

安晶潭,张 爱,陈 凌,等. 基于系统动力学与模糊预警模型的畜禽养殖资源环境承载力预测[J]. 江苏农业科学,2016,44(4):440-444.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.04.124

基于系统动力学与模糊预警模型的 畜禽养殖资源环境承载力预测

安晶潭,张 爱,陈 凌,黄 成,程 波

(农业部环境保护科研监测所,天津 300191)

摘要:随着畜禽养殖业的快速发展,畜禽养殖污染已成为我国农业非点源污染的重要因素之一。云南省大理州是我国典型的农业州,畜禽养殖业在大理农业中占重要的地位。合理规划畜禽养殖业的发展对保护大理州环境以及畜禽养殖业的可持续发展起着积极的促进作用;畜禽养殖资源环境承载力作为一个综合指标,在畜禽养殖业发展规划的制定中有一定指导作用。以大理州为例,构建具有大理州地区特色的畜禽养殖资源环境承载力评价指标体系,运用系统动力学和模糊预警模型对大理州畜禽养殖资源环境承载力进行预测、预警研究。结果表明:系统动力学结合模糊预警模型在畜禽养殖规划环评研究中应用比较成功,具有较好的可行性;大理州畜禽养殖资源环境承载力近年来呈持续下降趋势,规划发展后期承载力下降幅度有所减缓;大理州畜禽养殖资源环境承载力预警结果为中警,应采取措改善大理州畜禽养殖资源环境承载力。

关键词:大理州;畜禽养殖;资源环境承载力;系统动力学模型;模糊预警

中图分类号: X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)04-0440-05

随着畜禽养殖业发展给环境带来的巨大压力和负面影响,畜禽养殖环境污染已成为我国农业非点源污染的主要因素之一。开展畜禽养殖规划环评,有利于从源头上控制畜禽养殖面源污染。在开展畜禽养殖规划环评过程中,畜禽养殖资源环境承载力分析是其中一个重要环节,能为畜禽养殖业规划提供科学依据^[1]。畜禽养殖资源环境系统是畜禽养殖系统、资源环境系统以及社会环境系统的协调与统一。畜禽养殖资源环境承载力是指在特定时空条件下,畜禽资源养殖环境系统在维持系统平衡和健康不受影响时所能支持畜禽养殖行为的最大能力。畜禽养殖资源环境承载力研究突破以往仅考虑畜禽养殖系统对畜禽养殖污染物承载的思维模式,体

现了畜禽养殖业与资源环境大系统的相互适宜性,为畜禽养殖业可持续发展以及区域发展规划提供了实际指导意义。近些年我国关于畜禽养殖领域的承载力研究不少,陈晓燕等分别在浙江省杭州市、黑龙江省等地区围绕畜禽粪便给环境带来的污染对畜禽养殖方面的承载力展开研究,在评价指标选取上仅考虑了畜禽养殖污染而忽略了社会环境、资源环境对畜禽养殖环境系统的影响^[2-3]。也有学者综合考虑了畜禽养殖、社会发展以及资源环境等影响因素,选取具有华北平原以及重庆市地区特色的评价指标对畜禽养殖方面的承载力进行分析研究^[4-5]。大理州是典型的农业州,根据《大理州年鉴 2012》中的畜禽出栏量和存栏量进行统计,计算出 2011 年大理州畜禽养殖总量达 854.917 万头生猪当量,较 2010 年增长 4.7%^[6]。其中生猪、肉牛和奶牛养殖量分别占总量的 45%、30% 和 16.5%。全州规模化养殖场达 2 256 个,规模化生猪养殖场占 52.3%。规模化畜禽养殖业快速发展,特别是大理州洱海周边是奶牛养殖的重点区域,由于畜禽粪污治理相对落后,大量的畜禽粪便和养殖污水直接排入江河、溪流与农田,导致洱海水质日益下降^[7]。洱海为大理州重点保护水域,为有效保护洱海生态,积极促进大理州畜禽养殖业可持续

收稿日期:2015-03-16

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(编号:2011-aepi-14)。

作者简介:安晶潭(1989—),女,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事农业环境工程效应评价研究。Tel:(022)23610057;E-mail:534336066@qq.com。

通信作者:张 爱,硕士,助理研究员,主要从事农业环境科学与工程研究。Tel:(022)23610057;E-mail:nybhbs@126.com。

[22]韩永伟,拓学森,高吉喜,等. 黑河下游重要生态功能区防风固沙功能辐射效益[J]. 生态学报,2010,30(19):5185-5193.

[23]周心澄,李广毅,薛智德,等. 毛乌素沙地生态经济型防护林体系效益研究(技术总报告)[J]. 水土保持研究,1995,22(2):36-69.

[24]叶功富,王小云,卢昌义,等. 不同生长发育阶段木麻黄海岸林的防风效应[J]. 海峡科学,2008,10(10):68-70.

[25] Bisal F, Hsieh J. Influence of moisture on erodibility of soil by wind [J]. Soil Science, 2010, 102(3):143-146.

[26] Bagnold R A. The physics of wind blown sand and desert dunes

[M]. London:Springer, 1941.

[27]海春兴,刘宝元,赵 焱. 土壤湿度和植被盖度对土壤风蚀的影响[J]. 应用生态学报,2002,13(8):1057-1058.

[28]熊 勇,赵翠薇. 山地城镇化进程中土地生态安全动态评价研究——以贵阳市为例[J]. 水土保持研究,2014,21(4):195-202.

[29]李茂娟,李天奇,王 欢,等. 基于模糊综合评判的长春市生态系统健康评价[J]. 水土保持研究,2013,20(1):254-259.

[30]闫 妍,朱教君,闫巧玲,等. 基于遥感和 GIS 方法的科尔沁沙地边界划定[J]. 地理科学,2014,34(1):122-128.

性发展,本研究以大理州为例,综合考虑社会经济、资源环境与畜禽养殖之间的相互影响,建立具有大理州地区特色的畜禽养殖资源环境承载力评价指标体系,采用系统动力学和模糊预警方法,开展对畜禽养殖资源环境承载力的预测预警研究,为大理州合理规划畜禽养殖业和实现畜禽养殖业可持续发展提供依据和指导。

1 材料与方法

1.1 数据资料的获取

本研究 2001—2010 年基础数据来自《大理白族自治州年鉴》《云南省统计年鉴》《大理白族自治州环境公报》;同时根据《大理白族自治州国民经济和社会发展规划第十二个五年规划纲要》《七彩云南生态文明建设规划纲要(2009—2020 年)》《云南大理洱海绿色流域建设与水污染防治规划(2010—2030 年)》等公开发表的规划文件和文献,确定预警安全临界值。

1.2 研究方法

畜禽养殖资源环境承载力评价方法一般有指数评价法、层次分析法、状态空间法、模糊综合评价、人工神经网络法、系

统动力学方法以及多目标模型最优化法等^[8]。其中指数评价法、状态空间法和多目标模型最优化法相对比较成熟,但是仅用于现状分析,无法进一步预测研究。此外,多目标模型最优化法要求数据量大,模型也难于求解,应用并不广泛。人工神经网络法在预测研究中需要大量的训练样本和测试样本,不适用于基础数据较少的研究^[9]。系统动力学法重视分析系统和外部环境之间、系统内部各要素之间的相互作用和影响的关系,建模比较简单,适于复杂系统的分析预测研究^[10]。模糊综合评价法应用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象作出一个总体的评价,具有结果清晰、系统性强的特点,在处理生态环境评价等一些精确数学方法难以描述的复杂系统问题方面具有独特的优越性^[11-12]。为此,本研究主要采用系统动力学和模糊预警模型对大理州畜禽养殖资源环境承载力进行预测预警研究。

1.2.1 评价指标体系建立 通过资料搜集和专家咨询法,结合大理州畜牧业特点分析大理州地区特点以及社会环境、畜禽养殖以及资源环境的相互影响,建立具有大理州地区特色的畜禽养殖资源环境系统的承载力评价指标体系(表 1)。

表 1 大理州畜禽养殖资源环境承载力评价指标体系及权重

目标层 A	准则层 B	准则层 C	指标层 D	预警安全临界值
大理州畜禽养殖 资源环境承载力	资源环境类指标 体系 B ₁ (0.231 8)	资源状况评价 指标 C ₁ (0.5)	单位面积粮食产量 D ₁ (0.023 2)	5.070 00 ^[13-14]
			人均水资源量 D ₂ (0.023 2)	1 000.000 00 ^[15]
			人均耕地面积 D ₃ (0.069 5)	0.053 00 ^[13]
		环境状况评价 指标 C ₂ (0.5)	万元 GDP 废水排放总量 D ₄ (0.009 6)	6.840 00
			万元 GDP“三废”综合利用产品产值 D ₅ (0.018 7)	0.008 12
			地表水水质达标率 D ₆ (0.021 6)	0.700 00
	社会环境类指标 体系 B ₂ (0.184 0)	社会环境评价指标 C ₃	单位面积化肥施用量 D ₇ (0.017 7)	0.225 00 ^[16]
			工业废水排放达标率 D ₈ (0.018 7)	0.890 00
			工业固体废物综合利用率 D ₉ (0.011 9)	0.720 00
			城市污水处理率 D ₁₀ (0.017 7)	0.700 00
			人口密度 D ₁₁ (0.073 6)	124.580 00
			人均生产总值 D ₁₂ (0.036 8)	1.370 00
	畜禽养殖环境类 指标体系 B ₃ (0.584 2)	畜禽养殖状况 评价指标 C ₄ (0.5)	农业产值占 GDP 比重 D ₁₃ (0.073 6)	0.313 00
			养殖密度 D ₁₄ (0.125 2)	75.000 00
			养殖结构 D ₁₅ (0.125 2)	0.380 00
		畜禽养殖污染物 排放指标 C ₅ (0.5)	畜牧产值占农业产值比重 D ₁₆ (0.041 7)	0.400 00
			单位面积养殖污水排放强度 D ₁₇ (0.097 4)	0.004 60
			单位面积养殖粪便排放强度 D ₁₈ (0.194 7)	0.006 60

注:指标 D₆、D₈、D₁₀、D₁₁、D₁₂、D₁₃、D₁₆ 预警安全临界值根据《大理白族自治州国民经济和社会发展规划第十二个五年规划(2011—2015)》确定;D₉ 根据《七彩云南生态文明建设规划纲要(2009—2020 年)》确定;D₄、D₁₀ 预警安全临界值根据《云南洱海流域水污染综合防治“十二五”规划》确定;D₅、D₁₄、D₁₅、D₁₇、D₁₈ 经过指标计算获得。

1.2.2 系统动力学模型构建 大理州畜禽养殖户遍及大理州 12 个县市,本研究系统的空间边界确定为整个大理州行政区。借助畜禽养殖资源环境承载力指标体系建立了大理州畜禽养殖资源环境承载力 SD 结构流程图。模型中表函数和初始值用统计资料中变量的历史数据来表现,常数参数根据参数历史数据平均值、专家建议和有关部门选取的数值来确定。设置 2001、2020 年分别为模型运行起始年和终止年,时间步长为 1 年(图 1)。

1.2.3 多级模糊预警模型 由大理州畜禽养殖资源环境承载力评价指标体系组成评判集合,结合已有研究成果将畜禽养殖环境系统承载力预警警度确定为无警、轻警、中警、重警

和极重警 5 级,即评价集为 $V = (V_1、V_2、V_3、V_4、V_5) = (无警、轻警、中警、重警、极重警)$ 。由权重和隶属度矩阵根据模糊算子合成运算得到大理州畜禽养殖资源环境承载力的模糊综合评判结果^[13]。

2 结果与分析

2.1 指标权重计算

邀请环境影响评价、畜牧养殖、环境保护、畜禽粪污治理等领域的专家,根据 1~9 比较尺度的打分结果,利用层次分析法辅助软件(yaahp)构建判断矩阵进行一致性检验和权重的计算,得到各指标权重值(表 1)。

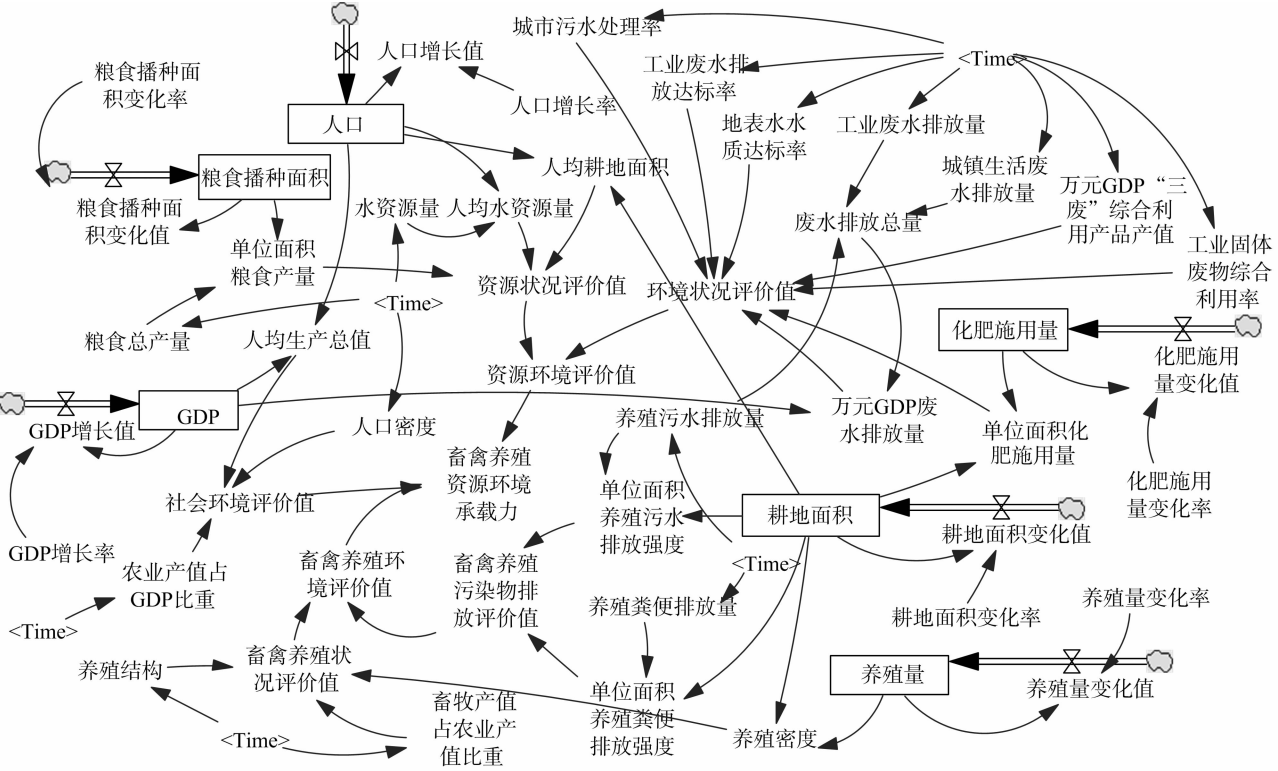


图1 大理州畜禽养殖资源环境承载力 SD 仿真模型结构流程

2.2 畜禽养殖资源环境承载力评价

2.2.1 畜禽养殖资源环境承载力预测研究 通过模型不断检验与修改,最终确定模型的参数值(表2)。

表2 SD模型模拟参数			
参数	参数值	变量	初始值
粮食播种面积变化率	0.000 10	粮食播种面积(万 hm ²)	27.581 9
人口增长率	0.005 80	人口(万人)	330.990 0
耕地面积变化率	-0.005 58	耕地面积(万 hm ²)	19.548 3
化肥施用量变化率	0.050 20	化肥施用量(万 t)	10.511 6
GDP 增长率	0.129 00	GDP(亿元)	145.469 0
养殖量变化率	0.070 00	养殖量(万头)	449.577 0

2.2.1.1 模型测试 (1) 极端测试,在切断人口、GDP、化肥施用量、养殖量、耕地面积、粮食播种面积的增长之后,畜禽养殖环境承载力并没有出现负值或其他不符合现实的情况,所以该模型相对来说比较稳定(图2)。

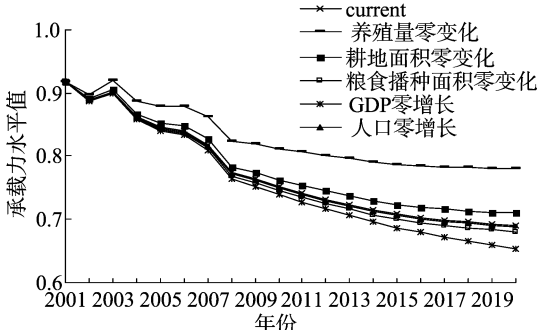


图2 极端测试结果

(2) 灵敏度测试 参数灵敏度测试结果表明,6个参数中灵敏度最大为-0.047 4,未超过10%,可见所有参数的变化

并不敏感,不会引起系统根本行为的变化,而且在极端测试中,模型的结论也基本合理,充分说明模型的有效性(图3)。

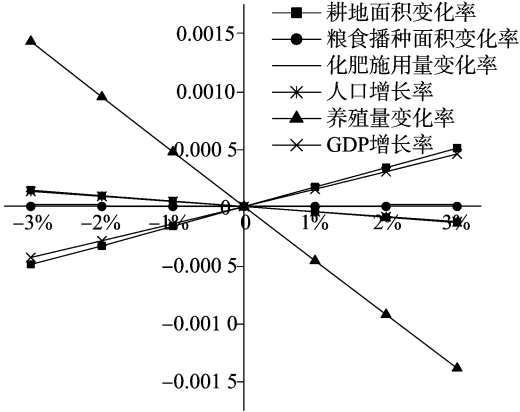


图3 SD模型参数灵敏度分析

(3) 历史检验 历史行为检验是将已有变量的历史数据带入模型进行仿真模拟,得到的仿真结果与历史数据作比较。本研究选取6个水平变量进行历史检验,发现误差最大的为2010年的GDP指标,达9.36%,但未超过10%,其他指标的误差均较小,说明模拟数据与历史数据基本相符,该模型具有较高的准确性。以上测试结果均表明该模型稳定性好,精确性高,能够较好地地进行仿真预测^[7]。

2.2.1.2 承载力趋势分析 系统动力学软件 Vensim 运行得到承载力变化趋势以及二级准则层的评价值变化趋势(图4)。通过分析可看出,大理州畜禽养殖资源环境承载力在仿真时期(2001—2010年)呈波动趋势,2003年以前呈下降趋势,2003年出现波动,最后持续下降,总体呈下降趋势。分析二级准则层评价水平值的趋势,2003年畜禽养殖污染物排放

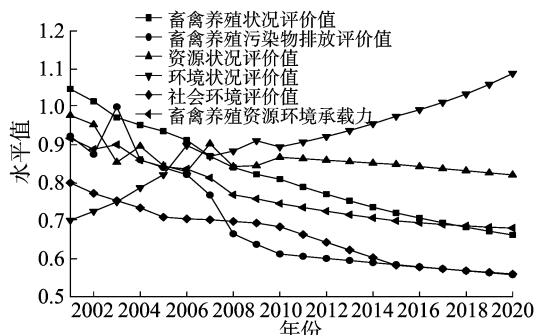
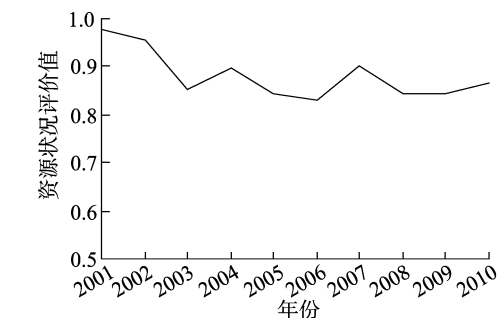
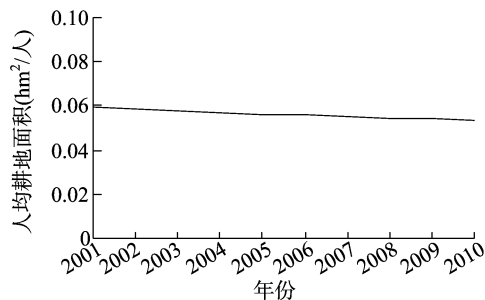


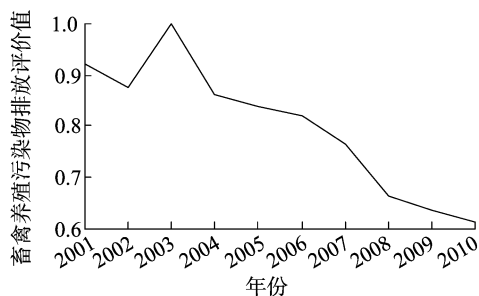
图4 畜禽养殖资源环境承载力仿真预测结果



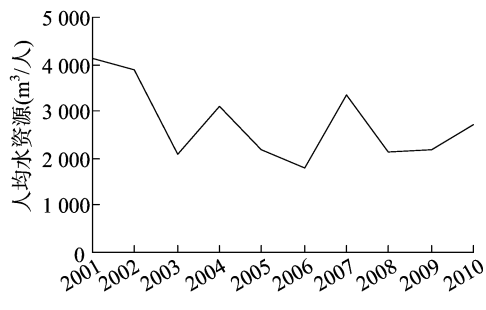
a. 资源状况评价价值



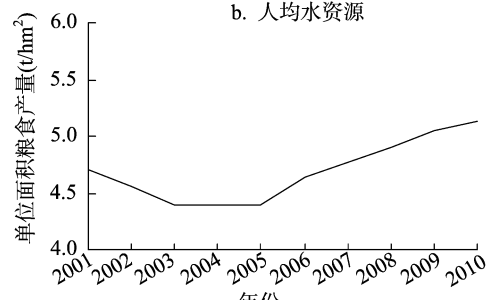
c. 人均耕地面积



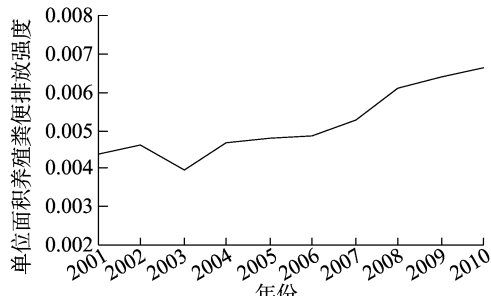
e. 畜禽养殖污染物排放评价价值



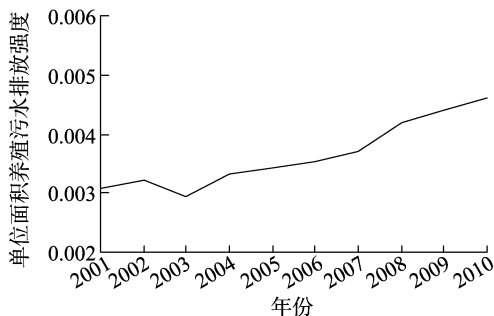
b. 人均水资源



d. 单位面积粮食产量



f. 单位面积养殖粪便排放强度



g. 单位面积养殖污水排放强度

图5 资源状况评价价值、畜禽养殖污染物排放评价价值因果追踪分析

评价价值和资源环境评价价值有明显的波动,进而对其进行因果分析(图5)。

通过因果追踪分析发现,影响资源环境评价价值出现波动的是单位面积粮食产量和人均水资源量的减少,影响畜禽养殖污染物排放评价价值的是单位面积粪污排放强度均大幅下降。结合2003年国内有关大事件,2003年大理州畜禽养殖资源环境承载力突增可能与自然因素以及2003年发生的非典型肺炎传染疾病有关。由于“非典”的原因,我国的种植业、活禽引进和饲料供应受到严重影响,2003年畜禽养殖粪污排放强度相比2002年大幅降低。随着养殖量不断增加,总体上大理州粪污排放强度不断加大,化肥等使用量逐年增加

使得大理州畜禽养殖资源环境承载力总体呈下降趋势。从模型运行结果可看出,大理州畜禽养殖资源环境承载力在预测时期内(2011—2020 年)整体呈下降趋势,预测期前 5 年内,相比 2011 年承载力水平值,到 2015 年承载力水平值下降 6.11%,下降幅度较大;相比 2015 年,2020 年承载力水平值下降了 2.73%,承载力下降趋势平缓。表明从 2015 年开始,大理州在耕地保护、人口增长控制、洱海水质保护以及畜禽养殖结构调整等方面的发展规划,在改善大理州畜禽养殖资源环境承载力方面发挥较大作用。但是大理州畜禽养殖仍以散养为主,畜禽粪污处理及利用水平较低,很大程度上制约着大理州畜禽养殖业的可持续发展。加大规模化畜禽养殖比例,积极改善畜禽养殖粪便处理及管理方式,将有利于大理州畜禽养殖资源环境承载力的改善和促进大理州区域的可持续发展。

2.2.2 畜禽养殖资源环境承载力模糊预警研究 通过单因素评价获得以下综合评价的单因素隶属度矩阵:

$$R_{C1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.667 & 0.333 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.533 & 0.334 & 0.133 & 0 \end{bmatrix};$$
$$R_{C2} = \begin{bmatrix} 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.867 & 0.133 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.867 & 0.133 & 0 & 0 \\ 0.667 & 0.267 & 0.066 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$
$$R_{C3} = \begin{bmatrix} 0 & 0.267 & 0.733 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$
$$R_{C4} = \begin{bmatrix} 0 & 0.4 & 0.333 & 0.267 & 0 \\ 0.933 & 0.067 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.677 & 0.333 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$
$$R_{C5} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0.267 & 0.667 & 0.066 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

由权重和隶属度矩阵根据公式 $R_B = W_C \cdot R_C$ 和 $R_A = W_B \cdot R_B$ 按(\wedge, \vee)算子合成并进行归一化处理得到 2020 年大理州畜禽养殖资源环境承载力预警结果(表 3)。

表 3 大理州畜禽养殖资源环境承载力预警结果

警情	承载力隶属度
无警	0.259 8
轻警	0.242 5
中警	0.303 1
重警	0.161 9
极重警	0

根据最大隶属度原则,对照表 3,到 2020 年大理州畜禽

养殖资源环境承载力预警结果为中警。分析单因素隶属度矩阵中的指标隶属度,致警原因主要是畜禽养殖量的不断增加和耕地面积的不断减少。为保证大理州畜禽养殖业的可持续发展,促进大理州社会经济环境的协调发展,有必要进一步控制畜禽养殖量的增加和规划养殖结构;加大力度保护耕地面积,提高畜禽养殖场科学管理水平。

3 结论与讨论

(1)系统动力学结合模糊预警模型适用于畜禽养殖资源环境承载力分析研究。模拟结果表明评价模型能较好地体现大理州地区特点,预测的结果都可以从发展规划的角度得到合理的解释,具有一定的可信度;预警模型通过对预测结果的进一步评价反映出畜禽养殖资源环境承载力的警度水平。(2)大理州畜禽养殖资源环境承载力近年来呈持续下降趋势,规划发展后期承载力下降幅度有所减缓;大理州畜禽养殖资源环境承载力预警结果为中警。

参考文献:

[1]程 波. 畜禽养殖业规划环境影响评价方法与实践[M]. 北京: 中国农业出版社,2011.

[2]陈晓燕. 杭州市各县区畜禽养殖环境承载力的比较研究[D]. 杭州:浙江工商大学,2012.

[3]王 洋,李翠霞. 黑龙江省畜禽养殖环境承载能力分析预测[J]. 水土保持通报,2009(1):187-191.

[4]王甜甜. 畜禽养殖环境承载力指标体系构建、量化及预测研究[D]. 北京:中国农业科学院,2012.

[5]宋福忠. 畜禽养殖环境系统承载力及预警研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.

[6]大理白族自治州地方志编纂委员会. 大理州年鉴 2012[M]. 昆明:云南民族出版社,2012.

[7]张建华,赵 航,杨理芳,等. 洱海湖滨区畜禽粪便污染与资源化利用措施[J]. 土壤肥料,2006(2):16-18.

[8]王 俭,孙铁珩,李培军,等. 环境承载力研究进展[J]. 应用生态学报,2005,16(4):768-772.

[9]陈 园. 重要矿产资源消耗预测的系统动力学模型研究及应用[D]. 成都:成都理工大学,2013.

[10]王其藩. 系统动力学[M]. 北京:清华大学出版社,2009.

[11]程兵芬,罗先香,王 刚. 基于层次分析-模糊综合评价模型的东辽河流域水环境承载力评价[J]. 水资源保护,2012,28(6):33-36.

[12]王莉芳,陈春雪. 济南市水环境承载力评价研究[J]. 环境科学与技术,2011,34(5):199-202.

[13]农村社会经济调查司. 我国粮食安全评价指标体系研究[J]. 统计研究,2005(8):3-9.

[14]中国农业科学院食物发展研究课题组. 再论人均 400 公斤粮食必不可少[J]. 农业经济问题,1990(10):3-7.

[15]龚久平,张 伟,洪云菊,等. 重庆市水资源承载力分析与可持续发展利用探讨[J]. 西南农业学报,2011,24(6):2429-2433.

[16]邢娇阳. 我国农业面源污染的治理对策研究[J]. 经济研究导刊,2012(5):112-113.