

DOI:10.11686/cyxb2025234

<http://cyxb.magtech.com.cn>

刘树超, 邵全琴, 樊江文, 等. 1981-2020 年三江源区可食牧草时空变化及气候驱动机制研究. 草业学报, 2026, 35(7): 15—31.

LIU Shu-chao, SHAO Quan-qin, FAN Jiang-wen, *et al.* Spatiotemporal dynamics of edible forage and its climatic driving mechanisms in the Three-River Headwaters Region from 1981 to 2020. *Acta Prataculturae Sinica*, 2026, 35(7): 15—31.

# 1981—2020 年三江源区可食牧草时空变化 及气候驱动机制研究

刘树超<sup>1,2,3</sup>, 邵全琴<sup>2,3,4\*</sup>, 樊江文<sup>2,3</sup>, 黄海波<sup>2</sup>

(1. 空天信息大学(筹)遥感科学与技术学院, 山东 济南 250299; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 海南大学生态学院, 海南 海口 570228)

**摘要:**三江源区作为青藏高原生态安全屏障的核心区域,其可食牧草动态变化对高寒草地可持续利用至关重要。本研究基于多源遥感数据(全球陆表特征参量产品和应用遥感—过程耦合模型 GLOPEM CEVSA 估算的 NPP 数据集、Landsat 系列卫星影像)、长期草地样方监测数据及气象资料,量化了不同退化梯度下可食牧草比例的时空分异特征,构建了 1981—2020 年三江源区天然草地可食牧草的产草量数据集。结果表明:1)近 40 年全区可食牧草比例均值为 0.69,呈“下降—波动—回升”趋势,分时段均值依次为 0.72(1981—1990)、0.69(1991—2004)、0.66(2005—2012)和 0.70(2013—2020),虽经生态工程修复,仍未恢复至 80 年代初水平;2)1981—2020 年,三江源区可食牧草产草量空间上自东向西递减,年均值为 403.48 kg·hm<sup>-2</sup>,年均产草总量为 1322.61 万 t,62.5% 区域呈显著增加趋势 ( $P < 0.05$ );3)年均温是可食牧草产草量变化的主控因子,正相关区域占 68.3%,降水驱动作用在干旱区 ( $< 400$  mm)及重度退化区显著增强;4)三江源国家公园内可食牧草产草量整体呈增长趋势,但园区间差异显著,澜沧江源园区年均产草量为 399.56 kg·hm<sup>-2</sup>,高于长江源园区(169.37 kg·hm<sup>-2</sup>)。本研究分析了气候变暖与降水格局变化对高寒草地可食牧草恢复的差异化调控机制,为三江源区草地适应性管理提供了科学依据。

**关键词:**三江源;可食牧草;产草量;时空动态变化;气候驱动

## Spatiotemporal dynamics of edible forage and its climatic driving mechanisms in the Three-River Headwaters Region from 1981 to 2020

LIU Shu-chao<sup>1,2,3</sup>, SHAO Quan-qin<sup>2,3,4\*</sup>, FAN Jiang-wen<sup>2,3</sup>, HUANG Hai-bo<sup>2</sup>

1. School of Remote Sensing Science and Technology, Aerospace Information Technology University, Jinan 250299, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Ecology, Hainan University, Haikou 570228, China

**Abstract:** The Three-River Headwaters Region (TRHR) is a core area of the ecological security barrier on the Tibetan Plateau. Understanding the dynamics of edible forage in this area is crucial for the sustainable utilization of alpine grasslands. This study integrated multi-source remote sensing data, including the global land surface satellite (GLASS) products, the Net Primary Productivity (NPP) dataset estimated by the remote sensing process coupled model, the global production efficiency model carbon exchange and vegetation structure analysis (GLOPEM CEVSA), and Landsat satellite imagery, long-term field monitoring data, and meteorological records to construct a

收稿日期:2025-06-10;改回日期:2025-10-09

基金项目:国家社会科学基金重大项目(208ZD096)资助。

作者简介:刘树超(1992—),男,山东泰安人,博士。E-mail: liushuchao@aitech.edu.cn

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: shaoqq@igsrr.ac.cn

grassland yield dataset (1981–2020) and quantify the spatiotemporal differentiation of the proportions of edible forage under varying degradation gradients. The results show that: 1) Over the past 40 years, the average edible forage proportion was 0.69, showing a “decline-fluctuation-recovery” trend, with periodical averages of 0.72 (1981–1990), 0.69 (1991–2004), 0.66 (2005–2012), and 0.70 (2013–2020). Despite ecological restoration efforts, the proportion of edible forage has not returned to the level in the early 1980s. 2) The edible forage yield exhibited a spatial decline from east to west, with an annual average of  $403.48 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  and a total yield of  $13.2261 \times 10^6 \text{ t}$ . Significant increases ( $P < 0.05$ ) occurred in 62.5% of the regions. 3) The annual average temperature dominated climatic drivers (68.3% of areas showed positive correlations) affecting the spatiotemporal dynamics of edible forage, while precipitation exerted stronger effects in arid zones ( $< 400 \text{ mm}$ ) and severely degraded areas. 4) Within the Three-River Source National Park, edible forage yield showed an overall increasing trend but varied significantly among zones, being markedly higher in the Lancang River Source Park ( $399.56 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) than in the Yangtze River Source Park ( $169.37 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). The results of this study elucidate the differential regulatory mechanisms of climate warming and precipitation changes on alpine grassland restoration, providing a scientific foundation for adaptive management strategies in the TRHR.

**Key words:** Three-River Headwaters Region; edible forage; forage yield; spatiotemporal dynamics; climatic drivers

三江源区位于青藏高原腹地,是长江、黄河、澜沧江三大河流的发源地。三江源区每年向下游地区供水约500亿 $\text{m}^3$ ,素有“中华水塔”之称<sup>[1]</sup>。三江源区草地资源丰富,是我国重要的草地畜牧业发展基地,是我国青藏高原生态安全屏障的重要组成部分,生态系统的健康稳定关系到我国生态安全。

20世纪50年代以来,受全球气候变化和人类活动的共同影响,三江源区的人口、资源、环境与发展之间的矛盾日渐严重,使草地生态系统持续退化<sup>[2]</sup>,严重影响我国生态安全。为了保护和修复生态环境,青海省在2000年成立了三江源自然保护区,自2003年开始,我国先后在三江源区开展退牧还草工程、三江源生态保护和建设一期工程(2004–2012年)、三江源生态保护和建设二期工程(2013–2020年)及国家公园体制创新等,一系列政策颁布和生态工程实施,叠加气候转入暖湿周期影响,三江源区生态系统持续退化的趋势总体上得到遏制,局部有所好转,但与20世纪70年代相比仍有较大差距,草地生态问题亟待解决<sup>[3]</sup>。研究表明,超载放牧是三江源区草地退化贡献率最高的因素<sup>[4]</sup>,超载放牧导致草原生态环境退化,可食牧草的比例逐渐降低,毒草、杂草的比例逐渐升高,给草地畜牧业生产和生态环境的保护带来一系列问题。厘清三江源区可食牧草的时空变化规律,是确保三江源草地资源生态安全、筑牢青藏高原生态安全屏障的必然要求。

近年来,国外学者对可食牧草的研究主要集中在以下几个方面:一是其营养品质与家畜肉质的关系,Greyerz等<sup>[5]</sup>和Zira等<sup>[6]</sup>通过试验发现,不同饲养方式下,可食牧草的营养成分组合显著影响牛、羊、猪等家畜的肉质特性;二是探索改变可食牧草的利用方式以减少环境负担,Moorby等<sup>[7]</sup>研究发现,优化饲喂策略可以有效降低温室气体排放和其他污染物的产生。此外,部分学者关注可食牧草在生态修复中的潜力,Wiangkham等<sup>[8]</sup>、Mirshad等<sup>[9]</sup>分别研究了其在重金属污染土壤修复和盐渍化治理中的应用效果。Vázquez等<sup>[10]</sup>则从功能性角度出发,尝试从硕大针茅(*Stipa gigantea*)中提取真菌共生体,并探究其对人类食用的杂交黑小麦( $\times$  *Tritordeum*)生长的促进作用。国内多侧重于对可食牧草生长过程中营养物质含量变化、可食牧草的品质及承载力变化等方面研究<sup>[11–13]</sup>。

关于可食牧草产草量的研究相对较少,大多数研究采用固定比例系数法估算产草量<sup>[14]</sup>,这种方法未能充分考虑草地类型和草地退化程度的差异。张凡凡等<sup>[15]</sup>通过在沙尔套山建立围栏样地刈割鲜重的方法进行单点测产,虽具有较高的准确性,但缺乏长期动态监测数据,无法反映草地退化的累积效应。基于遥感技术的研究则试图弥补这一不足。李文龙等<sup>[16]</sup>、王浩等<sup>[17]</sup>各自构建了植被指数与可食牧草产草量的正相关经验模型;刘兴元等<sup>[18]</sup>、杜笑村等<sup>[19]</sup>分别结合中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)影像的地表反射率数据与地面实测生物量,提出了不同的指数估产模型;俞慧云等<sup>[20]</sup>进一步优化了回归估产模型。然而,这些

方法仍面临以下问题:模型构建依赖的地面数据较少、遥感影像空间分辨率较低、放牧模式对模型的干扰影响不明确,以及植被指数的饱和效应可能降低产草量的估算精度<sup>[21]</sup>。

本研究应用三江源区草地生长季(7—8月)的长时间序列样方监测数据集、三江源区草地退化时空分布数据集、多源卫星数据、文献和文本资料,模拟生成1981—2020年三江源区天然草地产草量数据集,厘定三江源区各草地类型在不同时间、不同草地退化程度的可食牧草比例,结合天然草地产草量估算可食牧草的产草量,最终生成1981—2020年三江源区天然草地可食牧草的产草量,为合理规划畜牧养殖结构和及时调整草地资源利用方案提供理论依据,为保护野生动物和维护草地生态系统良性循环提供科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区为青海三江源国家生态保护综合试验区,是青海省三江源生态保护和建设二期工程实施区域,位于青海省南部,包括玉树藏族自治州、果洛藏族自治州、黄南藏族自治州、海南藏族自治州全部行政区域的21个县和格尔木市的唐古拉山镇。研究区总面积为3950万 $\text{hm}^2$ ,占青海省总面积的54.6%。地理范围为北纬 $31^{\circ}39' - 37^{\circ}10'$ ,东经 $89^{\circ}24' - 102^{\circ}27'$ 。三江源区以山原和峡谷地貌为主,山脉绵延,地势高耸,地形复杂,海拔介于1972~6725 m。年平均气温为 $-5.6 \sim -7.8^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量为262.2~772.8 mm,年降水量由东南向西北依次递减。

### 1.2 研究数据

**1.2.1 遥感数据** 卫星影像包括70年代中后期的多光谱扫描仪(multi-spectral scanner, MSS)数据,90年代初期专题制图仪(thematic mapper, TM)数据,2004年专题制图仪/增强型专题制图仪(thematic mapper/enhanced thematic mapper, TM/ETM)数据,2012年环境小卫星遥感影像,2013和2020年陆地卫星8号(land satellite 8, Landsat 8)影像。通过两期遥感影像的直接对比分析,采用草地退化分类判读的方式对草地退化动态信息进行提取,完成了三江源地区20世纪70年代中后期—1990年、1990—2004年、2004—2012年、2013—2020年共4期遥感解译专题图<sup>[2,22]</sup>。

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)数据:1)全球陆表特征参量(global land surface satellite, GLASS)产品的NPP数据集<sup>[23-24]</sup>,时间范围是1981—2018年,空间分辨率为1000 m,每8 d一期;2)王军邦等<sup>[25]</sup>发展植被生产力卫星遥感与生态系统过程耦合模型(global production efficiency model carbon exchange and vegetation structure analysis, GLOPEM CEVSA)估算的NPP数据集,时间范围是2000—2020年,空间分辨率为500 m,每8 d一期。

**1.2.2 草地数据** 三江源区草地资源空间分布数据(图1),是利用2004年100 m空间分辨率的中国多时期土地利用遥感监测数据集(China multi-period land use and land cover remote sensing monitoring dataset, CNLUCC)<sup>[26]</sup>,结合全国1:100万草地资源图进行草地类型属性赋值。本研究选择三江源区天然草地共5大类,包括高寒草甸类、高寒草原类、高寒荒漠类、温性草原类和沼泽类,共67个草地类型。

三江源区草地样方调查数据来自中国科学院地理科学与资源研究所课题组,样方调查数据记录了2004—2007年夏季(7—8月)三江源区的草地样方,包括草地类型、总盖度、优势种、总生物量、地上生物量等内容。三江源区草地样方监测数据由青海省草原总站提供,该数据由青海省草原总站对三江源区草地生态系统监测而来,主要选择3个草地类、19个草地型,共164个监测样点,记录了2004—2012年和2019年每个样方的草地类、草地型、植物类群、植株高度、频度、产草量、可食牧草产草量等数据。三江源区“黑土滩”数据来自三江源区“黑土滩”退化草地本底调查项目组<sup>[27]</sup>。

**1.2.3 气象数据** 本研究的气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)获取的“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”,该数据集包含了699个基准、基本气象站自1951年1月以来本站的日最高气温、最低气温、平均气温、降水量等数据。将气象监测站点数据插值到区域尺度,生成1981—2020年全国范围内1 km分辨率逐月降水量、气温数据集<sup>[3]</sup>。1981—2020年的三江源区1 km分辨率的年平均降水量、年平均气温数据由当年逐月数求平均值得到。

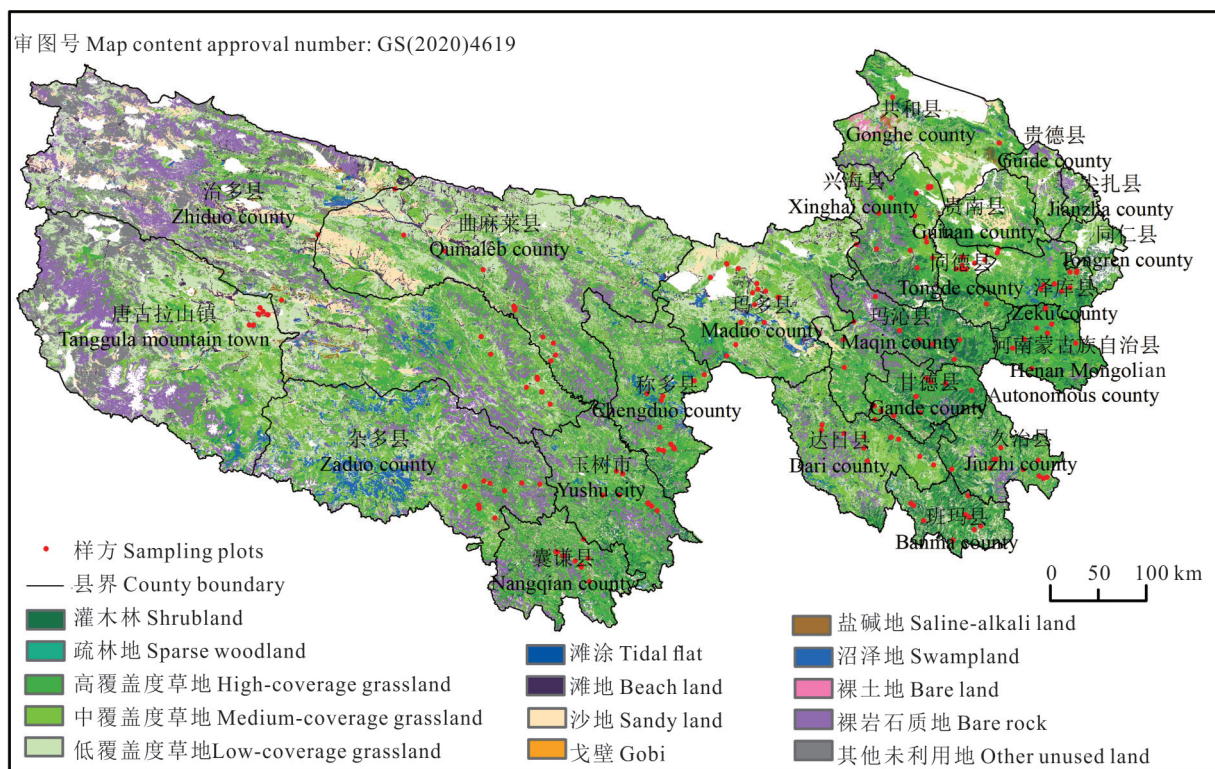


图1 三江源区草地空间分布

Fig. 1 Grassland spatial distribution of the Three-River Headwaters Region

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4619 号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2020)4619 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

## 2 结果与分析

### 2.1 天然草地产草量模拟及验证

**2.1.1 NPP 数据校正** 应用 2000—2013 年同期 GLOPEM CEVSA NPP 和 GLASS NPP 数据进行校正,并利用 2014—2018 年的 NPP 数据进行验证。将 2000—2020 年 500 m 分辨率的 GLASS NPP 数据进行升尺度处理,采用聚合平均处理升尺度为 1000 m 分辨率的 GLASS NPP<sub>1000</sub> 数据。利用 GLASS NPP<sub>1000</sub> 和 GLOPEM CEVSA NPP 同期数据逐像元进行回归分析,得到逐像元的回归公式,经验证  $R^2=0.85$ 。同理,得到 GLOPEM CEVSA NPP<sub>500</sub>,经验证  $R^2=0.89$ 。分别生成 1981—1999 年的 GLASS NPP<sub>500</sub> 和 2019—2020 年的 GLOPEM CEVSA NPP<sub>1000</sub> 数据。

**2.1.2 产草量模拟** 本研究利用 NPP 数据模拟草地产草量。Fan 等<sup>[28]</sup>提出通过各类草地植被地下部分与地上部分的净初级生产力比值来估算产草量。选择三江源区高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠、温性草原和沼泽共 5 类草地类型,模拟其产草量。模拟公式如下:

$$NPP = ANPP + BNPP \quad (1)$$

$$GY = NPP / (1 + BNPP / ANPP) \quad (2)$$

$$BNPP = BGB \times (liveBGB / BGB) \times turnover \quad (3)$$

$$turnover = 0.0009 \times ANPP + 0.25 \quad (4)$$

式中:  $ANPP$  (aboveground net primary productivity) 是植被地上部分生物量;  $BNPP$  (belowground net primary productivity) 是植被地下部分生物量;  $GY$  (grassland yield) 为草地产草量,单位是  $kg \cdot hm^{-2}$ ; 高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠、温性草原和沼泽的  $BNPP/ANPP$  值参照王春雨等<sup>[29]</sup>研究成果;  $BGB$  (belowground biomass) 为总根系生物量,  $liveBGB$  (living belowground biomass) 为活根系生物量占总根系生物量的比例,采用周兴民<sup>[30]</sup>在青海的实测值 0.79;  $turnover$  是草地植物根系周转值; 0.0009 是植物根系周转值随  $ANPP$  的变化速率,单位是  $g \cdot m^{-1}$ ; 草地

生物量与NPP的换算系数0.45。

**2.1.3 产草量验证** 本研究采用NPP数据分别模拟得到1981—2020年空间分辨率为500、1000 m三江源区天然草地的产草量数据集。选择三江源区实测样地产草量数据和文献数据<sup>[12]</sup>对产草量模拟结果进行验证。

如图2所示,本研究采用GLASS NPP<sub>500</sub>数据模拟的三江源区产草量与样方实测产草量的相关性较高, $R^2$ 为0.54,模拟产草量与实测产草量相比低估了约16%;采用GLOPEM CEVSA NPP<sub>1000</sub>数据模拟的三江源区产草量与样方实测产草量的相关性较低, $R^2$ 为0.34,该数据模拟的产草量与实测产草量相比偏高,整体高估了约44%。本研究采用的监测样点数据主要分布在高寒草甸类、高寒草原类和温性草原类三大类草地型,利用监测样点的产草量与模拟产草量对比验证,GLASS NPP<sub>500</sub>数据模拟的产草量与实际产草量的 $R^2$ 依次为0.46、0.60和0.75。因此,采用1981—2020年空间分辨率500 m的三江源区产草量数据进行后续研究。

**2.1.4 全国草地资源调查可食牧草比例** 本研究选择高寒草甸类、高寒草原类、高寒荒漠类、温性草原类和沼泽类共5类67个草地型,进行可食牧草产草量研究。在《中国草地资源》<sup>[31]</sup>中,对不同省份不同草地类、亚类、组和型的草地资源状况进行了系统描述,本研究收集部分草地资源在20世纪80年代的植被覆盖度、产草量干重和可食牧草比例数据,部分草地型的植被覆盖度以其所在的组或亚类的植被覆盖度替代,以书中资料数据作为20世纪80年代草地资源调查的基准,如表1所示。

**2.1.5 三江源区草地退化时空格局** 本研究基于刘纪远等<sup>[2]</sup>提出的草地退化遥感分类体系,将20世纪70年代中后期—1990年三江源地区草地退化图和1990—2004年三江源地区草地退化图中的草地退化类型合并为轻度退化、中度退化、重度退化和极度退化共4个等级。2004年极度退化草地是叠加青海省测绘局提供的2006年三江源“黑土滩”解译矢量数据,本研究制作了1990和2004年三江源地区草地退化现状空间分布图。基于2004—2012年和2013—2020年两个时段退化草地变化态势,制作了2012和2020年三江源地区草地退化现状空间分布图(图3)。

由图3得出,在1990年,三江源草地退化主要发生在其中部,部分地区天然草地发生着以草地破碎化为先导,覆盖度持续降低,最后形成黑土滩的退化过程,达日县草地退化程度最严重,全县草地退化以黑土滩为主。玛多县、曲麻莱县和称多县北部大部分草地发生退化,以沙化退化为主。1990—2004年,三江源区草地退化过程继续发生,全区黑土滩型草地退化加剧。玛多县、曲麻莱县和达日县草地退化程度加剧,重度退化草地面积增加;东部的贵德县、尖扎县和贵南县草地发生小范围退化。2004—2012年,因为三江源生态保护和建设一期工程的实施,三江源天然草地整体获得了改善,但草地退化的局面并没有得到根本扭转,局部地区草地退化继续发生。2012—2020年,三江源生态保护和建设二期工程的实施使三江源区退化草地恢复明显,草地退化趋势得到明显的遏制,黑土滩面积相比2012年减少了131.9万 $\text{hm}^2$ ,黑土滩型草地得到有效治理和恢复。已有研究表明,近年来三江源地区气候暖湿化,冰川融水增多,有助于草地生态系统恢复,三江源区的生态系统朝着正向演替<sup>[32-34]</sup>发展。

**2.1.6 三江源区天然草地可食牧草比例空间分布** 本研究以20世纪80年代全国草地资源调查的各草地型植被覆盖度为基准,参照三江源退化草地评价等级标准<sup>[34]</sup>,依据样地的植被覆盖度分别判断2004、2012和2019年三

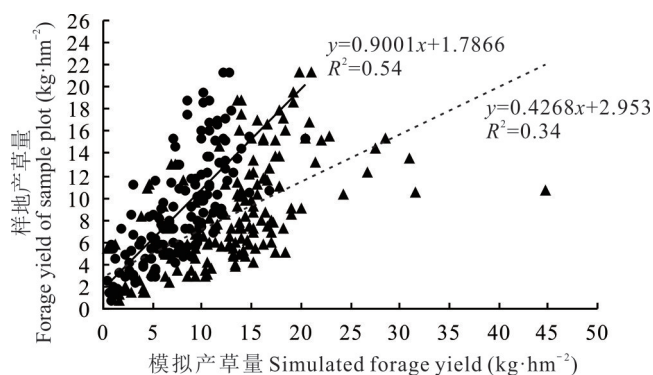


图2 不同NPP数据模拟产草量的精度验证

Fig. 2 Validation of simulated forage yield accuracy from different NPP datasets

“·”为基于GLASS NPP<sub>500</sub>数据模拟的产草量,“—”为GLASS NPP<sub>500</sub>数据模拟产草量的线性趋势线;“▲”为基于GLOPEM CEVSA NPP<sub>1000</sub>数据模拟的产草量,“·····”为GLOPEM CEVSA NPP<sub>1000</sub>模拟产草量的线性趋势线。“·” indicates the forage yield simulated based on GLASS NPP<sub>500</sub> data, “—” indicates linear trend line for simulating forage yield on GLASS NPP<sub>500</sub> data, “▲” indicates the simulated forage yield based on GLOPEM CEVSA NPP<sub>1000</sub> data, “·····” indicates linear trend line for simulating forage yield on GLOPEM CEVSA NPP<sub>1000</sub> data.

表 1 20 世纪 80 年代三江源区部分草地资源统计  
Table 1 Statistical of grassland resources in the Three-River Headwaters Region in the 1980s

| 草地类、亚类、组和型<br>Grassland class, subclass, group, and type | 植被覆盖度<br>Vegetation coverage | 产草量干重 Dry weight of<br>grass yield (kg·hm <sup>-2</sup> ) | 可食牧草比例 Proportion<br>of edible forage |
|----------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. 温性草原类 Temperate steppe                                | —                            | —                                                         | —                                     |
| 1. 1 山地草原亚类 Mountain grassland subclass                  | 0. 35(0. 20~0. 60)           | 665                                                       | —                                     |
| 1. 1. 1 中禾草组 Medium grass group                          | —                            | —                                                         | —                                     |
| 克氏针茅 <i>Stipa krylovii</i> 、羊茅 <i>Festuca ovina</i>      | 0. 40                        | 301                                                       | —                                     |
| 青海固沙草 <i>Orinus kokonorica</i> 、杂类草 Herbarum variarum    | 0. 30~0. 50                  | 532                                                       | —                                     |
| 2. 高寒草原类 Alpine steppe                                   | 0. 20~0. 60                  | —                                                         | —                                     |
| 2. 1 矮禾草组 Dwarf grass group                              | —                            | —                                                         | —                                     |
| 紫花针茅 <i>Stipa purpurea</i>                               | 0. 30~0. 50                  | 255                                                       | —                                     |
| 紫花针茅 <i>S. purpurea</i> 、杂类草 Herbarum variarum           | 0. 30~0. 50                  | 255                                                       | —                                     |
| 3. 高寒草甸类 Alpine meadow                                   | —                            | —                                                         | —                                     |
| 3. 1 高寒草甸亚类 Alpine meadow subclass                       | 0. 80~0. 90                  | —                                                         | —                                     |
| 3. 1. 1 小莎草组 Small sedge group                           | —                            | —                                                         | —                                     |
| 矮生嵩草 <i>Kobresia humilis</i>                             | 0. 80~0. 90                  | 831                                                       | 0. 93                                 |
| 高山嵩草 <i>Kobresia pygmaea</i>                             | 0. 80~0. 90                  | 562                                                       | 0. 85                                 |
| 禾叶嵩草 <i>Kobresia graminifolia</i>                        | 0. 70~0. 90                  | 968                                                       | —                                     |
| 线叶嵩草 <i>Kobresia capillifolia</i>                        | 0. 70~0. 90                  | 1212                                                      | 0. 85                                 |
| 线叶嵩草 <i>K. capillifolia</i> 、杂类草 Herbarum variarum       | 0. 60~0. 90                  | 1610                                                      | 0. 83                                 |
| 3. 2 沼泽化高寒草甸亚类 Swampy alpine meadow subclass             | 0. 70~0. 95                  | —                                                         | —                                     |
| 3. 2. 1 大莎草组 Large sedge group                           | —                            | —                                                         | —                                     |
| 西藏嵩草 <i>Kobresia tibetica</i>                            | >0. 90                       | 980                                                       | 0. 93                                 |

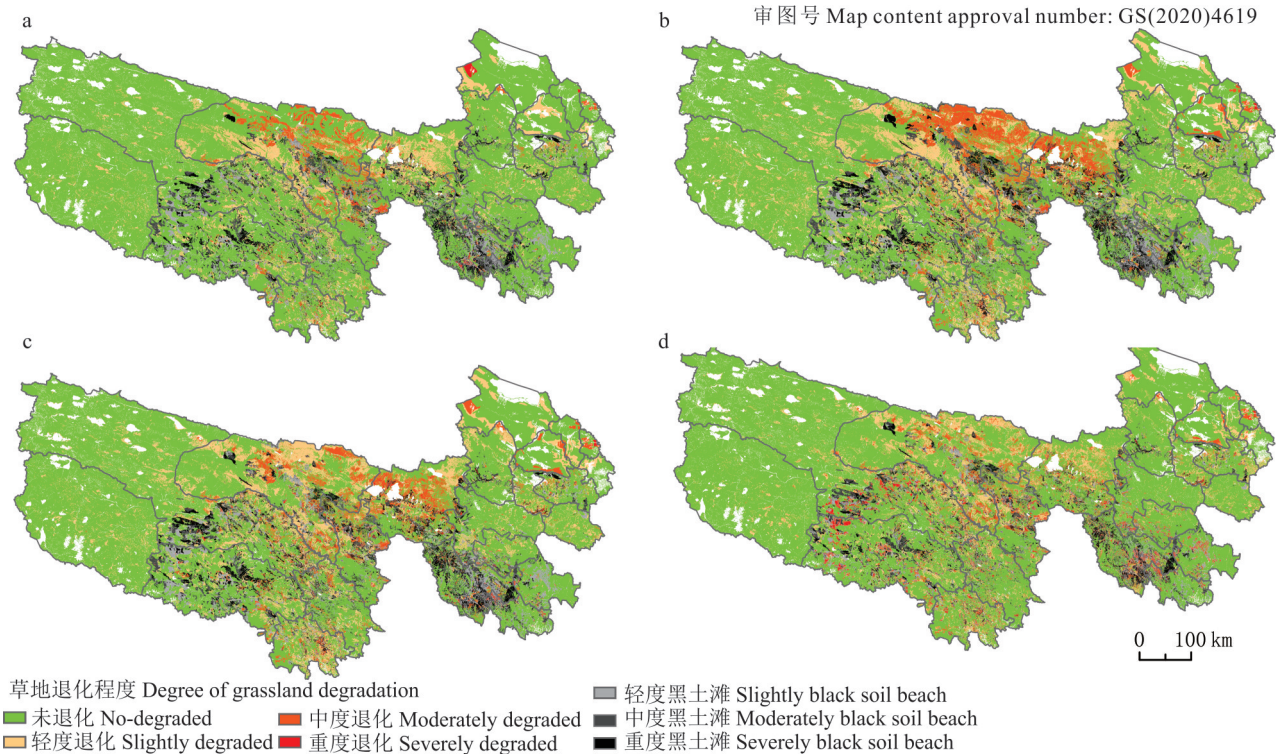


图 3 三江源区天然草地不同时段退化程度空间分布  
Fig. 3 Spatial distribution of natural grassland degradation at different time in the Three-River Headwaters Region  
a~d 分别为 1990、2004、2012 和 2020 年草地退化程度的空间分布,基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4619 号标准地图制作,底图边界无修改。a—d represents the spatial distribution of grassland degradation in 1990, 2004, 2012, and 2020, respectively. Based on the standard map service website GS(2020)4619 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

江源区实测样地的草地退化程度,得到不同退化程度的三江源区各草地型样地记录数据。分别统计未退化、轻度退化、中度退化和重度退化的草地型中可食牧草产草量和样地总产草量,计算各草地型在不同退化程度情形下的可食牧草比例。其中,极度退化草地中黑土滩型草地可食牧草比例参照董全民等<sup>[27]</sup>提出的黑土滩退化草地评价指标、类型及等级划分,轻度黑土滩可食牧草比例为 15%~20%,中度黑土滩可食牧草比例为 5%~15%,重度黑土滩可食牧草比例≤5%。

本研究中 1990 年可食牧草比例采用第一次全国草地资源调查<sup>[30]</sup>结果,2019 年草地退化状况采用 2020 年三江源区草地退化数据。2004、2012 和 2019 年可食牧草比例以样地实测结果计算得出。表 2 中记录了三江源区未

表 2 三江源区未退化草地可食牧草比例统计

Table 2 Statistical of the proportion of edible forage in non-degraded natural grassland in the Three-River Headwaters Region

| 草地类、亚类、组和型<br>Grassland class, subclass, group, and type    | 年份 Year |      |      |      |
|-------------------------------------------------------------|---------|------|------|------|
|                                                             | 1990    | 2004 | 2012 | 2019 |
| 1. 温性草原类 Temperate steppe                                   | 0.95    | 0.95 | 0.89 | 0.94 |
| 1.1 山地草原亚类 Mountain grassland subclass                      | 0.95    | 0.95 | 0.89 | 0.94 |
| 1.1.1 中禾草组 Medium grass group                               | 0.95    | 0.95 | 0.89 | 0.94 |
| 克氏针茅 <i>S. krylovii</i> 、羊茅 <i>F. ovina</i>                 | 0.99    | 0.99 | 0.93 | 0.98 |
| 青海固沙草 <i>O. kokonorica</i> 、杂类草 Herbarum variarum           | 0.91    | 0.91 | 0.90 | 0.97 |
| 2. 高寒草原类 Alpine steppe                                      | 0.83    | 0.83 | 0.78 | 0.82 |
| 2.1 矮禾草组 Dwarf grass group                                  | 0.83    | 0.83 | 0.78 | 0.82 |
| 紫花针茅 <i>S. purpurea</i>                                     | 0.87    | 0.86 | 0.81 | 0.85 |
| 紫花针茅 <i>S. purpurea</i> 、杂类草 Herbarum variarum              | 0.80    | 0.79 | 0.75 | 0.79 |
| 3. 高寒草甸类 Alpine meadow                                      | 0.82    | 0.80 | 0.75 | 0.79 |
| 3.1 高寒草甸亚类 Alpine meadow subclass                           | 0.79    | 0.77 | 0.75 | 0.76 |
| 3.1.1 小莎草组 Small sedge group                                | 0.79    | 0.77 | 0.75 | 0.76 |
| 矮生嵩草 <i>K. humilis</i>                                      | 0.93    | 0.90 | 0.85 | 0.89 |
| 高山嵩草 <i>K. pygmaea</i>                                      | 0.85    | 0.82 | 0.77 | 0.75 |
| 高山嵩草 <i>K. pygmaea</i> 、矮生嵩草 <i>K. humilis</i>              | 0.97    | 0.96 | 0.90 | 0.95 |
| 高山嵩草 <i>K. pygmaea</i> 、异针茅 <i>Stipa aliena</i>             | 0.81    | 0.79 | 0.75 | 0.78 |
| 高山嵩草 <i>K. pygmaea</i> 、圆穗蓼 <i>Polygonum macrophyllum</i>   | 0.88    | 0.86 | 0.80 | 0.84 |
| 高山嵩草 <i>K. pygmaea</i> 、杂类草 Herbarum variarum               | 0.79    | 0.76 | 0.75 | 0.76 |
| 线叶嵩草 <i>K. capillifolia</i> 、珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i> | 0.87    | 0.85 | 0.80 | 0.84 |
| 黑褐苔草 <i>Carex atrofusca</i> 、杂类草 Herbarum variarum          | 0.95    | 0.93 | 0.87 | 0.91 |
| 具金露梅的矮生嵩草 <i>K. humilis</i>                                 | 0.88    | 0.86 | 0.81 | 0.85 |
| 线叶嵩草 <i>K. capillifolia</i> 、高山早熟禾 <i>Poa alpigena</i>      | 0.81    | 0.79 | 0.75 | 0.78 |
| 禾叶嵩草 <i>K. graminifolia</i>                                 | 0.80    | 0.78 | 0.75 | 0.77 |
| 线叶嵩草 <i>K. capillifolia</i>                                 | 0.78    | 0.76 | 0.75 | 0.75 |
| 线叶嵩草 <i>K. capillifolia</i> 、杂类草 Herbarum variarum          | 0.83    | 0.79 | 0.75 | 0.79 |
| 3.2 沼泽化高寒草甸亚类 Swampy alpine meadow subclass                 | 0.93    | 0.97 | 0.91 | 0.96 |
| 3.2.1 大莎草组 Large sedge group                                | 0.93    | 0.97 | 0.91 | 0.96 |
| 西藏嵩草 <i>K. tibetica</i>                                     | 0.93    | 0.97 | 0.91 | 0.96 |
| 4. 沼泽类 Swamp                                                | 0.76    | 0.76 | 0.75 | 0.75 |
| 4.1 大莎草组 Large sedge group                                  | 0.76    | 0.76 | 0.75 | 0.75 |
| 木里苔草 <i>Carex muliensis</i>                                 | 0.76    | 0.76 | 0.75 | 0.75 |
| 5. 高寒荒漠类 Alpine desert                                      | 0.76    | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| 5.1 半灌木组 Semi-shrub group                                   | 0.76    | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| 垫状驼绒藜 <i>Krascheninnikovia compacta</i>                     | 0.76    | 0.75 | 0.75 | 0.75 |

退化草地的各草地型可食牧草比例,不同退化程度的各草地型可食牧草比例由实测数据、赵新全等<sup>[35]</sup>和董全民等<sup>[27]</sup>制定的标准得出,黑土滩草地的可食牧草比例取各黑土滩退化程度可食牧草比例的区间平均值。最终得到1990、2004、2012和2019年4期三江源区可食牧草比例(表2和图4)。

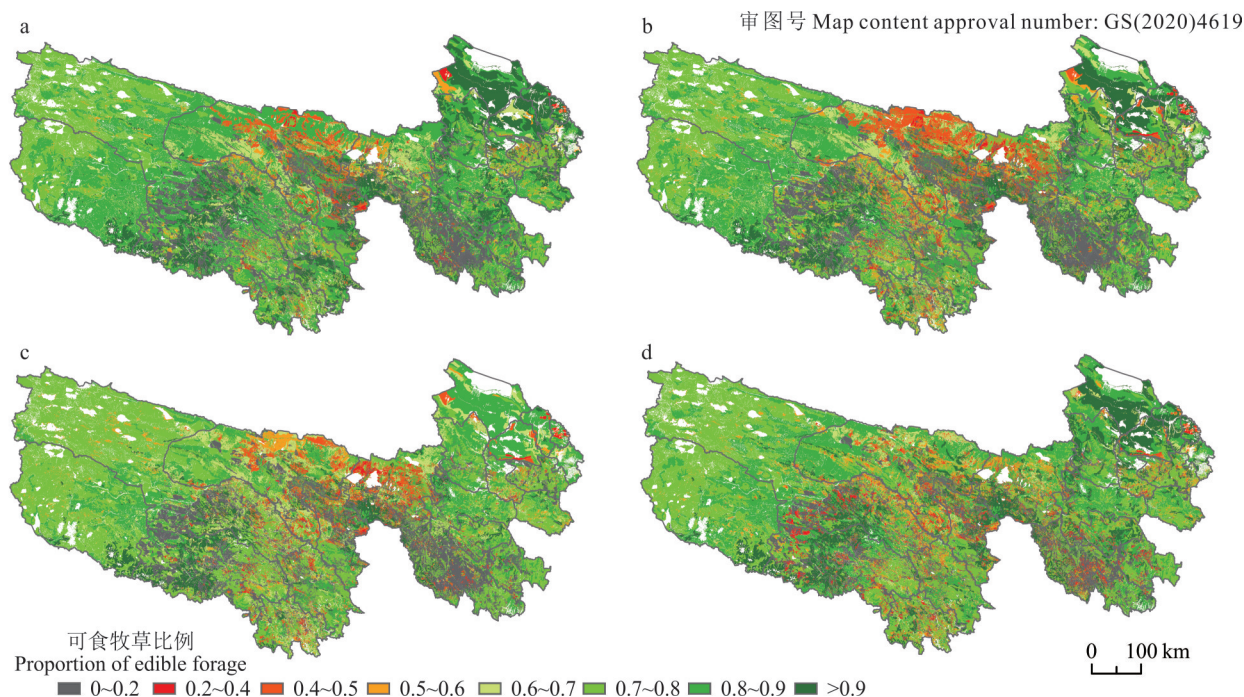


图4 三江源区各草地型可食牧草比例空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the proportion of edible forage in the Three-River Headwaters Region

a~d 分别为1990、2004、2012和2019年可食牧草比例空间分布,基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号标准地图制作,底图边界无修改。a~d represent spatial distribution of the proportion of edible forage in 1990, 2004, 2012 and 2019, respectively. Based on the standard map service website GS(2020)4619 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

三江源未退化的温性草原类各草地型的可食牧草比例最高,可食牧草比例均在0.89以上,主要分布在三江源东部的共和县、贵德县、贵南县和尖扎县。其次是高寒草甸类的西藏嵩草型、矮生嵩草型、高山嵩草—矮生嵩草型、黑褐苔草和杂类草型,上述草地型的可食牧草比例均在0.85以上。而未退化的高寒荒漠类垫状驼绒藜型、沼泽类木里苔草型可食牧草比例仅在0.75左右。可食牧草比例的低值区集中分布在草地退化程度严重的达日县、玛多县、曲麻莱县、杂多县和称多县北部。

在ArcGIS中分别以1990和2004年、2004和2012年、2012和2019年的三江源区天然草地可食牧草比例栅格数据进行逐像元等差分析,依据两期栅格数据之间的像元差值构建等差栅格影像,得到1990—2019年的三江源区天然草地可食牧草比例数据集。1981—1989年和2020年可食牧草产草量估算分别采用1990和2019年可食牧草比例数据,最终生成1981—2020年三江源区可食牧草产草量数据集。

为验证可食牧草比例模拟结果的可靠性,本研究采用2005—2010年的独立样方数据集进行点对点验证,在不同草地型和不同退化梯度下,在ArcGIS中每年随机选取50个样本点进行验证。结果显示,总体可食牧草比例模拟值与实测值之间的 $R^2$ 为0.61,表明模型在不同草地类型与退化梯度下具有较好的空间表征能力。

## 2.2 2020年三江源区可食牧草产草量

2020年,三江源区天然草地可食牧草的产草量为 $508.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,产草总量为1620.23万t,可食牧草产草总量占三江源区产草总量的70%,可食牧草产草量呈自东向西递减趋势,东部可食牧草的产草量最高(图5)。

从三江源国家公园来看,澜沧江源园区天然草地可食牧草的产草量最高,为  $550.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,其次是黄河源园区,可食牧草产草量为  $444.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,两个园区的可食牧草比例分别为 0.68 和 0.70;长江源园区天然草地可食牧草产草量为  $219.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,长江源园区因历史生态环境恶劣,园区内草地退化程度较轻,可食牧草比例为 0.70。长江源园区和黄河源园区天然草地可食牧草的比例高于三江源区平均值,表明两个园区内对草地生态系统保护和修复的措施效果较好,澜沧江源园区可食牧草比例较低,需继续提高草地保护和修复成效。

### 2.3 1981—2020 年三江源区可食牧草产草量

1981—2020 年,三江源区天然草地可食牧草的平均产草量为  $403.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,可食牧草产草总量多年平均值为 1322.61 万 t,可食牧草产草量呈自西向东递减趋势(图 6)。由图 7 可得,近 40 年三江源区天然草地可食牧草产草量整体呈递增趋势( $R^2=0.34$ ),部分年际间产草量变化较大,可食牧草产草量的变异系数(coefficient of variation, CV)为 8.0%,CV 较小的区域主要分布在三江源区东南部,该地区天然草地在近 40 年里退化程度较低,草地型的可食牧草比例变化较小,可食牧草产草量变化程度较低;CV 较大的地区与近 40 年草地退化程度严重的区域一致,随着草地生态系统的退化和恢复过程,草地型的可食牧草比例改变,可食牧草产草量变化剧烈。

近 40 年,三江源区天然草地可食牧草的产草量年变化速率为  $1.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,可食牧草产草量整体呈增加趋势(图 8),增加趋势通过 0.1 和 0.05 显著性检验的草地面积分别占总面积的 62.5% 和 59.8%,而下降趋势通过 0.1 和 0.05 显著性检验的草地面积分别占总面积的 16.2% 和 15.0%(图 8)。三江源区天然草地可食牧草产草量呈增加趋势的区域面积为 2237.34 万  $\text{hm}^2$ ,占总面积的 80.2%,年均增长速率最高的地区集中分布在三江源区东部共和县、兴海县,及贵南县和同德县的北部;可食牧草产草量呈下降趋势的区域主要分布在三江源区东部泽库县、贵南县、贵德县和同仁县的交界处,以及中部和西部的局部地区,表明近 40 年,上述地区可食牧草的产草量仍在下降,草地退化仍在发生,对草地生态系统保护需加强。

1981—2020 年,三江源国家公园天然草地可食牧草的年均产草量为  $221.37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,可食牧草年均产草总量为 211.12 万  $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,国家公园内可食牧草的年均比例为 0.67。澜沧江源园区天然草地可食牧草的年均产草量为  $399.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,可食牧草的年均比例为 0.66,可食牧草产草量的年均变化速率为  $2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;黄河源园区天

审图号 Map content approval number: GS(2020)4619

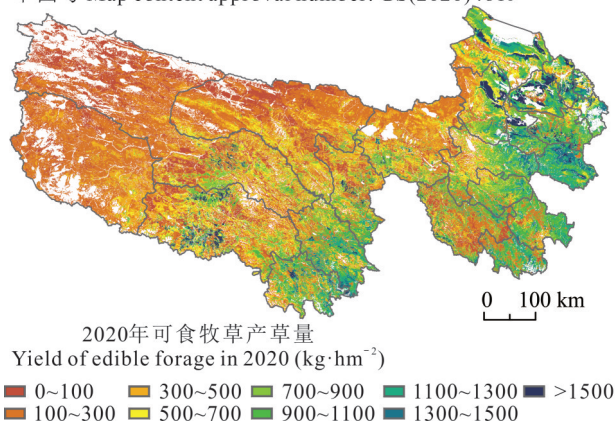


图 5 2020 年三江源区天然草地可食牧草产草量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of edible forage yield of natural grassland in the Three-River Headwaters Region in 2020

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4619 号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2020)4619 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

审图号 Map content approval number: GS(2020)4619

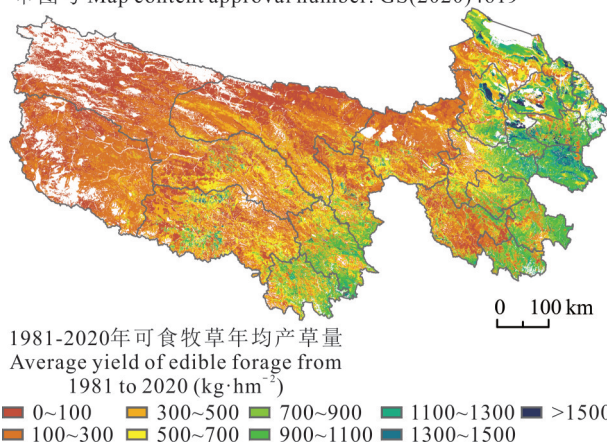


图 6 1981—2020 年三江源区天然草地可食牧草平均产草量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of average edible forage yield of natural grassland in the Three-River Headwaters Region from 1981 to 2020

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4619 号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2020)4619 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

然草地可食牧草的年均产草量为  $294.81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 但黄河源园区所在的玛多县草地退化状况严重, 可食牧草的年均比例为 0.63, 随着三江源生态保护和建设工程(一期、二期)实施, 玛多县草地退化得到有效遏制, 草地生态持续恢复, 园区内可食牧草的产草量年变化速率为  $1.32 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 长江源园区天然草地可食牧草的年均产草量为  $169.37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 可食牧草的年均产草量在 3 个园区最高, 为 112.19 万 t, 可食牧草产草量年变化速率为  $0.86 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 3 个园区的可食牧草产草量均呈增加趋势。

#### 2.4 三江源区各县可食牧草产草量

1981—2020 年, 三江源区 21 个县和唐古拉山镇

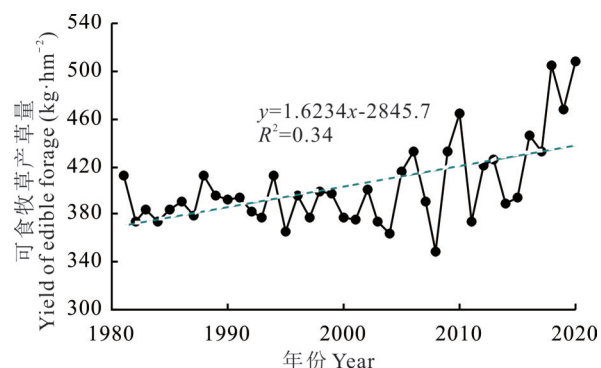


图7 1981—2020年三江源区天然草地可食牧草产草量年际变化  
Fig. 7 Interannual variation of edible forage yield in natural grassland in the Three-River Headwaters Region from 1981 to 2020

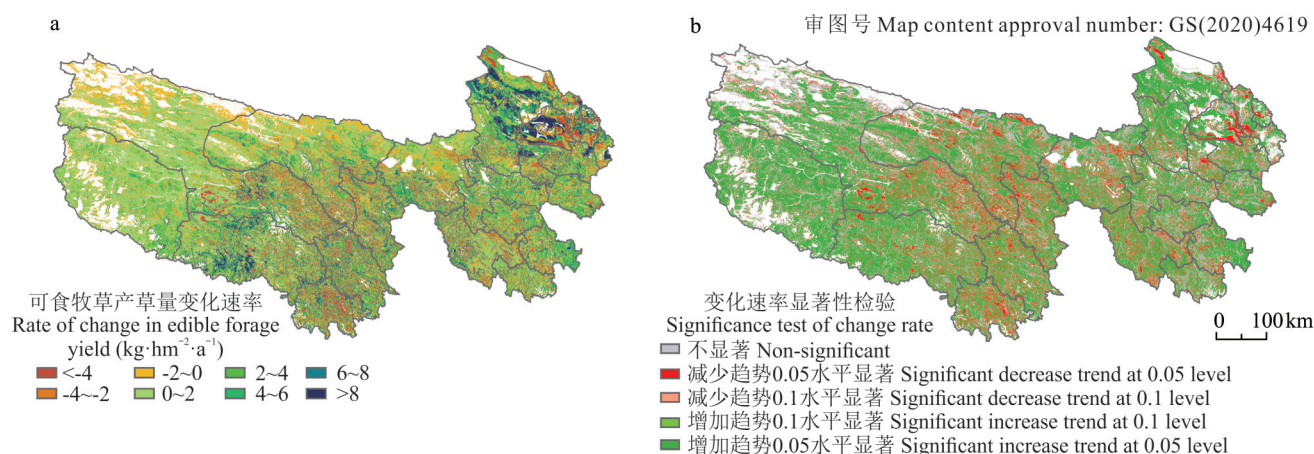


图8 1981—2020年三江源区可食牧草产草量年变化速率(a)及显著性检验(b)

Fig. 8 Annual change rate (a) and significance test (b) of edible forage yield in the Three-River Headwaters Region from 1981 to 2020

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4619 号标准地图制作, 底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2020)4619 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

的可食牧草产草量如表 3 所示。尖扎县、河南蒙古族自治县、同德县和同仁县共 4 县的天然草地可食牧草产草量在  $900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  以上; 玛多县、达日县、杂多县、曲麻莱县、治多县和唐古拉山镇的可食牧草产草量不足  $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 可食牧草的产草量与天然草地产草总量相比明显降低。共和县天然草地的可食牧草比例最高, 其次是贵德县, 贵南县和同仁县的可食牧草比例也在 0.80 以上; 达日县可食牧草比例最低, 仅为 0.46。三江源区有 10 个县的可食牧草比例低于平均值 0.70, 集中分布在三江源区中部和西部, 草地生态系统状况仍需继续改善和提高。

1981—2020 年, 三江源区河南蒙古族自治县天然草地可食牧草的年均产草量最高, 为  $1088.47 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 年均产草总量为 69.13 万  $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 全县年均可食牧草的比例为 0.79。唐古拉山镇和治多县天然草地可食牧草的年均产草量较低, 分别为  $166.73$  和  $192.36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。三江源区天然草地可食牧草比例最低的县是达日县, 全县草地以极度退化程度的黑土滩退化为主, 牲畜可食用牧草的比例严重下降。近 40 年, 三江源区 21 个县和唐古拉山镇的可食牧草产草量年变化速率差异明显, 可食牧草产草量均呈增加趋势, 共和县的可食牧草年变化速率最高, 为  $3.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (表 3)。

#### 2.5 不同时段可食牧草时空变化

1981—1990 年, 三江源区天然草地可食牧草的平均产草量为  $389.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 可食牧草年均产草总量为

表 3 1981–2020 年三江源区县、镇可食牧草产草量统计

Table 3 Statistics of edible forge yield in counties and towns of the Three-River Headwaters Region from 1981 to 2020

| 县、镇名称<br>County and town names             | 可食牧草产草量<br>Edible forage yield<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 可食牧草产草总量<br>Total yield of edible forage<br>(×10 <sup>4</sup> t) | 可食牧草比例<br>Proportion of<br>edible forage | 年变化速率<br>Annual rate of change<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 班玛县 Banma county                           | 666.53                                                   | 38.50                                                            | 0.61                                     | 1.11                                                                      |
| 久治县 Jiuzhi county                          | 717.78                                                   | 56.11                                                            | 0.67                                     | 1.40                                                                      |
| 甘德县 Gande county                           | 657.17                                                   | 44.72                                                            | 0.70                                     | 1.38                                                                      |
| 玛沁县 Maqin county                           | 612.34                                                   | 72.76                                                            | 0.76                                     | 1.89                                                                      |
| 玛多县 Maduo county                           | 278.62                                                   | 60.56                                                            | 0.64                                     | 1.18                                                                      |
| 达日县 Dari county                            | 367.88                                                   | 51.37                                                            | 0.46                                     | 0.52                                                                      |
| 同德县 Tongde county                          | 953.84                                                   | 36.28                                                            | 0.75                                     | 1.59                                                                      |
| 贵德县 Guide county                           | 772.37                                                   | 23.62                                                            | 0.84                                     | 1.24                                                                      |
| 共和县 Gonghe county                          | 599.44                                                   | 73.09                                                            | 0.85                                     | 3.73                                                                      |
| 兴海县 Xinghai county                         | 618.10                                                   | 66.81                                                            | 0.79                                     | 2.61                                                                      |
| 贵南县 Guinan county                          | 868.33                                                   | 45.72                                                            | 0.82                                     | 2.30                                                                      |
| 泽库县 Zeku county                            | 848.91                                                   | 51.74                                                            | 0.67                                     | 1.55                                                                      |
| 河南蒙古族自治县 Henan Mongolian Autonomous county | 1088.47                                                  | 69.13                                                            | 0.79                                     | 1.75                                                                      |
| 同仁县 Tongren county                         | 916.98                                                   | 17.21                                                            | 0.81                                     | 2.83                                                                      |
| 尖扎县 Jianzha county                         | 900.68                                                   | 10.69                                                            | 0.79                                     | 1.59                                                                      |
| 囊谦县 Nangqian county                        | 644.49                                                   | 69.98                                                            | 0.66                                     | 0.41                                                                      |
| 玉树市 Yushu City                             | 636.85                                                   | 92.94                                                            | 0.69                                     | 1.35                                                                      |
| 杂多县 Zaduo county                           | 367.91                                                   | 117.48                                                           | 0.65                                     | 2.02                                                                      |
| 称多县 Chenduo county                         | 438.60                                                   | 61.36                                                            | 0.64                                     | 0.96                                                                      |
| 曲麻莱县 Qumarleb county                       | 208.90                                                   | 87.80                                                            | 0.65                                     | 0.88                                                                      |
| 治多县 Zhiduo county                          | 192.36                                                   | 113.03                                                           | 0.66                                     | 0.75                                                                      |
| 唐古拉山镇 Tanggula mountain town               | 166.73                                                   | 61.73                                                            | 0.81                                     | 1.42                                                                      |

1277.71 万 t,可食牧草比例的均值为 0.72,可食牧草产草量的年均变化速率为 1.25 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,整体呈递增趋势。从空间分布(图 9)上看,三江源区天然草地可食牧草的产草量自东向西递减,中部草地退化严重地区和西部干旱地区的可食牧草产草量较低。本时段,三江源区可食牧草产草量的变化速率增加地区主要分布在东部,尖扎县、同仁县和贵德县天然草地可食牧草产草量的变化速率在 9 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 以上;可食牧草产草量变化速率降低的地区主要分布在三江源区中部的班玛县、达日县、称多县和囊谦县,可食牧草产草量呈下降趋势(图 10)。

1991–2004 年,三江源区天然草地可食牧草的平均产草量为 385.27 kg·hm<sup>-2</sup>,可食牧草的年均产草总量为 1262.97 万 t,与 1981–1990 年相比,产草量下降了 1.15%,空间上天然草地可食牧草的产草量自东向西递减。可食牧草所占比例的均值为 0.69,与前一时段相比可食牧草比例下降了 4.17%。本时段内,可食牧草的产草量变化速率为 -0.88 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,整体呈轻微下降趋势,全区有 19 个县的可食牧草产草量变化速率呈降低趋势,尖扎县和贵德县天然草地可食牧草的产草量下降速率较大,年变化速率均低于 -7 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

2005–2012 年,三江源区天然草地可食牧草的平均产草量为 410.08 kg·hm<sup>-2</sup>,可食牧草的年均产草总量为 1344.24 万 t,与 1991–2004 年相比,可食牧草的产草量增加了 6.4%。本时段内,三江源区可食牧草比例的均值为 0.66,与前一时段相比下降了 4.35%,其中,玛多县、同仁县、贵德县和贵南县天然草地可食牧草的比例下降程度较大,均在 8.0% 以上。本时段内,三江源区天然草地可食牧草的产草量年变化速率为 0.52 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,整体

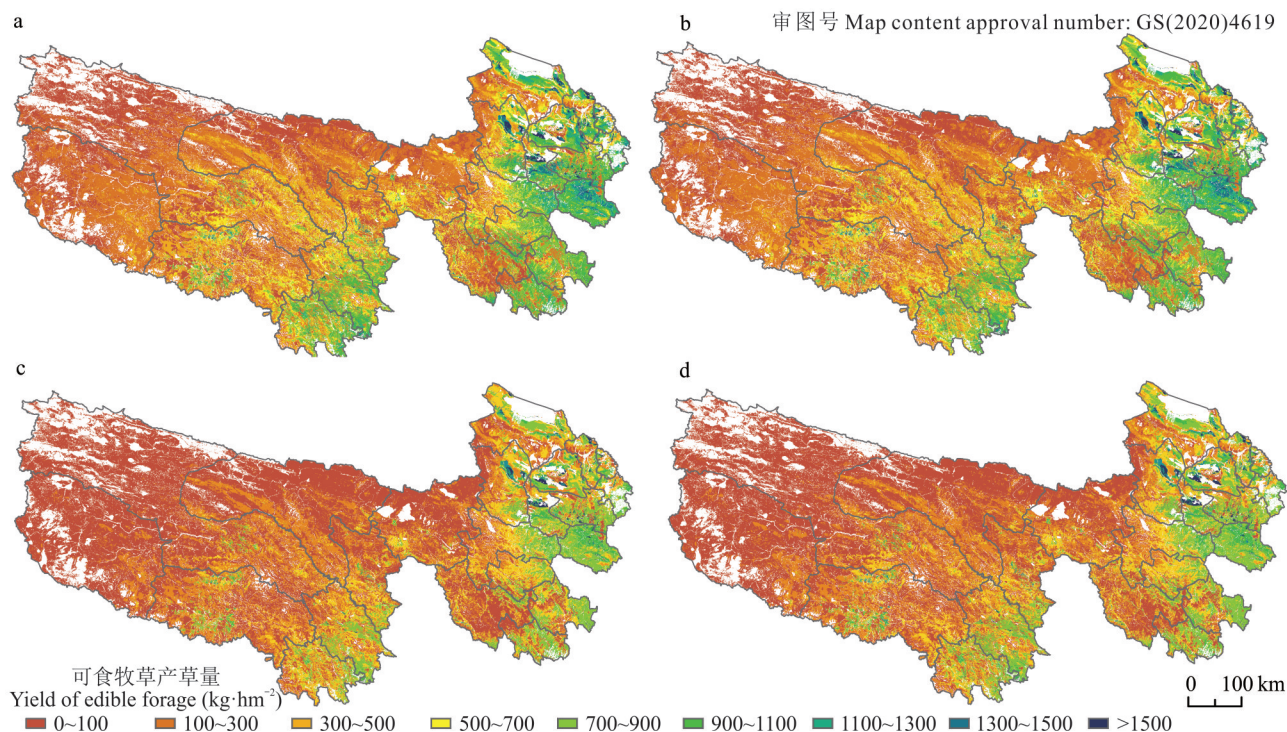


图9 三江源区天然草地可食牧草不同时段平均产草量空间分布

**Fig. 9 Spatial distribution of average edible forage yield at different time periods in natural grassland in the Three-River Headwaters Region**

a~d 分别为 1981—1990 年、1991—2004 年、2005—2012 年和 2013—2020 年的可食牧草年均产草量,基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4619 号标准地图制作,底图边界无修改。a—d represents the average annual yield of edible forage from 1981 to 1990, 1991 to 2004, 2005 to 2012, and 2013 to 2020, respectively. Based on the standard map service website GS(2020)4619 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified. 下同 The same below.

呈增加趋势。由图 11 可知,本时段三江源区东南各县的产草量年变化速率最低,河南蒙古族自治县的可食牧草产草量变化速率低于  $-7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,而共和县天然草地可食牧草的产草量变化速率为  $4.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,可食牧草产草量增加明显。结果表明,在三江源生态保护和建设工程(一期)实施过程中,虽然产草量在增加,但是三江源区可食牧草的比例仍在下降,仍然存在草地退化现象。

2013—2020 年,三江源区天然草地可食牧草的平均产草量为  $454.86 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,可食牧草的年均产草总量为 1461.55 万 t,与 2005—2012 年相比,可食牧草的产草量增加了 8.7%;本时段内,三江源区可食牧草比例的均值为 0.70,与前一时段相比增加了 6.1%。本时段内,三江源区天然草地可食牧草的产草量变化速率为  $14.47 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,由图 11 可得,除三江源西北部分地区可食牧草产草量呈下降趋势外,三江源区可食牧草的产草量均呈增加趋势,21 个县和唐古拉山镇的可食牧草产草量年变化速率均高于  $4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。贵南县、贵德县、尖扎县、同德县、兴海县、囊谦县和玉树市天然草地可食牧草产草量年变化速率在  $20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  以上,是近 40 年以来可食牧草产草量增速最快的阶段。上述结果表明,在三江源生态保护和建设工程(二期)实施过程中,措施的成效明显,三江源区天然草地得到有效的保护和恢复。

## 2.6 气候对可食牧草产草量的驱动

1981—2020 年,三江源区的年均降水呈波动上升趋势。天然草地可食牧草的产草量与年均降水以正相关为主,正相关区域的面积占草地总面积的 89.5%,负相关区域的面积占总面积的 9.4%,不相关区域占 1.1%。其中,极显著正相关区域占草地总面积的 31.3%,从空间分布上看(图 11),主要分布在三江源区北部和阿尼玛卿山西麓,三江源区北部的极显著正相关区域与 400 mm 等降水量线以下的地区基本一致,表明在干旱地区随着降水

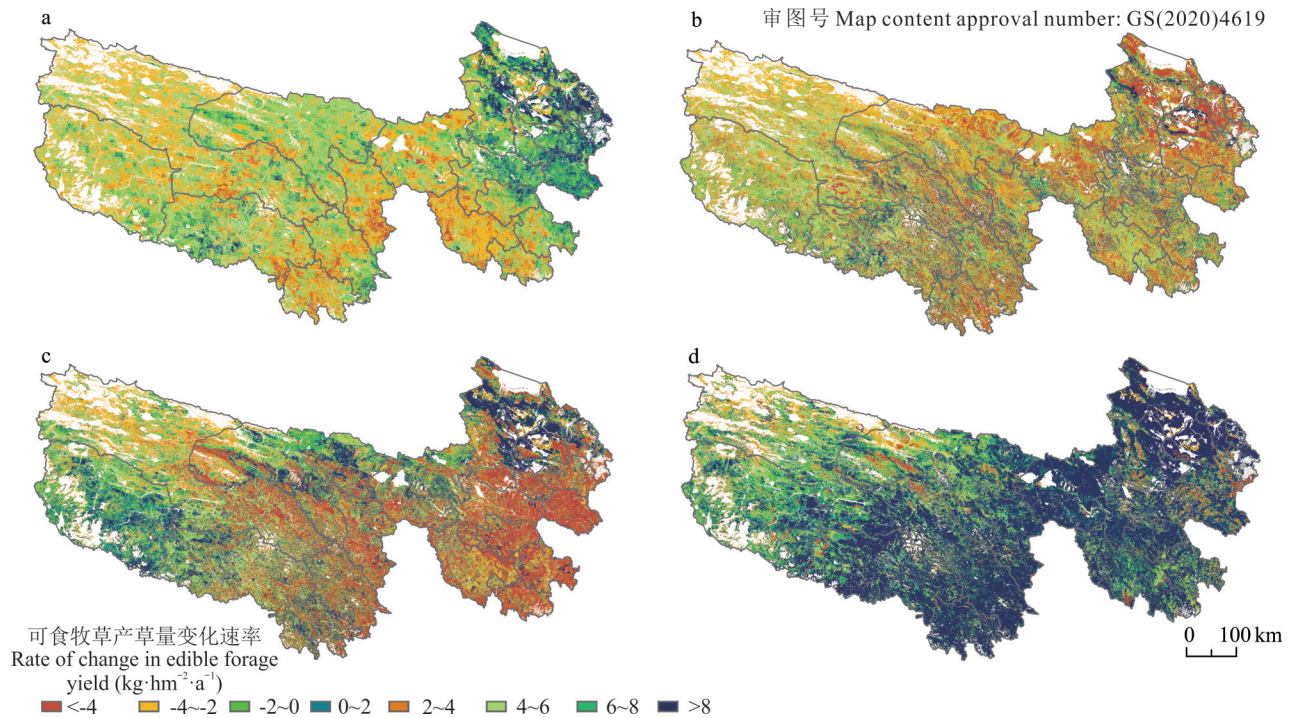


图 10 三江源区天然草地可食牧草不同时段产草量变化速率空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of change rate of edible forage yield in natural grassland at different periods in the Three-River Headwaters Region

a~d 分别为 1981—1990 年、1991—2004 年、2005—2012 年和 2013—2020 年可食牧草产草量的年变化速率,基于自然资源部标准地图服务网站 GS (2020)4619 号标准地图制作,底图边界无修改。a~d represents the annual change rate of edible forage yield from 1981 to 1990, 1991 to 2004, 2005 to 2012, and 2013 to 2020, respectively. Based on the standard map service website GS(2020)4619 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

量增加,可食牧草的产草量呈增加趋势;阿尼玛卿山西麓的达日县和玛多县南部地区的草地退化严重,重度和极度退化草地的可食牧草产草量与降水呈极显著正相关,表明在重度退化地区降水增加有利于草地植被恢复。可食牧草的产草量与年均降水呈负相关的地区主要位于三江源区南部和东部,极显著和显著负相关区域面积分别占总面积的 0.7% 和 1.4%,这些地区的年均降水量在 500 mm 以上,尤其是东部呈显著负相关的泽库县和同仁县,年均降水量在 600 mm 以上,表明在水热充足条件下,降水量对可食牧草产草量的正向驱动减弱。

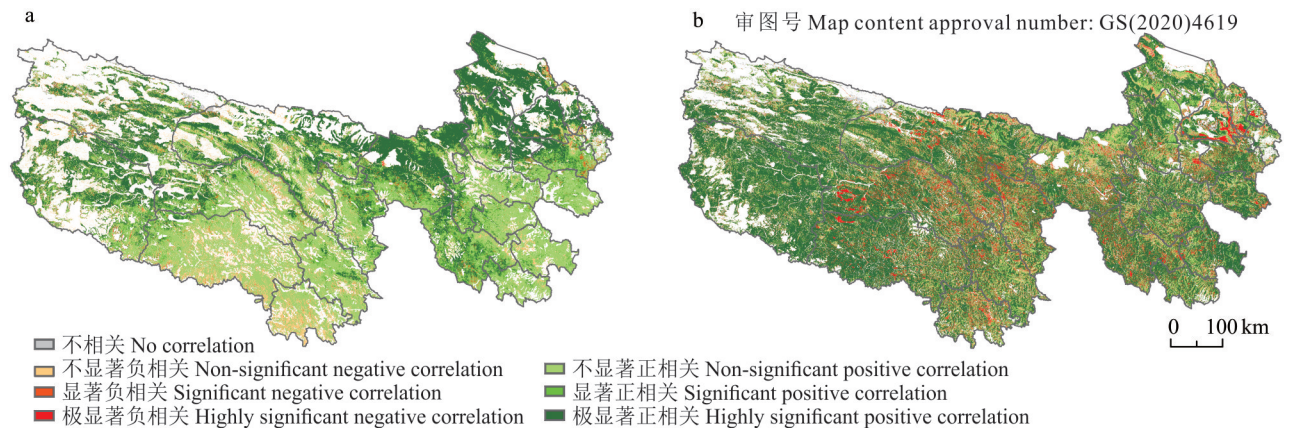


图 11 可食牧草产草量与年均降水(a)、年均温(b)的相关性

Fig. 11 Correlation between edible forage yield and annual precipitation (a) and annual average temperature (b)

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4619 号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2020)4619 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

利用三江源区天然草地产草量、可食牧草的产草量分别与年均气温、年均降水进行多元回归分析,并根据标准化回归系数进行气温和降水的相对重要性判断。在三江源区,气温是大部分天然草地产草量变化的主控因子,占三江源区面积的70.1%,广泛分布于整个地区。降水作为三江源区天然草地产草量变化主控因子的区域占三江源区总面积的17.7%,集中分布在玛多县、兴海县、贵德县、贵南县和共和县。在可食牧草的产草量中,气温作为主控因子的区域占三江源区面积的68.3%,降水作为主控因子的区域占三江源区总面积的22.4%(图12),空间分布趋势一致。

### 3 讨论

#### 3.1 气候与可食牧草产草量的相关性

1981—2020年,三江源区的年均温由 $-3.83^{\circ}\text{C}$ 增加到2020年的 $-2.72^{\circ}\text{C}$ ,整体呈增加趋势。三江源区天然草地可食牧草的产草量与年均温以正相关为主,正相关区域的面积占草地总面积的78.7%,极显著和显著正相关区域的面积分别占草地总面积的54.5%和62.1%;负相关区域的面积占草地总面积的16.1%,极显著负相关和显著负相关区域的面积分别占总面积的4.9%和6.8%。从空间分布上看(图11),三江源区东部和中部地区可食牧草产草量与温度呈极显著和显著负相关,包括东部的贵德县、泽库县、贵南县、尖扎县和同仁县,以及中部的玛多县、曲麻莱县和称多县,温度升高不利于当地可食牧草干物质的合成。三江源区南部和西部地区天然草地可食牧草的产草量与气温呈显著和极显著正相关,这些地区的年平均气温在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下,随着温度升高,可食牧草的产草量增加,有利于草地植被生长。

#### 3.2 气候对可食牧草产草量的相对重要性

对比1981—2020年三江源区产草量、年均气温和年均降水的多元回归结果,三江源区可食牧草的产草量受气温和降水的影响较为明显,降水在可食牧草产草量的变化中作为主控因子的区域占比增加,表明降水对可食牧草产草量的正向作用增强,降水增加有利于三江源区退化草地的恢复。

应用三江源区五大草地类与相对重要性空间分布图进行空间叠加分析,分别统计各草地类中,年降水和年均温对可食牧草产草量相对重要性的百分比。在温性草原类中,年均温相对重要性占比为75%,年降水相对重要性占比为25%。与温性草原类趋势相反,高寒草甸类、高寒草原类、高寒荒漠类和沼泽类中年降水对可食牧草产草量的相对重要性占比均超过60%,其中,高寒荒漠类年降水占比最高为86%,沼泽类年均温占比最高为34%。结果表明:温性草原类以年均温为主导,而高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠及沼泽类则均以年降水为主控因子。这一空间分异格局主要源于不同草地类型所处生境的水热组合及其对植被生长的限制性强弱差异。对于温性草原类,其水分条件相对得以基本满足,生长季长度与光合作用效率更直接地受温度调控,使得年均温成为产草量变化的关键限制因子。与之相反,分布于高海拔地区的4类草地,低温环境相对稳定,降水量的空间异质性及年际波动则直接决定了土壤水分的可获得性,从而成为制约高寒植被生产力最为关键的生态因子。

#### 3.3 误差来源

本研究在可食牧草产草量估算中存在多个误差来源:1)NPP数据获取,应用GLOPEM CEVSA NPP数据模拟获取1981—1999年的GLASS NPP<sub>500</sub>;2)产草量模型模拟,对三江源区的五大类草地BNPP/ANPP值,同一类草地采用了同一值;3)可食牧草比例估算,同一退化程度中,同一类草地型赋值相同的可食牧草比例;4)1981—1990年的可食牧草比例数据,均采用20世纪80年代三江源区草地数据;5)地面样方数据空间分布不均,高寒荒漠类和沼泽类草地缺少样方数据,且时间跨度大,为了与遥感数据结合分析,选取2004、2012和2019年的样方数

审图号 Map content approval number: GS(2020)4619

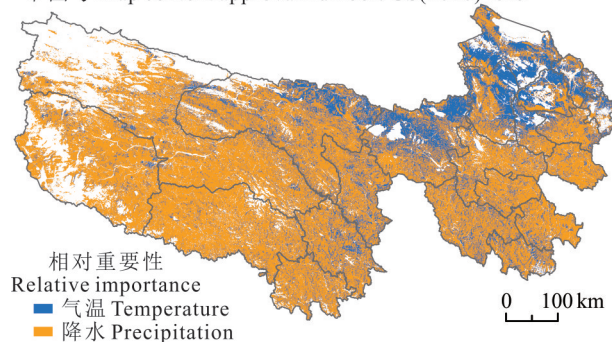


图12 降水和气温对可食牧草产草量相对重要性的空间分布  
Fig. 12 Spatial distribution of the relative importance of precipitation and temperature on the yield of edible forage

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4619号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2020)4619 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

据。本研究结合样方数据时效性与可食牧草分布空间异质性,在大尺度长时间序列研究中对可食牧草的比例进行简化处理,在同一草地类型中采用了固定比例,同一退化等级内草地型的比例赋值采用均值处理,缺少动态差异处理。同时,三江源区可食牧草的产草量受气候变化、人类活动等多重因素的影响,本研究聚焦气温和降水的驱动机制,未量化地形地势、放牧、工程干预等因子的影响,致使对气候驱动机制的分析存在局限。此外,极端气候(如 2018—2019 年雪灾)可能导致三江源区局部可食牧草比例的异常。后续研究将通过加长样地监测,引入可食牧草比例动态赋值,结合放牧强度空间分布图、工程实施台账等人类活动数据,构建“气候—人类活动”耦合模型,进一步降低不确定性,提升研究结果的精准性与应用价值。

#### 4 结论

本研究应用多源 NPP 数据模拟 1981—2020 年三江源区天然草地产草量,利用草地样方实测数据、遥感数据和文献资料等,厘定了三江源区各草地型在不同时间、不同草地退化程度的可食牧草比例,分析近 40 年可食牧草产草量的时空变化,得出以下结论:

1)三江源区天然草地可食牧草比例与草地退化程度密切相关,全区可食牧草比例多年平均值为 0.69,整体呈现“下降—波动—回升”的阶段特征,截至 2020 年仍未恢复至 20 世纪 80 年代初水平。1981—2020 年,三江源区的年均温和年均降水整体呈增加趋势,实施生态保护工程缓解了草地退化趋势,但高寒草地的自然恢复速率受限于气候与人类活动的长期累积效应,需进一步优化恢复策略。

2)1981—2020 年,三江源区可食牧草产草量空间异质性显著,自东向西递减,年平均产草量为  $403.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,产草总量多年平均值为 1322.61 万 t。可食牧草产草量的年变化速率为  $1.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,年均增长速率最高的地区集中分布在三江源区东部共和县、兴海县,及贵南县和同德县的北部;可食牧草产草量呈下降趋势的区域,主要分布在三江源区东部泽库县、贵南县、贵德县和同仁县的交界处,以及中部和西部的局部地区。

3)1981—2020 年,三江源国家公园可食牧草的年均产草量为  $221.37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,整体呈增长趋势,但园区间差异显著,澜沧江源园区年均产草量为  $399.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,高于长江源园区( $169.37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),表明生态工程措施需针对不同退化类型进行精准调控。研究结果为三江源区草地资源可持续管理及国家公园生态保护成效评估提供了量化支撑。

4)气候驱动机制分析表明,年均温是产草量变化的主控因子(正相关区域占 88.6%),而降水对于干旱区( $< 400 \text{ mm}$ )及重度退化草地的恢复具有关键作用(极显著正相关占 31.3%)。气候暖湿化与降水格局改变的协同效应,对高寒草地可食牧草恢复具有差异化调控作用,需在适应性管理中综合考虑水热条件的区域响应差异。

#### 参考文献 References:

- [1] Zhao X Q, Zhou H K. Eco-environmental degradation, vegetation regeneration and sustainable development in the Headwaters of Three Rivers on Tibetan Plateau. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2005, 20(6): 37—42.  
赵新全,周华坤.三江源区生态环境退化、恢复治理及其可持续发展.中国科学院院刊,2005,20(6):37—42.
- [2] Liu J Y, Xu X L, Shao Q Q. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three—River Headwaters Region in Qinghai Province. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 63(4): 364—376.  
刘纪远,徐新良,邵全琴.近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征.地理学报,2008,63(4):364—376.
- [3] Shao Q Q, Fan J W. Monitoring and evaluation of ecological benefits of Sanjiangyuan ecological protection and construction projects. Beijing: Science Press, 2018.  
邵全琴,樊江文.三江源生态保护和建设工程生态效益监测评估.北京:科学出版社,2018.
- [4] Zhou H K, Zhao X Q, Zhou L, *et al.* A study on correlations between vegetation degradation and soil degradation in the ‘Alpine Meadow’ of the Qinghai—Tibetan Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(3): 31—40.  
周华坤,赵新全,周立,等.青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究.草业学报,2005,14(3):31—40.
- [5] Greyerz V K, Ericsson N, Jardstedt M, *et al.* Feeding straw to suckler cows spared land but did not decrease the climate impact of beef. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2024, 39: e36.
- [6] Zira S, Salomon E, Akerfeldt M, *et al.* Environmental consequences of pig production scenarios using biomass from rotational

- grass-clover leys as feed. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, 30: 103068.
- [7] Moorby J M, Fraser M D. Review: New feeds and new feeding systems in intensive and semi-intensive forage-fed ruminant livestock systems. *Animal*, 2021, 15: 100297.
- [8] Wiangkham N, Prapagdee B. Potential of Napier grass with cadmium-resistant bacterial inoculation on cadmium phytoremediation and its possibility to use as biomass fuel. *Chemosphere*, 2018, 201: 511–518.
- [9] Mirshad P P, Chandran S, Puthur J T. Characteristics of bioenergy grasses important for enhanced NaCl tolerance potential. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2014, 61(5): 639–645.
- [10] Vázquez de Aldana B R, Arellano J B, Cuesta M J, *et al.* Screening fungal endophytes from a wild grass for growth promotion in tritordeum, an agricultural cereal. *Plant Science*, 2021, 303: 110762.
- [11] Xu T W, Zhao X Q, Zhang X L, *et al.* Sustainable development of ecological grass-based livestock husbandry in Qinghai-Tibet Plateau alpine area: principle, technology and practice. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6324–6337.  
徐田伟, 赵新全, 张晓玲, 等. 青藏高原高寒地区生态畜牧业可持续发展: 原理、技术与实践. *生态学报*, 2020, 40(18): 6324–6337.
- [12] He F Q, Chen D D, Li Q, *et al.* Temporal and spatial distribution of herbage nutrition in alpine grassland of Sanjiangyuan. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6304–6313.  
贺福全, 陈懂懂, 李奇, 等. 三江源高寒草地牧草营养时空分布. *生态学报*, 2020, 40(18): 6304–6313.
- [13] Chen D D, Li Q, Huo L L, *et al.* Nutritional condition, theoretical carrying capacity and feed value of alpine grasslands in the headwater regions of the Yangtze River and Yellow River. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(7): 2186–2192.  
陈懂懂, 李奇, 霍莉莉, 等. 长江源和黄河源区草地牧草养分、理论承载力及饲用价值. *草地学报*, 2023, 31(7): 2186–2192.
- [14] Cai Z Y, Wang J B, Song P F, *et al.* The analysis of grazing pressure of ungulates on grassland in Lancang River Source Park, Sanjiangyuan National Park. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(4): 1844–1853.  
蔡振媛, 王军邦, 宋鹏飞, 等. 三江源国家公园澜沧江源园区草地有蹄类动物承载力评估. *生态学报*, 2025, 45(4): 1844–1853.
- [15] Zhang F F, Yang K H, Yu L, *et al.* Dynamic research on the edible forage production of main grassland types in Shaertao Mountain, Xinjiang. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2018, 55(9): 1737–1746.  
张凡凡, 杨开虎, 于磊, 等. 新疆沙尔套山主要草地类型可食牧草产量动态变化规律. *新疆农业学报*, 2018, 55(9): 1737–1746.
- [16] Li W L, Xue Z Z, Guo S M, *et al.* Vegetation coverage changes and analysis of the driving forces in Maqu County based on 3S technology. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2010, 46(1): 85–90, 95.  
李文龙, 薛中正, 郭述茂, 等. 基于3S技术的玛曲县草地植被覆盖度变化及其驱动力. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(1): 85–90, 95.
- [17] Wang H, Li W L, Du G Z, *et al.* Research on the change of grassland vegetation coverage using 3S technology in Gannan. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(3): 26–37.  
王浩, 李文龙, 杜国祯, 等. 基于3S技术的甘南草地覆盖度动态变化研究. *草业学报*, 2012, 21(3): 26–37.
- [18] Liu X Y, Feng Q S, Liang T G, *et al.* Spatial-temporal dynamic balance between livestock carrying capacity and productivity of rangeland in Gannan of Gansu Province, China. *Chinese Journal of Grassland*, 2010, 32(1): 99–106.  
刘兴元, 冯琦胜, 梁天刚, 等. 甘南牧区草地生产力与载畜量时空动态平衡研究. *中国草地学报*, 2010, 32(1): 99–106.
- [19] Du X C, Li Y, Yu H Y, *et al.* Dynamic analysis of vegetation coverage, yield and nutrient content of edible forage in alpine meadow during growth period in Hezuo. *China Herbivore Science*, 2019, 39(4): 41–47.  
杜笑村, 李昀, 俞慧云, 等. 合作市高寒草甸牧草生长期植被盖度、可食牧草产量及养分含量动态分析. *中国草食动物科学*, 2019, 39(4): 41–47.
- [20] Yu H Y, Yu L P, Yang L P, *et al.* Analysis on the change of the yield and nutrient content of the edible forage and the grassland grazing capacity in the alpine grassland of Maqu County. *China Herbivore Science*, 2020, 40(3): 40–46.  
俞慧云, 俞联平, 杨林平, 等. 玛曲县高寒草地可食牧草产量和养分含量变化及草地承载力分析. *中国草食动物科学*, 2020, 40(3): 40–46.
- [21] Tao W G, Xu B, Yang X C. Advances and factors affecting the estimation of grass production using remote sensing. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(2): 1–8.  
陶伟国, 徐斌, 杨秀春. 草原产草量遥感估算方法发展趋势及影响因素. *草业学报*, 2007, 16(2): 1–8.

- [22] Xu X L, Wang L, Li J, *et al.* Analysis of the grassland restoration trend and degradation situation in the “Three-River Headwaters” region since the implementation of the ecological project. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(1): 50–58.  
徐新良, 王靓, 李静, 等. 三江源生态工程实施以来草地恢复态势及现状分析. *地球信息科学学报*, 2017, 19(1): 50–58.
- [23] Liang S L, Zhao X, Yuan W, *et al.* A long-term global land surface satellite (GLASS) dataset for environmental studies. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6: 5–33.
- [24] Liang S L, Zhang X, Xiao Z, *et al.* Global Land Surface Satellite (GLASS) products: Algorithms, validation and analysis. Berlin: Springer, 2013.
- [25] Wang J B, Liu J Y, Shao Q Q, *et al.* Spatial-temporal patterns of net primary productivity for 1988–2004 based on Glopem-Cevsa model in the “Three-River Headwaters” region of Qinghai Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(2): 254–269.  
王军邦, 刘纪远, 邵全琴, 等. 基于遥感—过程耦合模型的1988–2004年青海三江源区净初级生产力模拟. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 254–269.
- [26] Xu X L, Liu J Y, Zhang S W, *et al.* China multi-period land use and land cover remote sensing monitoring dataset (CNLUCC). Data registration and publishing system of resource and environment science data center, Chinese Academy of Sciences (<http://www.resdc.cn/>), 2018, DOI: 10.12078/2018070201.  
徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC). 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/>), 2018, DOI: 10.12078/2018070201.
- [27] Dong Q M, Ma Y S, Xu C J, *et al.* Study of classification and gradation, restoration of black-soil beach degraded grassland in the Headwaters of Three Rivers. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(3): 441–447.  
董全民, 马玉寿, 许长军, 等. 三江源区黑土滩退化草地分类分级体系及分类恢复研究. *草地学报*, 2015, 23(3): 441–447.
- [28] Fan J W, Shao Q Q, Liu J Y, *et al.* Assessment of effects of climate change and grazing activity on grassland yield in the Three Rivers Headwaters Region of Qinghai–Tibet Plateau, China. *Environment Monitoring and Assessment*, 2010, 170(1/4): 571–584.
- [29] Wang C Y, Wang J B, Zhang F W, *et al.* Climate resource utilization rate and livestock-carrying capacity of grasslands in the Three River Headwaters region over the past 40 years. *Pratacultural Science*, 2022, 39(4): 672–687.  
王春雨, 王军邦, 张法伟, 等. 近40年三江源区高寒草地气候资源利用率及载畜量. *草业科学*, 2022, 39(4): 672–687.
- [30] Zhou X M. Chinese *Kobresia* meadow. Beijing: Science Press, 2001.  
周兴民. 中国嵩草草甸. 北京: 科学出版社, 2001.
- [31] Department of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Ministry of Agriculture of the People’s Republic of China, National General Station of Animal and Veterinary Service. Rangeland resources of China. Beijing: China Science and Technology Press, 1996.  
中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站. 中国草地资源. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [32] Xie C W, Qi S H. Analysis of runoff change and its response to weather fluctuation at source regions of the Yangtze and Yellow Rivers. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(2): 251–255.  
谢昌卫, 齐三红. 长江—黄河源寒区径流量波动变化的气候因素分析. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(2): 251–255.
- [33] Chen Q, Zhou Q, Zhang H F, *et al.* Spatial disparity of NDVI response in vegetation growing season to climate change in the Three-River Headwaters Region. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(6): 1284–1289.  
陈琼, 周强, 张海峰, 等. 三江源地区基于植被生长季的NDVI对气候因子响应的差异性研究. *生态环境学报*, 2010, 19(6): 1284–1289.
- [34] Liu S C, Shao Q Q, Ning J, *et al.* Remote-sensing-based assessment of the ecological restoration degree and restoration potential of ecosystems in the upper Yellow River over the past 20 years. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3550.
- [35] Zhao X Q, Zhou Q P, Ma Y S, *et al.* Innovation and application of grassland ecological restoration and sustainable management technologies in Sanjiangyuan District. *Qinghai Science and Technology*, 2017, 24(1): 13–19.  
赵新全, 周青平, 马玉寿, 等. 三江源区草地生态恢复及可持续管理技术创新和应用. *青海科技*, 2017, 24(1): 13–19.