西藏地区草地承载力及其时空变化

赵卫^①, 沈渭寿^{①*}, 刘波^①, 林乃峰^①, 王涛^{①②}

① 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042;

② 南京信息工程大学地理与遥感学院, 南京 210044

* 联系人, E-mail: shenweishou@163.com

2014-12-03 收稿, 2015-03-12 接受, 2015-06-11 网络版发表

国家自然科学基金(41201456)和国家环境保护公益性行业科研专项项目(201209032)资助

摘要 在不适合和不能放牧区域划定、满足生态保护需要的牧草生物量估算、草地生产能力修正等的基础上, 开展西藏地区县域草地承载力及其时空变化研究, 分析农业、林业等补饲对草地承载力的影响机制, 以及草地承载力与草地生态状况变化的相互关系. 结果表明: (1) 西藏地区县域草地载畜量和补饲载畜量呈显著的地域差异, 主要影响因素分别为水分条件和热量因素; (2) 2011年藏东南、藏西北部分县域草地资源仍有盈余, 但是全区及其多数县域草地生态系统处于超载状态且自2000年以来不断加剧, 草地承载状况及其动态变化的空间自相关性下降、空间异质性增强; (3) 牲畜存栏量增长过快、草地资源供需空间匹配不协调是造成草地超载且不断加剧的主要原因; (4) 通过缓解草地资源供需的不平衡性和不协调性, 农业、林业等补饲可以改善全区尤其是农业县、半农半牧县草地承载状况, 但对草地承载状况变化趋势的影响有限; (5) 县域草地生态状况的下降趋势与其草地超载、草地承载率下降具有较强的相关性. 因此, 适合放牧区域划定、牲畜存栏量控制和畜牧业布局优化是改善西藏地区草地承载状况、减缓其草地生态状况下降趋势的主要途径.

关键词

草地承载力
补饲
适合放牧区域
县域
西藏

畜牧业既是西藏地区经济发展的传统产业和基础产业, 也是该区农牧民生产、生活资料的主要来源^[1]. 作为畜牧业发展的主要生产资料, 草地资源在西藏地区分布广泛且类型多样, 但是草层低矮稀疏、产草量普遍较低、地域差异和季节不平衡性显著, 对畜牧业生产和布局构成强烈约束^[2,3]. 而且近年来西藏部分地区因超载过牧引起的草地退化严重, 对其生态安全屏障功能构成不利影响^[4]. 以草定畜、草畜平衡成为西藏地区畜牧业可持续发展、草地生态良性循环和国家生态安全屏障维护的根本保障^[5].

草地承载力是实施以草定畜、草畜平衡制度的重要依据, 广泛用于草场管理、畜牧业发展和生态保护等领域^[6-8]. 载畜量是草地承载力研究的基础和关键环节, 因植被类型、气候、土壤等条件的影响而不

同^[8]. 研究初期, 载畜量强调草地资源不受破坏、牧草和家畜生长不受影响, 近年来土地资源、饲草料资源、生态服务功能等因素也逐渐纳入载畜量定义^[9-11]. 特定期限内, 一定面积草地可持续承载的家畜数量是各种载畜量定义的共同特征, 以确定草地牧草产量、牧草利用率和家畜采食量为核心^[7,11]. 包括可利用草地面积系数、可食牧草比例和放牧利用率等参数的牧草利用率是特定草地上引起载畜量变化的关键因素, 其变化甚至可使“载畜量”发生成倍的变化^[11,12]. 但是与草地牧草产量、家畜采食量等研究相比, 当前牧草利用率研究仍然较为薄弱, 各类研究对牧草利用率的界定不尽相同, 尚未形成系统、完整的理论和方法体系^[11,13,14]. 在载畜量评估中, 某一区域或某一类型草地一般采用相同的牧草利用率, 忽略

引用格式: 赵卫, 沈渭寿, 刘波, 等. 西藏地区草地承载力及其时空变化. 科学通报, 2015, 60: 2014–2028

Zhao W, Shen W S, Liu B, et al. Carrying capacity of grasslands and its spatiotemporal change in Tibet, China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2014–2028, doi: 10.1360/N972014-01113

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972014-01113>

了同一区域内不同草地类型之间或同一草地类型在不同区域的放牧可利用性差异,无法综合反映草地资源及其放牧可利用性的类型差异和地域差异,对土地资源、饲草料资源、生态服务功能等因素的考虑和定量表征也明显不足,导致草地承载力评估的准确性及其对畜牧业生产、草地生态保护等相关决策的指导意义受到制约^[11,14,15]。就西藏地区而言,目前覆盖所有县域的草地承载力研究仍然较少,已有研究对牧草利用率的定义和取值也未综合反映草地资源的地域差异和类型差异,对农区和农牧交错区饲草料资源,以及生物多样性维护、防风固沙等生态屏障功能的考虑也不足,影响了该区草地承载力研究的科学性、准确性及其应用价值^[16~19]。

针对草地承载力研究和草地资源利用中存在的主要问题,本研究一方面通过不适合和不能放牧区域划定及其与草地分布、行政区划等矢量数据的叠置分析,确定西藏地区各县域各草地型的牧草利用率;另一方面在草地牧草产量和家畜食草量的基础上,结合生态保护的牧草需求量和农业、林业等补饲载畜量,进行县域草地承载力评估。其中,本研究的重点是识别西藏地区草地盈余和超载的县域、补饲对草地承载力的贡献、草地承载力与草地生态状况变化的相关性、草地承载力变化的影响因素,以期为该区畜牧业发展、草地生态保护、国家生态安全屏障维护等提供科学依据。

1 材料与方法

(i) 研究区域。西藏自治区地处我国西南边疆,平均海拔4000 m以上,地形地貌复杂多样。该区属青藏高原气候区,光照充足、辐射强烈、气温偏低、干湿分明,气温、降水自东南向西北呈显著的递减趋势^[20]。土壤发育类型多样,但是大部分处于较原始的阶段,土层浅薄,砾石含量高,腐殖质层薄。源于独特的环境地域单元,西藏地区集中分布了许多特有的珍稀野生动植物,在全球生物多样性保护中占有重要战略地位;而且拥有几乎所有的陆地生态系统类型,其生态过程对保障我国乃至东亚安全具有独特的屏障作用^[21]。

2011年西藏自治区下辖73个县(市、区),其中牧业县14个、半农半牧县24个。2011年西藏地区牧业产值与农业总产值之比为49.48%,牧业县牧业产值与农业总产值的比值均超过80%^[22]。畜牧业在西藏地区尤其是牧区经济发展中占重要地位。但是由于惜

杀、惜售的传统观念和对畜牧业生产的依赖性,片面追求牲畜数量的现象较为突出。加之草地产草量有限且时空不平衡性显著,西藏部分地区草地退化严重^[4,23]。有研究表明,西藏部分地区的草场退化率达80%以上,对畜牧业生产、农牧民生活和生态环境等构成强烈影响^[24,25]。因此,亟需开展草地承载力评估,为该区畜牧业发展的规模控制、布局优化,以及退化草地生态系统恢复等提供决策依据。

(ii) 数据资料。本文的数据资料主要包括:(1) 1987~1998年Pathfinder AVHRR NDVI和1999~2011年SPOT VEGETATION NDVI指数数据集;(2) 1987年西藏自治区草地资源详查、1987~1990年西藏珍稀野生动物资源综合考察、1998~2001年西藏首次野生动物资源调查、西藏自然保护区基础调查等资料;(3) 西藏自治区地形图、植被图、土地利用图、基础地理信息等;(4) 中国统计年鉴、西藏自治区统计年鉴、各地(市)统计年鉴及相关的调查、统计资料等。

(iii) 不适合和不能放牧区域划定。根据生态保护要求、生态脆弱性、土地利用/覆被类型等,划定不适合和不能放牧区域,主要包括:(1) 自然保护区等依法设立的保护区域;(2) 坡度超过40°的坡草地和生长旺季植被盖度低于40%的中低覆盖度草地;(3) 半裸露砂砾地、流动沙地、半固定沙地等劣地分布区;(4) 水力、风力、冻融营力引起的强度、极强度和剧烈生态退化区;(5) 耕地、建设用地、湖泊等非草地。通过对保护区域、数字高程模型(digital elevation model, DEM)、劣地、土壤侵蚀、土地利用等数据的空间分析,划定西藏地区不适合和不能放牧区域。

(iv) 草地产草量修正。利用NDVI(normalized difference vegetation index)在大尺度植被状况监测和评估中的优势,以覆盖所有县域的1987年西藏自治区草地资源详查资料为基础,以132个草地型为基本单元,以1987年以来各草地型的NDVI变化斜率为修正参数,对西藏地区草地产草量的调查值进行修正。1987年以来各草地型NDVI变化斜率的计算公式如下^[26]:

$$\text{SLOPE} = \frac{L \times \sum_{h=1}^L h \times Y_{NDVIh} - \sum_{h=1}^L h \sum_{h=1}^L Y_{NDVIh}}{L \times \sum_{h=1}^L h^2 - \left(\sum_{h=1}^L h \right)^2},$$

式中,SLOPE为1987~2011年某一草地型的NDVI变化斜率; h 表示1~ L 的年序号; Y_{NDVIh} 表示第 h 年该草地型

的NDVI均值,通过对不同年份NDVI的平滑处理及其与各草地型边界的叠置分析来确定.假设各草地型的草地产草量与其NDVI具有相同的变化趋势,以草地型 λ 为例,根据1987年草地型 λ 产草量的调查值和1987年以来该草地型的NDVI变化斜率,利用SLOPE公式,逐年反推1988, 1989, …… , 2011年草地型 λ 的产草量,最终选取2000, 2005, 2010和2011年的产草量作为草地承载力评估的基础数据.

(v) 满足生态保护需要的牧草生物量估算. 由于野生动物与家畜的食草习性几乎相同、重叠分布区域大,加之野生动物数量的不断增加,近年来西藏地区野生动物与家畜争食牧草的现象愈演愈烈^[27].考虑到西藏地区在生物多样性保护中的重要地位,将野生动物牧草需求量纳入西藏地区草地承载力评估.按照“与家畜食草习性相近、分布区域重叠且争食牧草”原则,选择岩羊(*Pseudois nayaur*)、藏原羚(*Procapra picticaudata*)、西藏野驴(*Equus kiang*)、白唇鹿(*Cervus albirostris*)、盘羊(*Ovis ammon*)、藏羚(*Pantholops hodgsoni*)、野牦牛(*Bos mutus*)、北山羊(*Capra ibex*)、鹅喉羚(*Gazella subgutturosa*)、水鹿(*Cervus unicolor*)、普氏原羚(*Procapra przewalskii*)和喜马拉雅塔尔羊(*Hemitragus jemlahicus*)等野生动物,进行西藏野生动物牧草需求量计算,计算公式如下:

$$PD_i = \sum_{k=1}^O (X_{ik} \times R_k \times I \times D_k),$$

式中, PD_i 为区域 i 野生动物牧草需求量, kg; k 和 O 为野生动物物种的序号和总数; X_{ik} 为区域 i 第 k 种野生动物的数量; R_k 和 D_k 为第 k 种野生动物的标准绵羊单位折算系数和采食天数; I 为标准绵羊单位的采食量, kg d^{-1} . 其中,各县(市、区)野生动物种类和数量是根据西藏珍稀野生动物资源综合考察、野生动物资源调查等资料确定的.除野生动物保护外,防风固沙、水源涵养等生态屏障功能保护的牧草需求量由基于生态服务功能重要性的放牧利用率来控制.

(vi) 农业、林业等补饲载畜量计算. 在农区及农牧交错区,农林副产品也是畜牧业生产的重要饲料来源,形成农业、林业等补饲载畜量^[16,17].由于农业县和半农半牧县也是西藏畜牧业发展的重点地区,将农业、林业等补饲载畜量纳入西藏地区草地承载力评估.

西藏地区用于牲畜养殖的农林副产品包括麸皮、油饼等精饲料以及秸秆、落叶等粗饲料.根据各县(市、区)粮食、谷物、青稞、豆类、油菜籽、青饲料

等产量和林地面积,计算县域农林副产品及其载畜量.其中,谷物和青稞的出粉率分别取85%和80%,豌豆制作粉丝的出品率按25%计,油菜籽转化为油饼的比例取60%,可食落叶的产叶量、可食率、可获率和利用率按100 kg hm^{-2} , 20%, 20%和80%计,标准绵羊日食量为精饲料1 kg 或粗饲料1.5 kg ^[16].粮食、谷物等产量源于西藏自治区、各地区(市)统计年鉴,林地面积源于土地利用数据.

(vii) 草地承载力评估. 根据各草地型的产草量、牧草再生率、可食牧草比例、放牧利用率和标准干草系数等参数,计算各草地型的可食牧草量,其计算公式如下:

$$P_j = Y_j \times (1 + GR_j) \times R_j \times E_j \times H_j,$$

式中, P_j 为草地型 j 的可食牧草量,以单位面积的标准干草量表示, kg hm^{-2} ; Y_j 为草地型 j 经过NDVI变化斜率修正的产草量, kg hm^{-2} ; GR_j , R_j 和 E_j 分别为草地型 j 的牧草再生率、可食牧草比例和放牧利用率, %. H_j 为草地型 j 的标准干草折算系数.其中,各草地型的牧草再生率是在国家农业行业标准《天然草地合理载畜量的计算》(NY/T635-2002)规定的各草地类型放牧利用率基础上,根据各草地型的多年平均NDVI与其所属草地类型的多年平均NDVI、牧草再生率来确定的;各草地型的可食牧草比例采用1987年西藏自治区草地资源详查资料中各草地型可食牧草占总产量的比例;各草地型的放牧利用率为基于生态服务功能重要性的放牧利用率,即较重要的采用80%的放牧利用率、中等重要的采用60%的放牧利用率、极重要的采用40%的放牧利用率,放牧利用率为《天然草地合理载畜量的计算》(NY/T635-2002)的推荐值;各草地型的标准干草系数源于《天然草地合理载畜量的计算》(NY/T635-2002).

在各草地型的适合放牧面积和可食牧草量的基础上,扣除野生动物的牧草需求量,结合标准绵羊单位的采食量,估算西藏地区县域草地载畜量,其计算公式如下:

$$PL_i = \sum_{j=1}^m (S_{ij} \times P_j) - PD_i,$$

$$GCC_i = \frac{PL_i}{I \times D},$$

式中, PL_i 为区域 i 可供牲畜食用的牧草生物量, kg; GCC_i 为区域 i 的草地载畜量, 羊单位; S_{ij} 为区域 i 内草地型 j 的适合放牧面积, hm^2 ; D 为放牧天数, d. 其中,

各草地型的适合放牧面积是通过不适合和不能放牧区域分布图、草地型分布图和行政区划图的叠加分析来确定的。

综合考虑各县(市、区)的牲畜存栏量和补饲载畜量,计算西藏地区县域草地承载率和补饲草地承载率,其计算公式分别为

$$GCR_i = \frac{GCC_i - AL_i}{GCC_i},$$

$$GFCR_i = \frac{GCC_i - (AL_i - FCC_i)}{GCC_i},$$

式中, GCR_i 为不考虑补饲情况下区域 i 的草地承载率,即草地承载率; $GFCR_i$ 为补饲情况下区域 i 的草地承载率,即补饲草地承载率; AL_i 和 FCC_i 分别为区域 i 的牲畜存栏量和补饲载畜量,羊单位。当草地承载率小于0时,草地超载;反之,草地盈余。

2 结果与分析

2.1 西藏地区县域草地承载力现状评估

(i) 草地载畜量。结果表明,2011年西藏地区

适合放牧的草地面积为 $46.32 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全区草地总面积的55.63%; 可供牲畜食用的牧草总量为 $2885.57 \times 10^4 \text{ t}$, 对应的载畜量为 4392.04×10^4 羊单位, 单位面积草地载畜量为95 羊单位 km^{-2} 。从空间分布来看, 全区县域草地载畜量的平均中心 ($89^\circ 57' 3.296'' \text{E}$, $30^\circ 50' 58.800'' \text{N}$) 位于那曲地区班戈县, 各县(市、区)的单位面积草地载畜量自东南向西北总体上呈下降趋势(图1); 同时, 各县(市、区)的单位面积草地载畜量与其中心点经度呈显著正相关 ($R=0.861$, $P<0.01$), 与其中心点纬度呈显著负相关 ($R=-0.260$, $P<0.05$)。因此, 西藏地区草地载畜量表现出显著的地域差异, 水分条件的影响相对较强。这与我国高寒区草地生产潜力与载畜量研究结果一致。其中, 杨正礼和杨改河^[16]研究指出, 西藏、青海等高寒区草地气候生产潜力主要受降水条件的制约, 区域间的草地气候生产潜力存在较大的不平衡性。

(ii) 补饲载畜量。2011年西藏地区各县(市、区)可供牲畜食用的精饲料总量和粗饲料总量分别为 23.71×10^4 和 $27.50 \times 10^4 \text{ t}$, 对应的补饲载畜量为 115.18×10^4 羊单位, 主要分布于雅鲁藏布江中下游地区和藏东南地区(图2)。

图1 2011年西藏地区单位面积草地载畜量分布图

Figure 1 The carrying capacity of grassland per square kilometre in Tibet in 2011

图2 2011年西藏地区补饲载畜量分布图

Figure 2 The carrying capacity of supplementary feeding in Tibet in 2011

从空间分布来看, 全区县域补饲载畜量的平均中心($91^{\circ}34'57.204''\text{E}$, $29^{\circ}31'38.668''\text{N}$)位于山南地区扎囊县; 各县(市、区)的单位面积补饲载畜量与其中心点纬度呈显著负相关($R=-0.323$, $P<0.01$), 与其中心点经度不具有相关性。总体上, 西藏地区县域单位面积补饲载畜量自南向北呈下降趋势, 热量是影响补饲载畜量分布的主要因素。其中, 日喀则地区补饲载畜量最大, 其次是拉萨市、山南地区和昌都地区, 林芝地区次之, 阿里地区 and 那曲地区最少。各地(市)补饲载畜量排序情况与钱拴等人^[17]研究结果基本一致。

(iii) 牲畜存栏量。2011年西藏地区县域牲畜存栏量合计 4779.20×10^4 羊单位, 牲畜存栏量密度(以牲畜存栏量与适合放牧草地的比值计)为 103 羊单位 km^{-2} , 昌都、拉萨、那曲等地的县域牲畜存栏量密度相对较大(图3)。从空间分布来看, 各县(市、区)的牲畜存栏量密度与其中心点经度呈显著正相关($R=0.452$, $P<0.01$), 与其中心点纬度不具有相关性; 全区县域牲畜存栏量的平均中心($91^{\circ}42'13.915''\text{E}$, $30^{\circ}36'19.018''\text{N}$)位于拉萨市当雄县。西藏地区县域牲畜存栏量也具有显著的地域差异, 牲畜存栏量密

度自东向西总体呈下降趋势。

(iv) 草地承载率。2011年西藏地区牲畜存栏量高于其草地载畜量, 对应的草地承载率为 -8.82% , 草地生态系统处于超载状态。在全区73个县(市、区)中, 50个县域的草地承载率小于0, 草地生态系统处于超载状态; 23个县域的草地承载率大于0, 草地盈余(图4(a))。因此, 西藏地区及其多数县域草地生态系统处于超载状态, 但是藏西北、藏东南的部分县域草地盈余丰富。钱拴等人^[17]对西藏以草地为主县的自然草地载畜能力研究也指出, 西藏大部分县天然草地牲畜处于超载状态, 西北部分县实际牲畜数量没有超过天然草地的最大承载能力。

在考虑补饲的情况下, 2011年西藏地区草地承载率升至 -6.03% , 草地生态系统仍然处于超载状态, 但是草地超载状况减轻。西藏地区各县(市、区)补饲草地承载率与其草地承载率的比较表明, 补饲情况下各农业县和半农半牧县草地承载状况均有不同程度的改善, 萨迦县、丁青县和曲松县草地承载状况由“轻度超载”升至“微超载”等级, 米林县由“轻度盈余”升至“中度盈余”等级, 墨脱县由“中度盈余”升至“丰

图3 2011年西藏地区牲畜存栏量密度分布图

Figure 3 The stocking levels of livestock per square kilometre in Tibet in 2011

富盈余”等级；但是全区草地生态系统处于超载状态 and 盈余状态的县域数量保持不变(图4)。农业、林业等补饲通过弥补草地资源不足、减轻草地放牧压力等，可以显著改善农业县、半农半牧县及全区草地生态系统的承载状况。

除牲畜存栏量与草地载畜量的规模不平衡外，草地资源供需的空间不均衡也是导致区域草地超载的重要原因。由图5可以看出，西藏地区县域草地载畜量平均中心位于该区县域牲畜存栏量平均中心的西北方向，两者明显偏离；全区县域补饲载畜量平均中心位于该区县域牲畜存栏量平均中心的东南方向。因此，西藏地区畜牧业生产与可食牧草资源的空间匹配总体上不协调，加剧了全区草地生态系统的超载状态；但是农业、林业等补饲可以在一定程度上缓解牲畜存栏量与草地载畜量空间匹配的不协调性。

上述分析表明，2011年西藏地区县域草地载畜量、补饲载畜量和牲畜存栏量的地域差异显著，草地资源供需空间匹配的不协调性突出，全区及其多数县域草地生态系统处于超载状态。其中，农业、林业

等补饲通过弥补牧草资源不足、缓解草地资源供需空间匹配不协调性等，可以改善全区尤其是农业县、半农半牧县草地生态系统的承载状况。

2.2 西藏地区县域草地承载力动态分析

(i) 草地承载率动态变化。与2000年相比，2005、2010年西藏地区草地载畜量和牲畜存栏量均呈上升趋势，但是牲畜存栏量上升更快，草地承载率随之由0.48%降至-12.57%和-13.03%，草地承载状况由轻度盈余降为中度超载(图6和7)。期间，草地超载的县域数量也由2000年的44个增至2005年的50个、2010年的49个。由于牲畜存栏量的过快增长，2000年以来西藏地区草地生态系统承受的放牧压力不断增加，草地承载状况总体上呈下降趋势。

不同年份西藏地区各县(市、区)草地承载率的比较表明，2005和2010年均有60个县域的草地承载率低于其2000年评价价值，13个县域的草地承载率高于其2000年评价价值，草地承载率呈上升趋势；与2005年相比，2010年38个县域草地承载率呈下降趋势，其他35

图 4 2011 年西藏地区草地承载率和补饲草地承载率分布图

Figure 4 The carrying ratio of grassland and the carrying ratio of grassland with supplementary feeding in Tibet in 2011

图5 2011年西藏地区县域草地承载力平均中心分布图

Figure 5 The mean centers of carrying capacity of grassland of counties in Tibet in 2011

图6 西藏地区草地承载力动态变化

Figure 6 Dynamics of the carrying capacity of grassland in Tibet

个县域草地承载率呈上升趋势。同时，2000~2005，2005~2010和2000~2010年，边坝县等29个县域草地承载率均持续下降；墨脱县、桑日县、琼结县、城关区4个县域草地承载率持续上升，草地承载状况不断改善(图8)。因此，2000年以来西藏地区多数县域草地承载状况呈下降趋势，仅桑日县等4县域草地承载状

图7 西藏地区草地承载率动态变化

Figure 7 Dynamics of the carrying ratio of grassland with supplementary feeding in Tibet

况持续改善，但是2005年以后草地承载状况改善的县域数量明显增加。

(ii) 补饲情况下草地承载率动态变化。2000，2005，2010年西藏地区补饲草地承载率均大于其草地承载率；与2000年相比，2005，2010年西藏地区补饲草地承载率由3.08%降至-9.94%和-10.48%，草地承载状况由轻度盈余降为轻度超载、中度超载(图7)。补饲情况下，西藏地区草地超载的县域数量由2000年

图 8 不同时段西藏地区草地承载率变化分布图

Figure 8 Dynamics of the carrying ratio of grassland in Tibet in different periods

的44个增至2005年的50个和2010年的49个。因此, 2000年以来农业、林业等补饲可以改善西藏地区草地承载状况, 但是该区草地承载状况总体上仍呈下降趋势, 草地超载程度不断加剧。

不同年份西藏地区各县(市、区)补饲草地承载率的比较表明, 2005, 2010年均具有59个县域的补饲草地承载率低于其2000年的评价, 14个县域的补饲草地承载率高于其2000年的评价; 与2005年相比, 2010年有39个县域的补饲草地承载率呈下降趋势, 其他34个县域的补饲草地承载率呈上升趋势。同时, 2000~2005, 2005~2010和2000~2010年, 29个县域补饲草地承载率均呈下降趋势, 其补饲草地承载率持续下降; 城关区、桑日县、琼结县、墨脱县4个县域补饲草地承载率持续上升, 草地承载状况不断改善(图9)。可以看出, 不同年份西藏地区县域补饲草地承载率和草地承载率的变化趋势基本一致, 表明农业、林业等补饲在当地畜牧业生产资料中所占比例较小, 尽管可以改善不同年份的草地承载状况, 但是对草地承载状况变化趋势的影响仍然有限。

(iii) 草地承载率空间格局动态变化。2000年西藏地区县域草地载畜量平均中心和牲畜存栏量平均中心分别位于那曲地区班戈县和拉萨市当雄县, 草地载畜量平均中心位于牲畜存栏量平均中心的西北方向, 二者偏离严重, 全区牧草资源供需空间匹配总体上不协调(图10)。2000, 2005, 2010年西藏地区县域草地承载力平均中心的比较表明, 2000年以来全区县域草地载畜量平均中心、补饲载畜量平均中心和牲畜存栏量平均中心总体上均向东移动(图10)。期间, 西藏地区县域牲畜存栏量平均中心的移动趋势最明显, 其次是补饲载畜量, 草地载畜量平均中心的移动距离最小。因此, 2000年以来西藏地区县域草地载畜量平均中心与牲畜存栏量平均中心的偏离距离不断增大, 牧草资源供需空间匹配的不协调性随之加剧。结合2000年以来西藏地区草地承载率的下降趋势, 由县域草地载畜量、牲畜存栏量平均中心表征的草地资源供需空间匹配不协调性加剧也是导致西藏地区草地承载状况总体下降的重要原因。

应用GeoDA软件对西藏地区县域草地承载率及其变化量的空间自相关分析表明, 2000, 2005和2010年县域草地承载率的全局Moran'I指数分别为0.3016 ($P=0.002$), 0.2881 ($P=0.002$)和0.2995 ($P=0.001$), P 值均小于显著性水平5%, 拒绝零假设; 2000~2005, 2005~

2010年县域草地承载率变化量的全局Moran'I指数分别为0.1890 ($P=0.009$)和0.0656 ($P=0.108$), 2005~2010年县域草地承载率变化量的全局Moran'I指数检验计量的 P 值未能通过5%水平的显著性检验。因此, 不同年份西藏地区县域草地承载率均具有显著的空间正相关性, 形成明显的空间聚集格局; 2000~2005年县域草地承载率变化量也呈显著的空间正相关性, 表现出强烈的空间集聚性。与2000年相比, 2005, 2010年西藏地区县域草地承载率的全局Moran'I指数均呈下降趋势, 2005~2010年县域草地承载率变化量的空间自相关性也变得不显著。因此, 2000年以来西藏地区县域草地承载率及其变化量在县域之间的空间自相关性有所下降, 全区县域草地承载状况及其动态变化的近邻效应和空间集聚性减弱、空间异质性增强。

上述分析表明, 2000年以来西藏地区及其多数县域的草地承载率和补饲草地承载力均呈下降趋势, 草地承载状况渐趋恶化, 县域草地承载状况及其动态变化的空间异质性明显增强。通过缩小草地载畜量和牲畜存栏量的规模差距、缓解草地载畜量和牲畜存栏量空间匹配的不协调性, 农业、林业等补饲可以改善不同年份全区尤其是农业县、半农半牧县的草地承载状况, 但是对其草地承载状况变化趋势的影响有限。

3 讨论

3.1 农业、林业等补饲对草地承载力的影响分析

不同年份西藏地区补饲草地承载率均大于其草地承载率, 补饲草地承载率和草地承载率均呈下降趋势(图7)。2000~2005, 2000~2010年, 该区补饲草地承载率的下降比例分别为422.73%和440.26%, 草地承载率的下降比例分别为2718.75%和2814.58%。与草地承载率相比, 西藏地区补饲草地承载率的下降比例更小。因此, 农业、林业等补饲不仅可以改善不同年份西藏地区草地生态系统的承载状况, 而且可以减缓2000年以来该区草地承载状况的下降趋势。

2000, 2005, 2010年, 西藏59个农业县和半农半牧县的补饲草地承载率均高于其草地承载率, 农业、林业等补饲可以改善各农业县、半农半牧县草地承载状况。但是受草地载畜量、补饲载畜量及其动态变化的影响, 农业、林业等补饲对各县域草地承载状况变

图 9 不同时段西藏地区补饲草地承载率变化分布图

Figure 9 Dynamics of the carrying ratio of grassland with supplementary feeding in Tibet in different periods

图 10 不同年份西藏地区县域草地承载力平均中心分布图

Figure 10 The mean centers of the carrying capacity of grassland of counties in Tibet in 2000,2005 and 2010

化趋势的影响存在差异。若补饲载畜量变化率大于草地载畜量变化率，补饲载畜量在区域载畜量中的比例上升，补饲对牧草资源的补充作用增强，可以加快草地承载率的上升趋势、减缓草地承载率的下降趋势，推动草地承载状况改善，如左贡县、芒康县、洛隆县、江达县等11个县域。反之，补饲载畜量在区域载畜量中的比例下降，补饲对牧草资源的补充作用减弱，导致补饲草地承载率的变化量小于草地承载率的变化量，放慢草地承载状况改善趋势，如墨竹工卡县等18个县域。

由于不同年份补饲载畜量与草地载畜量比例的差异，补饲对各县域草地承载状况变化趋势的影响存在差异。若补饲载畜量变化率大于草地载畜量变化率，补饲会加快草地承载状况的改善趋势。总之，尽管对草地承载状况变化趋势的影响存在差异，补饲可以改善不同年份西藏地区及其农业县、半农半牧县草地承载状况是毋庸置疑的。

3.2 草地承载力与草地生态状况变化的相关分析

作为植物生长状态和植被空间分布密度的最佳

指示因子，NDVI指数被广泛用于区域生态状况监测与评估^[28]。2000、2005、2010年西藏地区草地NDVI年均值分别为0.117、0.118和0.134，草地NDVI不断上升。在全区73个县域中，2000~2005、2005~2010和2000~2010年草地NDVI呈上升趋势的县域分别有50、66和71个。2000年以来，西藏地区生态状况改善的县域数量不断增加，草地生态状况总体上呈改善趋势，仅少数县域草地生态状况有所下降。大量研究也表明，西藏地区草地NDVI总体上呈上升趋势，草地生态状况渐趋改善^[26,28,29]。

西藏地区各县(市、区)草地NDVI年均值与其草地承载率的比较结果表明，不同时段县域草地生态状况下降趋势和草地承载状况及其变化具有较强的协同性。2000~2005年草地生态状况呈下降趋势的23个县域中，江达县等7个县域草地超载且呈恶化趋势，八宿县等16个县域草地盈余但不断降低。2005~2010年草地生态状况呈下降趋势的7个县域中，2005、2010年这7个县域的草地生态系统均处于超载状态。2000~2010年草地生态状况呈下降趋势的县域仅普兰县和萨嘎县，这2个县域草地盈余但不断减少。

在西藏地区及其大多数县域草地生态状况总体上不断改善的背景下,少数县域草地生态状况的下降趋势与过度放牧引起的草地超载、牲畜存栏量增加引起的草地承载率降低具有较强的相关性。

3.3 草地承载力变化的影响分析

不同年份西藏地区及其大多数县域草地超载严重,2000年以来全区及其大多数县域草地承载率和补饲草地承载率总体上均呈下降趋势。究其原因,牲畜存栏量过大、过快增长是造成草地超载和草地承载状况下降的主要原因。因此,西藏地区和草地超载县域首先需要控制牲畜存栏量增长趋势,逐步减少牲畜存栏量直至草畜平衡。考虑到2005,2010,2011年西藏地区有23,24和23个县域草地盈余,在控制牲畜存栏量的过程中,可以通过优化畜牧业布局,适当增加草地盈余县域的牲畜存栏量,改善草地超载县域的草地承载状况。

不同年份西藏地区及其农业县、半农半牧县的补饲草地承载率均高于其草地承载率,2000年以来补饲情况下草地承载状况的下降趋势也明显减缓,农业、林业等补饲弥补草地牧草不足、改善草地承载状况的作用明显增强。受气候变化的影响,近年来农业县和半农半牧县水热条件有所改善。因此,可以充分利用气候变化有利条件,发展高原河谷农业和人工种草,利用农副产品发展饲料加工业,供应草地超载县域畜牧业发展。此外,退牧还草也是改善西藏地区草地承载状况的重要途径。以2004~2007年实施退牧还草工程的改则、日土、革吉、那曲、比如、班戈、聂荣、安多、当雄、林周、仲巴、昂仁12个县为例,2005~2010年除当雄县和昂仁县外其他10个县的草地承载率、补饲草地承载率变化均由2000~2005年的下降趋势转变为上升趋势;2005~2010年当雄县和昂仁县的草地承载率、补饲草地承载率变化尽管仍呈下降趋势,但明显慢于2000~2005年的下降趋势。因此,退牧还草工程的实施可以减缓甚至扭转西藏地区县域草地承载状况的下降趋势。

总体上,控制牲畜存栏量、优化畜牧业布局、发展高原河谷农业和人工种草、实施退牧还草工程等均有助于西藏地区草地承载状况的不断改善。

4 结论与建议

(i) 在不适合和不能放牧区域划定的基础上,以草地型为基本单元,通过草地生产能力修正、满足生态保护需要的牧草生物量估算、补饲载畜量计算等,对西藏地区县域草地承载力进行评估,可以提高草地承载力评估的准确性及其对相关决策指导的科学性。

(ii) 2011年西藏地区及其多数县域草地生态系统处于超载状态,藏东南、藏西北部分县域草地资源仍有盈余;草地载畜量、补饲载畜量和牲畜存栏量的地域差异显著,草地资源供需的空间匹配不协调。

(iii) 2000年以来,西藏地区及其大多数县域草地承载状况呈下降趋势,县域草地承载状况及其动态变化的近邻效应减弱、空间异质性增强。其中,牲畜存栏量和草地载畜量之间规模差距的扩大、空间匹配不协调性的加剧是西藏地区草地承载状况整体下降的主要原因。

(iv) 通过弥补牧草资源不足、减轻草地放牧压力、缓解草地资源供需空间匹配的不协调性,农业、林业等补饲可以改善西藏地区尤其是农业县、半农半牧县草地生态系统的承载状况,但是对草地承载状况变化趋势的影响仍然有限。

(v) 2000年以来西藏地区及其大多数县域草地生态状况渐趋改善。在草地生态状况下降的县域中,一部分县域草地超载且不断恶化,另一部分县域草地盈余但不断减少。在西藏地区草地生态状况总体上不断改善的背景下,少数县域草地生态状况的下降趋势与过度放牧引起的草地超载、牲畜存栏量增加引起的草地承载状况下降具有较强的相关性。

(vi) 根据西藏地区县域草地承载力及其时空变化特征,提出以下建议:(1) 藏东南、藏西北部分县域草地资源仍有盈余,在适合放牧区域划定和合理载畜量评估的基础上,可以适当增加牲畜存栏量;(2) 藏中诸县域草地超载严重,而且农业县、半农半牧县聚集,重点是控制牲畜存栏量,积极发展高原河谷农业和人工种草,提高农业、林业等补饲使用量;(3) 扩大退牧还草工程实施范围,改善西藏地区及其县域草地承载状况,减缓并消除少数县域草地生态状况的下降趋势。

参考文献

- 1 He Q Y. The main experience and review of 30 years' opening up policy in Tibet's rural area (in Chinese). *J Tibeat Univ*, 2014, 23: 96–101 [何勤勇. 西藏农牧区改革开放三十年来的回顾及其主要经验. 西藏大学学报, 2014, 23: 96–101]
- 2 Shi Y, Ma Y L, Ma W H, et al. Large scale patterns of forage yield and quality across Chinese grasslands. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1187–1199 [石岳, 马殷雷, 马文红, 等. 中国草地的产草量和牧草品质: 格局及其与环境因子之间的关系. 科学通报, 2013, 58: 226–239]
- 3 Xue S M. Utilization and construction of grassland resource in Tibet. *J Sichuan Grassland*, 2005, 19: 43–45 [薛世明. 浅析西藏草地资源的利用与建设. 四川草原, 2005, 19: 43–45]
- 4 Gao Q Z, Wan Y F, Xu H M, et al. Alpine grassland degradation index and its response to recent climate variability in Northern Tibet, China. *Quat Int*, 2010, 226: 143–150
- 5 Liang T G, Feng Q S, Xia W T, et al. Optimization strategy and management decision-making in balancing forage and livestock in Gannan pastoral area. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31: 1111–1123 [梁天刚, 冯琦胜, 夏文韬, 等. 甘南牧区草畜平衡优化方案与管理决策. 生态学报, 2011, 31: 1111–1123]
- 6 Unruh J D. An Acacia-based design for sustainable livestock carrying capacity on irrigated farmlands in semi-arid Africa. *Ecol Eng*, 1993, 2: 131–148
- 7 Hunt E R, Miyake B A. Comparison of stocking rates from remote sensing and geospatial data. *Rangeland Ecol Manage*, 2006, 59: 11–18
- 8 Ding G D, Li S Y, Cai J Y, et al. Pasture resources evaluation and stocking density in Hunshandake Sandy Land: Case study of Zhenglan Banner, Inner Mongolia. *Chin J Ecol*, 2005, 24: 1038–1042 [丁国栋, 李素艳, 蔡京艳, 等. 浑善达克沙地草场资源评价与载畜量研究——以内蒙古正蓝旗沙地区为例. 生态学杂志, 2005, 24: 1038–1042]
- 9 Roach M E. Estimating perennial grass utilization on semidesert cattle ranges by percentage of ungrazed plants. *J Range Manage*, 1950, 3: 182–185
- 10 Dasmann W. A method for estimating carrying capacity of rangeland. *J Forest*, 1945, 43: 400–402
- 11 Lin B, Tan Z L, Tang S S, et al. Research progress in methodologies for carrying capacity and proper stocking rate in grassland ecological system. *Pratac Sci*, 2008, 25: 91–99 [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. 草业科学, 2008, 25: 91–99]
- 12 Wang S P. Theory and practice on sustainable use of China's natural grassland: A study on the development strategy of grassland-livestock and grassland-agriculture. *Acta Agrest Sin*, 2006, 14: 188–192 [汪诗平. 天然草原持续利用理论和实践的困惑. 草地学报, 2006, 14: 188–192]
- 13 Luo T X, Li W H, Zhu H Z. Estimated biomass and productivity of natural vegetation on the Tibetan Plateau. *Ecol Appl*, 2002, 12: 980–997
- 14 Xu M Y, He J S. A review of grassland carrying capacity: Definition, theoretical consideration and model. *Acta Pratac Sin*, 2014, 23: 313–324 [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: 313–324]
- 15 Yu L, Zhou L, Liu W, et al. Using remote sensing and GIS technologies to estimate grass yield and livestock carrying capacity of alpine grasslands in Golog Prefecture, China. *Pedosphere*, 2010, 20: 342–351
- 16 Yang Z L, Yang G H. Potential productivity and livestock carrying capacity of high-frigid grassland in China. *Resour Sci*, 2000, 22: 72–77 [杨正礼, 杨改河. 中国高寒草地生产潜力与载畜量研究. 资源科学, 2000, 22: 72–77]
- 17 Qian S, Mao L X, Hou Y Y, et al. Livestock carrying capacity and balance between carrying capacity of grassland with added forage and actual livestock in the Qinghai-Tibet Plateau. *J Nat Resour*, 2007, 22: 389–397 [钱拴, 毛留喜, 侯英雨, 等. 青藏高原载畜能力及草畜平衡状况研究. 自然资源学报, 2007, 22: 389–397]
- 18 Yang G H. The livestock carrying-capacity of forage grasses and their development potential in three-river regions in Tibet. *Acta Univ Agric Bor-Occid*, 1995, 23: 59–63 [杨改河. 西藏“一江两河”牧草载畜量与开发潜力研究. 西北农业大学学报, 1995, 23: 59–63]
- 19 Chang H Q, Xu W Y, Yuan J, et al. Current situation of grassland resources and grazing capacity in Ali, Tibet. *Pratac Sci*, 2012, 29: 1660–1664 [畅慧勤, 徐文勇, 袁杰, 等. 西藏阿里草地资源现状及载畜量. 草业科学, 2012, 29: 1660–1664]
- 20 Editorial Board of Tibet Yearbook. *Tibet Yearbook 2009*. Lhasa: Tibet People's Publishing House, 2010. 10–13 [西藏年鉴编辑委员会. 西藏年鉴2009. 拉萨: 西藏人民出版社, 2010. 10–13]
- 21 Zhong X H, Liu S Z, Wang X D, et al. A research on the protection and construction of the state ecological safe shelter zone on the Tibet plateau. *J Mount Sci*, 2006, 24: 129–136 [钟祥浩, 刘淑珍, 王小丹, 等. 西藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 山地学报, 2006, 24: 129–136]
- 22 Tibet Autonomous Region Bureau of statistics, Tibet General Team of Investigation under the NBS. *Tibet Statistical Yearbook 2010*. Beijing: China Statistics Press, 2012. 105 [西藏统计局, 国家统计局西藏调查总队. 西藏统计年鉴2012. 北京: 中国统计出版社, 2012. 105]

- 23 Zhou W, Gang C C, Zhou L, et al. Dynamic of grassland vegetation degradation and its quantitative assessment in the northwest China. *Acta Oecol*, 2014, 55: 86–96
- 24 Department of the Chinese academy of sciences. Advice on development and structural adjustment of agriculture and livestock husbandry in Tibet. *Advance Earth Sci*, 2003, 18: 165–167 [中国科学院学部. 关于加速西藏农牧业结构调整与发展的建议. *地球科学进展*, 2003, 18: 165–167]
- 25 Harris R B. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau: A review of the evidence of its magnitude and causes. *J Arid Environ*, 2010, 74: 1–12
- 26 Wang T, Shen W S, Ou Y Y, et al. Characteristics of temporal and spatial variations in the grass growing season of Tibet during the period of 1982 to 2010. *Acta Agrest Sin*, 2014, 22: 46–51 [王涛, 沈渭寿, 欧阳琰, 等. 1982–2010年西藏草地生长季NDVI时空变化特征. *草地学报*, 2014, 22: 46–51]
- 27 Xu Z G, Wang X Y, Zong G, et al. The conflict and strategy between wildlife protection and livestock production in Qiangtang natural reserve. *Central South Forest Invent Plan*, 2010, 29: 33–37 [徐志高, 王晓燕, 宗嘎, 等. 西藏羌塘自然保护区野生动物保护与牧业生产的冲突及对策. *中南林业调查规划*, 2010, 29: 33–37]
- 28 Peng J, Liu Z H, Liu Y H, et al. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent. *Ecol Indic*, 2012, 14: 28–39
- 29 Zhang Y L, Gao J G, Liu L S, et al. NDVI-based vegetation changes and their responses to climate change from 1982 to 2011: A case study in the Koshi River Basin in the middle Himalayas. *Glob Planet Change*, 2013, 108: 139–148

Carrying capacity of grasslands and its spatiotemporal change in Tibet, China

ZHAO Wei¹, SHEN WeiShou¹, LIU Bo¹, LIN NaiFeng¹ & WANG Tao^{1,2}

¹Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China;

²College of Geography & Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

The carrying capacity of grassland and the carrying capacity of grassland with supplementary feeding were analyzed in Tibet, China. This analysis was based on identifying areas unsuitable for grazing or where grazing was not possible, correcting grass yield and calculating the demand for grass used for ecological protection, estimating the carrying capacity of grasslands at the county level. Also, the spatiotemporal change in the carrying capacity of grasslands over time, the effects of supplementary feeding of livestock on agricultural and forestry land on the trends and dynamics of the carrying capacity of grasslands, and the relationship between the carrying ratio of grasslands and the ecological status of counties were explored. Results showed that there was a significant regional difference in the spatial distribution of the carrying capacity of grasslands and the carrying capacity of grasslands with supplementary feeding of livestock in Tibet; these differences depended on water conditions and temperature, respectively. Although some counties in Southeast and Northwest Tibet had a grass surplus in 2011, grassland ecosystems of most counties and in Tibet as a whole were overstocked with livestock, shortages of adequate forage have become more serious since 2000. Furthermore, while the spatial autocorrelation of the carrying status of grasslands and its dynamic changes decreased, the spatial heterogeneity of the carrying status of grasslands increased. These characteristics were mainly the result of a rapid expansion of the stocking levels for livestock, and the spatial mismatch between the demand and supply of grass resources. By mitigating the quantitative and spatial mismatch between supply and demand for grass resources, the use of supplemental feeding on agricultural and forestry lands could improve the grassland carrying capacity of Tibet as a whole, especially for agricultural and semi-agricultural counties. However, such mitigation had a less significant effect on the dynamic trends of the carrying capacity of grasslands. In addition, the decreasing trend of the ecological quality in the counties was significantly correlated with the overstocking of grasslands with grazing animals and the decrease in the carrying ratio of grasslands in Tibet. Therefore, the main measures that are needed to improve the carrying capacity of grasslands and to mitigate the decreasing trend of the ecological quality of grasslands will include zoning areas suitable for grazing, controlling the stocking levels of livestock and optimizing the distribution of animal husbandry.

the carrying capacity of grassland, supplementary feed, area suitable for grazing, county, Tibet

doi: 10.1360/N972014-01113