

基于马尔可夫链的草原沙漠化模拟模型

姜屿涵¹, 桂志鹏^{1,2,3,4}

(1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079; 2. 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079; 3. 湖北珞珈实验室, 武汉 430079; 4. 地球空间信息技术协同创新中心, 武汉 430079)

摘要: 指导科学放牧, 加强草原沙漠化的预防和治理, 对实现草原的生态效益和经济效益具有重要意义。抽样调查等经验总结式的草原沙漠化防治, 无法从全局视角有效的预测沙漠化的进程, 指导科学放牧。本文针对草原生态及环境, 借助 NetLogo 仿真平台建立了四大模型以模拟草原沙漠化的进程, 分别是基于马尔可夫链的天气预测模型、草的生长模型、羊和狼的生命模型和沙漠的扩张模型, 实现了对草原沙漠化过程的模拟, 并以内蒙古鄂托克旗地区局部的遥感影像为实验数据, 预测和分析了该区域草原的沙漠化特征, 结果表明该地区的生态承载力很脆弱, 建议有关政府部门约束牧民, 禁止在该区域放牧, 及早治理, 同时在已经沙漠化的区域植树造林, 可以延缓区域沙漠化的进程。

关键词: 草原沙漠化; 气候; 过度放牧; 马尔可夫链; NetLogo

中图分类号: X825 **文献标识码:** A

草原生态系统具有重要的生态效益和经济效益, 它即是重要的生态屏障, 也是重要的畜牧业生产基地^[1]。然而随着社会经济的发展, 草原呈现出逐年退化、面积日益缩小的趋势^[2]。根据相关文献, 草地资源的不断退化主要归因于自然因素及人类活动^[3]。全球性变暖、气候日益干燥, 是草原生态环境恶化^[4]的基本驱动力。而盲目垦殖和过度放牧等人类活动^[5], 使得草原的土壤容量、肥力、植被的种类和数目发生很大的变化。

草地退化不断加剧的状况已经引起了很多研究者和相关部门的注意。王云霞等人基于统计数据研究了气候因子与过度放牧在内蒙古牧区草地退化演变中的作用^[6]。申陆等人基于 RWEQ 模型分析了浑善达克沙漠化防治生态功能土壤风蚀与主要影响因子分析^[7]。王鑫厅等人从正相互作用角度诠释过度放牧引起的草原退化^[8]。但是它们的研究多是基于已经发生沙漠化的草原进行相关的分析研究^[9], 从中总结经验以防治草原沙漠化^[10,11], 无法对还未沙漠化的地区进行具体的模拟分析。

为了加强对草原沙漠化的预防和治理, 指导科学放牧, 本文建立了基于马尔可夫链的草原沙漠化模型。马尔可夫过程因其无后效性、遍历性和时齐性, 目前被广泛应用在科学研究、农业预测^[12]、天气预测等领域^[13,14]。本文利用马尔可夫过程, 预测气候变化, 从而实现模拟在草原的气候下草的生长情况, 在过度放牧共同作用下, 完成草原退化的模拟模型。

1 模型方法

1.1 模型假设

1) 导致草地退化因素的假设: 根据现有研究, 自然因素是草地退化的基本驱动因素之一, 其中天气的变化为主

要的影响因子, 本模型定义为“DRY”和“WET”两种天气。其次, 过度放牧是草地资源退化的另外一个重要推动因素, 我们以羊的最大数量来定义是否构成过度放牧。

2) 草原生态系统的假设: 本文假设草原生态系统主要由草、狼、羊三个物种组成。草根据气候状况生长, 湿润的天气利于草的生长, 干旱的天气不利于草的生长, 并且草具有一定的生长周期。羊吃草获得能量, 羊具有一定的繁殖率, 狼捕食羊获得能量, 狼也具一定繁殖率。

3) 沙漠化过程的假设: 采用渗流模型模拟沙漠的扩张^[15], 本文假设土壤颗粒不存在, 沙漠化过程是由中心起点逐渐向周围土壤扩大。模型模拟了两种草地沙漠化的起点: 一是模拟现有沙漠的扩大, 沙漠化的中心起点为草地的一侧边缘。二是考虑到同一片草地, 生态状况不同, 而生态状况最差的草地往往最早开始退化, 因此将现有土壤中 NDVI 值最低的区域^[16]作为土壤退化的中心起点。另外, 由于沙漠一旦形成, 在没有植树造林等人工干预的情况下, 即使气候转变为湿润, 沙漠边缘的草地生长状况较好, 但由于土质已经恶化, 土壤养分不足, 短期内沙漠一般难以逆转^[17], 不在模型的预测范围内。因此模型在模拟草原沙漠化的过程中假设局部沙漠一旦形成, 则不再逆转恢复成为草原。

1.2 基于马尔可夫链的天气预测模型

马尔可夫预测是一种预测事件发生概率的方法。它是基于马尔可夫链(Markov Chain), 根据事件的当前状况预测其将来各个时刻变动状态的一种方法。

定义 1.2.1 状态转移概率矩阵

假设某一个事件的发展过程有 n 种可能的状态, 即 E_1, E_2, \dots, E_n 。由状态 E_i 转移为状态 E_j 的状态转移概率 $P(E_i \rightarrow E_j)$ 就是条件概率 $P(E_i/E_j)$, 则矩阵称为状态转移概

率矩阵。

$$P(E_i \rightarrow E_j) = P(E_i/E_j) = P_{ij}$$

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix}$$

一般地, 将符合以下条件的任何矩阵都称为随机矩阵, 或概率矩阵。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ij} \leq 1 & (i, j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 & (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

定义 1.2.2 状态概率 ($\pi_j(k)$)

表示事件在 $k=0$ 状态为已知的情况下, 经过 k 次状态转移后, 在第 k 时刻状态为 E_j 的概率。且

$$\sum_{j=1}^n \pi_j(k) = 1$$

根据马尔可夫过程的后无效性及 Bayes 条件概率公式, 有

$$\pi_j(k) = \sum_{j=1}^n \pi_j(k-1)P_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

记行向量 $\pi(k) = [\pi_1(k), \pi_2(k), \dots, \pi_n(k)]$, 则可以得到逐次计算状态概率的递推公式

$$\begin{cases} \pi(1) = \pi(0)P \\ \pi(2) = \pi(1)P = \pi(0)P^2 \\ \dots \dots \\ \pi(k) = \pi(k-1)P = \dots = \pi(0)P^k \end{cases}$$

式中: $\pi(0) = [\pi_1(0), \pi_2(0), \dots, \pi_n(0)]$ 为初始状态概率向量。

定义 1.2.3 第 k 时刻的状态概率预测

如果某一事件在第 0 时刻的状态已知, 即 $\pi(0)$ 已知, 则利用定义 1.2.2 中的递推公式, 就可以求得事件经过 k 次状态转移后, 在第 k 时刻处于各种可能状态的概率, 即为 $\pi(k)$, 从而预测该事件在第 k 时刻的状态概率。

一般我们认为, 今天的天气状况只与前一天的天气状况有一定关系, 具有无后效性, 满足马尔可夫的假设, 可以使用马尔可夫模型对天气进行预测。

天气情况可以分为很多种, 针对草的生长, 我们将天气分为两种状态 “WET” 和 “DRY”, 其状态转移概率矩阵如下所示:

$$P = \begin{bmatrix} P(WETtoWET) & P(WETtoDRY) \\ P(DRYtoWET) & P(DRYtoDRY) \end{bmatrix}$$

其中 $P(WETtoDRY)$ 和 $P(DRYtoWET)$ 由用户根据需要模拟的地区的实际情况自定义设置。 $P_{11} = P(WETtoWET)$, $P_{12} = P(WETtoDRY)$, $P_{21} = P(DRYtoWET)$, $P_{22} = P(DRYtoDRY)$, 且 $P_{11} + P_{12} = 1$, $P_{21} + P_{22} = 1$ 。

天气的初始状态随机生成, 即:

$$\pi(0) = [0, 1] \text{ 或 } \pi(0) = [1, 0]$$

根据递推公式即可预测其后任意一天的天气。

定义 1.2.4 终极状态概率预测

经过无穷多次状态转移后所得到的状态概率称为终极概率, 即

$$\pi = \left[\lim_{k \rightarrow \infty} \pi_1(k), \lim_{k \rightarrow \infty} \pi_2(k), \dots, \lim_{k \rightarrow \infty} \pi_n(k) \right] = \lim_{k \rightarrow \infty} \pi(k)$$

终极状态概率应满足的条件:

$$\pi = \pi P$$

$$0 \leq \pi_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\sum_{i=1}^n \pi_i = 1$$

在天气预测中, 设终极状态的状态概率为 $\pi = [\pi_1, \pi_2]$

$$\pi = \pi \begin{bmatrix} P(WETtoWET) & P(WETtoDRY) \\ P(DRYtoWET) & P(DRYtoDRY) \end{bmatrix}$$

即:

$$\begin{cases} \pi_1 = P(WETtoWET)\pi_1 + P(DRYtoWET)\pi_2 \\ \pi_2 = P(WETtoDRY)\pi_1 + P(DRYtoDRY)\pi_2 \end{cases}$$

解得:

$$\pi_1 = \frac{P(DRYtoWET)}{P(WETtoDRY) + P(DRYtoWET)}$$

$$\pi_2 = \frac{P(WETtoDRY)}{P(WETtoDRY) + P(DRYtoWET)}$$

1.3 草的生长模型

在 1.1 节中, 使用马尔可夫过程完成了对天气的预测。模型基于天气情况实现草的生长的模拟。模型定义草具有两个属性, 生长周期 GrassGrowTime 和生长度 Growth ($0 \leq \text{Growth} \leq 10$), 其中最小生长周期 minGrassGrowTime 由用户定义, 草的初始长势 Growth(0) 根据所要监测区域的遥感影像, 计算出的归一化植被指数 NDVI, 映射到 Growth 上即可。如果没有 NDVI 影像, 模型设置草的密度 GrassDensity, 随机生成草的初始长势。

植被指数(NDVI)是检测植被生长状态、植被覆盖度和消除部分辐射误差等。遥感影像中, NDVI 由近红外波段的反射值与红光波段的反射值之差比上两者之和计算得出, 将 NDVI 换算至 [0,10] 即为 Growth(0):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

$$\text{Growth}(0) = NDVI \div \max NDVI * 10$$

考虑到草的生长周期由日照程度、土壤酸碱度、土壤湿度、风速等多因素共同影响, 而这些因素由于遮挡、地形的原因, 在小范围内具有差异性, 决定草在局部长势的差异, 不同初始长势 Growth(0), 最能反应上述差异性。因此模型根据 minGrassGrowTime 和 Growth(0) 共同决定草的初始生长周期, 不同初始状态的草具有不同的初始生长周期。即

$GrassGrowTime(0)$

$$= \minGrassGrowTime \div 10 * Growth(0)$$

第 k 时刻, 当天气为 WET 时:

$$GrassGrowTime(k) = GrassGrowTime(k-1) - 1$$

当天气为 DRY 时, 草无法生长。直到 n 时刻后, $GrassGrowTime(k+n)=0$ 时, 草完成一个生长周期, 生长值增加 1, 生长周期初始化开始下一个生长周期, 即:

$$Growth(k+n) = Growth(k+n-1) + 1$$

$$GrassGrowTime(k) = GrassGrowTime(0)$$

在草的整个生命周期中, 如果在某个时刻 m , 草被羊食用, 则:

$$Growth(m) = 0$$

$$GrassGrowTime(m) = GrassGrowTime(0)$$

1.4 羊和狼的生命周期模型

该模型模拟草原的简单生物链, 羊群通过食草获得能量, 狼群通过捕食羊获得能量。羊和狼具有一定的生殖率, 生殖和移动都会消耗能量, 当长时间没有能量补充时, 羊和狼会死亡。羊和狼 1 生命周期都以能量 Energy 来标识, 初始能量随机生成, 单位能量表示为 1。

羊的生命模型包括移动、食草、生殖、被捕、死亡 5 个生命活动, 具体如下。

移动 Move: 每次移动消耗单位能量。

食草 SheepGainFromFood: 羊群食草获得的能量, 获得的最大单位能量为 \maxGrassEnergy 。当羊在食草时获得的具体能量由草所处的生长周期决定, 如果羊食用的是处于生长初期的草则获得的能量少, 食用成熟的草则获得的能量多。

$$SheepGainFromFood = \maxGrassEnergy * Growth / 10$$

生殖 ReproduceSheep: 羊具有一定的生殖率 $ReproduceSheepRate(0 < ReproduceSheepRate < 100)$ 。羊群的限定最大数量 \maxNumber , 当羊群数量达到最大, 不再生殖, 该参数用于模拟控制过度放牧。当且仅当 $SheepNumber < \maxNumber$, 且 $Random(0,100) < ReproduceSheepRate$ 时, 发生生殖行为, 消耗能量:

$$ReproduceSheep = SheepEnergy \div 2$$

被捕: 死亡 Death

能力消耗完毕: 死亡 Death

初始时刻, 羊的能量为:

$$Sheep(0) = Random(0, SheepGainFromFood)$$

第 k 时刻, 羊的能量为:

$$\begin{aligned} SheepEnergy(k) = & SheepEnergy(0) \\ & + \sum_{i=1}^k SheepGainFromFood(i) - Move(i) \\ & - ReproduceSheep(i) \end{aligned}$$

当 $SheepEnergy(k) \leq 0$ 时, 或被狼捕食, 羊死亡。

狼的生命模型包括移动、捕食羊、生殖、死亡 4 个生命活动, 其中移动 Move、生殖 ReproduceWolf 与羊基本相同, 此处不再赘述。捕食羊 WolfGainFromFood 定义狼捕

食一头羊获得的能量, 死亡 Death 只存在能量消耗完毕后死亡。

初始时刻, 狼的能量为:

$$Wolf(0) = Random(0, WolfGainFromFood)$$

第 k 时刻, 狼的能量为:

$$\begin{aligned} WolfEnergy(k) = & WolfEnergy(0) + \sum_{i=1}^k WolfGainFromFood(i) \\ & - Move(i) - ReproduceWolf(i) \end{aligned}$$

当 $WolfEnergy(k) \leq 0$ 时, 狼死亡。

1.5 沙漠的扩张模型

沙漠一般从现有的沙漠向边缘扩张, 当沙漠边缘相邻的土壤长期处于裸露状态, 则会沙漠化。模型定义了 3 种沙漠扩张的情况, 分别是:

情况一: 现有沙漠的扩展

模型将草地的一侧边缘作为沙漠的起点, 模拟该处草地与现有沙漠相邻, 其逐渐沙漠化的过程。

情况二: NDVI 最低区域为起点

当 NDVI 为 0 时, 表示有岩石或裸土, NIR 和 R 近似相等, 裸露的土壤和岩石相较于草地, 更容易沙化。因此 NDVI 越小, 表示草的长势越差, 此处的土壤条件越差, 越接近裸露的土壤, 所以模型取 NDVI 值最小处, 作为区域沙漠化的起点。

情况三: 随机起点

当草的初始长势是随机生成时, 初始长势无法代表土壤状况, 随机撒点作为沙漠化的起点, 仅用于观测沙漠的扩展效果和模型效果。

定义 1.5.1 渗流模型

渗流是指流体在孔隙介质中的流动。渗流状态, 是指系统中出现一个大的集群, 能够将这些集群节点的和邻居节点的边界打通、渗透(只考虑上下左右四个方向的邻居, 集群即团簇)。在保持渗流区原有的边界条件和渗透流量不变的条件下, 把渗流看成是由液体质点充满全部渗流区的连续流动, 这就是渗流模型^[18]。

沙漠的扩张采用渗流模型实现。当现有沙漠周围的草地长期出现裸露土壤时, 周围的草地沙漠化。沙漠扩张的速度由沙漠扩张周期

DesertificationTime 和草的长势 Growth 决定。

在第 k 时刻, 如果沙漠起点周围存在 $Growth = 0$ 的区域, 则:

$$DesertificationTime(k) = DesertificationTime(k-1)$$

直到 n 个时刻后,

$$DesertificationTime(k+n) = 0$$

沙漠向 $Growth = 0$ 的区域扩张, 该区域成为新的沙漠起点, 开启新的沙漠扩张周期 $DesertificationTime(k+n) = DesertificationTime(0)$

2 模型结果分析

模型的整体界面如图 1 所示: 左侧区域为参数调节区

域, 设置各类初始化选项, 右侧区域为监视区, 观察模拟过程中草、羊、狼、天气等的变化情况, 中间为模拟区域。

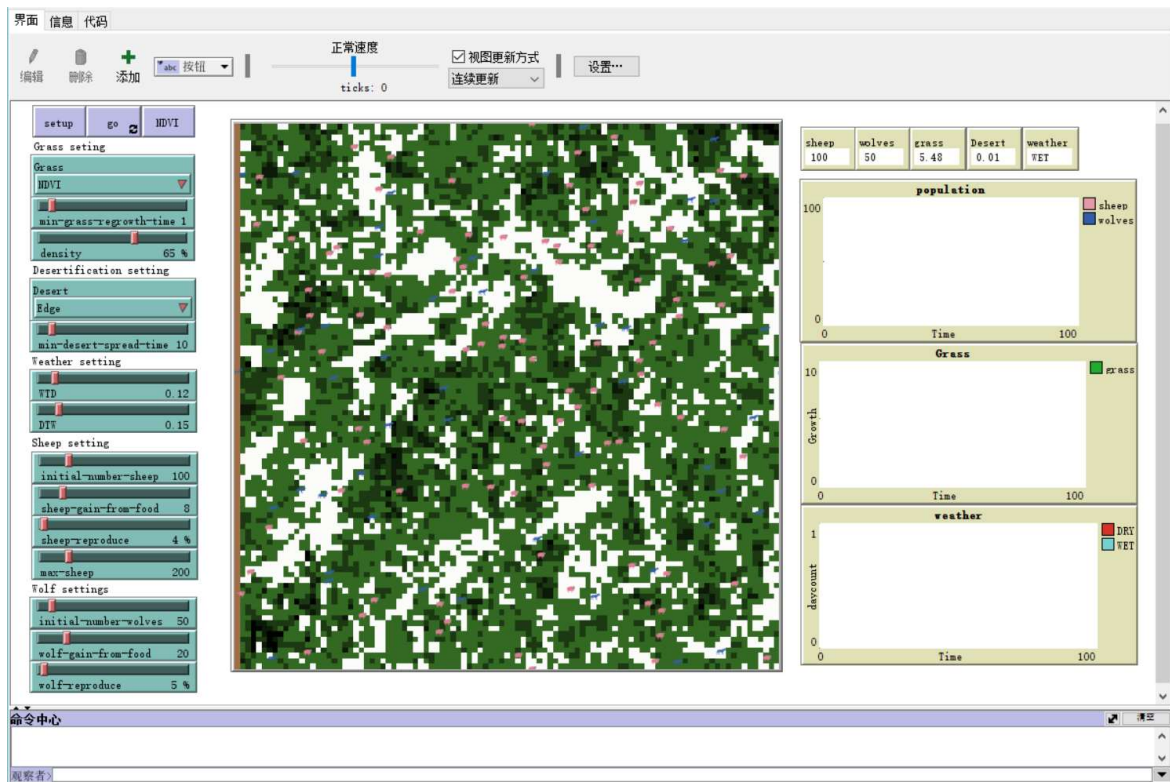


图1 NetLogo 模型界面

Fig.1 Model Interface in NetLogo

2.1 研究区概况

本文选择位于内蒙古西部, 地处草原与荒漠的过渡区的鄂托克旗作为实验区域。内蒙古鄂托克旗总土地面积为 19981.61km^2 , 地理坐标为东经 $106^\circ 43' \sim 108^\circ 54'$ 、北纬 $38^\circ 18' \sim 40^\circ 11'$, 毛乌素沙地分布在旗内的东南部, 境内沙地、荒漠、草原、湿地等生态类型多样, 区位十分重要^[19]。鄂托克旗属于温带大陆性气候^[20], 该旗基本是一个以牧业为主的旗县。

2.2 天气变化模拟

以鄂托克旗连续 42 天的天气状况为例, 如表 1 所示:

表 1 鄂托克旗 42 天天气

Tab. 1 The weather in Etuoke Banner over 42 days

天气 (DRY / WET)						
DRY	DRY	DRY	DRY	DRY	DRY	DRY
DRY	DRY	WET	DRY	DRY	DRY	DRY
DRY	DRY	DRY	DRY	WET	WET	DRY
WET	WET	WET	WET	DRY	WET	WET
WET	WET	WET	WET	WET	DRY	WET
WET	DRY	DRY	DRY	WET	WET	WET

由表 1 计算可得:

$$P(\text{DRY to WET}) = 6 / 41 = 0.15$$

$$P(\text{WET to DRY}) = 5 / 41 = 0.12$$

可见鄂托克旗的气候不是多变性的气候, 当气候时湿润或干旱都会维持较长一段时间。本文模型, 可以成功预测出未来的天气, 前 21 天如表 2 所示。

表 2 模型预测未来 21 天天气

Tab. 2 The weather for the next 21 days predicted by model

天气 (DRY / WET)						
WET	WET	WET	WET	WET	WET	WET
WET	DRY	DRY	DRY	DRY	WET	DRY
DRY	DRY	DRY	DRY	DRY	DRY	DRY

随着时间的推移, 湿润和干旱天气的累计频率如图 2 所示。

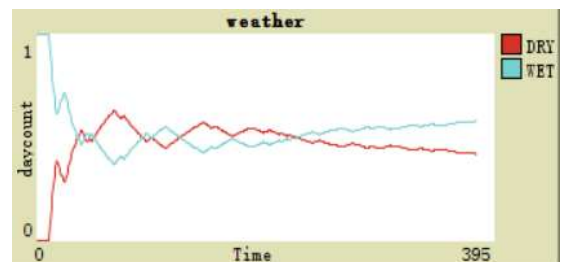


图 2 天气频率累计曲线

Fig.2 Accumulation curve of weather frequency

2.3 草的生长模拟

本文将 minGrassGrowTime 设置为 1, 之后的模型中不在变化。然后利用鄂托克旗地区的 TM 影像的 3, 4 波段, 计算出的 NDVI 值作为草的初始长势, NDVI 影像如图 3 左图所示, 黑色区域为长势较差的部分, 白色区域为长势较好的区域, 将 NDVI 映射到 Growth 上后, 经过渲染如图 3 中的右图所示, 白色区域为裸露的土壤, 其余区域颜色越深表示草的长势越好, 该区域草的整体长势还不错, 部分裸露土壤存在沙漠化的风险。

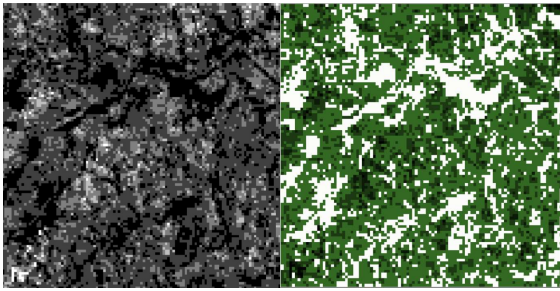


图 3 NDVI 影像和映射后影像

Fig.3 NDVI image and it's mapped image

从图 4 草长势的变化曲线中可以看到, 鄂托克旗地区草的整体生长情况, 波动较大, 存在明显的旱季和雨季。在旱季沙漠化的风险较高。

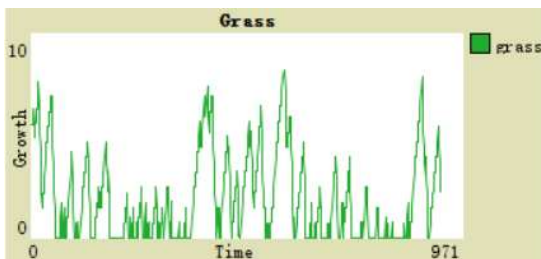


图 4 草的长势变化曲线

Fig.4 Change curve of grass growth

2.4 狼和羊的生命周期模拟

根据相关文献, 本文设置羊和狼的模型参数如表 3 所示。

表 3 模型参数设置

Tab. 3 Model parameter setting

参数	值
InitialSheepNumber	100
SheepGainFromFood	4
SheepReproduce	4%
maxNumber	1000
InitialWolfNumber	50
WolfGainFromFood	20
WolfReproduce	5%

在不考虑沙漠化的情况下, 由 2.3 节的分析可知, 鄂托克旗地区的气候具有明显的旱季和雨季特征, 因此当初始气候为干旱时, 草原会维持一段时间的干旱气候, 此时草的生长力较弱。如果不加干预, 过度放牧, 从图 5 可以看到, 羊群在前期食物充足的情况下急剧增长, 导致鄂托克旗地区的草原将急速退化, 以至于完全无法承受羊群的生长, 后期狼群和羊群全部死亡, 经过较长一段时间后, 草原才逐渐恢复。

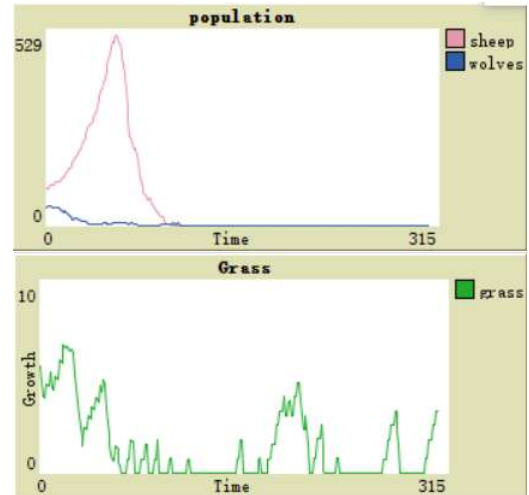


图 5 过度放牧下狼、羊和草的变化曲线

Fig.5 Change curves of wolves, sheep, and grass under overgrazing

改变模型参数, 设置 maxNumber = 200, 控制羊群的数量, 避免过度放牧情况, 其余参数不变。在图 6 中可以看到, 羊群和狼群依然在前期数量增长之后, 由于能量不足, 全部死亡。但是注意到, 草的长势恢复速度相较于过度放牧情况下, 恢复更快。

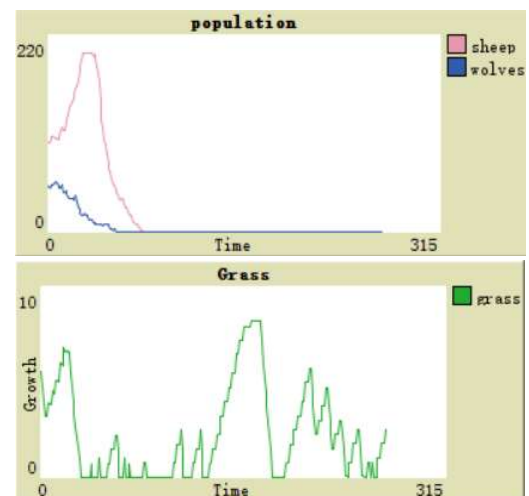


图 6 正常放牧下狼、羊和草的变化曲线

Fig.6 Change curves of wolves, sheep, and grass under normal grazing

因此针对鄂托克旗地区, 建议牧民在旱季应该适当的

给羊补充饲料, 草的生长能力较弱, 无法为羊群提供足够的能量, 并且在旱季放牧, 草原的恢复速度会变慢。

模型计算出半饲养半放养状态的临界值 $\text{SheepGainFromFood} = 9$, 羊群能够正常生存。其余参数与正常放牧情况下相同, 可以得到图 7 所示结果, 草的整体生长情况明显好转, 在旱季之后, 迅速恢复, 羊群也能够维持在稳定的最大数量。

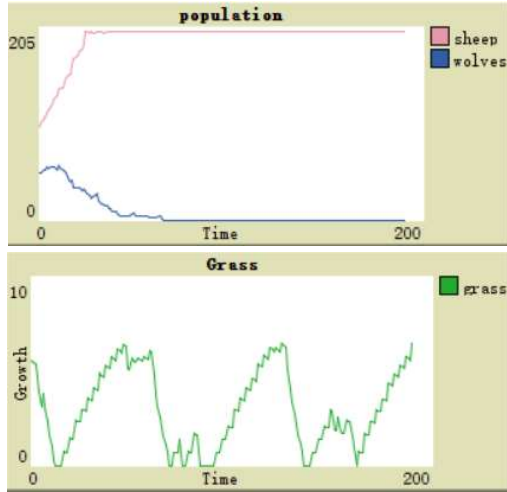


图 7 半饲养半放养下狼、羊和草的变化曲线

Fig.7 The change curves of wolves, sheep, and grass in a semi-captive semi-free range setting

注意到, 在不同情况下狼群依然全部死亡, 说明维持现有的羊群数量, 不利于狼的生存, 但现有的生态状况承载力有限, 鄂托克旗的草原生态处于不平衡状态, 十分脆弱。由模型结果, 建议相关在控制放牧的同时, 应该大力加强对狼群的保护。

2.5 沙漠扩张模拟

参考相关文献, 本文设置沙漠的扩张速度为 $\text{Desertification} = 10$, 之后的模型中不再变化。

2.5.1 现有沙漠的扩张 沙漠由边缘向中心逐渐延展, 羊和狼的参数与 2.4 节半饲养半放羊时相同, 初始化后如图 8 所示, 右侧褐色边缘即为沙漠化的起点, 粉色的点为羊, 蓝色的点为狼, 背景为鄂托克旗地区草原。模拟结果表示草原在 609tick 时沙漠化。

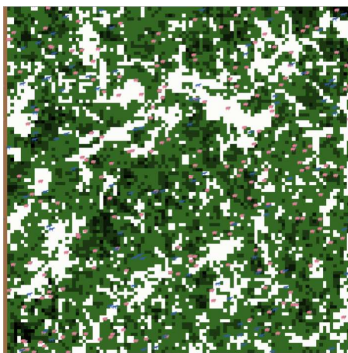
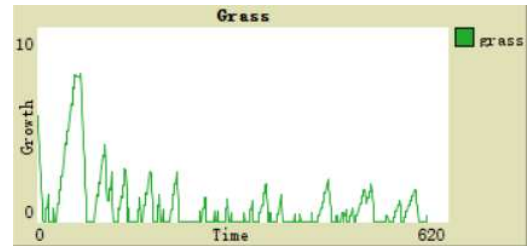


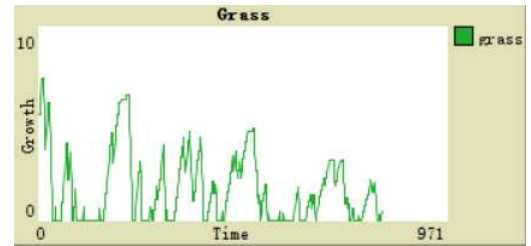
图 8 模型初始化

Fig.8 Model initialization

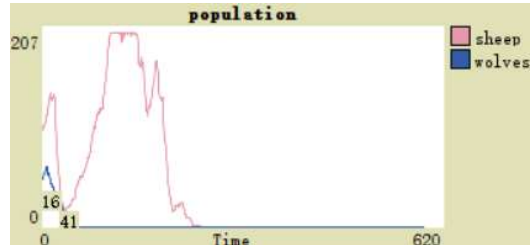
当没有羊群和狼群时, 模拟结果显示草原将在 817tick 时沙漠化, 说明鄂托克旗地区的生态十分脆弱, 即使没有牧羊, 由于气候恶劣以及草的原始长势不好的原因, 在自然状况下也会沙漠化。当有羊群时, 草原沙漠化的速度更加快, 加速约 1.4 倍。图 9 中图(a)和图(b)分别是有羊群和没有羊群时草的长势变化曲线, 当有羊群时, 草原的退化速度明显加快。同时, 图(c)说明在半饲养半放养状态下, 羊群依然全部死亡。因此像鄂托克旗地区这类生态脆弱, 在自然状况下就会完全沙漠化的地区, 完全不适合牧羊。



(a) 牧羊下沙漠化时草的长势变化曲线



(b) 无牧羊下沙漠化时草的长势变化曲线



(c) 羊群变化曲线

图 9 边缘沙漠化时狼、羊、草的变化曲线

Fig.9 Change curves of wolves, sheep, and grass during edge desertification. (a) The growth trend of grass during desertification under grazing. (b) The growth trend of grass during desertification without grazing. (c) The curve depicting changes in the sheep population.

图 10 模拟出了在沙漠化过程中, 沙漠扩张的方向和趋势, 沙漠由边缘向中心扩张, 并没有按照鄂托克旗区域的土壤状况扩张, 而是均匀由两边向中间逐渐推进。



图 10 沙漠化示意图

Fig.10 Desertification diagram

当我们改变地区的天气情况为更佳湿润, $P(\text{DRY to WET}) = 0.3$, 图 11 中可以看到湿润气候的累计频率明显上升。在没有羊群时, 鄂托克旗地区的沙漠化速度明显减缓, 在 825tick 时的情况如图 12 所示, 仅部分沙漠化, 并且在边缘区域, 沿着土壤状况较差的方向扩张。说明气候对于沙漠化会产生较大的影响, 当气候改善时, 沙漠化情况也会明显改善。直到 1557tick 草原才完全沙漠化, 沙漠化速度减缓了约 2 倍

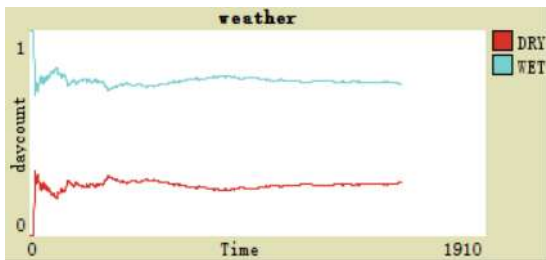


图 11 天气频率累计曲线

Fig.11 Cumulative frequency curve of weather

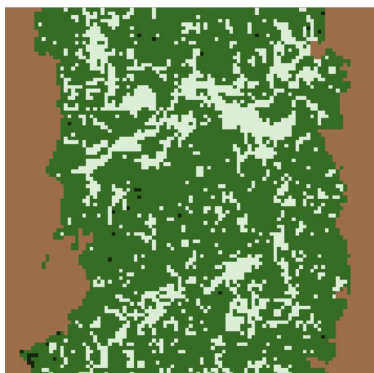


图 12 湿润天气沙漠化示意图

Fig.12 Desertification diagram under humid weather conditions

2.5.2 土壤状况最差处沙漠化 模型认为当鄂托克旗地区发生沙漠化时, 首先从 NDVI 值最低处开始, 该模型模拟鄂托克旗地区内部已经部分沙漠化后的情况。羊和狼的参数与 2.4 节半饲养半放羊时相同, 初始化后如图 13 所示。模拟结果表示草原在 50tick 时沙漠化。

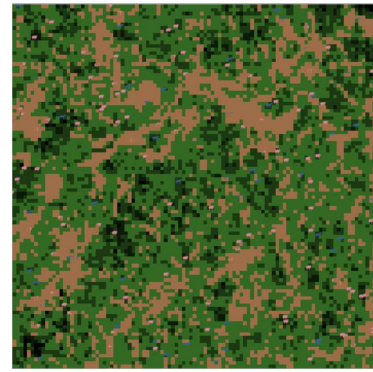


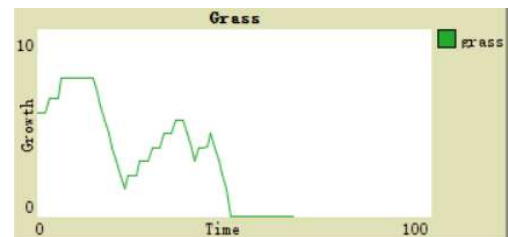
图 13 模型初始化

Fig.13 Model initialization

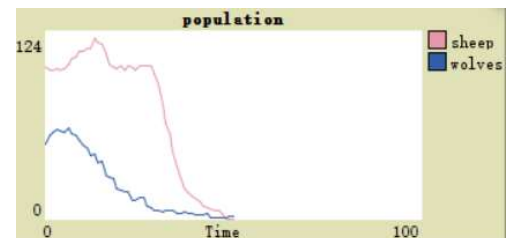
当没有羊群时, 由于鄂托克旗区域内部已经有一部分裸露土壤, 当假设这部分区域已经沙漠化时, 草原在 65tick 时几乎完全退化。图 14 中图(a)和图(b)分别是有羊群和没有羊群时草的长势变化曲线, 当有羊群时, 草原的退化速度更快。同时, 图(c)说明在半饲养半放养状态下, 羊群和狼群短时间内全部死亡。因此, 当草原内部已经开始出现部分地区沙漠化时, 一定要引起重视, 此时无论是否牧羊, 土壤状况已经很差, 沙漠化的速度极快。



(a) 牧羊下沙漠化时草的长势变化曲线



(b) 无牧羊下沙漠化时草的长势变化曲线



(c) 羊群变化曲线

图 14 NDVI 最低处沙漠化时狼、羊、草的变化曲线

Fig.14 The change curve of wolves, sheep, and grass during desertification at the lowest point of NDVI. (a) The growth trend of grass during desertification under grazing. (b) The growth trend of grass during desertification without grazing. (c) The curve depicting changes in the sheep population.

图 15 模拟出鄂托克旗地区内部 NDVI 值最低处已经沙漠化时, 该地区整体沙漠化的过程, 沙漠由已经沙漠化的区域向未沙漠化的迅速扩张, 在短时间内区域即将完全沙漠化。

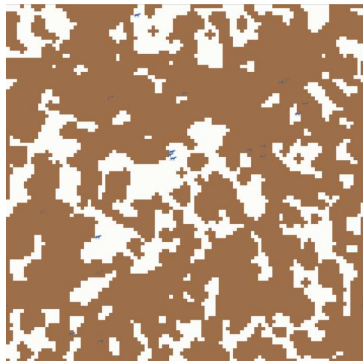


图 15 沙漠化示意图
Fig.15 A schematic diagram of desertification

综上, 通过 2.5.1 节和 2.5.2 节的模型模拟发现, 一是若鄂托克旗地区不考虑沙漠化, 当前草的生长情况也不适合放牧, 至少以 (草: 饲料 = 4: 5) 的比例半饲养半放养, 羊群才能存活。二是在考虑沙漠化时, 鄂托克旗地区本身的生态承受力较为脆弱, 不适合放牧, 按照当前的气候状况, 草原会在短期内沙漠化, 如果气候由干旱转为湿润的概率提高 2 倍, 沙漠化速度会放慢 2 倍。三是在像鄂托克旗地区这类土壤条件差的地区, 如果放牧, 仅 200 头羊也会加速沙漠化进程约 1.4 倍, 建议有关部门禁止在鄂托克旗地区放牧, 并且及时的植树造林, 保护草原。同时由于羊群的减少, 相关部门也要注意对其它野生动物的保护, 如狼群等。四是当鄂托克旗内部裸露土壤已经开始沙漠化时, 该地区完全沙漠化的风险极高, 沙漠化速是由边缘开始沙漠化的 12 倍。

2.5.3 模拟草原随机沙漠化 模型以按照草的密度随机生成的草原为基础, 随机撒点作为沙漠化起点, 模拟在土壤情况较好的地区沙漠化的过程, 并观察分析其原因。

首先是模拟“过度放牧”情况。将草的生长初始生长状况设置为随机, 随机撒点作为沙漠化的中心起点。羊和狼的模型参数如表 4 所示。

表 4 模型参数设置

Tab. 4 Model parameter setting

参数	值
InitialSheepNumber	200
SheepGainFromFood	4
SheepReproduce	4%
maxNumber	1000
InitialWolfNumber	100
WolfGainFromFood	20
WolfReproduce	5%

P(DRYtoWET)	0.15
P(WETtoDRY)	0.12
GrassDensity	80%

该草原比鄂托克旗原始的土壤条件更好, 草更加茂盛, 草的平均生长周期也较短, 在恶劣天气后, 能较快的恢复, 初始化效果如图 16 所示, 白色区域为没用草的区域。

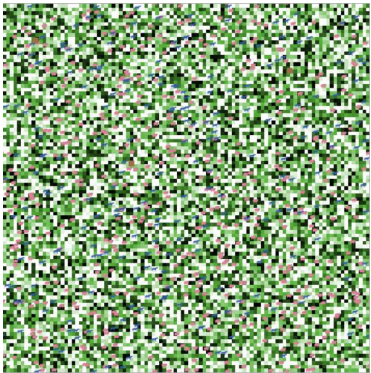


图 16 模型初始化
Fig.16 Model initialization

如图 17 可以看到, 初期, 运行 152tick 后, 可以看到羊群在前期迅速增长后, 产生“过度放牧”现象, 草原退化, 羊群也随之迅速减少, 但是我们注意到当羊群减少后, 草原迅速恢复, 此时草的平均所处生长值为 5.28%, 沙漠化现象并不严重, 沙漠化的区域占比为 0.02%。并且羊群在仅仅依靠草为唯一食物的情况下, 没有立即全部死亡, 草原的生态承载力较强。

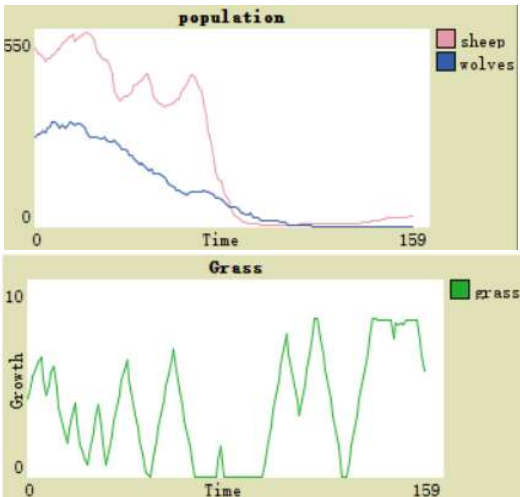


图 17 初期狼、羊、草的变化曲线

Fig.17 Change curves of wolves, sheep, and grass during the initial stage

直到 806tick 后, 草原才几乎完全沙漠化。如图 18 所示, 为整个过程中草的长势的变化曲线, 可以看到在初期由于过度放牧, 草的长势变差, 当羊群全部死亡后, 草原恢复长势, 之后均匀的逐渐沙漠化。

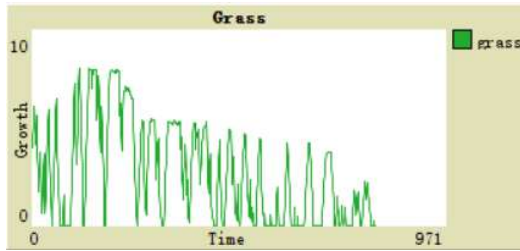


图 18 牧羊时草的整体变化曲线

Fig.18 The overall change curve of grass during grazing

当没有羊群时,其余参数不变,如图 19 所示,在 821tick 时,草原并没有发生严重的沙漠化,草的长势维持较好,沙漠化区域占比 0.16%。该模拟草原直到 1581tick 后才几乎完全沙漠化,并且在沙漠化过程中,基本保持匀速沙漠化。说明过渡放牧会对草原沙漠化产生较大的影响,加速草原的荒漠化约 2 倍。

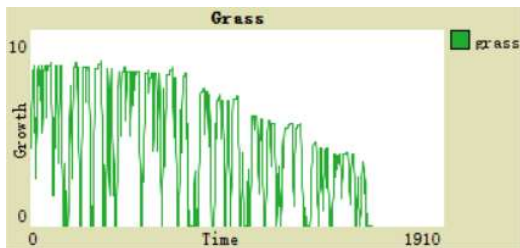
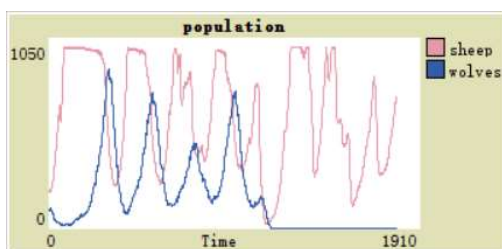


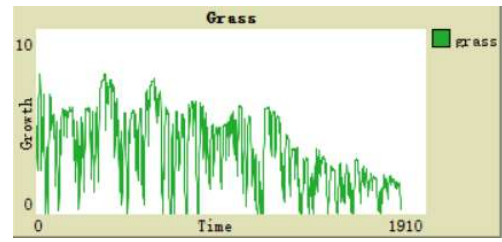
图 19 无牧羊时草的整体变化曲线

Fig.19 The overall change curve of grass without grazing

当使整体气候变湿润时,将 $P(\text{DRYtoWET})$ 提高到 0.3,其余参数不变,直到 1791tick,该区域沙漠化,与在原始气候条件下,没有牧羊时沙漠化的速度相差不大。在图 20(a)中看到在羊群在前期,由于模拟草原的长势较好,可以维持增长到足够多,狼可以生存,形成了相对的生态平衡,在前期一定程度上能够抑制羊群,有效的降低过度放牧的可能,如图 20(b) 所示,草的长势会随着羊群数量的变化波动。但由于羊群数量过多,随着沙漠由中心开始逐渐往外扩张,草减少,羊减少,狼群全部死亡。最终沙漠化时的模拟草原景象如图 22 所示,随机点为沙漠化中心的区域,沙漠化后的形状不规则,可以看到以起点为中心,均匀向周围扩张的趋势。



(a) 无牧羊时狼、羊的整体变化曲线



(b) 无牧羊时草的整体变化曲线

Fig.20 The overall change curve of wolves, sheep, and grass without grazing

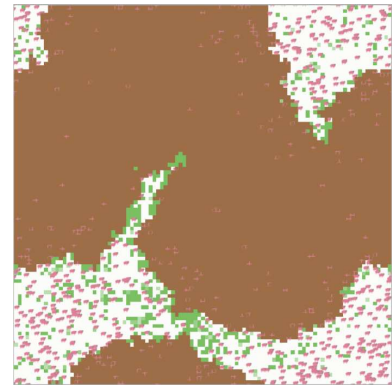


图 21 模拟草原的沙漠化

Fig.21 Desertification of simulate grassland

综上,对于土壤条件较好的地区,气候和放牧对沙漠化都会产生较大的影响。相关部门应该根据当地的情况,如果气候不可变,则控制牧民们牧羊的数量,尤其是过度放牧的情况。

3 总结

本文建立了基于马尔可夫链的草原沙漠化模型,结合天气预测模型、草的生长模型、羊和狼的生命模型和沙漠扩张模型,基于遥感影像计算 NDVI 或基于密度随机生成任意草原,能够实现观察在不同气候下,草的长势,草、羊、狼的生态平衡,模拟沙漠化的进程,能够有效的模拟草原的生态情况。在实验中,本文实现了对内蒙古鄂托克旗地区和随机草原区域的沙漠化进行模拟,模型得出,不论是在生态脆弱的区域还是生态较好的区域,气候因素和过度放牧对草原沙漠化都有较大的影响,效果很明显。有关部门应该根据当地原始的生态状况,结合气候情况,科学的指导牧民放牧,加强植树造林,减缓草原的沙漠化。另外,模型还发现在生态脆弱的地区,由于羊群难以生存,狼群也难以生存,因此有关部门也要注意保护狼,促进生态平衡,可以在一定程度上抑制过度放牧。

参考文献 (References)

- [1] 吴金蕊,李梦真,杨勇等.典型草原不同放牧强度下羊草种群空间分布的研究[J/OL].草业学报,2023,1-9.
- [2] 胡会峰.草地退化与修复研究态势:基于 1930—2022 年研究主题演变分析[J].中国科学基金,2023,37(04):613-622.

- [3] 王瑞玲. 草原退化原因及治理对策[J]. 当代畜牧, 2017(05):20-21.
- [4] Chen Z., Liu J., Li L., et al. Effects of climate change on vegetation patterns in Hulun Buir Grassland[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2022, 597(7046): 127275.
- [5] Zhao, X., Delgado-Baquerizo, M., Song, Y., Cai, J., Qing, Ch., Liu, J., Zhu, H., Li, Z., Chen, Y., Song, X., Zhu, Y., Wang, L.. Effects of livestock overgrazing on the relationships between plant and microbial diversity across the temperate steppes in northern China[J]. Land Degradation and Development, 2022, 34(4): 1-11.
- [6] 王云霞, 修长柏, 曹建民. 气候因子与过度放牧在内蒙古牧区草地退化演变中的作用[J]. 农业技术经济, 2015, 000(008):112-117.
- [7] 申陆, 田美荣, 高吉喜. 基于 RWEQ 模型的浑善达克沙漠化防治生态功能区土壤风蚀与主要影响因子分析[J]. 水土保持研究, 2016, 023(006):90-97.
- [8] 王鑫厅, 王炜, 梁存柱,等. 从正相互作用角度诠释过度放牧引起的草原退化[J]. 科学通报, 2015, 60(28):2794-2799.
- [9] 阿如早, 都来, 盛艳,等. 基于 Logistic 回归模型的内蒙古多伦县土地沙漠化驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(01):139-145.
- [10] 李成洁. 加强草原监理有效遏制草原沙漠化[J]. 农业工程技术, 2018, 38(20):41-42.
- [11] Zhou Y., Hasi E., Wang Z., et al. Dynamics of blowouts indicating the process of grassland desertification[J]. Land Degradation and Development, 2022, 33(15):2885-2897.
- [12] 常小燕,刁海亭,邓琦等.基于灰色马尔可夫模型的耕地需求量预测[J].黑龙江农业科学,2020(02):107-112.
- [13] 周安琪,高松,喻丹.加权马尔可夫链阶数对湖北省年降雨量预测精度的影响研究[J].水资源开发与管理,2022, 8(05): 64-71+76.
- [14] 梁爱凝. 马尔可夫链在天气预测中的应用[J]. 价值工程, 2016, 35(23).
- [15] 侍世玲,韩若琳,蒙仲举.半干旱区放牧管理草地土壤优先流特征及其影响因素研究[J].节水灌溉,2023(08):110-120+128.
- [16] Wang X., Li Y., Wang X.,et al. Temporal and Spatial Variations in NDVI and Analysis of the Driving Factors in the Desertified Areas of Northern China From 1998 to 2015[J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9(633020):1-16.
- [17] 马浩文,王永芳,郭恩亮.基于 GEE 的翁牛特旗土地沙漠化遥感监测[J].干旱区研究, 2023,40(03):504-516.
- [18] 刘志春,高新强,朱永全.裂隙岩体隧道非均质、各向异性等效渗流模型及应用[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2011,24(01):1-4.
- [19] 冯娟丽,崔红,刘利清.草原化荒漠地区景观格局特征研究——以内蒙古鄂托克旗为例[J].内蒙古林业调查设计,2006,3:76-77.
- [20] 刘永红,李艳红,段启勇.鄂托克旗近 50 年气候变化特征分析[J].农业灾害研究,2014,4(06):38-40.

Markov Chain-based Simulation Model of Grassland Desertification

Jiang Yuhan¹, Gui Zhipeng^{1,2,3,4}

(1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping, and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. Hubei LuoJia Laboratory, Wuhan 430079, China; 4. Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China)

Abstract: Guiding scientific grazing and strengthening the prevention and control of grassland desertification are of great significance for achieving the ecological and economic benefits of grasslands. Experience-based approaches such as sampling surveys are insufficient to effectively predict the process of desertification from a global perspective and guide scientific grazing. In this paper, focusing on the grassland ecology and environment, four models were established using the NetLogo simulation platform to simulate the process of grassland desertification. These models include a weather prediction model based on the Markov chain, a grass growth model, a model for the interaction between sheep and wolves, and a desert expansion model. By utilizing remote sensing images of the Etoke Banner region in Inner Mongolia as experimental data, the desertification characteristics of the grassland in this area were predicted and analyzed. The results indicate that the ecological carrying capacity in this region is fragile. It is recommended that relevant government departments restrict herdsmen from grazing in this area, implement early-stage control measures, and conduct afforestation in areas already experiencing desertification to slow down the process of desertification in the region.

Keywords: grassland desertification; climate; overgrazing; Markov chain; NetLogo