

1988 - 2005 年三江源草地产草量变化动态分析

樊江文, 邵全琴*, 刘纪远, 王军邦, 陈卓奇, 钟华平, 徐新良, 刘荣高

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 三江源地区是我国长江、黄河、澜沧江的发源地, 分析该地区草地产草量的变化动态, 探讨导致草地生态系统变化的自然和人文驱动机制, 对于制定科学的草地恢复、管理和利用战略, 以及开展有效的生态工程成效评估具有重要意义。利用 GLOPEM 模型对三江源地区 1988 - 2005 年的草地产草量变化动态进行分析, 结果表明: 三江源地区草地产草量呈现出 3 - 5 年的周期性波动规律, 其产草量的年际变幅表现出从东部地区到西部地区依次增高; 从沼泽草地、高寒草甸、高寒草原到温性草原依次增高的特征。同时, 18 年来三江源地区草地产草量总体呈增加趋势, 特别以高寒草原或西部地区草地的提高幅度较大。尽管如此, 它仍受到气候变化的强烈驱动。因此, 应该对由于全球气候变化造成的生态系统牧草供给功能的短期增加保持清醒的认识, 这种增加有可能掩盖了气候变化对生态系统整体功能的长期负面影响。

关键词: 三江源, 草地产草量, 变化动态

中图分类号: S812.5

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2010)01-0005-06

Dynamic Changes of Grassland Yield in Three River Headwater Region from 1988 to 2005

FAN Jiang-wen, SHAO Quan-qin*, LIU Ji-yuan, WANG Jun-bang, CHEN Zhou-qi,

ZHONG Hua-ping, XU Xin-liang, LIU Rong-gao

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The Three River Headwater Region is the source of the Yangtze, Yellow, and Lantsang rivers. The objectives of this study were to analyze the dynamic changes of grassland productivity and explore the natural and human driven mechanisms causing the grassland ecosystem changes. Findings in this study would be applied to the development of scientific strategies and programs for grassland restoration, management, and utilization and assess the effectiveness of the ecological engineering project. Dynamic changes of grassland yield of the region from 1988 to 2005 were analyzed using the GLOPEM model. The results indicate that grassland productivity in the region fluctuated periodically with a 3 to 5 year cycle. The variation coefficient of annual productivity increased from the east to the west of the region and from marsh, alpine meadow, alpine steppe, to temperate steppe grasslands. In general, grassland yield in the region showed an increasing trend during the studied 18-year period, especially a remarkable increase in alpine steppe and grasslands in the west of the region. The analysis indicates that the increased grassland productivity during the 18 years was influenced by climatic change. These findings indicate that we should keep clear-headed understanding to the contingent increase of ecosystem supply function which probably covers up the long-term negative impact of climatic change on the holistic functions of ecosystem.

Key words: Three River Headwater Region; Grassland yield; Dynamic change

“三江源”是长江、黄河、澜沧江的发源地区, 素有“江河源”之称, 是中国江河中下游地区和东南亚国家生态环境安全和区域可持续发展的生态屏障, 同时也是中国生态系统最敏感和最脆弱的地区之一。目前该地区生态系统的保护以及在全球变化背

景下的生态系统变化为世界科学界所关注^[1]。草地生态系统是三江源地区的主体生态系统类型, 草地畜牧业是三江源地区的主导产业。牧草供给是三江源草地生态系统的重要供给功能之一, 是草地畜牧业生产的物质基础, 并通过草食家畜生产为人们提

收稿日期: 2009-07-14; 修回日期: 2009-11-06

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-06-03) 和国家科技支撑项目 (2006BAC08B00) 资助

作者简介: 樊江文 (1961-), 男, 甘肃陇西人, 研究员, 主要从事草地生态学研究, E-mail: fanjw@igsrr.ac.cn; * 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: shaoqq@reis.ac.cn

供直接福利。近几十年来,由于气候变化的影响,加之人类不合理地开发利用,如超载过牧、滥樵乱挖、滥采黄金等,造成源区草地退化严重^[2-4]。据统计,目前源区退化草场面积已占到可利用草场面积的 26% - 46%^[5-7],严重影响了该地区的生态环境和草地畜牧业的可持续发展,并对其他相关地区的生态安全造成严重威胁。基于此状况,国务院于 2005 年批准实施了“三江源自然保护区生态保护和建设工程”,投资 75 亿元,开展生态恢复和治理工作。在此背景下,分析该地区工程实施前草地生产力的变化动态,评估草地生态系统牧草供给功能的变化趋势,探讨导致草地生态系统变化的自然和人文驱动机制,对于该地区工程项目制定科学的草地恢复、管理和利用战略,并在今后进行工程成效的评估具有重要意义。

1 研究区域

三江源位于青海省的南部,区域面积 36.3 万 km²,占整个青海省总土地面积的 50.3%。其行政区域包括玛多、玛沁、达日、甘德、久治、班玛、称多、杂多、治多、曲玛莱、囊谦、玉树、兴海、同德、泽库、河南等 16 个县,以及格尔木市代管的唐古拉山乡。

三江源的草地主要包括高寒草甸、高寒草原、沼泽湿地以及面积较小的温性草原等植被类型^[8-11]。由于该地区地势由东南至西北逐渐抬升,同时受到来自南部孟加拉湾暖湿气流的影响,造成自东南向西北温度和降水量均逐渐降低,从而出现高寒草甸和高寒草原由东南向西北的过渡。高寒草甸一般发育于海拔 3500 - 4500 m 的地区,以嵩草 (*Kobresia* spp.) 等植物为优势种。高寒草原一般分布于海拔 4000 - 4500 m 的地区,以寒冷旱生的多年生密丛禾草和莎草,如紫花针茅 (*Stipa purpurea* Griseb.)、青藏苔草 (*Carex moorcroftii* Falc. ex Boott)、紫羊茅 (*Festuca rubra* L.)、羊茅 (*F. ovina* L.)、沙生蒿 (*Artemisia desertorum* Spreng.) 等占优势。温性草原主要分布于三江源区东北部河谷滩地以及黄河谷地,其优势植物有长芒草 (*Stipa bungeana* Trin.)、西北针茅 (*S. krylovii* Roshev.)、短花针茅 (*S. breviflora* Griseb.)、芨芨草 (*Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski)、蒿 (*Artemisia* spp.) 等。三江源地区的沼泽湿地主要有湖泊型湿地、河流型湿地和沼泽型湿地等 3 个基本类型。典型湿地优势植物有眼子菜 (*Potamogeton* spp.)、苔草 (*Carex* sp.)、水毛茛 (*Batrachium bungei* (Steud.)

L. Liou)、杉叶藻 (*Hippuris vulgaris* L.)、荸荠 (*Eleocharis* sp.)、水麦冬 (*Triglochin palustre* L.) 等。由于地理、气候等条件的制约,该地区的草地生态系统极其脆弱,利用不当极易遭受破坏而使其发生退化^[10]。

2 研究方法

2.1 草地产草量计算

1988 - 2005 年的草地产草量通过植被净初级生产力 (NPP) 计算 (由于可用于提取相关生态参数的遥感影像最早为 1988 年,所以本研究的研究时段为 1988 - 2005 年)。草地植被 NPP 的计算采用 GLO-PEM 模型,该模型是应用卫星遥感数据估计陆地净初级生产力和碳循环动态变化的生态系统模型,在国际上应用广泛。它建立在光能利用效率概念基础上,以遥感反演的植被光合有效辐射吸收率 (FPAR) 模拟植被吸收的光合有效辐射 (APAR),获得植被总初级生产力 (GPP); 以植被生物量、气温及不同植被群落的维持性呼吸系数及温度关系模拟植被维持性呼吸 (R_m) 和生长性呼吸 (R_g), 获得植被净第一性生产力 (NPP)^[12-15]。

模型所用主要数据包括基于卫星遥感的 FPAR 和气温及降水等气象数据。其中遥感数据是 1988 年以来 1 km 空间分辨率的 NOAA/AVHRR 的 NDVI, 该数据由中国气象局气象卫星中心提供, 本研究根据 NOAA 公布的最新校正方法和校正系数重新进行了辐射订正, 并采用手工几何校正的方式, 对该数据进行了精确的几何纠正。在此 NDVI 数据基础上, 采用 Liu 等开发的冠层辐射传输算法^[16], 反演获得用于模型输入的 FPAR。气象数据由中国气象局和青海省气象局提供, 在 13 个站点气象数据基础上, 利用 ANUSPLIN 空间插值, 获得了 1988 年以来气温、降水、相对湿度、风速、日照时数等空间插值数据作为模型输入。在此基础上, 通过 GLOPEM 模型模拟了 1988 年以来 1 km 空间分辨率三江源区草地植被 NPP。

由于 $NPP = ANPP + BNPP$ (其中 ANPP 为植被地上部分生产力, BNPP 为植被地下部分生产力), 因此可通过各类草地植被地下部分生产力和地上部分生产力的比值估算草地产草量:

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

其中 GY 为草地产草量。

BNPP 的计算采用了 Gill 等^[17] 提出的草地植被地下生产力计算方法:

$$BNPP = BGB * (live BGB / BGB) * turnover \quad (2)$$

$$Turnover = 0.0009 (g/m^2) * ANPP + 0.25 \quad (3)$$

其中 BGB 为草地植被地下部分(根系)生物量; live BGB/BGB 为活根系生物量占总根系生物量的比例; turnover 为草地植物根系周转值。

在本计算中, BGB 和 ANPP 分别采用 2003 - 2005 年在三江源地区实测的高寒草甸、高寒草原和温性草原等各类草地地下生物量和地上生产力的样方数据; Gill 等在 2002 年曾确定 live BGB/BGB = 0.6。在本研究采用周兴民等^[18]在青海地区测定的实测值 0.79。

各类草地分布和面积数据来源于 1:100 万比例尺的草地资源图^[19], 并对该图的相关地区进行了数字化处理。三江源区县级行政边界由青海省环境监测中心站提供。

各统计单元的草地产草量分别利用草地类型和县界数据, 采用 ArcInfo workstation 软件中的 ZonalSum 功能, 与三江源地区产草量数据进行叠加分析, 叠加操作后利用栅格数据的属性表, 提取不同单元的产草量。

为了分析和验证 GLO-PEM 模型模拟三江源地区草地生产力的有效性和准确性, 于 2004 年在三江源地区开展了野外调查, 设置了 31 个样地, 测定了产草量, 并与相同地点的模型模拟结果进行对比分析。结果显示, 两者之间具有较好的相关性 ($r^2 = 0.542$, $P < 0.01$), 表明模型模拟具有较好的准确性。

2.2 气候变化要素的分析和计算方法

选取将降水量和蒸发量综合考虑的桑斯威特 (Thorntwait) 湿润指数进行气候变化分析。降水量数据来源于三江源区域河南、达日、玛多、班玛、久治、玉树、清水河、治多、囊谦、曲麻莱、杂多、伍道梁、沱沱河等 13 个气象台站 1988 - 2004 年的观测数据。潜在蒸发散采用桑斯威特经验公式计算, 用于计算潜在蒸发散的气温数据也来源于上述气象站。桑斯威特湿润指数的具体计算方法详见参考文献 [20] 中的介绍。每年的湿润指数的空间数据利用 ANUSPLIN 空间插值获得, 最后通过线性回归方法计算了 1988 - 2005 年湿润指数的变化倾斜率, 用于分析多年来湿润指数在空间上的变化趋势。

3 结果与分析

3.1 产草量变化的基本特征

据测算, 三江源区草地 1988 - 2005 年平均产草量为 442.5 kg/hm^2 , 年均牧草供给总量约 974 万 t

(干草,下同), 各地区的牧草平均年供给总量因草地类型和分布的不同而有很大变化。草地生产力在空间特征上呈现东南 - 西北递减的趋势, 以河南、久治、班玛等东部县较高, 唐古拉、曲麻莱、治多等西部县(乡)较低, 其中河南县 18 年来(1988 - 2005)平均产草量达 930.7 kg 干草/hm^2 , 而唐古拉乡平均产草量仅为 183.4 kg 干草/hm^2 。

在时间序列上, 从 1988 - 2005 年的 18 年来三江源地区草地产草量呈现出 3 - 5 年周期的波动规律(产草量的年际变异系数 12.74%), 以 1989、1994、1998、2005 年出现峰值, 特别是 2005 年产草量最高(图 1)。此外, 经计算 18 年来产草量的回归倾向率为 $3.41 \text{ kg/hm}^2/\text{a}$, 表明三江源地区草地产草量总体上呈增加趋势。

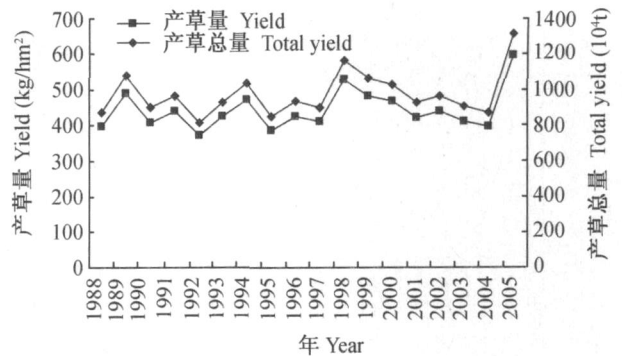


图 1 1988 - 2005 年三江源草地产草量的年度变化规律
Fig. 1 Yearly changes of grassland productivity of Three River Headwater Region from 1988 to 2005

在产草量变化的空间格局上, 1988 - 2005 年的 18 年间三江源地区草地呈现出西部或西北部产草量提高幅度大(以 18 年来产草量的变化斜率反映), 而东部或东南部产草量提高幅度小, 或有所下降的趋势(图 2)。

3.2 不同植被类型草地产草量动态变化

三江源区的草地类型主要有沼泽、高寒草甸、高寒草原和温性草原等几类, 其中沼泽类产草量最高, 其余依次为温性草原、高寒草甸、高寒草原(图 3)。这种规律反映了由水热条件所决定的植被地带性特征和生产力梯度。

从 1988 - 2005 年的 18 年里, 各类型草地的产草量均以 1989、1994、1998 和 2005 年的产草量较高。另外, 4 类草地 18 年来的年度波动变化幅度(年际变异系数)的顺序从大到小依次为温性草原、高寒草原、沼泽和高寒草甸, 可以看出较湿润的草地受年度间气温和降水变化增减变化不明显, 而较干旱的草地变化相对较大(图 3)。各类型草地产草量

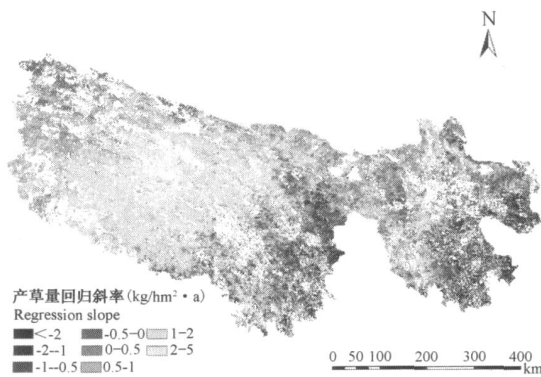


图2 1988—2005年18年间三江源草地
产草量斜率(增减趋势)的空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of the regression slope of
grassland productivity in the Three River
Headwater Region from 1988 to 2005

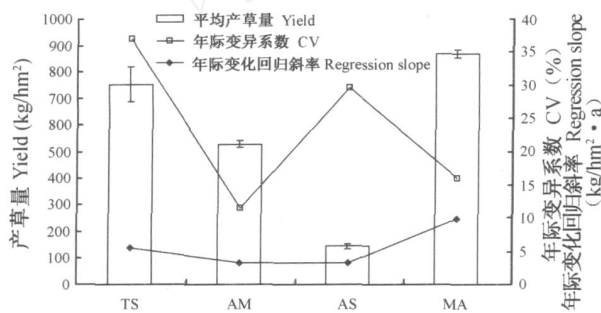


图3 三江源不同植被类型草地生产特征(TS 温性草原,
AM 高寒草甸, AS 高寒草原, MA 沼泽)

Fig. 3 Productivity characteristics of different grassland
vegetation types (TS: temperate steppe; AM: alpine
meadow; AS: alpine steppe; MA: marsh)

的回归趋势反映,18年来各类型草地的产草量在总体上均呈增加态势,其中沼泽类增加幅度最大;温性草原次之;高寒草甸和高寒草原较低(图3)。

3.3 不同地区草地产草量及其变化

三江源地区草地产草量的区域差异十分明显(表1)。从各县草地产草量和产草总量的年际变异性看,以唐古拉、曲麻莱、治多、玛多等县(乡)的变异系数较大(表1),说明这些地区(大都处于三江源西部)的草地供给易受到年度间气候变化的影响而发生波动,造成草地畜牧业生产的不稳定。另一方面,1988-2005年的18年来各县草地产草量的变化趋势反映,河南、久治、班玛等县的草地产草量有较明显的下降趋势,而唐古拉、曲麻莱、治多、杂多、玛多等县(乡)草地产草量有较明显的提高趋势(表1)。由此可见,草地产草量有增加趋势的县(乡)大都集中在西部地区,有下降趋势的县乡大都集中在东部地区。

表1 三江源各县草地产草量基本状况

Table 1 Grassland productivity of counties in
Three River Headwater Region

| 县 County | 产草量 Yield (kg/hm ²) | 标准差 SD | 年际变异 系数 CV (%) | 18年斜率 Regression slope over 18 years |
|--------------|---------------------------------------|-----------|----------------------|--|
| 同德 Tongde | 645.12 | 121.03 | 18.76 | 1.62 |
| 泽库 Zeku | 748.29 | 105.94 | 14.16 | 0.81 |
| 玛沁 Maqin | 606.78 | 80.53 | 13.27 | 2.30 |
| 兴海 Xinghai | 467.02 | 116.95 | 25.04 | 2.68 |
| 河南 Henan | 930.69 | 121.55 | 13.06 | -2.62 |
| 甘德 Gande | 764.67 | 86.47 | 11.31 | -0.72 |
| 久治 Jiuzhi | 886.85 | 98.85 | 11.15 | -2.59 |
| 班玛 Banma | 824.94 | 102.61 | 12.44 | -2.56 |
| 达日 Dari | 641.47 | 72.66 | 11.33 | 1.95 |
| 玛多 Maduo | 321.97 | 74.15 | 23.03 | 2.55 |
| 曲麻莱 Qumalai | 236.46 | 64.92 | 27.45 | 4.86 |
| 称多 Chenduo | 545.13 | 65.31 | 11.98 | -0.51 |
| 玉树 Yushu | 733.87 | 76.00 | 10.36 | -0.32 |
| 囊谦 Nangqian | 774.84 | 88.46 | 11.42 | 2.03 |
| 杂多 Zaduo | 533.06 | 83.75 | 15.71 | 5.55 |
| 治多 Zhiduo | 242.49 | 60.93 | 25.13 | 5.69 |
| 唐古拉 Tanggula | 183.43 | 52.57 | 28.66 | 6.68 |

4 讨论与结论

研究表明,三江源地区的草地生产力在空间上呈现出明显的东南-西北递减的趋势,这种产草量空间不平衡的现象反映了三江源地区由水热条件所决定的植被地带性格局和生产力梯度,是三江源地区草地牧草生产和供给的重要特征。因此,三江源地区的草地畜牧业生产应以此为基础和依据,进行统筹规划、合理布局、科学生产。

在时间序列上,三江源地区草地产草量呈现出3-5年的周期性波动规律(图1),草地的这种年际波动现象,明显制约了该地区牧草的稳定生产和供应,造成草地畜牧业生产的周期性起伏,在产草量欠年将加大草地的载畜压力,可能造成草地退化。根据这一规律,建议在核定草地载畜量时,应遵循系统论中“最小限制因子法则”,以产草量低产年份的牧草量核定家畜载畜量,或在低生产年份及时调整家畜饲养量,保障草地生态系统的良性循环。

在草地产草量年际变异性上,表现出从东部地区到西部地区依次增高(表1);从沼泽草地、高寒草甸、高寒草原到温性草原依次增高的特征(图3)。这反映出较脆弱草地的生产力受年际间气候变化的影响相对较大,更容易受年际间气候变化的影响而发生牧草供给矛盾,并导致草地退化。对于植被生产力的年际变异性,由于一直存在长期观测数据缺乏的问题^[21],目前仅有少数报道。但大部分研究认为随着

干旱的加剧,植被生产力的年际变异性逐渐增强,即越是在干旱的地区,不但植被的生产力越低,其年际变异性也越强^[22-24]。其原因可能是,降水的年际变异性对于生产力的年际变异性具有决定性作用^[22,25-27],而在较干旱地区,生长季降水的频率可能具有更大的年际变异性^[24]。另外,在物种较丰富的群落中,不同物种有着不同的水分利用策略,因此,无论是在降水充裕的年份还是在降水短缺的年份,总会有物种有着较高的生产力,即这些物种间存在着补偿效应,从而使整个群落的生产力能够保持相对稳定^[24,28,29],而在干旱的地区,生态系统物种组成单一,群落生产力则最容易受降水影响^[29]。根据干旱地区草地生产力年际变异大的特点,建议特别重视这些草地的合理利用和休闲封育,以避免这部分草地在产草量低产年份因牧草供给矛盾突出而发生急剧退化。另一方面,多数模型预测结果显示,在全球气候变化背景下,未来降水的年际变异性将增强,极端干旱事件的频率增加^[30],这对于畜牧业的持续发展有很大的负面影响,需要科学利用和管理好现有的草地生态系统,维持其生物多样性和生产力的稳定性^[28]。

在草地产草量的多年变化趋势上,三江源地区草地产草量总体上呈略增加的趋势(图 1),其中,在植被类型上以温性草原和沼泽类的提高幅度较大(图 3);在地区上以西部地区县(乡)草地的提高幅度较大(表 1)。发生这种现象的原因除与该地区草地的自然特性有关外,还与气候变化,特别是与湿润指数的增减格局是一致的。研究表明,近 30 年(1975 - 2004)来,原来较湿润的东部地区具有暖干化的趋势,而干旱的西部地区出现暖湿化的现象(图 4),这显然是导致西部地区及西部较干旱的草地植被类型产草量提高的重要因素。因此,18 年来三江源地区草地产草量呈增加趋势,特别是西部地区产草量呈较明显的增加趋势受到气候变化的强烈驱动,人为恢复的贡献十分有限,不能盲目乐观。另外,在 2005 年,西部等较脆弱草地的产草量提高幅度较大。这表明,脆弱草地对环境条件的变化更敏感,受水热变化的影响更大。因此,建议应该特别注重利用类似 2005 年这样的好年景,利用自然赋予的好的水热条件,抓住时机,进行草地的恢复和治理工作。

以往的研究资料表明,三江源地区草地发生了广泛的退化现象^[6,7,10,31-37],但就本研究的草地产草量而言,近 18 年来三江源地区的草地产草量并没有发生明显下降。其原因是多方面的:其一,三江源地区草地的载畜量在 70 年代达到最高,之后随着减压减负政策的落实,其草地载畜压力逐渐降低(图 4),这有

助于草地生产力的提高。遥感解译结果也证实^[38],三江源草地退化主要发生在 70 年代前后,90 年代以后并没有出现急剧加速退化的现象。尽管如此,由于草地退化的基本格局在早期已经形成,且一直持续至今,目前载畜压力的减小不可能在短期内彻底扭转草地退化的状况,草地退化可能仍将持续较长的一个时期;其二,近几十年发生的气候变化,对三江源一部分草地产草量的提高起到了相对积极的作用(图 5);其三,由于三江源草地生态系统生境的变化,大面积原来以高草和小型莎草或禾草为建群种的草地,被大量低劣高大的杂草和毒草侵入而产生退化,使草地组成结构发生重大变化,草地质量严重降低,但部分中度退化草地的生产力并没有下降,有些甚至有所提高^[34,35,39]。因此,该地区的草地植物多样性的变化和草地植被组成结构变化现象应引起广泛关注。

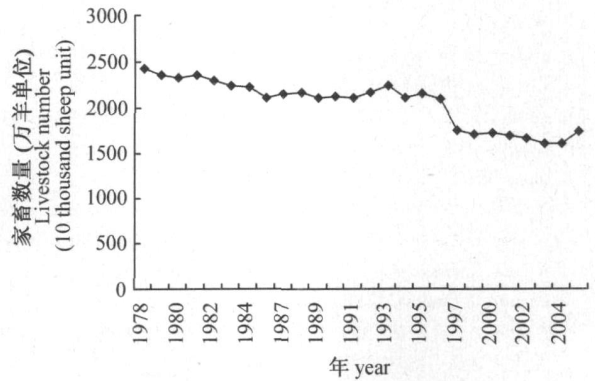


图 4 1978—2005 年三江源草食家畜饲养规模
Fig. 4 Changes of livestock number in Three River Headwater Region from 1978 to 2005

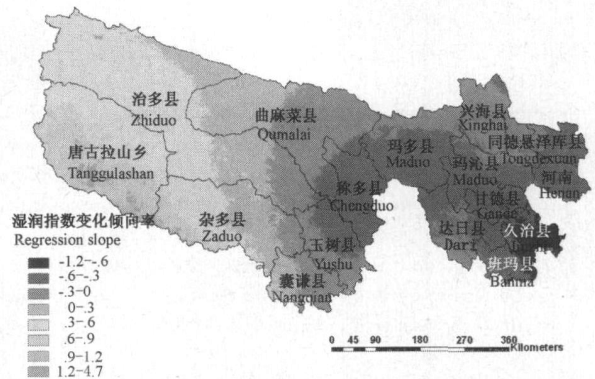


图 5 1975—2004 年三江源湿润指数斜率的空间变化特征
Fig. 5 Spatial variation of the regression slope of humid index for different areas in Three River Headwater Region from 1975 to 2004

三江源地区草地的牧草供给以及由此支持的草食家畜生产是该地区草地生态系统为人类提供福利的重要供给功能之一。尽管 18 年来该地区的草地生产力

有增加趋势,但鉴于目前草地超载态势仍在持续,草地退化极为严重的状况不能片面追求对草地生态系统牧草供给功能的利用,以便保护草地生态系统其它服务功能(特别是水源调节功能)的正常发挥。另外对由于全球气候变化造成的生态系统牧草供给功能的短期增加应保持清醒的认识,这种增加有可能掩盖了气候变化对生态系统整体功能的长期负面影响,如冰川融化、生物多样性变化等。

参考文献

- [1] 黄铁青, 赵涛, 冯仁国, 等. 中国科学院西部行动计划(二期)项目布局与初步进展[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 888-895
- [2] 郑度, 林振耀, 张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展[J]. 地学前缘, 2002, 9(1): 95-102
- [3] Feng J M, Wang T, Xie C W. Eco-environmental degradation in the source region of the yellow river, northeast Qinghai-Zizang plateau [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 122: 125-143
- [4] Wang G X, Cheng G D. Eco-environmental changes and causative analysis in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers, China [J]. The Environmentalist, 2000, 20: 221-232
- [5] Chen J, Hu Z Y, Dou S, et al. Yir Yang Slope problem along Qinghai-Tibetan Lines and its radiation mechanism[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 44: 217-224
- [6] Yang J P, Ding Y J, Chen R S. Spatial and temporal of variations of alpine vegetation cover in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers of the Tibetan Plateau from 1982 to 2001 [J]. Environmental Geology, 2006, 50: 313-322
- [7] 刘晓玲. 三江源自然保护区“黑土滩”退化草地调查[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2007, (1): 93-96
- [8] 青海省植被编写委员会. 青海省植被[M]. 西宁: 青海人民出版社, 1994. 67-94
- [9] 青海省草原总站编. 青海草地资源[M]. 西宁: 青海人民出版社, 1988
- [10] 王堃、洪绂增、宗锦耀. 三江源地区的草地资源现状及持续利用途径[J]. 草地学报, 2005, 13(增刊): 28-31
- [11] 陈桂琛, 卢学峰, 彭敏, 等. 青海省三江源区生态系统基本特征及其保护[J]. 青海科技, 2003, (4): 14-17
- [12] Prince S D, Goward S N. Global primary production: a remote sensing approach [J]. Journal of Biogeography, 1995, 22: 815-835
- [13] Goetz S J, Prince S D, Goward S N, et al. Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach [J]. Ecological Modelling, 1999, 122: 235-239
- [14] Goetz S J, Prince S D, Small J, et al. Interannual variability of global terrestrial primary production: results of a model driven with satellite observations [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105: 20077-20091
- [15] Cao M, Prince S D. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981-2000 [J]. Ecosystems, 2004, 7: 233-242
- [16] Liu R, Chen J M, Liu J, et al. Application of a new leaf area index algorithm to China's landmass using MODIS data for carbon cycle research [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(3): 649-658
- [17] Gill R A, Kelly R H, Parton W J, et al. Using simple environmental variables to estimate below-ground productivity in grasslands [J]. Global Ecology and Biogeography, 2002, 11: 79-86
- [18] 周兴民著. 中国高草草甸[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 158
- [19] 1 100 万中国草地资源图编制委员会. 1 100 万中国草地资源图集. 北京: 中国地图出版社, 1993
- [20] 胡自治主编. 草原分类学概论[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997. 231-233
- [21] Knapp A K, Smith M D. Variation among biomass in temporal dynamics of aboveground primary production [J]. Science, 2001, 291: 481-484
- [22] Fang J Y, Piao S L, Tang Z Y, et al. Interannual variability in net primary production and precipitation [J]. Science, 2001, 293(5536): 1723
- [23] Huxman T E, Smith M D, Fay P A, et al. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency [J]. Nature, 2004, 429: 651-654
- [24] Hu Z M, Fan J W, Zhong H P, et al. Spatiotemporal dynamics of aboveground primary productivity along a precipitation gradient in Chinese temperate grassland [J]. Science in Chinese Series D: Earth Sciences, 2007, 50(5): 754-764
- [25] Hou H N, Bingham R L, Skerbek W. Relationship between the variability of production and the variability of annual precipitation in world arid lands [J]. Journal of Arid Environments, 1988, 15: 1-18
- [26] Paruelo J M, Lauenroth W K, Burke I C, et al. Grassland precipitation-use efficiency varies across a resource gradient [J]. Ecosystems, 1999, 2: 64-68
- [27] Lauenroth W K, Sala O E. Long-term forage production of North American shortgrass steppe [J]. Ecological Application, 1992, 2: 397-403
- [28] Bai Y, Han X, Wu J, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland [J]. Nature, 2004, 431(9): 181-184
- [29] Connor T G, Haines L M, Snyman H A. Influence of precipitation and species composition on biomass of a semi-arid, African grassland [J]. Journal of Ecology, 2001, 89: 850-860
- [30] IPCC. Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2001
- [31] 董全民, 赵新全, 马玉寿. 江河源区高寒草地畜牧业现状及可持续发展策略[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(4): 438-442
- [32] 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[J]. 中国科学院院刊, 2005, 20(6): 471-476
- [33] 王启基, 来德珍, 景增春, 等. 三江源区资源与生态环境现状及可持续发展[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2005, 41(4): 50-55
- [34] 王根绪, 程国栋. 江河源区的草地资源特征与草地生态变化[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 101-107
- [35] 刘伟, 王启基, 王溪, 等. 高寒草甸“黑土型”退化草地的成因及生态过程[J]. 草地学报, 1999, 7(4): 300-307
- [36] Zhou H. K, Zhao X Q, Tang Y H, Zhou L. Alpine grassland degradation and its control in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers, China [J]. Grassland Science, 2005, 51: 191-203
- [37] 景晖, 徐建龙. 中清以来人类经济活动对三江源区生态环境的影响[J]. 攀登, 2005, 24(3): 87-92
- [38] 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[J]. 地理学报, 2008, 63(4): 364-376
- [39] 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[J]. 草业学报, 2005, 14(3): 31-40

(责任编辑 才杰)