

DOI: 10.20103/j.stxb.202405311255

王雯雯, 栗塞雅, 李昂, 周立华, 张亚丽. 我国南方草牧业发展和生态协同研究. 生态学报, 2024, 44(22): 10212-10221.

Wang W W, Li S Y, Li A, Zhou L H, Zhang Y L. Study on the development of pasture-based livestock husbandry and ecological coordination in south China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10212-10221.

## 我国南方草牧业发展和生态协同研究

王雯雯<sup>1</sup>, 栗塞雅<sup>2,3</sup>, 李昂<sup>4</sup>, 周立华<sup>5</sup>, 张亚丽<sup>2,3,\*</sup>

1 华北电力大学 环境科学与工程学院 资源环境系统优化教育部重点实验室, 北京 102206

2 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 中国科学院植物研究所, 北京 100093

5 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

**摘要:** 随着国内对肉奶的需求日益增长, 北方草原因载畜量逼近其生态承载力而难以继续扩大产能。在此背景下, 积极推进南方生态草牧业的发展, 对保障肉奶供应和缓解北方放牧压力至关重要。然而, 南方草牧业发展潜力尚未得到充分的量化评估, 其生产生态协调问题也亟待研究。因此, 聚焦南方草牧业的生产与生态协同问题, 选取我国南方 8 个省份, 从市级尺度评估 2000—2020 年间的牧草供需状况, 并探讨其对生态保育的潜在影响。研究表明, 南方八省拥有丰富的草地资源, 总干草产量高达  $4.49 \times 10^{11}$  kg, 尤其在云南、贵州与四川西部, 这些区域的牧草产量占总量的 73.50%。尽管南方草地总体饲草富余, 约 71% 的市域呈现盈余状态, 显示出生态草牧业的巨大发展潜力, 但草牧业的发展也可能对生态系统服务产生不利影响。以云南省和四川省为例, 共 25 个市域拥有较高的草牧业发展潜力, 然而, 这些地区生境质量较高, 平均值达到 0.52, 而且在碳储量与产水量方面也表现出色, 分别为  $837.24 \text{ g C/m}^2$  与  $515.66 \text{ mm}$ 。这意味着在这些区域推进草牧业发展的同时, 将会削弱其生态系统服务功能。因此, 建议对南方草地的生态草牧业进行顶层规划, 选择水土保持和生物多样性保育压力小的区域发展草牧业, 在生态系统服务重要的区域采取严格保育措施, 以实现南方草牧业的生产与生态协同发展。

**关键词:** 南方草牧业; 草畜供需; 生产潜力; 生产生态权衡

## Study on the development of pasture-based livestock husbandry and ecological coordination in south China

WANG Wenwen<sup>1</sup>, LI Saiya<sup>2,3</sup>, LI Ang<sup>4</sup>, ZHOU Lihua<sup>5</sup>, ZHANG Yali<sup>2,3,\*</sup>

1 MOE Key Laboratory of Resources and Environmental Systems Optimization, College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

2 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Modelling, Institute of Geographic Sciences and Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

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

4 Institute of Botany, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

5 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract:** Despite the rapid increase in demand for meat and dairy, China's northern grasslands cannot support expanded livestock production, as the current livestock numbers have already surpassed the ecological carrying capacity. Thus, the development of grasslands in South China is vital for securing future supplies of meat and dairy and could help ease the

**基金项目:** 中国科学院战略性先导科技专项-创建生态草牧业科技体系(A类)(XDA26010301); 国家自然科学基金(42277488, 32271744)

**收稿日期:** 2024-05-31; **采用日期:** 2024-10-31

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyali@igsrr.ac.cn

grazing pressure on the northern rangelands. However, gaps in knowledge remain regarding the development potential of pasture-based livestock husbandry in South China, and the production-ecology coordination issues of southern grasslands are also in urgent need of research. To answer this question, this study focuses on the production-ecology synergy of southern pasture-based livestock husbandry, assessing the spatial distribution characteristics of forage demand and potential supply capacity in eight southern provinces at the municipal scale from 2000 to 2020, and analyzing the potential ecological impacts of the development of southern pasture-based livestock husbandry. Based on these research results, we analyze the trade-offs and synergies between the development of pasture-based livestock husbandry and ecological conservation in South China. The results show that the eight southern provinces have abundant grassland resources, with a total dry forage grass production of  $4.49 \times 10^{11}$  kg, mainly concentrated in Yunnan, Guizhou and western Sichuan, where the yields account for 73.50% of the total production. Although the production of natural forage grasses exceeds the consumption of local livestock in southern provinces, with about 71% of the cities showing the forage surplus. This result indicates a huge potential for the development of ecological pasture-based livestock husbandry in South China. However, developing pasture-based livestock husbandry could potentially introduce adverse ecological impacts in China's southern grasslands. Taking Yunnan Province and Sichuan Province as examples, a total of 25 cities have a higher potential for the development of pasture-based livestock husbandry. Nevertheless, these cities have many intact habitats of superior quality with an average value reaching 0.52 and they also exhibit excellent performance in providing vital ecosystem services, such as carbon storage at  $837.24 \text{ g C/m}^2$  and water yield at 515.66 mm, respectively. This suggests that promoting pasture-based livestock husbandry in these areas might come at the expense of diminished ecosystem service function. Therefore, this study advocates for strategic planning for ecological pasture-based livestock husbandry in the southern grasslands. This study recommends prioritizing areas with lower impacts on soil and water conservation and biodiversity, while implementing stringent conservation measures in southern regions with important ecosystem services to harmonize production and ecological development.

**Key Words:** southern pasture-based livestock husbandry; pasture supply and demand; production potential; production-ecology trade-offs

草地是我国重要的陆地生态系统,覆盖了约 41.7%的国土总面积<sup>[1]</sup>,既是畜牧业健康发展不可或缺的物质基础,也在防风固沙、生物多样性保育等方面提供了极其重要的生态系统服务。我国草地分为北方温带草原、青藏高寒草原与南方草山草坡。其中,北方草原和青藏高原的生态保育压力巨大,实际载畜量已经逼近甚至超过生态承载力,难以继续增产,因此难以满足我国人民群众对优质肉奶产品日益增长的需求<sup>[2-4]</sup>。鉴于此,南方草山草坡的生态草牧业发展,在满足人民群众的肉奶需求方面,具有重要的意义。自 2010 年以来,我国政府相继出台了一系列政策,明确提出促进南方草牧业的发展。2014 年,农业部办公厅与财政部办公厅联合发布《关于做好 2014 年南方现代草地畜牧业发展工作》的通知,强调在保护生态环境的基础上,合理开发利用南方草山草地资源。2020 年,国务院办公厅发布《关于促进畜牧业高质量发展的意见》,进一步强调南方草山草坡地区的草地改良和人工草地建植的重要性。2022 年,农业农村部印发《“十四五”全国饲草产业发展规划》,提出因地制宜挖掘南方地区饲草生产潜力。这些政策的出台,体现了国家层面对南方草牧业发展的空前重视。我国南方草山草坡资源丰富,面积高达 7.34 亿  $\text{hm}^2$ ,四季常青,产草量高,蕴藏着发展畜牧业的巨大潜力<sup>[5]</sup>。研究表明,高水平开发南方草地 1330 万  $\text{hm}^2$ ,可使年产牛羊肉能力高达 300 万 t<sup>[6]</sup>;同时,南方地区市场需求旺盛,发展草牧业具有显著的经济价值<sup>[7]</sup>。然而,目前南方草牧业仅利用了 20%—50%的天然牧草,且现有放牧地多集中在丘陵岗地和农林隙地<sup>[8]</sup>,粗放的牧业管理导致草地生态退化问题严重<sup>[9]</sup>。加之,未来南方草牧业的发展必然会导致集中连片的高山草地的开发<sup>[8]</sup>。这些高山草场暴露在较高的人类活动压力下,极有可能产生生境破碎化、物种多样性下降等生态负面问题。因此,我们需要聚焦南方草牧业的生产与生态协同问题,深入分析南方草地天然饲草产量的空间分布格局,评估南方草地的生态系统服务分布,进一步

探讨不同区域生态草牧业可持续模式,以权衡南方草地的生产和生态功能。

草地畜牧业的生产生态协调研究,基于草畜供需理论,致力于评估草地的自然产草量与牲畜饲草需求,以平衡草地生态系统健康与畜牧业的持续发展<sup>[10]</sup>。其基本思想是将草地初级生产力合理分配于放牧家畜饲养和维持生态系统服务两个方面,进而实现协同草地生态系统健康和畜牧业持续发展的双重目标。技术层面上,天然草地产草量估算是权衡和协同草地生产和生态功能的基础与前提。目前,天然草地生产力测定主要依赖于实地测定和模型估测两种方法<sup>[11-12]</sup>,各有其优缺点和局限性。实地测定方法虽精确,但受限于资源和自然条件使其难以广泛应用<sup>[13]</sup>。而基于遥感模型的产草量估算尽管能够快速获取大范围的草地覆盖度、生物量等数据<sup>[14-16]</sup>,但其分辨率和数据处理技术仍是其瓶颈。牲畜饲草需求量的估算则通常基于牲畜饲养数量与家畜存栏量进行,尽管家畜单位、畜牧日采食量等方面逐渐标准化的方法日益完善,但家畜存栏结构、头数核算等相关参数选择仍存在争议<sup>[17]</sup>。另外,科学评价放牧草地生态承载力的研究集中在我国北方,在我国南方草山草坡地区的相关研究仍不充分,大多集中于定性分析<sup>[18-19]</sup>,仅有少量的研究聚焦于分析少数县域的畜牧业经济发展<sup>[20-22]</sup>,鲜少从定量的角度评估南方草地畜牧业的生产生态协同与权衡。因此,本研究旨在填补这一空白,通过评估南方草地的天然牧草产量和存栏量,分析草畜供需状况,随后利用生态系统服务模型定量分析南方草地的生态功能和价值,最后讨论实现南方草地生产生态权衡的发展思路。

## 1 研究方法数据来源

### 1.1 研究区概况

我国南方地区具有丰富的草地资源,天然草山草坡的总面积达 7958.47 万  $\text{hm}^2$ ,占全国草地面积的 20%,是支撑南方地区畜牧业发展的关键优势。该区域的气候特征表现为典型亚热带季风气候与热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温和多雨,无霜期均在 300 d 以上,降水量丰沛,大部分地区年降水量在 800—1600 mm 之间,适宜牧草生长<sup>[23]</sup>。良好的自然条件使得南方草地具有单位面积生产力高、牧草生长期长、营养元素全面以及可利用时间长等优点;但目前南方 90%的草地面积尚未得到充分利用<sup>[9]</sup>。近年来,随着北方禁(休)牧政策以及肉奶需求的持续增长,国家对南方草地畜牧业的政策扶持力度不断加大,推动了南方的畜牧业发展。2014 年,农业部启动了“南方现代草地畜牧业推进行动”,该行动覆盖了江西、安徽、福建、湖南、湖北、广东、广西、重庆、四川、云南和贵州等十一个省份,旨在大力推进南方十一省草地畜牧业发展。自该行动实施以来,南方牛羊存栏量整体呈缓慢增加态势,以四川省牛羊存栏量最高,峰值时存栏量分别为 985.3 万只与 1782.3 万只。鉴于数据的可获得性和代表性,本研究选取了云南、四川、贵州、湖南、湖北、江西、安徽、广东八个南方省份作为研究区。

### 1.2 数据来源

本文的数据来源主要包括四个方面,分别为草地分布数据、遥感数据、统计年鉴和农业行业标准。为了精准提取草地范围,本研究使用 1:100 万比例尺的中国植被数据集,由中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>)提供。遥感数据包括植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)、土地利用、气象、数字高程模型(DEM)。植被 NPP、土地利用、DEM 均来源于中国科学院资源环境科学数据中心。气象数据来源于国家地球系统科学数据中心。研究区各市牲畜(牛和羊)存栏头数来源于 2000—2020 年各省统计年鉴,用于核算各市牲畜饲草需求量。通过查阅农业行业标准及文献,获得标准家畜单位饲草日食量<sup>[17]</sup>、家畜单位换算系数<sup>[24]</sup>、牲畜饲草结构<sup>[25]</sup>等参数。除此之外,通过相关文献获取地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度与死亡有机质等数据。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 草地产草量测算方法

草地天然产草量测算是草畜供需动态评估的基础。本研究基于南方草地分布与植被 NPP 数据间接估算各市草地产草量。通过将 1:100 万草地植被空间分布数据与 2000—2020 年植被平均 NPP 数据进行叠加以获

取草地 NPP。对研究区草地 NPP 进行区域统计测算平均草地植被碳密度,进一步将其乘以各市草地面积,得到研究区各市草地植被碳储量。依据目前国内外通用的草地植被干物质碳储量与植被生物量换算系数估算草地干草产量。

$$S_p = N_p \times A_p \times C \quad (1)$$

式中,  $S_p$  指研究区  $p$  市的草地干草产量,单位为  $g$ ;  $N_p$  是各市平均草地 NPP,指草地生态系统的植被碳密度,单位为  $g C/m^2$ ;  $A_p$  是各市草地面积总量,单位为  $m^2$ ;  $C$  为草地植被干物质生物量与碳的换算系数,国际通用指数为  $0.45^{[26]}$ 。

### 1.3.2 牲畜饲草需求量测算方法

牲畜饲草需求量是指能够满足饲养牲畜需求的草量。本文将 2000—2020 年研究区各市牛(羊)存栏数分别乘以草食牲畜折算系数,换算成牛(羊)单位,再乘以牛(羊)单位的日采食标准干草量,最后乘以天然牧草饲喂比例即可得到牲畜饲草需求量,具体的计算公式如下:

$$D_p = I \times d \times Q_p \times E_{unit} \times E_g \times O_p \quad (2)$$

式中,  $D_p$  即研究区  $p$  市的牲畜饲草需求量,单位为  $Kg$ ;  $I$  指 1 个羊单位的日采食标准干草量,按照中华人民共和国农业行业标准 NY/T 3647—2020,取值为  $1.6 Kg$ ;  $d$  指研究范围内天数,在研究中取 365,即分析一年的饲草需求量;  $Q_p$  为研究区牲畜(牛和羊)年底存栏头数,取 2000—2020 年平均值,为提高饲草需求估算的准确性,根据畜群结构的经验数据将牲畜分为成年畜与幼畜,即某一畜群中幼畜占牲畜年底存栏总数的 30%;  $E_{unit}$  是草食牲畜对羊单位的折算系数,根据中华人民共和国农业行业标准 NY/T 3647—2020 中牛羊存栏量换算羊单位估算所得;  $E_g$  指牲畜采食量中天然牧草饲喂比重,根据《全国农产品成本收益资料》、草食畜牧业饲料构成计算所得<sup>[25]</sup>;  $O_p$  为研究区牛羊规模养殖的比例,根据各省畜牧饲养规模情况估算所得。

### 1.3.3 草畜供需分析

基于草地天然产草量与牲畜饲草需求量的关系来评估监测单元的草地资源利用程度。本文将已测算的草地产草量与饲草需求量作差,即得到研究区牧草供需差值,计算公式如下:

$$G_p = S_p - D_p \quad (3)$$

式中,  $G_p$  指研究区  $p$  市牧草供需差值,若差值为正,表明饲草供给大于需求,牲畜饲草盈余;若差值为负,则表明饲草供不应求,只有部分牲畜饲草需求得到满足,这意味着畜群已经超过承载力。

### 1.3.4 生态系统服务分析

我国南方地区具有重要的水源涵养和生物多样性保护功能。然而,过度开垦、城市化扩张等人为干扰,破坏了原有的生态系统,导致生态系统服务功能退化。本研究基于 InVEST 模型对南方八省地区的三种重要的生态系统服务,包括碳储量、产水量和生境质量,进行了评估。

碳储量一般包含地上生物量、地下生物量与土壤和死亡有机质,其随时间变化的原理在于土地利用从一种类型至另一种类型的转变。本研究采用 InVEST 模型中碳储存模块进行量化<sup>[27]</sup>,计算公式如下:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (4)$$

式中,  $C_{total}$ 、 $C_{above}$ 、 $C_{below}$ 、 $C_{soil}$  与  $C_{dead}$  分别代表总碳储存量、地上碳储存量、地下碳储存量、土壤碳储存量和死亡有机质碳储存量,单位为  $g C/m^2$ 。考虑到死亡有机质碳储存量含量很小且难以获取,故本研究中取  $C_{dead}$  值为 0。

产水量是多种生态服务与过程的基础,其计算原理是区域降雨量减去实际蒸散发量<sup>[28]</sup>。本研究采用 InVEST 模型中产水模块进行量化<sup>[29]</sup>,计算公式如下:

$$WY_x = \left( 1 - \frac{AET_x}{P_x} \right) \times P_x \quad (5)$$

式中,  $WY_x$  代表栅格单元  $x$  的产水量( $mm$ );  $AET_x$  代表栅格单元  $x$  的实际蒸散量( $mm$ );  $P_x$  代表栅格单元  $x$  的年降雨量( $mm$ )。

生境质量代表栖息地景观的生物多样性,高质量的栖息地具有较高的生物多样性潜力。本研究采用 InVEST 模型的生境质量模块进行量化<sup>[30]</sup>,计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_{xj} \times \left[ 1 - \left( \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^2} \right) \right] \quad (6)$$

式中,  $Q_{xj}$  代表土地利用类型  $j$  中栅格  $x$  的生境质量,其取值通常在  $[0, 1]$  之间,数值越高意味着生境质量越好;  $H_{xj}$  代表土地利用类型  $j$  中栅格  $x$  的生境适宜度;  $D_{xj}$  代表土地利用类型  $j$  中栅格  $x$  的生境威胁水平;  $k$  为半饱和常数;  $z$  为归一化常量。

## 2 结果分析

### 2.1 南方八省草地 NPP 与产草量分析

我国南方草地面积在各个地区分布不均,呈零星分散的分布特征。在市级尺度上,草地面积总体上由西向东逐渐减少(图 1)。南方八省草地总面积为  $2.97 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,各市的草地面积差异显著,草地面积介于  $0—5.78 \times 10^4 \text{ km}^2$  之间。南方草地资源表现出显著的空间不平衡性,特别是在云南、四川西部、贵州和江西南部,草地面积集中,34 个市域的平均草地面积超过  $2000 \text{ km}^2$ ,这些地区草地面积占研究区域总面积的 93.59%。相较之下,湖北、安徽和广东的草地面积较少。草地单位面积的初级生产力与草地面积的空间分布格局相反。四川西部地区各市域草地初级生产力相对较低,介于  $260—488 \text{ g C/m}^2$  之间。但其东部和南部地区,比如广东省和云南南部市域的草地 NPP 相对较高,普遍在  $700 \text{ g C/m}^2$  以上。

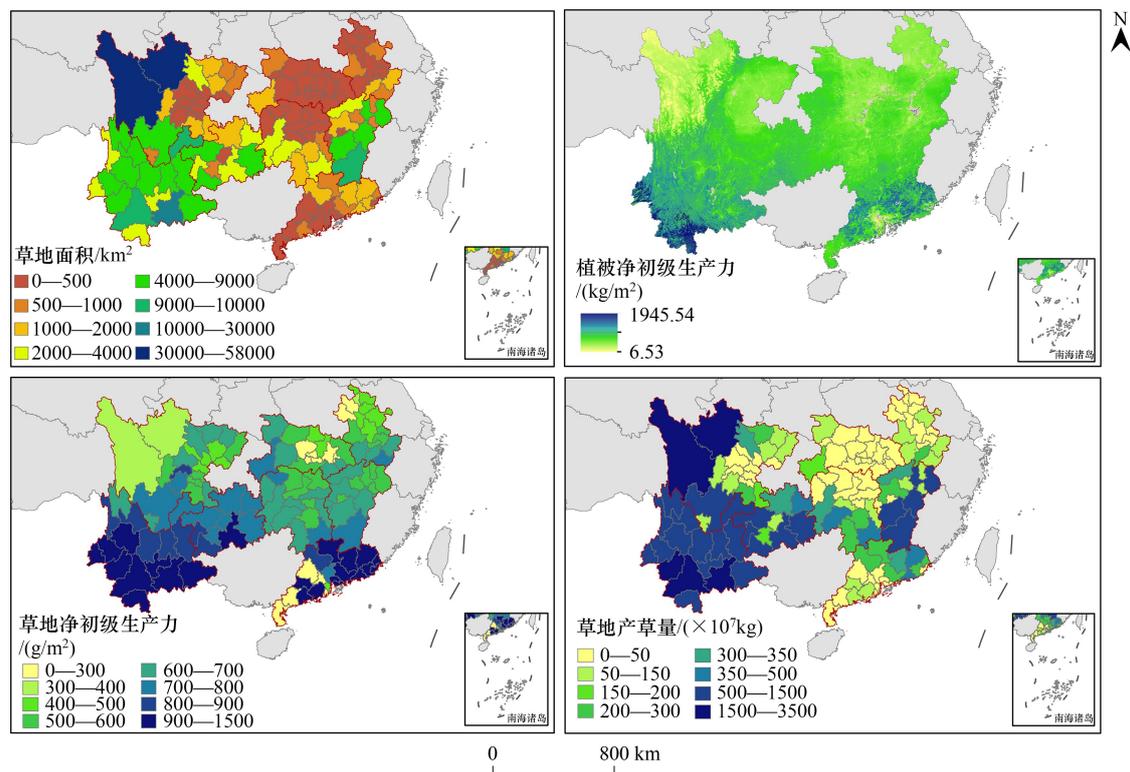


图 1 各市草地面积、植被 NPP、草地 NPP、可利用天然牧草生物量的空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of grassland area, vegetation NPP, grassland NPP, and available natural pasture biomass by municipality

南方八省的总干草产量高达  $4.49 \times 10^{11} \text{ kg}$ ,受草地面积和单位面积生产力的差异影响,市域尺度的干草产量也呈明显的空间差异(图 1)。云南、贵州与四川西部等西南地区各市的干草生物量最高。除此之外,江西东部部分市域干草生物量也较高,这一空间分布结果总体上服从草地面积分布格局。研究还发现,尽管广东

与湖南的部分市域草地面积相对有限,但因单位面积生物量高,其市域干草生物量也保持在较高水平。

## 2.2 南方八省牛羊饲养量与饲草需求量分析

南方八省的牛羊饲养量与饲草需求量均具有鲜明的空间差异。首先,畜群存栏和结构的空间差异较强(图2)。南方八省牛存栏总量大于羊存栏总量,2000—2020年,八省年均值分别为7138.17万头与5431.90万头,各市年均值分别为57.11万头与43.46万头。其中66个市以饲养牛为主,集中分布在广东(21个)、江西(9个)与湖北(8个)等地区;其余59个市则以饲养羊为主,主要分布在四川(19个)、安徽(10个)与云南(9个)等地区。从空间分布来看,市域牛存栏量大体由西向东呈U型分布,牛存栏最高的市域分布在四川省和广东省(图2)。其中,位于四川的甘孜藏族自治州与阿坝藏族羌族自治州,以及位于广东的湛江市、茂名市、肇庆市、清远市与阳江市,是南方饲养牛的关键地区,这些地区牛饲养量总和占研究区总量的33.10%。与牛饲养量的空间分布不同,南方地区羊存栏量整体表现为西多东少的空间分布格局(图1)。其中四川凉山彝族自治州的羊存栏量最高,其次为云南曲靖市与大理白族自治州,三者羊饲养量总和占研究区总量的21.74%。南方八省各市牛的饲草需求量远远高于羊的饲草需求量,分别为 $5.42 \times 10^{10}$  kg与 $9.87 \times 10^9$  kg。这一结果意味着饲养牛为主的地区对草地资源的需求更高。从空间分布来看,牛和羊饲草需求量与其饲养量的空间匹配较好。广东与四川部分市域仍是牛饲草需求量的关键区(图2),四川与云南部分市域则是羊饲草需求量较高的地区(图2)。

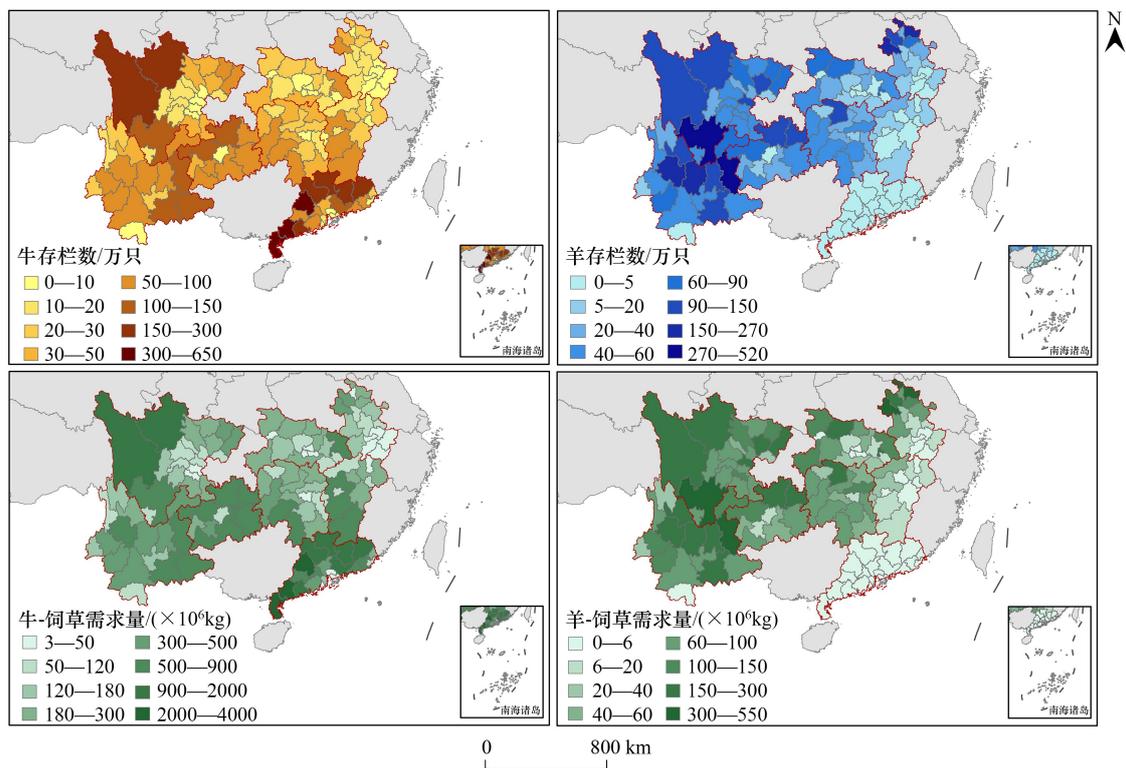


图2 各市牛存栏数、羊存栏数、牛饲草需求量、羊饲草需求量的空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of cattle stock, sheep stock, cattle feed requirement, sheep feed requirement by municipality

## 2.3 南方八省草地的“草畜平衡”

南方八省地区全域总体上不存在超载放牧问题,但是在局部地区,存栏牛羊头数已经超过当地草地的生态承载力。研究区草地的自然产草总量为 $4.49 \times 10^{11}$  kg,牛羊饲草需求总量为 $0.64 \times 10^{11}$  kg,牧草供给量远大于需求量。从空间分布来看,南方八省共89个市域天然饲草盈余,当前天然牧草需求量远远低于这些地区草地的生态承载力,具备进一步发展畜牧业的潜力。这些区域集中分布在云南省(16个)、四川省(15个)、广东

省(13个)与江西省(11个)。除此之外,研究区共36个市域天然饲草供应不足,且存在不同程度的饲草缺口,饲草缺口量介于 $2.10 \times 10^7$ — $5.06 \times 10^9$  kg之间,供给总缺口为 $1.89 \times 10^{10}$  kg。牧草供给不足的区域较为分散,分布在湖北省(10个)、广东省(8个)、湖南省(6个)与安徽省(6个)等地区。

本研究划分了南方八省89个市域的天然饲草潜力等级,揭示了南方草地畜牧业潜力的空间差异(图3)。其中,四川甘孜藏族自治州与阿坝藏族羌族自治州,以及云南红河哈尼族彝族自治州、普洱市与临沧市,因其丰富的草地资源而具有极高的畜牧业发展潜力。此外,研究还识别出具有较高的草地畜牧业发展潜力的23个市域,主要集中在云南省(13个)、贵州南部(5个)以及江西南部(4个)等地区。具有中等潜力的市域分布则较为广泛,涵盖了除云南省以外的其他省份的20个市域。相比之下,草地畜牧业发展低潜力的地区最多,共计41个市域,主要集中分布在安徽省(9个)、广东省(8个)、四川省东部(8个)与湖北省(6个)。

#### 2.4 南方八省草地畜牧业发展的生产和生态权衡

南方八省碳储量、产水量与生境质量三种生态系统服务功能的空间分布格局(2020年)各具特色,如图4所示。碳储量作为固碳能力的衡量标准,其分布较为均匀,市域碳储量范围在 $538.21$ — $1093.21$  g C/m<sup>2</sup>之间。产水量服务功能则在江西省和湖南省西部地区表现突出,平均产水量分别为 $947.37$  mm和 $981.74$  mm,为水资源的合理管理和保护提供了关键的地理信息。除此之外,南方八省的生境质量呈现出高低交错分布的特

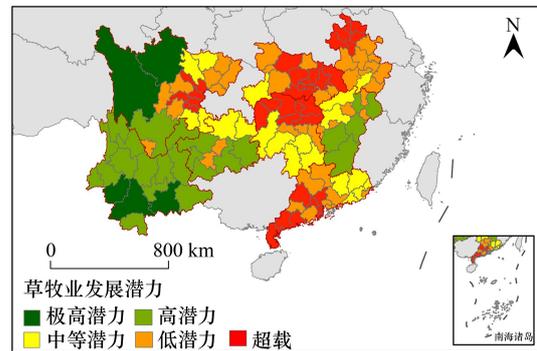


图3 南方八省草地畜牧业生产潜力空间格局  
Fig.3 Spatial pattern of production potential of grassland livestock in the eight southern provinces

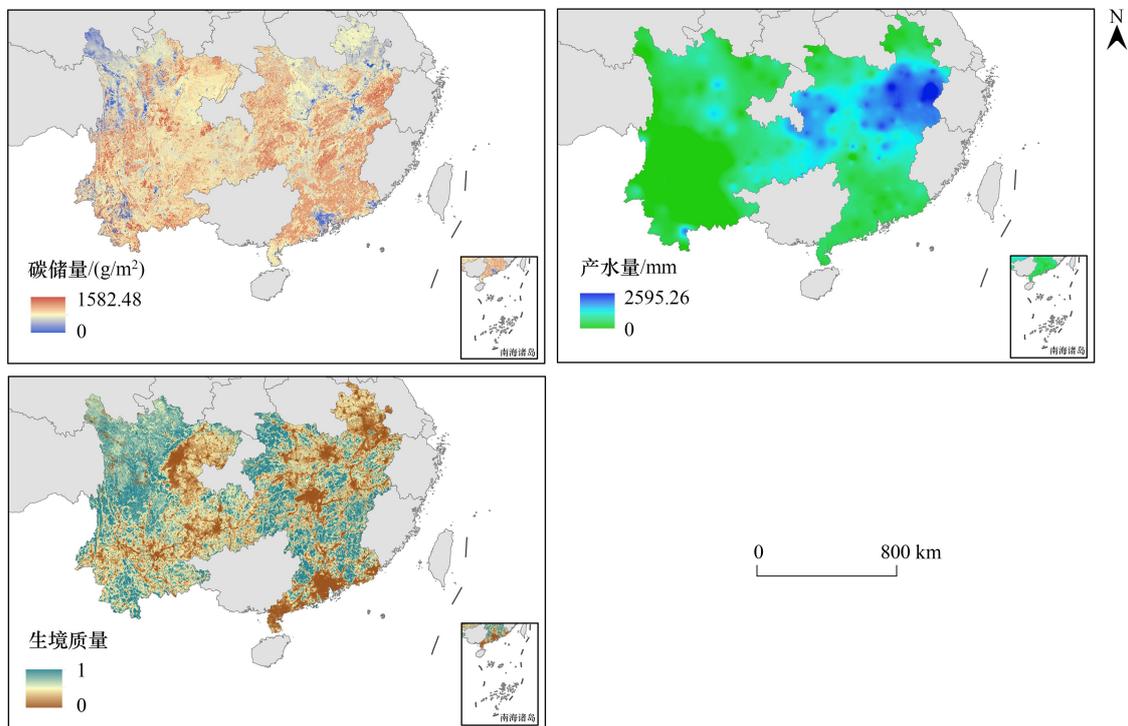


图4 南方八省生态系统服务功能(碳储量、产水量、生境质量)  
Fig.4 Ecosystem service functioning in the eight southern provinces (carbon storage, water yield, habitat quality)

点。生境质量是衡量生物多样性和生态系统健康状态的重要指标,33%的市域生境质量大于 0.5,主要分布在生物多样性丰富的云南省与四川省。这些地区通常拥有较为完善的自然保护措施和较低的人为干扰,为生物多样性提供了良好的生存条件。相对地,生境质量较低的区域,常常是植被稀疏、建设用地密集的地区,这些区域由于受到较多的人为活动影响,其生态系统服务功能受到了一定程度的损害。

在草牧业发展潜力较高的区域,草地不仅展现出了卓越的固碳能力,还提供了丰富的水资源,并维持了生物多样性和生态平衡的优越栖息地(图 5)。特别值得注意的是,云南省(15 个市)与四川省(10 个市)拥有较高的草牧业发展潜力,它们不仅提供了良好的生境质量,其平均值为 0.52,而且在碳储量和产水量方面也表现出色,分别为  $837.24 \text{ g C/m}^2$  与  $515.66 \text{ mm}$ 。这意味着在这些区域推进草牧业发展的同时,将会削弱其生态系统服务功能。草牧业的扩张可能会导致草地退化,影响其固碳能力和水资源的可持续供应,进而降低生境质量。因此,必须在草牧业发展和生态保育之间找到平衡点,以确保生态系统服务的长期稳定。

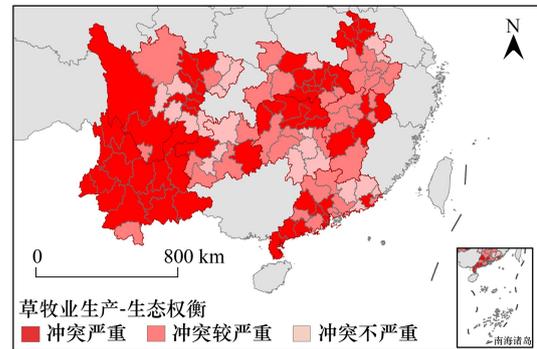


图 5 南方八省草牧业生产-生态权衡现状

Fig.5 Status of production-ecological trade-offs in grassland livestock in eight southern provinces

### 3 讨论

本研究表明,我国南方草地总体上天然牧草的产量较高,因此有很大的草牧业发展潜力;然而,草牧业发展潜力高的区域,生态系统服务也非常高。因此,南方草地发展草牧业面临着重要的生产生态权衡问题。同时,研究也表明,南方草地生态系统存在空间异质性,因而生态草牧业的发展也应该根据这种生态异质性而因地制宜地制订相应的策略。

南方草牧业生产潜力高和生态系统服务高的地区分布较为一致。这些区域通常位于经济发展的边缘地带,远离经济中心,地理位置相对偏僻。由于当地经济发展水平较低,传统产业在经济结构中占据主导地位,因而这些地区尚未经历高强度的草地开发和利用。这种相对原始的状态为草地生态系统保留了较为完整的栖息地,减少了水土流失,增强了产水能力,使得天然草地能够集中连片分布,保持了较高的生态完整性。这些地区大部分气候温和,牧草生长茂盛,是天然放牧和建设人工草地的良好场所,具备进一步发展草牧业的潜力空间。然而,草牧业的快速发展也可能带来一系列较为严峻的生态问题<sup>[31-32]</sup>。一方面,南方草地已经出现了因过度放牧导致的水土流失问题<sup>[33-35]</sup>,突出表现为涵养水源能力下降<sup>[36]</sup>。这些问题在安徽豪州市与阜阳市等区域已经较为严峻。此外,过度放牧还会导致植被生物量无法返还生态系统<sup>[37]</sup>,进而导致生态系统固碳能力下降的问题<sup>[38-39]</sup>。同时,生态环境破碎化叠加过度的人类干扰也导致了湖北武汉市与广东湛江市的草地生物多样性严重下降<sup>[40-42]</sup>。另一方面,不合理和未加利用的畜牧粪便及畜牧业产品生产加工过程中产生的营养性污染物,会导致水体和土壤富营养化等面源污染问题<sup>[43-44]</sup>。因此,我们需要未雨绸缪地应对我国南方地区草牧业生产发展会带来的生态环境问题。

鉴于南方草地生态系统的空间异质性,生产生态权衡和协同策略也应该是因地制宜的。这种因地制宜的方法不仅可以保护和优化生态系统服务,而且还能够促进当地草牧业的可持续发展,实现生态保护与经济增强的平衡。在生态系统服务高的地区,应以生态保育为最为优先的事项,制定严格的生态保护政策,限制畜牧业规模,避免过度放牧和草地退化。通过立法保护关键生态区域,如水源地、珍稀物种栖息地等。在生态系统服务中等、草牧业发展潜力较高的区域,如四川和云南等地区,可以适度发展草牧业,但同时需要加强草地管理和生态监测,确保草牧业发展不会损害生态系统服务功能,实现生态与经济的双赢<sup>[45-46]</sup>。在生态系统服务低、草牧业发展潜力较低的区域,如湖北与安徽等地区,要侧重于生态修复。这些区域要首先进行生态恢复,

如推广秸秆补饲和植被恢复的生态管理措施,以提升与修复生态系统服务功能<sup>[47]</sup>。然后,在研判导致畜牧业发展潜力和生态系统服务水平双低的气候生态和水土地理因素的基础上,可以适度地发展畜牧业,使修复后的草地成为人类干扰较少的荒野,以此尽可能地发挥和提升这些区域的生态功能。除此之外,建立跨区域协调机制,协调不同地区的生态保护和草牧业发展策略,实现区域间的生态平衡和资源优化配置。

综合上述分析,南方八省草地畜牧业的发展必须在生态保护和经济发展之间找到平衡点。通过科学评估、合理规划、技术创新、政策支持和社区参与,探索出一条生态友好、经济可行的畜牧业发展之路<sup>[48-49]</sup>。因此,国家有关部门应把南方草地纳入全国草地统筹范围,完善南方草地监管机构,建立科学化管理体系和考核机制。采取种植和养殖相结合的方式利用畜禽粪便、促进就地就近还田利用,依据生态承载力优化调整畜牧业区域布局,引导市场主体加大对南方现代化草原生态牧场的投入,推广智能养殖、种养循环、疫病防控等新技术和模式,加快培养和造就较高素质、有技能的新型牧民。同时,加强扶持力度和政策支持,根据南方草地特点,实施禁牧、休牧、轮牧等政策措施,建立草原畜牧业生产方式转变补偿制度。通过这些政策措施,可以有效地提高南方草地的利用效率和生产力,促进草地畜牧业的可持续发展,同时保护和改善生态环境,实现经济、社会和环境的协调发展。

本研究聚焦南方草牧业的生产与生态协同问题,依据现行草畜供需计算体系对南方八省市级尺度的草牧业发展潜力进行了评价,并探讨其对生态保育的潜在影响,但研究尚存在一些局限性。首先,本研究利用现有的植被 NPP 数据与南方草地分布数据间接测算了草地 NPP,这一过程可能缺少一定的机理性,无法表达模拟对象的内在规律。尽管如此,将本研究的测算结果与现有南方草地 NPP 遥感估算结果相比较,两者结果较为相似,表明测算结果是可行的。其次,在草畜供需核算中,采用年末存栏数作为牲畜头数的统计数据存在争议。有学者认为年底为牲畜的产仔旺季,牲畜数量变动较大,不适宜作为统计数据。再者,本研究对规模化饲养与散户饲养的牲畜饲草结构等参数进行了初步估算,但目前所采用的参数相对粗略。未来需要结合实地调研数据,对不同饲养模式下的牲畜饲草结构进行深入分析,采用更精细的本地化参数以提高准确性。

#### 4 结论

本研究揭示了南方地区草地畜牧业的发展潜力及面临的生产生态权衡问题。总体而言,南方八省在发展草地畜牧业方面具有较大的潜力和优势,但也面临着生态环境退化的挑战。南方八省的草地资源总量丰富。四川西部、云南、贵州和江西南部的草地面积较为集中。值得注意的是,尽管四川西部地区的草地面积广阔,但草地生产力处于较低水平,因此需要严格执行草畜平衡和休牧轮牧等生态可持续管理模式。相比之下,广东、湖北、湖南等东部省份的草地面积较少,但草地生态系统的生产力水平较好,意味着这些地区发展集约化草牧业生产模式较为高效。同时,我们需要清醒地认识到南方草地也存在局部区域牲畜饲草需求超过草地牧草供给能力的问题,超载放牧导致的草地生态退化在个别地区业已凸显。尤其重要的是,南方草地具有发展潜力的地区,恰恰也是生态系统服务较高的地区。南方草地的生态草牧业发展将会影响这些区域的固碳增汇、涵养水源和生物多样性等生态系统服务功能。因此,建议学术界和政策制定者重视南方草地的生产生态权衡问题,合理规划和布局南方草地的生态草牧业发展,以充分发挥南方地区的草地资源潜力,推动生态草牧业在南方草地的可持续发展。

#### 参考文献 (References):

- [1] 阿不满. 中国草业可持续发展战略研究取得重要成果. 甘肃农业, 2011, 25(4): 64-65.
- [2] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策. 中国农业科学, 1997, 38(6): 2-10.
- [3] 万麻才郎. 草原退化原因分析和草原保护长效机制的建立. 农业开发与装备, 2018, 24(6): 72.
- [4] 李银鹏, 季劲钧. 内蒙古草地生产力资源和载畜量的区域尺度模式评估. 自然资源学报, 2004, 19(5): 610-616.
- [5] 韩丰泽, 包晓影, 朱钦. 南方草地畜牧业发展潜力巨大——以云南、湖北两省为例. 中国畜牧业, 2018, 27(5): 55-57.
- [6] 刘树军, 张大权, 伊亚莉, 李文红, 孔嫣. 发挥优势, 推广经验, 促进南方草地畜牧业快速发展. 第十一届(2014)中国羊业发展大会论文集. 中国畜牧业协会、贵州省遵义市人民政府、中国畜牧业协会, 2014: 6.
- [7] 汪武静, 吕官旺, 王明利, 王国刚, 石自忠. 基于 SWOT 模型的中国南方牧草产业发展战略分析. 农业展望, 2015, 11(10): 45-50, 64.

- [ 8 ] 廖开文. 我国南方草山草坡利用与肉牛业发展问题探讨. 中国草学会、农业部草原监理中心, 中国草学会, 2004; 8.
- [ 9 ] 白冰, 文亦蒂. 南方草地可持续发展与思考. 四川草原, 2005, 26(2): 49-51.
- [ 10 ] 尚懿. 从探索到拓展再到深化: 国内草畜平衡研究现状及其展望. 中国畜禽种业, 2023, 19(4): 67-74.
- [ 11 ] 孙成明, 刘涛, 田婷, 郭斗斗, 王力坚, 陈瑛瑛, 李菲, 李建龙. 基于 MODIS 的南方草地 NPP 遥感估算与应用. 草业学报, 2013, 22(5): 11-17.
- [ 12 ] 陈世荣, 王世新, 周艺. 基于遥感的中国草地生产力初步计算. 农业工程学报, 2008, 24(1): 208-212.
- [ 13 ] 王艳杰, 王卷乐, 魏海硕, Altansukh Ochir, Davaadorj Davaasuren, Sonomdagva Chonokhuu. 基于稀疏样点的蒙古国产草量估算方法研究. 地球信息科学学报, 2020, 22(9): 1814-1822.
- [ 14 ] 徐斌, 杨秀春. 东北草原区产草量和载畜平衡的遥感估算. 地理研究, 2009, 28(2): 402-408.
- [ 15 ] 张勇娟, 曹娟, 负旭江, 李新一, 王加亭, 闫瑞瑞, 辛晓平, 张云玲. 基于 3S 技术的新疆巩留县草原产草量及载畜平衡评估研究. 中国农业资源与区划, 2020, 41(10): 156-164.
- [ 16 ] 吕鑫, 王卷乐, 康海军, 赵强, 韩雪华, 王玉洁. 基于 MODIS NPP 的 2006—2015 年三江源区产草量时空变化研究. 自然资源学报, 2017, 32(11): 1857-1868.
- [ 17 ] 徐敏云. 草地载畜量研究进展: 中国草畜平衡研究困境与展望. 草业学报, 2014, 23(5): 321-329.
- [ 18 ] 洪振海, 何仕林. 南方发展草畜业的几点思考. 安徽农业大学学报: 社会科学版, 2002, 11(2): 41-43.
- [ 19 ] 艾云航. 合理开发南方草山草坡大力发展畜牧业经济. 中国动物保健, 2005, 7(9): 22-23, 53.
- [ 20 ] 曾诗淇. 种草养畜, 护了生态富了村民——云南省南方现代草地畜牧业项目建设综述. 农村工作通讯, 2018, 63(16): 51-52.
- [ 21 ] 农新. 南方现代草地畜牧业: 绿了荒山富了民. 农村新技术, 2018, 36(1): 4-7.
- [ 22 ] 杨明清, 陈嘉奇, 杨平. 祥云县南方现代草地畜牧业发展项目建设经验及意义. 中国畜牧兽医文摘, 2017, 33(10): 59.
- [ 23 ] 任继周, 张英俊. 中国南方草地资源及其发展战略. 中国计量学院学报, 2002, 13(3): 11-17.
- [ 24 ] 李佳晓. 中国分区域牧草供需测算及决路径研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [ 25 ] 刘浩, 董晓霞. 我国不同奶业产区规模化牧场饲料结构分析. 中国乳业, 2021, 42(3): 5-10.
- [ 26 ] 杨婷婷, 吴新宏, 王加亭, 李鹏, 石红霄. 中国草地生态系统碳储量估算. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 127-130.
- [ 27 ] 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 冯小华, 刘璐媛. 基于 InVEST 模型的新疆天山碳储量时空演变研究. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1896-1906.
- [ 28 ] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 唐承延. 基于贝叶斯网络的生态系统服务空间格局优化——以泾河流域为例. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1268-1280.
- [ 29 ] 窦攀峰, 左舒翟, 任引, 戴劭劭, 云国梁. 气候和土地利用/覆被变化对宁波地区生态系统产水服务的影响. 环境科学学报, 2019, 39(7): 2398-2409.
- [ 30 ] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 张嘉晖. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析. 生态学报, 2020, 40(9): 2895-2906.
- [ 31 ] 脱登峰, 卢琦, 却晓娥, 程磊磊, 杨岩岩, 高攀, 崔桂鹏. 中国北方草地生态系统服务评估. 生态学报, 2024, 44(2): 455-462.
- [ 32 ] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 郑华. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. 生态学报, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [ 33 ] 王智涛, 赵雁伟, 刘利民. 过度放牧对草原生态保护建设的影响与思考. 畜牧业环境, 2023, 39(7): 28-30.
- [ 34 ] 李东丽. 草原荒漠化的成因及防治对策. 林业科技情报, 2020, 52(1): 16-18.
- [ 35 ] 张清海, 林昌虎, 何腾兵. 贵州喀斯特山区水土流失因素与生态修复对策探讨. 贵州科学, 2006, 24(3): 62-65, 74.
- [ 36 ] 王晓慧, 陈远荣. 不同放牧方式对岩溶区土壤养分的影响——以广西桂林岩溶区实验基地为例. 地质通报, 2008, 27(2): 286-291.
- [ 37 ] 赵星宇, 韩国强, 张圣微, 赵鸿彬, 刘敏敏, 林汐, 王帅. 放牧对不同类型草原植物多样性及其碳储量的影响. 环境科学, 2024, 45(9): 5395-5405.
- [ 38 ] He N P, Zhang Y H, Yu Q, Chen Q S, Pan Q M, Zhang G M, Han X G. Grazing intensity impacts soil carbon and nitrogen storage of continental steppe. *Ecosphere*, 2011, 2(1): 1-10.
- [ 39 ] 高丽, 朱清芳, 闫志坚, 王育青, 侯向阳, 戴雅婷. 放牧对鄂尔多斯高原油蒿草场生物量及植被-土壤碳密度的影响. 生态学报, 2017, 37(9): 3074-3083.
- [ 40 ] 段鹏, 陈文波, 杨欢, 梁翔. 生境破碎化过程对流域生境质量的影响与交互作用. 生态学报, 2024, 44(14): 1-14.
- [ 41 ] 许英杰, 杨绍微, 张峻铭, 孙永玉, 杨秀彪, 欧朝蓉. 云南金沙江干热河谷县域土地利用景观格局的地形效应. 生态学杂志, 2023, 42(8): 1982-1992.
- [ 42 ] 孔雪松, 陈俊励, 王静, 赵晓东. 耦合土地利用格局与过程变化的生态干扰评价——以长三角地区为例. 地理科学, 2021, 41(11): 2031-2041.
- [ 43 ] 房金星, 阎伍玖. 巢湖流域农村畜牧业发展与非点源污染研究. 资源开发与市场, 2007, 23(4): 345-347, 363.
- [ 44 ] 马林, 柏兆海, 王选, 曹玉博, 马文奇, 张福锁. 中国农牧系统养分管理研究的意义与重点. 中国农业科学, 2018, 51(3): 406-416.
- [ 45 ] 乔斌, 王乃昂, 王义鹏, 赵航, 程弘毅, 刘锐, 孙德浩, 祝存兄. 山地-绿洲“共轭型”生态牧场理念源起、概念框架与发展模式——以祁连山牧区为例. 生态学报, 2023, 43(21): 8917-8932.
- [ 46 ] 张新时, 李博, 史培军. 南方草地资源开发利用对策研究. 自然资源学报, 1998, 13(1): 1-7.
- [ 47 ] 方精云, 潘庆民, 高树琴, 景海春. “以小保大”原理: 用小面积人工草地建设换取大面积天然草地的保护与修复. 草业科学, 2016, 33(10): 1913-1916.
- [ 48 ] 李冉, 王莉, 沈贵银. 发展南方草地生态畜牧业——来自贵州省晴隆县的经验. 中国畜牧业, 2013, 22(16): 37-39.
- [ 49 ] 孙佳美, 刘智全, 钟瑾, 王天威. 云贵高原生态草牧业立体发展模式探索: 以云南省永善县为例. 草业科学, 2022, 39(2): 381-390.