

DOI: 10.5846/stxb201906171276

于慧,王根绪,杨燕,吕雅琼.草地绿色承载力概念及其在国家公园中的应用框架.生态学报,2020,40(20):7248-7254.

Yu H, Wang G X, Yang Y, Lü Y Q. Concept of grassland green carrying capacity and its application framework in national park. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7248-7254.

草地绿色承载力概念及其在国家公园中的应用框架

于 慧^{1,2}, 王根绪^{1,2,*}, 杨 燕^{1,2}, 吕雅琼^{1,2}

1 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 针对国家公园, 在草地承载力的基础上, 从如何解决野生动物种群多样性与繁衍兴盛, 实现禁牧减畜后的牧民脱贫致富, 保障不断增长的生态体验或旅游经济发展需求的视角出发, 以生态功能维护+草畜平衡+生态体验为架构, 提出草地绿色承载力概念; 从生态系统支撑条件、草地生产力、野生动物与家畜承载规模、农牧民与生态体验人口承载规模、监测预警 5 个维度, 构建草地绿色承载力评价体系; 提出三江源国家公园草地绿色承载力应用框架, 以期科学制定建设规划和发展目标, 推动三江源国家公园生态保护与区域可持续发展提供理论依据。

关键词: 草地绿色承载力; 三江源国家公园; 生态功能; 草畜平衡; 生态体验

Concept of grassland green carrying capacity and its application framework in national park

YU Hui^{1,2}, WANG Genxu^{1,2,*}, YANG Yan^{1,2}, LÜ Yaqiong^{1,2}

1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: A concept of grassland green carrying capacity was proposed with considerations to national park based on grassland carrying capacity. A conceptual framework of grassland green carrying capacity composed of ecological functional maintaining+forage-livestock balance+ecological experience to solve problems of how to solve population diversity and reproduction of wild animals, improve living standards of herdsman after the implementation of reduced-livestock and forbidden-grazing policy, and protect the increasing ecological experience or tourism economic development demands. Moreover, an evaluation index system of grassland green carrying capacity was constructed from five perspectives of supporting conditions of ecosystem, grassland productivity, carrying capacity scale of wild animals and livestock, and carrying capacity scale of peasants, herdsmen and ecological experience population, and monitoring and warning. A case study based on the Three-River-Source National Park was carried out. Research conclusions provide theoretical references to formulate scientific construction plans and development goals, and promote ecological protection and sustainable regional development of the Three-River-Source National Park.

Key Words: grassland green carrying capacity; Three-River-Source National Park; ecological functions; grass-livestock balance; ecological experience

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 A 类 (XDA23060601); 国家自然科学基金面上项目 (41671529); 四川省科技计划重点研发项目 (2019YFS0467)

收稿日期: 2019-06-17; **网络出版日期:** 2020-08-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanggx@imde.ac.cn

承载力理论起源于人口统计学、种群生物学和应用生态学^[1-3]。承载力概念的提出可以追溯到马尔萨斯的人口增长理论^[2],用容纳能力指标反映环境约束对人口增长的限制作用是现今承载力起源^[4]。承载力研究经历起源奠基、应用探索和理论深化3个阶段^[5],并从单要素发展到多要素制约承载力^[6-7],但尚未形成一套统一的理论与方法体系^[5]。

生态承载力概念演化是人类社会与自然界在发展过程中衍生的产物。有关生态承载力概念已开展了大量工作。Andrew、Hudak T定义生态承载力为特定时期内植被所能提供的最大种群数量。最佳承载力意在表达系统所有服务功能和产品最盈水平^[8]。杨理认为生态承载力是在资源合理开发利用和环境良性循环的条件下,“自然资源-生态环境-社会经济”复合生态系统的承载能力与承载对象压力的反映^[9]。高吉喜、王宁等认为生态承载力是在特定时期区域内生态系统的自我维持、调节、发展能力,以及资源与环境子系统所能承载的人口数量和维持的生态、经济、社会可持续发展的能力^[10-11]。就目前研究现状来看,生态承载力评估主要从资源供求的角度进行,其方法和理论有待完善^[12]。

20世纪初, Hadwen 和 Palmer 将“承载力”一词引入草原管理,载畜量被赋予科学含义,即草地资源不受破坏前提下,一定面积的草地能够承载的家畜数量^[13]。载畜量是草地承载力研究的基础和关键环节^[14],草地承载力研究主要集中于牧草产量、家畜采食量和载畜量等方面^[15-17]。现有草畜平衡研究较少考虑野生动物的需求量。尽管青海省出台了《三江源国家公园管理规范和技术标准应用指南》、《三江源国家公园标准体系导则》等相关文件,但主要是关于国家公园建设标准和管理规范体系方面的规定,仍然有很多科学问题值得深入探讨和研究。三江源国家公园草地生态系统承载着区域畜牧业的发展和当地居民的生存生活,随着社会经济的发展,其承载压力日益增加。因此,如何科学构建国家公园草地绿色承载力评价体系,将牲畜控制合理的规模和空间范围内并科学支撑草畜平衡,成为亟待解决的科学问题。本文以三江源国家公园为例,对草地承载力概念进行拓展和提升,形成草地绿色承载力概念,以满足国家公园对生态系统稳定维持、野生动植物有效保护的需求,以期为解决草畜平衡、人畜平衡问题提供思路和决策依据。

1 草地绿色承载力概念和特征

1.1 草地绿色承载力的概念

研究草地生态承载力的学者们^[18-19]认为自然生态系统承载力应以载畜量来衡量。生态承载力主要强调系统承载功能,突出的是对人类活动的承载能力,在确保资源的合理开发利用和生态环境良性循环情况下,可持续承载的人口、经济社会总量的能力^[20]。

随着人们认识的深入,草地承载力理论和方法体系也是不完善、创新提升的过程。草地绿色承载力是基于草地承载力提出的新概念,是对草地承载力的拓展和提升。以生态功能维护+草畜平衡+生态体验为草地绿色承载力概念框架,定义草地绿色承载力,即指稳定维持并不断提升生态系统关键功能条件下,维护草畜平衡、人畜平衡,既能满足生态体验需求又能满足区域经济社会可持续发展需要的草地承载能力。草地绿色承载力的“载体”是整个草地生态系统,“承载对象”包括动物和人两部分,其中,“动物”主要指野生动物和家畜、“人”指当地的农牧民和生态体验者。

草地绿色承载力注重生态系统的整体效应,重点研究草地生态体系中关键承载要素的生态承载能力与承载对象之间的耦合协调关系,核心研究内容包括生态系统关键功能测度、草地生产力估算、合理载畜规模与合理人口承载测算、草地绿色承载力预警5个部分,需要解决的关键问题是草畜平衡与人畜平衡、生态系统关键功能稳定维持与提升、生态体验需求与牧民脱贫致富。草地绿色承载能力反映草地系统状态与承载水平,是衡量草地可持续发展能力有力工具,其理论及研究方法是生态学、资源学和生态经济学研究的交叉前沿领域。

1.2 草地绿色承载力的特征

(1) 动态性。对于一定数量和质量的草地资源来说,草地绿色承载力不是一成不变的。在不同的生态演变发展阶段,人类活动对生态环境影响力和治理力度有所差异^[21]。

(2)有限性。有限性指在给定技术水平和经济规模等影响因素的条件下,有限的草地资源存在对社会经济和环境的最大支持能力^[22]。

(3)空间异质性。草地系统结构和过程、区域水热组合条件具有明显的空间分异特征,草地绿色承载力同样也具有空间异质性。

(4)相对性。草地绿色承载力的研究涉及到自然社会经济这一复杂系统,原本脆弱的生态环境加上系统内部因素之间影响的不确定性也决定草地绿色承载力具有不确定性。因此,承载能力的衡量不是绝对的,而是相对的^[23]。

2 草地绿色承载力与草地承载力区别

草地绿色承载力的“绿色”在传统概念中生态系统关键功能稳定维持的基础上,突出了生态系统关键功能不断提升的理念。在传统概念中满足区域经济社会可持续发展需要的基础上,即鼓励生态体验需求,又突出了草畜平衡、人畜平衡对生态体验的限制和约束力。草地绿色承载力以生态系统稳定维持、野生动植物有效保护为前提目标,将需要解决的关键问题由传统意义的草畜平衡拓展为草畜平衡与人畜平衡,将牧民脱贫致富与生态体验需求有机耦合。针对国家公园这一特殊的保护地,草地绿色承载力评价体系将草地绿色承载力预警、最优承载规模纳入其中,强调生态环境短板要素识别,探索稳定维持并不断提升生态系统关键功能下区域经济社会可持续发展的有效途径。

表1从定义、承载体、承载对象、功能、评价体系、解决问题等角度,阐述了草地绿色承载力与草地承载能力的区别与联系。草地绿色承载力既有传统意义上草地承载能力的传承,也有拓展和提升。

表1 草地绿色承载力与草地承载力对比表

Table 1 Comparison between grassland green carrying capacity and grassland carrying capacity

项目 Item	草地绿色承载力 Grassland green carrying capacity	草地承载能力 Grassland carrying capacity
定义 Definition	草地绿色承载力稳定维持并不断提升生态系统关键功能条件下,维护草畜平衡、人畜平衡,既能满足生态体验需求又能满足区域经济社会可持续发展需要的草地承载能力。	草地承载能力准确反应草地生态系统容纳牲畜压力的最大能力 ^[24] 。
承载体 Carrying body	整个草地生态系统。	牧草 ^[25] 或可食牧草 ^[14] 。
承载对象 Carrying object	包括动物和人两部分,其中,“动物”主要指野生动物和家畜,“人”指当地的农牧民和生态体验者。	有的学者认为以载畜量来衡量 ^[14,18-19] 。也有认为承载对象是人类及一定生活质量的人类活动 ^[25] 。
功能 Function	稳定维持并不断提升生态系统关键功能;既能满足生态体验需求又能满足区域经济社会可持续发展需要。	确保资源的合理开发利用和生态环境良性循环 ^[25] 。
评价体系 Evaluation system	包括生态系统关键功能测度、草地生产力估算、合理载畜规模与合理人口承载测算、草地绿色承载力预警5个部分。	可食牧草量与草地载畜量 ^[14] 。
解决问题 Solve the problem	草畜平衡与人畜平衡、生态系统关键功能稳定维持与提升、生态体验需求与牧民脱贫致富。	草畜平衡 ^[14,16,24]

3 三江源国家公园草地绿色承载力评价体系与应用框架

三江源国家公园由长江源(可可西里)、黄河源、澜沧江源三个园区构成,总面积为12.31万km²,属于国家级重点生态功能区,草地生态系统是三江源国家公园下垫面的主要生态系统。按照《全国主体功能区规划》^[26],国家级重点生态功能区以保护和修复生态环境、提供生态产品为首要任务,因地制宜地发展不影响主体功能定位的适宜产业。根据《三江源国家公园条例(试行)》^[27](以下简称《条例》),三江源国家公园按照生态系统功能、保护目标和利用价值划分为核心保育区、生态保育修复区、传统利用区等3类功能区,实行差别

化保护。基于各功能区的差异化保护目标,三江源国家公园草地绿色承载力评价体系的应用框架,主要包括各功能区核心目标与关键问题解析、草地绿色承载力评价体系和评价模块 3 个部分。

3.1 核心目标与关键问题解析

针对三江源国家公园,解析各功能区的核心目标。在草地绿色承载力评价中体现各功能区关键问题的解决路径。

3.1.1 生态功能维护提升

根据《条例》,三江源国家公园核心保育区以强化保护和自然恢复为主,提高水源涵养和生物多样性服务功能。保育修复区加强退化草地和沙化土地治理、水土流失防治、林地保护。

草地生态系统承担着水源涵养、生物多样性等重要生态功能。放牧是对高寒草地影响最为广泛也是最常见的土地利用方式^[28]。根据中度干扰假说,中等程度的干扰既能刺激物种竞争,此时生态系统具有较高的物种多样性和生态系统生力^[29]。外界如何适度放牧干扰,提高资源有效性,维护生态功能,科学确定承载力阈值,将物种多样性和生态系统生产力同时维持在最佳水平成为核心保育区、保育修复区亟待解决的科学问题。

3.1.2 草畜平衡与人畜平衡

根据《条例》,三江源国家公园的生态保育修复区实行严格的禁牧、休牧、轮牧,逐步实现草畜平衡。传统利用区适度发展生态畜牧业,合理控制载畜量,保持草畜平衡。因此,生态保育修复区和传统利用区以草畜平衡与人畜平衡为核心问题。

草地畜牧业的核心问题是草畜平衡问题^[30]。平衡理论强调家畜和草地资源之间的生物反馈,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^[16]。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^[31],合理的放牧率是放牧决策管理的基础^[32]。科学地确定草地载畜量(包括野生食草动物和家畜),实现草畜平衡与人畜平衡是关键科学问题。

3.1.3 生态体验塑造与牧民脱贫致富

根据《建立国家公园体制总体方案》(2017),国家公园的首要功能是重要自然生态系统的原真性、完整性保护,同时兼具科研、教育、游憩等综合功能。同时,《条例》指出:三江源国家公园实行严格保护,除生态保护修复工程和不损害生态系统的居民生活生产设施改造,以及自然风光、科研教育、生态体验外,禁止其他开发建设,保护自然生态和自然文化遗产的原真性、完整性。

国家公园发展生态旅游,是以生态旅游资源为载体,向社会公众提供生态旅游产品的过程。在三江源国家公园试点区适度开展生态观光、科考探险、野生动物观赏、民族文化体验、宗教朝圣等生态旅游活动。探索人与自然和谐发展的模式,塑造好当地农牧民全面发展与牧民脱贫致富、资源环境有效保护与科学利用的生态体验模式。

3.2 草地绿色承载力评价体系

在稳定维持并不断提升生态系统关键功能前提下,从如何解决野生动物种群多样性与繁衍兴盛,实现禁牧减畜后的牧民脱贫致富,保障不断增长的生态体验或旅游经济发展需求的视角出发,构建草地绿色承载力评价体系。草地绿色承载力评价体系由生态系统关键功能模块、草地生产力模块、载畜规模模块、人口承载模块、监测预警模块 5 个部分。三江源国家公园草地绿色承载力评价体系见图 1。

草地绿色承载力评价体系的基本思路是在生态系统服务功能评价(约束力)的基础上,结合遥感方法、地面调查等手段,获取地表植被、水源涵养、水土保持等基础数据,评估生态系统支撑条件,衡量草地生态系统自平衡、自调节能力,揭示生态体系维持生态功能的阈值,为监测预警模块提供科学支撑;测算可食性牧草(承载体)的空间分布数据,评估草地生产力。以此为基础,优先保障野生动物(承载对象)的可食牧草最大需求量前提下,测算合理的家畜载畜量(承载对象);在充分考虑到牧民脱贫致富、生态体验地可持续发展和生态系统能保持自我平衡与调节能力的前提下,结合人口承载力模型,测算农牧民最优承载规模、生态体验活动所能容纳的最大游客数(承载对象),提出适宜产业、合理的人口布局及承载规模,为三江源区国家公园科学制

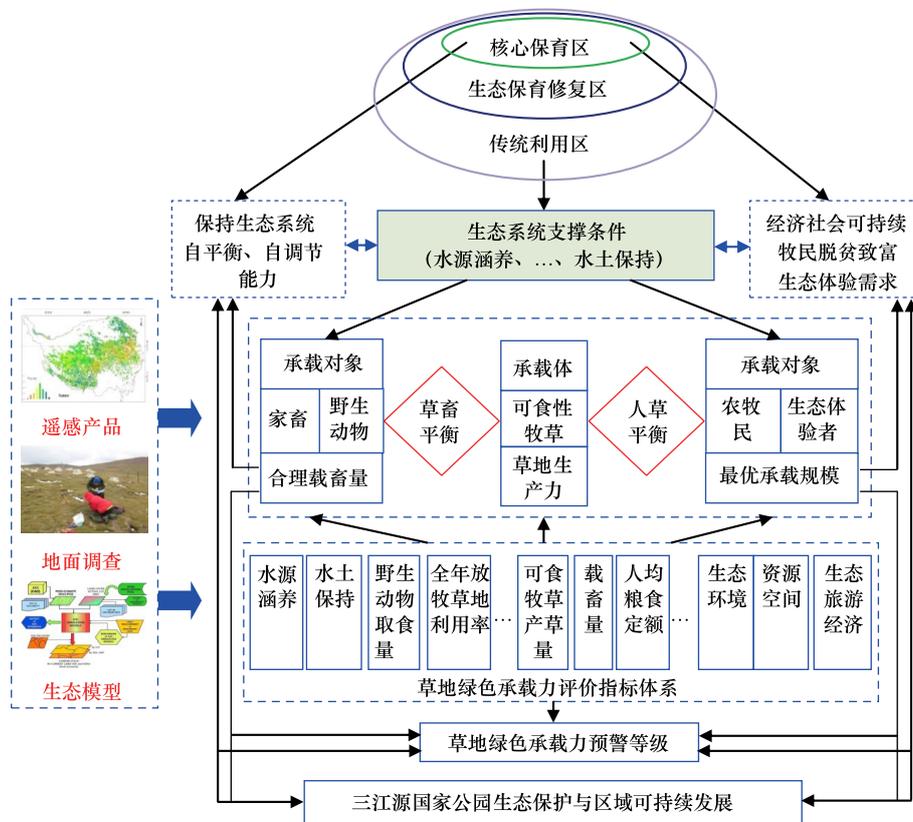


图1 三江源国家公园草地绿色承载力评价体系框架图

Fig.1 Technique flow chart of green carrying capacity in Three-River-Source National Park

定建设规划和发展目标、划分草地绿色承载力预警等级,推动三江源国家公园生态保护与区域可持续发展提供理论依据和基本思路。

3.3 草地绿色承载力评价模块

在3.2 章节中介绍了草地绿色承载力评价由5 个模块组成,这里就5 个模块的相互支撑关系(图2)以及可能涉及的相关评价方法做简要介绍。

五大模块之间是相互支撑、互相反馈的作用机制。其中,模块1 为模块2 草地生产力测算提供数据支撑,为模块5 提供预警的关键参数阈值;模块2 支撑模块3 和4 承载对象测算并限制最大承载规模;模块3 和模块4 为模块5 提供承载规模关键预警参数;模块5 达到预警状态,识别短板要素,为政府决策提供依据。

草地绿色承载力评价可通过构建多目标规划模型,测算合理的野生动物与家畜载畜量,解决生态系统功能

提升、草畜平衡问题;测算农牧民最优承载规模、生态体验活动所能容纳的最大游客数,解决人草平衡与生态系统功能维护的问题。随着认识的不断深入,草地绿色承载力评价5 大模块的相关研究方法将根据研究的需要做相应调整。

3.3.1 生态系统关键功能模块

在分析生态系统服务功能、特征的基础上。识别评估区的主导生态服务功能和关键生态问题,进而确定

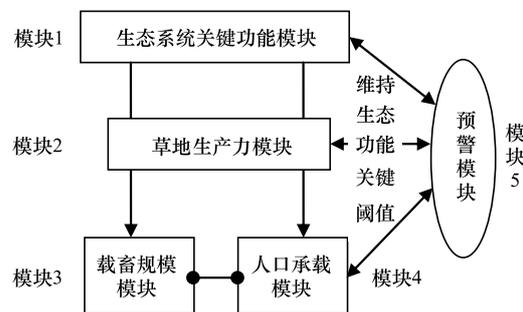


图2 草地绿色承载力评价模块关系图

Fig.2 The module relation diagram of grass green carrying capacity

相应的评估指标。如三江源国家公园选择评估时重点考虑水源涵养重要性、防风固沙功能和水土保持功能等,通过地面调查实验和遥感数据等方式获取评估所需基础数据,开展生态系统关键功能评价,揭示关键参数阈值。

$$[\text{生态系统服务功能重要性}]^{[31]} = \text{Max}([\text{水源涵养重要性}], \dots, [\text{防风固沙功能重要性}], [\text{水土保持重要性}]) \quad (1)$$

水源涵养重要性以水源涵养能力或水源涵养量作为衡量指标,主要考虑河流源区、河流供水功能、地表覆盖、地形等因子^[31]。公式如下:

$$\text{水源涵养量}(TQ) = \sum_i^j (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^3 \quad (2)$$

式中: P_i 为降雨量, R_i 为地表径流量, ET_i 为蒸散发量, A_i 为*i*类生态系统面积。

防风固沙功能重要性以防风固沙量作为主要评估指标,采用修正的风蚀方程来进行计算,主要考虑因素有风速、降雨、温度、土壤、地形和植被等^[31]。公式如下:

$$\text{防风固沙量} = \text{潜在风蚀量} - \text{实际风蚀量} \quad (3)$$

水土保持重要性以水土保持量作为评价指标,采用修正的水土流失方程进行计算^[31-32]。公式如下:

$$A = R \times K \times L \times S \times (1 - C) \quad (4)$$

式中: A 为水土保持量, R 为降水因子, K 为土壤侵蚀因子, L 、 S 为地形因子, C 为植被覆盖因子。

3.3.2 草地生产力模块

草地生产力(B)是指区域在某段时间内生产的牧草干物质总产量^[33]。计算公式如下:

$$B = \text{NPP} / S(C + 1) \quad (5)$$

式中: S 为草地生物量换算成 NPP 的转换系数, C 为地下与地上部分生物量比例系数。

3.3.3 载畜规模模块

草地理论载畜量指在确保野生动物的牧草需求量的前提下,剩余可食用牧草的载畜量,其计算公式为:

$$\text{TGC}_i = (EL_i - PN_i) / (I \times D) \quad (6)$$

式中, TGC_i 代表理论草地载畜量, EL_i 代表可食用的牧草生物量, PN_i 代表野生动物牧草需求量, D 为放牧天数, I 为标准绵羊单位的采食量。

3.3.4 人口承载模块

基于草地生产力的人口合理规模,指在一定的放牧时间内,保证野生食草动物及家畜正常生长的前提下所能承载的人口规模。计算公式如下:

$$PS = [Y \times E \times C / (I \times D \times L)] / P \quad (7)$$

式中, PS 为人口规模, Y 为单位面积内的可食牧草产量, E 为全年放牧草地利用率, C 为实际可利用可食牧草面积, I 为绵羊单位日食量, D 为放牧草地的放牧天数, L 为牦牛、绵羊、马等家畜转换等到标准羊总数, P 为人均粮食定额。

生态体验最优承载规模主要通过生态体验活动所能容纳的最大游客数来反映,包括生态环境、资源空间、生态旅游三个部分。

$$\text{生态环境承载力模型:EECC} = \text{Min}(\text{水体环境承载力}, \text{大气环境承载力}, \dots) \quad (8)$$

$$\text{资源空间承载力模型:RECC} = \text{步道长度承载力} + \text{景点面积承载力} \quad (9)$$

$$\text{生态旅游承载力模型:TECC} = \text{Min}(\text{住宿承载力}, \text{餐饮承载力}, \dots) \quad (10)$$

3.3.5 监测预警模块

草地绿色承载力预警主要是指主控因子超过生态系统功能维持的关键参数阈值、草畜平衡与人畜平衡的最大承载阈值时,草地绿色承载力呈现预警状态,其计算公式为:

$$\text{草地绿色承载力监测预警模型:GEEW} = \text{Max}(\text{生态功能维持阈值}, \text{草畜平衡阈值}, \text{人畜平衡阈值}, \dots) \quad (11)$$

4 结语

在草地系统绿色发展理念的指引下,基于已有的基础理论与方法,逐渐完善草地承载力理论与评估方法体系,提出了草地绿色承载力概念,明确了草地绿色承载力的承载体、承载对象。在传统草地承载力的基础上,从生态系统支撑条件、草地生产力、野生动物与家畜承载规模、农牧民与生态体验人口承载规模、监测预警五个维度,创建草地绿色承载力评价体系并构建三江源国家公园草地绿色承载力应用框架,为科学合理测算生态系统功能、载畜量、农牧民最优承载规模、生态体验最优游客数等提供理论依据和技术支撑,为推动三江源国家公园生态保护与区域可持续发展提供决策依据。随着研究和认识的不断深入,相关研究方法体系将会做相应调整,希望通过本研究可以抛砖引玉,建立更加科学合理的草地绿色承载力评估体系。研究团队也将根据草地绿色承载力评价体系,在三江源国家公园开展深入的研究,以期为解决生态系统关键功能稳定维持与提升、野生动物种群多样性与繁衍兴盛、禁牧减畜后牧民脱贫致富、不断增长的生态体验或旅游经济发展需求的冲突问题找到解决突破口。

参考文献 (References):

- [1] Graymore M. Journey to Sustainability: Small Regions, Sustainable Carrying Capacity and Sustainability Assessment Methods [D]. Queensland: Griffith University, 2005.
- [2] Seidl I, Tisdell C A. Carrying capacity reconsidered: from Malthus' population theory to cultural carrying capacity. *Ecological Economics*, 1999, 31 (3): 395-408.
- [3] Clarke A L. Assessing the Carrying Capacity of the Florida Keys. *Population and Environment*, 2002, 23(4): 405-418.
- [4] Hardin G. Cultural capacity: a biological approach to human problems. *Bioscience*, 1986, 36(9): 599-604.
- [5] 张林波, 李文华, 刘孝富, 王维. 承载力理论的起源、发展与展望. *生态学报*, 2009, 29(2): 878-888.
- [6] Marten G G, Sancholuz L A. Ecological land-use planning and carrying capacity evaluation in the Jalapa region (Veracruz, Mexico). *Agro-Ecosystems*, 1982, 8(2): 83-124.
- [7] Hegenbarth J L. Carrying Capacity Study of Hatteras Island. Baltimore, MD, USA: ASCE, 1985.
- [8] Heady H F. Rangeland Management. New York, USA: McGraw Hill Book Corporation, 1975.
- [9] 杨理, 侯向阳. 以草定畜的若干理论问题研究. *中国农学通报*, 2005, 21(3): 346-349.
- [10] 高吉喜. 可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用. 北京: 中国环境科学出版社, 2001: 12-80.
- [11] 王宁, 刘平, 黄锡欢. 生态承载力研究进展. *中国农学通报*, 2004, 20(6): 278-281, 385-385.
- [12] 刘东霞, 张兵兵, 卢欣石. 草地生态承载力研究进展及展望. *中国草地学报*, 2007, 29(1): 91-97.
- [13] Hadwen S, Palmer L J. Reindeer in Alaska. *USDA Bulletin*, No 1089. Washington: Department of Agriculture, 1922.
- [14] 赵卫, 沈渭寿, 刘波, 林乃峰, 王涛. 西藏地区草地承载力及其时空变化. *科学通报*, 2015, 60(21): 2014-2028.
- [15] 徐斌, 杨秀春, 金云翔, 王道龙, 杨智, 李金亚, 刘海启, 于海达, 马海龙. 中国草原牧区和半牧区草畜平衡状况监测与评价. *地理研究*, 2013, 31(11): 1998-2006.
- [16] 徐敏云, 贺金生. 草地载畜量研究进展: 概念、理论和模型. *草业学报*, 2014, 23(3): 313-324.
- [17] Sullivan S, Rohde R. On non-equilibrium in arid and semi-arid grazing systems. *Journal of Biogeography*, 2002, 29(12): 1595-1618.
- [18] Lockwood J A, Lockwood D R. Catastrophe theory: a unified paradigm for rangeland ecosystem dynamics. *Journal of Range Management*, 1993, 46 (4): 282-288.
- [19] Roe E M. Viewpoint: on rangeland carrying capacity. *Journal of Range Manage*, 1997, 50(5): 467-472.
- [20] 邓波, 洪绂曾, 高洪文. 试述草原地区可持续发展的生态承载力评价体系. *草业学报*, 2004, 13(1): 1-8.
- [21] 赵东升, 郭彩霞, 郑度, 刘磊, 吴绍洪. 生态承载力研究进展. *生态学报*, 2019, 39(2): 399-410.
- [22] 程国栋. 承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架. *冰川冻土*, 2002, 24(4): 361-367.
- [23] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 607-616.
- [24] 萨仁高娃. 浅谈草地承载能力与家畜配置研究. *草原与草业*, 2015, 27(3): 11-14.
- [25] 林波, 谭支良, 汤少勋, 孙志洪, 王敏. 草地生态系统载畜量与合理放牧率研究方法进展. *草业科学*, 2008, 25(8): 91-98.
- [26] 国务院. 国务院关于印发全国主体功能区规划的通知(国发[2010]46号). 北京: 国务院, 2010.
- [27] 青海省人民代表大会常务委员会. 三江源国家公园条例(试行). 青海: 青海省人民代表大会常务委员会, 2017.
- [28] 张春花. 放牧方式和施肥梯度对高寒草甸群落生产力和物种丰富度的影响. *草业科学*, 2014, 31(12): 2293-2300.
- [29] 张中华, 周华坤, 赵新全, 姚步青, 马真, 董全民, 张振华, 王文颖, 杨元武. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系. *生物多样性*, 2018, 26(2): 111-129.
- [30] 陈全功. 关键场与季节放牧及草地畜牧业的可持续发展. *草业学报*, 2005, 14(4): 29-34.
- [31] 自然资源部. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(征求意见稿). 北京: 自然资源部, 2019-03.
- [32] Scarnecchia D L. Concepts of carrying capacity and substitution ratios: a systems viewpoint. *Journal of Range Management*, 1990, 43(6): 553-555.
- [33] 王琪, 吴成永, 陈克龙, 张肖, 张乐乐, 丁俊霞. 基于 MODIS NPP 数据的青海湖流域产草量与载畜量估算研究. *生态科学*, 2019, 38(4): 178-185.