

基于供给—消耗关系的蒙古高原草地承载力 时空变化分析

董 昱^{1,2}, 闫慧敏^{1,2}, 杜文鹏^{1,2}, 胡云锋^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在全球气候变化与人类活动加剧的双重影响下, 蒙古高原草地放牧超载与草地退化问题不断凸显。如何从畜牧业生产对草地利用强度角度揭示草地生态系统的人地关系, 对草地资源可持续利用对策研究至关重要。基于生态系统供给与消耗平衡关系, 利用卫星遥感数据与畜牧业统计数据, 分析蒙古高原草地生态系统的生态承载状态, 研究不同政策背景和资源禀赋条件下草地生态系统承载压力的区域差异特征。研究结果表明: (1) 内蒙古自治区和蒙古国两地不同的政策和习俗深刻影响了牧民对草地的利用方式, 使得两地畜牧业生产结构产生显著差异, 内蒙古自治区牲畜类型组成区域差异性大、总量相对平稳, 而蒙古国牲畜数量增加显著、牲畜类型组成区域分布更为均匀。(2) 内蒙古自治区和蒙古国草地消耗量均呈现出明显的上升趋势, 蒙古高原草地资源消耗总量在 2014 年超出了供给量, 其中内蒙古自治区草地资源消耗量在 2005 年超出了供给量, 而近年来蒙古国的草地资源消耗量也逐渐逼近供给量。(3) 2000-2016 年间, 蒙古高原草地承载压力不断增大, 整体从盈余状态变为临界超载状态, 持续严重超载地区主要出现在荒漠草原地区, 并逐渐向典型草原及农牧交错区推进; 蒙古国自 2003 年起富有余状态区逐步减少且严重超载区逐步增多, 内蒙古自治区则受生态保护政策的影响呈波动性变化。通过定量分析内蒙古自治区和蒙古国草地承载状况的时空差异性, 所揭示出的不同社会经济背景下畜牧业生产结构与强度的变化规律可为草地资源管理提供科学依据。

关键词: 蒙古高原; 生态消耗; 生态压力; 草畜平衡; 生态承载状态

蒙古高原位于东亚温带寒温带的半干旱、干旱地区, 其主体生态系统类型——温带草原是欧亚草原面积最大、分布最为连续、保存相对完好的陆地生态系统, 在初级生产、水土保持、物质循环、大气与气候调控等功能上被联合国 FAO 列为 A 类生态功能区, 对维持东亚与全球生态安全意义极为重要^[1]。蒙古高原是世界放牧草地畜牧业生产的三大主要区域之一, 饲养各类家畜约 1.2 亿头, 维持了约 1000 万低收入人口的生计^[2]。在气候条件和人类活动的共同影响下, 蒙古高原约有 70% 左右的草地正在退化, 其中极重度退化区域主要集中在高原西南部草地植被和荒漠区的过渡地带^[3], 而超载过牧是导致这些草地退化的主要原因^[4-7]。人类活动对蒙古高原植被格局与草地畜牧业的影响比气候变化更加广泛和深刻^[8-9]。内蒙古自治区 90% 的天然草地存在不同程度的退化, 中度以上退

收稿日期: 2018-12-07; 修订日期: 2019-03-16

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 A 类 (XDA20010202, XDA23100202); 国家自然科学基金项目 (41671517)

作者简介: 董昱 (1991-), 男, 河北石家庄人, 硕士, 研究方向为资源遥感。E-mail: dongy.16s@igsrr.ac.cn

通讯作者: 闫慧敏 (1974-), 女, 内蒙古自治区锡林郭勒盟人, 博士, 副研究员, 研究方向为土地利用与生态系统变化研究。E-mail: yanhm@igsrr.ac.cn

化明显的草原占总草地面积50%以上,退化草地出现了生态系统多样性降低、土壤裸露和持水性下降等问题^[8,10-11]。蒙古国草地退化近20年来也日益严重,受到不同程度的荒漠化威胁,约有16.6%的草地具有非常高的脆弱性^[12]。提升蒙古高原生态系统服务功能、维持草地畜牧业生产能力是中蒙两国社会生态可持续发展共同面临的重大挑战^[13-16]。由于内蒙古自治区与蒙古国社会经济发展模式不同,经济发展、城市化、生态工程(退牧还草、生态移民等)等因素导致了蒙古高原草地生态变化时空格局产生不同的趋势。蒙古国草地面积约占国土面积的80%,畜牧业是蒙古国的主要经济基础,国民经济产值的26.2%来自畜牧业^[17]。长期以来,蒙古国经济发展水平较为低下,人口密度相对较低,绝大多数地区采用大规模粗放式的放牧方式,部分地区还保留着传统的游牧习俗。内蒙古自治区人类活动相对强烈,人口密度和载畜量都远高于同类型的蒙古国草原地区,草原地区的畜牧生产以定居定牧为主。在退牧、禁牧的政策下,近20年来内蒙古自治区放牧方式正在由自由放牧向舍饲和半舍饲、由全年放牧向季节性放牧转变,这些生态治理、生态恢复政策为内蒙古自治区退化的草地生态系统恢复提供了有利条件。可见,内蒙古自治区和蒙古国政治环境与农牧民的生活方式存在显著的区域性差异,这种区域间差异导致人类对草地生态系统的压力状态也明显不同^[18-19]。因此,定量分析内蒙古自治区和蒙古国草地承载状况的时空差异性,对掌握畜牧业生产活动对草地生态系统的压力状态与规律、制订保障生态与社会经济可持续发展的政策措施十分重要。

畜牧业生产活动中,草地利用和消费移走或汲取了草地关键的生态系统要素,当这种攫取速度超过补给速度时,生态系统本身的资本就逐渐萎缩。因此,需要一个定量的评价方法衡量生态系统供给与消耗之间的平衡关系,进而测算生态系统对人类活动的承载能力与当前的承载状态。目前,主流的承载力评价方法各有侧重。例如,能值分析法着重将各种自然资源和社会资源统一为相同评价标准,对多种资源的利用状况综合分析;生态足迹法则是以“生态占用”的角度着重探讨人类持续生存的空间问题。自2004年Imhoff等^[20]在Nature上发表了全球人类对陆地生态系统净初级生产力消耗占用研究成果后,以生态系统净初级生产力(Net Primary Production, NPP)衡量生态供给能力,以NPP消耗衡量人类对生态系统生产力供给的消耗占用情况,探讨生态系统对人类生产生活的支撑能力及其自我维持能力,成为区域可持续发展生态评估的主要方法之一^[21-23],同时也逐渐发展为生态承载力评估的重要方法^[3,24-25]。该方法不同于生态足迹、能值分析和物质流分析等方法的是:基于供给与消耗平衡的承载力评价方法更加侧重于找到一个可持续发展的生态阈值,而NPP是可以直接由遥感观测数据估算的指标,因此“NPP消耗”成为既可以表示人类对生态系统的占用程度又能够体现其空间格局的生态系统消耗指标。利用遥感数据估算草地资源供给量,由统计资料计算畜牧业对草地资源的消耗量,进而通过草地供给与消耗的平衡关系判断草地生态系统的压力状态成为草畜平衡测算的重要手段^[26-28]。

本研究以NPP供给与消耗为依据,利用畜牧业统计数据估算各年草地资源消耗量,分析蒙古高原草地消耗的空间格局与历史演变,利用多年时序的植被净初级生产力衡量草地资源的供给能力,分别从蒙古高原草地资源供给端、消耗端以及人地关系三个维度评估草地生态系统的承载压力状态,认识内蒙古自治区和蒙古国两地不同的政策环境和人文环境背景下草地生态系统承载压力的现状、成因和机理。

1 研究方法与数据来源

1.1 数据来源与预处理

本研究采用的数据包括草地分布、草地生态系统NPP、畜牧业统计数据 and 降水量数据。NPP数据采用基于Zhang等^[29]通过植被光合呼吸模型(Vegetation Photosynthesis Model, VPM)研制的2000-2016年植被总初级生产力(Gross Primary Production, GPP)数据,通过自养呼吸比率计算得到的NPP数据,空间分辨率500 m,时间分辨率为8天。通过数据下载、拼接等预处理后,计算每年的NPP总量,并投影到正轴等积割圆锥投影,以便于进行面积统计,数据单位转换为 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

内蒙古自治区和蒙古国牲畜分布统计数据分别来源于2000-2017年内蒙古自治区统计年鉴和蒙古国统计年鉴,主要包括内蒙古自治区各地级行政区和蒙古国各一级行政区的牛、马、山羊、绵羊、驴和骆驼等牲畜的年中和年末数量,单位为头。土地覆被利用分类数据来源于欧空局气候变化倡议项目(European Space Agency's Climate Change Initiative)生产的2015年ESACCI-LC土地利用数据。该数据采用FAO/UNEP土地覆被分类系统(LCCS),空间分辨率为300 m(图1)^[30],本研究提取数据集中全部草地范围(类型编号为110、130、150、153)。气候数据采用瑞士苏黎世大学基于ERA-Interim数据再分析生产的地球陆表高分辨率气候数据(The Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface, CHELSA),时间跨度为1979-2013年,时间分辨率为1个月,空间分辨率达到1 km。本研究将草地分布数据与降水量数据进行叠加,得到草地降水数据用于草地供给分析。

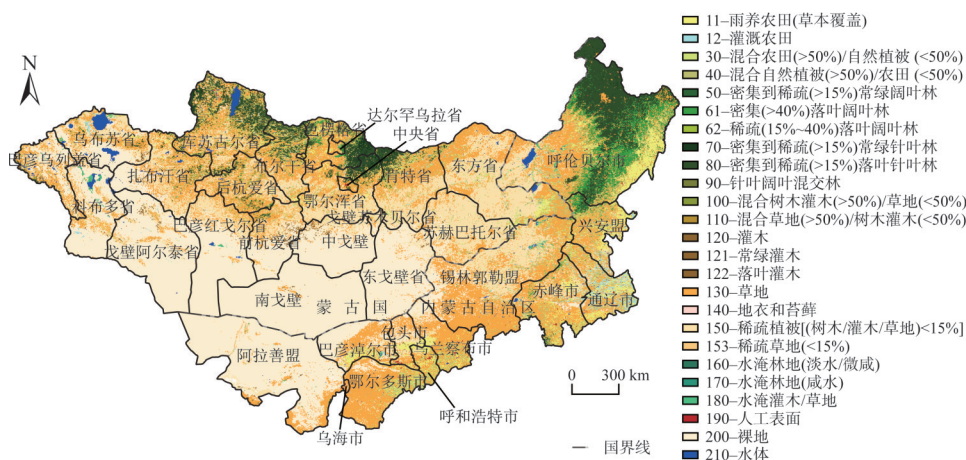


图1 2015年中国内蒙古自治区与蒙古国土地利用类型分布

Fig. 1 Distribution of land use types in Inner Mongolia of China and Mongolia in 2015

1.2 研究区概况

蒙古高原也称为东亚内陆高原,地处东北亚的内陆地区,东起大兴安岭,西达阿尔泰山脉,北连萨彦岭、肯特山、雅布洛诺夫山脉,南界戈壁沙漠,地势较高且平坦,平均高程1580 m。本研究中蒙古高原的区域范围包括蒙古国和中国的内蒙古自治区,纬度跨越 $41^{\circ}35' \sim 52^{\circ}8' \text{N}$,经度在 $87^{\circ}44' \sim 119^{\circ}55' \text{E}$ 之间,共约 275.0 km^2 。其中,内蒙古自治区面积约为 118.3 万 km^2 ,约占中国总面积的12.3%,2016年年末全区常住人口约为2520.1

万人；蒙古国面积约为156.7万km²，2016年人口约为312.0万人。

蒙古高原地处温带大陆性气候区，降水稀少，年温差较大^[31]，大约有40%~50%左右的土地被草原所覆盖^[32-33]，其草地面积约占全球草地面积的5.6%^[34-35]。根据基于CHELSA数据的蒙古高原降水量统计结果，蒙古高原草地降水量较低，平均值为269.25 mm，并且在各个地区分布不均，从最低的19 mm到最高的749 mm。在降水量等气候因素的限制下，草地生长状况年际差异大，生态系统结构单一且脆弱^[36]。根据不同地区草地生长差异，蒙古高原草地主要分为草甸草原、典型草原和荒漠草原。蒙古高原降水量从北向南、从东向西减少，使得三种草原类型也呈现规律化分布：草甸草原分布在蒙古高原的北部和东部，形成一个弧形；随着草原向欧亚大陆内陆延申，草甸草原逐渐过渡到典型草原、荒漠草原，并最终过渡到荒漠地区（图1）。在人口增加和经济发展的趋势下，草地所承载的牲畜不断增多，压力不断增大，逐渐成为当今资源科学与环境科学的研究热点区域。

1.3 研究方法

从供给与消耗角度出发，在供给端利用植被净初级生产力数据作为估算草地供给量的基础数据，利用多年NPP和土地利用数据估算草地资源供给量（Supplied Net Primary Productivity, SNPP）作为可载畜量，在消耗端利用畜牧业统计数据作为估算草地消耗量的基础数据，利用畜牧业统计数据估算草地资源消耗量（Consumed Net Primary Productivity, CNPP）作为实际载畜量，两者的比值为生态承载压力状态指数。

1.3.1 草地资源消耗量

为了便于计算草地资源消耗，本研究利用转换系数将各类牲畜（牛、马、驴、骆驼、山羊、绵羊等）转换为标准羊单位，折算系数参考中华人民共和国农业行业标准中的《天然草地合理载畜量的计算》^[37]，取得各种牲畜中型体重的折算系数。特别地，对牛而言，取得黄牛、水牛和耗牛的中型体重折算系数的平均值。各类牲畜转换为标准羊单位的折算系数如表1所示。

表1 标准羊单位折算系数表

Table 1 Conversion coefficient table of standard sheep unit

牲畜类型	绵羊	山羊	牛	马	驴	骆驼
折算系数	1.0	0.8	6.0	5.5	3.0	8.5

标准羊单位数量（Number of Standard Sheep Unit, NSSU）按照上述折算系数进行折算，计算公式如下：

$$NSSU = \sum_{i=1}^n N_i \times \epsilon_i \quad (1)$$

式中： i 表示牲畜种类； n 表示牲畜种类数目； N_i 表示 i 牲畜类型的数量（头）； ϵ_i 为某种牲畜的标准羊转换系数。利用NSSU即可通过牲畜的食草量、食草天数等参数对草地资源消耗量进行估算^[27]：

$$CNPP = NSSU_e \times GW \times GD_e \times (1 - MC) \times FC \times 1000 + (NSSU_m - NSSU_e) \times GW \times GD_o \times (1 - MC) \times FC \times 1000 \quad (2)$$

式中: $CNPP$ 代表草地资源消耗量 (g C); $NSSU_m$ 和 $NSSU_e$ 分别表示年中和年末的牲畜标准羊单位数量 (头); GW 代表食用干草的重量 (kg/天), 本研究设为 1.8 kg/天 ^[38]; GD_e 和 GD_o 表示存栏牲畜和出栏牲畜的食草天数 (天), 本研究分别设为 365 天 (生长季 184 天) 和 180 天 (生长季 61 天); MC 表示风干草含水比例, 虽然干草已经去除了大量水分, 但仍存在吸附在蛋白质、淀粉上的吸附水, 本研究设为 14% ^[38-39]; FC 表示为生物量和碳含量的转换系数 ($\text{g C} \cdot \text{g}^{-1}$), 根据龙世友等^[40]的实测研究结果, 不同草种中的碳含量相差不大, 其变化在 $0.45 \sim 0.55$ 之间, 本研究设为 0.45 。

1.3.2 草地资源供给量

利用由 2000-2016 年的 VPM 模型计算的 NPP 多年平均值与草地分布数据进行空间叠加分析, 计算草地生态系统的 NPP 总量, 记为 NPP_g 。其中, 可供畜牧业生产所利用的部分 ($ANPP_g$) 由下式计算:

$$ANPP_g = \beta \times NPP_g \quad (3)$$

式中: β 代表可供畜牧利用的草地供给系数。根据马文红等^[41]利用地面刈割和地下挖掘等方法对 300 余个样点进行生物量调查, 得到的中国北方草地地上、地下生物量密度及其占比研究结果, 草地地上生物量占总生物量的比例为 14% , 因此 β 值设为 0.14 。为了进行基于行政单元的统计与分析, 求得 $ANPP_g$ 在各个行政区的草地可利用的净初级生产力的总和, 即:

$$SNPP_g = \sum ANPP_g \times \gamma^2 \quad (4)$$

式中: γ 为 $ANPP_g$ 的空间分辨率 (m); $SNPP_g$ 为各个行政区可利用的草地净初级生产力的总和 ($\text{g C} \cdot \text{a}^{-1}$), 本研究将 $SNPP_g$ 作为草地资源供给总量 $SNPP$, 即:

$$SNPP = SNPP_g \quad (5)$$

1.3.3 草地承载压力

草地承载状态 (Grassland Carrying State, GCS) 采用草地承载状态指数 (Grassland Carrying State Index, GCSI) 作为指标, 其计算公式如下:

$$GCSI = CNPP \div SNPP \quad (6)$$

式中: $GCSI$ 表示为草地承载状态指数; $CNPP$ 为牧业生产消耗量 ($\text{g C} \cdot \text{a}^{-1}$)。当消耗量低于供给量时, 草地承载力处于盈余状态; 当消耗量高于供给量时, 草地则处于超载状态。为了能够定性分析各个地区的草地承载状态, 并评价其差异性, 参考封志明等^[42-43]在中国土地资源承载力中的分级方案, 根据草地承载力供给及盈余程度将草地承载状态分成盈余与超载两种状态。为了细致刻画蒙古高原各地区草地承载状态的差异, 本研究将草地承载状态指数以 0.2 为间隔分别将盈余与超载等分为三个不同的等级, 即共包含富富有余、盈余、平衡有余、临界超载、超载和严重超载 6 个等级 (表 2)。

表 2 草地承载状态分级

Table 2 Classification standard table for grassland carrying state

草地承载状态指数 $GCSI$	<0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	1.0~1.2	1.2~1.4	>1.4
草地承载状态 EEC	富富有余	盈余	平衡有余	临界超载	超载	严重超载

2 结果分析

2.1 蒙古高原草地畜牧业结构及变化

内蒙古自治区与蒙古国牲畜的空间结构布局有很大差异,2016年蒙古高原各地区各种牲畜的标准羊单位数量占比分析体现出两个区域之间的分异特征,即蒙古国的各类主要牲畜(羊、牛、马等)空间分布均衡,在全国各个地区基本都存在一定比例的分布;而内蒙古自治区各地区间牲畜结构差异较大。内蒙古自治区的12个地区中有9个以牛和绵羊两种牲畜为主,两种牲畜的比例占整个地区的75%以上,分布在中东部地区、西部地区的牲畜类型更为多元化,除位于沙漠区的阿拉善地区骆驼和山羊分别占42%和28%以外,其余两个地区山羊、绵羊、牛所占的比例相当。在蒙古国北部地区以牛、山羊、绵羊、马四类牲畜为主,南部戈壁荒漠区骆驼开始占一定比例,尤其是南戈壁区骆驼和山羊的占比分别达32%和36%;22个地区中有14个主要牲畜类型(占比超过20%的类型)在三类以上,牲畜类型分布较内蒙古自治区均衡和多元化(图2)。

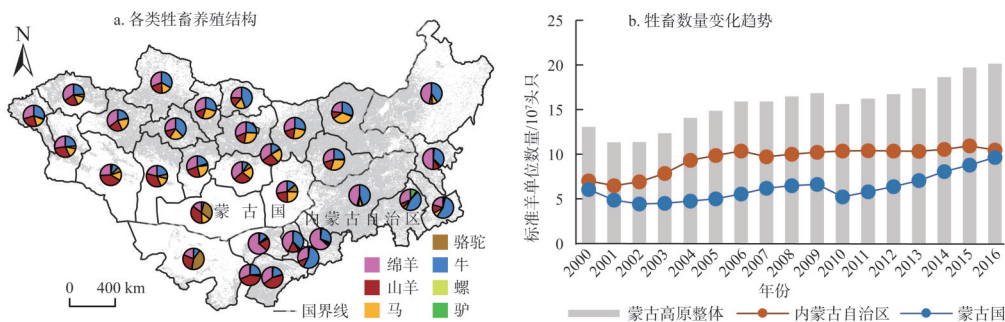


图2 蒙古高原羊单位数量空间分布与变化趋势

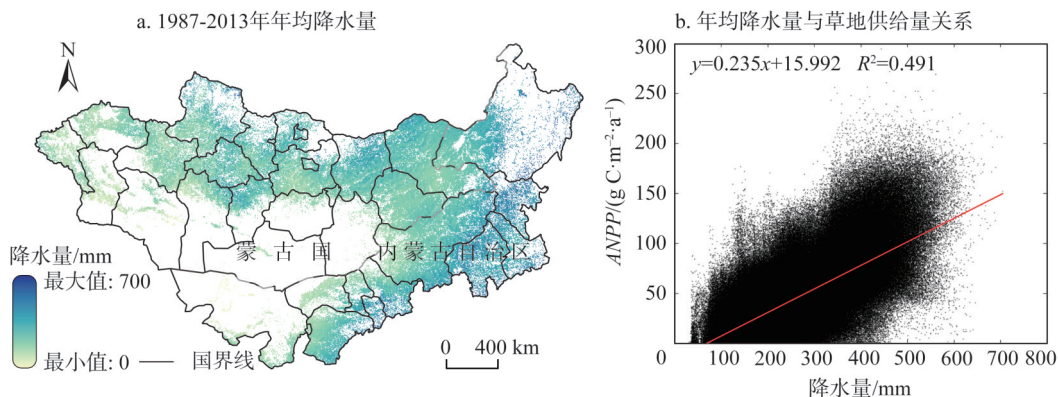
Fig. 2 Spatial distribution and variation trend of NSSU in Mongolian Plateau

2000-2016年间,蒙古高原牲畜数量从2000年的约1.31亿羊单位增长到2016年的约2.01亿羊单位。内蒙古自治区以每年约218万羊单位的速率增长,从2000年的0.70亿增长到2016年的1.05亿;蒙古国牲畜增长速率略高,从2000年的0.60亿羊单位增长到2016年的0.97亿羊单位,年均增长约231万羊单位。然而,蒙古高原的牲畜数量并非持续增长,而呈现波动上升趋势。其中,蒙古国在2010年之前羊单位较为平稳,在2010年因受冻害较前一年减少了21%,在2010年以后,羊单位数量又出现迅速增加趋势。内蒙古自治区在2006年以前数量增速较快,而2006年以后数量则没有明显的波动。

2.2 蒙古高原草地供给与消耗的空间格局

蒙古高原降水量主要来自西风带和东亚季风,限制了蒙古高原草地供给量的分布(图3)。蒙古高原北部地区受西风带影响,蒙古国降水量呈现出北高南低的趋势,约从北部的651 mm下降到南部的19 mm,平均降水量为240.28 mm;而东部受东亚季风影响,雨水较为充足,雨热同期,降水量呈现从西向东逐渐升高的趋势,约从33 mm上升到749 mm,平均值为308.43 mm。从降水量与草地供给量的相关性来看(图3b),蒙古高原草地供给量随降水量的增加而增加,解释系数 R^2 为0.491,基本呈线性正向关系。

蒙古高原草地供给能力的空间格局与降水量分布相似(图4)。蒙古国草地供给量呈现出北高南低的趋势,鄂尔浑省草甸草原最高达到了 $73.23 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;而东部的内蒙古



注: 1987-2013年年均降水量来源于CHELSA。

图3 蒙古高原草地年降水量及与草地供给的关系

Fig. 3 Annual precipitation of grassland in Mongolian Plateau and its relationship with grassland supply

自治区草地供给量呈现从西向东逐渐升高的趋势, 东部多地(赤峰市、通辽市、兴安盟和呼伦贝尔市)草甸草原平均供给量高于 $80 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。蒙古高原草地资源供给总量为 $5.72 \times 10^{13} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中内蒙古自治区占43%, 蒙古国占57%。但内蒙古自治区单位面积供给水平略高于蒙古国, 内蒙古自治区和蒙古国的多年平均草地资源供给量分别为 $54.42 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $43.77 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。内蒙古自治区草地供给量在 $44.77 \sim 67.91 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间波动, 最欠年较平均状态低18%, 丰年较平均状态高25%; 而干旱等极端气候条件对蒙古国草地资源供给能力的影响较内蒙古自治区更强烈, 蒙古国草地供给量在 $30.10 \sim 53.04 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 区间波动, 最欠年草地供给较平均状态低31%, 丰年较平均状态高21%。

2000-2016年, 蒙古高原地区NPP消耗量(CNPP)呈逐渐增长的趋势, CNPP从2000年的 $3.87 \times 10^{13} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$ 增长到2016年的 $6.50 \times 10^{13} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$, 增长了68%。其中, 内蒙古自治区在2006年以前草地的消耗量呈高速上升趋势, 而2006以后增长趋势放缓, CNPP从2000年的 $2.15 \times 10^{13} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$ 增长到2016年的 $3.70 \times 10^{13} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$, 增长了72%; 蒙古国增速略缓, 其草地消耗量几乎一直处在上升的趋势, 只有2010年由于气象灾害导致了牲畜数量大量死亡, 使得草地消耗量出现一次降低, 其CNPP从2000年的 $1.72 \times 10^{13} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$ 增长到2016年的 $2.79 \times 10^{13} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$, 增长了62%。无论是从蒙古高原整

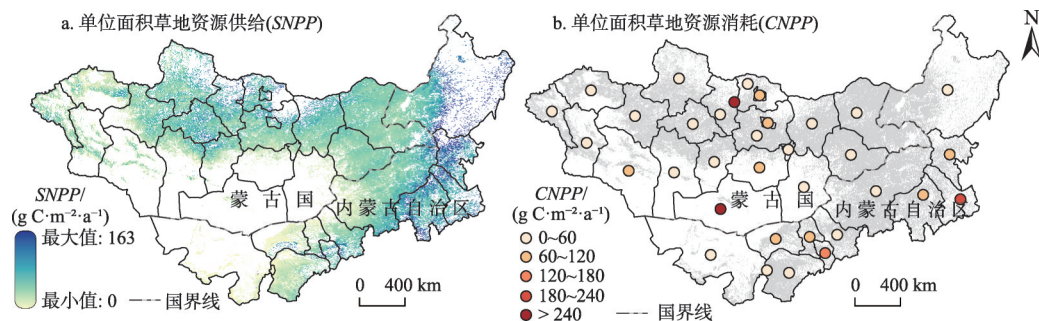


图4 蒙古高原草地资源供给与消耗空间格局

Fig. 4 Distribution of meadow supply and consumption in Mongolian Plateau

体,还是内蒙古自治区或蒙古国,其草地消耗量均呈现出明显的上升趋势,内蒙古自治区和蒙古高原整体的草地消耗量分别在2005年和2014年超出了草地供给量,而近年来蒙古国的草地消耗量也逐渐逼近草地供给量(图5)。

2.3 蒙古高原地区草地承载状态空间分布与变化趋势

2000-2016年,蒙古高原草地承载状态指数($GCSI$)显著提升($R^2=0.89$), $GCSI$ 从2000年的0.68上升到2016年的1.14,上升了68%,草地承载压力从盈余状态不断增强直至临界超载。内蒙古自治区草地承载压力变化较蒙古国更为剧烈,从0.76上升到1.31,上升了73%,草地承载压力从盈余状态变为超载的状态;蒙古国从0.60上升到0.97,上升了62%,从盈余的状态转变为平衡有余状态(图5)。



图5 2000-2016年蒙古高原SNPP、CNPP、GCSI变化趋势

Fig. 5 Trend of SNPP, CNPP and GCSI in Mongolia Plateau from 2000 to 2016

2001年,蒙古高原共有11个地区处于严重超载状态(内蒙古自治区5个,蒙古国6个),其中有10个位于荒漠草原。至2006年,除内蒙古自治区锡林郭勒盟外,蒙古高原整体上草地压力增强,内蒙古自治区新增3个严重超载地区,其中鄂尔多斯市、乌兰察布市也处在荒漠草原中。2006-2011年,内蒙古自治区锡林郭勒盟的草地压力进一步减缓,锡林郭勒盟以西地区的荒漠、半荒漠草原区草地压力也在缓解,乌兰察布市从严重超载转变为超载;同时,蒙古国西部地区的草地压力也在缓解;但是,位于草地生产力较高地区蒙古国达尔罕乌拉省和内蒙古自治区赤峰市的超载程度均有上升。2011-2016年,蒙古国全域草地承载压力增加,内蒙古自治区除中部地区的呼和浩特、包头和乌兰察布市外,其他区域草地承载压力也都趋于增强。蒙古国有4个处在典型草原的地区变为严重超载,而内蒙古自治区只有赤峰市从超载转变为严重超载状态。可见,蒙古高原超载地区主要出现在荒漠草原地区,蒙古国严重超载地区从东南部的荒漠草原地区不断向北扩展到典型草原地区,而内蒙古自治区则由于近年来草畜平衡等生态保护政策的实施使得2001-2011年间中西部地区草地承载压力整体趋缓(图6)。

蒙古高原地区的载畜压力呈现不断增加的趋势(图7),2000-2016年超载及临界超载的地区数量从12个上升到22个,而富富有余的地区从10个下降到3个。内蒙古自治区超载及临界超载的地区数量从6个上升到9个,而富富有余的地区从2个下降为零;蒙古国超载及临界超载的地区数量从6个上升到13个,而富富有余的地区从8个下降到3个。但是内蒙古自治区和蒙古国的草地承载压力变化态势不同,蒙古国体现出自2003年起富富有余状态区逐步减少而严重超载状态区逐步增多的草地压力日益增强的发展态势,严重

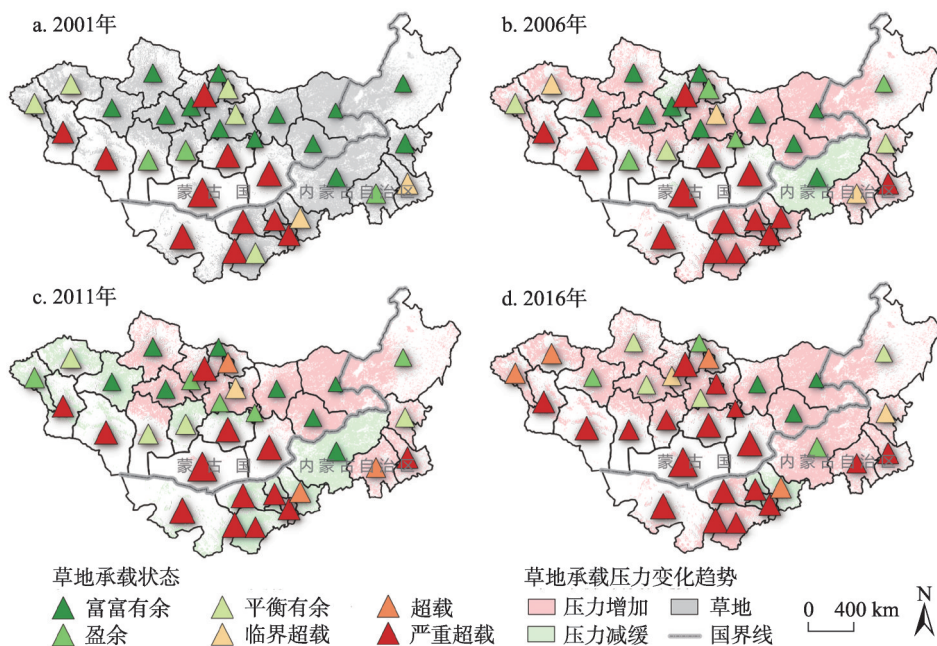


图6 2001年、2006年、2011年、2016年蒙古高原地区各行政区草地承载状态空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of grassland carrying state in Mongolian Plateau in 2001, 2006, 2011 and 2016

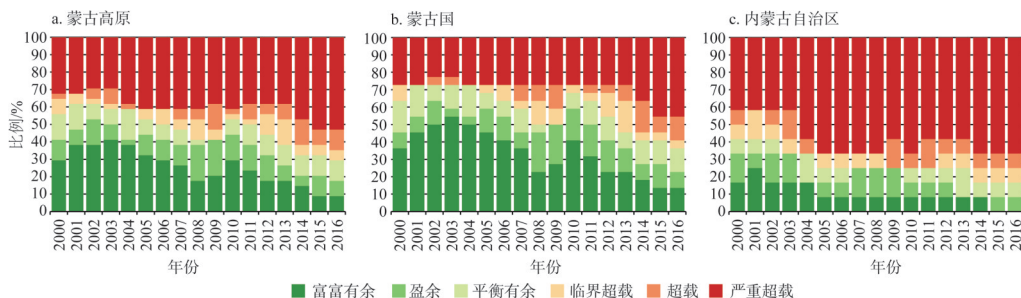


图7 2000-2016年蒙古高原不同草地承载状态地区数量变化趋势

Fig. 7 The quantity trend of different grassland carrying state types in Mongolian Plateau from 2000 to 2016

超载地区主要出现在2013年以后, 2003-2012年间6个严重超载地区都稳定分布在草地生产力低下的地区。内蒙古自治区则受生态保护政策的影响体现出波动性变化特征, 严重超载状态的区域在2003-2006年和2014-2016年间最多, 其他时段超载程度有所缓解。近年来, 内蒙古自治区虽然有生态保护政策约束, 但由于人口和GDP增加很快, 使得牲畜养殖数量平稳略有上升的趋势, 对草地的利用强度依然很大, 因此虽然2014-2016年的严重超载状态区域最多, 但是相对于2005年以来严重超载地区的数量变化不大。

3 结论与讨论

3.1 结论

以草地生态系统供给与消耗之间的平衡关系为依据, 通过分析蒙古高原畜牧业结构与数量, 估算畜牧业养殖产生的草地资源消耗量及其对草地资源供给能力的压力, 评价

不同草地利用方式下内蒙古自治区和蒙古国草地生态系统的承载状况, 研究结果表明:

(1) 蒙古高原牲畜数量从2000年的约1.31亿羊单位波动上升到2016年的约2.01亿羊单位; 16年间内蒙古自治区牲畜总头只数增长了50%, 蒙古国牲畜增长了62%。内蒙古自治区和蒙古国两地不同的政策和习俗深刻影响了牧民对草地的利用方式, 使得两地畜牧业生产结构产生显著差异, 蒙古国羊、牛、马等主要牲畜类型在全国各个地区基本都存在一定比例的分布, 而内蒙古自治区的12个地区中有9个以牛和绵羊两种牲畜为主, 两种牲畜的比例占整个区域的75%以上, 内蒙古自治区牲畜类型组成区域差异较大, 而蒙古国各区域牲畜类型组成则更为均匀。

(2) 蒙古高原草地资源供给总量为 $5.72 \times 10^{13} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$, 内蒙古自治区单位面积供给水平较蒙古国高24%, 但是内蒙古自治区草地供给量最低年份较平均状态低18%, 而蒙古国草地供给量最低年份较平均状态低31%, 因而干旱等极端气候条件对蒙古国草地资源供给能力的影响较内蒙古自治区更强烈。2000-2016年, 蒙古高原地区草地资源消耗量增加了68%, 内蒙古自治区增速较快, 在2006年以前草地的消耗量呈现高速上升趋势, 而2006以后增长趋势放缓, 其CNPP增长了72%, 并于2005年超出了草地供给量; 蒙古国的草地消耗量几乎一直处在上升趋势, 只有2010年由于气象灾害导致了牲畜数量大量死亡, 使得草地消耗量出现一次降低, CNPP增长了62%, 正在逐渐逼近草地供给量。整体上, 草地资源消耗量的增加使得蒙古高原草地资源消耗总量在2014年超出了供给量。

(3) 2000-2016年间, 蒙古高原草地承载压力不断增大, 整体从盈余状态变为临界超载状态, 并且持续严重超载地区主要出现在荒漠草原地区, 并逐渐向半荒漠草原、典型草原以及农牧交错区推进。其中, 蒙古国自2003年起富富有余状态区逐步减少而严重超载状态区逐步增多, 在2013年以后严重超载地区跳跃式增加, 可能原因是经济全球化背景下蒙古国畜牧业高速发展使得牲畜数量明显增多。与蒙古国草地承载压力日益增强的发展态势不同, 内蒙古自治区草地承载压力呈现波动性变化特征, 严重超载在2003-2006年和2014-2016年间两个时段最为突出, 这可能与2000年起中国实施的禁牧还草等一系列草地生态系统恢复的相关政策实施有关。

3.2 讨论

蒙古高原草地资源变化与人类利用的关系一直是研究的热点, 表3列举了近年来主要的蒙古高原草地资源与草地承载力变化的相关研究。草地变化是一个长期过程, 这些研究都使用了至少30年的数据对地表植被进行了分析, 并且研究结果都无疑例外地展现了蒙古高原草地的退化趋势。不过这些研究都更加侧重于供给端或消耗端: 从定性和定量角度对供给分析上看, 草地退化具有一定的区域性^[44-45], 常常集中于草地植被和荒漠区的过渡地带^[3], 这与本文中草地供给量在各个区域变化存在差异性的结论相符。但是上述研究并没有对人类的草地利用过程进行深入探讨。张耀启等^[46]分析了近三千余年蒙古高原草地、牲畜和人口之间的关系, 全面地分析了各种人为因素与草地的平衡关系。但是由于时间尺度很长, 难以对人草关系进行详尽的承载状态分析, 特别是文献资料中常常缺乏草地生长的定量描述。在这个层面上, 相比于上述分析, 本文基于现有的畜牧业资料和草地卫星监测数据, 提供了较为长期、连续和可靠的草地承载状态分析结果。

从2000年以来各区域的草地承载状态的变化情况来看, 内蒙古自治区和蒙古国具有明显的差异性: 特别是因社会制度和生态管理措施的不同, 使得2000年以来草地生态系

表3 蒙古高原草地资源与草地承载力相关研究分析对比

Table 3 Analysis and comparison of grassland resources and grassland carrying capacity in Mongolia Plateau

研究主题	研究方法	数据	侧重角度	时间尺度	主要结论	参考文献
土地利用变化	多维迭代分类	Globcover	定性/供给端	1970年代末-2005	草地面积减少，内蒙古自治区更加严峻	[45]
植被变化	Hurst指数	GIMMS NDVI	定量/供给端	1982-2011	过渡放牧是区域退化的主要因素，草地退化还将继续	[44]
草地退化	草地退化指数(GDI)	GIMMS NDVI MODIS NDVI	定量/供给端	1982-2013	先退化后改善，草地退化区域性明显	[3]
草地—牲畜—人关系	自然与社会耦合理论	书籍资料	定性/消耗端	近三千年	自然灾害、战乱等是人、畜、草的平衡器，畜牧业技术革新提高了草场承载能力	[46]

统的压力态势出现显著的差异。自从21世纪以来，内蒙古自治区实行了“禁牧休牧”“退耕还草”等一系列生态恢复和生态治理的相关政策^[47-48]，牲畜数量得到了控制，直接缓解了草地的承载压力。而蒙古国的牲畜数量则持续上升，对于草地资源的利用强度加剧。另外，两国畜牧业养殖方式的不同使得二者对极端气候事件应对能力不同，影响着牲畜数量的稳定性。在2010年初，蒙古高原出现了严重的冻害^[49]，在相似的气候背景下，蒙古高原牲畜量出现了明显的降低，而内蒙古自治区的牲畜量却没有发生太大的变化，说明这可能和两地的放牧政策与生活习俗有关：内蒙古自治区的放牧政策以定居为主，放牧在固定的草地进行，而且畜牧用的饲料来源比较固定；冬季来临之时，牧民保存了大量饲料，并且保证了牲畜有稳定的栖息场所；而蒙古国则保持着游牧习俗，牲畜饲料和住所往往得不到保障，难以应对突发性强的自然灾害^[50-51]。此外，畜牧业对草地的影响是多方面的，不仅仅体现在越来越多的牲畜对草地进行啃食、踩踏等活动，也体现在牲畜分布状况的改变^[25,52]。例如羊的采食方式是“啃式采食”，特别是山羊采食往往将草连根拔起，而牛的采食方式是“卷式采食”，因此牛采食过程对牧草损伤较小^[19]，当前内蒙古自治区部分地区正在实施“增牛减羊”等草地保护和管理政策，在维持牲畜总量平衡的条件下，也正在缓解畜牧业生产对草地生态系统的压力，这也提示我们在草地承载能力及状态的评估中，除考虑牲畜养殖规模外应考虑牲畜类型差异的影响。

本研究以蒙古高原为研究对象，应用大尺度的遥感模型和统计数据，刻画各地区的草地承载状态，通过对比内蒙古自治区和蒙古国的生态供给—消耗关系，分析导致生态承载压力格局与规律形成的政策、牧民生计、文化习俗等方面的可能成因，以期掌握不同地区草畜平衡关系及人地关系提供依据。本文所探讨的内容是对当地天然草地资源供给能力和当前消耗模式的评估，是当地草业发展和异地资源补给需求分析的基础。区域草地承载状况是在经济、政策和自然环境等多因素影响下形成的复杂现象，同一个地区不同生态系统之间（耕地补饲等）和不同区域之间（跨地区牧草交易等）存在资源流动。如果在该研究的基础上，进一步分析草地异质性带来的草地可采食性差异以及生态系统外部性带来的草地资源流动过程，则能够更准确地掌握当地资源禀赋所产生的草地承载能力，并判断饲料补给、异地牧草供给等流动性要素对当前生态承载状况的影响，进而判断通过草牧业建设^[53]等措施提升当地草地畜牧业生产效率和保护草地生态可持续供给能力的可行性，为寻找草原牧区社会—生态系统可持续发展的适应性调控策略提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] STEINFELD H, GERBER P, WASSENAAR T, et al. Livestock's long shadow: Environmental issues and options. *Livestocks Long Shadow Environmental Issues & Options*, 2006, 16(1): 7.
- [2] NEELY C, BUNNING S, WILKES A. Review of evidence on drylands pastoral systems and climate change: Implications and opportunities for mitigation and adaptation. *Land & Water Discussion Paper*, 2009, 6(2): 103.
- [3] 张艳珍, 王钊齐, 杨悦, 等. 蒙古高原草地退化程度时空分布定量研究. *草业科学*, 2018, 35(2): 233-243. [ZHANG Y Z, WANG Z Q, YANG Y, et al. Research on the quantitative evaluation of grassland degradation and spatial and temporal distribution on the Mongolia Plateau. *Pratacultural Science*, 2018, 35(2): 233-243.]
- [4] HILKER T, NATSAGDORJ E, WARING R H, et al. Satellite observed widespread decline in Mongolian grasslands largely due to overgrazing. *Global Chang Biology*, 2014, 20(2): 418-428.
- [5] BATUNACUN, NENDEL C, HU Y F, et al. Land-use change and land degradation on the Mongolian Plateau from 1975 to 2015: A case study from Xilingol, China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(6): 1595-1606.
- [6] 董婷. 内蒙古草原超载过牧问题研究综述. *赤峰学院学报: 自然版*, 2011, 27(3): 47-49. [DONG T. A summary of studies on overgrazing and overgrazing in Inner Mongolia grassland. *Journal of Chifeng University: Natural Science Edition*, 2011, 27(3): 47-49.]
- [7] ZHEN L, HU J, DU B Z, et al. International experience of green development in Western China: An overall review of policy and practice. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 2015, 13(4): 281-290.
- [8] DU B Z, ZHEN L, HU Y F, et al. Comparison of ecosystem services provided by grasslands with different utilization patterns in China's Inner Mongolia Autonomous Region. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(10): 1399-1414.
- [9] ZHANG G L, BIRADAR C M, XIAO X M, et al. Exacerbated grassland degradation and desertification in Central Asia during 2000-2014. *Ecological Applications*, 2018, 28(2): 442.
- [10] SHA Z Y, ZHONG J L, BAI Y F, et al. Spatio-temporal patterns of satellite-derived grassland vegetation phenology from 1998 to 2012 in Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(3): 462-477.
- [11] BRISKE D D, ZHAO M L, HAN G D, et al. Strategies to alleviate poverty and grassland degradation in Inner Mongolia: Intensification vs production efficiency of livestock systems. *Journal of Environmental Management*, 2015, 152: 177-182.
- [12] The UB Post. Desertification affects 77% of Mongolian territory. <http://ubpost.mongolnews.mn/?p=6107>, 2013-09-20.
- [13] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Desertification Synthesis*. World Resources Institute (WRI), 2005.
- [14] 李凌浩, 王堃, 斯琴毕力格. 新时期我国草地环境科学发展战略的思考. *草地学报*, 2012, 20(2): 199-206. [LI L H, WANG K, SIQIN B L G. Perspectives on the new-era strategies for advancing grassland ecology & environmental studies in China. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(2): 199-206.]
- [15] HU Y F, BATUNACUN. An analysis of land-use change and grassland degradation from a policy perspective in Inner Mongolia, China, 1990-2015. *Sustainability*, 2018, 10(11): 40-48.
- [16] ROSEN A M, HART T C, FARQUHAR J, et al. Holocene vegetation cycles, land-use, and human adaptations to desertification in the Gobi desert of Mongolia. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2019, 1: 1-15.
- [17] 魏云洁, 甄霖, BATKHISHIG O, 等. 蒙古高原生态服务消费空间差异的实证研究. *资源科学*, 2009, 31(10): 1677-1684. [WEI Y J, ZHEN L, BATKHISHIG O, et al. Empirical study on consumption of ecosystem services and its spatial differences over the Mongolian Plateau. *Resources Science*, 2009, 31(10): 1677-1684.]
- [18] FIJN N. Living with herds: Human-animal coexistence in Mongolia. *Asia Pacific Journal of Anthropology*, 2011, 16(1): 88-90.
- [19] 师华定, 周锡饮, 孟凡浩, 等. 30年来蒙古国和内蒙古的LUCC区域分异. *地球信息科学学报*, 2013, 15(5): 719-725. [SHI H D, ZHOU X Y, MENG F H, et al. Mongolia and Inner Mongolia LUCC regional differentiation over the past 30 years. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(5): 719-725.]
- [20] IMHOFF M L, BOUNOUA L, RICKETTS T, et al. Global patterns in human consumption of net primary production. *Nature*, 2004, 429(6994): 870-873, Doi: 10.1038/nature02619.
- [21] DU W P, YAN H M, YANG Y Z, et al. Evaluation methods and research trends for ecological carrying capacity. *Journal*

- of Resources and Ecology, 2018, 9(2): 115-124.
- [22] HABERL H, ERB K H, KRAUSMANN F, et al. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *PNAS*, 2007, 104(31): 12942-12947.
- [23] 闫慧敏, 刘纪远, 黄河清, 等. 城市化和退耕还林草对中国耕地生产力的影响. *地理学报*, 2012, 67(5): 579-588. [YAN H M, LIU J Y, HUANG H Q, et al. Impacts of cropland transformation on agricultural production under urbanization and grain for green project in China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 579-588.]
- [25] ZHAO H L, ZHAO X Y, ZHOU R L, et al. Desertification processes due to heavy grazing in sandy rangeland, Inner Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62(2): 309-319.
- [26] SMART A J, DERNER J D, HENDRICKSON J R, et al. Effects of grazing pressure on efficiency of grazing on North American great plains rangelands. *Rangeland Ecology & Management*, 2010, 63(4): 397-406.
- [27] 吕鑫, 王卷乐, 康海军, 等. 基于遥感估产的2006-2015年青海果洛与玉树地区草畜平衡分析. *自然资源学报*, 2018, 33(10): 1821-1832. [LYU X, WANG J L, KANG H J, et al. Balance analysis between forage and livestock based on grassland production estimation by remote sensing in Golog and Yushu region, Qinghai, China during 2006-2015. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(10): 1821-1832.]
- [28] 张福平, 王虎威, 朱艺文, 等. 祁连县天然草地上生物量及草畜平衡研究. *自然资源学报*, 2017, 32(7): 1183-1192. [ZHANG F P, WANG H W, ZHU Y W, et al. Study on the aboveground biomass of natural grassland and balance between forage and livestock in Qilian county. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(7): 1183-1192.]
- [29] ZHANG Y, XIAO X, WU X, et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000-2016. *Scientific Data*, 2017, 4: 170165.
- [30] LI W, CIAIS P, MACBEAN N, et al. Major forest changes and land cover transitions based on plant functional types derived from the ESA CCI land cover product. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 47: 30-39.
- [31] JOHN R, CHEN J, OUYANG Z T, et al. Vegetation response to extreme climate events on the Mongolian Plateau from 2000 to 2010. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 035033, Doi: 10.1088/1748-9326/8/3/035033.
- [32] 魏云洁, 甄霖, 刘雪林, 等. 1992-2005年蒙古国土地利用变化及其驱动因素. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1995-2002. [WEI Y J, ZHEN L, LIU X L, et al. Land use change and its driving factors in Mongolia from 1992 to 2005. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 1995-2002.]
- [33] 王卷乐, 程凯, 祝俊祥, 等. 蒙古国30米分辨率土地覆盖产品研制与空间格局分析. *地球信息科学学报*, 2018, 20(9): 1263-1273. [WANG J L, CHENG K, ZHU J X, et al. Development and pattern analysis of Mongolian land cover data products with 30 meters resolution. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(9): 1263-1273.]
- [34] LI S G, ASANUMA J, EUGSTER W, et al. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in Central Mongolia. *Global Change Biology*, 2005, 11(11): 1941-1955.
- [35] BONTEMPS S, DEFOURNY P, RADOUX J, et al. Consistent global land cover maps for climate modelling communities: Current achievements of the ESA' Land Cover CCI. *ESA Living Planet Symposium*, Edinburgh, UK, 2013.
- [36] BAO G, BAO Y, QIN Z, et al. Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 46: 84-93.
- [37] 中华人民共和国农业部. NY/T 635-2015天然草地合理载畜量的计算. 北京: 中国标准出版社, 2015. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 635-2015 Calculation of Reasonable Stocking Capacity of Natural Grassland. Beijing: China Standard Press, 2015.]
- [38] 刘兴义, 赵国伟. 天然草地合理载畜量有关问题探讨. *新疆畜牧业*, 2014, (10): 62-63. [LIU X Y, ZHAO G W. Discussion on the problems related to the reasonable carrying capacity of natural grassland. *Xinjiang Animal Husbandry*, 2014, (10): 62-63.]
- [39] 来强, 李青丰, 莫日根敖其尔, 等. 草地牧草含水量测定暨干鲜比估测方法研究. *内蒙古草业*, 2008, (3): 4-7. [LAI Q, LI Q F, MORIGENAOQIER, et al. Study on the method of water content measurement and dry-fresh ratio estimation of grassland pasture. *Inner Mongolia Prataculture*, 2008, (3): 4-7.]
- [40] 龙世友, 鲍雅静, 李政海, 等. 内蒙古草原67种植物碳含量分析及与热值的关系研究. *草业学报*, 2013, 22(1): 112-

119. [LONG S Y, BAO Y J, LI Z H, et al. The carbon contents and the relationship with the calorific values of 67 plant species in Inner Mongolia grasslands. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(1): 112-119.]
- [41] 马文红, 方精云, 杨元合, 等. 中国北方草地生物量动态及其与气候因子的关系. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 632-641. [MA W H, FANG J Y, YANG Y H, et al. Biomass carbon stocks and their changes in Northern China's grasslands during 1982-2006. *Science China: Life Science*, 2010, 53: 841-850.]
- [42] 封志明, 杨艳昭, 张晶. 中国基于人粮关系的土地资源承载力研究: 从分县到全国. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 865-875. [FENG Z M, YANG Y Z, ZHANG J. The land carrying capacity of China based on man-grain relationship. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 865-875.]
- [43] 封志明, 杨艳昭, 游珍. 中国人口分布的土地资源限制性和限制度研究. *地理研究*, 2014, 33(8): 1395-1405. [FENG Z M, YANG Y Z, YOU Z. Research on land resources restriction on population distribution in China, 2000-2010. *Geographical Research*, 2014, 33(8): 1395-1405.]
- [44] MIAO L, QIANG L, FRASER R, et al. Shifts in vegetation growth in response to multiple factors on the Mongolian Plateau from 1982 to 2011. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2015, 87: 50-59.
- [45] 周锡饮, 师华定, 王秀茹, 等. 蒙古高原近30年来土地利用变化时空特征与动因分析. *浙江农业学报*, 2012, 24(6): 1102-1110. [ZHOU X Y, SHI H D, WANG X R, et al. Study on the temporal and spatial dynamic changes of land use and driving forces analysis of Mongolia Plateau in recent 30 years. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2012, 24(6): 1102-1110.]
- [46] 张耀启, 邵长亮, 陈吉泉, 等. 蒙古高原为何能持续三千年游牧: 草地、牲畜、人口关系的分析. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(6): 40-45. [ZHANG Y Q, SHAO C L, CHEN J Q, et al. Understanding 3000 years of nomadic history of Mongolian Grassland: Grassland, livestock and population. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(6): 40-45.]
- [47] DU B Z, ZHEN L, YAN H M, et al. Effects of government grassland conservation policy on household livelihoods and dependence on local grasslands: Evidence from Inner Mongolia, China. *Sustainability*, 2016, 8(12): 1314, Doi: 10.3390/su8121314.
- [48] ZHEN L, DU B Z, WEI Y J, et al. Assessing the effects of ecological restoration approaches in the alpine rangelands of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(9): 095005. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/aada51>.
- [49] TACHIIRI K, KOMIYAMA H, MORINAGA Y, et al. Application of a livestock weight model to the 2009-2010 winter disaster in Mongolia. *Rangeland Journal*, 2017, 39(3): 523-542.
- [50] STERNBERG T. Unravelling Mongolia's extreme winter disaster of 2010. *Nomadic Peoples*, 2010, 14(1): 72-86.
- [51] TACHIIRI K, SHINODA M, KLINKENBERG B, et al. Assessing Mongolian snow disaster risk using livestock and satellite data. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(12): 2251-2263.
- [52] 甄霖, 刘纪远, 刘雪林, 等. 蒙古高原农牧业系统格局变化与影响因素分析. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(1): 144-151. [ZHEN L, LIU J Y, LIU X L, et al. Analysis on the pattern change and influencing factors of agriculture and animal husbandry system in Mongolian Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(1): 144-151.]
- [53] 方精云, 景海春, 张文浩, 等. 论草牧业的理论体系及其实践. *科学通报*, 2018, 63(17): 1619-1631. [FANG J Y, JING H C, ZHANG W H, et al. The concept of "Grass-based Livestock Husbandry" and its practice in Hulun Buir, Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(17): 1619-1631.]

Spatio-temporal analysis of grassland carrying capacity in Mongolian Plateau based on supply-consumption relationship

DONG Yu^{1,2}, YAN Hui-min^{1,2}, DU Wen-peng^{1,2}, HU Yun-feng^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

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

Abstract: Under the influence of global climate change and human activities, the problems of grassland grazing overload and grassland degradation in the Mongolian Plateau have become increasingly prominent. How to reveal the human-land relationship of grassland ecosystem from the perspective of the intensity of animal husbandry production to grassland utilization is very important for the sustainable utilization of grassland resources. Based on the balance relationship between supply and consumption of grassland ecosystem, using satellite remote sensing data and livestock statistics, the ecological carrying status of grassland ecosystem in Mongolian Plateau was analyzed, and the regional differences of carrying pressure of grassland ecosystem under different policy backgrounds and resource endowments were studied. The results show that: (1) Different policies and customs in Mongolia and Inner Mongolia of China profoundly affect the way herdsmen use the grassland, which caused significant differences in the livestock production structure of the two areas. The composition of livestock types in Inner Mongolia of China has great regional differences and the total amount is relatively stable, while the number of livestock in Mongolia has increased significantly, and the composition of livestock types is more uniform in the region. (2) The consumption of grassland resources in Mongolia and Inner Mongolia of China showed an obvious upward trend. The total consumption of grassland resources in the Mongolian Plateau exceeded its supply in 2014. Specifically, consumption of grassland resources in Inner Mongolia of China exceeded its supply in 2005, and the consumption of grassland resources in Mongolia has gradually approached the supply in recent years. (3) From 2000 to 2016, the carrying pressure of grassland in Mongolian Plateau has been increasing, and the overall situation has changed from surplus state to critical overload state. Continuous serious overload areas mainly occur in desert grassland areas, and gradually advance to typical grassland and agro-pastoral ecotone. Since 2003, Mongolia's rich and surplus areas have gradually decreased and the serious overload areas have gradually increased, while the Inner Mongolia Autonomous Region has been fluctuating under the influence of ecological protection policies. The spatial and temporal differences of grassland carrying capacity in Mongolia and Inner Mongolia of China were quantitatively analyzed. The changes of livestock structure and intensity under different social and economic backgrounds could provide scientific basis for grassland resource management.

Keywords: Mongolian Plateau; ecological consumption; ecological pressure; balance of grass and livestock; grassland carrying status