

# 高寒牧场最优生产结构的研究\*

## I. 藏系绵羊种群最大能量输出的生产结构\*\*

周 立 王启基 赵新全 刘 阳

(中国科学院西北高原生物研究所)

### 摘 要

本文采用最优化技术中静态稳定平衡途径,以最大畜产品能量输出为目标,以两季轮牧草场的草、畜生态平衡为约束条件,建立年度两阶段线性规划模型。确定在年间稳定平衡状态下藏羊两季最佳种群结构和出栏方案、两季草场最佳面积分配。探讨了最优生产结构的经济、生态环境和资源效益,以及在高寒牧场的实际可行性。本文为静态优化牧业生产结构提供了理论、方法和计算机软件。

**关键词:** 最优生产结构; 最大畜产品能量输出; 两阶段静态线性规划模型; 高寒牧场。

藏系绵羊是青藏高原特有的本地品种。在高原畜牧业中,藏羊是主要经营品种之一。青海省是我国五大牧区之一。解放以来,青海省的畜牧业有很大发展,牧畜总头数增长近 3 倍。但经营管理技术原始落后,经济效益低下、资源浪费严重;超载放牧,致使天然草场不同程度地退化,草畜矛盾尖锐。畜牧业生产系统实际上是一个开放的生态系统,其生产结构制约着生产功能。不合理的牲畜数量增加,在短期内可能提高经济效益;但从长远来看,畜牧业生产环境的破坏必定降低经济效益和生态环境效益。因此,在目前草场投入甚微的情况下,由于受天然草场承载能力的限制,显然不能依靠增加牲畜数量的办法来提高畜牧业的经济效益;应该从整个系统的高度、从长远利益出发,制定一个统筹兼顾、科学管理牧场的策略:合理利用草场资源,增强稳定性,阻止生态环境的进一步恶化;在此基础上优化畜牧业生产结构,提高经济效益和社会效益。

本文根据高寒牧场畜牧业生产实践中历来施行的冬春(冷季)、夏秋(暖季)两季草场轮牧制度,以最大畜产品能量输出为目标,以适度利用的牧草量为资源约束,以年为单位建立两时间阶段的线性规划模型。采用最优化技术中静态平衡途径,确定年间稳定平衡状态下的藏羊最优种群结构和出栏结构,以及两季草场最佳面积分配比例;为静

\* 国家自然科学基金和中国科学院西北高原草甸生态系统定位站基金资助项目。

\*\* 承蒙夏武平教授指导,特此致谢。

态优化牧业生产结构提供指导。但静态平衡方法,尚不能指出从现有的不合理种群结构过渡到最优结构的最佳途径,拟另文通过动态追踪方法指出。线性规划模型,描述的是宏观离散化的畜牧业生产过程;受线性最优化方法本身的限制,无法考虑过程内部各因素之间的相互作用;受计算机内存的限制,又不能将离散段分得太细,因此,只能给出一个比较粗糙、宏观的结果。

数学规划应用于农牧业经济分析,制订最优的农牧业经济计划,显示出巨大的生产实践意义(Fox, 1953; Gass, 1985; Hazell 和 Norton, 1986)。在国内,数学规划于农牧业经济计划和经济分析中的应用尚不广泛,与生产实践的结合还不够密切(董全等, 1984, 1987)。

## 线性规划模型

以高寒牧场的主要植被类型——高寒草甸为例,构造线性规划模型。

高寒草甸气候四季不分明,年平均气温仅 $-2^{\circ}\text{C}$ 左右。按自然季节可划分为冷(冬)半年和暖(夏)半年。植物生长期(4—9月)短促,平均只有148天(夏武平, 1982; 周立, 1989)。受气候条件和牧草资源的限制,牧民们历来施行冬春(冷季)、夏秋(暖季)草场两季轮牧制。通常,于6月1日前后由冬春草场转移到夏秋草场,而于11月1日前后再转回冬春草场。每年在10月底至11月初出栏一次,元月前后繁殖一次。夏秋、冬春草场的主要植被分别为高寒灌丛和矮嵩草草甸,放牧时间长度分别为5个月和7个月左右。由于两季草场的净初级生产力、牧草供给、牧草质量的差异和季节性变动,藏羊消化率和采食量也随之变化,于夏秋草场体重增长迅速、死亡率很低,而在冬春草场体重持续下降、死亡率增高,尤以羔羊显著。为了反映畜牧业生产实践中这种放牧制度、出栏和草、畜的明显季节性差异,进而提出合乎实际的最优生产计划和管理措施,理应将生产过程离散为3个时间段;但依据出栏实践,假定出栏于暖季草场向冷季草场轮换的过程中同时进行,这样既可以减少一个出栏时间段,也不会和时间上和空间上带来明显的误差。因此,我们采用2个时间阶段的线性规划模型来描述藏羊种群的年度生产过程,而出栏置于1个轮换点,即将年度放牧过程在时间上离散为两个时间段:夏秋和冬春放牧时间段,在空间上分为两个草场。每个时间段的草、畜统计时刻,以安排在开始或结束时刻较为方便。如果统计时刻置于时间段的中间,稍不留意可能出现漏洞。例如,假定出栏和繁殖均在某一时间段中进行(冬春草场),统计时刻安排在出栏后繁殖前的某一时刻,若只考虑存活羊只的牧草采食,则出栏羊只于出栏前采食的牧草量和新羔羊需要的牧草量,就可能没有计入草场被利用的牧草总量之中,导致优化解确定的草场载畜量超过其资源约束限定的容纳量。这里,我们取每个时间段的结束时刻,即10月31日和5月31日作为草、畜统计时刻。由于线性规划方法假定在每个时间段上保持常态,显然,如果某一时间段中数量有大幅度的变化,为表现这种变化应该把时间段再细分些。

### (一) 两季草场藏羊种群平衡约束

将藏羊种群按性别分别划为9个年龄组: $<10$ 月龄、 $10$ 月龄 $\leq$ 且 $<1$ 岁、 $1$ 岁 $10$ 月龄、……、

6岁10月龄 $\leq$ 且 $\leq$ 7岁10月龄和 $\geq$ 7岁10月龄年龄组,分别称为0岁、1岁……、7岁和8岁年龄组。放牧的藏羊极少有超过8岁尚不出栏者,故将8岁以上的藏羊粗略地划分为一个组。这样,种群在夏秋和冬春草场各有18个年龄组,分别用 $F_{i,t}^{(s)}$ 、 $M_{i,t}^{(s)}$ 和 $F_{i,t}^{(w)}$ 、 $M_{i,t}^{(w)}$  ( $i=0, 1, \dots, 8$ )表示夏秋草场(上标为 $s$ )和冬春草场(上标为 $w$ )、母羊( $F$ )和羯羊( $M$ )0—8岁年龄组(下标 $i$ )第 $t$ 年的个体数量(只)。母羊( $KF$ )和羯羊( $KM$ )各年龄组(下标 $i$ )第 $t$ 年的出栏数量分别用 $KF_{i,t}$ 和 $KM_{i,t}$  ( $i=0, 1, \dots, 8$ )表示。为简化起见,将实际调查的种公羊数量(占母羊的3.5%)也一并计入各母羊年龄组数量之中。

为了清晰起见,引入放牧年度的概念。从冬春草场时间段的起点(11月1日)作为放牧年度的起点,经过冬春、夏秋草场放牧时间段,恰好是1个自然年度,称为1个放牧年,用 $t$ 来标记。藏羊的年龄仍按自然年日历计算。由于自然年与放牧年的时差,以及藏羊的繁殖时间在元月前后,不是放牧年的起点,所以,在下一个放牧年度开始之时,藏羊的年龄均恰好带有10月龄的尾数。

藏羊种群从冬春草场转换到夏秋草场,依统计时刻计数,其结构变化方程为

$$\begin{aligned} F_{i,t}^{(s)} &= SF_{i,t}^{(s)} \cdot F_{i,t}^{(w)} \\ M_{i,t}^{(s)} &= SM_{i,t}^{(s)} \cdot M_{i,t}^{(w)} \\ i &= 0, 1, \dots, 8 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $SF_{i,t}^{(s)}$ 、 $SM_{i,t}^{(s)}$  ( $i=0, 1, \dots, 8$ )分别表示第 $i$ 年龄组母羊和羯羊于第 $t$ 年夏秋草场时间段的存活率。

藏羊种群从夏秋草场向冬春草场转换之时,恰好是出栏时刻,故首先出栏。进入冬春草场后,放牧年度 $t$ 增加1年,各性别各年龄组藏羊增长1岁,递进到下一年龄组;在冬春草场藏羊还繁殖一次,为了不影响母羊的生长发育和提高羔羊的繁殖率,夏秋草场上2岁以上的母羊才配种怀胎。这样,从夏秋到冬春草场藏羊种群结构变化方程为

$$\begin{aligned} F_{0,t+1}^{(w)} &= \sum_{i=2}^8 MF_{i,t+1} \cdot (F_{i,t}^{(s)} - KF_{i,t}) + 0.035F_{0,t+1}^{(w)} \\ M_{0,t+1}^{(w)} &= \sum_{i=2}^8 MM_{i,t+1} \cdot (M_{i,t}^{(s)} - KM_{i,t}) - 0.035F_{0,t+1}^{(w)} \\ F_{i,t+1}^{(w)} &= SF_{i,t+1}^{(w)} \cdot (F_{i,t}^{(s)} - KF_{i,t}) \\ M_{i,t+1}^{(w)} &= SM_{i,t+1}^{(w)} \cdot (M_{i,t}^{(s)} - KM_{i,t}) \\ (i &= 0, 1, \dots, 6) \\ F_{8,t+1}^{(w)} &= SF_{8,t+1}^{(w)} \cdot (F_{8,t}^{(s)} - KF_{8,t}) + SF_{8,t}^{(w)} \cdot (F_{8,t}^{(s)} - KF_{8,t}) \\ M_{8,t+1}^{(w)} &= SM_{8,t+1}^{(w)} \cdot (M_{8,t}^{(s)} - KM_{8,t}) + SM_{8,t}^{(w)} \cdot (M_{8,t}^{(s)} - KM_{8,t}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $SF_{i,t+1}^{(w)}$ 和 $SM_{i,t+1}^{(w)}$  ( $i=0, 1, \dots, 8$ )分别表示母、羯羊各年龄组个体在冬春草场上的成活率。 $MF_{i,t+1}$ 和 $MM_{i,t+1}$  ( $i=2, 3, \dots, 8$ )是2—8龄母羊分别繁殖母、公羔羊的繁殖率,考虑到繁殖母羊到繁殖时间的成活率和新产羔羊成活到冬春草场统计时刻的比例,其计算公式为

$$\begin{aligned} MF_{i,t+1} &= SF_{i,t+1} \cdot BSF_{i,t+1} \\ MM_{i,t+1} &= SF_{i,t+1} \cdot BSM_{i,t+1} \\ (i &= 2, 3, \dots, 8) \end{aligned} \quad (3)$$

这里  $SF_{i, i+1}$ : 繁殖母羊到繁殖时刻的成活率, 因繁殖母羊成活率比较高, 令其等于  $SF_{i, i+1}^{(W)}$ 。

$B_{SF_{i, i+1}}$ ,  $B_{SM_{i, i+1}}$ : 分别为母、公羔羊到冬春草场统计时刻的繁殖率。  
 方程 (2) 第 1 个式子的最后一项  $0.035F_{i+1}^{(W)}$ , 表明母羔羊年龄组应该增加的种公羊数量; 相应地, 在第 2 个式子中应从公羔羊数量中将已计入母羔羊数量之内的种公羊数去掉, 余下者将被去势而变成羯羔羊。根据前面的约定, 后备母羔羊中也应包含 3.5% 的种公羊, 一并计入该年龄组母羊数量之中; 否则, 将无法保证此后各母羊年龄组 3.5% 的种公羊比例。

只要给定初始结构, 我们可以按方程 (1)、(2) 周而复始地推算逐年种群结构。方程 (1)、(2) 为 Leslie 方程。

为了寻求在年间静态稳定平衡状态下最大畜产品能量输出的种群结构和出栏结构, 显然应当假定 (1)、(2) 中各变量和参数与年度  $t$  无关, 即种群结构和出栏结构, 无论在冬春草场还是夏秋草场, 第  $t$  年和第  $t+1$  年是相同的, 因此, (1) 和 (2) 中各变量和参数的下标  $t$  均可去掉。以这样的 Leslie 方程 (1)、(2) 作为年间静态种群结构的两季动态平衡约束。

## (二) 资源约束

为了在最优种群结构下使两季草场均达到草、畜平衡, 避免因两季草场面积结构不合理, 而引起任一草场可采食牧草的利用不足, 造成资源浪费, 或者供给不足, 我们在约束条件中引入两季草场面积约束:

$$A^{(W)} + A^{(S)} \leq A \quad (4)$$

式中  $A^{(W)}$ : 冬春草场面积 (公顷)  
 $A^{(S)}$ : 夏秋草场面积 (公顷)

$A$ : 草场总面积 (公顷) (给定)

把  $A^{(W)}$  和  $A^{(S)}$  作为结构变量, 通过线性规划模型求得在最优种群结构下两季草场面积的最佳分配, 以保证最有效地利用草地资源输出最多的畜产品。

两季草场的载畜量受其牧草资源量的制约。由于两季草场面积已作为模型的结构变量, 可直接采用草场面积、平均地上净初级生产力, 不至于引起草场退化的适度利用率、凋落率, 计算可利用牧草量; 再考虑到现存可利用牧草中藏羊最大利用比例, 可求得两季草场藏羊实际可采食的牧草量, 具体计算公式如下:

$$\begin{aligned} H^{(S)} &= A^{(S)} \cdot NP^{(S)} \cdot (1 - FL^{(S)}) \cdot U^{(S)} \cdot MU^{(S)} = AT^{(S)} \cdot A^{(S)} \\ H^{(W)} &= A^{(W)} \cdot NP^{(W)} \cdot (1 - FL^{(W)}) \cdot U^{(W)} \cdot MU^{(W)} = AT^{(W)} \cdot A^{(W)} \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $AT^{(S)} = NP^{(S)} \cdot (1 - FL^{(S)}) \cdot U^{(S)} \cdot MU^{(S)}$   
 $AT^{(W)} = NP^{(W)} \cdot (1 - FL^{(W)}) \cdot U^{(W)} \cdot MU^{(W)}$

这里

$H^{(S)}$ 、 $H^{(W)}$ : 夏秋、冬春草场藏羊实际可采食的牧草量 (kg)

$NP^{(S)}$ 、 $NP^{(W)}$ : 夏秋、冬春草场平均地上净初级生产力 (kg/ha)

$FL^{(S)}$ 、 $FL^{(W)}$ : 夏秋、冬春草场放牧期间牧草凋落率

$U^{(s)}$ 、 $U^{(w)}$ : 夏秋、冬春草场牧草适度利用率

$MU^{(s)}$ 、 $MU^{(w)}$ : 夏秋、冬春草场可利用牧草的藏羊最大利用比例

$AT^{(s)}$ 、 $AT^{(w)}$ : 夏秋、冬春草场每单位面积草地的可采食牧草量 (kg/ha)

显然, (5) 式中前 4 项的积表示两季草场可利用牧草量。于是, 牧草资源约束条件可写为: 夏秋草场

$$(II) \quad \sum_{i=0}^8 (IF_i^{(s)} \cdot F_i^{(s)} + IM_i^{(s)} \cdot M_i^{(s)}) \leq H^{(s)} \quad (7)$$

冬春草场

$$\sum_{i=0}^8 (IF_i^{(w)} \cdot F_i^{(w)} + IM_i^{(w)} \cdot M_i^{(w)}) \leq H^{(w)} \quad (8)$$

式中,  $IF_i^{(s)}$ 、 $(IF_i^{(w)})$ 、 $IM_i^{(s)}$ 、 $(IM_i^{(w)})$  ( $i=0, 1, \dots, 8$ ) 分别表示在夏秋(冬春)草场上第  $i$  年龄组母羊和羯羊个体在相应放牧时间段内的总采食量 (kg/只)。

注意 (1)、(2) 式, 在线性规划模型的结构变量中只包含存活羊只和出栏羊只的数量, 并不包括死亡羊只的数量。因出栏时间恰在两季草场轮换衔接点上, 出栏羊只的采食量已计入出栏前放牧草场的存活羊只采食量之中。而 (7) 和 (8) 式中的  $F_i^{(s)}$ 、 $(F_i^{(w)})$  和  $M_i^{(s)}$ 、 $(M_i^{(w)})$ , 是夏秋(冬春)放牧时间段结束时刻藏羊的存活数量, 因此,

(7) 式和 (8) 式的右端分别表示夏秋、冬春草场上存活羊只的总采食量, 显然没有计入在夏秋、冬春草场上死亡羊只的牧草消费量。当死亡率较低时, 死亡羊只的牧草消费量可以忽略不计, 对最优计划影响不大。但当死亡率较高时, 若最优解使得牧草资源约束不等式 (7) 或 (8) 成为等式 (根据线性规划问题解的几何性质, 这一点总是成立的), 势必导致最优解确定的载畜量明显地超过牧草资源实际容纳量, 为了计入死亡羊只牧草消费量, 并且不使 (7) 和 (8) 式变得复杂, 我们把每季草场上死亡羊只的牧草消费量附加到存活羊只的牧草消费量之上, 即按年龄组将其平摊到每只存活羊只的采食量之中。

设于夏秋(冬春)时间段第  $i$  年龄组平均每只死亡母、羯羊的牧草消费量分别为  $DF_i^{(s)}$  和  $DM_i^{(s)}$  ( $DF_i^{(w)}$  和  $DM_i^{(w)}$ ), 那么在夏秋时间段于夏秋草场上包括死亡羊只在内的第  $i$  年龄组全部母羊牧草消费量为

$$DF_i^{(s)} \cdot (1 - SF_i^{(s)}) \cdot F_i^{(w)} + IF_i^{(s)} \cdot F_i^{(s)} \quad (a)$$

由 (1) 式

$$F_i^{(s)} = SF_i^{(s)} \cdot F_i^{(w)} \quad (b)$$

将该牧草消费量平摊到第  $i$  年龄组存活到夏秋时间段结束时刻的每只存活母羊, 即 (a) 式除以 (b) 式:

$$IRF_i^{(s)} = \frac{(a)}{(b)} = \left( \frac{1}{SF_i^{(s)}} - 1 \right) \cdot DF_i^{(s)} + IF_i^{(s)} \quad (9)$$

$$(i=0, 1, \dots, 8)$$

为夏秋草场第  $i$  年龄组平均每只存活母羊的修正采食量。类似地, 夏秋草场每只存活羯羊的修正采食量为

$$IRM_i^{(s)} = \left( \frac{1}{SM_i^{(s)}} - 1 \right) \cdot DM_i^{(s)} + IM_i^{(s)} \quad (10)$$

$$(i=0, 1, \dots, 8)$$

对于冬春草场, 若以  $SF$ 、 $SM$  分别表示新产母、羯羔羊的成活率, 则每只存活羊只的修正采食量为

$$\begin{aligned} IRF_0^{(w)} &= IF_0^{(w)} + \left(\frac{1}{SF} - 1\right) \cdot DF_0^{(w)} \\ IRM_0^{(w)} &= IM_0^{(w)} + \left(\frac{1}{SM} - 1\right) \cdot DM_0^{(w)} \\ IRF_i^{(w)} &= \left(\frac{1}{SF_{i-1}^{(w)}} - 1\right) \cdot DF_i^{(w)} + IF_i^{(w)} \\ IRM_i^{(w)} &= \left(\frac{1}{SM_{i-1}^{(w)}} - 1\right) \cdot DM_i^{(w)} + IM_i^{(w)} \\ (i &= 1, 2, \dots, 8) \end{aligned} \quad (11)$$

以修正采食量分别代替 (7) 和 (8) 式中相应采食量, (7) 和 (8) 式即为包括死亡羊只在内的牧草消费的资源约束。

像羊这样的较大型食草动物, 在采食过程中被采食的牧草并没有全部被摄入, 有相当数量的被采食牧草以碎屑形式洒落到地面; 再考虑到践踏、粪便污染的牧草损失, 并计入其他食植动物采食的牧草, 浪费是显著的。据 Anway (1978) 估计, 这样浪费的牧草约占被摄入牧草的 75%, 故上述修正采食量应再扩大 1.75 倍, 再次进行修正。为了简化符号, 仍以原来的符号表示, 但在具体估计参数时要 2 次修正。

### (三) 线性规划模型

连同目标函数和约束条件, 完整的线性规划模型为

$$\begin{aligned} \text{Max } Z &= \sum_{i=0}^8 \left[ (BF_i^{(w)} \cdot F_i^{(w)} + BM_i^{(w)} \cdot M_i^{(w)}) + (BF_i^{(s)} \cdot F_i^{(s)} + \right. \\ &\quad \left. BM_i^{(s)} \cdot M_i^{(s)}) \right] + \sum_{i=0}^8 (CF_i \cdot KF_i + CM_i \cdot KM_i) \\ \text{满足} \quad F_i^{(s)} &= SF_i^{(s)} \cdot F_i^{(w)} \\ M_i^{(s)} &= SM_i^{(s)} \cdot M_i^{(w)} \\ (i &= 0, 1, \dots, 8) \\ F_0^{(w)} &= \sum_{i=2}^8 MF_i \cdot (F_i^{(s)} - KF_i) + 0.035F_0^{(w)} \\ M_0^{(w)} &= \sum_{i=2}^8 MM_i \cdot (M_i^{(s)} - KM_i) - 0.035F_0^{(w)} \\ F_{i+1}^{(w)} &= SF_i^{(w)} \cdot (F_i^{(s)} - KF_i) \\ M_{i+1}^{(w)} &= SM_i^{(w)} \cdot (M_i^{(s)} - KM_i) \\ (i &= 0, 1, \dots, 6) \\ F_8^{(w)} &= SF_7^{(w)} \cdot (F_7^{(s)} - KF_7) + SF_8^{(w)} \cdot (F_8^{(s)} - KF_8) \\ M_8^{(w)} &= SM_7^{(w)} \cdot (M_7^{(s)} - KM_7) + SM_8^{(w)} \cdot (M_8^{(s)} - KM_8) \\ A^{(w)} + A^{(s)} &\leq A \\ \sum_{i=0}^8 (IRF_i^{(w)} \cdot F_i^{(w)} + IRM_i^{(w)} \cdot M_i^{(w)}) &\leq AT^{(w)} \cdot A^{(w)} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\sum_{i=0}^8 (IRF_i^{(s)} \cdot F_i^{(s)} + iRM_i^{(s)} \cdot M_i^{(s)}) \leq AT^{(s)} \cdot A^{(s)}$$

且

$$F_i^{(s)}, M_i^{(s)}, F_i^{(w)}, M_i^{(w)}, KF_i, KM_i, A^{(w)}, A^{(s)} \geq 0$$

$$(i = 0, 1, \dots, 8)$$

各个变量及各参数的定义如前所述。模型中共有结构变量 56 个，常数参数 82 个；除非负条件外，共有结构性约束条件 39 个，其中“=”平衡型约束 36 个，“≤”限制型约束 3 个。目标函数 Z 是年度畜产品能量输出 (MJ)，前 2 个小括号内的项分别表示冬春、夏秋草场上存栏羊只的畜产品收益，而第 3 个小括号内的项表示出栏羊只的畜产品收益。式中  $BF_i^{(s)}$ 、 $BM_i^{(s)}$  ( $BF_i^{(w)}$ 、 $BM_i^{(w)}$ ) ( $i = 0, 1, \dots, 8$ ) 分别为夏秋 (冬春) 草场每只存栏母、羯羊直接畜产品能量输出收益 (MJ/只)，而  $CF_i$ 、 $CM_i$  ( $i = 0, 1, \dots, 8$ ) 分别为出栏每只母、羯羊的畜产品能量输出 (MJ/只)。冬春草场存栏羊只的畜产品收益，全部是死亡羊只的皮、毛带来的，将其平摊到每只存活的羊上，类似于 (11) 式的计算方法，有

$$BF_0^{(w)} = \left( \frac{1}{SF} - 1 \right) \cdot GF_0^{(w)}$$

$$BM_0^{(w)} = \left( \frac{1}{SM} - 1 \right) \cdot GM_0^{(w)}$$

$$BF_i^{(w)} = \left( \frac{1}{SF_i^{(w)}} - 1 \right) \cdot GF_i^{(w)} \quad (13)$$

$$BM_i^{(w)} = \left( \frac{1}{SM_i^{(w)}} - 1 \right) \cdot GM_i^{(w)}$$

( $i = 1, 2, \dots, 8$ )  
夏秋草场除死亡羊只带来存栏羊只收益外，每年 6—7 月剪羊毛一次 (羔羊例外)，额外增加存栏羊只的畜产品能量收益，因此有

$$BF_i^{(s)} = \left( \frac{1}{SF_i^{(s)}} - 1 \right) \cdot GF_i^{(s)} + WF_i \quad (14)$$

$$BM_i^{(s)} = \left( \frac{1}{SM_i^{(s)}} - 1 \right) \cdot GM_i^{(s)} + WM_i$$

( $i = 0, 1, \dots, 8$ )

式中  $GF_i^{(w)}$ 、 $GM_i^{(w)}$  ( $GF_i^{(s)}$ 、 $GM_i^{(s)}$ ) ( $i = 0, 1, \dots, 8$ ) 分别为冬春 (夏秋) 草场上每只死亡母、羯羊的皮、毛能量收益 (MJ/只)， $WF_i$  和  $WM_i$  分别为每只母、羯羊的产毛能量收益。

鉴于模型的维数较高，为节省篇幅，不再以等价的矩阵形式来表示模型。

### 参 数

线性规划模型 (12) 中的全部参数，均取自 1985—1988 年在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站的观测和研究结果。因本模型支持的是高寒牧场宏观优化管理决策，其分解度是低的，由此换来了模型的减化和空间维数的降低，故其参数值反映的只能是宏观平均效应，而不能反映季节内的动态，参数值的估计也是比较粗糙的。

目标函数的系数列于表1。其中,  $BF_i^{(w)}$ 、 $BM_i^{(w)}$ 、 $BF_i^{(s)}$ 和 $BM_i^{(s)}$  ( $i=0, 1, \dots, 8$ ) 是通过公式 (13)、(14) 估算的。

表1 目标函数的系数 (单位: MJ/只)  
Table 1 Coefficients of the objective function. (Unit: M Joule/sheep)

年龄组 Age class $i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$BF_i^{(w)}$	0.796	0.398	0.792	0.855	0.897	0.928	1.022	1.127	1.508
$BM_i^{(w)}$	0.796	0.398	0.792	0.855	0.897	0.928	1.022	1.127	1.508
$BF_i^{(s)}$	0.016	8.483	18.557	19.960	20.741	21.672	24.016	26.158	27.909
$BM_i^{(s)}$	0.016	8.483	18.557	19.960	20.741	21.672	24.016	26.158	27.909
$CF_i$	143.130	184.990	246.760	363.030	392.820	411.600	441.100	428.310	415.520
$CM_i$	143.130	184.990	246.760	363.030	392.820	411.600	441.100	428.310	415.520

各年龄组藏羊于冬春、夏秋草场的存活率见表2。年度存活率等于两季草场存活率之积, 0岁年龄组年存活率为82.00%、1岁为95.00%、2—6岁均为95.82%、7岁为95.73%、8岁为93.65%。

表2 各年龄组藏羊的存活率  
Table 2 Survival rates of Tibetan sheep indifferent age classes.

年龄组 Age class $i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$SF_i^{(w)}$	0.829	0.955	0.959	0.959	0.959	0.959	0.959	0.958	0.948
$SM_i^{(w)}$	0.829	0.955	0.959	0.959	0.959	0.959	0.959	0.958	0.948
$SF_i^{(s)}$	0.989	0.995	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998
$SM_i^{(s)}$	0.989	0.995	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998

用 (3) 式估计成年母羊的繁殖率, 列于表3。这些繁殖率是以夏秋草场数量减去出栏数量为基数 (见 (2) 式), 故 2 岁以上母羊参加繁殖。由于在实际种群中包含占母羊 3.5% 的种公羊, 为了便于计算已计入母羊各年龄组数量之中, 所以在估计各年龄组成年母羊 (包括种公羊) 的繁殖率时, 应考虑成年母羊中真正繁殖的比例。按表2、表3估计的参数推算, 羔羊的年度繁活率为74%。

表3 各年龄组母羊繁殖率  
Table 3 Breeding rates of Tibetan female sheep indifferent age classes.

年龄组 Age class $i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$MF_i$	—	—	0.417	0.417	0.417	0.417	0.417	0.402	0.379
$MM_i$	—	—	0.417	0.417	0.417	0.417	0.417	0.402	0.379

各年龄组藏羊的修正采食量,是在摄食量的基础上 ( $IF_i$ 、 $IM_i$ ) 首先按(9)一(11)式修正,计入死亡羊只的牧草消耗,然后再计入牧草浪费比例求得(表4)。藏羊在夏秋草场放牧153天(6月1日—10月31日),余下的212天在冬春草场上放牧,因此,表4所列出的 $IRF_i^{(w)}$ 、 $IRM_i^{(w)}$  ( $IRF_i^{(s)}$ 、 $IRM_i^{(s)}$ ) 是每只羊于夏秋(冬春)时间段的全部采食量,即季采食量。季摄入量是实测该季日摄入量平均值的季累计。死亡羊只的季摄入量取为相应存活者的一半。羔羊于哺乳期,其采食量实际上是母体为哺乳羔羊而增加的采食量。

表4 各年龄组藏羊的季采食量

Table 4 Seasonal quantities of forage grasses eaten (单位: kg/只) by Tibetan sheep of different age classes. (Unit: kg/sheep)

年龄组 Age class $i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$IRF_i^{(w)}$	78.506	293.806	406.164	683.615	720.527	759.557	818.959	787.610	759.913
$IRM_i^{(w)}$	78.506	293.806	406.164	683.615	720.527	759.557	818.959	787.610	759.913
$IRF_i^{(s)}$	187.268	253.348	347.441	577.277	607.857	640.190	689.402	663.096	640.293
$IRM_i^{(s)}$	187.268	253.348	347.441	577.277	607.857	640.190	689.402	663.096	640.293

随着农牧业经济管理体制的改革,小规模的家庭承包牧场大量涌现,因此,选取A值为一般家庭承包牧场的天然草场总面积500 ha。根据海北定位站多年积累的观测资料,在半封育状态下冬春草场(以矮嵩草草甸为主)的平均地上净初级生产力 $NP^{(w)} = 3578.8\text{kg/ha}$ 、夏秋草场(以灌丛草甸为主)的 $NP^{(s)} = 2667.2\text{kg/ha}$ 。高寒草甸冷季多风,加之降雪等因素的机械物理作用,冷季牧草自然凋落率高达52%。但考虑到冷季草场牧草的凋落过程和利用过程是同时进行的,牧草的持续利用减少了现存量,进而降低了冷季凋落率,故粗略估计 $FL^{(w)} = 50\%$ 。夏秋草场在放牧期间的凋落率微小,忽略不计( $FL^{(s)} = 0$ )。夏秋草场的利用季节恰值牧草的生长发育阶段,为了维持夏秋草场多年生牧草净初级生产力的稳定、草场不至于退化,必须保持一个适度的利用率,即保持不失掉过多的叶片而明显地降低光合产物,维持牧草与环境因子的相对平衡,利于根系(包括根茎)的生长发育和营养储备的恢复,支持根系稳定动态周转,不明显地影响下一年度牧草的生长发育。Zon Kechen等(1986)从高寒草甸土壤N、P库平衡的角度建议牧草的利用率在50%左右。从海北定位站多年的实际研究结果估计,利用率在45—50%之间比较合适。本文取 $U^{(s)} = 50\%$ 。冬春草场被利用的牧草基本上是立枯草;除去约15%的毒草和不采食的杂草,余下的85%是可利用牧草,故取 $U^{(w)} = 85\%$ 。但随着牧草的消耗,相对喜食的牧草逐渐减少,选择性降低;此外,经过啃食,牧草留茬高度以下部分不能为藏羊利用;这样,大约剩余20%的可利用牧草不被家畜利用。因此,冬春草场可利用牧草藏羊的最大利用比例 $MU^{(w)} = 80\%$ 。夏秋草场因控制牧草的利用度为50%,选择性不会受多大影响,留茬不计入利用部分,因此,这50%的牧草可以全部被利用,即夏秋草场的 $MU^{(s)} = 100\%$ 。这样,可依据(6)式计算出每公顷草地的可采食牧草

量:  $AT^{(W)} = 1216.79\text{kg/ha}$ 、 $AT^{(S)} = 1333.60\text{kg/ha}$ 。

至此, 已估计了线性规划模型 (12) 的全部参数。

## 结 果

线性规划模型 (12), 既包含整数变量 (羊只数), 又包含连续变量 (草场面积), 故不能将其视为整数线性规划问题。这里, 把各变量统一都作为连续变量处理, 看作一般线性规划问题, 采用修正单纯法 (revisal simple method) 求解。自行编制附带灵敏度分析和稳定性分析的解线性最优化问题的软件包 (简介于后), 于 IBM PC 系列微型机上运行。下面列出的线性规划模型 (12) 最优解计算结果, 羊只数量均已经过四舍五入取整处理, 故其只是一个最佳近似最优解。

### (一) 夏秋草场藏羊种群最优存栏结构

在前述模型参数下, 于夏秋时间段 (6月1日至10月31日) 在夏秋草场上藏羊种群最优存栏结构列于表5。在下文中除非特别说明, 母羊各年龄组数量中均包含其自身数量3.5%的种公羊在内。在夏秋草场优化存栏种群结构中, 母羊占83.90%, 羯羊占16.10%; 繁殖母羊占种群的52.31%, 其中包括占种群1.83%的种公羊, 实际繁殖母羊占种群的50.48%, 其自身年龄分布为: 2岁者占26.01%、3岁占24.82%、4岁23.87%、5岁占12.89%、6岁占12.41%、7、8岁均为0。包括后备种公羊在内, 1岁后备母羊占种群的14.23%, 后备母羔羊占种群的17.35%。存栏羯羊全部由羯羔羊组成 (占种群的16.10%)。种群中约1/3是羔羊。

表5 夏秋草场存栏藏羊最优种群结构

Table 5 The optimal population structure stocked for Tibetan sheep in the summer-autumn grazing land. (单位: 只) (Unit: sheep)

年龄组 Age class	0	1	2	3	4	5	6	7	8	合计 Total
♀ ( $F_i^{(e)}$ )	139	114	109	104	100	54	52	0	0	672
%*	17.35	14.23	13.61	12.98	12.48	6.74	6.49	0	0	83.90
♂ ( $M_i^{(e)}$ )	129	0	0	0	0	0	0	0	0	129
%*	16.10	0	0	0	0	0	0	0	0	16.10
合计 Total	268	114	109	104	100	54	52	0	0	801
%*	33.46	14.23	13.61	12.98	12.48	6.74	6.49	0	0	100.00

\* 占种群总数量的百分比。

Percentage calculated in terms of total number of population.

### (二) 最佳出栏结构和种群周转期

在最佳出栏结构中, 羯羔羊占总出栏数的57.33%, 母羊占42.67%, 其中4岁母羊占19.56%、6岁母羊占23.11% (表6)。表中藏羊的年龄, 仍为夏秋草场结束时刻的年

表6 最佳出栏结构 (单位: 只)  
Table 6 The optimal slaughter structure for Tibetan sheep. (Unit: sheep)

年龄组 Age class <i>i</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	合计 Total
♀( $KF_i$ )	0	0	0	0	44	0	52	0	0	96
%*	0	0	0	0	19.56	0	23.11	0	0	42.67
♂( $KM_i$ )	129	0	0	0	0	0	0	0	0	129
%*	57.33	0	0	0	0	0	0	0	0	57.33
合计 Total	129	0	0	0	44	0	52	0	0	225
%*	57.33	0	0	0	19.56	0	23.11	0	0	100.00

\* 占出栏总数的百分比。  
Percentage calculated in terms of total slaughter number.

表7 出栏数量与出栏前存栏数量的比较 (单位: 只)  
Table 7 Comparison of slaughter numbers with stock numbers before slaughter. (Unit: sheep)

年龄组 Age class <i>i</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	合计 Total
出栏前存栏数量 Stock numbers before slaughter	0	86.23	27.0	30.81	30.81	10.73	21.13	0	0	206.71
♀( $F_i^{(s)}$ )	139	114	109	104	100	54	52	0	0	672
♂( $M_i^{(s)}$ )	129	0	0	0	0	0	0	0	0	129
合计 Total	268	114	109	104	100	54	52	0	0	801
出栏数 Slaughter numbers										
♀( $KF_i$ )	0	0	0	0	44	0	52	0	0	96
% <sup>a)</sup>	0	0	0	0	44.00	0	100.00	0	0	14.29
♂( $KM_i$ )	129	0	0	0	0	0	0	0	0	129
% <sup>a)</sup>	100.00	0	0	0	0	0	0	0	0	100.00
合计 Total	129	0	0	0	44	0	52	0	0	225
% <sup>b)</sup>	48.13	0	0	0	44.00	0	100.00	0	0	28.09

a) 对应性别年龄组出栏数占出栏前存栏数的百分比。  
Percentage of slaughter numbers in terms of stock numbers before slaughter in corresponding sex-age classes.  
b) 对应年龄组总出栏数占出栏前总存栏数的百分比。  
Percentage of total slaughter numbers in terms of total stock numbers before slaughter in corresponding age classes.

龄。为了便于与出栏前数量进行比较和计算出栏率。综合表5和表6在表7中一并列出出栏前数量与出栏数量, 以及出栏率。相对于出栏前相应存栏数量, 种群的总出栏率为28.09%, 母羊出栏率为14.29%, 羯羊出栏率为100% (全部是羯羔羊); 出栏的母羊

均为繁殖母羊,其出栏率为22.91%(4岁母羊出栏率为44.00%、6岁母羊出栏率为100%);其他各性别年龄组的出栏率均为0。为了保持种公羊的固定比例,母羊出栏时应按3.5%的比例出栏种公羊。

根据出栏率和死亡率推算,藏羊种群的周转期为3年,母羊的周转期为7年,繁殖母羊的周转期为4年,羯羊的周转期为1年。

### (三) 冬春草场最优存栏结构

藏羊种群出栏后刚刚进入冬春草场时只剩下后备母羊和繁殖母羊,繁殖之后才出现

表8 冬春草场存栏藏羊最优种群结构

Table 8 The optimal population structure stocked for Tibetan sheep (单位:只) in the winter-spring grazing land. (Unit: sheep)

年龄组 Age class $i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	合计 Total
出栏后 After slaughter										
$\text{♀}(F_i^{(w)})$	0	139	114	109	104	56	54	0	0	576
%	0	24.13	19.79	18.92	18.06	9.72	9.38	0	0	100.00
$\text{♂}(M_i^{(w)})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
冬春草场结束时刻 At end of the winter-spring grazing period										
$\text{♀}(F_i^{(w)})$	140	115	109	105	100	54	52	0	0	675
%*	17.39	14.29	13.54	13.04	12.42	6.71	6.46	0	0	83.85
$\text{♂}(M_i^{(w)})$	130	0	0	0	0	0	0	0	0	130
%*	16.15	0	0	0	0	0	0	0	0	16.15
合计 Total	270	115	109	105	100	54	52	0	0	805
%*	33.54	14.29	13.54	13.04	12.42	6.71	6.46	0	0	100.00

\* 占种群总数量百分比。

Percentage in terms of total number of population.

羔羊。为了便于比较,将出栏后繁殖前的种群结构与冬春草场结束时刻的种群结构一并列于表8。出栏后繁殖前的种群中,3岁以上繁殖母羊占绝对多数(56.08%),1岁后备母羊次之(24.13%),2岁母羊由于其刚刚由1岁年龄组进入2岁年龄组,下一年度方能产羔,故也是后备母羊(19.79%)。冬春草场结束时刻的种群与之相比,种群中增加了近一半的新产羔羊,使此时的种群结构中羔羊的比例达到33.54%;包括2岁母羊在内的下一年度繁殖母羊占种群的52.17%,若去掉占种群1.83%的种公羊,实占50.34%;包括后备种公羊在内,1岁后备母羊占种群的14.29%,后备母羔羊占种群的17.39%。比较表5和表8可以看出,冬春草场结束时刻和夏秋草场结束时刻的最优种群结构基本是一样的,粗略地说,羔羊约占1/3、繁殖母羊约占1/2(呈金字塔型年龄分布)、1岁后备母

羊约占1/6；若从性别来看，母羊约占5/6、羯羊接近1/6（全部是羯羔羊）。自然死亡、出栏与繁活羔羊的替补相平衡，是维持种群结构基本不变的原因。

#### (四) 两季草场最佳面积分配

在最优种群结构下两季草场的牲畜数量相近，分别为801只（夏秋）和805只（冬春），但在两季草场上藏羊的平均体重、采食量及放牧时间长度均不相同，因而对牧草的总需求也不相同。在供给方面，两季草场单位面积可供采食的牧草量并不相同，只有通过合理地调整两季草场的面积，才能使两季草场的牧草总供给和总需求均达到平衡，解决季节性草畜矛盾。线性规划模型（12）的最优解，给出了在最优存栏和出栏结构下夏秋和冬春草场最佳面积分配，两者分别为231.415ha和268.585ha，分别占总草场面积（500ha）的46.28%和53.72%；两季草场面积相对比为（夏秋）1:1.16（冬春），恰好两者均达到草畜最佳平衡。

#### (五) 牧草利用

按上述最佳面积分配，夏秋和冬春草场提供的实际可采食牧草总量分别为308.62吨和326.81吨。由于单位面积草地可采食牧草量，是在适度利用、不引起草场退化的条件下实际可能提供的牧草量，因此，即使两季草场可采食牧草总量全部被利用完，也不会导致草场过度利用。反之，若某一季草场提供的可采食牧草有剩余，则说明该季草场的牧草利用没有达到预定的利用率，亦即牧草利用不足，这将降低畜产品的生产率。

在最优存栏结构下夏秋草场和冬春草场各性别各年龄组藏羊的数量（只）、总采食量（吨）和在最佳面积分配下牧草的总供给量（吨）分别列于表9和表10。由于模型将羊的只数作为连续变量处理，其最优解取整有舍入误差，破坏了草、畜本应达到的精确

表9 夏秋草场各年龄组藏羊的总采食量

Table 9 Total quantities of forage grasses eaten by Tibetan sheep in the summer-autumn grazing land. (单位: 只, 吨) (Unit: sheep, ton)

年龄组 Age class i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	合计 Total
♀(F <sup>(s)</sup> )	139	114	109	104	100	54	52	0	0	672
采食量 Forage eaten	26.03	28.88	37.87	60.04	60.79	34.57	35.85	0	0	284.03
♂(M <sup>(s)</sup> )	129	0	0	0	0	0	0	0	0	129
采食量 Forage eaten	24.16	0	0	0	0	0	0	0	0	24.16
采食量合计 Total forage eaten	50.19	28.88	37.87	60.04	60.79	34.57	35.85	0	0	308.19
%	16.29	9.37	12.29	19.48	19.72	11.22	11.63	0	0	100.00
可采食牧草总量 Total forage allowed to utilize	—	—	—	—	—	—	—	—	—	308.62
剩余牧草 Surplus forage	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.43

表 10 冬春草场各年龄组藏羊的总采食量

Table 10 Total quantities of forage grasses eaten by Tibetan sheep in the winter-spring grazing land. (单位: 只, 吨) (Unit: sheep, ton)

年龄组 Age class $i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	合计 Total
♀ ( $F_i^{(w)}$ )	140	115	109	105	100	54	52	0	0	675
采食量 Forage eaten	10.99	33.79	44.27	71.78	72.05	41.02	42.59	0	0	316.49
♂ ( $M_i^{(w)}$ )	130	0	0	0	0	0	0	0	0	130
采食量 Forage eaten	10.21	0	0	0	0	0	0	0	0	10.21
采食量合计 Total forage eaten	21.20	33.79	44.27	71.78	72.05	41.02	42.59	0	0	326.70
%	6.49	10.34	13.55	21.97	22.05	12.56	13.04	0	0	100.00
可采食牧草总量 Total forage allowed to utilize	—	—	—	—	—	—	—	—	—	326.81
剩余牧草 Surplus forage	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.11

平衡, 使得两季草场的可采食牧草微有剩余 (分别为 0.43 吨和 0.11 吨); 但与两季牧草总供给量相比可忽略不计, 因此, 可以认为两季草场的牧草总供给与藏羊采食总需求恰好分别达到最佳平衡。

比较表 9 和表 10 可以发现, 各性别各年龄组藏羊在两季草场所消耗的牧草量及其占总供给量的百分比均不相同。无论是夏秋草场还是冬春草场, 母羊消耗的牧草最多, 分别占供给牧草总量的 92.03% 和 96.87%; 在各年龄组中, 3 岁和 4 岁母羊采食牧草最多 (分别占总供给量的 1/5 左右), 2 岁母羊消耗的牧草也较多 (占 2/15 左右), 5 岁和 6 岁母羊消耗的牧草稍低于 2 岁母羊 (分别占 1/8 左右), 1 岁后备母羊消耗牧草较少 (占 1/10 左右)。除羔羊外, 各年龄组藏羊冬春草场的牧草消耗稍高于夏秋草场。在夏秋草场羔羊数量约占种群的 1/3, 消耗的牧草占总供给量的 16.29% (约 1/6); 而在冬春草场羔羊的数量也约占 1/3, 但因其体重轻所消耗的牧草只占 6.49% (约 1/15)。夏秋草场的牧草主要被 3—4 岁母羊和羔羊消耗, 而冬春草场的牧草主要被 2—4 岁母羊消耗。作为秋季出栏数量主要部分的羯羔羊, 在两季草场上所消耗的牧草很少, 分别只占夏秋和冬春草场牧草总供给量的 7.84% 和 3.13%。

#### (六) 放牧强度

如果不考虑存栏羊只因体重不同所引起的采食量差异, 只按牲畜头数平均计算, 那么在最优存栏结构下, 夏秋草场的放牧强度为 3.46 只/ha, 冬春草场为 3.00 只/ha, 全年为 1.61 只/ha。但事实上, 羔羊和 1 岁后备母羊的体重, 以及随之个体采食量均较成年羊低得很多 (表 4)。若分别以两季草场成年羊 (2—6 岁) 的平均采食量作为标准, 按采食量将存栏的羔羊和 1 岁后备母羊的只数折算成成年羊只数, 即所谓标准羊只数, 则于夏秋草场存栏的 268 只羔羊相当于 87.67 只标准羊, 而存栏的 114 只 1 岁后备母羊相

当于 50.45 只标准羊, 从而夏秋草场的载畜量 (801 只) 折合为 557.12 只标准羊, 放牧强度为 2.41 只标准羊/ha; 而冬春草场的载畜量 (805 只) 折合为 501.13 只标准羊, 放牧强度为 1.87 只标准羊/ha, 全年放牧强度为 1.05 只标准羊/ha。此即适度利用草场并保证两季草场草、畜平衡的标准羊放牧强度。

### (七) 畜产品生产力和种群生产力

在上述最优存栏和出栏结构下, 以及总面积为 500ha 的草场最佳两季草场面积分配下, 藏羊的以能量度量的最大畜产品生产力为 68 877.91MJ/年。为了便于分析, 将畜产品的生产结构列于表 11。这里需要指出的是, 由于本最优解实型的出栏羊只数在进行舍入处理时恰好都是个位进 1 (一般情况下有舍有入), 因进位误差使得最佳近似解的畜产品生产力较实型精确解高出 208.82 MJ/年 (精确解的目标函数为 68 669.09MJ/年) 相对误差为 0.3%。显然, 可以认为最佳近似解仍是这类似近似解中最优的。

表 11 优化藏羊种群的畜产品生产结构

Table 11 The production structure of livestock products for the optimal population structure of Tibetan sheep.

(单位: 兆焦耳)  
(Unit: MJ)

年龄组 Age class $i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	合计 Total
夏秋草场 Summer-autumn grazing land										
$\text{♀}(F_i^{(s)})$	2.22	967.06	2 022.71	2 075.84	2 074.10	1 170.29	1 248.83	0	0	9 561.05
$\text{♂}(M_i^{(s)})$	2.06	0	0	0	0	0	0	0	0	2.06
合计 Total	4.28	967.06	2 022.71	2 075.84	2 074.10	1 170.29	1 248.83	0	0	9 563.11
冬春草场 Winter-spring grazing land										
$\text{♀}(F_i^{(w)})$	111.44	45.77	86.33	89.78	89.70	50.11	53.14	0	0	526.27
$\text{♂}(M_i^{(w)})$	103.48	0	0	0	0	0	0	0	0	103.48
合计 Total	214.92	45.77	86.33	89.78	89.70	50.11	53.14	0	0	629.75
出栏 Slaughter										
$\text{♀}(KF_i)$	0	0	0	0	17 284.08	0	22 937.20	0	0	40 221.28
$\text{♂}(KM_i)$	18 463.77	0	0	0	0	0	0	0	0	18 463.77
合计 Total	18 463.77	0	0	0	17 284.08	0	22 937.20	0	0	58 685.05
年累计 Yearly accumulation										
合计 Total	18 682.97	1 012.83	2 109.04	2 165.62	19 447.88	1 220.40	24 239.17	0	0	68 877.91
%	27.13	1.47	3.06	3.14	28.24	1.77	35.19	0	0	100.00

冬春草场的畜产品全部来自死亡羊只的皮、毛,其量微小,不足年生产力的1%。夏秋草场的畜产品,除微少的死亡羊只皮、毛外,主要是存栏羊只剪下的羊毛,占年生产力的13.88%。占年生产力85.20%的畜产品是出栏羊只提供的。在全年畜产品生产中,6岁肥育出栏母羊提供的畜产品最多,占年生产力的35.19%,4岁母羊(有44%出栏)次之,占年生产力的28.24%,羔羊(全部羯羔出栏)再次之,提供27.13%的畜产品。

由于本模型表述的是依靠自身繁殖补充的藏羊种群的静态稳定平衡状态,亦即年度间种群没有差异,因此,开放的藏羊种群的自身生产输入与畜产品输出在一年中是平衡的,也就是说,年度畜产品生产力和藏羊种群的生产力是相等的,同为最大值:68 877.91 MJ/年。

#### (八) 能量转换效率和边际生产率

若以收益最佳的方式利用各种固定资源,一个单位的每种固定资源都有唯一确定的产值,经济学上称其为边际产值(marginal value product),线性规划理论中称其为隐蔽价(shadow price)(Hazell和Norton,1986)。在线性规划模型(12)中,作为固定资源约束的可采食牧草量和草地面积,其边际产值或隐蔽价就是相应约束的对偶值(dual value),可以通过求解模型(12)的对偶问题或其他技术获得。由此可以估计在最优生产方式下,从初级生产者到藏羊两个营养层次间的能量转换生态效率。在等价的原则下,通过边际产值也可以估计每公斤可采食牧草和每公顷草地以畜产品度量的最高价值(隐蔽价)。

在模型(12)的最优生产结构下,夏秋草场和冬春草场可采食牧草的边际产值分别为102.98kJ畜产品/kg干草和112.87kJ畜产品/kg干草。全年平均计算,可采食牧草的边际产值为108.40kJ畜产品/kg干草,放牧天然草地的边际产值为137.338MJ畜产品/ha。前已述及,维持年度间平衡的藏羊种群的年度畜产品生产力即为其年度种群生产力,因此,上述各资源年度畜产品边际产值,也表明了藏羊种群次级生产关于可采食牧草和天然草地的边际生产率。若将牧草年度边际产值的分母转换为能量,便可直接获得从牧草到藏羊的最高能量转化效率。根据曾绍祥等(1982)测定的金露梅灌丛(夏秋草场)混含牧草和矮嵩草草甸(冬春草场)混合牧草于各物候期的热值,采用放牧时间段跨越各物候期天数加权平均方法,即可得到放牧期间夏秋草场平均混合牧草热值为18.06MJ/kg干草、冬春草场平均混合牧草热值为18.58MJ/kg干草。再按年度两场放牧天数加权平均,年平均采食牧草的热值为18.35MJ/kg干草。于是,牧草向藏羊种群营养层次的能量转化年度平均生态效率为0.59%,显然,这是在模型(12)的约束条件下最高能量输出的转化效率。

通过屠宰试验测定,藏羊的平均活重热值为6.054MJ/kg,平均干重组织热值为28.344MJ/kg。据此可以计算出采用习惯单位的藏羊年度次级生产率:每公斤可采食牧草的年度次级边际生产率为17.91g活重/kg干草或者3.82g干重组织/kg干草,每公顷草地年度次级边际生产率为22.68kg活重/(ha·年)或者4.84kg干重组织/(ha·年)。若去掉内脏及其内含杂物、头、蹄、皮等,按平均屠宰率43%计算其肉(胴体)生产,则分别为7.70g鲜肉/kg干草,9.75kg鲜肉/(ha·年)。若再去掉骨头,只计算净肉生产,则分别为4.78g净鲜肉/kg干草,6.05kg净鲜肉/(ha·年)。

草地是畜牧业生产的物质基础，是宝贵的可再生资源，也是人们赖以生存的生态环境。在开发利用草地的同时，要进行保护和建设。在目前草地物质投入甚微的情况下，要加强、依靠智力投入和技术投入来提高经济效益。至少在利用和保护并重的前提下合理开发草地资源，从子孙后代的长远利益出发，发展“持续畜牧业”、阻止草地生态环境的不断恶化，摒弃那种急功近利、“竭泽而渔”式的摧残资源和生态环境的短期行为。

### (一) 生态环境、资源效益与经济效益

解放40年来，青海省的牲畜总头数由1949年的748.73万头增加到1976年的2102.99万头，增长2.8倍。此后稳定在2000万头左右，1979年为2152.94万头，1984年为2040.10万头，1985年为2126.36万头，1989年为2129.50万头。但随着牲畜头数的增加，畜均草地面积下降了近3倍，草畜矛盾加剧。由于对草地过度利用，引起草地程度不同地退化，虫鼠害加重，处于一种恶性循环之中。70年代后期以来牲畜总头数徘徊在2000万头左右，某种程度上说明载畜量已达到或超过天然草地的承载能力的极限。

本文建议的高寒牧场藏羊种群优化生产结构，从保护天然草场的长远利益出发，减轻放牧压力，适度利用天然草场，以藏羊为准的畜均草地面积达到0.95ha/只标准羊，高于青海省的平均值0.70ha/只羊（青海省草原工作队1976年统计值），给草地以喘息、恢复的机会，阻止天然草地的进一步退化，甚至有逐渐恢复的可能；同时，兼顾到近期经济、社会效益，在载畜量容许的范围内，依靠提高科学管理水平来增加畜牧业生产力。根据高原气候特点和牧草生长节律，优化调整两季草场面积结构，使两季草场畜群达到平衡，妥善解决季节性草畜矛盾，同时又充分利用可采食牧草。优化藏羊种群结构和出栏结构，提高次级生产力，提高了出栏率，加速畜群周转，加快系统内的物质能量循环，提高畜产品生产力和牧草转化效率。由此产生的经济效益超过了牲畜头数减少所带来的经济损失。若以产肉量作为衡量基准，在最优生产结构下单位面积天然草地的产肉量达到9.75kg鲜肉/(ha·年)，较传统经营下青海省草地平均产肉量2.025kg/(ha·年)（青海省《农牧资源与区划研究》编委会）提高了近4倍。

青海省有可利用草地3345.07万公顷，在优化生产结构下，折合藏羊的牲畜总头数将减少26.42%，若不考虑气候以及随之牧草产量的年际波动，就平均状况而言，全省产肉量将达到32.61万吨，较传统经营方式增加25.84万吨，增长近5倍，较1988年（10.62万吨）增加近22万吨。

这个结论基于中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站对牧草产量多年观测的平均值：夏秋草场为2667kg/ha、冬春草场为3578kg/ha（干重），即使由于地理、气候条件和植被差异全省平均产草量较之降低一半，提高近1.5倍的经济效益总是可以期望的。

### (二) 最优生产结构的可行性

复杂的高原地形限制了冷、暖两季草场面积弹性调整的范围，青海省冷、暖草场面积比为1.1:1.0。冷季草场牧草枯黄、凋落，牧草量仅为青草期的1/2左右，而且质量低

劣,蛋白质含量仅为暖季的1/3—1/4左右。但冷季草场放牧时间却长达7个月以上(冷暖两季草场放牧时间比近似1.5:1.0),草畜矛盾异常尖锐,致使牲畜处于饥寒交迫状态,大量牲畜因缺草春乏死亡,如果再加上相当于死亡损失4倍的掉膘损失,冷季草场的畜群损失是相当惊人的,严重地浪费了牧草资源,大大降低了畜产品生产能力。为此,广大畜牧业工作者经过长期艰苦地探索,提出“季节性畜牧业”这一改革措施,调整草畜供求关系,提高经济效益。

青海省的畜牧工作者在推广季节性畜牧业生产的过程中,摸索了一套提高畜牧业经济效益的经验:①充分利用牧草丰盛、质量优良的夏秋草场,在进入冬春草场之前将大部羯羔羊和老弱畜出栏,进入冬春草场的牲畜存栏数减少1/3左右,畜群基本上3年周转一次,既缓解了草畜矛盾又提高了经济效益。②提高母畜比例和繁殖率,繁殖母羊比例达到种群数量的49%,并有17%的后备母羊作为补充,即母羊比例(不包括羔羊)达到65%时,具有最好的经济效益。要达到这个标准,繁殖率必须在65—70%的水平上<sup>1)</sup>。

但是,这些行之有效的实践经验尚缺乏充分的科学理论支持。本文以藏羊优化生产结构为例,从理论上说明这些实践经验的科学性,并予以精确化,为季节性畜牧业经营方式提供有力的理论依据和具体的实施方案。

由于冷、暖两季草场的最优种群结构基本一样,现以夏秋草场为例,将藏羊最优生产结构与实际经验结构的比较列于表12。在两个生产结构中,繁殖、后备母羊以及两者的和在种群中所占比例十分接近,畜群出栏种类相同,出栏率和周转期也相差不多。注意,表12最优结构一栏中,各母羊组已去掉包含于其中的占自身3.5%的种公羊,所列百分数均是真正母羊所占比例;而种公羊占整个种群的比例已单独列出。两个生产结构还有如下差异之点:①在最优结构出栏羊只中,除全部羯羔和老弱畜(6岁母羊)外,还有部分4岁母羊(44%,表7)。这是因为6岁母羊的繁殖功能没有明显地降低,并且其体重最大,产毛较多,从而出栏效益也最大(表1)。对于繁殖母羊除考虑其繁殖功能之外,还要兼顾淘汰出栏时的生产效益。但受草场承载能力的限制,不可能将4、5岁繁殖母羊全部存栏,肥育成6岁母羊出栏,因此,部分4岁母羊出栏,余下者肥育到6岁出栏。至于不出栏4岁母羊,代之出栏5岁母羊的不利之处,见后面的稳定性分析。②支持藏羊种群最优结构稳定、平衡周转的羔羊年繁殖率为74%,该值是海北站几年的实际观测平均值。如果繁殖率低于此值,为了维持种群平衡,母羊、尤其是繁殖母羊的比例还要提高。③对于夏秋草场,大部分放牧时间牧草正处于生长发育阶段,若放牧强度高,必然使绝大多数牧草不能完成其正常生命周期,影响第2年牧草的生长发育和更新,而且土壤库矿质营养元素入不敷出,从而导致天然草场退化。本文综合国内外关于牧草利用度的经验,以及海北定位站土壤N、P库收支平衡的定点研究结果,提出以“适度”(50%)而非“充分”利用夏秋草场为基点,确定供给牧草约束以及最佳种群规模。④为了充分利用可以被利用的牧草,考虑了维持两季草场畜群平衡和草畜平衡、依赖于可利用牧草量的两季草场最佳面积分配结构。冷、暖季草场面积最佳分配比在本文参数下为1.16:1.00,接近于青海省牧区自然冷、暖季草场面积比(1.1:1.0)。因此,实施本

1) 吴阿迪, 农牧资源与区划研究, 1986, (2): 16—19。

文设计的最优结构，可以比较充分、平衡地利用青海省的草地资源。

表 12 畜牧业生产中藏羊种群的优化结构与经验结构的比较

Table 12 Comparison of the optimal structure with the experiential structure in the population of Tibetan sheep for livestock production.

	繁殖母羊 Breeding female sheep (%)	后备母羊(1岁) Replacement female sheep (%)	两项和 Sum of two terms (%)	母羔羊 Female lambs (%)	种公羊 Breeding male sheep (%)	母羊合计 Sum of female sheep (%)	羯羔羊 Male lambs (%)	出栏率 Percent- age of slaughter (%)	周转期 Turnover period (years)
最优结构 Optimal structure	50.48	14.23	64.71	16.74	2.45	81.45	16.10	28.09	3
经验结构* Experiential structure	49	17	65	—	—	—	—	33.33	3

\* 取自吴阿迪 (1986)。  
From Wu Adi (1986) .

从实践经验结构和优化结构的异同比较可以看出，两者的相同点是基本的，差异点是后者对前者的精确化或补充。这就从理论上和实践上都说明了季节性畜牧业经营方式，符合高原畜牧业生产规律，能够提高畜牧业生产力。可以期望，高原畜牧业最优生产结构，为保护生态环境，合理开发利用草地资源和提高畜牧业生产经济效益作出贡献。

### (三) 最优生产结构的应用普遍性

线性规划和数学经济学 (Hartley, 1985; Lancaster, 1968) 原理表明，线性规划模型 (12) 最优解的目标函数值 (用  $Z^*$  表示)，与各固定资源 [用向量  $b = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T$  表示] 之间存在着一种线性关系，各固定资源  $b_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 以不变尺度贡献于最大收益  $Z^*$ ，可以表为齐次线性函数 (Euler 定理)

$$Z^* = f(b) = \sum_{i=1}^m b_i \lambda_i$$

称为牧场生产函数。式中  $b_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 表示各固定资源的数量， $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 是常数 (不变尺度)、 $b_i$  对应约束的对偶值 ( $b_i$  的隐蔽价)。显然，如果各固定资源量  $b_i$  的供给等比例增加  $k$  倍，那么

$$f(kb) = kf(b) = kZ^*$$

新的最优解与原来最优解的关系是：目标函数值增加  $k$  倍、各结构变量的值也扩大  $k$  倍。

根据上述原理，在线性规划模型 (12) 中如果其他参数不变，当草场总面积  $A$  在 500 ha 的基础上扩大或缩小时，牧场生产函数值 (收益) 和载畜量也相应地等比例变化，从而藏羊最优生产结构的相对百分比组成 (相对结构) 保持不变，因此，文中提供的优化藏羊生产结构在畜牧业生产中具有普遍意义。人们可以在模型 (12) 现有的最优解的基础上，根据草场总面积的大小很容易制定出最优生产计划并预测出最大可能收益。

如果由于地理、气候条件及植被差异引起某些参数发生变化，只要修改相应参数并运行本文提供线性规划软件包 (SLPPA)，即刻就可获得优化生产计划、产值以及参数分析结果。

#### (四) 灵敏度分析

灵敏度分析是确定当各种参数或最优解的结构发生变化时, 最优目标函数(收益)值的反应灵敏程度。由于模型中的参数都是观测的结果, 必定不同程度地存在着观测误差, 因此, 有必要探讨最优解目标函数值对各参数误差反应的灵敏度, 指出其变化范围以及需要精确化的灵敏参数。此外, 当优化生产方式的基底变量结构发生变化、转为非优化生产方式时, 人们自然想了解各种变化将给最大收益带来损失的严重程度, 此即最优目标函数值对各非基底变量进入基底的反应灵敏度。灵敏度分析能够指出各种非优化管理措施将给最大收益带来损失的大小, 为生产经营管理者提供衡量各种生产计划优化程度的度量尺度。至于参数在什么范围内变化将引起最优解的结构发生变化, 我们将在稳定性分析中讨论。

在模型(12)中, 作为资源约束的可采食牧草和草场面积, 以及作为目标函数系数的藏羊个体畜产品输出收益等参数的解析和分析相对比较容易; 而关于其他参数的解析分析十分困难, 通常采用试算法进行, 故这里只讨论前者。

对于最优解, 其目标函数值可视为藏羊个体畜产品输出收益参数的线性函数, 显然, 最优解中存栏或出栏数量越大者, 相应收益参数关于最大收益的灵敏度越高。如前所述, 在最优解中藏羊的存栏数量随年龄增加而递减, 因此, 个体存栏收益参数的灵敏度亦随年龄增加而递减。根据出栏数量, 个体出栏收益参数的灵敏度依次降低的顺序为: 羯羔羊、6岁母羊和4岁母羊。

对于资源, 计算机灵敏度分析程序的分析结果表明, 当夏秋草场每减少或增加1kg可采牧草, 将相应减少或增加102.98kJ的畜产品输出能量, 相当于藏羊17.01g活重或4.54g净鲜肉; 当冬春草场减少或增加1kg可采牧草, 将相应地减少或增加112.87kJ的畜产品输出能量, 相当于18.64g活重或4.97g净鲜肉。年平均增减1kg可采食牧草, 将增减108.40kJ的畜产品输出能量, 相当于藏羊17.91g活重或4.78g净鲜肉。夏秋、冬春草场牧草灵敏度的差异主要是由于放牧时间和采食量不同引起的。草场总面积每增减1ha, 将相应增减137.338MJ的畜产品输出能量, 相当于藏羊22.68kg活重或6.05kg净鲜肉。

对于非优化生产结构, 表13列出了出栏4岁和6岁以外年龄组的母羊或者在冬春草场上存栏1—7岁羯羊, 每个个体将给畜产品能量输出收益带来的损失(与最优生产结构相比)。表13显示, 如果出栏年龄较小的母羊, 尤其是2岁和1岁母羊, 种群输出能量的损失将会很大。这是因为母羊在种群畜产品生产中的作用, 不仅仅是生产毛、奶和作为畜产品出栏, 更重要的是其繁衍功能支撑着种群的稳定平衡周转和优化生产结构。从这个意义上讲, 没有母羊种群的生产力将会枯竭, 或者说种群生产力主要来源于母羊, 它相当于“母机”, 生产出的“机器”利用“原料”生产畜产品。如果出栏年龄小的母羊, 必定会破坏种群的优化生产结构, 引起生产功能的下降。因此, 不能单单以母羊的毛、奶生产和出栏效益来衡量母羊在种群畜产品生产中的作用, 而应以其在整个种群生产功能上的地位来考虑。2岁母羊恰值开始繁殖年龄, 若其出栏, 虽然会带来出栏效益, 但将会马上影响羔羊数量和以后逐年各年龄组替补羊只的数量, 即整个生产结构, 故此时期种群生产力的损失最大。1岁后备母羊和母羔羊是潜在的繁殖母羊, 它们出栏只会影响

表 13 非优化生产结构目标函数损失 (单位: 兆焦耳/只)  
 Table 13 Losses of the objective function for nonoptimal structure. (Unit: MJ/sheep)

年龄组 Age class $i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
母羊出栏损失 Losses of slaughter for female sheep	62.05	114.29	129.26	18.03	---	0.27	---	34.80	37.26
冬春草场羯羊存栏损失 Losses of stock in the winter-spring grazing land for male sheep	---	38.87	9.45	10.40	108.37	127.44	126.89	161.54	---

替补羊只的数量, 对羔羊数量产生影响尚有 1—2 年的时滞, 故其对生产力的影响强度依次减小。受草地和牧草资源的限制, 每年必定有一定数量的母羊出栏, 以维持草畜平衡和藏羊种群平衡。就母羊个体出栏收益而言, 6 岁母羊最佳 (表 1)。若设想将不足 6 岁的母羊全部肥育成 6 岁母羊, 既发挥其繁殖功能又产生最佳的出栏效益, 但从上述平衡角度来看是不可能的, 故在最优生产结构中将一部分 4 岁母羊出栏。如果 4 岁母羊不出栏, 而改为 5 岁母羊相应部分出栏, 由此引起的种群畜产品输出收益损失并不显著 (0.27 MJ/只)。至于 7—8 岁母羊, 因其存活率、繁殖功能和个体出栏效益均已下降, 从其在种群生产功能上的地位来看已成为多余, 养到这个年龄再出栏既浪费资源又降低收益, 但其造成损失的程度远小于 0—2 岁母羊的出栏损失。

表 13 还说明, 在冬春草场每存栏 1 只 1—7 岁羯羊给种群畜产品生产力造成的损失。除 1 岁羯羊外, 损失大致是随年龄递增的。值得注意的是, 若羯羔羊秋季不出栏, 就必定在冬春草场存栏 1 岁羯羊, 从整体收益来看, 每存栏 1 只 1 岁羯羊将损失 38.87MJ 的畜产品收益。这是由于在有限的牧草和草地资源约束下, 如果存栏 1 岁以上的羯羊, 其牧草消耗量高于羯羔羊, 加之新增羯羔羊, 羯羊数量的增加必然要减少母羊的数量, 随之羔羊的数量也减少。由于母羊的特殊功能地位, 结构的改变就降低了生产力。

### (五) 稳定性分析

由于某些参数发生年际变化, 例如, 因气候年间差异引起牧草地上净生产力的变化、羊只个体收益的变化等等, 人们自然关心原来的最优解结构是否仍然保持最优、可用? 这就需要进行稳定性分析。稳定性分析就是确定参数在什么范围内变化时, 将维持最优解的结构 (指基底变量结构) 不变; 或者说, 探讨最优解结构的稳固程度。

象灵敏度分析一样, 稳定性分析涉及所有的参数, 限于篇幅, 不可能也没有必要在此对其全面叙述。这里利用软件包输出的稳定性分析结果, 只探讨一个难以判断的问题: 1 岁羯羊的出栏效益究竟达到多高, 以秋季出栏 1 岁羯羊来代替出栏羯羔羊 (即秋季羯羔羊不出栏, 继续存栏) 更有利可图? 稳定性分析结果表明, 当 1 岁羯羊的出栏收益 (现为 184.99 MJ/只) 在 175.96—224.06MJ/只之间变化, 而羯羔羊的出栏收益 (现为

143.13MJ/只)和其他参数保持不变时,最优结构中仍以出栏羯羔羊可获得最大种群生产效益。当1岁羯羊的出栏收益增加39.07MJ/只(增加21%)以上,达到224.06MJ/只以上时,出栏1岁羯羊才比出栏羯羔羊收益更大。

从系统生态学观点评价一个生态系统结构功能的优劣,营养层次之间的能量转化效率是重要的指标之一。显然,在各年龄组中羔羊的牧草能量转化效率最高,因而利用牧草资源最经济、最有效。若要提高系统内的能量转换效率,调控优化放牧生态系统的结构功能,就应该在种群中存栏和秋季出栏尽可能多的羔羊。由此可见,系统的生态效率优化目标和种群生产力优化目标是不相容的,或者说,最大生产力的种群结构并不是最佳生态效率结构,仅之亦然。这恰是物理、化学领域中人们熟知的普遍原理。如果在追求尽可能多的畜产品收益的同时,兼顾到调控优化系统的结构功能,那么,即使1岁羯羊的出栏效益有较大幅度的提高,也应将羯羔羊秋季全部出栏,保证草场上不存在1岁以上的羯羊。

参数分析的计算结果表明,线性规划模型(12)的最优解是唯一的。

### 线性规划软件包SLPPA简介

本软件包在计算方法上采用单纯形法(simplex method)求解线性规划问题。但如同问题(12)一样,生态学中的许多线性规划问题,在其约束条件中存在大量平衡型(“=”)约束,以满足某种平衡要求,并且,因其不包含常数项,致使右端为0。这类线性规划问题用通常的单纯法求解时常常出现退化(degeneracy)现象和关联(tie)现象,致使单纯法迭代序列收敛很慢、或者不收敛,甚至进入循环;另外,可能选择过小的主元作除数,从而放大误差,即使采用单纯法能够获得最优解,因其误差过大也可能无法使用。为此,对通常的单纯形计算方法进行修正,指定任选微小偏差,选取尽可能大的主元,转而去寻求在指定偏差范围内的近似最优解。通常的单纯形法是一种精确型计算方法,而修正单纯形法则属于近似法。理论和实践都证明,修正单纯法(revisal simplex method)能消除退化、打开关联和循环,是促进迭代序列收敛的有效方法。由于该计算方法的理论和公式都比较复杂,有兴趣者请参看Hartley(1985)和Fletcher(1981)的专著,限于篇幅,不再赘述。

灵敏度、稳定性等参数分析的内容和格式,按着生态学问题的分析需要来确定,其数学理论基础亦可参考上述专著。

采用IBM FORTRAN 算法语言自行编制线性规划软件包SLPPA,在IBMPC系列微机或兼容机上运行。软件运行环境为:FORTRAN 2.0 编译程序,LINK 2.2 链接程序和相应的例程序库(library),以及DOS 2.0 以上版本的操作系统。除内存要求在512k以上外,硬件环境无特殊要求。程序采用交互对话方式进行人-机信息交换、功能选择。软件包由下面3个主要功能模块组成:修正单纯形法模块、参数分析模块和读、写数据文件模块。

该软件包要求的运行环境宽松,使用方便,输出信息较多;最优解的精度可根据需要指定,迭代序列收敛速度亦较快,它为了解决社会——经济——生态领域中的优化问题提供了一个有力的手段和工具。当线性规划问题(12)的参数或结构发生变化时,只须

对数据文件进行相应的修改、运行软件包,即可获得最优解及其参数分析结果。

## 参 考 文 献

- 周立, 1989, 高寒草甸生态系统非生命亚系统模拟模型及应用程序: 方案 1.0 (英文摘要)。高寒草甸生态系统国际学术讨论会文集, 科学出版社, 176—179。
- 夏武平, 1982, 高寒草甸生态系统, 甘肃人民出版社。
- 曾绍祥、王祖望、韩永才、何海菊, 1982, 高寒草甸啮齿动物、绵羊及牧草能量值季节变动的初步研究, 高寒草甸生态系统(夏武平主编), 甘肃人民出版社, 58—66。
- 董全、皮南林、许新宜、孙儒泳, 1984, 海北藏系绵羊种群结构及其出栏方案最优化的探讨, 生态学报, 4 (2): 1—12。
- 董全、皮南林、许新宜、孙儒泳, 1987, 海北藏系绵羊种群结构及其出栏方案分季最优化的探讨, 生态学报, 7 (2): 276—286。
- Anway, J.C, 1978, A mammalian consumer model for grasslands. 89—126, in Grassland simulation model. (G. S. Innis, ed.) Ecological Studies, 26. New York, Springer-Verlag.
- Fletcher, R., 1981, Practical methods of optimization. 2: Constrained optimization. Chichester, John Wiley & sons.
- Fox, K. A., 1953, A spatial equilibrium model of the livestock feed economy, U.S. *Econometrica*, 21: 547—566.
- Gass, S. I., 1985, Linear programming: methods and applications. (5th ed.) New York, McGraw-Hill.
- Hartley, R., 1985, Linear and nonlinear programming. An introduction to linear methods in mathematical programming. Chichester, Ellis Horwood.
- Hazell, P. B. R. and R. D. Norton., 1986, Mathematical programming for economic analysis in agriculture, New York, Macmillan.
- Lancaster, K., 1968, Mathematical economics, New York, Macmillan.
- Zuo kechen, Le Yanzhou, Zhang Jinxia, Wang Zaimo, Zhao Baolian, 1986, Preliminary approach to nitrogen and phosphorus exchange between soil and plants in native alpine meadow in Qinghai plateau. in Current progress in soil research in people's Republic of China. (Soil Science Society of China, ed.) Jiangsu China, Jiangsu Science and Technology Pub. House.

## STUDIES ON THE OPTIMAL STRUCTURE OF PRODUCTION FOR ALPINE PASTURELANDS

### I. THE OPTIMAL STRUCTURE OF PRODUCTION TO MAXIMIZE THE OUTPUT ENERGY OF LIVESTOCK PRODUCTS FOR THE POPULATION OF TIBETAN SHEEP

Zhou Li, Wang Qiji, Zhao Xinquan and Liu Yang

(Northwest Plateau Institute of Biology, The Chinese Academy of Sciences)

Tibetan sheep is one of main managed breeds in the livestock husbandry of Qinghai-Tibetan plateau. The production system of animal husbandry is really an open ecosystem, the production structure restricts its production function. Therefore, it is necessary to control the production structure for increasing economic and ecological-environmental benefit.

In Qinghai-Tibetan Plateau, rotation grazing has been historically performed according to geographic and climatic conditions, dividing a pastureland into the summer-autumn (warm season) and the winter-spring (cold season) grazing grassland in a year. Using the static equilibrium approach to modelling grazing processes in a year, a two-period linear programming model is constructed for rotation grazing in a year. Constraints of source include total area of grazing grassland and appropriate utilized herbage; constraints of sheep population describe equilibriums of sex-age classes in rotation state from one to another grazing grassland through culling and replacement policies. Maximizing objective function is the output of livestock products in energy. Utilized degree of herbage is limited in the range of 50% in the summer-Autumn grazing grassland according to input-output balance for nitrogen and phosphorus in soil, because herbage are growing and developing in the grazing period, thus the degeneration of grazing grasslands is prevented.

The solution of the two-period linear programming model focuses on the optimal level of production decisions that should be attained in an equilibrium state, including the optimal distribution of total area of grassland divided into two grazing lands, and the optimal size of sex-age classes in Tibetan sheep population in both cold and warm season grazing lands, and optimal policies of culling and replacement.

The two-period linear programming model is expressed as expression (12):

$$\text{Max } Z = \sum_{i=0}^8 [(BF_i^{(w)} \cdot F_i^{(w)} + BM_i^{(w)} \cdot M_i^{(w)}) + (BF_i^{(s)} \cdot F_i^{(s)} + BM_i^{(s)} \cdot M_i^{(s)})] \\ + \sum_{i=0}^8 (CF_i \cdot KF_i + CM_i \cdot KM_i)$$

subject to

$$F_i^{(s)} = SF_i^{(s)} \cdot F_i^{(w)}$$

$$M_i^{(s)} = SM_i^{(s)} \cdot M_i^{(w)}$$

$$(i = 0, 1, \dots, 8)$$

$$F_0^{(w)} = \sum_{i=2}^8 MF_i \cdot (F_i^{(s)} - KF_i) + 0.035F_0^{(w)}$$

$$M_0^{(w)} = \sum_{i=2}^8 MM_i \cdot (M_i^{(s)} - KM_i) - 0.035M_0^{(w)} \quad (12)$$

$$F_{i+1}^{(w)} = SF_i^{(w)} \cdot (F_i^{(s)} - KF_i)$$

$$M_{i+1}^{(w)} = SM_i^{(w)} \cdot (M_i^{(s)} - KM_i)$$

$$(i = 0, 1, \dots, 6)$$

$$F_8^{(w)} = SF_7^{(w)} \cdot (F_7^{(s)} - KF_7) + SF_8^{(w)} \cdot (F_8^{(s)} - KF_8)$$

$$M_8^{(w)} = SM_7^{(w)} \cdot (M_7^{(s)} - KM_7) + SM_8^{(w)} \cdot (M_8^{(s)} - KM_8)$$

$$A_8^{(w)} + A^{(s)} \leq A$$

$$\sum_{i=0}^8 (IRF_i^{(w)} \cdot F_i^{(w)} + IRM_i^{(w)} \cdot M_i^{(w)}) \leq AT^{(w)} \cdot A^{(w)}$$

$$\sum_{i=0}^8 (IRF_i^{(s)} \cdot F_i^{(s)} + IRM_i^{(s)} \cdot M_i^{(s)}) \leq AT^{(s)} \cdot A^{(s)}$$

and

$$F_i^{(s)}, M_i^{(s)}, F_i^{(w)}, M_i^{(w)}, KF_i, KM_i \geq 0$$

$$(i = 0, 1, \dots, 8)$$

where  $F_i^{(j)}$  and  $M_i^{(j)}$  denote numbers of Tibetan sheep in  $i$ th age-class ( $i = 0, 1, \dots, 8$ ) in the  $j$ th grazing grassland ( $j = w$  indicates cold season;  $j = s$  indicates warm season) for female sheep and wether, respectively;  $KF_i$  and  $KM_i$  denote numbers of slaughtering in the Autumn in  $i$ th age-class ( $i = 0, 1, \dots, 8$ ) for female sheep and wether, respectively;  $A^{(w)}$  and  $A^{(s)}$  denote area of both the cold and warm season grazing grasslands, respectively. The above symbols represent activities in processes of production, and the others indicate constant parameters or resource (A-total area of grazing grassland).

Parameters (Tab.1—4) in the model are determined in Haibei Research Station, of Alpine Meadow Ecosystem Academia Sinica.

The optimal solution of the linear programming model provides information for the optimal size of the population, as well as provides information for how to maintain the population of Tibetan sheep through appropriate culling and replacement in an equilibrium state, etc. The optimal production plan of livestock products in the pasturelands of Qinghai-Tibetan plateau, composed with the above activities, is as follows:

(1) The ratio between area of the warm and cold season grazing grasslands is 1:1.16.

(2) Culling and replacement policies are that total lamb-wethers, and part of female sheep 4-years old (44%), and total old female sheep (6-years old) are culled. The percentage of the cull to the stock before culling in the population is 28.09%, thereby the turnover period of the population is 3 years.

(3) Structures of stock for the population in both warm and cold season grazing grasslands are shown with Table 5 and 8. They are nearly identical in which the sex-age classes make up about percentage of the population; adult female 50%, and replacement female (1-year old) 14%, and female lambs 17%, thereby total female 81.45%, breeding male 2.5%, and wether-lambs 16%. Under the structures, equilibriums are attained between sheep and herbage.

(4) Grazing intensities are 2.41 sheep/ha and 1.87 sheep/ha in the warm and cold season grazing lands respectively, in a year 1.05 sheep/ha, that is less than present grazing intensity (1.4 sheep/ha).

(5) Yearly marginal value products (shadow price) are 108.40 KJ/kg dry weight of herbage and 137.338M J/ha of grassland, or 17.91g live weight/kg and 22.68 kg live weight/ha. Ecological efficiency from herbage to Tibetan sheep is 0.59%.

Using the revised simplex method of computation, the linear programming model is solved. A software package (SLPPA) with parametric analysis, solving linear programming problem, is developed. The package is written with IBM FORTRAN language and operated in IBM PC series microcomputers.

The sensitivity and stability analysis of the optimal solution are done, and the results of parametric analysis indicate that the optimal solution of the linear programming model (12) is unique.

**Key words:** Optimum structure of production; Maximum energy output of livestock products; Two-period linear programming model of static equilibrium; Alpine pasturelands.