

湖南省资源环境承载力预警评价与警情趋势分析

徐美^{1, 2} 刘春腊^{3, 41}

(1. 中南林业科技大学 旅游学院, 中国湖南 长沙 410004;

2. “聚落文化遗产数字化技术与应用”湖南省重点实验室, 中国湖南 衡阳 421002;

3. 湖南师范大学 资源与环境科学学院, 中国湖南 长沙 410081;

4. 湖南师范大学 地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室, 中国湖南 长沙 410081)

【摘要】: 基于资源环境承载力的内涵,从资源承载力、环境承载力、生态承载力三方面构建湖南省资源环境承载力预警指标体系,运用灰色关联投影法(GRPM)模型对 2004—2017 年湖南省资源环境承载力警情现状进行分析,进而运用径向基函数神经网络(RBFNN)模型对 2018—2022 年湖南省资源环境承载力警情演变趋势进行预测,结果表明:①总体而言,2004—2017 年,湖南省资源环境承载力的警情灰色关联投影值呈波动下降态势,警度由“重警”(橙灯)下降到“中警”(黄灯)。2018—2022 年,其警情灰色关联投影值将进一步波动下降,但幅度不大,警度将保持“中警”(黄灯)不变。②就各子系统而言,2004—2017 年,湖南省资源环境承载力各子系统的警情灰色关联投影值均有所下降,警度均由“重警”(橙灯)下降至“中警”(黄灯)。2018—2022 年,资源承载力和生态承载力子系统将保持“中警”(黄灯)水平,环境承载力子系统将进一步下降至“轻警”(蓝灯)。③制约湖南省资源环境承载力警情缓解的主要因素包括人均耕地面积、单位工业增加值用水量、单位国土面积 SO₂ 排放强度、污水处理率、工业固体废物综合利用率、单位耕地面积化肥施用量、人均公园绿地面积、自然保护区面积占国土面积比重、湿地面积比重。

【关键词】: 生态文明建设 资源环境承载力 预警 GRPM 模型 RBFNN 模型

【中图分类号】: K909 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2020) 01-0187-010

资源环境承载能力监测预警是对承载力各构成要素及其组合的变化规律的预言预判,对未来可能出现的承载力危险进行报告,以避免或缩小因承载力临界超载或超载带来的损失^[1],可为区域可持续发展战略的制定提供重要依据^[2-3]。近年来,随着我国社会经济的快速发展、人口的不断增长及城市化、工业化进程的不断加快,对资源环境的影响和破坏程度也在不断增加,人口、资源、环境、发展之间的矛盾日趋尖锐。为有效协调社会经济发展与资源环境保护之间的关系,推进生态文明建设,国家高度重视开展资源环境承载力预警工作,相继出台了《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》《关于加快推进生态文明建设的意见》《生态文明体制改革总体方案》《关于建立资源环境承载能力监测预警长效机制的若干意见》等政策文件,对资源环境承载力预警工作提供了方向和指引。

鉴于资源环境承载力预警对区域可持续发展的指导意义,相关研究也引起了国内外学者的关注,成为承载力研究的重要领

作者简介: 徐美(1983-),女,湖南益阳人,博士,讲师。主要研究方向为生态经济与生态旅游、区域可持续发展。
E-mail:461355118@qq.com。刘春腊(1985-),男,湖南衡阳人,博士,副教授。主要研究方向为区域经济、人文地理。
E-mail:liuchunla111@163.com。

基金项目: 教育部人文社会科学研究项目(16YJC840012);湖南省哲学社会科学基金项目(16YBQ076);湖南省教育厅优秀青年项目(18B190);湖南省社科成果评审委员会课题(XSP19YBC287);中南林业科技大学国家社会科学基金预研项目(2017YY005);“聚落文化遗产数字化技术与应用”湖南省重点实验室开放基金项目(JL18K05);湖南省“人居环境学”研究基地开放基金项目(RJ18K01)。

域^[4-7]，学者们结合不同地区、不同资源的实际，在预警理论、预警指标、预警方法、区域实证等领域开展了诸多有益探索。预警理论上，预警的理论模型^[1,8-9]、学术思路^[10-11]、基本概念^[1,12]、建设内容^[13]、技术方法^[1,12,14-15]等探讨较多。预警指标上，学者们结合不同区域实际提出了不少指标体系，如 PSR 体系^[16]、“水资源—水环境—大气环境—土地—生态”体系^[17]、“基础评价指标—专项评价指标—过程评价指标—‘一票否决’指标—部门红线管控指标”体系^[11]等。预警方法上，状态空间法^[18-19]、风险熵模型^[20]、指数法^[12]、层次分析法^[21]、灰色 GM(1,1) 模型^[22]、BP 神经网络^[18-19]、系统动力学模型^[23-25]、景气指数法^[26]、TOP-SIS^[27]等方法运用较多。区域实证上，关注重点包括城市^[17,28]、岛屿^[29]、生态脆弱区^[21]、海域及沿海地区^[18,30]等人地关系较为紧张的区域。概括而言，当前对资源环境承载力预警的研究，已由土地、水、生态、海洋（海域）等单项资源预警发展到包括资源、环境、生态等在内的综合承载能力预警，研究方法也已由定性的理论探讨和分析转向定量的综合评价，在理论和方法上均取得了明显进展，为区域可持续发展战略的制定提供了重要参考。但总体而言，学者们对资源环境预警的认识仍存在一定差异，统一的理论和方法体系尚未形成，预警指标、阈值、标准等问题有待进一步深入研究，更加精确合理的警情动态预警模型有待继续开发；研究重点也以现状承载力警情的静态分析、评价和分区为主，对警情未来演变趋势的预测预警研究较少；研究对象则重点关注中小尺度的城市和区域，关于省域资源环境承载力的预警成果不多。有鉴于此，本文尝试以湖南省为例，对其资源环境承载力预警问题进行系统探讨，以期在省域资源环境承载力预警研究的理论和方法创新提供一定参考。

1 研究区概况

湖南省地处长江以南，位于我国东部沿海地区和中西部地区过渡带、长江开放经济带和沿海开放经济带结合部，区内地形多样，土地肥沃，资源丰富，是著名的“有色金属之乡”和“非金属矿之乡”。近年来，湖南高度重视生态文明建设、资源节约集约利用和生态环境保护工作，资源环境承载力不断增强。2017 年，全省人均耕地面积 0.057hm²、人均水资源量 2795.5m³、污水处理率 95.5%、工业固体废物综合利用率 81.96%、人均公园绿地面积 9.99m²、森林覆盖率 59.68%，有力地支撑了全省社会经济的健康持续发展。但与此同时，随着全省人口规模的不断增长和工业化、城镇化步伐的进一步加快，加之经济发展方式仍较粗放、能源资源短缺、可开发的空间有限、生态环境脆弱等因素的制约，全省面临的资源紧张、环境污染、生态破坏问题仍较明显，开展资源环境承载力预警研究，系统分析全省资源环境承载力的警情格局及其演变趋势、影响因素等问题，对其平衡发展与保护的关系，推进人地关系的协调、主体功能区战略和生态文明战略的实施具有重要意义。

2 预警指标体系及指标安全标准值的确定

2.1 预警指标体系的建立

资源环境承载能力是指作为承载体的自然基础对作为承载对象的人类生产生活活动的支持能力，其中的自然基础包括资源、环境、生态、灾害等影响人类生产生活活动的所有自然条件^[11]。基于这一概念可知，资源环境承载力包括资源承载力、环境承载力、生态承载力、灾害承载力四个方面。鉴于灾害的不确定性，有些灾害无法预测，考虑这一实际及数据的可得性，本文暂不考虑灾害承载力，仅从资源承载力、环境承载力、生态承载力三个方面对资源环境承载力预警进行衡量。在此基础上，遵循体系构建的典型性、代表性、综合性等原则，参考相关学者有关成果^[21,31]，选取 14 个具体指标构建湖南省资源环境承载力预警指标体系（表 1）。

表 1 湖南省资源环境承载力预警指标体系

系统	子系统	指标(代码)	单位	指标性质
资源承载力	土地资源承载力	人均耕地面积(X1)	ha	+
		城市人均建设用地面积(x2)	m ²	-
	水资源承载力	人均水资源量(X3)	m ³	+
		单位工业增加值用水量(X4)	m ³ /10 ⁴ 元	-

环境承载力	大气环境承载力	PM10 浓度 (X5)	ug / m ³	-
		单位国土面积 SO ₂ 排放强度 (X6)	t / km ²	-
	水环境承载力	重要江河湖泊水功能区水质达标率 (X7)	%	+
		污水处理率 (X8)	%	+
	土壤环境承载力	工业固体废物综合利用率 (X9)	%	+
		单位耕地面积化肥施用量 (x10)	kg / hm ²	-
生态承载力	生态空间承载力	人均公园绿地面积 (X11)	m ²	+
		自然保护区面积占国土面积比重 (X12)	%	+
	生态资源承载力	森林覆盖率 (X13)	%	+
		湿地面积比重 (X14)	%	+

注：“+”指标即指标值越大，承载力越强，警度越小；“-”指标即指标值越大，承载力越小，警度越大。

2.2 指标安全标准值的确定

资源环境承载力预警指标安全标准值，即资源环境承载力处于可载的安全状态，不存在超载风险的值，一旦超过该值，资源环境就会面临一定的超载风险，它是判断承载力警情状况的重要依据。结合湖南省实际，本文综合运用如下方法确定指标安全标准值：(1)参考国际、国家、相关行业、相关领域标准；(2)参考国家、湖南省相关控制性指标要求；(3)参考国际先进地区水平、全国平均水平并结合湖南区域实际综合确定。各指标安全标准值见表 2。

表 2 湖南省资源环境承载力预警指标安全标准值

指标代码	安全标准值	确定依据
X1	0.09	全国平均水平
X2	105	依据《城市用地分类与规划建设用地标准》确定
X3	3000	国际公认标准依据《湖南省实行最严格的水资源管理制度
X4	57.5	考核办法》和《湖南省“十三五”水资源消耗总量和强度双控行动实施方案》确定
X5	70	国家二级标准
X6	0.5	参考美国等发达国家水平确定
X7	92	依据《湖南省实行最严格的水资源管理制度考核办法》确定
X8	100	参考国家生态文明建设示范县、市指标标准并结合湖南区域实际
X9	90	参考国家生态文明建设示范县、市指标标准
X10	255	国际公认标准 参考国家生态文明建设示范县、市指标标准
X11	13	并结合湖南区域实际
X12	14.3	全国平均水平
X13	60	参考国家生态文明建设示范县、市指标标准
X14	12.7	参考加拿大等世界先进国家水平

2.3 数据来源

本文的数据主要来源于 2005—2018 年《湖南统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》及 2004—2017 年湖南省土地利用现状变更数据、《湖南省环境状况公报》和《湖南省环境质量状况》报告。

3 研究方法

3.1 警情评估方法

资源环境承载力预警系统涉及的要素多样而复杂，其评估信息的不确定性特点明显，为典型的灰色系统^[32]。而灰色关联投影法（Grey Relation Projection Method, GRPM）从矢量投影的角度探讨多目标决策与评价^[33]，对于灰色系统问题的适应性很强^[32]，有利于提高研究结果的客观性。有鉴于此，本文尝试运用该方法对湖南省资源环境承载力警情状况进行评估。其计算过程为：

3.1.1 对预警指标进行标准化处理

设 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, 14; j=1, 2, \dots, 14$) 为第 i 年第 j 个预警指标值，则标准化公式为：

若 x_{ij} 为正指标，则：
$$y_{ij} = \begin{cases} 1 - x_{ij}/X_j, & x_{ij} < X_j \\ 0, & x_{ij} \geq X_j \end{cases}$$

若 x_{ij} 为逆指标，则：
$$y_{ij} = \begin{cases} 1 - X_j/x_{ij}, & x_{ij} > X_j \\ 0, & x_{ij} \leq X_j \end{cases}$$

式中： X_j 为第 j 个预警指标的承载力安全标准值； y_{ij} 为第 i 年第 j 个指标的标准化值，其取值范围为 $[0, 1]$ ，且值越大，说明该指标的警情越严重。

3.1.2 求解灰色关联系数

由于 $y_{ij} \in [0, 1]$ ，且其值越大警情越严重，则可定义比较样本为 $Y_{0j}=1$ 。由此以 y_{ij} 为子序列、 Y_{0j} 为母序列，可求得评估样本 y_{ij} 与比较样本 Y_{0j} 的灰色关联系数，公式为：

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |Y_{0j} - y_{ij}| + \rho \max_i \max_j |Y_{0j} - y_{ij}|}{|Y_{0j} - y_{ij}| + \rho \max_i \max_j |Y_{0j} - y_{ij}|}$$

式中： ξ_{ij} 为灰色关联系数； ρ 为分辨系数，通常取 0.5 ^[34]。

3.1.3 计算指标权重

为增强研究的客观性，本文运用熵权法来计算指标权重，其公式为^[35]：

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^{14} (1 - e_j)}$$

$$e_j = -k \sum_{j=1}^{14} q_{ij} \ln q_{ij}$$

$$q_{ij} = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^n P_{ij}} \left(\text{当 } q_{ij} = 0 \text{ 时, } q_{ij} \ln q_{ij} = 0 \right)$$

式中： w_j 为第 j 个指标的权重； $k=1/\ln 14$ ； $\ln$ 为自然对数； p_{ij} 为运用极差法求得的原始指标归一化值。

为使后面计算得到的比较样本的灰色关联投影值为 1，需要满足单位化约束条件： $\sum_{j=1}^{14} W_j'^2 = 1$ ，为此，要对权重进行单位化处理，其公式为：

$$W_j' = \frac{w_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^{14} w_j^2}}$$

式中： W_j' 为 w_j 单位化处理后的值。

3.1.4 计算灰色关联投影值

将每个评估样本看成一个行向量，则灰色关联投影角为 y_i 与 Y_0 之间的夹角 θ_i ，可求得 θ_i 的余弦 $\cos_i$ 为：

$$\cos_i = \frac{y_i \times Y_0}{\|y_i\| \times \|Y_0\|} = \frac{\sum_{j=1}^{14} (W_j' \xi_{ij} W_j')}{\sqrt{\sum_{j=1}^{14} (W_j' \xi_{ij})^2} \times \sqrt{\sum_{j=1}^{14} W_j'^2}}$$

式中： $\cos_i \in (0, 1]$ ，其值越大，表明评价样本 y_i 越接近比较样本 Y_0 。进一步将其与 y_i 的模相结合，求解灰色关联投影值，则可准确反映 y_i 与 Y_0 的接近程度^[32-33]，公式为：

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{14} [(W_j' \xi_{ij})^2]}$$

$$T_i = \cos_i \times d_i = \frac{\sum_{j=1}^{14} (W_j'^2 \xi_{ij})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{14} (W_j'^2)}}$$

式中： d_i 为 y_i 的模； T_i 为 y_i 在 Y_0 上的灰色关联投影值，其取值范围为 $[0, 1]$ ，且其值越大，表明评估样本越接近比较样本，资源环境承载力警情越严重，反则反之。

3.2 警情预测方法

如何提高预测精度是预测研究的关键，考虑到径向基函数神经网络（Radial Basis Function Neural Network, RBFNN）模型学习速度快、逼近收敛能力强，对提高预测效率和精度具有重要意义^[36-37]，本文尝试将该方法运用到湖南省资源承载力警情演变趋势预测中来。

3.2.1 RBFNN 的运行原理

RBFNN 由 JMoody 等于 1988 年提出，是一种以函数逼近理论为基础的前向神经网络^[38]，其网络结构包括输入层、隐含层和输出层三层，运行原理为：隐含层通过基函数执行一种非线性变换，将输入空间从低维度特征空间映射到高维度特征空间，输出层则在高维特征空间实现线性加权组合^[37, 39]，网络流程图如图 1。

RBFNN 最常用的径向基函数是 Gauss 函数，即对于任意的输入向量 $Z \in R^n$ (R^n 为输入样本集)，有：

$$\Phi(\|Z - K_u\|) = \exp\left[-\frac{\|Z - K_u\|^2}{2\delta_u^2}\right] \quad (u = 1, 2, \dots, n)$$

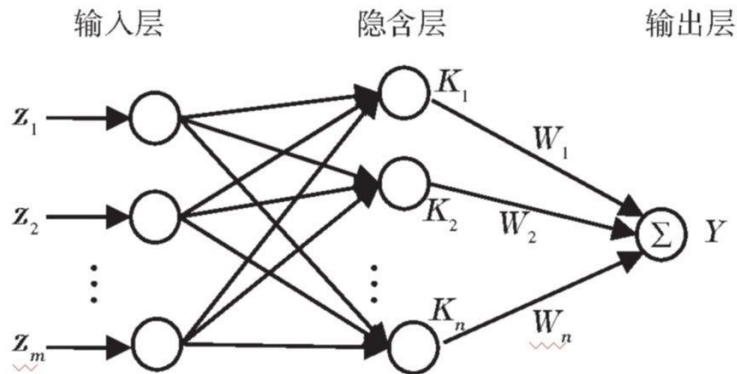


图 1 RBFNN 网络流程图

式中： $\Phi(\|Z - K_u\|)$ 为隐含层第 u 个神经元节点的输出； K_u 为第 u 个隐含层节点 Gauss 函数的中心点； $\|Z - K_u\|^2$ 为 X 向量与 K 向量之差的模； δ_u 为第 u 个隐含层节点的归一化参数； n 为隐含层节点数。

3.2.2 RBFNN 的学习算法

RBFNN 需求解的参数主要为： K_u 、 δ_u 以及隐含层到输出层的权值 W_v ，其网络学习常采用自组织学习法，包括两个阶段。

a) 无监督学习阶段：运用 K-means 聚类法对训练样本的输入量进行聚类，求解基函数的中心 K_u 和 δ_u 参数。

b) 监督学习阶段：运用最小二乘法求解权重 W_v ($v=1, 2, \dots, n$)，其算法步骤为：

(1) 用最小、最大规范化方法，使属性归一到网络的处理范围。

(2)用径向基函数计算隐含层的输出值 Y_h 。

(3)求输出层第 v 个神经元的输出值 Y_v 。其公式为：

$$Y_v = f\left(\sum_{u=1}^n W_{vu} Y_{hu}\right)$$

式中： Y_{hu} 为隐含层第 u 个神经元的输出值； W_{vu} 为隐含层第 u 个神经元至输出层第 v 个神经元的权重，函数 f 取 Sigmoid 形式。

(4)计算输出层误差。其公式为：

$$\Delta Y_v = Y_v(1 - Y_v)(y_v - Y_v)$$

式中： ΔY_v 为输出误差； y_v 为第 v 个神经元的实际值。

(5)对 ΔW 进行调整，直到网络误差达到要求，公式为：

$$\Delta W = \varepsilon \times \Delta Y_v(1 - Y_v)(y_v - Y_v), W'_v = W_v + \Delta W$$

式中： W'_v 为调整后的权重； ε 为学习速率。

当 K_h 、 δ_u 、 W_v 确定后，即可用训练好的模型进行预测，求出给定某一输入时，网络对应的输出值^[39]。

3.3 警情缓解的障碍因素分析方法

借鉴相关学者的研究成果^[33]，采用障碍度模型对警情影响因素进行分析，其公式为：

$$Q = L_j \times \frac{w_j}{\sum_{j=1}^{14} L_j w_j} \times 100\%$$

式中： Q 为各指标对资源环境承载力警情缓解的影响程度，即障碍度； L_j 为第 j 个预警指标值与安全标准值的差距，即 $L_{ij}=1-X_{ij}$ 。

3.4 预警结果划分标准

运用等分法，依据灰色关联投影值将湖南省资源环境承载力预警结果划分为五级，见表 3。

表 3 湖南省资源环境承载力预警结果划分标准

灰色关联投影值	[0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1.0]
---------	----------	------------	------------	------------	------------

预警等级	无警	轻警	中警	重警	巨警
信号灯	绿灯	蓝灯	黄灯	橙灯	红灯

4 结果及分析

4.1 警情演变趋势预测过程及结果

运用 GRPM 模型求得 2004—2017 年湖南省资源环境承载力及各子系统的灰色关联投影值，将其作为预测基础数据。在此基础上，运用迭代一步预测法，以年度为时间序列构建预测模型，对 2018—2022 年湖南省资源环境承载力及各子系统的警情演变趋势进行预测。

由于 Matlab 的神经网络工具箱提供了 newrb 和 newrbe 两个 RBFNN 函数，可以通过调用方式进行网络模型的设计与仿真模拟，方便、快捷地实现预测过程，本文借助该软件编写程序进行预测。依据 RBFNN 运行原理，在仿真模拟前，需要设置输入层和输出层神经元节点数，其中输入层神经元节点数即自变量个数，由于迭代一步预测法对其数量没有具体规定，本文综合运用 3、4、5、6 等值对湖南省资源环境承载力及各子系统进行试验和对比，最终确定其最佳个数为 4（即以 2004—2007 年资源环境承载力系统或各子系统的灰色关联投影值预测其 2008 年的灰色关联投影值，依此类推）；输出层神经元节点数即因变量个数，依据资源环境承载力预警的实际，本文旨在探求各预测年份的资源环境承载力或各子系统的灰色关联投影值，故而确定为 1。

在此基础上，分别以 2004—2016 年湖南省资源环境承载力及各子系统的灰色关联投影值构造输入样本集，以 2008—2017 年湖南省资源环境承载力及各子系统的灰色关联投影值作为期望输出值，构建湖南省资源环境承载力及各子系统的警情演变趋势预测训练样本，运用 Matlab 应用软件编写程序，调用 newrb 工具箱构造 RBFNN 进行样本仿真模拟，结果如图 2。

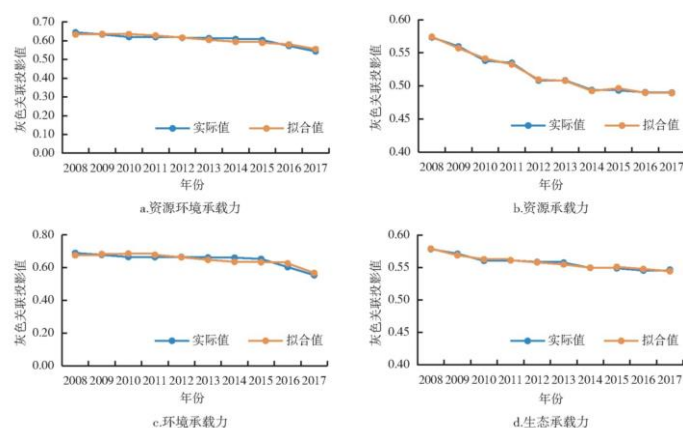


图 2 各训练样本 RBFNN 仿真模拟情况

为进一步检验模型拟合效果，分别运用 GM(1, 1) 模型、一元线性回归模型对湖南省资源环境承载力及各子系统的灰色关联投影值进行拟合，进而运用均方根误差检验方法，对 RBFNN 的拟合误差与灰色 GM(1, 1) 模型、一元线性回归模型的拟合误差进行对比，结果见表 4。由表 4 可知，RBFNN 的均方根误差均小于灰色 GM(1, 1) 模型和一元线性回归模型，说明 RBFNN 拟合效果好，有利于更好地预测湖南省资源环境承载力演变趋势。据此预测得 2018—2022 年湖南省资源环境承载力及各子系统的警情变化趋势，结果如图 3、图 4。

表 4 不同预测方法拟合误差对比

预测方法	资源环境承载力	资源承载力	环境承载力	生态承载力
RBFNN	0.0101	0.0018	0.0158	0.0018
灰色 GM (1, 1)	0.0107	0.0072	0.0180	0.0022
一元线性回归	0.0118	0.0090	0.0216	0.0032

4.2 预警结果分析

4.2.1 资源环境承载力预警结果分析

2004—2017 年，湖南省资源环境承载力警情灰色关联投影值呈波动状下降态势，由 0.6689 下降到 0.5431，警度由“重警”下降到“中警”（图 3），信号灯则由“橙灯”转变为“黄灯”（表 5），资源环境承载能力不断增强。近年来，随着“两型社会”建设、生态文明、生态强省等战略的深入推进，湖南省对资源节约、环境保护和生态建设的重视程度不断提升，相继出台了最严格的节约用地制度、最严格的水资源管理制度、主要污染物减排制度等政策制度，开展了大气污染防治专项行动等具体行动，划定了全省生态保护红线，在这些政策制度和战略行动的影响下，全省国土资源、水资源集约利用水平明显提升，水环境、大气环境质量逐渐好转，公园绿地、森林等生态空间面积不断增加，资源环境承载力警情逐步下降。

按此发展态势，2018—2022 年，随着生态文明战略的进一步深入推进及各类资源环境保护和管控制度的进一步深入实施，湖南省资源环境承载力警情的灰色关联投影值将进一步下降，到 2022 年可望下降至 0.4233。但总体而言，全省资源环境承载力警情下降幅度不大，其灰色关联投影值无法突破“中警”的下限，警度将继续保持“中警”，信号灯为“黄灯”，资源环境承载力警情不能发生根本好转（图 3，表 5），面临的问题仍较明显、形势仍不容乐观。究其原因，主要是由于受产业结构不优、城镇化和工业化快速发展等因素的影响，全省主要污染物减排和江河水质全面达标仍面临较大困难，在一定程度上影响和制约了资源环境承载力的提升。需要进一步加大生态强省战略实施力度，深入推进资源性产品价格改革、产业准入退出提升、排污权交易等资源环境管理体制改革，大力推进产业高质量发展和经济绿色转型，建立跨区域、跨城乡、跨部门的环境共治共管机制，全面推进全省资源环境质量和承载能力的提升。

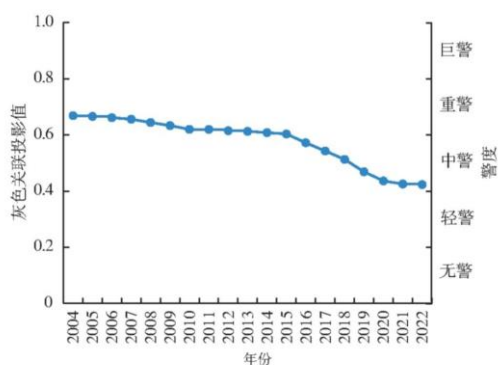


图 3 2004—2022 年湖南省资源环境承载力预警结果

注：2018—2022 年的为预测结果，下同。

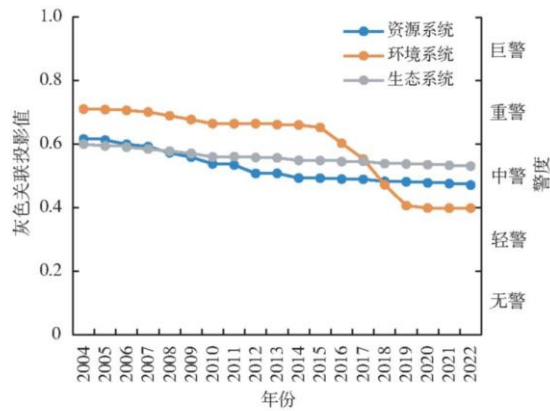


图 4 2004-2022 年湖南省资源环境承载力子系统预警结果

4.2.2 各子系统预警结果分析

(1)资源承载力系统预警结果分析。2004—2017 年，湖南省资源承载力系统的警情灰色关联投影值由 0.6166 下降到 0.4899，警度相应地由“重警”下降至“中警”，信号灯则由“橙灯”转变为“黄灯”，警情状况有一定好转（图 4，表 5）。近年来，湖南省强化土地资源、水资源等各类资源保护和节约利用，实行最严格的耕地保护制度、最严格的水资源管理办法、水资源消耗总量和强度双控行动、建设用地总量和强度双控制度等政策制度，耕地面积较为稳定，单位工业增加值水耗明显下降，在一定程度上带动了全省资源承载力的提升及其警情的下降。但总体而言，受人口增长、城市化发展、资源本底数量、资源利用水平等因素的影响，全省资源承载力面临的形势仍较严峻，突出表现在：人均耕地面积不到全国平均水平的 2/3，也低于世界粮农组织确定的土地资源压力临界值（0.08hm²）^[40]，人地矛盾较为突出；城市建设用地面积不断拓展，人均面积偏高，集约利用水平有待提升；人均水资源量低于 3000m³，按照国际公认标准，为轻度缺水地区；水资源利用方式仍较粗放，万元工业增加值用水量与最严格的水资源控制标准仍有一定差距。

表 5 2004-2022 年湖南省资源环境承载力预警信号灯状况

年份	资源环境承载力	资源环境承载力子系统		
		资源系统	环境系统	生态系统
2004	★	★	★	★
2005	★	★	★	▲
2006	★	★	★	▲
2007	★	▲	★	▲
2008	★	▲	★	▲
2009	★	▲	★	▲
2010	★	▲	★	▲
2011	★	▲	★	▲
2012	★	▲	★	▲
2013	★	▲	★	▲
2014	★	▲	★	▲
2015	★	▲	★	▲
2016	▲	▲	★	▲

2017	▲	▲	▲	▲
2018	▲	▲	▲	▲
2019	▲	▲	▲	▲
2020	▲	▲	◆	▲
2021	▲	▲	◆	▲
2022	▲	▲	◆	▲

注：★表示橙灯，▲表示黄灯，◆表示蓝灯。

按此发展态势，今后一段时期，随着各类资源保护和管控力度的进一步加大、节约水平的进一步提升、利用技术的进一步发展，全省资源承载力警情将进一步下降，到2022年其灰色关联投影值将下降到0.4717，但总体而言幅度有限，警度仍保持“中警”水平，信号灯则保持“黄灯”（图4，表5），面临的形势仍不容乐观。需要进一步创新资源利用和管理模式，合理调控和配置各类用地规模，提高建设用地集约利用水平；健全耕地保护的长效机制，推进其数量、质量、生态“三位一体”保护；强化工农用水总量和效率控制，积极推进城乡生活节水，严守水资源管理“红线”，逐渐缓解水资源供需矛盾。

(2)环境承载力系统预警结果分析。2004—2017年，湖南省环境承载力警情下降较为明显，其灰色关联投影值由0.7107下降至0.5540，警度由“重警”下降至“中警”，信号灯则由“橙灯”转变为“黄灯”（图4，表5）。这与近年全省强化打好大气、水、土壤污染防治“三大战役”，推进多污染源综合治理和主要污染物减排，加大环境风险防控和环保监管执法等因素密切相关，在这些利好政策和制度的引导下，全省环境质量持续改善，承载能力持续提升，警度呈持续下降态势。

按此发展态势，2018—2022年，随着最严格的环境保护制度的深入推进和一系列环境监测、管理、许可、监督、治理措施的不断健全完善，全省环境承载力警情将进一步下降，到2022年其灰色关联投影值将下降到0.3991，警度则进一步下降至“轻警”，信号灯也将由“黄灯”转变为“蓝灯”（图4，表5），环境质量将进一步好转，承载力将进一步提升。但与“无警”的标准和要求相比，全省环境承载力距其上限仍有一定差距，究其原因，主要包括以下几方面：一是SO₂、PM₁₀等污染物排放量仍处高位，大气污染问题尚未全面遏制；二是主要江河功能区水质仍未全面达标，水污染问题还较明显；三是工业固体废弃物处理水平依然不高，单位耕地面积化肥施用量不断增加，土壤污染问题仍较严峻。在今后的发展中，需要进一步加大整治和管控力度，推进环境质量的总体改善和全面提升。

(3)生态承载力系统预警结果分析。2004—2017年，湖南省生态承载力警情灰色关联投影值呈波动状略微下降态势，由0.6003下降到0.5465，警度由“重警”转变为“中警”，信号灯则由“橙灯”变为“黄灯”（图4，表5）。近年来，湖南坚持“绿水青山就是金山银山”的发展理念，强化山水林田湖等自然生态系统修复、生物多样性保护、生态保护红线管控和城镇绿色发展，“四水”协同、“江湖”联动的生态安全屏障得到不断稳固，生态文明建设水平得到不断提升，为全省生态承载力的提升提供了重要保障。但由于历史积累、自然地理条件、区域发展水平、社会经济发展等因素的影响，全省生态承载力提升面临的压力依然较大，自然保护区面积占比、人均公园绿地面积等指标与安全标准值相比，仍存在一定差距；湿地面积更是呈下降趋势，需要进一步加大保护和发展力度。值得注意的是，2017年的警情灰色关联投影值略大于2016年，究其原因，主要是因为其湿地面积比重、人均公园绿地面积均略小于2016年，也进一步说明湿地保护和公园绿地建设对全省生态承载力的提升具有重要意义。

按此发展态势，2018—2022年，随着生态文明理念的进一步深入人心，全省生态承载力的警情灰色关联投影值将继续波动状略微下降，到2022年将下降至0.5312，但总体而言，下降幅度不大，警情不会发生根本变化，警度将继续保持“中警”，信号灯也将保持“黄灯”（图4，表5）。需要以生态文明理念为指导，进一步加强生态保护能力建设，加大湿地、森林、草地等各类生态用地保护和修复力度、自然保护区和重点生态功能区建设和管理力度、城乡绿化建设和恢复力度，推动全省生态承载力警情的根本好转。

4.3 警情缓解的主要障碍因素分析

参考相关学者成果,以障碍度 $\geq 5\%$ 为标准识别主要障碍因素^[41]。依据障碍度模型计算结果可知,2004—2017年,人均耕地面积(x_1)、单位工业增加值用水量(x_4)、单位国土面积 SO_2 排放强度(x_6)、污水处理率(x_8)、工业固体废物综合利用率(x_9)、单位耕地面积化肥施用量(x_{10})、人均公园绿地面积(x_{11})、自然保护区面积占国土面积比重(x_{12})、湿地面积比重(x_{14})9个指标的年均障碍度 $\geq 5\%$ (表6),为制约湖南省资源环境承载力警情缓解的主要因素。其中人均耕地面积、单位工业增加值用水量为资源承载力指标。近年来,随着人口的增加和城镇化、工业化的发展,全省人地矛盾越来越突出,耕地保护面临的压力也越来越大,采取措施推进人地关系的协调和耕地数量、质量的稳步提升,应成为关注的重点之一;湖南虽为水资源大省,水资源总量丰富且近年节水成效显著,但与最严格的水资源控制标准相比,差距仍较明显,产业用水量尤其是工业用水量有待进一步降低。单位国土面积 SO_2 排放强度、污水处理率、工业固体废物综合利用率、单位耕地面积化肥施用量为环境承载力指标。单位国土面积 SO_2 排放强度的障碍度达26.3942,说明近年湖南虽采取了一系列措施推进 SO_2 减排,也取得了明显成效,但其排放量依然较大,对资源环境承载力提升产生的制约仍较明显,需要进一步加大减排力度;近年来,全省污水、工业固体废物处理水平明显提升,污水处理率、工业固体废物综合利用率与安全标准值的差距逐步缩小,其对资源环境承载力警情缓解的制约也在逐渐缩小(到2017年障碍度分别下降至1.3683、3.0813),按此发展态势,今后几年,随着全省环保力度的加大,其障碍度有望进一步下降甚至消除;随着全省农业生产水平的提升,单位耕地面积化肥施用量也一直居高,对土壤安全造成严重威胁,需要采取措施加以控制。人均公园绿地面积、自然保护区面积占国土面积比重、湿地面积比重为生态承载力指标。近年,湖南人均公园绿地面积明显增加,但与国家生态文明建设示范市标准相比,仍有较大提升空间;自然保护区面积占国土面积比重不到全国平均水平的一半,需要加大工作力度;湿地面积比重呈下降态势,面临的压力越来越大,应引起重视。

表6 2004—2017年湖南省资源环境承载力各指标障碍度均值

指标代码	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
Z	5.9923	0.8059	1.1685	7.4532	0.9516	26.3942	0.6944	6.0249	5.2643	18.0776	5.2937	10.9601	0.6693	10.2499

5 结论与展望

5.1 结论

运用GRPM对2004—2017年湖南省资源环境承载力警情状况进行分析,进而运用RBFNN对2018—2022年湖南省资源环境承载力警情演变趋势进行预测,研究结果能够基本反映湖南省资源环境承载力的警情状况及其演变趋势,说明将GRPM与RBFNN结合开展资源环境承载力预警是可行的,且RBFNN的拟合误差较灰色GM(1,1)模型、一元线性回归模型小,有利于提高预测精度,对丰富资源环境承载力预警的方法体系具有一定意义。

总体而言,2004—2017年,湖南省资源环境承载力警情灰色关联投影值呈波动下降态势,警度由“重警”(橙灯)下降到“中警”(黄灯),2018—2022年,其灰色关联投影值将进一步下降,但下降幅度有限,警度仍处于“中警”(黄灯)。就各子系统而言,2004—2017年,湖南省资源环境承载力各子系统的警情灰色关联投影值均有所下降,警度均将由“重警”(橙灯)转变至“中警”(黄灯);2018—2022年,资源承载力、生态承载力子系统将保持“中警”(黄灯)水平,环境承载力子系统将进一步下降至“轻警”(蓝灯),各系统承载力提升均面临一定压力。

近14年来,湖南省资源环境承载力警情未得到根本性好转,这与其人均耕地面积和人均公园绿地面积较小,自然保护区面积比重和湿地面积比重偏低,污水处理率和工业固体废物综合利用率不高,单位工业增加值用水量、单位国土面积 SO_2 排放强度和单位耕地面积化肥施用量较大等因素密切相关。今后一段时期,面对资源环境约束趋紧、生态系统退化的严峻形势,深化生

态文明体制机制,推进资源环境承载力的提升,应成为湖南发展中关注的重点之一。结合湖南实际,可重点抓好如下几方面工作:(1)强化资源能源节约集约利用,严格控制非农建设占用耕地,稳步提升水资源和土地资源利用效率及水平,缓解资源供需矛盾和压力。(2)标本兼治,统筹推进大气、水、土壤污染综合治理和主要污染物减排,积极倡导绿色生产和绿色生活,系统防治工业污染、生活污染、农业面源污染等污染源,全面改善区域环境质量。(3)落实主体功能区战略,加大湿地、林地、草地保护力度,严守生态保护红线,减少人为因素对自然生态系统的干扰和破坏,维护“一湖三山四水”的生态安全格局。(4)统筹资源环境与社会经济发展,以保护自然生态系统为前提、以水土资源承载能力和环境容量为基础,合理规划社会经济布局,有序开发各类资源能源,实现资源环境承载力与社会经济发展的协调。

5.2 展望

资源环境承载力涉及诸多要素,且各要素间相互影响、相互制约,系统而全面的预警指标体系是研究的关键,受资料、数据等的限制,能源资源、灾害承载力等指标未考虑,个别环境、生态指标也未纳入。同时,本文仅对湖南省资源环境承载力的警情现状及其演变趋势进行了分析和预测,关于其警情的区域格局、空间分异、时空动态演变机制、调控机制等问题,是下一步研究的方向。此外,基于大数据等的资源环境承载力预警方法,也值得深入探索。

参考文献:

- [1] 樊杰,周侃,王亚飞.全国资源环境承载能力预警(2016版)的基点和技术方法进展[J].地理科学进展,2017,36(3):266-276.
- [2] 邓伟.山区资源环境承载力研究现状与关键问题[J].地理研究,2010,29(6):959-969.
- [3] Wang R, Cheng J H, Zhu Y L, et al. Evaluation on the coupling coordination of resources and environment carrying capacity in Chinese mining economic zones[J]. Resources Policy, 2017, 53(9):20-25.
- [4] Feng Z M, Sun T, Yang Y Z, et al. The progress of resources and environment carrying capacity: from single-factor carrying capacity research to comprehensive research[J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(2):125-134.
- [5] 封志明,杨艳昭,闫慧敏,等.百年来的资源环境承载力研究:从理论到实践[J].资源科学,2017,39(3):379-395.
- [6] 刘文政,朱瑾.资源环境承载力研究进展:基于地理学综合研究的视角[J].中国人口·资源与环境,2017,27(6):75-86.
- [7] 吕一河,傅微,李婷,等.区域资源环境综合承载力研究进展与展望[J].地理科学进展,2018,37(1):130-138.
- [8] Meadows D H, Meadows D L, Rander S J, et al. The limits to growth: a report for the club of rome's project on the predicament of mankind[M]. New York: Universe Books, 1972.
- [9] Rodríguez J, Mateos A. Carrying capacity, carnivore richness and hominin survival in Europe[J]. Journal of Human Evolution, 2018, 118:72-88.
- [10] 袁国华,郑娟尔,贾立斌,等.资源环境承载力评价监测与预警思路设计[J].中国国土资源经济,2014(4):20-24.
- [11] 樊杰,王亚飞,汤青,等.全国资源环境承载能力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程[J].地理科学,

2015, 35(1):1-10.

[12]徐卫华, 杨琰璞, 张路, 等. 区域生态承载力预警评估方法及案例研究[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3):306-312.

[13]洪亮, 黄露, 史晓明, 等. 湖北省资源环境承载能力监测预警长效机制建立初探[J]. 测绘通报, 2018(11):103-106.

[14]徐勇, 张雪飞, 周侃, 等. 资源环境承载能力预警的超载成因分析方法及应用[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3):277-285.

[15]Zuo Q. Review of research methods of water resources carrying capacity[J]. Advances in Science & Technology of Water Resources, 2017, 37(3):1-6, 54.

[16]朱玉林, 李明杰, 顾荣华. 基于压力-状态-响应模型的长株潭城市群生态承载力安全预警研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(12):2 057-2 064.

[17]贾滨洋, 袁一斌, 王雅璐, 等. 特大型城市资源环境承载力监测预警指标体系的构建——以成都市为例[J]. 观察, 2008, 46(12):54-57.

[18]李明, 董少戡, 张海红. 基于多维状态空间与神经网络模型的山东省海域承载力评价与预警研究[J]. 海洋通报, 2015, 34(6):608-615.

[19]董成森, 陈端吕, 董明辉, 等. 武陵源风景区生态承载力预警[J]. 生态学报, 2007, 27(11):4 766-4 776.

[20]Huang X, Bai H. Risk prediction of rural public security environmental carrying capacity based on the risk entropy[J]. Natural Hazards, 2018, 90(1):157-171.

[21]高洁, 刘玉洁, 封志明, 等. 西藏自治区水土资源承载力监测预警研究[J]. 资源科学, 2018, 40(6):1 209-1 221.

[22]张国庆. 辽宁省水资源承载力预警模型研究[J]. 科研与管理, 2018(8):75-78, 130.

[23]崔丹, 陈馨, 曾维华. 水环境承载力中长期预警研究——以昆明市为例[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3):1 174-1 184.

[24]张林波, 李文华, 刘孝富, 等. 承载力理论的起源、发展与展望[J]. 生态学报, 2009, 29(2):878-888.

[25]Del Monte Luna P, Brook B W, Zetinarejo M J, et al. The carrying capacity of ecosystems[J]. Global Ecology and Biogeography, 2004, 13(6):485-495.

[26]解钰茜, 吴昊, 崔丹, 等. 基于景气指数法的中国环境承载力预警[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1):440-448.

[27]Irankhahi M, Jozi S A, Farshchi P, et al. Combination of GIS-FM and TOPSIS to evaluation of urban environment carrying capacity (Case study: Shemiran City, Iran) [J]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2017, 14(6):1-16.

[28]周道静, 王传胜. 资源环境承载能力预警城市化地区专项评价: 以京津冀地区为例[J]. 地理科学进展,

2017, 36(3):359-366.

[29] 任保卫. 无居民海岛资源环境承载力监测与预警评价试点研究—以三沙湾为例[J]. 海洋环境科学, 2008, 37(4):545-551.

[30] Guyondet T, Comeau L A, Bacher C, et al. Climate change influences carrying capacity in a coastal embayment dedicated to shellfish aquaculture[J]. Estuaries&Coasts, 2015, 38(5):1 593-1 618.

[31] 叶有华, 韩宙, 孙芳芳, 等. 小尺度资源环境承载力预警评价研究—以大鹏半岛为例[J]. 生态环境学报, 2017, 26(8):1 275-1 283.

[32] 王枫, 董玉祥. 基于灰色关联投影法的土地利用多功能动态评价及障碍因子诊断[J]. 自然资源学报, 2015, 30(10):1 698-1 713.

[33] 吕锋, 崔晓辉. 多目标决策灰色关联投影法及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2002(1):103-107.

[34] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

[35] 黎枫, 陈亚宁, 李卫红. 基于熵权的集对分析法在水资源可持续利用评价中的应用—以塔里木河三源流地区为例[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4):723-730.

[36] 焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 神经网络七十年: 回顾与展望[J]. 计算机学报, 2016, 39(8):1 697-1 716.

[37] 曹文洁, 肖长来, 梁秀娟, 等. RBF 神经网络在地下水动态预测中的应用[J]. 水利水电技术, 2018, 49(2):43-48.

[38] 陈德军, 胡华成, 周祖德. 基于径向基函数的混合神经网络模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(2):122-125.

[39] 唐启义, 冯明光. DPS 数据处理系统—实验设计、统计分析及模型优化[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[40] 黎德川, 廖铁军, 刘洪, 等. 乐山市土地生态安全预警研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(3):141-147.

[41] 苏飞, 张平宇. 基于集对分析的大庆市经济系统脆弱性评价[J]. 地理学报, 2010, 65(4):454-464.