

第八届“认证杯”数学中国

数学建模网络挑战赛

承 诺 书

我们仔细阅读了第八届“认证杯”数学中国数学建模网络挑战赛的竞赛规则。

我们完全明白，在竞赛开始后参赛队员不能以任何方式（包括电话、电子邮件、网上咨询等）与队外的任何人（包括指导教师）研究、讨论与赛题有关的问题。

我们知道，抄袭别人的成果是违反竞赛规则的，如果引用别人的成果或其他公开的资料（包括网上查到的资料），必须按照规定的参考文献的表述方式在正文引用处和参考文献中明确列出。

我们郑重承诺，严格遵守竞赛规则，以保证竞赛的公正、公平性。如有违反竞赛规则的行为，我们接受相应处理结果。

我们允许数学中国网站(www.madio.net)公布论文，以供网友之间学习交流，数学中国网站以非商业目的的论文交流不需要提前取得我们的同意。

我们的参赛队号为：3399

参赛队员 (签名)：

队员 1： 孙一洪

队员 2： 印芷水

队员 3： 张雁

参赛队教练员 (签名)：

参赛队伍组别：本科组

第八届“认证杯”数学中国

数学建模网络挑战赛

编号专用页

参赛队伍的参赛队号： 3399

竞赛统一编号（由竞赛组委会送至评委团前编号）：

竞赛评阅编号（由竞赛评委团评阅前进行编号）：

2015 年第八届“认证杯”数学中国 数学建模网络挑战赛第二阶段论文

题 目 荒漠区生态退化程度及生态恢复动力学的研究

关 键 词 生态退化、植物种群、人为干扰、模糊综合评价、

MATLAB 、恢复动力学

摘 要：

本文针对人为干扰对生态系统的影响，建立了基于层次分析法的模糊综合评价模型，评价过牧、轮牧和开垦三种人为活动对生态系统退化的影响程度。针对退化、半退化等生态环境恢复可行性的问题，本文创造性地建立了物群植物恢复模型，在生态系统恢复动力学模型的基础上，很好地证明了退化半退化地区经过人工植入物群和减少人为干扰的生态恢复的可行性。

针对问题一人为干扰对生态系统影响，本文建立模糊综合评价模型，运用层次分析法进行主观与客观相结合的赋权方式，结合求解不同人为干扰下的生态系统退化程度，并使用 MATLAB 进行求解得到“荒漠区生态系统退化程度开垦区>过牧区>轮牧区”的结论。

针对问题二退化、半退化生态系统的恢复建设，创新性地建立了物群植物恢复模型，在生态恢复动力学的基础上，分析了物群与环境、植入物群与原有物种之间的关系，运用 MATLAB 进行求解，得出了“在人工植入时，要选择蒸发系数小于固水系数的草本和灌木作为物群植入对象，而非蒸发系数很大的乔木，要选择物种相近的植物作为植入对象，这样可以促进生态系统物种丰富度的提高”的结论。

本文最后对模型做了误差分析、评价以及推广。本文的特点是综合使用了 Excel, MATLAB 等多种数学软件，利用模糊综合评价模型，运用层次分析方法和一致性检验，建立了生态恢复动力学模型与“物群——生态恢复”模型，比较具有创新性，并通过不断的检验及反思，使结果不断改进，贴近实际情况。

参赛队号： 3399

所选题目： C 题

参赛密码

(由组委会填写)

Abstract

This paper according to the effects of human disturbance on the ecological system, the establishment of the method, the fuzzy comprehensive evaluation model based on AHP and evaluated over grazing, rotational grazing and reclamation of three kinds of human activities on the ecosystem degradation degree of influence. Aiming at the problems of degradation, degradation of ecological environment recovery and feasibility, this paper creatively established populations of plant restoration model, in the ecosystem recovery kinetics model based, well proved the degeneration of semi degraded areas after artificial implant group and reduce anthropogenic interference with the ecological restoration of feasibility.

The influence of problem a human disturbance on ecosystem. In this paper, we establish fuzzy comprehensive evaluation model, the subjective and objective combination weighting approach by using analytic hierarchy process, combined to solve different under the disturbance of the ecosystem degradation degree, and the use of MATLAB software to solve this "desert ecosystem degradation degree of reclamation area > a pasturing area > rotational grazing area" conclusion.

In view of the problem second degradation, degraded ecosystem restoration construction, innovatively established populations of plant restoration model, in the dynamics of ecological restoration on the basis, analysis the relationship between populations and the environment, the implant group and original species, using MATLAB to solve, and draw the conclusion that "in the implantation of artificial to evaporation coefficient is less than solid water coefficient of herbs and shrubs as group implanted objects rather than evaporation coefficient is very big trees, plants closely related species should be chosen as the object of the implant, this can promote the ecosystem and species richness of the conclusion.

In this paper, we give the error analysis, evaluation and promotion of the model. The feature is the integrated use of Excel, MATLAB and other mathematical software, using the fuzzy comprehensive evaluation model, using AHP method and consistency check, establishes the ecological recovery dynamics model and the group -- ecological restoration model, compared with innovation, and through continuous testing and reflection of the continuous improvement, closer to the actual situation.

目录

摘 要:	3
Abstract	4
§1 问题的重述.....	1
一、背景知识.....	1
二、相关资料.....	1
三、要解决的问题.....	1
§2 问题的分析.....	1
一、问题的总分析.....	1
二、对具体问题的分析.....	2
§3 模型的假设.....	3
§4 名词解释与符号说明.....	3
一、名词解释.....	3
二、主要符号说明.....	3
§5 模型的建立与求解.....	4
一、问题一的分析与求解.....	4
(一) 问题的分析.....	4
(二) 问题的求解.....	4
二、问题二的分析与求解.....	8
(一) 问题的分析.....	8
(二) 问题的求解.....	8
§6 误差分析.....	13
一、误差分析.....	13
§7 模型的评价与推广.....	13
一、模型的优点.....	13
二、模型的缺点.....	13
三、模型的推广.....	14
参考文献.....	15
附录	16
附表.....	16
附件.....	16

§ 1 问题的重述

一、背景知识

1. 总背景介绍

荒漠化是全球共同面临的生态灾难，也是我国当前最为严重的生态问题之一，当前，我国荒漠化最严重地区当属我国的西北地区。由于各种因素，这些地区的荒漠化速度不断加快，其中人类活动是主要的荒漠化驱动因子，人类活动对环境的负效应在总体上已导致以土地荒漠化急剧发展为典型特征的生态环境质量明显下降，使这一区域脆弱的生态系统向逆行的方向发展，并进一步影响着人类生存环境的可持续发展。

联合国的研究报告称，世界人口的持续增加和经济活动的不断扩展对地球生态系统造成了巨大压力，人类活动已给地球上 60% 的草地、森林、农耕地、河流和湖泊带来了消极影响。人类在追求自身经济发展不可避免的会对生态环境造成影响，为了人与自然和谐及人类生存环境的可持续发展，科学家也在研究如何缓解荒漠化问题，研究通过减少人为干扰、扩大植被面积等方法来使荒漠化的生态环境恢复正常。

2. 问题的产生

荒漠化是环境因素和人为因素综合作用的结果，其气候特点是强烈大陆性，降水十分稀少，气温变化极端，日照强烈，冬春多大风沙暴，荒漠区生态环境条件十分严酷。近年来认为干扰不断加重，西北干旱区的荒漠化日益严重，人与自然之间严重失衡，严峻的形势使人类必须认真对待，荒漠化与人类生存环境和社会经济的发展息息相关，故人类活动对荒漠化影响的程度、进行荒漠化的防治以实现人类生存环境的可持续发展是必须思考的问题，因而开展荒漠化方面的研究具有十分重要的现实意义。

二、相关资料

1. 西北某干旱区植物动物数据（详见原题附件一、附件二）；
2. 生态系统指标评判标准（详见附录附表一）；
3. 准则层对目标层、方案层对准则层的特征向量求解及一致性检验程序（详见附表程序一、程序二）
4. 物种丰富度与各个力之间关系的求解程序（详见附表程序三）

三、要解决的问题

1. 问题一：根据附件一和附件二提供的数据，建立数学模型并评估人类活动造成的荒漠地区生态退化的程度。
2. 问题二：根据附件一和附件二提供的数据，分析一个荒漠地区处于半退化、退化等不同阶段时，是否可以通过减少人为干扰，或者采用补充人工植被的方法来促使该地区的生态环境恢复正常。如果可行，请给出量化的实施方案；如果不可行，请指出造成这种不可逆性的原因。

§ 2 问题的分析

一、问题的总分析

针对不同人类活动造成荒漠区生态系统退化的程度，以及荒漠区退化、半退化地区生态系统的恢复的可行性研究总思路见图 1：

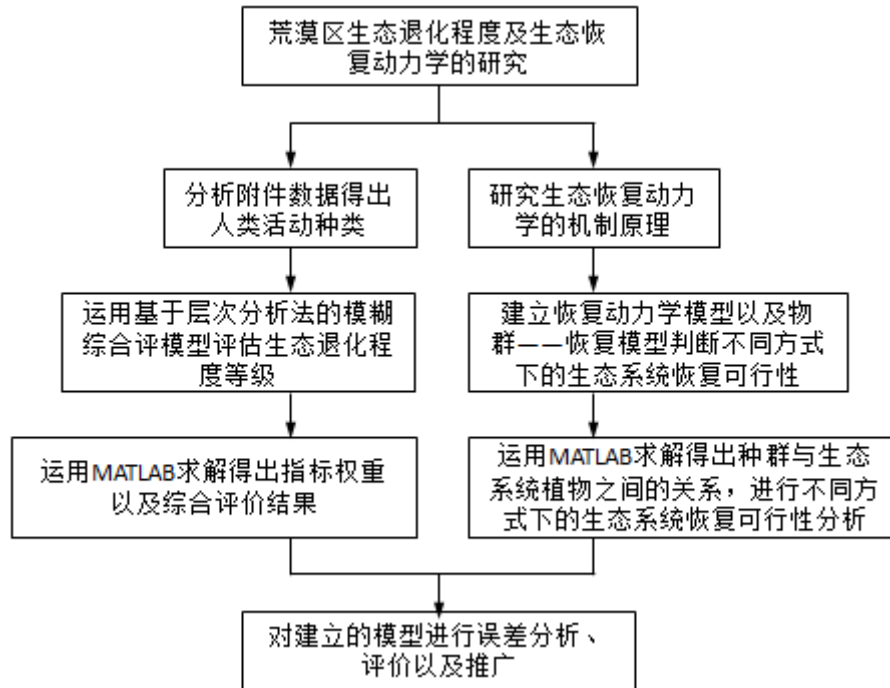


图 1 建模思路流程图

二、对具体问题的分析

1. 对问题一的分析

问题要求我们结合附件一和附件二的数据，建立合理的数学模型，来评估由人类活动造成的荒漠地区生态退化的程度。

通过对附件一与附件二的分析，可得出人类活动主要分为过牧、轮牧和开垦三种，所以我们通过建立一个新的量化评价模型——基于层次分析法的模糊综合评价模型，结合附录一、附录二中提供的数据，采用模糊综合评价方法对不同人类活动所造成荒漠地区生态退化的程度等级进行评估。

建立模糊综合评价模型，利用隶属度函数量化十一个指标的模糊关系，使用对十一个指标的评价能做出定量化表达，从而解决不同指标间的差异对总体评价的影响；在模糊综合评价模型的基础上建立层次分析模型，对指标进行分类，然后在不同影响因素下确定不同的判断矩阵，通过归一化处理，确定各个指标层的权重。

2. 对问题二的分析

问题要求我们分析在荒漠区处于退化、半退化等不同阶段时，是否可以通过减少人为干扰，或者采用补充人工植被的方法来促使该地区的生态环境恢复正常，即研究减少人为干扰和补充人工植被促使生态恢复的可行性。

首先，考虑生态系统恢复动力学机制，将植入种群视为恢复力 F_1 ，减少人为干扰视为减少干扰力 F_2 ，则通过上述两种方法可能会使生态退化得以恢复。

其次，在退化的生态系统中，只要植物能够适应相应环境，将其切入到退化的生态系统中，物种丰富度就会不断地增加，但考虑到单种植物不能构成种群效应，因此考虑将具有相依关系的两个物种同时植入到退化的生态系统中，在此基础上，考虑植入种群与环境、植入种群与生态系统中原有的植物种群之间的关系。

§3 模型的假设

1. 假设生态退化影响因素只来自原题所提供的因素；
3. 假设动物和植物之间没有很强的相互影响；
2. 假设退化、半退化生态系统中的物种关系仅有相依和竞争；
4. 假设单个植物在生态系统中的数量模型是 LOGISTIC 模型；
5. 假设荒漠地区水资源有限，不足以提供大型植物种群的生长。

§4 名词解释与符号说明

一、名词解释

1. 生态系统 (ecosystem): 简称 ECO, 指在自然界的一定的空间内, 生物与环境构成的统一整体, 在这个统一整体中, 生物与环境之间相互影响、相互制约, 并在一定时期内处于相对稳定的动态平衡状态。

2. 生态退化 (ecosystem degradation): 生态退化是生态系统的一种逆向演替过程, 是生态系统在物质、能量匹配上存在着某一环节上的不协调或达到发生生态退变的临界点, 此时, 生态系统处于一种不稳或失衡状态, 表现为对自然或人为干扰的较低抗性、较弱的缓冲能力以及较强的敏感性和脆弱性, 生态系统逐渐演变为另一种与之相适应的低水平状态的过程, 即谓之为退化。

3. 荒漠生态: 荒漠是植被稀少或缺水的干旱地区, 荒漠生态即指荒漠地区的生态环境。一般, 年平均降水量在 250 毫米以下。水分的缺乏限制了绿色植物的生长以及一切直接或间接依赖绿色植物为生的动物和微生物。植物分布稀疏, 几乎全为旱生种类。

4. 种群 (population): 指在一定时间内占据一定空间的同种生物的所有个体。种群是进化的基本单位, 同一种群的所有生物共用一个基因库。

5. 物群: 生物群是指生活在一定地区的所有生物, 包括动物群及植物群。

6. 种群关系: 是指不同物种种群之间的相互作用所形成的关系。两个种群的相互关系可以是间接的, 也可以是直接的相互影响。这种影响可能是有害的, 也可能是有利的。

7. 人工植被 (artificial vegetation): 又称“栽培植被”, 指人类利用自然、改造自然, 经长期选择而栽培的植物群落的泛称。

二、主要符号说明

序号	符号	符号说明
1	a_{ij}	x_i 和 x_j 对上层目标的影响比
2	λ_i	正互反矩阵的最大特征值
3	U	荒漠区退化程度的评价因素集
4	V	荒漠区退化程度各因素的评判集
5	B_i	第一层因素评判决策矩阵
6	W	指标层权重矩阵
7	F_1	生态系统恢复力

8	F_2	生态系统干扰力
9	F_3	生态系统环境阻力

§ 5 模型的建立与求解

一、问题一的分析与求解

（一）问题的分析

问题要求我们结合附件一和附件二的数据，建立合理的数学模型，来评估由人类活动造成的荒漠地区生态退化的程度。

通过对附件一与附件二的分析，可得出人类活动主要分为过牧、轮牧和开垦三种，所以我们通过建立基于层次分析法的模糊综合评价模型，结合附录一、附录二中提供的数据，采用模糊综合评价方法对不同人类活动所造成荒漠地区生态退化的程度等级进行评估。

建立模糊综合评价模型，利用隶属度函数量化十一个指标的模糊关系，使用对十一个指标的评价能做出定量化表达，从而解决不同指标间的差异对总体评价的影响；在模糊综合评价模型的基础上建立层次分析模型，对指标进行分类，然后在不同影响因素下确定不同的判断矩阵，通过归一化处理，确定各个指标层的权重。

（二）问题的求解

1. 模型的准备

（1）最大隶属度原则

给定论域 U 上的 n 个模糊子集 $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n$ 其隶属函数分别为： $\mu_{\tilde{A}_1}(x), \mu_{\tilde{A}_2}(x), \dots, \mu_{\tilde{A}_n}(x)$ ，若对于任意的 $x_0 \in U$ ，存在 \tilde{A}_k 使得 $\mu_{\tilde{A}_k}(x_0) = \max_{1 \leq i \leq n} \mu_{\tilde{A}_i}(x_0)$ ，则应使 x_0 优先属于 \tilde{A}_k 。

（2）一致性检验

设 A 为 n 阶互正反矩阵， $AW = \lambda_{\max} W$ ，且 $\lambda_{\max} \geq n$ ，若 λ_{\max} 比 n 大得越多，则 A 的不一致程度越严重。令 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ ， CI 可作为衡量不一致程度的数量标准，称 CI 为一致性指标（Consistency Index）。当 $n \geq 3$ 时，令 $CR = CI / RI$ ，称 CR 为一致性比例。当 $CR < 0.1$ 时，认为比较判断矩阵的一致性可以接受，否则应对判断矩阵作适当的修正。其中 Satty 教授给出 RI 值，如表 1 所示

表 1 平均随机一致性指标

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

2. 模型的建立与求解

（1）数据的预处理

由于数据为人工采集，可能存在一定的误差，所以为了使我们的研究结果比较精确，我们首先对原始数据进行一定的处理，剔除差异比较大的不合理的数据。

首先，对原数据取对数转换： \log_{10} （算术表达式）；其次判断其符合正态分布

后将数据标准化 $x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j}$ ；最后根据 Z 分数原理剔除大于三倍标准差的数据。

(2) 通过层次分析结构模型建立荒漠区生态退化程度的评价指标体系

1) 建立评价系统的递阶层次结构

本文所建立的荒漠区生态退化程度的评价指标体系分为三个层次：目标层、准则层和方案层。

目标层：荒漠区生态退化程度

准则层：草本植物特征、灌木植物特征、啮齿动物优势种百夹捕获率

方案层：草本高度、草本盖度、草本密度、草本生物量、灌木高度、灌木盖度、灌木密度、灌木生物量、三趾跳鼠百夹捕获率、子午沙鼠百夹捕获率、小毛足鼠百夹捕获率共 11 项指标。具体如图 2 所示。

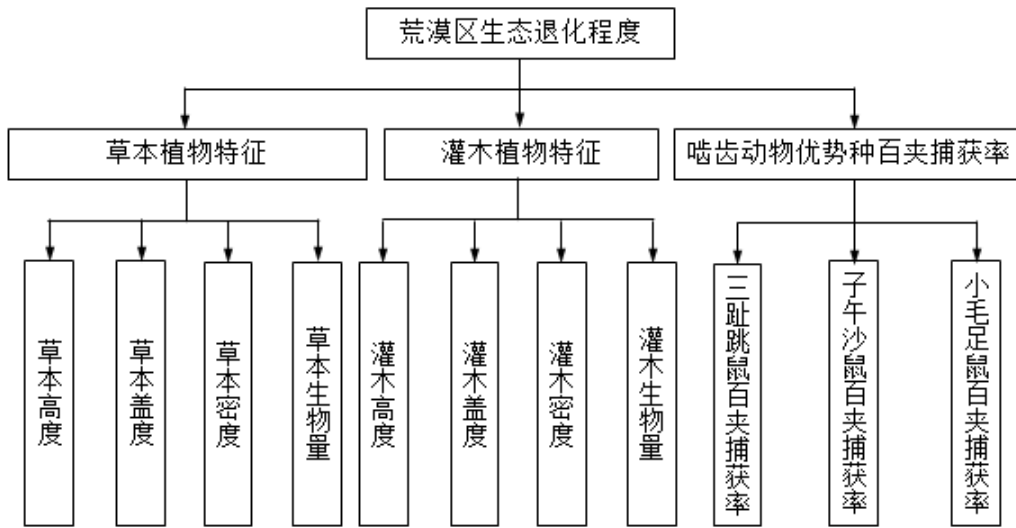


图 2 荒漠区生态退化程度评价系统的递阶层次结构

2) 构造比较判别矩阵 A

首先分析指标层对目标层的影响，我们通过对已有的文献的分析研究以及对专家对比三个一级指标的咨询，最终可近似得到如下判断矩阵：

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 2 \\ 2 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

3) 层次单排序及其一致性检验

利用 MATLAB 归一化处理后，求得矩阵 A 的最大特征值为 $\lambda = 3.0536$ ；标准化特征向量（权向量）为 $W_A = (0.3108, 0.4934, 0.1958)$ 。根据 Saaty 的随机一致性指标可得 $RI = 0.90$ ，利用 MATLAB 进行一致性检验，求得一致性比例 $CR = 0.0462 < 0.1$ ，即通过一致性检验。（具体程序见附录程序 1）

4) 计算组合权向量

下面开始构造方案层对准则层的每个准则的判断矩阵

① B_{11} 、 B_{12} 、 B_{13} 、 B_{14} 对 B_1 的判断矩阵（具体程序见附录程序 2）

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 1/2 \\ 3 & 1 & 1 & 2 \\ 3 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}, \lambda = 4.0104$$

$$W_{B_1} = (0.1091, 0.3509, 0.3509, 0.1891), CR = 0.0038 < 0.1$$

② B_{21} 、 B_{22} 、 B_{23} 、 B_{24} 对 B_2 的判断矩阵（具体程序见附录程序 2）

$$B_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}, \lambda = 4.0104$$

$$W_{B_2} = (0.1223, 0.2270, 0.4236, 0.2270), CR = 0.0038 < 0.1$$

③ B_{31} 、 B_{32} 、 B_{33} 、对 B_3 的判断矩阵（具体程序见附录程序 2）

$$B_3 = \begin{pmatrix} 1 & 3/4 & 3/5 \\ 3/4 & 1 & 1/3 \\ 5/3 & 3 & 1 \end{pmatrix}, \lambda = 3.0858$$

$$W_{B_3} = (0.2366, 0.2356, 0.5279), CR = 0.0739 < 0.1$$

根据以上矩阵的一致性比例处理，均满足 $CR < 0.1$ ，即都通过了一致性检验。荒漠区生态退化程度评价指标层权重如表 2 所示：

表 2 荒漠区生态退化程度评价指标层权重表

	一级指标	权重	二级指标	权重
荒漠区生态退化程度评价指标体系	草本植物特征(B_1)	0.3108	草本高度 (B_{11})	0.1091
			草本盖度 (B_{12})	0.3509
			草本密度 (B_{13})	0.3509
			草本生物量 (B_{14})	0.1891
	灌木植物特征(B_2)	0.4934	灌木高度 (B_{21})	0.1223
			灌木盖度 (B_{22})	0.2270
			灌木密量 (B_{23})	0.4236
			灌木生物量 (B_{24})	0.2270
	啮齿动物优势种百夹捕获率(B_3)	0.1958	三趾跳鼠百夹捕获率 (B_{31})	0.2366
			子午沙鼠百夹捕获率 (B_{32})	0.2356
			小毛足鼠百夹捕获率 (B_{33})	0.5279

(3) 建立模糊综合评价模型

1) 确定评判因素集 U

根据荒漠地区生态退化程度评价指标对给定的因素集合 U 进行划分。

第一层因素 U_i 为：

$$U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\} = \{\text{草本植物, 灌木植物, 啮齿动物优势种百夹捕获率}\}$$

第二层因素 U_i 的构成 U_{ij} 为：

$$U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}\} = \{\text{草本高度, 草本盖度, 草本密度, 草本生物量}\}$$

$U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}\} = \{\text{灌木高度, 灌木盖度, 灌木密度, 灌木生物量}\}$

$U_3 = \{U_{31}, U_{32}, U_{33}\} = \{\text{三趾跳鼠, 子午沙鼠, 小毛足鼠}\}$

2) 建立各因素的评判集 V

结合荒漠区生态退化的特点, 给定评价等级集合 $V = \{v_1, v_2, v_3\}$, 其中 $v_i (i = 1, 2, 3)$ 分别表示低度退化、中度退化和高度退化。

3) 确定各因素的权重矩阵 W

荒漠区生态退化程度: $W_A = (0.3108, 0.4934, 0.1958)$

草本生物特征: $W_{B_1} = (0.1091, 0.3509, 0.3509, 0.1891)$

灌木生物特征: $W_{B_2} = (0.1223, 0.2270, 0.4236, 0.2270)$

啮齿动物优势种百夹捕获率: $W_{B_3} = (0.2366, 0.2356, 0.5279)$

4) 建立第二层因素模糊评判矩阵 R

我们通过已有文献参考以及询问相关专家, 分别在三个评判等级上对某项评估要素作属于或不属于的二值逻辑判断, 即当认为该要素属于该等级时记 1, 否则记 0。在统计 r_{ij} 时取 $r_{ij} = P'/P$, 其中 P 为每一种人为干扰下两个月份的观测总次数, P' 为某一要素属于该等级的观测次数。(每个指标的评判标准详见附录附表 1)

根据每一种人为干扰方式下两个月份的观测值, 得到各评判矩阵如下:

$$\begin{aligned} R_{11} &= \begin{pmatrix} 39/42 & 2/42 & 1/41 \\ 39/42 & 0 & 3/42 \\ 19/42 & 12/42 & 11/42 \\ 36/42 & 3/42 & 3/42 \end{pmatrix} & R_{12} &= \begin{pmatrix} 3/42 & 7/42 & 32/42 \\ 7/42 & 8/42 & 27/42 \\ 11/42 & 11/42 & 20/42 \\ 14/42 & 10/42 & 18/42 \end{pmatrix} & R_{13} &= \begin{pmatrix} 12/42 & 9/42 & 21/42 \\ 13/42 & 11/42 & 18/42 \\ 10/42 & 4/42 & 28/42 \end{pmatrix} \\ R_{21} &= \begin{pmatrix} 25/42 & 29/42 & 13/42 \\ 23/42 & 9/42 & 32/42 \\ 19/42 & 12/42 & 35/42 \\ 25/42 & 7/42 & 30/42 \end{pmatrix} & R_{22} &= \begin{pmatrix} 0 & 29/42 & 13/42 \\ 1/42 & 9/42 & 32/42 \\ 4/42 & 3/42 & 35/42 \\ 3/42 & 9/42 & 30/42 \end{pmatrix} & R_{23} &= \begin{pmatrix} 23/42 & 4/42 & 15/42 \\ 16/42 & 5/42 & 21/42 \\ 19/42 & 5/42 & 18/42 \end{pmatrix} \\ R_{31} &= \begin{pmatrix} 9/31 & 7/31 & 15/31 \\ 6/31 & 13/31 & 12/31 \\ 6/31 & 6/31 & 19/31 \\ 4/31 & 12/31 & 15/31 \end{pmatrix} & R_{32} &= \begin{pmatrix} 17/31 & 8/31 & 6/31 \\ 26/31 & 3/31 & 2/31 \\ 23/31 & 5/31 & 3/31 \\ 25/31 & 4/31 & 2/31 \end{pmatrix} & R_{33} &= \begin{pmatrix} 25/31 & 5/31 & 1/31 \\ 7/31 & 5/31 & 19/31 \\ 27/31 & 1/31 & 3/31 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

5) 模糊综合评价结果

模糊综合评价的顺序是由低层次向高层次逐层进行的, 因此其评价顺序是先进行第二层评价, 然后进行第一层评价。

第二层的计算采用评估模型 $M(*, +)$ 模型 (加权平均模型), 经过合成运算, 第二层次的综合评判结果 B_i :

$$B_i = W_{B_i} \circ R_{ij} (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3)$$

因此,

$$\begin{cases} B_{11} = W_{B_1} \circ R_{11} = (0.8232, 0.1228, 0.1350) \\ B_{12} = W_{B_2} \circ R_{12} = (0.2332, 0.2286, 0.5381) \\ B_{13} = W_{B_3} \circ R_{13} = (0.2654, 0.1620, 0.5697) \\ B_{21} = W_{B_1} \circ R_{21} = (0.5766, 0.2985, 0.2059) \\ B_{22} = W_{B_2} \circ R_{22} = (0.0620, 0.2120, 0.7260) \\ B_{23} = W_{B_3} \circ R_{23} = (0.3397, 0.1131, 0.4275) \end{cases}$$

$$\begin{cases} B_{31} = W_{B_1} \circ R_{31} = (0.2154, 0.3312, 0.5344) \\ B_{32} = W_{B_2} \circ R_{32} = (0.5889, 0.1511, 0.0940) \\ B_{33} = W_{B_3} \circ R_{33} = (0.7014, 0.0927, 0.2030) \end{cases}$$

由此可得第一层的评判决策矩阵为：

$$\begin{aligned} B_1 &= \begin{pmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ B_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.8232 & 0.1228 & 0.1350 \\ 0.2332 & 0.2286 & 0.5381 \\ 0.2654 & 0.1620 & 0.5697 \end{pmatrix} \\ B_2 &= \begin{pmatrix} B_{21} \\ B_{22} \\ B_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5766 & 0.2985 & 0.2059 \\ 0.0620 & 0.2120 & 0.7260 \\ 0.3397 & 0.1131 & 0.4275 \end{pmatrix} \\ B_3 &= \begin{pmatrix} B_{31} \\ B_{32} \\ B_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2154 & 0.3312 & 0.5344 \\ 0.5889 & 0.1511 & 0.0940 \\ 0.7014 & 0.0927 & 0.2030 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

第一层评价结果为：

$$\text{过牧区: } W_A \circ B_1 = (0.4229, 0.1827, 0.4190)$$

$$\text{轮牧区: } W_A \circ B_2 = (0.2763, 0.3195, 0.5059)$$

$$\text{开垦区: } W_A \circ B_3 = (0.4948, 0.1957, 0.2522)$$

依据最大隶属度原则，荒漠区过牧条件与开垦条件下生态系统的退化程度属于高度退化，轮牧条件下生态系统的退化程度属于低度退化。并且可以得出，不同人为因素干扰条件下，由人类活动造成的荒漠区生态退化程度：开垦区>过牧区>轮牧区。

二、问题二的分析与求解

（一）问题的分析

问题要求我们分析在荒漠区处于退化、半退化等不同阶段时，是否可以通过减少人为干扰，或者采用补充人工植被的方法来促使该地区的生态环境恢复正常，即研究减少人为干扰和补充人工植被促使生态恢复的可行性。

首先，考虑生态系统恢复动力学机制，将植入种群视为恢复力 F_1 ，减少人为干扰视为减少干扰力 F_2 ，则通过上述两种方法可能会使生态退化得以恢复。

其次，在退化的生态系统中，只要植物能够适应相应环境，将其切入到退化的生态系统中，物种丰富度就会不断地增加，但考虑到单种植物不能构成种群效应，因此考虑将具有相依关系的两个植物物种同时植入到退化的生态系统中，在此基础上，考虑植入物群与环境、植入种群与生态系统中原有的植物种群之间的关系。

（二）问题的求解

1. 模型一：生态恢复动力学模型

(1) 模型的准备

物种丰富度的变化是生态系统恢复或退化的标志物,其增加或减少很大程度上取决于各种力变化。我们称可推动生态系统恢复的力,例如生命自组织、人工植被等为生态系统恢复力 F_1 ; 称干扰生态系统恢复的力,例如生态系统自然环境的变化、人类活动、外来生物入侵等为干扰力 F_2 , 这种干扰力的方向是不确定的,有可能是阻力,有可能是推力; 由于植物、水、阳光等环境资源有限,限制了物种丰富度增长,这种力称为环境阻力 F_3 。

(2) 模型的建立

根据植物群落演替理论,生态系统多样性是随时间而变化的。记 x 为物种丰富度, x 是时间 t 的函数, 记为 $x = x(t)$, 时间以年为单位。对 t 进行求导, 得到物种丰富度变化速度 $v = dx/dt$, 一般而言, 物种丰富度的变化速度 v 也是时间 t 的函数, 记为 $v = v(t)$, v 为每年变化的物种数量。对 t 进行求导, 得到物种丰富度变化速度的变化率 $\Psi = dv/dt = (d^2x)/(dt^2)$ 。

记 $F = F_1 + F_2 + F_3$ 是生态系统恢复力、生态系统干扰力和环境阻力, F 是一个矢量, 生态系统恢复是在 F 的推动下实现的, 因此要考虑物种丰富度与 F 之间的关系, 同时也要考虑物种丰富度与 F_1 、 F_2 、 F_3 之间的关系。

下面对各物种丰富度与各种力之间的关系进行具体说明:

①物种丰富度变化速度 v 的变化率 Ψ 与 F 之间呈正相关, 即 $\Psi \propto F$; 物种丰富度变化速度的变化率 Ψ 与物种丰富度 x 呈负相关, 因为随着 x 的增加, 外来物种是新物种的几率下降。对上面的关系进行量化, 得到 $\Psi = k \frac{F}{x}$, 本文这里的 k 取 1, 于是有 $F = \Psi x$ 。

②考虑物种丰富度变化速率受环境阻力、干扰及水资源量等因素的影响, 于是有

$$\frac{dx}{dt} = k \left(\frac{x_m - x}{x_m} \right) \left[1 - \frac{x}{x_m} (1 - p) \right] - bx + cx$$

其中 k 为系数, 与地理因素、热度有关, x_m 是生态系统允许的最大物种丰富度, $1 - \frac{x}{x_m}$ 表示随着生态系统的恢复, 物种丰富度 x 的增加, 进入生态系统的物种是新物种的比重减少。 $1 - \frac{x}{x_m} (1 - p)$ 表示随着生态系统的恢复, x 的增加, 环境阻力增大, 又限制了 x 的增长, 导致了 x 的下降。 b 为干扰影响丰富度的强度系数, 当 $b > 0$ 时, 表示干扰力是阻力; $b < 0$ 时, 干扰力是推力。 c 是水资源量影响物种丰富度 x 的变化系数。

求解上面的微分方程可得:

$$x = \frac{\alpha(2Px_0 + \beta) - \beta e^{t(\beta-Q)}(2Px_0 + \alpha)}{2P[e^{t(\beta-Q)}(2Px_0 + \alpha) - (2Px_0 + \beta)]}$$

其中 $P = k \frac{1-p}{x_m}$, $Q = k \frac{p-2}{x_m} - b + c$, $\alpha = Q - \sqrt{Q^2 - 4Pk}$, $\beta = Q + \sqrt{Q^2 - 4Pk}$

上式为各种作用力下的物种丰富度 x 的计算公式, 其中 x_0 表示退化、半退化生态系统中原有的物种丰富度, x_0 越小, 生态系统物种丰富度 x 增加的过程就越具有 LOGISTIC 性。

求解相应的 Ψ 、 F_1 、 F_2 、 F_3 , 可得:

$$\because \Psi = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = \left(k \frac{P}{x_m} + 2k \frac{x}{x_m^2} + c \right) - \left(2k \frac{1}{x_m} + 2k \frac{Px}{x_m^2} \right) - b$$

$$\therefore F = \Psi x = \left[\left(k \frac{P}{x_m} + 2k \frac{x}{x_m^2} + c \right) - \left(2k \frac{1}{x_m} + 2k \frac{Px}{x_m^2} \right) - b \right] x$$

$$\therefore F = F_1 + F_2 + F_3$$

$$\therefore F_1 = \left(k \frac{P}{x_m} + 2k \frac{x}{x_m^2} + c \right) x, F_2 = -bx, F_3 = -\left(2k \frac{1}{x_m} + 2k \frac{Px}{x_m^2} \right) x$$

通过参数估计确定 k 、 b 、 c 、 x_m 、 P 值之后,可利用公式画出 F_1 、 F_2 、 F_3 与 x 的相关图形。

(3) 模型的求解:

我们通过 MATLAB 求解可得出物种丰富度与各个力之间的关系,如图 3 所示:
(具体程序见附录程序 3)

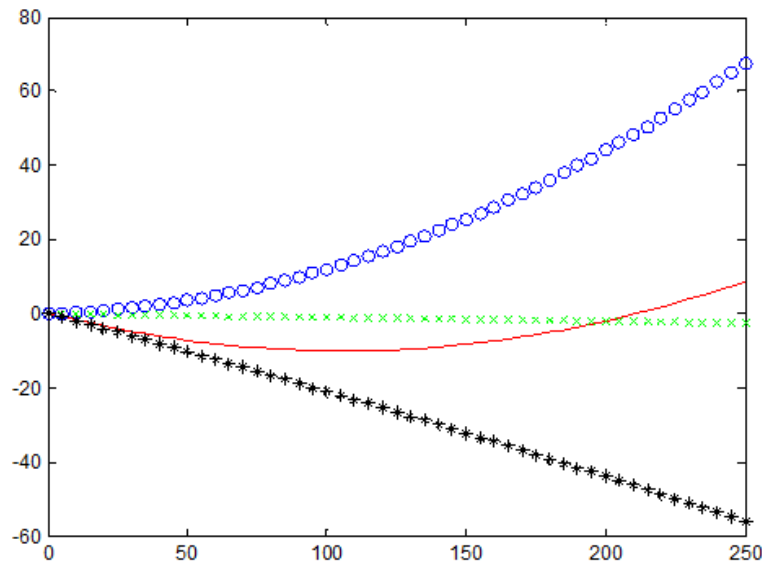


图 3 物种丰富度与各力之间的关系图

在参数设置如 $k = 20$; $p = 0.1$; $x_m = 200$; $c = 0.01$; $b = 0.01$ 的情况下,得到不同作用力与物种丰富度之间的变化图,其中,红色曲线为合力 F ,蓝色曲线为生态系统恢复力 F_1 ,绿色曲线为生态系统干扰力 F_2 ,黑色曲线为环境阻力 F_3 ,可以看到,随着物种丰富度 x 的增加,相应的合力是增加的而且是先减小后增加,生态系统恢复力增加的最快,生态系统干扰力会逐渐降低,但不会有很大变化,环境阻力是一直增加的,因为环境阻力是矢量,所以我们这里是观察其数值大小。

经过上面的简单分析可以得到如下结论:

A. 在进行人工植入物种后,相应的生态系统恢复力会有所提高,但总的合力并不会马上增加,但经过 50 年左右的降低后,后期还是会呈现增加趋势,这说明:采取措施后,效果不是马上呈现,而是要经过一定的时间后,生态系统才能有所恢复。

B. 上面的生态系统的干扰力是取得负值,说明干扰力是阻力,会影响生态系统物种丰富度的增长,因此,减少相应的干扰,例如减少人为破坏等,还是会有助于物种丰富度的提高,有助于生态系统的恢复。

C. 从上图中可以看出,环境阻力是随着物种丰富度增加而显著变强的,因此,在植入植物时,应该考虑植入同物种,或相近物种的植物,避免植入大型植物,因为大型植物会消耗许多资源,从而导致生态系统更加脆弱。

2. 模型二:“物群——生态恢复”模型

(1) 模型的准备

考虑到曾经在我国西部某地区种植过乔木，以达到生态系统恢复，但是最终结果不是很理想，下面我们建立“物群——生态恢复”模型，希望通过物群的植入使退化的生态系统得以恢复，因此对植入的物群要进行两方面的考虑：一是考虑植入物群与环境之间的关系，如水资源和环境适应度等；二是考虑植入物群与生态系统原有的植物种群之间的关系。

(2) 模型的建立

A. 场景模拟

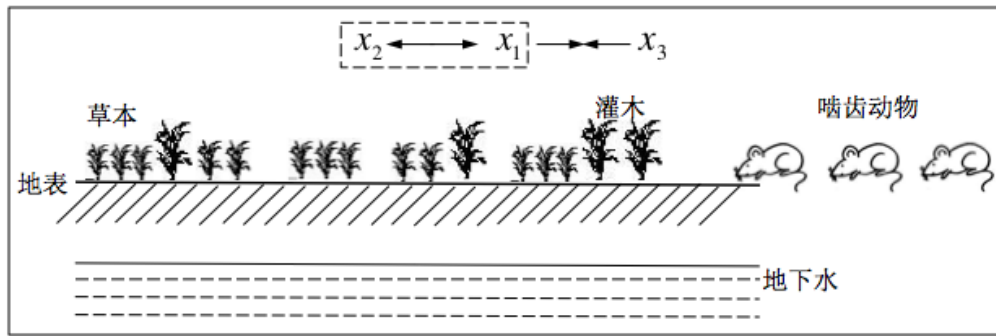


图 4 退化生态系统模拟图

说明：

- ①在退化、半退化的生态系统中，水资源有限；
- ②物种数量较少，有灌木、草本和啮齿动物；
- ③食物链较简单，生态系统较脆弱；
- ④物群说明： x_1 、 x_2 为植入到退化的生态系统中的植入物群， x_3 、 x_4 为生态系统中原有的植物种群。
- ⑤关系说明： x_1 和 x_2 是植入物群，之间为相依关系； x_3 与植入物群为竞争关系，与 x_1 存在直接竞争，与 x_2 存在间接竞争； x_4 与植入物群为相依关系。

B. 物竞关系

植物周围水分 W 与植物的蒸发系数 k_1 、固水系数 k_2 之间的关系，如图 5 所示：

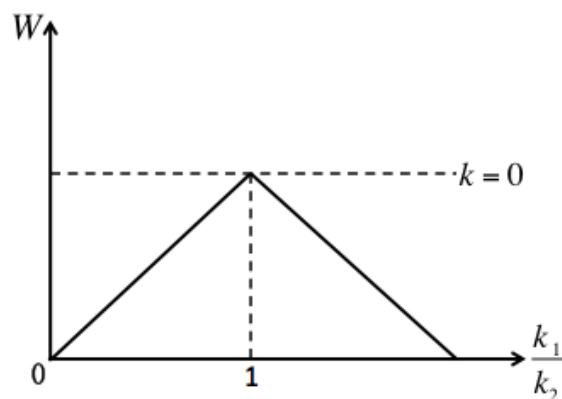


图 5 植物蒸发与固水系数之比和植物周围水分关系图

当 $k_1/k_2 < 1$ ，即蒸发系数小于固水系数时，植物周围水分 W 会增加；当 $k_1/k_2 > 1$ ，即蒸发系数大于固水系数时，植物周围水分 W 会减少。因此，我们需要植入 $k_1/k_2 < 1$ 的植物，其中，乔木的蒸发系数过大，不宜与植入到荒漠区退化、半退化生态系统中，而草本与灌木均满足条件。下面我们主要以草本和灌木作为植入植物进行分析。

C. 物种关系

这里我们仅考虑两种物种关系——相依与竞争，不考虑捕食关系。

- a) 设种群 x_1 可以单独的以 LOGISTIC 规律增长, 种群 x_2 有助于种群 x_1 的增长, 则 x_1 的数量规律表达式为

$$x_1'(t) = r_1 x_1 \left(1 - \frac{x_1}{N_1} + \sigma_1 \frac{x_2}{N_2} \right)$$

x_2 在没有 x_1 的存在时会死亡, 死亡率为 $-r_2$, 则 x_2 的数量规律表达式为

$$x_2'(t) = r_2 x_2 \left(-1 + \sigma_2 \frac{x_1}{N_1} - \frac{x_2}{N_2} \right)$$

- b) 设种群 x_3 与种群 x_1 之间是竞争关系, 则 x_1 的数量规律表达式为

$$x_1'(t) = r_1 x_1 \left(1 - \frac{x_1}{N_1} - \sigma_3 \frac{x_3}{N_3} \right)$$

x_3 的数量规律表达式为

$$x_3'(t) = r_3 x_3 \left(1 - \frac{x_3}{N_3} - \sigma_4 \frac{x_1}{N_1} \right)$$

其中, r_i 为种群 i 的固有增长率, N_i 表示环境资源允许的种群 i 的最大数量, $1 - x_i/N_i$ 表示自身消耗环境资源对资源数量的阻滞, σ_i 表是种群 i 对研究种群的影响系数, x_i/N_i 表示相对 N_i 而言单位数量的种群 i 消耗的水和营养。

- c) 考虑将 x_1 和 x_2 作为一个物群进行分析, 分析其与生态系统中原有的物种 x_3 、 x_4 之间的关系, 简单起见, 这里仅考虑 x_1 、 x_2 与 x_3 的竞争关系, 与 x_4 的相依关系不做详细讨论, 可得到如下方程组:

$$\begin{cases} x_1'(t) = r_1 x_1 \left(1 - \frac{x_1}{N_1} + \sigma_1 \frac{x_2}{N_2} - \sigma_3 \frac{x_3}{N_3} \right) \\ x_2'(t) = r_2 x_2 \left(-1 + \sigma_2 \frac{x_1}{N_1} - \frac{x_2}{N_2} \right) \\ x_3'(t) = r_3 x_3 \left(1 - \frac{x_3}{N_3} - \sigma_4 \frac{x_1}{N_1} \right) \end{cases}$$

对上面的微分方程组进行求解, 可得到 3 个物种随时间的变化趋势。

(3) 模型的求解

运用 MATLAB 进行求解, 可得到三个物种的数量变化趋势, 根据求解的数值可绘制三个物种数量变化的曲线图, 如图 6 所示: (具体程序见附件程序 4)

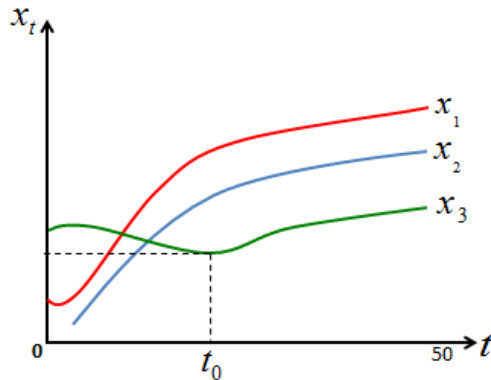


图 6 50 年内 3 个物种的数量变化图

在设定微分方程组的初始值如: $x(0) = 0.5, y(0) = 1, z(0) = 1.5$ 后, 可得到相应的数值解, 依据上图可看出: 植入退化生态系统中的具有相依关系的物群 x_1

和 x_2 具有很好的发展趋势，其中，能自行生长的 x_1 是先减少后增加的，但其减少的时间并不长，而依靠 x_1 增长的 x_2 ，要等到 x_1 开始增加时才开始增加，而生态系统中原有的物种 x_3 的变化是先减少而后增加。经过上面的简单分析，我们可以得到如下的结论：

1. 植入生态系统中的物群(x_1 与 x_2)从整体来看会有较好的发展趋势，但这里并没有分析他们的发展快慢。这说明我们的植入植被的方案具有一定的可行性，在向退化的生态系统植入植物时，应先考虑具有相依关系的物群作为植入对象。

2. 生态系统中原有的物种 x_3 ，在 t_0 之前，会由于新植入的物群消耗环境资源而降低，但降低的幅度并不是很大；在 t_0 之后，数量会呈上升趋势。这表明，虽然植入物群与生态系统中原有的物种之间会争夺资源，但随着环境的逐渐改善，环境资源总量在提高，退化程度降低，每个物种的数量都会有所提高。

§ 6 误差分析

一、误差分析

1. 主观赋权时构造的比较判别矩阵可能具有一定的误差；
2. 在确定蒸发系数和固水系数时，产生误差；
3. 选择建模方法的过程中，可能会有方法选取不当而造成的误差，从而对结果造成影响。

§ 7 模型的评价与推广

一、模型的优点

1. 本文对问题有合理的猜想、假设、计算以及检验；
2. 本文使用的模糊综合评价模型不同于传统的评价模型，而与层次分析法相结合能够主客观相结合的算出各个指标的权重，从而消除不同指标间的差异。
3. 在生态系统恢复动力学的基础上，考虑了植入种群和环境物种之间的关系，得到的结论具有可行性。
4. 本文建立的模型能与实际紧密联系，结合实际情况对所提出的问题进行求解，使模型更贴近实际，通用性、推广性较强；
5. “物群——生态恢复”模型具有创新性和可行性；
6. 所建立的模型有比较完备的理论基础，又有专业的数学理论支持，灵活运用 *Matlab* 软件对问题进行编程求解，精确度较高，结果更为可靠；

二、模型的缺点

1. 虽然最大隶属度的方法简单易行，但是由于数据的有限性以及缺少相应的大样本条件下，最大隶属度的方法很难发挥其原有的优势；
2. 在退化、半退化生态系统中物种关系中，仅考虑了相依和竞争，没有考虑捕食关系；
3. 由于背景知识不足，在模型建立过程中，主观部分导致模型也许不能很好的拟合具体地区的真实状况；
4. 模型中为使计算简便，使所得结果更理想化，忽略了一些次要的影响因素。

三、模型的推广

模糊综合评价模型：本题中运用基于层次分析法的模糊综合评价模型，对不同人类活动所造成荒漠地区生态退化的程度等级进行评估。该模型不仅仅可以在解决问题中使用，实际问题中，它具有结果清晰、系统性强的特点，被广泛应用于机器人、过程控制、地铁机车、交通管制、故障诊断、医疗诊断、声音识别、图像处理、市场预测、环境质量监测、水利等众多领域，能够很好地解决现实生活中的各类问题，尤其是能较好地解决模糊的、难以量化的问题，适合各类非确定性问题的解决。

参考文献

- [1] 龙瑞军,董世魁,胡自治. 西部草地退化的原因分析与生态恢复措施探讨[J]. 草原与草坪, 2005 年 06 期.
- [2] 贾宝全,慈龙骏,高志海,丁国栋,张克斌. 洲荒漠化及其评价指标体系的初步探讨[J]. 干旱区研究, 2001 年 02 期.
- [3] 格日乐,孙保平,刘军. 农牧交错带土地退化类型区的划分及其防治研究[J]. 干旱区研究, 2004 年 06 期.
- [4] 桂呈森,徐蒙,王桂华. 干旱半干旱地区生态环境在西部大开发中可持续发展的研究[J]. 内蒙古林业科技, 2005 年 01 期.
- [5] 刘玉平. 毛乌素沙区草场荒漠化评价的指标体系及荒漠化驱动力研究[D]. 中国科学院研究生院(国家计划委员会自然资源综合考察委员会), 1997 年.
- [6] 胡小龙. 内蒙古多伦县退化草地生态恢复研究[D]. 北京林业大学, 2011 年.
- [7] 杨晓辉. 半干旱农牧交错区土地荒漠化成因与荒漠化状况评价[D]. 北京林业大学, 2000 年.
- [8] 叶笃正. 人类活动引起的全球性气候变化及其对我国自然、生态、经济和社会发展的可能影响[J]. 中国科学院院刊, 1986 年 02 期.
- [9] 王礼. 全球荒漠化防治现状及发展趋势[J]. 世界林业研究, 1994 年 01 期.

附录

附表

附表 1 生态系统指标评判标准

生态退化程度		高度退化	中度退化	低度退化
草本生物特征	高	[0, 5)	[5, 10)	[10, +∞
	盖	[0, 5)	[5, 10)	[10, +∞
	密	[0, 50)	[50, 100)	[100, +∞
	生物量	[0, 200)	[20, 40)	[40, +∞)
灌木生物特征	高	[0, 15)	[15, 30)	[30, +∞
	盖	[0, 5)	[5, 10)	[10, +∞
	密	[0, 0.2)	[0.2, 0.4)	[0.4, +∞
	生物量	[0, 10)	[10, 20)	[20, +∞)
啮齿动物百夹捕获率	三趾跳鼠	[0, 1)	[1, 2)	[2, +∞)
	子午沙鼠	[0, 1)	[1, 2)	[2, +∞)
	小毛足鼠	[0, 0.5)	[0.5, 1)	[1, +∞)

附件

程序 1 准则层对目标层的特征向量求解及一致性检验

$A = [1, 1/2, 2; 2, 1, 2; 1/2, 1/2, 1]$;

$a = \text{eig}(A)$

$[X, D] = \text{eig}(A)$

$a1 = a(1, :)$

$a2 = X(:, 1)$

$a3 = \text{ones}(1, 3)$

$a4 = a3 * a2$

$w1 = 1 / a4 * a2$

$c11 = (a1 - 3) / 2$

$cr1 = c11 / 0.58$

程序 2 方案层对准则层的各个特征向量及一致性检验

① $B1 = [1, 1/3, 1/3, 1/2; 3, 1, 1, 2; 3, 1, 1, 2; 2, 1/2, 1/2, 1]$;

$b = \text{eig}(B1)$

$b1 = b(1, :)$;

$[X, D] = \text{eig}(B1)$;

$b2 = X(:, 1)$;

$b3 = (-1) * b2$;

$b4 = \text{ones}(1, 4)$;

$b5 = b4 * b3$;

$w3 = 1 / b5 * b3$

```

ci3=(b1-4)/3
cr3=ci3/0.9
②B2=[1, 1/2, 1/3, 1/2; 2, 1, 1/2, 1; 3, 2, 1, 2; 2, 1, 1/2, 1];
b=eig(B2)
b1=b(1, :);
[X, D]=eig(B2);
b2=X(:, 1);
b3=(-1)*b2;
b4=ones(1, 4);
b5=b4*b3;
w3=1/b5*b3
ci3=(b1-4)/3
cr3=ci3/0.9
③B3[1, 3/4, 3/5; 4/3, 1, 1/3; 5/3, 3, 1];
b=eig(B3);
[X, D]=eig(B3);
b1=b(1, :);
b2=X(:, 1);
b3=ones(1, 3);
b4=b3*b2;
w1=1/b4*b2
ci1=(b1-3)/2
cr1=ci1/0.58

```

程序 3 物种丰富度与各个力之间关系的求解

```

x=0:5:250;
F=(-19/100+9/10000.*x). *x;
F1=(1/50+1/1000.*x). *x;
F2=-1/100.*x;
F3=(-1/5-1/10000.*x). *x;
plot(x, F, 'r-', x, F1, 'bo', x, F2, 'gx', x, F3, 'k*')
F=((k*p./x_m+2*k*x./x_m^2+c)-(2*k*1./x_m+2*k*(p*x)./x_m^2)-b)*x;
F1=(k*p./x_m+2*k*x./x_m^2+c)*x;
F2=-b*x;
F3=-(2*k*1./x_m+2*k*(p*x)./x_m^2)*x;

```

程序 4 微分方程组的求解

```

[x, y, z]=dsolve('Dx=2.5*x*(1-x/1.6+0.5*y-0.3*0.5*z)', 'Dy=1.8*y*(-1+x-y)', 'Dz=2*z*(1-z/2-x/1.6)', 'x(0)=0.5, y(0)=1, z(0)=1.5', 't');
x=simple(x)
y=simple(y)
z=simple(z)
t=0:0.5:10;
plot(t, x, 'r-', t, y, 'go', t, z, 'c*')

```