

草原放牧策略研究

一、背景介绍

草原作为世界上分布最广的重要的陆地植被类型之一，分布面积广泛。中国的草原面积为 3.55 亿公顷，是世界草原总面积的 6%~8%，居世界第二。此外，草原在维护生物多样性、涵养水土、净化空气、固碳、调节水土流失和沙尘暴等方面具有重要的生态功能。自 2003 年党中央、国务院实施“退牧还草”政策以来，在保护和改善草原生态环境、改善民生方面取得了显著成效。“退牧还草”并不是禁止放牧，除了部分区域禁牧外，很多草原实行划区轮牧以及生长季休牧。合理的放牧政策是带动区域经济、防止草原沙漠化及保障民生的关键，放牧优化问题的研究也为国家、政府制定放牧政策和草原管理决策提供科学的依据。

中国草原主要分为温带草原、高寒草原和荒漠草原等类型。内蒙古锡林郭勒草原是温带草原中具有代表性和典型性的草原，是中国四大草原之一，位于内蒙古高原锡林河流域，地理坐标介于东经 $110^{\circ}50'$ ~ $119^{\circ}58'$ ，北纬 $41^{\circ}30'$ ~ $46^{\circ}45'$ 之间，年均降水量 340mm。内蒙古锡林郭勒草原不仅是国家重要的畜牧业生产基地，同时也是重要的绿色生态屏障，在减少沙尘暴和恶劣天气的发生方面发挥着作用，也是研究生态系统对人类干扰和全球气候变化响应机制的典型区域之一和国际地圈—生物圈计划 (IGBP) 陆地样带—中国东北陆地生态系统样带 (NECT) 的重要组成部分。

关于草原放牧通常要考虑放牧方式和放牧强度（单位面积牲畜密度）2 个因素。放牧方式可以分为多种，有文献将放牧方式分为以下五种，分别为：全年连续放牧、禁牧、选择划区轮牧、轻度放牧、生长季休牧。放牧强度可以分为四种，分别为：对照、轻度放牧强度、中度放牧强度、重度放牧强度。附件 14、15 中数据将选择划区轮牧的放牧强度分为：对照 (NG, 0 羊/天/公顷)、轻度放牧强度 (LGI, 2 羊/天/公顷)、中度放牧强度 (MGI, 4 羊/天/公顷) 和重度放牧强度 (HGI, 8 羊/天/公顷)。实际中，也可以做如下的划分：对照 (NG, 0 羊/天/公顷)、轻度放牧强度 (LGI, 1-2 羊/天/公顷)、中度放牧强度 (MGI, 3-4 羊/天/公顷) 和重度放牧强度 (HGI, 5-8 羊/天/公顷)。

植物的生长满足自身的生长规律，同时受到周围环境的影响。例如，降水、温度、土壤湿度、土壤 PH、营养等都决定植物的生长情况。当牧羊（家畜日食量为 1.8kg，即标准羊单位，也包括羊羔。大牲畜折算系数 6.0，比如牛、马、骆驼，大牲畜幼崽折算系数 3.0）对植物进行采食时，一方面植物的地上生物量减少；另一方面，放牧对植物有刺激作用，改变了植物原有的生长速率，适当的放牧会刺激植物的超补偿生长，同样不合理的放牧也会降低植物的生长速率。

过度放牧，往往因牲畜密度过大，可能导致草原植被结构破坏，土壤裸露面积增大，促进了土壤表面的蒸发，土体内水分相对运动受到不利影响，破坏了土壤积盐与脱盐平衡，增加了盐分在土壤表面的积累，土壤盐碱化程度加重。最终造成草场退化、土地沙

漠化。

适度的放牧可以改善草原土壤质量、提高草原生物的多样性。一方面由于家畜的采食践踏造成枯落物分解，充分进入土壤，从而提高土壤有机质和氮和钾含量，减少土壤的板结。另一方面放牧能够降低表层土壤湿度、PH，一定程度增加土壤容重。土壤氮、磷、钾的含量及比例是土壤有机质组成和质量程度的重要指标。磷元素含量多少会影响土壤中凋落物的分解速率、微生物数量及活性以及有机碳和养分的积累。钾元素能够促进植物生理代谢，增强抗逆性，并促进植物对氮素营养的吸收和利用。土壤全氮含量随着放牧强度的增加而降低。有研究表明：高寒草甸的土壤全氮含量沿着放牧梯度呈下降趋势。因此，为了保证土壤达到合适的状态，找到放牧羊（标准羊）数量的阈值是问题的关键。

土壤沙漠化又被称为沙质沙漠化，是荒漠化的一种主要表现类型。沙漠化是在干旱、半干旱和部分半湿润地区的沙物质基础和干旱大风动力条件下，由于自然因素或人为活动的影响，致使自然的生态系统平衡性遭到破坏，出现了以风沙活动为主要标志，并逐渐形成风蚀、风积地貌景观的环境退化过程，使原来没有沙漠景观的地区出现了类似沙漠景观的环境变化。所谓土壤板结化是指土壤打破了原有结构，表层的有机质遭到严重破坏而造成的，土壤板结原因很多，比如土壤贫瘠、容重过大、土壤质地太粘以及有机肥严重不足等。

沙漠化程度指数（SM）是从数学的范畴去界定沙漠化程度，采用一定的分级标准使得其与沙漠化程度相对应。把沙漠化程度划分为五类：非沙漠化、轻度沙漠化、中度沙漠化、重度沙漠化和极重度沙漠化，SM 采用 0~1 标度法。

表 1 沙漠化程度及沙漠化程度指数划分标准

划分内容	划分类型				
沙漠化程度	非沙漠化	轻度沙漠化	中度沙漠化	重度沙漠化	极重度沙漠化
沙漠化程度指数	[0,0.20]	(0.20,0.40]	(0.40,0.60]	(0.60,0.80]	(0.80,1.00]

沙漠化程度指数预测模型表达式[2]:

$$SM = \eta \cdot \sum_{i=1}^n S_{Q_i} = \eta \cdot \sum_{i=1}^n (Q_i \cdot W_{c_i})$$

公式具体含义及其符号说明见文后扩展阅读。

土壤板结化与土壤有机物、土壤湿度和土壤的容重有关，目前还没有明确的定量表达式，其数学模型可定性描述为如下：

$$B = f(W, C, O)$$

土壤湿度 w 越少，容重 c 越大，有机物含量 o 越低，土壤板结化程度 B 越严重。

土壤化学性质和物理性质是影响土壤肥力重要因素，土壤化学性质包括：土壤有机碳 SOC、土壤无机碳 SIC、土壤全碳 STC、全 N、土壤 C/N 比等；土壤物理性质包括：土壤湿度、土壤容重等。一般来说，在保持土壤化学性质等基本不变情况下，降水会增加土壤湿度，而土壤湿度增加会提高草场植被覆盖率，在良好的植被覆盖情况下可以适当提高放牧强度，在一定区域内，放牧强度越高意味着更多的放牧数量，在不考虑放牧

补贴和价格波动情况下，更多放牧数量代表更高的放牧收益。

现代草地资源的经营应遵循可持续发展原则，在保证生态环境良性健康发展中寻求经济利益的最大化。美国著名生态经济学家赫尔曼·E·戴利给可持续发展的定义是：“可持续发展是经济规模增长没有超越生物环境承载能力的发展”。其理念是“可持续发展的整个理念就是经济子系统的增长规模绝对不能超越生态系统可以永远持续或支撑的容纳范围”。在草原区域系统中，承载力是评价可持续发展的一种工具。在《远东英汉大辞典》中，承载力被定义为“某一自然环境所能容纳的生物数目（指最高限度）”。区域生态系统承载力和可持续发展是相辅相成的两个概念。

二、需解决问题：

请你根据附件数据以及收集有关草原数据（土壤容重、土壤 PH 等），由于历史原因，数据虽然并不充分，实际问题仍然需要解决。请通过数学建模完成下列问题：

问题 1. 从机理分析的角度，建立不同放牧策略（放牧方式和放牧强度）对锡林郭勒草原土壤物理性质（主要是土壤湿度）和植被生物量影响的数学模型。

问题 2. 请根据附件 3 土壤湿度数据、附件 4 土壤蒸发数据以及附件 8 中降水等数据，建立模型对保持目前放牧策略不变情况下对 2022 年、2023 年不同深度土壤湿度进行预测，并完成下表。

年份	月份	10cm 湿度 (kg/m ²)	40cm 湿度 (kg/m ²)	100cm 湿度 (kg/m ²)	200cm 湿度 (kg/m ²)	
2022	04					
	05					
	06					
	07					
	08					
	09					
	10					
	11					
	12					
	2023	01				
		02				
		03				
04						
05						
06						
07						
08						
09						
10						
11						
12						

问题 3.从机理分析的角度，建立不同放牧策略（放牧方式和放牧强度）对锡林郭勒草原土壤化学性质影响的数学模型。并请结合附件 14 中数据预测锡林郭勒草原监测样地(12 个放牧小区)在不同放牧强度下 2022 年土壤同期有机碳、无机碳、全 N、土壤 C/N 比等值,并完成下表。

放牧强度	Plot 放牧小区	SOC 土壤有机碳	SIC 土壤无机碳	STC 土壤全碳	全 N	土壤 C/N 比
NG	G17					
	G19					
	G21					
LGI	G6					
	G12					
	G18					
MGI	G8					
	G11					
	G16					
HGI	G9					
	G13					
	G20					

问题 4、利用沙漠化程度指数预测模型和附件提供数据（包括自己收集的数据）确定不同放牧强度下监测点的沙漠化程度指数值。并请尝试给出定量的土壤板结化定义，在建立合理的土壤板结化模型基础上结合问题 3，给出放牧策略模型，使得沙漠化程度指数与板结化程度最小。

问题 5、锡林郭勒草原近 10 的年降水量（包含降雪）通常在 300 mm~1200 mm 之间，请在给定的降水量（300mm，600mm、900 mm 和 1200mm）情形下，在保持草原可持续发展情况下对实验草场内（附件 14、15）放牧羊的数量进行求解，找到最大阈值。（注：这里计算结果可以不是正整数）

问题 6、在保持附件 13 的示范牧户放牧策略不变和问题 4 中得到的放牧方案两种情况下，用图示或者动态演示方式分别预测示范区 2023 年 9 月土地状态（比如土壤肥力变化、土壤湿度、植被覆盖等）。

三、内蒙古锡林郭勒草原数据及其说明

附件 1、2 分别为内蒙古锡林郭勒草原概况和锡林郭勒统计年鉴（2016-2021）。锡

林郭勒草原的土壤、气候等基本数据（附件 3-11 等）均有专门机构进行监测并提供，附件 3-11 为保持目前放牧策略下土壤湿度、土壤蒸发、植被指数 NDVI 等数据。此外，近年来，科研工作者在内蒙古自治区锡林郭勒盟草原上选取代表性草场进行了大量的实验，采集了不同牧户生态畜牧业模式群落样方调查数据（附件 12）以及不同示范牧户牲畜数量调查数据（附件 13）；不同放牧强度土壤碳氮监测数据（附件 14）、轮牧放牧样地群落结构监测（附件 15）数据、其中，附件 12 和附件 13 是具体的放牧情况。附件 14 和附件 15 均是选取实验草场 12 个放牧小区（附表中 plot 与 block 同义）采集在不同放牧强度下相应的数据。

附件 13《内蒙古自治区锡林郭勒盟不同示范牧户牲畜数量调查数据集》为这 4 类不同示范牧户牲畜（2018 年 7 月 28 日-2020 年 9 月 30 日）数量调查数据集，采取放牧策略基本上为生长季休牧，比较客观的反映了目前放牧情况。附件 15《内蒙古自治区锡林郭勒盟典型草原轮牧放牧样地群落结构监测数据集》是分别在 12 个放牧小区取样，每个小区统一按照最初设置的取样带采集 5 个 1mX 1m 的样方进行试验。试验设计采用随机区组方式，将每个放牧强度设置 3 个重复。放牧实验从 2012 年开始，每年轮放 4 期，放牧样地实验设计见如下。

样品采集：每一期放牧结束后，分别在 12 个放牧小区取样，每个小区统一按照最初设置的取样带采集 5 个 1mX 1m 的样方。调查信息包括：样方的编码、经度、纬度、调查日期、采样地海拔（m）、物种中文名、植物拉丁学名、营养枝高度（cm）、生殖枝高度（cm）、植物个数(株)、植物鲜重(g)、植物干重（g）、植物干重之和（g）、植物冠幅。采用收割法齐地面收割地上植物部分，收集到的植物同天晚上称取鲜重后，置于 65℃的鼓风烘箱中，24 小时后，称取干重，即为植物地上生物量。

附件 1：内蒙锡林郭勒草原概况

附件 2：锡林郭勒统计年鉴（2016-2021）

附件 3：土壤湿度（2012-2022）

附件 4：土壤蒸发（2012-2022）

附件 5：绿植覆盖率（2020-2022）

附件 6：植被指数 NDVI（2012-2022）

附件 7：土壤基本数据

附件 8：锡林郭勒盟气象数据（2012-2022）

附件 9：径流量（2012-2022）

附件 10: 叶面积指数 LAI (2012-2022)

附件 11: 一些历史数据 (2005-2008)

附件 12: 内蒙古自治区锡林郭勒盟不同牧户生态畜牧业模式群落样方调查数据集 (2018 年 7 月-2020 年 9 月)

附件 13: 内蒙古自治区锡林郭勒盟不同示范牧户牲畜数量调查数据集 (2018 年 7 月-2020 年 9 月)

附件 14: 内蒙古自治区锡林郭勒盟典型草原不同放牧强度土壤碳氮监测数据集 (2012 年 8 月 15 日-2020 年 8 月 15 日)。

附件 15: 内蒙古自治区锡林郭勒盟典型草原轮牧放牧样地群落结构监测数据集 (2016 年 6 月-2020 年 9 月)。

补充数据来源 (不限于):

- 1、国家冰川冻土沙漠科学数据中心([http:// www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/](http://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/))
- 2、美国地质调查局(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)
- 3、中国科学院生态学学科数据中心
<http://www.nesdc.org.cn/sdo/detail?id=609de9c07e28176b33e8743d>
- 4、wheatA 小麦芽-农业气象大数据系统 (v1.5.1) 软件

四、名词解释:

土壤含水量 (与土壤湿度本质相同, 只是表现方法上有所不同): 一般是指土壤绝对含水量, 即 100g 烘干土中含有若干克水分, 也称土壤含水率。测定土壤含水量可掌握作物对水的需要情况, 对农业生产有很重要的指导意义。土壤含水量的影响因素: 气象因素 (主要是降水)、土壤特征 (孔隙度、容重、渗透性能等)、植被状况、人为活动都可能影响土壤含水量变化。

土壤容重: 应称为干容重, 又称土壤假比重, 指一定容积的土壤 (包括土粒及粒间的孔隙) 烘干后质量与烘干前体积的比值。

土壤PH: 亦称“土壤pH”, 土壤酸度和碱度的总称, 用以衡量土壤酸碱反应的强弱。主要由氢离子和氢氧根离子在土壤溶液中的浓度决定, 以pH表示。pH在6.5--7.5之间的为中性土壤; 6.5以下为酸性土壤; 7.5以上为碱性土壤。

沙漠化: 土壤沙漠化是指气候变异和人类活动在内的种种因素造成的干旱、半干旱和亚湿润干旱地区的土地退化。也就是说, 由于大风吹蚀、流水侵蚀、土壤盐渍化等造成的土壤生产力下降或丧失, 都可称为沙漠化。

土壤板结化: 土壤板结度增大孔隙量也随之减少, 除透气性和透水性变坏外, 还危害根系的伸展生长和分根性。

土壤PH值的影响因素: 它是受母质、生物、气候以及人为作用等多种因素控制的。我国土壤pH由北向南渐低。华北地区碱土pH可高达10.5; 而华南地区强酸土pH可低至3.6--3.8。酸碱度对植株生长的重要性, 酸碱度的高低会影响植株对养分的吸收度。一般作物在中性或近中性土壤生长最适宜。过酸或过碱都会严重抑制土壤微生物的活动,

从而影响氮素及其他养分的转化和供应。土壤酸度通常与土壤养分的有效性之间有一定相关。如土壤磷素在pH为6时有效性最高，当介质pH值低于或高于6时，其有效性明显下降；土壤中锌、铜、锰、铁、硼等营养元素的有效性一般随土壤pH值的降低而增高，但钼则相反。

NDVI: 归一化的植被指数， $-1 \leq \text{NDVI} \leq 1$ ，负值表示地面覆盖为水、雪等，对可见光高反射；0表示有岩石或裸土等，NIR和R近似相等；正值，表示有植被覆盖，且随覆盖度增大而增大。NDVI能反映出植物冠层的背景影响，如土壤、潮湿地面、雪、枯叶、粗糙度等，且与植被覆盖有关。

叶面积指数(leaf area index, 缩写LAI): 又叫叶面积系数，是指单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的倍数。即:叶面积指数=叶片总面积/土地面积。

五、扩展阅读:

1、放牧与植物生长之间的关系

对于放牧与植物生长之间的关系，Woodward等建立了如下一个简单模型[7]:

$$\frac{dw}{dt} = 0.049w\left(1 - \frac{w}{4000}\right) - 0.0047Sw$$

式中， w 为植被生物量， S 为单位面积的载畜率。

该模型只考虑放牧影响，简单地反映了载畜率对植被生物量的作用，没有考虑其他因素的影响，只是从某一个侧面刻某一个因素对于植被生长的影响。

2、土壤含水量-降水量-地表蒸发模型

$$\frac{d\beta}{dt} = P - E(\alpha)$$

式中， P 为该牧区供水率（主要为降水）； E 为地表蒸散发率； β 为土壤含水量； α 为土壤植被覆盖率可表达为 $\alpha^*G(w)$ ， w 为成草数量， $G(w) = (1 - e^{-\varepsilon_g w/w^*})$ 为草原的盖度，内蒙古草原盖度在0.25-0.8之间， α^* 为最大增长率，依赖于牧区草地除成草量外的环境条件（如光照、气温、土壤养分等）； $D = \beta^*(e^{\varepsilon_g w/w^*} - 1)$ 为枯萎率，其中 w^* 为该草原群落的特征值只是一个大概的标度，引入它是使相应的无量纲量例如 w/w^* 中的量级为1，便于计算， α^* 为有量纲系数，其余系数则是无量纲量。

3、沙漠化程度指数预测模型表达式[2]:

$$SM = \eta \cdot \sum_{i=1}^n S_{Q_i} = \eta \cdot \sum_{i=1}^n (Q_i \cdot W_{c_i})$$

SM 表示沙漠化程度指数； η 为调节系数，用来修正模型； n 为模型中指标因子的个数； Q_i 为第 i 个因子的因子强度； S_{Q_i} 为第 i 个因子对沙漠化程度的贡献值，定义 $S_{Q_i} = Q_i \cdot W_{c_i}$ ， W_{c_i} 为因子权重系数，即因子对沙漠化程度的贡献值等于因子强度与因子权重系数的乘积， W_{c_i} 确定主要方法是用层次分析法和主成分分析法来确定。有关因子强度 Q_i 、因子权重系数 W_{c_i} 、沙漠化程度指数 SM 和调节系数 η 方面详细的介绍参见[2]。沙漠化相关关系的指标因子可以考虑风速、降水、气温（三个气象因素）；植被盖度、地表水资源、地下水位（三个地表因素）；人口数量、牲畜数量、社会经济水平（三个人

文因素)等。

4、土壤-植被-大气系统的水平衡基本方程

草原水分通过降水、入渗、蒸发等形式周而复始的循环,其过程十分复杂,在无人干扰的情况下,土壤-植被-大气系统的水平衡基本方程[3-6]为

$$\Delta W = W_{t+1} - W_t = P + G_u + R_{in} - (Et_a + G_d + R_{out} + IC_{store})$$

其中, ΔW 为土壤贮水变化量, W_{t+1} 和 W_t 分别为时间段内的始末土壤含水量, P 为降水量, G_u 和 G_d 分别为地下水毛管上升量和土壤水渗透量, Et_a 为实际蒸发量, R_{in} 和 R_{out} 分别为入和出径流量, IC_{store} 为植被截流量。锡林郭勒草原地势比较平坦, 降水量和降水强度较少, 水分循环以垂直方向的水量交换为主, 绝大部分降水被蓄积在土壤中, 尽管在遇到较大降水时会产生局地径流, 但仍在整个草原区域内, 其出入径流可视为相等。

草地的植被直接决定放牧的强度, 而植被的截流量能最好反映植被的生长能力, 依照递推关系, 放牧强度与植被的截流量存在正相关关系。

植被截流量与降水量、植被覆盖度、叶面积指数(LAI)等密切相关。植被覆盖度是植物群落覆盖地表状况的一个综合量化指标, 能够直观反映地表植被的丰度。降水量小、植被覆盖度高、LAI大时植被截流量大, 其表达式为:

植被截流量与降水量、植被覆盖度、叶面积指数(LAI)等密切相关。植被覆盖度是植物群落覆盖地表状况的一个综合量化指标, 能够直观反映地表植被的丰度。降水量小、植被覆盖度高、LAI大时植被截流量大, 其表达式为:

$$IC_{store} = c_p \cdot IC_{max} \cdot \left[1 - \exp\left(-k \cdot R_{cum} / IC_{max}\right) \right]$$

上式中, IC_{store} 为植被截流量(mm); c_p 为植被覆盖度; IC_{max} 特定植被的最大截流量(mm); k 为植被密度校正因子, 与LAI有关; R_{cum} 为累积降雨量(mm)。 IC_{max} 可以通过LAI来估算:

$$IC_{max} = 0.935 + 0.498 \cdot LAI - 0.00575 \cdot LAI^2$$

式中, LAI 为一个分布式的时变参数。

六、参考文献:

- [1] 宫海静, 王德利. 草地放牧系统优化模型的研究进展[J], 草业学报, 15(6): 1-8.
- [2] 刘敦利. 基于栅格尺度的土地沙漠化预警模式研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010.
- [3] Simon J. R. Woodward, Graeme C. Wake, et al, A Simple Model for Optimizing Rotational Grazing, Agricultural Systems, 41 (1993) 123-155.
- [4] 王悦骅. 模拟降水对不同载畜率放牧荒漠草原植物多样性的影响[D]. 内蒙古农业大学, 2019.
- [5] 侯琼, 王英舜, 杨泽龙, 等. 基于水分平衡原理的内蒙古典型草原土壤水动态模型研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(05): 197-203.
- [6] 许宏斌, 辛晓平, 宝音陶格涛, 等. 放牧对呼伦贝尔羊草草甸草原生物量分布的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(03): 768-774.
- [7] Woodward S J R. Wake G C. McCall D G. Optimal grazing of a multi-paddock system using a discrete time model[j]. Agri-cultural Systems. 1995, 48: 119-139.