



SGM模型牦牛子模型生长发育模块校验及应用

刘海波 BEHRENDT Karl 吴建平 杜文华 KEMP David BADGERY Warwick 宫旭胤 刘立山 金茜

Calibration, validation, and application of the yak growth and development module in the SGM yak sub-model

LIU Haibo, BEHRENDT Karl, WU Jianping, DU Wenhua, KEMP David, BADGERY Warwick, GONG Xuyin, LIU Lishan, JIN Qian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0558>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

牦牛和藏羊单牧、混牧对高寒草地星毛委陵菜营养与生殖生长权衡的影响

Effects of single and mixed grazing of yak and Tibetan sheep on the balance between vegetative and reproductive growth of *Potentilla acaulis* in alpine grassland

草业科学. 2023, 40(7): 1866 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0453>

矮生嵩草对牦牛和藏羊放牧的响应机制

Response mechanisms of *Kobresia humilis* to grazing of yaks and Tibetan sheep

草业科学. 2022, 39(6): 1129 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0440>

微气候和适度放牧对高寒草甸植物群落特征的影响

Effects of Microclimate and Moderate Grazing on the Characteristics of Alpine Meadow Plant Community

草业科学. 2022, 39(12): 2503 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0121>

棕榈粕添加水平对高原型藏羊生长发育影响

Effects of supplemental level of palm meal on the growth and development of plateau Tibetan sheep

草业科学. 2023, 40(9): 2401 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0642>

青藏高原自然资源综合观测体系构建探讨

Discussion on the construction of a comprehensive observation system of natural resources in the Qinghai-Tibet Plateau

草业科学. 2022, 39(12): 2645 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0186>

季节放牧下青藏高原高寒草甸牧草生物量空间分布特征

Effects of seasonal grazing on spatial distribution characteristics of forage biomass in an alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau

草业科学. 2022, 39(2): 318 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0490>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0558

刘海波, BEHRENDT Karl, 吴建平, 杜文华, KEMP David, BADGERY Warwick, 宫旭胤, 刘立山, 金茜. SGM 模型牦牛子模型生长发育模块校验及应用. 草业科学, 2023, 40(12): 3163-3176.

LIU H B, BEHRENDT K, WU J P, DU W H, KEMP D, BADGERY W, GONG X Y, LIU L S, JIN Q. Calibration, validation, and application of the yak growth and development module in the SGM yak sub-model. Pratacultural Science, 2023, 40(12): 3163-3176.



SGM 模型牦牛子模型生长发育模块校验及应用

刘海波¹, BEHRENDT Karl^{2,3}, 吴建平^{4,5}, 杜文华⁶, KEMP David³,
BADGERY Warwick⁷, 宫旭胤⁸, 刘立山⁸, 金茜⁸

(1. 甘肃省农业科学院农业经济与信息研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. Harper Adams University, Shropshire Newport TF10 8NB; 3. Gulbali Institute, Charles Sturt University, NSW Orange 28000; 4. 甘肃省农业科学院, 甘肃 兰州 730070; 5. 西北师范大学新农村发展研究院, 甘肃 兰州 730070; 6. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070; 7. NSW Department of Primary Industries Orange Agricultural Research Institute, NSW Orange 2800; 8. 甘肃省农业科学院畜草与绿色农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 基于前期构建的 Sustainable Grassland Model (SGM) 模型框架, 选用并改进 GRAZPLAN 动物模型和不完全小区模拟方法, 在 MATLAB 平台对 SGM 模型进行二次开发, 建立牦牛子模型生长发育模块, 以期为青藏高原可持续放牧生产体系的构建提供研究工具及决策支持。采用局部敏感度分析法, 筛选并计算敏感度系数确定牦牛子模型生长发育模块下放牧采食量和体重变化模拟中的敏感参数, 以已发表的研究数据为基础, 利用最小二乘法建立敏感参数校准模型并完成模块校准, 校准后运行模型, 得到的增重模拟结果与前人发表的研究数据对比后进行统计分析, 完成模型检验。检验后的模型以甘肃省玛曲县高寒草甸典型牦牛牧户(草地中度退化)为研究对象进行模型示范。结果表明: 经参数校验后的 SGM 牦牛子模型在模拟牦牛放牧采食量和增重方面切实可行。示范结果证明 SGM 模型能够合理地模拟粗放型生产管理下放牧压力的降低对高寒草甸牦牛放牧生产体系草地地上生物量、植物群落功能组成、家畜放牧采食量和体重变化的长期影响, 说明 SGM 模型在青藏高原高寒草甸模拟放牧压力对放牧生产体系的长期影响具有可行性。该模型采用不同的参数, 基于同一套数学公式实现对放牧牛羊生长发育的模拟, 在未来牛羊放牧系统模型开发中具有良好的应用前景, 但需要针对模拟对象的实际实施校准, 且对牦牛产奶量和放牧采食量的模拟仍需进一步开发和改进。

关键词: 农业模型; 放牧生产体系; 模拟; 青藏高原; 牦牛; 干物质采食量; 增重

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2023)12-3163-14

Calibration, validation, and application of the yak growth and development module in the SGM yak sub-model

LIU Haibo¹, BEHRENDT Karl^{2,3}, WU Jianping^{4,5}, DU Wenhua⁶, KEMP David³,
BADGERY Warwick⁷, GONG Xuyin⁸, LIU Lishan⁸, JIN Qian⁸

(1. Institute of Agricultural Economics and Information, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Harper Adams University, Newport TF10 8NB, Shropshire, United Kingdom; 3. Gulbali Institute, Charles Sturt University, Orange 28000, NSW, Australia; 4. The Institute of Rural Development, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 5. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

收稿日期: 2022-07-07 接受日期: 2022-11-26

基金项目: 甘肃省农业科学院院列博士基金项目 (2019GAAS30); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201503134); 甘肃省 2022 年度重点人才项目 (2022RCXM018); 西藏重大专项 (XZ202101ZD003N)

第一作者: 刘海波 (1989-), 男, 甘肃泾川人, 副研究员, 博士, 主要从事放牧管理方面研究。E-mail: liuhb@gsagr.ac.cn

通信作者: 吴建平 (1960-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士, 主要从事动物遗传育种、草食畜生产系统、草地生态畜牧业研究。
E-mail: wujp@gsagr.ac.cn

6. Pratacultural College, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China; 7. NSW Department of Primary Industries Agricultural Research Institute, Orange 28000, NSW, Australia; 8. Institute of Animal Husbandry, Pasture and Green Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Based on the Sustainable Grassland Model (SGM) model framework established previously, this study constructed a yak growth and development module in the SGM yak sub-model. This was conducted to provide research tools and decision-making support for the construction of a sustainable grazing production system on the Qinghai-Xizang Plateau. The modified GRAZPLAN animal model and the partial paddock simulation method were used for the secondary development of the SGM model on the MATLAB platform. Local sensitivity analysis was applied, and sensitive parameters for the simulation of grazing yak dry matter intake (DMI) and live weight change were selected by calculating the sensitivity coefficient (SC). Based on data published by others, the least squares method was used to construct a calibration model to fulfill the module calibration. Liveweight data from the published literature were used to statistically compare the difference between simulation data and observed data to conduct module validation. To demonstrate the application of the model, a typical yak farm with moderately degraded pastures was analyzed based on data collected in the alpine meadow area of Maqu County. The results showed that, after calibration and validation, the yak growth and development module in the SGM yak sub-model was able to mimic grazing yak DMI and live weight gain. Results from the application demonstration showed that the SGM model was able to mimic the effects of decreased stocking densities on grassland aboveground biomass, pasture composition, grazing DMI, and live weight changes in the alpine meadow yak production system under traditional management over longer timescales. This indicates that the SGM model is suitable for simulating the effects of stocking density on the grazing production system in alpine areas on the Qinghai-Xizang Plateau. This simulation method has strong potential for the development of a future grazing system model because it has the same functions as the two different sets of parameters for sheep and cattle. However, calibration needs to be conducted based on the simulation object, and further revision and development of yak lactation and grazing DMI are required.

Keywords: agricultural modelling; grazing production system; simulation; Qinghai-Xizang Plateau; yak; dry matter intake; live weight gain

Corresponding author: WU Jianping E-mail: wujp@gsagr.ac.cn

青藏高原承载着目前世界面积最大、平均海拔最高的放牧生产体系,其总面积的70%被用于放牧利用^[1]。青藏高原生态环境脆弱且对气候变化敏感^[2],是亚洲主要河流的给水水源,拥有巨大的碳汇,显著影响并调节亚洲季风系统的强度,是世界气候的调节器^[3]。近年来由于气候变暖、超载过牧等因素,青藏高原草地大面积出现不同程度的退化^[4],而超载过牧也被认为是引起草地退化的主要原因^[3]。家畜生产管理是解决可持续供养世界人口问题的重要途径^[5],其对于青藏高原这种传统粗放型的放牧生产体系尤为重要^[6]。而牦牛作为青藏高原放牧生产体系重要的藏系家畜,可持续牦牛放牧生产体系的构建是青藏高原可持续发展的关键^[7]。

可持续放牧生产体系的构建,单纯依靠实地试验研究是不够的,还需要利用模型这一研究复杂系统最为有效的工具^[7-8]。农业系统模型在半个多世

纪的发展中取得了很大成就,目前较为成熟的农业系统模型主要是作物系统模型,而放牧系统模型仍处于发展阶段^[9]。放牧家畜生长发育模拟中有关放牧干物质采食量(以下简称为采食量)和体重变化的模拟,一直是放牧系统模型研发的难点和热点^[10]。目前世界主流的农业系统模型均由西方国家研发,我国在该领域尚处于起步阶段,主要涉及作物栽培模型及决策优化系统^[7],在放牧系统模型的研发方面尤为薄弱^[11],且工作主要集中在简易决策优化模型的建立、国外成熟放牧系统模型引入及参数化^[7]。2017年建立的 Sustainable Grassland Model (SGM) 模型成为我国首个针对青藏高原高寒草甸藏羊生产体系的生物经济学研究模型,是我国在放牧系统模型方面的首次尝试^[7]。由于其研发周期较其他主流放牧系统模型短,SGM模型首版源代码仅针对藏羊生产体系进行了校验,而牦牛子模型的研发对放牧

牦牛采食量和增重的模拟效果较差, 仍需进行二次开发。本研究基于前期研究成果^[7], 面向放牧系统模型的研发热点, 重点介绍 SGM 模型二次开发中牦牛子模型生长发育模块下放牧采食量和增重模拟的校验, 并以甘肃省玛曲县高寒草甸典型牦牛牧户为研究对象, 模拟传统粗放型生产管理下不同放牧压力对高寒草甸牦牛放牧生产体系的影响, 以期后续放牧系统模型有关放牧采食量和增重模拟的研发提供新思路和研究基础。

1 材料与方 法

1.1 SGM 模型概述

SGM 模型的研发目的是为了模拟放牧生产体系在不同气候条件下对不同生产管理措施的长期动态响应, 模型模拟结果可被用于决策制定和科研试验设计 (图 1)^[7]。SGM 模型研发初期以青藏高原高寒草甸藏羊生产体系为研究对象^[7], 源代码在 MATLAB 平台构架, 后被继续开发, 形成了 *StageTHREE Sustainable Grasslands Model*^[12], 并在蒙古高原放牧生产体系得到应用^[13]。SGM 模型模拟尺度是牧户或牧场, 包含土壤侵蚀和养分变化、草地植物群落

结构及地上生物量、家畜生长发育和经济效益分析等 5 个模块^[7], 其中草地植物群落结构、土壤侵蚀和养分变化的模拟以年为时间单元, 其余模拟均以日为时间单元。SGM 模型的具体构架、公式选用、参数设计、模型输入和初步校验详见参考文献 [7], 本研究主要展示牦牛生长发育模块的构建、放牧采食量和增重模拟的改进方法。

1.2 牦牛生长发育模块建立

牦牛生长发育模块 (图 2) 以日为时间单元, 畜群结构的模拟是将其分为母牛、公牛 (包含小于 1 岁的犊牛) 和阉牛 3 类模拟对象, 每类模拟对象又可以分为不同的年龄段, 用户设定的生产节律作为模型输入后, 3 类模拟对象的体重、母畜的繁殖率和胚胎重等日模拟数据可计入其对应的年龄段, 每个年龄段家畜数量是现存数量、繁殖、购买、死亡等的合计数值。

SGM 模型草畜交互界面的核心是改进的不完全小区 (Partial paddock) 模拟方法, 该方法将每个模拟地块草地植物群落结构在模型中划分为喜食和非喜食两个小区 (即功能组), 且改进后, 小区基盖度可随着气候和管理进行改变, 该模拟方法结合经

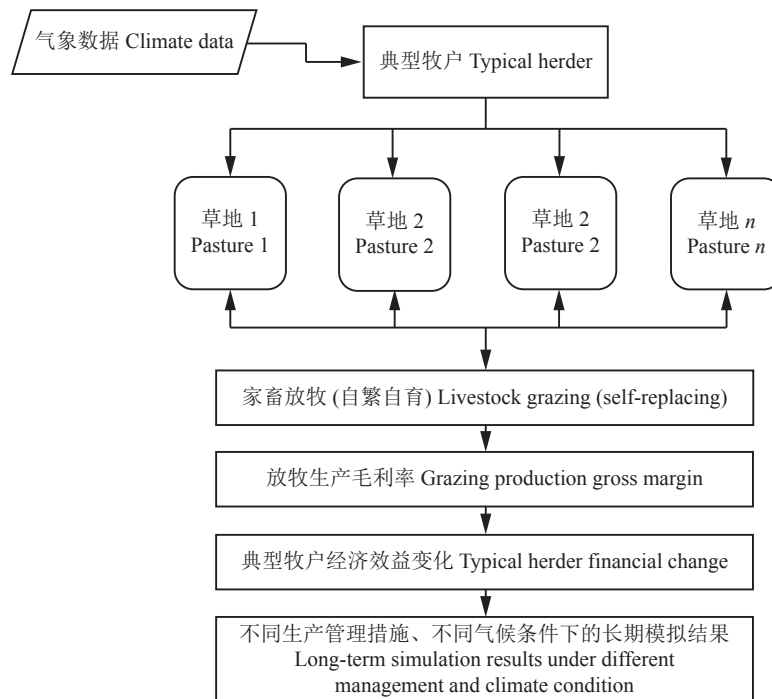


图 1 SGM 模型构架示意图

Figure 1 Diagram showing the conceptual framework of the Sustainable Grassland Model

箭头表示模型数据流方向, 草地 n 表示同一模拟下可以设置多块模拟草地或地块。

Arrows represent the directions of data flow, and pasture n represents the multiple pastures or land available for one simulation.

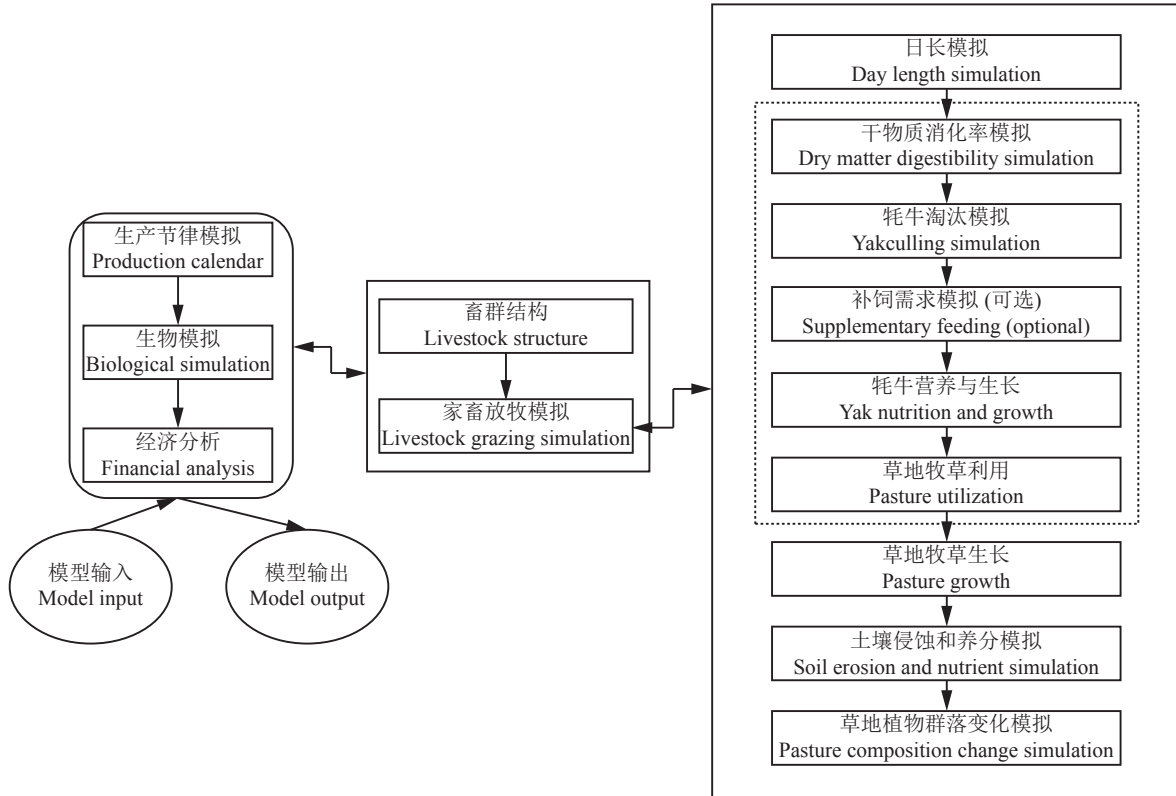


图 2 SGM 模型 MATLAB 模拟运行示意图

Figure 2 A diagrammatic outline of SGM model simulation execution in MATLAB

箭头表示软件运行时的数据流方向，其中双向箭头表示产生的数据会在下一个函数或者模块中被调用；长方形标注文字的文本框代表自主编程的 MATLAB 函数；虚线框内是牦牛生长发育模块部分。

The arrows represent the directions of data flow during execution; double arrows represent data produced and used in the coming functions or modules; rectangular textboxes with texts represent the functions built in MATLAB; dotted boxes represent the yak growth and development module.

验型草地牧草生长模型可简单高效模拟地上生物量变化，也可实现草地植物群落功能组结构变化的动态模拟，体现了“状态与过渡模型”的核心观点，已在退化栽培草地的改良试验中被证实其可行性^[7]。为了模拟家畜放牧的选择性采食、放牧采食量及代谢能摄入，基于“瘤胃容积/代谢化学反馈”理论，本研究选用并改进 Freer 等^[14]在 GRAZPLAN 动物模型中的模拟方法。其中家畜放牧采食后的干物质消化率 (dry matter digestibility, DMD) 数值，参考 GRAZPLAN 原版，仍将地上生物量划分为 6 个干物质消化率组，DMD 数值由 0.8 向 0.3 依次递减。但 SGM 模型在两个小区分别设立 6 个消化率组，放牧家畜在两小区间按照 DMD 由高到低的顺序自由采食 (两个小区的采食概率相同)，直至其最大采食量 (potential intake, PI) 得到满足。为更准确地模拟家畜放牧采食后的 DMD 值进而模拟家畜代谢能摄入并联动放牧采食量的模拟，本研究引入了用户设定的 DMD 值，用经验型公式模拟每个小区 6 个消化率组分的

地上生物量比例 (图 3)，具体如下：

$$G_{dp} = \{x^5 \quad 5x^4(1-x) \quad 10x^3(1-x)^2 \quad 10x^2(1-x)^3 \quad 5x(1-x)^4 \quad (1-x)^5\} \quad (1)$$

式中： $x = \frac{DMD_{nom} - 0.3}{0.8 - 0.3}$ ， DMD_{nom} 是用户设定的干物质消化率数值， G_{dp} 是小区内 6 个消化率组内的地上生物量比例。

牦牛营养与生长模拟 (图 2) 中采用的数学公式多来自于 Freer 等^[14]提出的 GRAZPLAN 动物模型 (以下简称为原版)，后被开发为澳大利亚反刍动物营养标准 (以下简称为 CSIRO 标准^[15])。主要模拟变量及其在 MATLAB 中的数据流详如图 4 所示。SGM 模型通过代谢能摄入和支出 (即主要模拟变量)，结合蛋白平衡，模拟家畜体重变化。

1.3 牦牛生长发育模块的改进

牦牛生长发育模块的改进主要体现在两方面，第一是牦牛淘汰模块的改进，首版模型的方法是畜

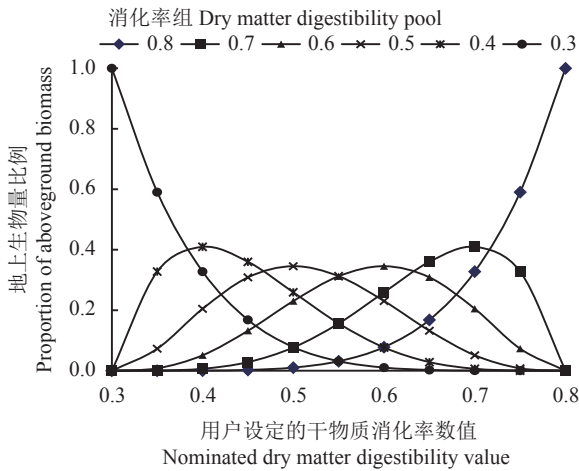


图 3 6 个消化率组分间的地上生物量比例与用户设定的干物质消化率数值间的关系

Figure 3 The proportion of grassland aboveground biomass allocated to each of the six dry matter digestibility pools in relation to the nominated mean dry matter digestibility of the grassland functional groups

群总数乘以淘汰率再平均分配到各年龄段, 这样的方法不能体现生产实际, 且模型运行中易因畜群数量过高或过低产生错误。为此, 本研究引入不同年龄段家畜卖出比例及目标畜群数量两个新参数, 模型可根据用户设定的这两大参数, 自动“淘汰”多余家畜; 第二是牦牛营养与生长模拟的改进, 这也是模块研发和校验的重点, 受篇幅限制, 这里仅给出修订公式, 修订公式变量与参数命名均与 Freer 等^[14]的模型手册相同, 未列出的公式可参考原版^[14]。

采食量模拟需要计算 PI 和相对采食量 (relative intake, RI), 但原版 PI 公式设计存在漏洞, 由于 PI

计算需要预先求得温度因子 (temperature factor, TF), 即需要计算出家畜每日下临界温度 (lower critical temperature, T_{lc}), 但原版中有关 T_{lc} 的计算需要已知代谢能摄入量 (metabolizable energy intake, MEI), 但 MEI 的计算又需要已知 T_{lc} (详见 Freer 等^[14] 公式 97 $T_{lc,h}$ 及公式 98 MEI_{total})。为此, 本研究加入一个临时估测 PI 进行改进 (provisional estimation for potential intake, PI_p)。

$$PI_p = C_{I1} \times SRW \times Z(C_{I2} - Z)CF \times YF \times LF. \quad (2)$$

式中: C_{I1} 和 C_{I2} 是参数, PI_p 是临时估测最大采食量, SRW 是家畜标准参考体重, Z 是相对体重比, CF 是体况指数, YF 是瘤胃发育指数, LF 是泌乳指数。 PI_p 可被用于计算 MEI 继而计算 T_{lc} 从而得到 TF 并最终求得 PI 。

幼畜日粮中的摄乳比例 (Proportion of the diet as milk, ϕ_{milk}) 的模拟改进如下 (详见 Freer 等^[14] 公式 4)。

$$\phi_{milk} = \min(0.99, meanMP_2/MEI). \quad (3)$$

式中: MEI 是代谢能摄入量, $meanMP_2$ 是母牛不同年龄段实际泌乳量的加权平均值。

$$meanMP_2 = \frac{\sum_i^n (MP_{2i} \times FN_i)}{\sum_i^n FN_i}. \quad (4)$$

式中: MP_{2i} 是母牛不同年龄段的实际泌乳量 (详见 Freer 等^[14] 公式 71), FN_i 是母牛不同年龄段数量。

基于前人研究^[16], 牦牛体表面积 (m^2) 计算公式

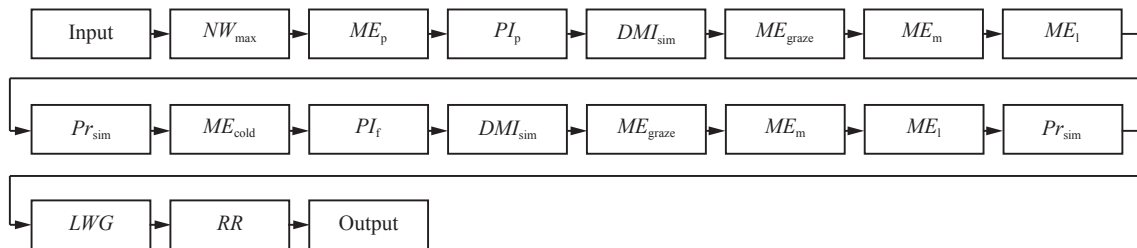


图 4 牦牛营养与生长模拟的 MATLAB 函数编程流程图

Figure 4 A flow chart demonstrating the execution sequence in yak nutrition and growth simulation in MATLAB function

箭头表示软件运行数据流方向, 其中 $Input$ 是模型输入, NW_{max} 是家畜标准体重的上限, ME_p 是母畜妊娠代谢能需求, PI_p 是临时估测最大采食量, DMI_{sim} 是放牧采食量模拟, ME_{graze} 是放牧代谢能需求, ME_m 是维持代谢能需求, ME_l 是母畜泌乳所需代谢能, Pr_{sim} 是蛋白平衡模拟, ME_{cold} 是御寒代谢能需求, PI_f 是最终最大采食量, LWG 是体重变化, RR 是母畜繁殖率, $Output$ 是模型输出。

Arrows represent the directions of the execution, in which $Input$ is the simulation input required. NW_{max} is the upper limit of normal weight in kg, ME_p is metabolizable energy used for pregnancy, and PI_p is provisional estimation for potential intake. DMI_{sim} is daily grazing dry matter intake simulation, ME_{graze} is metabolizable energy used for grazing, and ME_m is metabolizable energy used for maintenance. ME_l is metabolizable energy used for lactation, Pr_{sim} is protein balance simulation, and ME_{cold} is the metabolizable energy cost of chilling. PI_f is the final estimation for potential intake, LWG is live weight change, RR is the reproductive rate of females, and $Output$ is the simulation output produced.

修订如下 (其余详见 Freer 等^[14] 公式 86)。

$$SA = 0.1814 \times W^{0.516} \tag{5}$$

式中: SA 是家畜体表面积, W 是家畜体重。

原版^[14] 中家畜体重变化的能量需求计算存在错误, 现改进如下 (原版公式详见 Freer 等^[14] 公式 117),

$$Wt = Wy + C_{G18} \frac{NE_g}{EVG} \tag{6}$$

式中: C_{G18} 是参数, Wt 是当前模拟日体重, Wy 是当前模拟昨日体重, NE_g 是增重净能, EVG 是空腹体重变化所需能量。

1.4 牦牛生长发育模块校准检验方法

模型的校准需要比较模型模拟结果与实际情况的差距, 并进行参数调整, 直至差距在合理范围之内。由于原版^[14] 是一个半机理半经验模型, 复杂度不高, 且 SGM 模型的五大模块相对独立, 因此本研究中模型参数的校准采用局部敏感度分析法, 具有易操作、快速、建模难度低等优点, 通过计算敏感度系数 (sensitivity coefficient, SC)^[17], 筛选出敏感度系数数值高的模型参数作为敏感参数, 进行下一步校准。

$$SC = \left| \frac{\Delta output/output}{\Delta parameter/parameter} \right| \tag{6}$$

式中: $\Delta parameter$ 是模型参数的变化量, $parameter$ 是原始参数, $\Delta output$ 是模型结果随参数改变后的变化量, $output$ 是原始参数下的模拟数值。牦牛生长发育模块中其他参数的校准, 包括牦牛标准参考体重 (SRW)、标准初生重 (standard birth weight, SBW)、牦牛标准体重 (normal weight, NW)、牦牛维持代谢

能需求 (metabolizable energy used for maintenance, ME_m) 和牦牛产奶量模拟等详见前期研究^[7]。本研究主要进行放牧采食量和增重的校验。基于前期研究^[7], C_{R4} 、 C_{G8} 和 C_{G9} 3 个参数被选入进行敏感度分析 (表 1)。

敏感参数的校准方法采用最小二乘法^[17], 残差平方和的计算如下:

$$RSS = \sum_i^n \left[\ln \left(\frac{y_i}{x_i} \right) \right]^2 \tag{7}$$

式中: y_i 是用于模型校准的数据, x_i 是模型模拟数据, n 是数据量, RSS 是残差平方和。在 MATLAB 平台将模块拆解并建立参数校准模型, 设定敏感参数上下限、通过优化求解, 求出 RSS 最小值对应的敏感参数值, 进入模型试运行、调整及检验环节。

放牧家畜体重变化模拟不准确是目前家畜生长发育模型的主要缺点之一^[18]。因此获得初步校准结果后, 需要利用新参数对模型进行试运行并不断检查微调, 无误后利用牦牛平均日增重 (average daily gain, ADG) 模拟数据和检验数据的均方根误差, 检验校准效果^[19], 具体如下:

$$RMSE = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}} \tag{8}$$

$$RMSE_{95\%} = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_i [t_{(n-2)95\%} \times S_e(i)]^2}{n}} \tag{9}$$

式中: $RMSE$ 是均方根误差, O_i 是检验数据, P_i 是模拟数据, \bar{O} 是检验数据的均值, n 是检验数据的数

表 1 敏感参数及敏感度分析及结果

Table 1 Candidates for parameter sensitivity analysis and results of the statistic sensitivity coefficient

参数及单位 Parameter and unit	参数含义 Parameter description	肉牛参数 <i>Bos taurus</i> parameter	敏感度系数 Sensitivity coefficient		
			+ 10%	+ 20%	+ 40%
$C_{R4}/(\text{head} \cdot \text{kg}^{-1})$	放牧压: 地上现存量 Stocking density: herbage availability	0.000 78	0.48	0.46	0.42
$C_{G8}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	EVG: 参考值 EVG: reference value	27	1.96	1.96	1.96
$C_{G9}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	EVG: 成年参考值(L = 1, BC = 1) EVG: EVG range with maturity at L = 1 and BC = 1	20.3	0.88	0.88	0.89

EVG 是空腹体重变化所需能量, L 是饲喂水平, BC 是体况指数, + 10% 表示敏感参数按照原始数值增加 10% 以后求得的敏感度系数, + 20% 和 + 40% 表示敏感参数按照原始数值增加 20% 和 40% 以后求得的敏感度系数。

EVG is the energy content in empty body weight change, L is the feeding level, and BC is the body condition score. + 10% represents the sensitivity coefficients calculated as the absolute values of the ratio of + 10% change in the simulation results (output of the model) to + 10% change in parameter. + 20% or + 40% represents the sensitivity coefficients calculated as the absolute values of the ratio of + 20% or + 40% change in the simulation results (output of the model) to + 20% or 40% change in parameter.

量, $t_{(n-2)95\%}$ 是 95% 置信区间下, 自由度为 $n-2$ 的两尾 t 分布的分位数, $S_e(i)$ 是标准误。RMSE 数值小于 $RMSE_{95\%}$ 数值, 说明模拟数据在检验数据 95% 置信区间之内即模拟结果合理。

1.5 模型数据库构建

1.5.1 模型基础数据库

于 2010—2015 年在甘肃省甘南藏族自治州玛曲县欧拉乡选取具有代表性的 5 户牧户作为高寒草甸试验户, 收集模型基础数据。试验地位于青藏高原东北部 ($101^{\circ}53'17''$ E, $33^{\circ}52'02''$ N)。平均海拔 3 650 m, 年均温 1.1°C , 极端低温 -29.6°C , 无绝对无霜期, 年日照时长 2 583.9 h, 辐射 $33.0\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$, 平均降水量 615.5 mm, 蒸发量 1 353.4 mm, 属于高寒阴湿高原大陆性季风气候。植被类型为高寒草甸, 优势牧草主要有莎草科线叶嵩草 (*Kobresia capillifolia*)、矮生嵩草 (*K. humilis*)、矮蔗草 (*Scirpus pumilus*) 以及禾本科的异针茅 (*Stipa aliena*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、匍匐翦股颖 (*Agrostis stolonifera*)、羊茅 (*Festuca ovina*)、波伐早熟禾 (*Poa poophagorum*) 等。牧草一般于 5 月上旬返青, 9 月中旬枯黄, 绿草期约 120 d, 枯草期长达 240 d。家畜转场时间为 5 月底由冬季放牧场转入夏季放牧场, 10 月底再转入冬季放牧场。

SGM 模型中的气候数据以玛曲县日气象数据为基础, 包括每日最高气温、最低气温、平均气温、平均风速、日均降水量和相对湿度等^[3]。利用围笼并配合样方法、针刺法, 按月监测草地牧草生长、植被组成和盖度等数据^[3]。按月采样监测土壤水分数据, 每年测定一次土壤理化性质和常规养分数据^[7]。

每月利用手拔法采集天然草地混合草样, 对草样区分功能组后, 利用尼龙袋法测定消化率数据^[7], 数据加权平均后即为用户设定的干物质消化率数值 (即 DMD_{nom})。每月进行入户访谈, 收集牧户生产节律数据和经济数据^[7]。

1.5.2 模型校验数据库

通过文献调研, 以甘肃农业大学“高原草地畜牧业专题数据库”牦牛畜种数据库为基础, 构建模型研发的校验数据库 (表 2、表 3)。校验数据库构建的原则: 1) 研究数据涵盖牦牛全年龄组, 体重数据以 20 世纪 80 到 90 年代数据为准; 2) 能量评价指标以代谢能为主; 3) 放牧试验为主, 舍饲试验为辅, 研究数据涵盖采食量、日粮能量浓度及体重变化。经过筛选, Ding 等^[20] 的研究数据被用于牦牛放牧采食量模拟的校准数据。由于目前没有放牧牦牛增重的适宜校准数据, Dong 等^[21] 的舍饲牦牛增重试验数据被用于牦牛增重的校准数据。参数校准后, 利用杨俊等^[22] 的研究数据作为检验数据, 同时配合模拟数据, 进行统计分析, 检验模拟结果的合理性。

1.6 示范模拟

基于模型数据库, 以前期收集的 5 户试验户各类数据为主, 结合专家座谈、文献调研等方法, 在 SGM 模型中建立高寒草甸区典型牦牛牧户 (中度退化草地) 的模型输入数据集^[7], 主要包含地理信息、地形信息、土壤理化性质及土壤含水量、生产节律、草地、家畜等 5 个方面。其中, 有关草地植物群落结构中喜食与不喜食的划分, 依据前期在 5 户试验户放牧草地按月样方监测收集到的牧草样品, 在室内进行功能组划分, 分为禾草、莎草、杂类草 (非毒

表 2 牦牛生长发育模块放牧采食量模拟的参数校准数据

Table 2 Data for parameter calibration for grazing yak dry matter intake simulation for the yak growth and development module

日期 Date/d	日龄 Days after birth/d	采食量 DMI/ ($\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$)	代谢能浓度 ME content/ ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	代谢能摄入 MEI/ [$\text{MJ}\cdot(\text{head}\cdot\text{d})^{-1}$]	体重 Live weight/kg	地上生物量比例* Green biomass/total biomass/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)*	放牧压力* SD/ ($\text{head}\cdot\text{hm}^{-2}$)*	坡度* Slope/ °*
227	2 722	6.7	10.4	70.1	253	248/248	5	0
349	2 844	5.7	3.4	19.4	254	0/208	5	0
135	2 995	2.4	12.8	30.6	187	67.8/158.2	5	0
288	3 148	7.1	3.8	27.1	243	0/351	5	0

Date 是一年 1 到 365 天内的某一天, 用于模型时间模拟, * 表示因原文中未有数据表述而做出的合理假设。

Date is the day of the year used for time simulation, DMI is dry matter intake, ME is the metabolizable energy, MEI is the metabolizable energy intake, SD is the stocking density, and * represents assumptions made owing to the lack of information in the initial paper, which are the inputs required in the current module calibration.

表3 牦牛生长发育模块体重变化模拟的参数校准数据

Table 3 Data for parameter calibration for the yak liveweight change simulation for the yak growth and development module

年龄 Age/year	代谢能浓度 Metabolizable energy content/(MJ·kg ⁻¹)	采食量 Dry matter intake/ [kg·(head·d) ⁻¹]	育肥前体重 Live weight starter/kg	育肥后体重 Live weight finisher/kg	平均日增重 Average daily gain/(g·d ⁻¹)
3	10.26	3.48	118.00	140.60	452.00
3	8.44	2.51	117.50	134.20	334.00
2	9.67	2.28	109.50	124.60	302.00
2	8.32	2.03	110.40	124.20	276.00
2	8.00	1.54	110.90	122.60	234.00

草)和毒草4类,为简化输入,以毒草类为非喜食,其余3类为喜食,以5户试验户牧草样品的风干生物量和样方法测得的盖度数据为基础,确定典型牦牛牧户草地植物群落结构及地上生物量模拟的模型输入^[7]。本研究主要模型输入总结如表4所列,全部模型输入详见文献[7]附录B。本研究不涉及经济效益分析模块,模拟示范所用的牦牛生长发育模块的校验后参数详如表5所列,模块其余参数详见文献[7]附录A。本研究示范模拟中有关土壤侵蚀和养分变化、草地植物群落结构、地上生物量等模块的构建和校验详见文献[7]。模拟的气象数据以玛曲县2010年日气象数据为准,进行20年重复的静态模拟。

基于前期研究成果,减畜或降低放牧压力是实现高寒草甸可持续发展的重中之重,且模拟区域典型牧户的适宜全年放牧率是1.30 DSE·hm⁻²^[7]。本研究示范模拟部分,分别模拟在传统粗放型生产管理及牦牛放牧压力降低及全年低放牧压(约0.26 head·hm⁻²,按照1头牦牛约为5个羊单位粗略计算)对高寒草甸牦牛放牧生产体系草地地上生物量、植物群落功能组结构、家畜放牧采食量和体重变化的长期影响。

2 结果

2.1 模型校准及检验结果

经过校准、模型试运行及检查微调系统无误后,最终确定并用于本研究中示范模拟的牦牛生长发育模块 C_{R4} 、 C_{G8} 和 C_{G9} 等参数最终数值分别为0.000 78 head·kg⁻¹、27 MJ·kg⁻¹和20.3 MJ·kg⁻¹。其中牦牛 C_{R4} 参数数值与肉牛及瘤牛相同;牦牛 C_{G8} 参数数值约为肉牛参数数值的53%,瘤牛参数数值的62%;牦牛 C_{G9} 参数数值约为肉牛参数数值的148%,瘤牛参

表4 典型牦牛牧户基础信息输入

Table 4 General information and inputs for a typical yak farm

输入 Input	冬季放牧场 Winter pasture	夏季放牧场 Summer pasture
草地面积 Pasture area/hm ²	133	213
轮牧制度或利用时间 Rotation management/d	215	150
草地植物群落结构(喜食/非喜食) Pasture composition (desirable/undesirable)	0.3/0.7	0.4/0.6
牦牛初期数量 Yak number initial/head		123
产犊日期 Calving date		60
出栏日期 Selling date		280
标准参考体重 Standard reference weight/kg		300
初生重 Birth weight/kg		15

Date是一年1到365天内的某一天,用于模型时间模拟。

Date is the day of the year used for time simulation.

数数值的182%。结合前期研究结果,最终确定了SGM牦牛子模型生长发育模块敏感参数数值(表5)。

根据杨俊等^[22]研究数据计算平均日增重作为模型的检验数据,计算根均方根误差,进行牦牛体重模拟的检验,结果表明 $RMSE = 9.14$, $RMSE_{95\%} = 203.15$, $RMSE$ 小于 $RMSE_{95\%}$ (表6),说明平均日增重模拟数据在检验数据95%置信区间之内,模拟结果符合检验要求。

2.2 示范模拟结果

在传统粗放型生产管理下,当模型模拟放牧压逐渐下降时(图5D),冬季和夏季放牧场草地地上生物量呈现升高的趋势,冬季放牧场草地地上生物量整体低于夏季放牧场(图5A);随着放牧压降低,草地植物群落功能组结构变化表现为冬、夏季放牧场非喜食比例先升高再逐渐稳定,喜食比例先降低后

表 5 牦牛生长发育模块校验后参数数值及比较 (校准参数已用于本研究示范模拟)
Table 5 Demonstration and comparison of calibrated and validated parameters for the yak growth and development module used in the model demonstration

参数及单位 Parameter and unit	参数含义 Parameter description	肉牛参数数值 <i>Bos taurus</i> parameter	瘤牛参数数值 <i>Bos indicus</i> parameter	牦牛参数数值 <i>Bos gruniens</i> parameter value adopted	校准方法 Calibration method	参考文献 Reference
$C_{N1}/(\text{kg}^{0.27} \cdot \text{d}^{-1})^*$	生长速率常数 Growth rate constant	0.011 5	0.011 5	0.004 1	LSM	[7]
$C_{M2}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-0.75})^*$	基础代谢: 代谢体重 Basal metabolism: metabolic weight	0.36	0.31	0.37	LSM	[7]
$C_{R4}/(\text{head} \cdot \text{kg}^{-1})$	放牧压: 地上现存量 Stocking density: herbage availability	0.000 78	0.000 78	0.000 78	LSM	-
$C_{G8}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	EVG: 参考值 EVG: reference value	27	23.2	14.3	LSM	-
$C_{G9}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	EVG: 成年参考值(L = 1, BC = 1) EVG: EVG range with maturity at L = 1 and BC = 1	20.3	16.5	30	LSM	-
$C_{L0,1}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-0.75})^*$	泌乳峰值标量(带犊一头) Peak yield scalar (suckling for one calf)	0.375	0.375	0.019 7	LSM	[7]
C_{L2}/d^*	泌乳高峰日 Peak time	30	30	83.31	LSM	[7]
$C_{L3}/^*$	带犊的泌乳曲线形状标量 Shape scalar with one calf	0.6	0.6	2.029	LSM	[7]
$C_{L6}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})^*$	乳能量浓度 Milk energy content	3.1	3.1	3.8	文献调研 Literature review	[7]

EVG是空腹体重变化所需能量, L是饲喂水平, BC是体况指数, LSM代表最小二乘法, *表示前期已有校准结果, 详见参考文献[7]。

EVG is the energy content in empty body weight change. L is the feeding level, BC is the body condition score, LSM represents the least squares method, and * represents the calibration results from a previous report. See reference [7] for a detailed description.

表 6 牦牛生长发育模块检验数据及结果
Table 6 Validation data and results for the yak growth and development module

处理 Treatment	检验平均日增重数据 ADG-V/($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)	标准误 SE	模拟平均日增重数据 ADG-S/($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)
低能 Low energy	0.12	0.03	0.133 61
中能 Medium energy	0.25	0.07	0.233 62
高能 High energy	0.20	0.05	0.221 22
RMSE		9.14	
RMSE _{95%}		203.15	

ADG-V is the average daily gain used for validation, and ADG-S is the average daily gain from the simulation.

稳定, 且随着放牧压力降低, 夏季放牧场非喜食比例有下降趋势, 喜食比例有提高趋势 (图 5B); 冬季放牧场水土流失量高于夏季放牧场, 且有降低趋势, 夏季放牧场水土流失在第 2 年后风险较小 (图 5C); 牦牛放牧采食量 (以 3 岁母牦牛为例) 的最大值随着放牧压降低而下降但最小值相对稳定 (图 5E); 牦牛

体重 (以 3 岁母牦牛为例) 随着放牧压力下降呈现增加趋势 (图 5F)。

典型牦牛牧户长期低放牧压的模拟中 (图 6D, 放牧压维持在 $0.25 \text{ head} \cdot \text{hm}^{-2}$), 冬季放牧场草地上生物量仍然整体低于夏季放牧场, 但冬、夏季放牧场最低生物量差值较高放牧压下 (图 6A) 降低; 长期低放牧压下, 夏季放牧场非喜食比例有下降趋势, 喜食比例有提高趋势, 但冬季放牧场非喜食比例仍然处于增加趋势而喜食比例处于下降趋势; 长期低放牧压管理夏季放牧场水土流失量少, 风险较小; 低放牧压下, 牦牛放牧采食量 (以 3 岁母牦牛为例) 在第 3 年以后呈现稳定趋势; 牦牛体重 (以 3 岁母牦牛为例) 最小值在传统粗放型经营长期低放牧压下, 呈现先增加后平稳的变化趋势。示范模拟中假设的牦牛适宜的全年放牧压 ($0.26 \text{ head} \cdot \text{hm}^{-2}$) 未能得到验证, 存在季节性差异, 表现在 $0.26 \text{ head} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的全年放牧压促进夏季放牧场草地植物群落功能组结构优化并提高夏季放牧场地上生物量, 也使得冬季放牧场地上生物量有一定程度增加, 但冬季放牧场草地植物群落功能组结构未能得

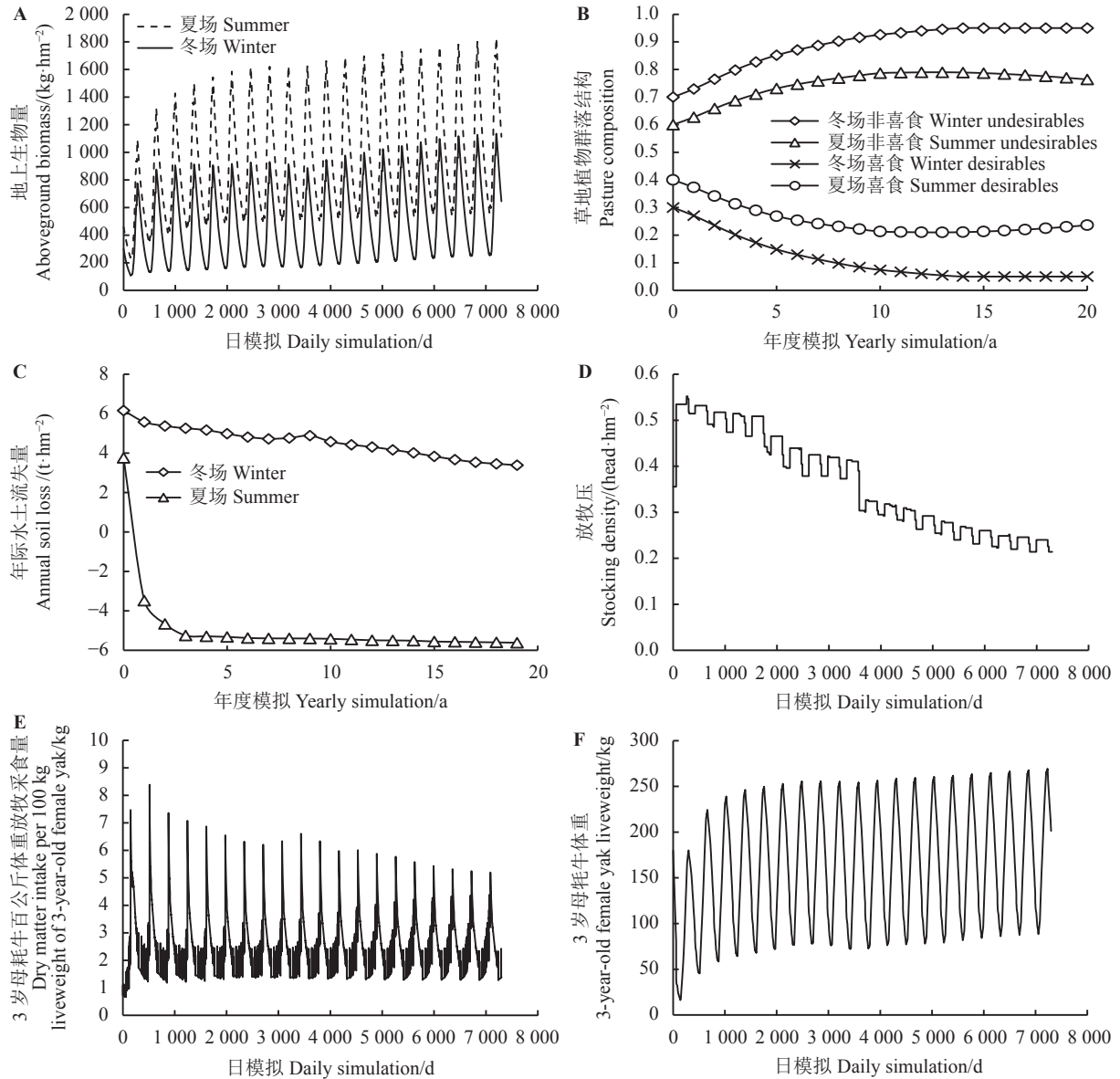


图 5 放牧压下降对高寒草甸典型牦牛牧户放牧生产体系的长期影响

Figure 5 Long-term effects of decreased stocking density on the production system of a typical yak farm in the alpine meadow region

到优化 (图 5B、图 6B)。

3 讨论

采食量测定乃至模拟目前仍然是放牧家畜营养和家畜系统模型领域的瓶颈问题^[10], 并且放牧家畜采食量模型数量较少^[23]。本研究表明, 参数校验后, SGM 牦牛子模型模拟牦牛放牧采食量和增重可行。牦牛存在特殊的放牧采食行为, 成年牦牛的舌头平均比肉牛短 4 cm, 且放牧采食中依赖口唇而非舌头, 类似于绵羊, 可在草地高度较低的草地上进行放牧采食^[24]。原版模型中绵羊的参数要高于肉

牛, 可能反映出绵羊的选择性采食习性表现较强。因此本研究校准前假设参数 C_{R4} 校准数据接近原版绵羊的数值, 结果未能验证假设的合理性, C_{R4} 参数最小二乘法得出数值为 0.000 12, 远低于绵羊数值, 且在模型进行试运行中产生错误, 可能是由于校准数据量较少及原版模型中 C_{R4} 参数生物学定义模糊的原因。且目前对于放牧牦牛采食习性及其采食量的研究仍有不少争议, 有报道称成年母牦牛 1 min 的采食速度在 40.3~44.6 口, 与肉羊的采食速度类似^[25], 但也有报道认为牦牛采食速度与肉牛无差距^[26], 在每分钟 74~88 口的范围内^[27], 且可能存在

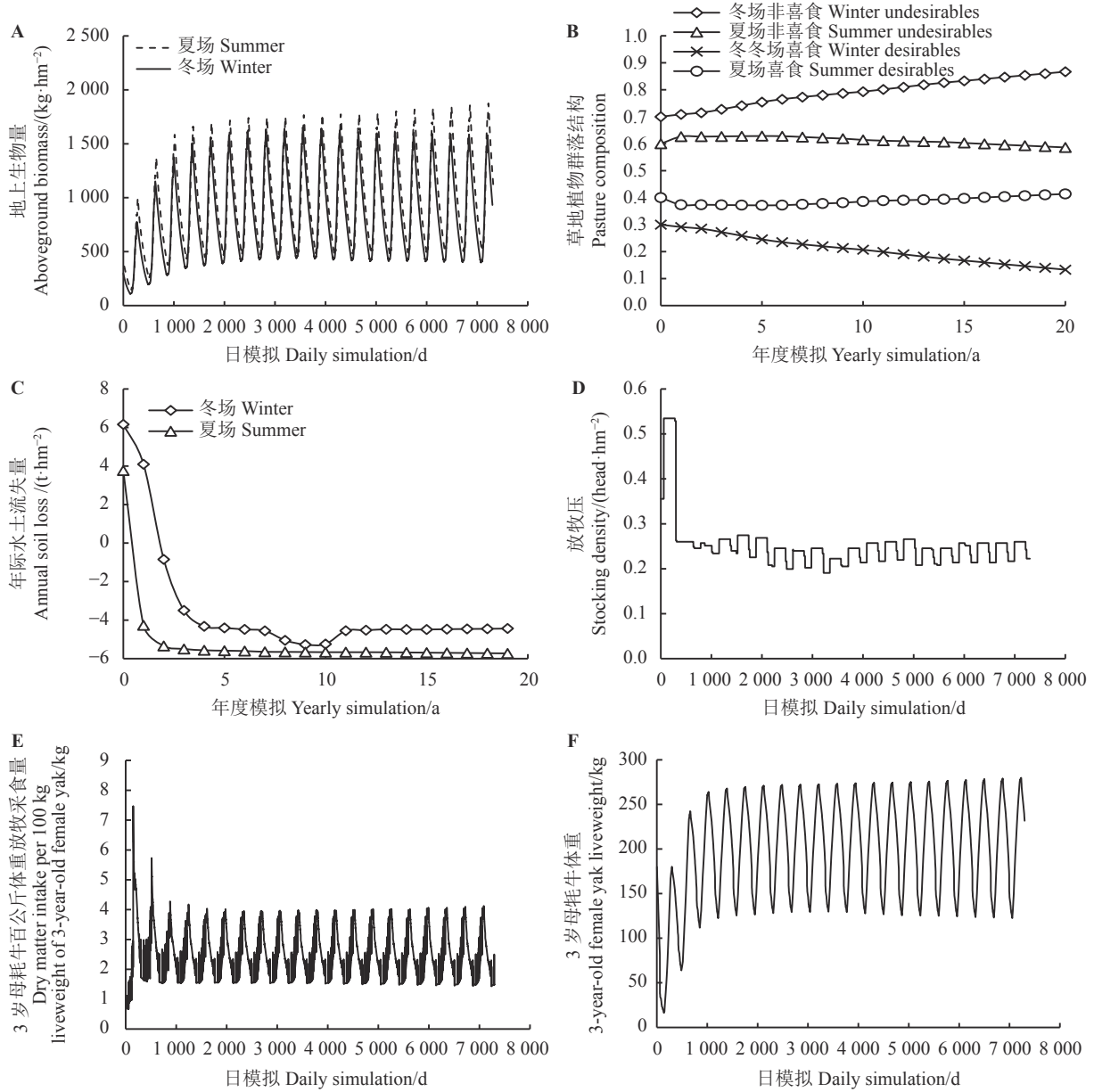


图 6 长期低放牧压对高寒草甸典型牦牛牧户放牧生产体系的影响

Figure 6 Long-term effects of low stocking density on the production system of a typical yak farm in the alpine meadow region

季节性差异^[26]。因此,通过代码试运行后, C_{R4} 参数数值在本研究与原版肉牛和瘤牛相同。目前牦牛采食量的研究报道数据差异较大,部分牦牛放牧采食量的数据折算成单位体重后高于舍饲条件下数据^[28],且变幅较大(体重的 1.28 到 7.53%),可能由于方法固有差异及试验误差所致,后续有关牦牛放牧采食量的研究需要同时采用至少两种以上方法测定比较^[29],并基于研究数据,持续性地开展牦牛放牧采食量的模拟方法的二次开发与改进。放牧家畜体重变化的精准模拟是目前放牧系统研发中的难点^[18]。本研究中校准后的牦牛参数 C_{G8} 的数值仅有

肉牛参数的 53%,该参数在原版模型中代表空腹体重变化所需能量,即肉的燃烧热。原版模型牛属参数中,瘤牛的 C_{G8} 数值低于普通肉牛,牦牛犊牛肉的燃烧热在 $5.01 \sim 6.3 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[30],成年牦牛肉的燃烧热在 $7 \sim 10 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,远低于普通肉牛的数值(犊牛 $9 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,成年 $27 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[15],因此本研究中较低的 C_{G8} 数值是合理的。

本研究基于前人研究成果,通过合理改进,首次将 CSIRO 标准应用在放牧牦牛采食量模拟和生长发育模拟中。结合前期研究基础,在 MATLAB 平台编码建立了 SGM 模型牦牛生长发育模块,并对放牧采

食量和增重的模拟参数予以校准和检验, CSIRO 营养标准^[15]经改造和参数校准后用在放牧牦牛生长发育模拟中具有可行性。同时典型牦牛牧户的示范模拟表明, 超载过牧是导致高寒地区植被、土壤退化的主要因素^[8]。传统粗放型经营下随着放牧压降低, 夏季放牧场草地植物群落功能组结构呈现优化趋势, 地上生物量优于冬季放牧场, 且水土流失风险低。而冬季放牧场由于利用时限长, 即使在长期低放牧压力状态下, 植物群落功能组结构仍处于恶化趋势, 说明大型反刍动物低放牧率下可维持并一定程度上提高草地生物多样性, 改善草地植物群落结构^[31-32]。模拟结果再次强调减畜对于传统粗放型放牧生产体系健康维护的重要性^[33], 但是夏季放牧场牦牛放牧压力的模拟结果小于前人试验研究结果^[34], 可能原因是研究区域草地地上生物量存在差异及研究方法不同所致。模拟结果表明 SGM 模型能够合理地模拟传统粗放型生产管理下放牧压力降低对高寒草甸牦牛放牧生产体系草地地上生物量、草地植物群落功能组结构、家畜放牧采食量和体重变化的长期影响, 该模型在青藏高原高寒草甸区模拟放牧压力对于放牧生产体系的长期影响具有可行性。

农业模型的发展趋势不再是创造新的模型公式, 而是在已有模型的基础上, 不断整合、加工、完善, 形成新的模型^[35]。本研究是 CSIRO 标准^[15]首次用于放牧牛属动物生长发育的模拟, 研究再次证明, 动物营养标准在放牧系统模型研发中具有重要作用, 系统模型常采用动物营养标准作为模拟家畜生长发育及营养代谢的方法^[10]。例如 FASSET^[36]和 GRAZPLAN^[14]采用 CSIRO 营养标准^[15], IFSM^[37]利用康奈尔净碳水化合物净蛋白质标准^[38]。其原因是机理模型产出的数据较为详尽, 难以利用到以日平均值作为时间单位的系统模型框架内。从放牧系统模型研发角度来说, CSIRO 标准相比其他标准具有优势, 主要表现在: 1) 采用了适宜于放牧反刍动物营养评价的代谢能体系; 2) 经验型模拟居多, 可用于后期改进; 3) 具有一套放牧采食量模拟方法。本研究表明 CSIRO 标准的方法可用于牛属动物放

牧采食量模拟, 适用于系统模型研发且适用范围较广^[12]。机理型采食量模拟, 如 MINDY, 虽然对采食量模拟的机理性较强, 但由于数据量大, 模拟的时间单位小(分钟), 仅适用植被结构相对单一的栽培草地^[12], 不适于天然草地放牧模拟。但也有研究发现, 6个消化率组分地上生物量比例对于采食量模拟影响较大^[7], 因此 SGM 模型对于6个消化率组分地上生物量比例模拟部分进行改进, 一旦模拟对象发生改变, 则有必要重新对草地牧草干物质消化率进行测定。虽然舍饲条件下增重模拟结果较为准确, 但示范模拟中发现 SGM 牦牛生长发育模块出现了其他放牧家畜体重模拟中的类似问题, 即体重模拟数据整体偏高^[18], 这可能是由于校准数据量不够所致。部分放牧采食量模拟数据不在合理的生物学数值之内(超过了体重的 0.6% 到 4.5%), 这可能是由原版采食量模型是半机理半经验模型, 部分参数无准确定义造成。由于牦牛在生理代谢上的特殊性^[39-40]和相关基础研究的缺乏, 牦牛生长发育模型的构建仍然存在许多亟待需要完善的地方, 如牦牛放牧采食量的影响因素的研究、牦牛泌乳能量需求、半乳牛的泌乳量模拟以及牦牛增重的适宜能氮比例需求等。这也体现出农业模型在科学研究中的重要作用之一, 即发现科学问题, 并用于下一步的试验设计, 如此互为补充, 使得模型的二次开发成为一个不断重复的过程^[10]。

4 结论

基于 CSIRO 营养标准和不完全小区模拟改良修订后的 SGM 模型的牦牛子模型生长发育模块可用于放牧牦牛生长发育模拟。SGM 模型在青藏高原高寒草甸区模拟放牧压力对于放牧生产体系的长期影响作用具有可行性, 其采用不同的参数, 基于同一套数学公式完成对放牧牛羊生长发育的模拟, 在未来牛羊放牧系统模型开发中具有较好的应用前景, 但仍需针对模拟对象的实际, 实施模型校准, 且对牦牛产奶量和放牧采食量的模拟方法仍需进一步开发和改进。

参考文献 References:

- [1] MIEHE G, MIEHE S, KAISER K, REUDENBACH C, BEHRENDEN L, LA DUO F, SCHLÜTZ F. How old is pastoralism in Tibet? An ecological approach to the making of a Tibetan landscape. *Palaeogeography*, 2009, 276(1): 130-147.

- [2] LI X L, GAO J, BRIERLEY G, QIAO Y M, ZHANG J, YANG Y W. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibet Plateau: Implications for rehabilitation. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(1): 72-80.
- [3] LIU H B, WU J P, TIAN X H, DU W H. Dynamic of aboveground biomass and soil moisture as affected by short-term grazing exclusion on eastern alpine meadow of Qinghai-Tibet plateau, China. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2016, 76(3): 321-329.
- [4] HARRIS R B. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau: A review of the evidence of its magnitude and causes. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(1): 1-12.
- [5] HERRERO M, THORNTON P K. Livestock and global change: emerging issues for sustainable food systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(52): 20878-20881.
- [6] 吴建平. 草地畜牧业生产体系导论. 北京: 科学出版社, 2020.
WU J P. Introduction to Production Systems of Animal Husbandry in Rangeland. Beijing: Science Press, 2020.
- [7] 刘海波. 青藏高原草甸区草地资源可持续利用模型的建立和应用. 兰州: 甘肃农业大学博士学位论文, 2017.
LIU H B. Simulation and application on the sustainable grasslands model in the meadow area of Qinghai-Tibetan Plateau. PhD Thesis. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.
- [8] KEMP D R, HAN G D, HOU X Y, MICHALK D L, HOU F J, WU J P, ZHANG Y J. Innovative grassland management systems for environmental and livelihood benefits. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(21): 8369-8374.
- [9] JONES J W, ANTLE J M, BASSO B, BOOTE K J, CONANT R T, FOSTER I, GODFRAY H, CHARLES J, HERRERO M, HOWITT, R E, JANSSEN S. Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*, 2017, 155: 240-254.
- [10] SNOW V O, ROTZ C A, MOORE A D, MARTIN-CLOUAIRE R, JOHNSON I R, HUTCHINGS N J, ECKARD R J. The challenges and some solutions to process-based modelling of grazed agricultural systems. *Environmental Modelling and Software*, 2014, 62: 420-436.
- [11] 李治国, 韩国栋, 赵萌莉, 王忠武, 王静. 家庭牧场研究现状及展望. *草业学报*, 2015, 24(1): 158-167.
LI Z G, HAN G D, ZHAO M L, WANG Z W, WANG J. An overview of the prospects for family farms. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(1): 158-167.
- [12] BEHRENDT K, LIU H B, KEMP D R, TAKAHASHI T. Sustainability modelling of grassland systems Sustainable. //KEMP D. (eds). Sustainable Chinese Grasslands. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 2020: 97-124.
- [13] BEHRENDT K, TAKAHASHI T, KEMP D R, HAN G D, LIU H B. Modelling Chinese grassland systems to improve herder livelihoods and grassland sustainability. *The Rangeland Journal*, 2020, 42(5): 329-338.
- [14] FREER M, MOORE A, DONNELLY J. The GRAZPLAN animal biology model for sheep and cattle and the GrazFeed decision support tool. (2012-12) [2022-06-16]. <https://grazplan.csiro.au/wp-content/uploads/2007/08/TechPaperMay12.pdf>.
- [15] CSIRO. Nutrient requirements of domesticated ruminants. Collingwood: CSIRO Publishing, 2007.
- [16] 胡令浩, 谢敖云, 韩兴泰. 生长牦牛与生长黄牛体表面积的研究. *中国畜牧杂志*, 1994(6): 9-10.
HU L H, XIE A Y, HAN X T. The study of body surface area of growing yaks and cattle. *Chinese Journal of Animal Science*, 1994(6): 9-10.
- [17] THORNLEY J H, FRANCE J. *Mathematical Models in Agriculture: Quantitative Methods for the Plant, Animal and Ecological Sciences*. 2nd Edition. Wallingford: CABI Publishing, 2007.
- [18] MAYBERRY D E, SYAHNIAR T M, ANTARI R, NINGRUM G P, MARSETYO, PAMUNGKAS D, POPPI D P. Predicting feed intake and liveweight gain of Ongole (*Bos indicus*) cattle in Indonesia. *Animal Production Science*, 2014, 54(12): 2089-2096.
- [19] SMITH P, SMITH J, POWLSON D, MCGILL W, ARAH J, CHERTOV O, COLEMAN K, FRANKO U, FROLKING S, JENKINSON D. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 1997, 81(1-2): 153-225.
- [20] DING L M, WANG Y P, BROSH A, CHEN J Q, GIBB M J, SHANG Z H, GUO X S, MI J D, ZHOU J W, WANG H C, QIU Q, LONG R J. Seasonal heat production and energy balance of grazing yaks on the Qinghai-Tibetan plateau. *Animal Feed Science and Technology*, 2014, 198: 83-93.
- [21] DONG Q M, ZHAO X Q, XU Y S, DONG S X, MA Q Y, DONG Q Y, LI Q Y. Live-weight gain, apparent digestibility, and economic benefits of yaks fed different diets during winter on the Tibetan plateau. *Livestock Science*, 2006, 101(1-3): 199-207.
- [22] 杨俊, 王之盛, 保善科, 王威, 薛白, 张海波, 邹华围. 精料补充料能量水平对早期断奶犏牛生产性能和营养物质表观消化率的影响. *动物营养学报*, 2013, 25(9): 2021-2027.

- YANG J, WANG Z S, BAO S K, WANG W, XUE B, ZHANG H B, ZOU H W. Effects of energy level of concentrate supplement on performance and nutrient apparent digestibility of early-weaner yak calves. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2013, 25(9): 2021-2027.
- [23] PITTROFF W, KOTHMANN M M. Quantitative prediction of feed intake in ruminants: II. Conceptual and mathematical analysis of models for cattle. *Livestock Production Science*, 2001, 71(2-3): 151-169.
- [24] SHAO B, LONG R J, DING Y, WANG J, DING L M, WANG H. Morphological adaptations of yak (*Bos grunniens*) tongue to the foraging environment of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Animal Science*, 2010, 88(8): 2594-2603.
- [25] DING L M, LONG R J, WANG C, SHANG Z H. Grazing behavior of lactating and non-lactating yaks in the summer season of the Qinghai-Tibetan plateau. *Israel Journal of Ecology & Evolution*, 2006, 52(2): 141-149.
- [26] KONDO S. Recent progress in the study of behavior and management in grazing cattle. *Animal Science Journal*, 2011, 82(1): 26-35.
- [27] 宋仁德, 长谷川信美, 李国梅, 徐宁, 才尕, 张青兰. 天然草地放牧牦牛采食行为及食性选择的研究. *家畜生态学报*, 2008, 29(5): 31-35.
- SONG R D, CHANGGU C X M, LI G M, XU N, Caiga, ZHANG Q L. Botanical composition and grazing behaviour of Qinghai yaks of plateau type in the natural rangeland. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2008, 29(5): 31-35.
- [28] 韩兴泰, 谢敖云, 胡令浩. 生长牦牛采食量的研究. *青海畜牧兽医杂志*, 1990(6): 5-6, 39.
- HAN X T, XIE A Y, HU L H. The study of dry matter intake of growing yaks. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 1990(6): 5-6, 39.
- [29] MAYES R W, DOVE H. Measurement of dietary nutrient intake in free-ranging mammalian herbivores. *Nutrition Research Reviews*, 2000, 13(1): 107-38.
- [30] XUE B, ZHAO X Q, ZHANG Y S. Seasonal changes in weight and body composition of yak grazing on alpine-meadow grassland in the Qinghai-Tibetan plateau of China. *Journal of Animal Science*, 2005, 83(8): 1908-1913.
- [31] PLANTUREUX S, PEETERS A, MCCRACKEN D. Biodiversity in intensive grasslands: Effect of management, improvement and challenges. *Agronomy Research*, 2005, 3(2): 153-164.
- [32] OLFF H, RITCHIE M E. Effects of herbivores on grassland plant diversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13(7): 261-265.
- [33] KEMP D R, HAN G D, HOU F J, HOU X Y, LI Z G, SUN Y, WANG Z, WU J P, ZHANG X, ZHANG Y, GONG X Y. Sustainable management of Chinese grasslands-issues and knowledge. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2018, 5(1): 9-23.
- [34] DONG Q M, ZHAO X Q, WU G L, CHANG X F. Optimization yak grazing stocking rate in an alpine grassland of Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(5): 2497-2503.
- [35] 刘海波, 李林渊, 蒲小剑, 杜文华. 基于静态模拟模型的青藏高原东缘高寒草甸区草畜平衡研究. *草原与草坪*, 2017, 37(4): 26-37.
- LIU H B, LI L Y, PU X J, DU W H. Study on the grassland-livestock balance based on static model in the alpine meadow on the eastern edge of the Qinghai Tietan Plateau. *Grassland and Turf*, 2017, 37(4): 26-37.
- [36] BERNTSEN J, PETERSEN B M, JACOBSEN B H, OLESEN J E, HUTCHINGS N J. Evaluating nitrogen taxation scenarios using the dynamic whole farm simulation model FASSET. *Agricultural Systems*, 2003, 76(3): 817-839.
- [37] ROTZ C A, CORSON M S, CHIANESE D S, MONTES F, HAFNER S D, COINER C U. The integrated farm system model reference manual, version 3.6. (2012-09-01) [2022-06-16]. https://www.researchgate.net/publication/242713478_THE_INTEGRATED_FARM_SYSTEM_MODEL/link/004635321ac7a10beb000000/download.
- [38] SNIFFEN C J, OCONNOR J D, VANSOEST P J, FOX D G, RUSSELL J B. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets. 2. carbohydrate and protein availability. *Journal of Animal Science*, 1992, 70(11): 3562-3577.
- [39] ZHOU J W, LIU H, ZHONG C L, DEGEN A A, YANG G, ZHANG Y, QIAN J L, WANG W W, HAO L Z, QIU Q, SHANG Z H, GUO X S, DING L M, LONG R J. Apparent digestibility, rumen fermentation, digestive enzymes and urinary purine derivatives in yaks and Qaidam cattle offered forage-concentrate diets differing in nitrogen concentration. *Livestock Science*, 2018, 208: 14-21.
- [40] ZHOU J W, ZHONG C L, LIU H, DEGEN A A, TITGEMEYER E C, DING L M, SHANG Z H, GUO X S, QIU Q, LI Z P, YANG G, LONG R J. Comparison of nitrogen utilization and urea kinetics between yaks (*Bos grunniens*) and indigenous cattle (*Bos taurus*). *Journal of Animal Science*, 2017, 95(10): 4600-4612.

(责任编辑 张瑾)