

草地载畜量研究进展:概念、理论和模型

徐敏云^{1,2}, 贺金生¹

(1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 2. 河北农业大学动物科技学院, 河北 保定 071000)

摘要:平衡理论强调家畜和草地资源之间的生物反馈,主张采取保守放牧策略保证草地生态系统的稳定性,草地管理的目标是调节草地牧草供给量和家畜饲草需求量平衡。基于非平衡理论的“新草地科学”,则强调气候因素尤其是降水,决定着干旱、半干旱区草地承载力,主张采取机会主义策略,充分利用草地并维持草地基况。传统上,草地载畜量的确定是先计算生长季末的草地产量,利用草地利用率等校正系数校正,再除以家畜的年平均需求量;但由于其没有考虑牧草质量、饲喂价值和家畜营养需求,载畜量估计存在误差,从而导致争议。本文依据国内外研究进展,回顾了草地载畜量概念的发展和演变,比较了草地产量载畜量、营养载畜量(包括标准干草载畜量、总可消化养分及可消化粗蛋白载畜量、能量载畜量)差异,归纳了草地载畜量在应用上的争议。本文指出,由于牧草养分的季节变化动态,采用家畜营养需求法估测的载畜量值通常较草地产量法为低,放牧实践上应采用 2 种方法相结合估算草地载畜量,根据估算数较低者确定草地载畜量有利于草地可持续利用和保护。草地通常既存在平衡态,也存在非平衡态;而基于平衡理论的保守放牧策略在放牧率和放牧压力上,与基于非平衡理论的机会放牧策略存在差异;放牧管理应结合气候条件、草地基况、草地产权制度、政府补贴与否及市场价格等因素,选择保守放牧策略或机会放牧策略,实现草地畜牧业生产的生态和经济效益。由于生态模型通过模拟草地对放牧的响应及放牧对草地的影响,是草地管理的基础,本文归纳了草地放牧管理相关的生态模型和放牧管理应用程序,以期对草地放牧管理决策提供参考。

关键词:草地载畜量;平衡理论;新草地科学;放牧策略;草地生态模型

中图分类号:S812.8 文献标识码:A 文章编号:1004-5759(2014)03-0313-12

DOI:10.11686/cyxb20140337

全球草地面积 $3.5 \times 10^9 \text{ hm}^2$, 约占世界陆地面积的 26%, 占农业用地面积的 70%^[1]。草地在畜牧生产、野生动物栖息地、生物多样性、碳贮存、淡水供应和休闲服务等方面发挥重要作用。其中,家畜放牧是天然草地最主要的利用方式。合理放牧,对于草地利用可持续性,以及家畜生产和草地生态系统服务至关重要。虽然全球范围草地产量呈现下降趋势,但牧民出于经济利益等因素,扩大饲养规模^[2],使家畜数量增长迅速^[3]。此外,由于大多数草地的自由放牧利用方式,草地利用存在着经济上的非理性和生态上的破坏性,造成公地悲剧^[4]。过度放牧造成土壤侵蚀和草地退化^[5],降低了生态系统弹性和系统应对气候变化的能力,草地管理面临着如何适应降水的不确定性^[6]及规避生产风险的挑战^[6]。

草地畜牧业的核心问题是草畜平衡问题^[7]。草畜平衡就是在草原上保持合理的载畜量,合理地利用草地^[8]。草地放牧管理是草地系统组分的综合管理,放牧管理应调控草原各生产要素,摒弃传统的片面追求牲畜数量的粗放型草地畜牧业,确保草地稳定高产、保护草地生态环境和促进草地畜牧业持续发展。草地可持续利用的关键是引导牧民成为理性生产者^[6],最优放牧策略必须对不断变化的草地做出快速反应,科学地确定草地载畜量和放牧率,实现草畜平衡,实现草地的可持续利用^[9]。目前,确定载畜量的方法在家畜采食量、牧草产量、关键区域选择、放牧利用率、水源距离调整以及补饲等逐渐趋向标准化^[10]。但关于草地载畜量与放牧率研究存在着理论和方法上的缺陷^[8,11-15],理论上存在平衡理论^[16-17]、非平衡理论^[18]之争;计算方法上存在产量载畜量和营养载畜量^[12,19]之争;草地产量的年限也不确定^[10,20],也存在生态载畜量^[21-22]和经济载畜量^[13,23]上的争议。新的理论和

* 收稿日期:2013-06-05;改回日期:2013-11-06

基金项目:中国科学院重要方向性项目(KSCX2-YW-G-076),中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050304)和保定市科技攻关项目(13zf063)资助。

作者简介:徐敏云(1977-),男,山东苍山人,博士后。E-mail:xuminyun@pku.edu.cn

方法正在逐步建立和完善,但由于草地生态系统的复杂性,新的、完整的理论和方法体系尚未形成^[24]。依据国内外研究进展,本文综述了草地载畜量定义、理论依据,以及草地载畜量生态模型,以期为草地放牧管理提供参考和依据。

1 草地载畜量概念

1.1 草地载畜量概念的演变

草地载畜量的概念是由人口承载力衍生而来^[13,25], Malthus^[26]在“人口论”中最先提出了人口承载力的概念,1838年 Verhulst^[27]用 Logistic 方程首次表达了 Malthus 人口论, Pearl 和 Reed^[28]也于 1920 年独立提出了 Logistic 方程,以及 Logistic 方程的渐近线,即“K”值,指的是有限资源下种群的容纳量,但此时并未明确提出承载力这个概念,而以“饱和水平上限”、“最大种群数量”或“S 型曲线渐近线”来表示生物在环境约束下的最大种群数量^[29]。承载力概念和 Logistic 方程在生态学研究中也并没有联系在一起^[30]。直到 1953 年, Odum^[31]第 1 次把承载力的概念和 Logistic 曲线的理论最大值常数联系起来,将承载力概念定义为种群数量增长的上限。真正促使承载力概念提出的是 19 世纪末至 20 世纪初美国西部牧区载畜量管理研究^[25]。承载力这个词最早出现在 1845 年美国国务院向参议院所做的报告中^[32], 19 世纪 70 年代应用到生物系统,大约 10 年后,承载力应用范围扩大到非生命自然系统^[32]。1886 年,它首次涉及家畜^[33]。1889 年,承载力作为衡量生产力的手段开始应用于草地^[32]。

1.2 草地产量载畜量

20 世纪初, Hadwen 和 Palmer^[34]将“承载力”一词引入草原管理学,由此衍生载畜量的科学含义,即特定时期内在草地资源不受破坏的条件下,一定面积的草地能够承载的家畜数量。建立于 1903 年的 Santa Rita Experimental Range(SRER),主要从事草地生态畜牧业研究^[35],推进草地载畜量研究的发展,将草地载畜量界定为:草地实现稳定性盈利所能承载的家畜数量^[36],家畜需求与草地供应保持和谐稳定^[37],草地可持续利用而不造成草地退化^[38],提供相对稳定的畜产品而不严重损害草地资源等^[35]。

Sampson^[39]完善了载畜量的定义:在草地牧草被正常采食而不影响下一生长季草地产量条件下,一定面积的草地能够承载的一种或多种家畜的数量。Dasmann^[40]进一步将其修正为:在草地牧草和放牧家畜的生长不受影响、土壤资源不受破坏的条件下,草原能够负荷的同种家畜的最大数量。1964 年美国草原学会规定了载畜量的标准,即每年最长放牧时间内,一定土地面积上存活的最大家畜数量^[41]。1985 年任继周^[42]给出了载畜量的综合概念:单位时间内单位面积草地上可以正常养活的家畜数量,并提出了载畜量的准确表示方法,包括时间单位法、面积单位法和家畜单位法。1989 年,美国草原学会又修正了载畜量的定义,即以饲草料资源为基础,一定土地面积上承载的家畜总数^[43]。目前,草地载畜量最广为接受的概念是:在可持续的基础上,草地最大可能放牧率^[44]。载畜量多指牧草产量载畜量,因没有考虑牧草质量和饲用价值而饱受批评^[12]。草地载畜量通常用家畜单位月(animal unit month, AUM)计量,其定义为,体重为 454 kg 的牛,日食量为 11.8 kg 干草,1 个月摄食牧草的数量^[43]。

1.3 草地营养载畜量

草地产量载畜量只考虑了摄食的数量,没有考虑牧草的质量;在家畜采食量上,没有区分家畜生长阶段的饲养差异^[45]。批评者认为,可食干物质产量并不是评价载畜量的可靠指标,牧草营养价值才是影响草地载畜量的决定性因素^[19]。由于天然草地牧草营养成分的季节性变化,家畜营养需求法估算的草地载畜量一般低于根据草地产量法估算的草地载畜量^[12]。产量载畜量必须和牧草营养价值,特别是粗蛋白含量、能量、矿物质含量结合起来^[12,46]。Moen^[47]综述了基于家畜蛋白质和能量需求的载畜量评估,Robbins^[48]详尽论述了家畜营养需求评估载畜量的概念和体系。Hobbs 和 Swift^[49]提出了基于牧草产量和质量为基础的估算草地载畜量的方法和程序。

Weende 分析^[45]和 Soest 等^[50]粗饲料静态分析,以及 CNCPS 体系^[51]动态分析、中性洗涤纤维分析、体外干物质消失法、近红外分光光度测定法等饲料分析技术的发展,使得测定和分析牧草营养价值成为可能^[52]。食管瘘技术的发展^[53-56]方便了反刍家畜的营养评估,使估算载畜量从以草地产量为基础转向以家畜营养需求为基础

成为可能。目前,主要存在 3 类营养载畜量评价方法。

1.3.1 标准干草法 采用干草价(hay value)^[57]是较为简便的载畜量营养评估法。Albrecht^[57]首次提出了“干草价理论(hay value theory)”,以优良草甸干草(good meadow hay)为标准干草,把其他牧草与标准干草比较,表达饲草的营养价值,这是第一个根据饲草种类和家畜体重变化的草地放牧评价系统。我国草地管理实践提出了标准干草^[58]的概念,也是草地载畜量营养评估法的基础。刘玉杰等^[59]以苜蓿(*Medicago sativa*)作为标准干草,测得了其能值,概算了牛单位、羊单位的标准干草能量需求。

1.3.2 总可消化养分及可消化粗蛋白评价法 总可消化养分(total digestible nutrients, TDN)法及可消化粗蛋白(digestible crude protein, DCP)法是根据畜营养需求法中主要的 2 种方法^[60-61]。TDN 和 DCP 法主要是基于 Weende 分析、可消化养分价值分析及 Atwater 和 Bryant^[61]生理能值分析,测定牧草总可消化养分,根据家畜单位的 TDN 和 DCP 需求,计算草地的 TDN、DCP 营养载畜量。TDN 法应用于载畜量的评估差异较大, Sampson^[62]认为 1 个家畜月等同于 300 磅 TDN 或 300 kg 干草,而 Shultis 和 Strong^[63]认为 1 个家畜月应为 400 磅的 TDN 或 360 kg 干草, Harris^[64]则提出 1 个家畜天为 16 磅的 TDN。

1.3.3 能量需求法 体外产气技术估测牧草代谢能(metabolic energy, ME)的应用使计算 ME 载畜量成为可能^[60,65]。由于环境条件的复杂性,自由放牧家畜的能量需求估算难度很大^[66]。与圈养家畜相比,放牧家畜能量维持需求提高 0~100%、牛增加 50%~100%、羊的增加 25%~100%^[67]。能量需求增加主要是由于放牧活动能耗,特别是行走和觅食,使维持能量需求增加,并随着采食难度和环境压力而发生变化。还有研究估计,对羊而言,放牧由于环境影响、活动增加,维持能量需求比圈养增加 60%~70%^[68]。平地上羊的行走能量需求平均为 2.47 J/(kg·m),并随着行走速度的增加而增加,而陡坡上,平均行走能量需求为 26.99 J/(kg·m),陡坡行走的能量需求是平地的 10 倍^[69]。

基于养分需求法的草地载畜量评估最早应用于对草地野生动物载畜量的评价上^[49]。与牧草产量法确定载畜量相比,家畜营养需求法着重考虑家畜的营养需求,估算时要结合牧草质量和养分产量^[12]。基于牧草数量和质量的草地载畜量评估,显然要比仅仅基于牧草数量的评估更为精确^[70-71]。

1.4 草地载畜量应用上的争议

1.4.1 载畜量与承载力 有学者认为,载畜量和承载力的概念效力是等同的,对草地而言,均指实际利用应该确保不对草造成长期的损害,草地植被具有恢复到顶级群落的能力^[32]。但也有学者认为承载力是一个非常模糊的概念,是应用承载力还是应用载畜量来表达草地的容量存在争议^[72]。Scarnecchia^[73]认为,承载力本质上特定管理措施下为了实现特定目标的最优化水平,而不是数量最大化。在最佳承载力之下,系统可以实现最大的盈利能力。因此,最佳承载力表达的是系统所有服务功能和产品最盈利时的水平^[74],而最佳载畜量是指能获得最大畜产品时的草地放牧率,但也有学者^[73]认为不应作此区分。

1.4.2 公共草地及复合生态系统的载畜量 草地载畜率的前提,是家畜放牧有固定的边界^[75]。而世界上广泛存在的公共放牧地,由于放牧家畜的游弋和不固定性,在公共放牧草地上,计算草地载畜率没有实际意义,采用载畜量评价草地,受到广泛质疑^[76]。补充精料、放牧制度变化等,进一步加大估算草地载畜量的难度^[75]。游牧地区和农牧交错带,家畜的饲料来源广,除了依赖草地放牧以外,农作物秸秆也是家畜的重要饲料来源。作物秸秆在饲料中的比重往往很难确定,也难以计算草地的家畜载畜量^[12]。混群放牧,由于家畜的食性差异,确定可食牧草的采食率通常也较为复杂,特别是灌木、枝桠也是重要饲料来源的地区,确定草地载畜量更为困难^[12]。

1.4.3 草地产量年限的确定 草地生产具有波动性,如果以 1 年的产量为基础来确定草地的载畜量,则应为短期载畜量。如果以多年产量为基础确定草地载畜量则为长期载畜量。通常所说的载畜量指的是长期载畜量。在计算草地载畜量时,采用多年平均草地产量,年限一般指的是过去 10 年,理想情况下,最少也应该有过去 3 年的草地产量。一般情况下,草地载畜能力的确定应该每 10 年进行更新 1 次^[10]。也有学者认为长期指的是 >30 年^[20],尤其是对安全载畜量的估计,由于安全载畜量通常被作为一种草地战略管理,它是一种长期的平均草地容量,其估算要明确过去一段时间草地实际放牧家畜的数量、草地利用率、草地动态及降水情况^[10],确保其不会导致草地退化和土壤侵蚀。安全载畜量的计算,是基于草地资源长期(>30 年)承载家畜放牧的能力^[77-78],不能和

作为响应草地植被动态的放牧率(<1 年)估计相混淆^[79],草地放牧率和草地过去5,10,20年的承载家畜的数量没有必然的联系^[10]。

2 草地载畜量与放牧策略

被 Sampson^[80]引入草地管理的植被演替模型^[81-82],以及植被-家畜种群动态模型^[83],是评价草地基况的基础。草地基况理论长期以来也是评估草地植被动态和放牧管理的主要依据^[16]。草地基况理论在传统草地科学研究和草地管理中占绝对支配地位^[17]。平衡理论强调草食家畜和草地资源之间的生物反馈,主张采取保守放牧策略保证草地生态系统的稳定性;基于半干旱草地,主要是非洲热带稀树草地研究,提出的“草地新科学”理论则以非平衡理论为基础,强调随机非生物因素对草地产量和家畜数量动态的驱动作用,提倡机会放牧策略保持草地生态系统的灵活性^[18]。合理的放牧率是草地生态系统主要动力,基于平衡和非平衡理论放牧策略的选择,是放牧管理决策的基础^[16]。

2.1 平衡理论与保守放牧策略

平衡理论认为植被对放牧压力的反应是线性的、可逆的,草地植被动态对放牧强度的反应是可预测的。放牧率长期超过草地承载能力,将会引起草地生产力的下降,进而威胁到草地生产的可持续性^[84-86],同时也增加了干旱时期草地面临的风险^[84]。草地放牧应采取保守放牧策略,放牧率保持相对恒定且不超过干旱年份草地的载畜能力,避免干旱年份过牧的家畜损失和植被退化^[87]。保守放牧策略主张采用轻度和中度放牧强度^[88],实际放牧率一般固定在67%,即2/3的生态载畜量水平上,对可食牧草不造成损害,或有利于提高可食牧草的生产能力^[89]。

草地放牧管理的目标是维持家畜牧草需求量和草地饲料供应量的平衡,获取最大的经济效益。采用保守放牧策略,虽然降水和牧草生长发生时空变化,草地不同季节和年际间的承载能力也发生了改变,但草地放牧家畜的数量没有变化^[90]。保守放牧策略采用固定放牧率,造成湿润年份的草地得不到充分的利用^[91],但超过干旱年份的草地承载能力,对牧民来说通常并不适宜^[92]。Dunn等^[93]利用美国南达科他州杂类草草地34年(1969—2002年)的放牧试验数据,比较了不同放牧率下草地畜牧业生产效益的结果表明,采取保守放牧策略能维持良好的草地基况,但缺乏经济效益,而且还需要付出很多机会成本。在非洲草地上进行的试验也表明,传统草地科学的理论基础可能存在缺陷^[75],草地顶级演替理论并不适应于草地管理^[94-95]。

2.2 非平衡理论与机会放牧策略

干旱、半干旱草地,受气候因素,尤其是降水的控制,而不受生物因素的制约,家畜放牧对草地植被没有影响,表现为明显的非平衡特征^[94,96-97]。平衡理论面临着多个非均衡理论的挑战,包括状态-过渡理论^[94]、阈值理论^[98]、灾难理论^[99]及草地非均衡动态理论^[96,100]。平衡、非平衡理论的争议最早出现于20世纪80年代^[101]。20世纪90年代,基于非平衡生态动力学理论提出的“新草地生态学”^[101],使争议达到高峰^[100]。大量的文献^[102]出现在20世纪90年代。Westoby等^[94]提出的草地状态-过渡假说开启了非平衡草地管理研究的新篇,被广泛用于评价草地生态系统动态。该假说认为不确定性在草地演替中具有重要作用^[9],草地沿着一系列稳定态转换,一个放牧强度对应一个群落稳定态,群落的稳定态之间存在一系列过渡态,环境对过渡态有选择作用,草地管理就是在放牧压力与演替趋势之间寻求长期稳定平衡,以获得持续最大的畜产品产量^[94]。

新草地科学认为由于干旱、半干旱草地生长季短,干旱频繁,降水的年内、年际变幅大,可利用牧草的年际波动较大,家畜种群数量的调整无法适应草地产量的剧烈波动,草地产量和家畜数量大部分时间存在系统悖论^[18],家畜数量主要受环境波动调控,放牧对策应适应环境的变化^[87,96],尤其是可利用牧草的时空变化^[97]。而非平衡草地理论没有充分考虑半干旱地区草地的空间异质性和气候变异^[18]。半干旱草地应根据草地产量变化波动调整家畜数量^[102],采用机会放牧策略。机会放牧,也称为追踪放牧策略,机会放牧策略通过出售或购进家畜,放牧率随牧草产量的变化而调整,草地承载能力保持在生态载畜量的水平,能够充分利用湿润年份较高的草地产量,也可以在干旱年份通过出售或屠宰家畜,有效避免草地产量降低引起的家畜死亡和产量下降^[87]。根据非平衡理论,降水不确定的情况下,保守放牧策略的经济回报较低^[103]。但机会放牧策略也面临着风险,尤其是畜群规模

基本稳定,而季节性条件恶化草地产量下降的情况下,需要及时降低畜群数量达到安全放牧率^[90]。

相关研究认为,在降水量小于 400 mm 或在 300~400 mm,年降水变率 $\geq 33\%$ 的地区,适用非平衡理论管理草地^[83,97,104],在这种情况下,频繁干旱常导致家畜高达 50%死亡率^[96]。干旱常使密度制约型家畜种群保持较低数量,避免对牧草资源的竞争^[100]。年际降水变率 33%是非洲草地畜牧业 2 种放牧策略的边界,如果降水变率低于 20%,则家畜数量将保持相对稳定,草食家畜和牧草之间存在正反馈^[97]。

2.3 放牧策略的争议

平衡理论强调生态系统的内部调节和稳定,低估了气候变化及偶发事件对生态系统的影响^[96]。非平衡理论强调外部干扰对生态系统的影响^[96]。对保守放牧策略而言,放牧率是个常数,放牧压力干旱年份较高,湿润年份较低;机会放牧策略的放牧压力是稳定的,放牧率则会发生变化^[101]。

作为干旱、半干旱草地生态系统放牧管理的理论基础,非平衡理论有取代平衡生态学的趋势^[105]。但非平衡理论也受到质疑,因为植被波动并不是干旱、半干旱草地畜牧业生产的本质特征,家畜种群决定因子(通常是牧草休眠时期保育率)才是干旱、半干旱地区畜群密度制约的主要因素^[106-107]。非平衡理论中,关于环境变化如何调整家畜数量的过程和机制并不清楚。与此同时,如果植被波动是半干旱草地的一种常态,很难区分草地植被波动在草地长期退化中的作用^[108]。

机会放牧策略经济效益高于保守放牧策略的观点也受到学者^[102]的质疑,基于津巴布韦南部的草地试验,模拟机会放牧(只考虑降水)、紧密追踪放牧(考虑产量)、保守追踪放牧(考虑产量和波动)、保守放牧(固定放牧率)等 4 种放牧方式的试验结果表明,机会放牧策略由于在家畜调整,包括缩减载家畜和补充家畜的成本较高,经济回报反而要低于保守放牧策略^[109]。此外,除非牧民具备确定牧草产量的经验和技能,机会放牧策略才不会导致草地的退化,因为牧民不愿意及时缩减饲养规模、调整存栏,往往造成干旱年份收入损失,并使得合理利用草地累积的红利消失殆尽。

究竟采用何种放牧策略更为恰当,在科学家和牧民之间长期以来一直存在争议^[110]。Campbell 等^[101]指出,草地放牧策略没有万能模式,究竟采用保守或机会放牧策略取决于各种条件,包括环境因素、草地基况及其阈值、草地产权制度、政府补贴及市场稳定性。密度制约型草地生态系统更适合采用保守放牧策略,而非密度制约型草地生态系统更适合采取机会放牧策略。在降水量大、降水变率小的草地,由于牧民可以提前规划家畜存栏和出栏,采用保守放牧策略就较为适当;机会放牧策略则更适合降水量少、变率大的草地^[101]。研究者也发现,在不同时间和草地的不同地段,保守放牧策略和机会放牧策略在草地管理上其实是共存的^[16]。

3 草地载畜量模拟模型

3.1 生态模型

生态模型,是草地研究和管理的基礎,生态模型通过模拟草地对放牧的响应,及为达到预期目标应采取的策略,有利于放牧管理决策^[111]。

1965 年构建的生态系统等级模型(the ecosystem level model,ELM)^[112]是后续草地生态模型基础。其后,主要有以下草地载畜量模拟模型:1)以放牧率为水平变量,家畜数量和放牧密度作为响应变量的牧草—家畜供需(supply/demand)模型^[113],是载畜量估算应用最为广泛的模型^[73]。2)1987 年,草地生产利用仿真模型(simulation of production and utilization of rangelands,SPUR)^[114]最初被用作研究和开发的工具,其改进版本 SPUR2 具备模拟草地对全球变暖和气候变化的响应,以及干旱、半干旱草地对 CO₂ 浓度增加的响应功能;另一个修订版本 SPUR-91 模型,用以评估管理措施对草地的影响;SPUR 的改进版本 SPUR-91、SPUR2 和 SPUR2.4 都具有小范围内评估草地管理策略和措施的功能。3)植物生长模型(phytomass growth model,PHYGROW)^[115]能够模拟出栏和存栏各种等级的决策风险。4)GRASP 模型^[79]用以模拟大范围天然草地和栽培草地产量年际动态,并用于模拟特定草地降水与草地产量关系,进而计算草地载畜量。5)作为 Aussie-GRASS 模型一部分,Aussie-GRASP 模型,把模拟范围缩小到 5 km×5 km 空间,采用多参数,改进了单纯以降水量预测草地载畜量精度^[20]。6)状态—过渡模型(state-and-transition models,STMs)^[94]集成了历史放牧经验资料和科学数据,更便于草地管

理者确定放牧率。7) 随机动态规划模型(stochastic dynamic programming, SDP)利用草地现存量数据和随机降水资料^[103]确定草地最佳载畜率,提高草地畜牧业生产效益^[116]。8) 马尔可夫链动态规划模型,是基于马尔可夫方程和高阶依赖理论的渐近决策规则,为草地管理提供了数字化的解决方案^[117]。9) 依据贝尔曼最优化原则,把不确定性引入动态方程建立的随机化动态规划模型^[118],考虑了时间和风险的共同作用,该模型不但采用当前的植被状态(载畜容量),也采用当年的实际降水量,建立了干旱、半干旱草地放牧优化管理的经验法则^[110]。与马尔可夫链动态规划模型相比,随机化动态规划模型在确定最优草地利用频率和放牧率,采取的是线性规划方法^[118]。

3.2 计算机决策支持系统

单独使用模拟模型,或和计算机决策支持系统(computerized decision support systems, DSS)联合使用,在草地生态系统管理中发挥着越来越重要的作用^[112]。卫星影像、航空照片在确定载畜量的广泛应用,使得计算机模拟技术在草地管理中的作用不断增加^[75]。

放牧地应用程序(grazing lands applications, GLA)^[119-120],作为决策辅助软件,根据草地植被对放牧预期响应和牧户调查做出专业判断,对草畜平衡决策发挥着重要作用。混群放牧率计算程序(multiple species stocking calculator, MSSC)^[112]通过模拟野生动物及不同家畜混群放牧条件下的食性选择,确定草地载畜量。养分平衡分析程序(nutritional balance analyzer, NUTBAL)^[119]弥补了放牧地应用程序的不足,为准确确定载畜量提供了养分管理模块。放牧地替代分析工具(grazing-lands alternative analysis tool, GAAT)^[121]包含经济动态模型,用于模拟复杂条件下,如何应对草地生态和经济条件变化。RANGETEK是决策辅助软件,根据蒸散发/潜在蒸散发估计作物产量峰值,根据在生长季初期的土壤水分含量估计草地产量^[122]。中国草业开发与生态建设专家系统^[123]为计算载畜量提供了详细的草地利用率数据。草畜平衡计算系统(livestock-feed balance calculation system)^[124],缩短了计算时段,解决载畜量计算中饲草供给与家畜需求的时差问题,提高了预测的准确性。环境资源评估管理系统(environmental resource assessment and management system, ERAMS),广泛应用于确定半干旱草地载畜量^[125],这个系统的方法学基础是半干旱地区的草地产量和有效水分的强相关性。作为全球家畜协作研究支持项目(global livestock collaborative research support program, GL-CRSP)的一部分,家畜预警系统(livestock early warning systems, LEWS)^[126]的主要任务是作为畜牧业生产的信号器,自动搜集和传递牧草供应信息,通过对家畜体况和草地产量的估计,及时应对气候干旱,为牧民及时调整家畜存栏提供信息。

4 小结

草地退化直接的原因主要有过牧、砍伐薪柴、采矿、草地开垦,而气候、社会经济形态以及政府管理政策才是关键因素^[127]。草地放牧管理应结合气候条件、草地类型等因素,确定采用保守放牧策略或机会放牧策略,实现草地畜牧业生产的生态和经济效益。Behnke和Kerven^[128]关于草地管理政策有了新的思考,提出应当建立追踪(根据可利用牧草的波动调整畜群)和缓冲机制(为应对气候或植被的恶劣变化,建立牧民收入和生活保障机制)。草地弹性(恢复力)理论^[129],或称为“生态系统管家”^[1],强调草地的社会生态性,能够更好地应对草地迅速变化及不确定性。

草地产量法和家畜营养需求法估算草地载畜量通常并不一致,应采用2种方法相结合估算草地载畜量,确保草地的可持续利用。生态模型通过模拟草地对放牧的响应及放牧对草地的影响,是草地管理的基础,虽然导致生态系统改变的阈值尚不清楚^[127],生态过程对人类决策的反馈最终决定生态系统弹性。草地载畜量计算,采用地面数据结合模型模拟,有利于放牧管理决策。

参考文献:

- [1] Chapin III F S, Folke C, Kofinas G P. A framework for understanding change[A]. In: Chapin III F S, Kofinas G P, Folke C. Principles of Ecosystem Stewardship: Resilience-based Natural Resource Management in a Changing World[M]. New York, USA: Springer, 2009.

- [2] Herskovits M J. The cattle complex in East Africa[J]. *American Anthropologist*, 1926, 28(1): 230-272.
- [3] Bestelmeyer B T, Estell R E, Havstad K M. Big questions emerging from a century of rangeland science and management[J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2012, 65(6): 543-544.
- [4] Hardin G. The Tragedy of the Commons[J]. *Science*, 1968, 162: 1243-1248.
- [5] 刘金鑫, 宫渊波, 左琴, 等. 山地牧道与植被空间异质性研究评述[J]. *草业学报*, 2013, 21(1): 254-261.
- [6] Adano W R, Witsenburg K. Once nomads settle. assessing the process, motives and welfare changes of settlements on mount marsabit[A]. In: Fratkin E, Roth E A. *As Pastoralists Settle: Studies in Human Ecology and Adaptation*[M]. New York, USA: Springer, 2005.
- [7] 陈全功. 关键场与季节放牧及草地畜牧业的可持续发展[J]. *草业学报*, 2005, 14(4): 29-34.
- [8] 贾幼陵. 关于草畜平衡的几个理论和实践问题[J]. *草地学报*, 2005, 13(4): 265-268.
- [9] Batabyal A A, Godfrey E B. Rangeland management under uncertainty: A conceptual approach[J]. *Journal of Range Management*, 2002, 55(1): 12-15.
- [10] Galt D, Molinar F, Navarro J, *et al.* Grazing capacity and stocking rate[J]. *Rangelands*, 2000, 22(6): 7-11.
- [11] 汪诗平. 天然草原持续利用理论和实践的困惑[J]. *草地学报*, 2006, 14(2): 188-192.
- [12] Leeuw P N D, Tohill J C. The concept of rangeland carrying capacity in sub-saharan Africa: myth or reality[A]. In: Behnke R H, Scoones I, Kerven C. *Range Ecology at Disequilibrium: New Models of Natural Variability and Pastoral Adaptation in African Savannas*[M]. London: Overseas Development Institute, 1993.
- [13] 董世魁, 江源, 黄晓霞. 草地放牧适宜度理论及牧场管理策略[J]. *资源科学*, 2002, 24(6): 35-41.
- [14] Dhont A A. Carrying capacity: a confusing concept[J]. *Acta Oecologica Oecologia Generalis*, 1988, 9(4): 337-346.
- [15] Price D. Carrying capacity reconsidered[J]. *Population and Environment*, 1999, 21(1): 5-26.
- [16] Briske D D, Fuhlendorf S D, Smeins F E. Vegetation dynamics on rangelands: a critique of the current paradigms[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(4): 601-614.
- [17] Fernandez-Gimenez M E, Allen-Diaz B. Testing a non-equilibrium model of rangeland vegetation dynamics in Mongolia[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1999, 36(6): 871-885.
- [18] Vetter S. Rangelands at equilibrium and non-equilibrium: recent developments in the debate[J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62(2): 321-341.
- [19] Bell R V H. The effect of soil nutrient availability on community structure in African ecosystems[A]. In: Huntley B J, Walker B H. *Ecology of Tropical Savannas, Ecological Studies, V42*[M]. Berlin: Springer Verlag, 1982.
- [20] McKeon G M, Stone G S, Syktus J I, *et al.* Climate change impacts on northern Australian rangeland livestock carrying capacity: a review of issues[J]. *The Rangeland Journal*, 2009, 31(1): 1-29.
- [21] 黄富祥, 高琼, 赵世勇. 生态学视角下的草地载畜量概念[J]. *草业学报*, 2000, 9(3): 48-57.
- [22] 杨理, 侯向阳. 以草定畜的若干理论问题研究[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(3): 346-349.
- [23] Bell R H V. Carrying capacity and offtake quotas[A]. In: Bell R H V, McShane C E. *Conservation and Wildlife Management in Africa*[M]. Washington: Peace Corp, 1985.
- [24] 林波, 谭支良, 汤少勋, 等. 草地生态系统载畜量与合理放牧率研究方法进展[J]. *草业科学*, 2008, 25(8): 91-99.
- [25] 张林波, 李文华, 刘孝富, 等. 承载力理论的起源、发展与展望[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 878-888.
- [26] Malthus T R. *An Essay on the Principle of Population* [second edition][M]. New York, USA: Norton Critical Editions, 2003.
- [27] Verhulst P F. Instructions on the rule following population growth[J]. *Mathematical and Physical Correspondence*, 1838, 10: 113-121.
- [28] Pearl R, Reed L J. On the rate of growth of population of the United States since 1790 and its mathematic representatio[J]. *Proceedings of the National Academy of Science*, 1920, 6(6): 275-288.
- [29] Young C C. Defining the range: The development of carrying capacity in management practice[J]. *Journal of History of Biology*, 1998, 31(1): 61-83.
- [30] Scarnecchia D L. The relationship of stocking intensity and stocking pressure to other stocking variables[J]. *Journal of Range*

- Management, 1985, 38(6): 558-559.
- [31] Odum E P. Fundamentals of Ecology[M]. Philadelphia: W. B Saunders, 1953.
- [32] Sayre N F. Carrying capacity: genesis, history and conceptual flaws, prepared for the environmental politics colloquium[EB/OL]. http://www.michigandnr.com/publications/pdfs/wildlife/viewingguide/images/eco_carrycapacity.jpg, 2007-01-26.
- [33] Thomson G M. Acclimatization in New Zealand[J]. Science, 1886, 8: 426-430.
- [34] Hadwen S, Palmer L J. Reindeer in Alaska. USDA Bulletin, No 1089[R]. Washington: Department of Agriculture, 1922.
- [35] Martin S C, Reynolds H G. The santa rita experimental range: your facility for research on semidesert ecosystems[J]. Journal of the Arizona Academy of Science, 1973, 8(2): 56-67.
- [36] Griffiths D. Range Investigations in Arizona[M]. Washington, USA: Department of Agriculture, Bureau of Plant Industry, 1904.
- [37] Roach M E. Estimating perennial grass utilization on semidesert cattle ranges by percentage of ungrazed plants[J]. Journal of Range Management, 1950, 3(3): 182-185.
- [38] Reynolds H G. Meeting drought on southern Arizona rangelands[J]. Journal of Range Management, 1954, 7(1): 33-40.
- [39] Sampson A W. Range and Pasture Management[M]. New York, USA: John Wiley and Sons, Incorporation, 1923.
- [40] Dasmann W. A method for estimating carrying capacity of rangeland[J]. Journal of Forestry, 1945, 43(6): 400-402.
- [41] Society for Range Management. A Glossary of Terms Used in Range Management[M]. Denver, Colorado, USA: Edison Press, 1964.
- [42] 任继周. 草原调查与规划[M]. 北京: 中国农业出版社, 1985.
- [43] Society for Range Management. A Glossary of Terms Used in Range Management: a Definition of Terms Commonly Used in Range Management[M]. Denver, Colorado, USA: Society for Range Management, 1989.
- [44] Roe E M. Viewpoint: On rangeland carrying capacity[J]. Journal of Range Management, 1997, 50(5): 467-472.
- [45] Morrison F B. Feeds and Feeding[M]. Ithaca, New York: The Morrison Publishing Corporation, 1949.
- [46] FAO. Guidelines: Land evaluation for extensive grazing[S]. Rome: Soil Resources, Management and Conservation Service, Soils Bulletins Series No 58, 1988.
- [47] Moen A N. Wildlife Ecology, an Analytical Approach[M]. San Francisco, USA: W. H. Freeman, 1973.
- [48] Robbins C T. The Biological Basis for the Determination of Carrying Capacity[D]. Ithaca: Cornell University, 1973.
- [49] Hobbs N T, Swift D M. Estimates of habitat carrying capacity incorporating explicit nutritional constraints[J]. Journal of Wildlife Management, 1985, 49(3): 814-822.
- [50] Soest P J V, Sniffen C J, Mertens D R. A net protein system for cattle: The rumen submodel for nitrogen[A]. In: Owens F N. Protein Requirements for Cattle: Proceedings of an International Symposium[M]. Stillwater: Oklahoma State University, 1981.
- [51] Sniffen C J, O'Connor J D, Soest P J V, *et al.* A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability[J]. Journal of Animal Science, 1992, 70(11): 3562-3577.
- [52] Burns J C. Advancement in assessment and the reassessment of the nutritive value of forages[J]. Crop Science, 2011, 51: 390-402.
- [53] Holecheck J L, Vavra M, Pieper R D. Methods for determining the nutritive quality of range ruminant diets: A review[J]. Journal of Animal Science, 1982, 54(2): 363-376.
- [54] Dyne G M V, Torell D T. Development and use of the esophageal fistula: A review[J]. Journal of Range Management, 1964, 17(1): 7-19.
- [55] Torell D T. An esophageal gistula for animal nutrition studies[J]. Journal of Animal Science, 1954, 13(4): 878-884.
- [56] Dyne G M V, Brockington N R, Szocs Z, *et al.* Large herbivore subsystem[A]. In: Breymeyer A I, Dyne G M V. Grasslands, Systems Analysis and Man[M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1980.
- [57] Albrecht D T. Principles of Rational Agriculture[M]. Berlin: Realschulbuchhandlung, 1809.
- [58] 苏大学, 孟有达, 武保国. 中华人民共和国农业行业标准—天然草地合理载畜量的计算(NY/T 635-2002)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

- [59] 刘玉杰, 李向林, 何峰. 基于饲养标准的家畜单位折算方法[J]. 草地学报, 2009, 17(4): 500-504.
- [60] 郝力壮, 刘书杰, 吴克选, 等. 玛多县高山嵩草草地天然牧草营养评定与载畜量研究[J]. 中国草地学报, 2011, 33(1): 84-89.
- [61] Atwater W, Bryant A. The Availability and Fuel Value of Food Materials[R]. 12th Annual Report of the Storrs Connecticut Agricultural Experiment Station, 1900.
- [62] Sampson A W. Range Management: Principles and Practices[M]. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc., 1952.
- [63] Shultis A, Strong H T. Choosing Profitable Beef Production[M]. University of California: Agriculture extension services, 1955.
- [64] Harris L E. Measurement of the energy value of pasture and range forage[A]. American Society of Agronomy, American Dairy Science Association, American Society of Animal Production, *et al.* Pasture and Range Research Techniques[M]. Ithaca, New York: Comstock Publishing Associates, 1962.
- [65] 沈世英. 青海省草原畜牧业最适载畜量的研究[J]. 中国草原与牧草, 1986, 3(5): 1-6.
- [66] Osuji P O. The physiology of eating and the energy expenditure of the ruminant at pasture[J]. Journal of Range Management, 1974, 27(6): 437-443.
- [67] Lachica M, Aguilera J F. Estimation of energy needs in the free-ranging goat with particular reference to the assessment of its energy expenditure by the ¹³C-bicarbonate method[J]. Small Ruminant Research, 2003, 49(3): 303-318.
- [68] Young B A, Corbe J L. Maintenance energy requirement of grazing sheep in relation to herbage availability I. Calorimetric estimates[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1972, 23(1): 57-76.
- [69] Clapperton J L. The energy expenditure of sheep walking on the level and on gradients[J]. Proceedings of the Nutrition Society, 1961, 20(2): 31-32.
- [70] Svejcar T, Vavra M. The Influence of several range improvements on estimated carrying capacity and potential beef production[J]. Journal of Range Management, 1985, 38(5): 395-399.
- [71] 杨博, 吴建平, 杨联, 等. 中国北方草原草畜代谢能平衡分析与对策研究[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 187-195.
- [72] Scarnecchia D L, Gaskins C T. Modeling animal-unit-equivalents for beef cattle[J]. Agricultural Systems, 1987, 23(1): 19-26.
- [73] Scarnecchia D L. Concepts of carrying capacity and substitution ratios: a systems viewpoint[J]. Journal of Range Management, 1990, 43(6): 553-555.
- [74] Heady H F. Rangeland Management[M]. New York, USA: McGraw Hill Book Corporation, 1975.
- [75] Hocking D, Mattick A. Dynamic carrying capacity analysis as tool for conceptualizing and planning range management improvements, with a case study from India[A]. In: Pastoral Development Network, 34c[M]. London: Overseas Development Institute, 1993.
- [76] Mace R. Overgrazing overstated[J]. Nature, 1991, 349: 280-281.
- [77] Johnston P W, McKeon G M, Day K A. Objective 'safe' grazing capacities for south-west Queensland Australia: development of a model for individual properties[J]. The Rangeland Journal, 1996, 18(2): 244-258.
- [78] Condon R W. Estimation of grazing capacity on arid grazing lands[A]. In: Stewart G A. Land Evaluation: Papers of a CSIRO Symposium Organised in Cooperation with UNESCO[M]. Canberra: CSIRO Division of Land Research, 1968.
- [79] McKeon G M, Ash A J, Hall W B, *et al.* Simulation of grazing strategies for beef production in north-east Queensland[A]. In: Hammer G, Nicholls N, Mitchell C. Applications of Seasonal Climate Forecasting in Agricultural and Natural Ecosystems—The Australian Experience[M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Press, 2000.
- [80] Sampson A W. Plant succession in relation to range management[R]. Washington, U. S: Department of Agriculture, 1919.
- [81] Clements F E. Nature and structure of the climax[J]. Journal of Ecology, 1936, 24(1): 252-284.
- [82] Clements F E. Plant succession: An Analysis of the Development of Vegetation[M]. Washington: Carnegie Institution of Washington Publishing, 1916.
- [83] Caughley G. What is this thing called carrying capacity? [A]. In: Boyce M S, Hayden-Wing. North American Elk: Ecology, Behavior and Management[M]. Laramie, Wyoming: University of Wyoming Press, 1979.

- [84] Holechek J L, Pieper R D, Herbel C H. Range Management: Principles and Practices (6th Edition)[M]. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2010.
- [85] Holechek J L. Financial returns from different grazing management systems in New Mexico[J]. Rangelands, 1994, 16(6): 237-240.
- [86] Manley W A, Hart R H, Samuel M J, *et al.* Vegetation, cattle, and economic responses to grazing strategies and pressures[J]. Journal of Range Management, 1990, 50(6): 638-646.
- [87] Sandford S. Management of Pastoral Development in the Third World[M]. New York, USA: John Wiley and Sons, 1983.
- [88] Holechek J L, Gomez H, Molinar F, *et al.* Grazing studies: what we've learned[J]. Rangelands, 1999, 21(2): 12-16.
- [89] Klipple G E, Bement R E. Light grazing: Is it economically feasible as a range-improvement practice[J]. Journal of Range Management, 1961, 14(2): 57-62.
- [90] Hunt L P. Safe pasture utilisation rates as a grazing management tool in extensively grazed tropical savannas of northern Australia[J]. The Rangeland Journal, 2008, 30(3): 305-315.
- [91] Workman J P. Range Economics[M]. New York, USA: Macmillan, 1986.
- [92] Sandford S. Organisation and management of water supplies in tropical Africa[R]. Addis Ababa, Ethiopia: International Livestock Centre for Africa, 1983.
- [93] Dunn B H, Smart A J, Gates R N, *et al.* Long-term production and profitability from grazing cattle in the northern mixed grass prairie[J]. Rangeland Ecology & Management, 2010, 63(2): 233-242.
- [94] Westoby M, Walker B, Noy-Meir I. Opportunistic management for rangelands not at equilibrium[J]. Journal of Range Management, 1989, 42(4): 266-274.
- [95] Abel N O J. Comments on PDN paper 29a land degradation, stocking rates and conservation policies in the communal rangelands of Botswana and Zimbabwe[A]. In: Abel N O J, Blaikie P M. Pastoral Development Network Paper (29d)[M]. London: Overseas Development Institute, 1990.
- [96] Ellis J E, Swift D M. Stability of African pastoral ecosystems: alternate paradigms and implications for development[J]. Journal of Range Management, 1988, 41(6): 450-459.
- [97] Ellis J E. Climate variability and complex ecosystem dynamics: implications for pastoral development[A]. In: Scoones I. Living with Uncertainty: New Directions in Pastoral Development in Africa[M]. London: Intermediate Technology Publications, 1994.
- [98] May R M. Thresholds and breakpoints in ecosystems with a multiplicity of stable states[J]. Nature, 1977, 269: 471-477.
- [99] Lockwood J A, Lockwood D R. Catastrophe theory: a united paradigm for rangeland ecosystem dynamics[J]. Journal of Range Management, 1993, 46(4): 282-288.
- [100] Behnke R H, Scoones I. Rethinking range ecology: implications for rangeland management in Africa[A]. In: Behnke R H, Scoones I, Kerven C. Range Ecology at Disequilibrium, New Models of Natural Variability and Pastoral Adaptation in African Savannas[M]. London: Overseas Development Institute and International Institute for Environment and Development, 1993.
- [101] Campbell B M, Gordon I J, Luckert M K, *et al.* In search of optimal stocking regimes in semi-arid grazing lands: One size does not fit all[J]. Ecological Economics, 2006, 60(1): 75-85.
- [102] Campbell B M, Dore' D, Luckert M, *et al.* Economic comparisons of livestock production in communal grazing lands in Zimbabwe[J]. Ecological Economics, 2000, 33: 413-438.
- [103] Ritten J P, Frasier W M, Bastian C T, *et al.* Optimal rangeland stocking decisions under stochastic and climate-impacted weather[J]. American Journal of Agricultural Economics, 2010, 92(4): 1242-1255.
- [104] Coppock D L. Vegetation and pastoral dynamics in the southern Ethiopian rangelands: Implications for theory and management[A]. In: Behnke R H, Scoones I, Kerven C. Range Ecology at Disequilibrium[M]. London: Overseas Development Institute, 1993.
- [105] George M R, Brown J R, Clawson W J. Application of non-equilibrium ecology to management of Mediterranean grassland[J]. Journal of Range Management, 1992, 45(5): 436-440.

- [106] Illius A W, O'Connor T G. On the relevance of nonequilibrium concepts to semi-arid grazing systems[J]. *Ecological Applications*, 1999, 9(3): 798-813.
- [107] Illius A W, O'Connor T G. Resource heterogeneity and ungulate population dynamics[J]. *Oikos*, 2000, 89(2): 283-294.
- [108] Gillson L, Hoffman M T. Rangeland ecology in a changing world[J]. *Science*, 2007, 315: 53-54.
- [109] Cowling R M. Challenges to the 'new' rangeland science[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, 15(8): 303-304.
- [110] Quaas M F, Baumgärtner S. Optimal grazing management rules in semi-arid rangelands with uncertain rainfall[J]. *Natural Resource Modeling*, 2012, 25(2): 364-387.
- [111] Abel N, Ross H, Walker P. Mental models in rangeland research, communication and management[J]. *The Rangeland Journal*, 1998, 20(1): 77-91.
- [112] Hanson C L, Wight J R, Slaughter C W, *et al.* Simulation models and management of rangeland ecosystems: past, present, and future[J]. *Rangelands*, 1999, 21(4): 32-38.
- [113] Forrester J W. *Industrial Dynamics*[M]. Cambridge: M. I. T. Press, 1961.
- [114] Teague W R, Foya J K. Can the SPUR rangeland simulation model enhance understanding of field experiments? [J]. *Arid Land Research and Management*, 2004, 18(3): 217-228.
- [115] Group R S. PHYGROW: Phytomass growth simulator, version 2[S]. Mimeo, College Station, Department of Rangeland Ecology and Management, Texas A&M University, 1995.
- [116] Noy-Meir I. Rotational grazing in a continuously growing pasture: A simple model[J]. *Agricultural Systems*, 1976, 1(2): 87-112.
- [117] Burt O R. A dynamic economic model of pasture and range investments[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1971, 53(2): 197-205.
- [118] Bernardo D J. A dynamic model for determining optimal range improvement programs[J]. *Western Journal of Agricultural Economics*, 1989, 14(2): 223-234.
- [119] Stuth J W, Hamilton W T, Conner R. Insights in development and deployment of the GLA and NUTBAL decision support systems for grazinglands[J]. *Agricultural Systems*, 2002, 74(1): 99-113.
- [120] Hamilton W T, Sheehy D P, Stuth J W, *et al.* Introduction and Use of the Grazing Land Applications (GLA) Resource Planning System in China[C]. *Proceedings of the International Rangeland Development Symposium, 45th Annual Meeting*, Spokane, Washington, 1992.
- [121] Kreuter U P, Rowan R C, Conner J R, *et al.* Decision support software for estimating the economic efficiency of grazingland production[J]. *Journal of Range Management*, 1996, 49(5): 464-469.
- [122] Wight J R, Gebhardt K A, Huber A L, *et al.* RANGETEK: a decision aid for range management[A]. In: James E B, Hotchkiss W R. *Transferring Models to Users: Symposium Proceedings*. Denver, Colorado[M]. Bethesda, Maryland: American Water Resources Association, 1990.
- [123] 陈全功, 任继周, 王珈谊. 中国草业开发与生态建设专家系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [124] 李青丰, 齐智鑫. 草畜平衡管理系列研究(4)—草畜平衡计算软件开发[J]. *草业科学*, 2011, 28(11): 2042-2045.
- [125] Squires V R, Grierson I T, Thomas D A. The use of remote sensing and environmental resource measurements to determine the present and potential grassland production in semi-arid areas[A]. In: Yang H. *Proceedings of the International Symposium on Grassland Vegetation*[M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [126] Stuth J W, Angerer J, Kaitho R, *et al.* Livestock early warning system for Africa rangelands[A]. In: Boken V K, Cracknell A P, Heathcote R L. *Monitoring and Predicting Agricultural Drought: a Global Study*[M]. New York, USA: Oxford University Press, 2005.
- [127] Bedunah D J, Angerer J P. Rangeland degradation, poverty, and conflict: how can rangeland scientists contribute to effective responses and solutions? [J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2012, 65(6): 606-612.
- [128] Behnke R H, Kerven C. Redesigning for risk: tracking and buffering environmental variability in African's rangelands[A]. In: *Natural Resources Perspectives*[M]. London: Overseas Development Institute, 1994.
- [129] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, *et al.* Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems[J].

Ecology and Society, 2004, 9(2): 5.

A review of grassland carrying capacity: definition, theoretical consideration and model

XU Min-yun^{1, 2}, HE Jin-sheng¹

(1. College of Urban and Environment, Peking University, Beijing 100871, China; 2. College of Animal Science & Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract: Based on equilibrium theoretical models, the response of vegetation to grazing pressure is linear and reversible, and can be manipulated predictably with stocking rates. This equilibrium-based theoretical model advocates a conservative stocking strategy to maintain internal ecosystem regulation and stability. The management goal is to maintain a balance between stocking numbers and feeding resources. In contrast, 'new rangeland science' based on non-equilibrium ecological dynamics placed greater emphasis on external disturbances as drivers of ecosystem behavior. The 'new science', proposes that plant composition and biomass in semi-arid rangelands are primarily driven by rainfall and not by grazing pressure. Management of such systems should be opportunistic and take advantage of, or create, conditions which allow switches to a more desirable state. There are two major approaches: plant- or animal-oriented, to determine rangeland carrying capacity (CC). The traditional technique for determining CC is to calculate the total amount of forage at the end of the growing season, multiply this by a correction factor, and then divide by the average yearly feeding requirements of a livestock unit. Using total herbaceous forage productivity as the single criterion to predict the livestock support capacity has been criticized because biomass quality and feeding value for livestock and livestock nutritional needs are largely ignored. Based on research progress, the development and evolution, controversy in the application of the CC concept are summarized. The plant-, animal- (including standard hay-, total digestible nutrients- digestible crude protein- and energy-oriented) oriented CC was also compared. It is evident that in view of the seasonal variation in nutrient content of natural herbage, animal-oriented permissible stocking rates on the whole tend to be lower than those predicted by the plant-oriented approach. The most complete approach to evaluate primary and secondary productivity of rangelands should combine plant- and animal-based methods, rather than just plant oriented. In the case of a conservative grazing strategy, stocking rate was stable and grazing pressure fluctuated while for an opportunistic grazing strategy, stocking rate was unstable and grazing pressure was stable. Both equilibrium and non-equilibrium dynamics are found in rangelands, often at different times or governing different parts of the resource. Either conservative or opportunistic strategies could be correct, depending on the circumstances, including environmental variability and predictability, degradation and thresholds, property right regimes, discount rates, and market stability and prices. Finally, rangeland science and management are ultimately based on ecological models. In making management decisions, the specific model used is important because it determines both the expected ecosystem response to particular actions, as well as the strategies to attain desired conditions. The ecological model and grazing lands applications are summed up to provide reference for grazing management decision.

Key words: grassland carrying capacity; equilibrium theory; new grassland science; grazing strategy; grassland ecology model