

607-611

# 高寒草甸放牧生态系统夏秋草场 轮牧制度的模拟研究

黄大明

(清华大学生物科学与技术系, 北京, 100084)

5812

A

**摘要** 利用 GMAME 1 模拟高寒草甸放牧生态系统夏秋草场在临界放牧压力下的 270 种轮牧制度, 并对其累积采食量进行比较分析。结果指出: 在高寒草甸放牧生态系统中, 最佳的轮牧小区数目为 3 或 4 个。证明了 Morley 规则: 最佳轮牧小区数目应该小于 10。推荐 2 个高寒草甸地区最佳的轮牧模式供野外实验和放牧规划参考: (1) 3 个轮牧小区, 每小区每次持续放牧 29 d, 放牧压力为  $30.14 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{d}$ , 累积牧草采食量最高为  $4250.443 \text{ kJ/m}^2$ 。(2) 为保持牧草结构的稳定和各轮牧小区牧草生物量的均匀性, 可以采用 3 个轮牧小区, 放牧持续时间 7 d, 放牧压力  $I_{(145)} = 28.8914 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{d}$ , 累积采食量为  $4073.34 \text{ kJ/m}^2$ 。

**关键词:** 高寒草甸, 轮牧制度, 放牧压力, 放牧持续时间, 轮牧小区。

放牧生态学, 夏秋草场

草场生态学

## A SIMULATION ANALYSIS ON ROTATION GRAZING SYSTEM OF SUMMER-AUTUMN PASTURE IN AN ALPINE MEADOW ECOSYSTEM

Huang Daming

(Department of Biological Sciences and Biotechnology, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

**Abstract** An expert system, Grazing Manager of Alpine Meadow Ecosystem 1 (GMAME 1), has been structured to facilitate stochastic evaluations of rotation grazing system on alpine meadow pastures, Qinghai Province, China. A model grazing on summer-autumn meadow (from 1 June to 30 October) was originated to provide a practical method for estimating the effects of grazing frequency, grazing duration and grazing pressure on GMAME 1. The model provides 31 different attributes for characterizing the performance of a grazing system. Analysis of 270 simulated rotation grazing systems provided an inference base to support two recommendations concerning the management variables. The recommendations are as follows: First, a three-field system, a twenty-nine-day grazing duration and  $30.14 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{d}$  grazing pressure. The system has the highest accumulated intake,  $4250.44 \text{ kJ/m}^2$ . Second, a three-field system, a seven-day grazing duration,  $28.89 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{d}$  grazing pressure and accumulated

收稿日期: 1994-08-30, 修改稿收到日期: 1996-04-08。

intake, 4073.34 kJ/m<sup>2</sup>. It is beneficial to stabilizing grass structure and evening grass biomass in every field.

**Key words:** alpine meadow grazing ecosystem, rotation grazing system, grazing pressure, grazing duration, rotation grazing field.

轮牧制度的选择一直是高寒畜牧业夏秋草场管理中无法圆满解决的一道难题。由于草甸植物种类的多样性和地上生物量的不均匀性,使轮牧制度的野外试验研究很难获得统一而准确的结果,且耗资巨大。因此,通过实验观测,进行模拟研究,已经成为本领域中最有效的方法之一。Smith 等人<sup>[1]</sup>和 Tharel 等人<sup>[2]</sup>曾编制一个管理多年生牧草的专家系统,对 2 和 4 个轮牧小区,放牧持续时间分别为 3、6、9 和 12 d,放牧压力分别为 28、56、84、112 和 140 kg/hm<sup>2</sup>·d 的轮牧制度进行模拟。结果表明:在美国 Arkansas 的 Booneville, 4 个轮牧小区,放牧持续时间 9 d,放牧压力为 84 kg/hm<sup>2</sup>·d 的放牧制度,其累积牧草收获量最大。由于这一系统运算量非常庞大,对 80 种轮牧制度进行枚举已非易事。本项工作的早期研究中,利用野外实验观测数据<sup>[3~6]</sup>,建立高寒草甸放牧生态系统能量动态的分室模型,并编制成专家系统,GMAME 1。本研究采用 GMAME 1,模拟临界放牧压力下的 270 种轮牧制度,并对其累积采食量进行比较分析。

### 1 GMAME 1 中放牧部分的模拟模型

GMAME 1 中高寒草甸放牧生态系统的能量流分室部分示于图 1。其中能量源和能量库用旗表示,能量暂时积累的分室用矩形表示,直接的能量流用带箭头的实线表示,环境和人为因素的影响用带箭头的点线表示。点线箭头所指的蝴蝶结表示调整能量流动的阀门。本项研究涉及 6 个状态变量; $I$  是用单位面积日采食量表示的放牧压力, $I_1$ 、 $I_4$  和  $I_5$  分别表示对  $V_1$ 、 $V_4$  和  $V_5$  每日的采食量,单位为 kJ/m<sup>2</sup>·d,地上生活部分, $V_1$ ,地下活根, $V_2$ ,地下死根, $V_3$ ,地上枯枝落叶 I(易分解部分), $V_4$ ,地上枯枝落叶 I(不易分解部分), $V_5$ 。 $V_i$  ( $i=1, 2, 3, 4, 5$ ) 的单位为 kJ/m<sup>2</sup>。6 个联立微分方程表示如下

$$dV_1/dt = f_{01}Q_0 + f_{21}V_2 - (f_{145} + f_{12})V_1 - I_1 \quad (1)$$

$$dV_2/dt = f_{12}V_1 - (f_{21} + f_{23} + f_{24})V_2 \quad (2)$$

$$dV_3/dt = f_{23}V_2 - f_{310}V_3 \quad (3)$$

$$dV_4/dt = f_{14}f_{145}V_1 - f_{410}V_4 - I_4 \quad (4)$$

$$dV_5/dt = f_{15}f_{145}V_1 - f_{510}V_5 - I_5 \quad (5)$$

$$dI/dt = I_1 + I_4 + I_5$$

$$J = \int_{42}^{162} I dt$$

这里  $f_{ij}$  是从  $i$  分室到  $j$  分室的能量流速率,一般是温度  $TM$  的函数。而温度又是时间  $t$  的函数,表示为

$$TM = 1.11013 + 0.153234t - 6.5979 \times 10^{-6}t^3 + 4.004 \times 10^{-13}t^6 - 7.9187 \times 10^{-16}t^7$$

其中  $TM$  为 1981~1985 年的平均气温(°C)变化。草甸上太阳辐射强度用一个正弦函数表示

$$Q_0 = 17165.88 + 4605.48 \{ \sin[2\pi(t+32)/365] \} \quad (\text{kJ/m}^2 \cdot \text{d})$$

$t$  为天数, 从 4 月 21 日 ( $t=1$ ) 起计算,  $Q_0$  的最大值与最小值分别为 21771.36 和 1200.4  $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{d}$ 。  $f_0$  作为草甸植物对太阳辐射能量的转化效率, 表示为

$$f_0 = 95 [1 - 1 / (0.1019LV_1 + 1) - A / (0.2388AQ_0 + 1)]$$

其中  $A$  为太阳能利用效率,  $L$  为单位生物量的叶面积指数, 表示为

$$A = 0.035 + 0.035 \{ \sin[2\pi(t+32)/365] \}$$

$$L = 3.238 \times 10^{-4} + 2.768 \times 10^{-6}t + 8.46 \times 10^{-8}t^2 - 3.11 \times 10^{-10}t^4 + 1.519 \times 10^{-13}t^7$$

其它有关初级生产的速率变量和参数以及本模型的验证请参阅<sup>[1,4]</sup>。采用四阶 Runge-Kutta 法求解方程组的数值解, 其初始值为:  $t=42\text{d}$ ,  $V_1=916.285$ ,  $V_2=25534.238$ ,  $V_3=8128.224$ ,  $V_4=15.266$ ,  $V_5=271.382$ 。牧草的热值为:  $1\text{g}=17.74 \text{kJ}$ (干物质)<sup>[5]</sup>,  $t$  的步长为 1。计算每一种轮牧制度时,  $I_1$  的起始值为 1, 以步长 0.01 增长;  $I_4$  的起始值为 0.1,  $I_5$

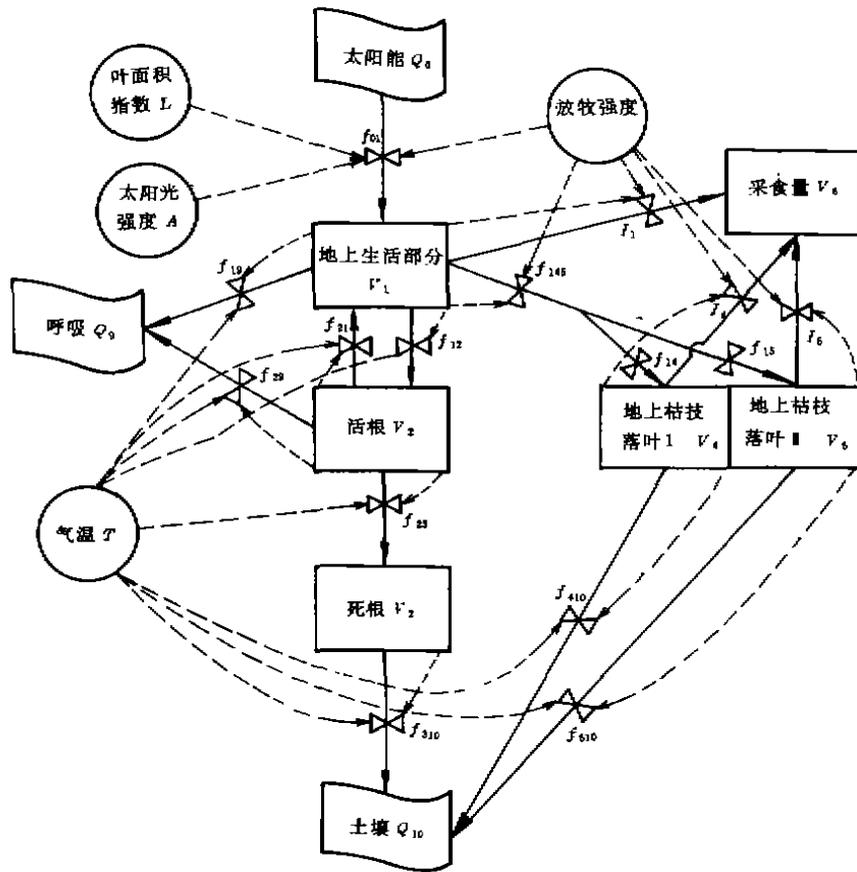


图 1 高寒草甸放牧生态系统的能量流

Fig. 1 Energy flow of alpine meadow pastoral ecosystem

$=2I_4/3$ , 以步长 0.01 增长,  $I_1$  与  $I_4$  分别变化, 模拟计算每日的草甸能量动态, 同时给出日采食量、地上生活部分、地下活根、地下死根、地上枯枝落叶……等 31 项特征指标。每一轮牧制度 ( $t=42-182$ ) 计算完, 与前一轮比较, 若  $J_{n+1} > J_n$ , 即在数据库中将  $J_n$  的资料删除存入  $J_{n+1}$  的资料。随着  $I$  的不断增长, 当出现缺草日时 ( $V_1=0$  或  $V_4=0$ ), 即停止本轮牧制度的运算, 并将前一个轮牧制度的放牧压力作为临界放牧压力, 再计算下一轮牧制度。

## 2 变量与模拟实验设计

GMAME 1 的轮牧部分, 有 3 个可被管理者使用的变量。第 1 个是轮牧小区数目, 就是一块草甸分成多少个轮牧小区, 本项工作分为 2, 3, …… , 10 个, 共 9 种轮牧小区设置。第 2 个是放牧持续时间, 就是在每个小区中连续放牧的天数。例如, 一块草甸围成 2 个小区, 放牧持续时间为 10 d, 就是在第 1 个小区中连续放牧 10 d, 再转到第 2 个小区中连续放牧 10 d, 然后再转到第 1 个小区中放牧 10 d, ……。本研究中, 放牧持续时间分为 1, 2,

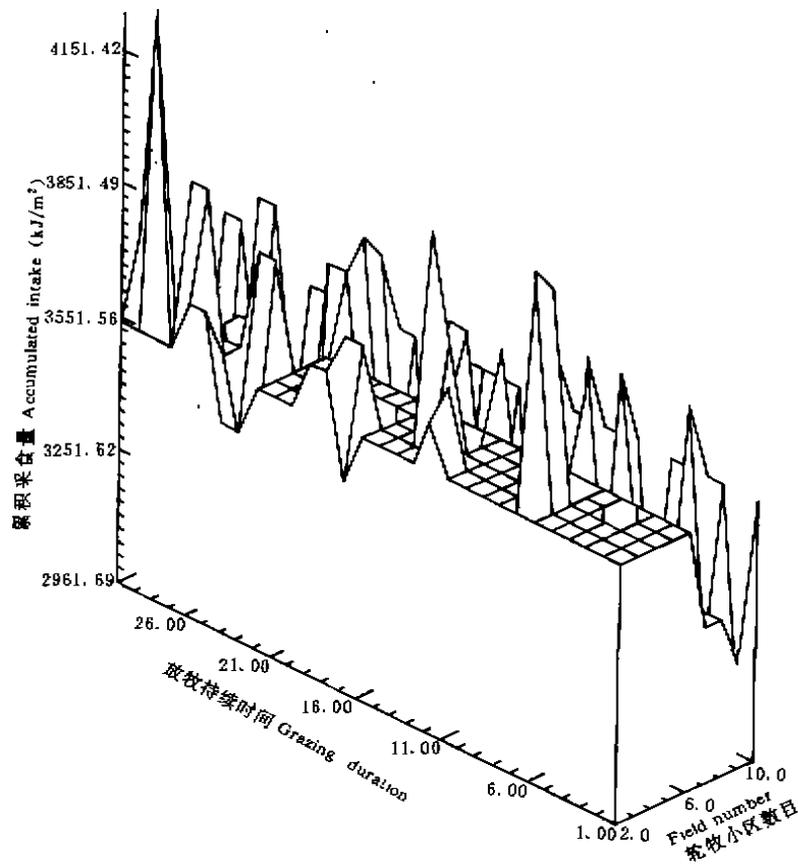


图 2 临界放牧压力下 270 种轮牧制度的累积采食量

Fig. 2 The accumulated intakes of 270 rotation grazing systems under critical grazing pressure

……, 30 d, 共 30 种放牧持续时间设置。第 3 个是临界放牧压力, 是在一定轮牧小区数目、一定轮牧周期下的临界放牧压力。在此临界放牧压力下, 不是累积牧草收获量最大, 而是刚好在轮牧过程中没有缺草天数和放牧压力, 超过此放牧压力, 应会在轮牧过程中出现缺草日 ( $V_1=0, V_2=0$ )。每年的轮牧季节从 6 月 1 日开始, 于 10 月 30 日结束, 模拟运算每天系统各分室的能量动态。

### 3 结果与讨论

临界放牧压力下, 轮牧小区、放牧持续时间与累积采食量的关系由图 2 表明。

**3.1** 在常放牧压力下, 绵羊采食地上生物量 ( $V_1+V_2+V_3$ ), 且无缺草天数的最大放牧压力  $I_{(1,5)}=25.56 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{d}$ , 其累积采食量为  $J_{(1,5)}=3579.04 \text{ kJ/m}^2$ 。与之相比, 所研究的 270 种轮牧制度中, 有 235 种轮牧制度的累积采食量低于  $3579.04 \text{ kJ/m}^2$ , 有 35 种高于  $3579.04 \text{ kJ/m}^2$ , 其中有 3 种高于  $4000 \text{ kJ/m}^2$ , 分别是 3 个轮牧小区, 放牧持续时间 7 d; 3 个轮牧小区, 放牧持续时间 29 d; 4 个轮牧小区, 放牧持续时间 14 d。具有最大累积采食量的轮牧制度是: 3 个轮牧小区, 放牧持续时间 29 d; 放牧压力为  $I_{(1,5)}=30.14 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{d}$ , 累积采食量为  $J_{(1,5)}=4250.44 \text{ kJ/m}^2$ 。总之, 正确轮牧制度的累积采食量高于不轮牧, 不正确轮牧制度的累积采食量低于不轮牧。在无缺草日的条件下, 正确轮牧制度比不轮牧能更有效地利用牧草, 因此, 选择正确的轮牧制度十分重要。

**3.2** Morley<sup>[3]</sup>曾利用一个牧草生长的数学模型, 用计算机处理来比较一轮牧制度中轮牧小区数目的变化。他发现了最适数目少于 10 的 Morley 规则, 并认为: 轮牧的最适间隔长度和放牧持续时间的最适长度不必规定。本研究表明: 矮嵩草草甸最适轮牧小区数目为 3 或 4。符合 Morley 规则, 但放牧持续时间是确定的。

**3.3** 一般认为连续放牧是不利的, 有少数植物可能被完全采除, 改变牧草的组成, 如果牧草大部分被采食, 牧草的复原就需要很长的间歇时间。为保持牧草结构的稳定和各轮牧小区牧草生物量的均匀性, 可以采用另一种轮牧制度: 3 个轮牧小区, 放牧持续时间 7 d, 放牧压力  $I_{(1,5)}=28.8914 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{d}$ , 累积采食量为  $J_{(1,5)}=4073.34 \text{ kJ/m}^2$ 。

**3.4** 模拟轮牧实验的结果可用于高寒草甸地区轮牧实验的设置, 将放牧压力, 轮牧制度, 放牧持续时间设置在所推荐的 2 个轮牧制度附近。发展一个研究放牧管理的野外实验系统, 对有效地研究高寒草甸放牧生态系统中的轮牧问题具有重要意义。

### 参 考 文 献

- 1 Smith E M. *et al.* A simulation model for managing perennial grass pastures. Part I — Structure of the model. *Agricultural Systems*, 1985, 17: 181~196
- 2 Tharel L M. *et al.* A simulation model for managing perennial grass pastures. Part II — A simulated systems analysis of grazing management. *Agricultural Systems*, 1985, 17: 181~196
- 3 黄大明, 王祖望等. 高寒草甸地区家庭牧场能量流与价值流的研究. *高寒草甸生态系统*, 1990, 3: 381~402
- 4 黄大明, 赵松岭. 矮嵩草草甸能量动态的分室模型研究. *生态学报*, 1992, 12(2): 119~124
- 5 黄大明. 高寒草甸放牧生态系统的分室模型. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1993, 32(6): 768~772
- 6 黄大明. 高寒草甸生态系统中轮牧实验的系统分析. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1994, 33(2): 259~264
- 7 Morley F H W. A model for rotation grazing system. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry Melbourne*, 1968, 8(1): 40~45