scale early-warning model system for measure of farming sustainability based on the IANN method had good operability. Secondly, the improved BP algorithm can not only reflect the preferences of decision makers on the indicators, but also obtain a fast convergent and highly accurate neural network model. Finally, the empirical analysis of early-warning for the sustainability of farming measure in the county scale achieved the desired goals and was in line with reality. The warning degrees in two counties from 2010 to 2014 were mainly light and moderate, on which abnormal fluctuations of warning signs from resource and environment subsystems, especially those having greater weights, had a more direct impact.

Key words: neural network, models, algorithms, sustainability of farming, “yellow” warning method, the downstream of Yellow river