

DOI: 10.5846/stxb202102030361

王立景,肖燧,孔令桥,吴炳方,欧阳志云.青藏高原草地承载力空间演变特征及其预警.生态学报,2022,42(16):6684-6694.

Wang L J, Xiao Y, Kong L Q, Wu B F, Ouyang Z Y. Spatiotemporal patterns and early-warning of grassland carrying capacity in the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6684-6694.

青藏高原草地承载力空间演变特征及其预警

王立景^{1,2}, 肖 燧¹, 孔令桥¹, 吴炳方³, 欧阳志云^{1,*}

1 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

2 中国科学院大学,北京 100049

3 中国科学院空天信息研究院,北京 100094

摘要:为研究青藏高原草地承载力的空间演变特征并对其进行预警,以已有的青藏高原净初级生产力数据为基础,核算了该地区的草地理论载畜量及演变趋势,并结合县域实际存栏量,划定了草地承载力的预警等级。结果表明:(1)青藏高原草地承载力整体呈东高西低的格局,其中高寒草原和高寒草甸是该地区草地承载力的主要组成部分;(2)2000—2015年,青藏高原理论载畜量由8614.89万羊单位增至9451.53万羊单位;(3)青藏高原整体处于超载状态,2000—2010年超载状况加剧,至2015年超载状况稍有缓解,草畜平衡指数由67.88%增至79.90%,再降至67.91%。目前亟需优先控制72个红色预警县(超载状态正在加剧)的牲畜存栏量,避免超载状况进一步恶化。未来需要通过控制牲畜存栏量、调整畜牧区发展布局和提高草地生产力等多项措施的结合来改善青藏高原地区的草地承载状况,维持草地生态系统的可持续发展。

关键词:草地生态系统;承载力;预警;青藏高原

Spatiotemporal patterns and early-warning of grassland carrying capacity in the Qinghai-Tibet Plateau

WANG Lijing^{1,2}, XIAO Yi¹, KONG Lingqiao¹, WU Bingfang³, OUYANG Zhiyun^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

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

3 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: Grassland ecosystem carrying capacity (GCC) is directly related to herdsman's livelihood, and the implementation of ecosystem conservation and restoration programs. It is particularly concerned widely in the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) due to its unique location conditions and important ecosystem services. To investigate the spatiotemporal patterns and early-warning of GCC in the QTP, we calculated the theoretical livestock carrying capacity, and defined the early-warning level of GCC based on the net primary productivity (NPP) in the QTP and livestock inventory in 236 counties from 2000 to 2015. The results showed as follows: (1) the GCC in the east was higher than that in the west in the QTP. The theoretical livestock carrying capacity of alpine grassland and alpine meadow accounted for 64.99% of the total, and they were the main components of theoretical livestock carrying capacity. (2) The theoretical livestock carrying capacity increased from 86.15 million sheep units (SU) to 91.18 million SU from 2000 to 2010, and then increased to 94.52 million SU from 2010 to 2015. The theoretical livestock carrying capacity increased by 9.71% in the past 15 years. And the theoretical livestock carrying capacity in the northeast increased the most, but the theoretical livestock carrying capacity in the west was basically stable in the QTP. (3) The GCC had always been overgrazed in the QTP. The livestock inventory

基金项目:第二次青藏高原科学考察研究“生态脆弱性与生态安全”专题(2019QZKK0308)

收稿日期:2021-02-03; 网络出版日期:2022-03-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

increased from 144.90 million SU to 163.85 million SU from 2000 to 2010, and then decreased to 158.46 million SU from 2010 to 2015. The livestock inventory increased by 9.36% in the past 15 years. The Balance of Grassland and Livestock Index (BGLI) increased from 67.88% to 79.90% before 2010, and then slightly eased in 2015 (67.91%). The spatial pattern of GCC was consistent with the early-warning pattern. The numbers of green no early-warning zone, blue early-warning zone, yellow early-warning zone, orange early-warning zone and red early-warning zone were 32, 9, 4, 119 and 72, respectively. The green no early-warning zone was located in the west and north, meanwhile, they were always the pastoral and semipastoral areas in the QTP. At present, we should give priority to control the livestock in the red early-warning area since they were overgrazed and their BGLI were still increasing. In the future, it is necessary to improve the GCC and maintain the sustainable development of grassland ecosystem by controlling the livestock inventory, adjusting the development pattern of animal husbandry and enhancing grassland productivity in the QTP.

Key Words: grassland ecosystem; carrying capacity; early-warning; Qinghai-Tibet Plateau

草地生态系统是中国面积最大的陆地生态系统类型,占国土面积的 29.98%,也是中国重要的生态安全屏障区,在土壤保持、防风固沙和水源涵养的方面发挥着重要作用^[1]。草地也是我国北方、西北和青藏高原等地区畜牧业发展的基础,是当地居民生产生活的重要资源。由于社会历史的原因,草地生态系统遭到掠夺式开发,造成草地退化,草地载畜量下降,居民承受巨大的经济损失^[2]。因此充分了解各地区草地生态系统的承载状况及演变趋势,对于我国现阶段及未来的草地生态系统恢复和科学规划畜牧业发展格局具有重要意义。

青藏高原是我国重要牧区之一,全国 264 个牧区与半牧区县中有 133 个位于该地区^[3]。同时,该地区作为我国“两屏三带”生态系统格局的重要组成部分^[4],对于区域和国家的生态安全战略具有重要意义。草地生态系统也是青藏高原主要的生态系统类型,对青藏高原草地承载力展开研究,可充分了解青藏高原畜牧业的发展状况及潜力,并对该地区的草畜平衡、草地生态系统保护和区域乃至国家的生态安全提供必要支撑^[2]。

草地承载力是指区域的草地资源在可持续发展的前提下,所能承载的最大牲畜数量,是草地牧业发展的重要指标,对区域草地的开发与保护具有重要意义,具体表现为草地的理论载畜量等^[5]。测算产草量是计算草地承载力的基础。草地承载力的研究需要通过草地产草量间接计算牲畜承载量。产草量的计算方法包括实测产量法^[6]、模型评估法^[7-8]和遥感评估法。其中,实测产量法的结果准确,适用于局部地区的研究使用,现有研究多将其用于验证其他两种方法^[9-10]。模型评估法包括气候模型和过程模型,适用于定性评价大尺度区域的产草量地带性分布规律或已有长期试验站区域的研究^[11];遥感评估法包括 NDVI 法^[12-13]和 NPP 法^[5, 14-15],两种方法均适用于大尺度范围的研究^[16-17],其中 NPP 法是利用改进的 CASA 模型计算产草量,该模型考虑了光能利用率,机理性较强,适用于缺乏大量实测数据的地区^[5, 18]。

目前针对青藏高原草地承载力的研究多以局部地区为主^[19-27],如曹娟等^[25]发现在草畜平衡政策实施之前的青海刚察县处于超载状态,政策实施后则处于草畜平衡状态;Zhang 等^[26]发现,三江源东部和南部县虽然承载力较强,但牲畜存栏量过高,这些地区仍处于超载状态;赵卫等^[27]发现,西藏地区整体处于超载状态,且未超载县的草地承载力盈余越来越少。为充分了解青藏高原全域草地承载力的空间变化特征并对其进行预警,根据青藏高原独特的地理条件,且缺乏大范围实测数据的情况,本文选择 NPP 法展开研究。

本文以多年 NPP 数据为基础,以青藏高原全域为研究区域,选取理论载畜量和草畜平衡指数,展开草地承载力评价,主要为了(1)分析青藏高原 2000—2015 年间草地生产力空间格局及其变化特征,(2)结合牲畜存栏量分析县域草地承载状况,并对其进行预警,旨在为青藏高原草地保护的优先级划分,为畜牧业的发展规划等提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

青藏高原位于亚洲内陆,是地球上最独特的地质-地理-生态单元,是中国面积最大,世界海拔最高的高原,平均海拔 4000 m 以上,被称为“世界屋脊”^[28],位置介于 26°00′—39°47′N,73°19′—104°47′E 之间,总面积约 278.68 万 km²。草地生态系统总面积 158.82 万 km²,占青藏高原总面积的 56.99%,是该地区主要的生态系统类型(图 1)。青藏高原内的县级行政区有 244 个,除新疆边界的 8 个不完全县外,共有完整县级行政区 236 个。

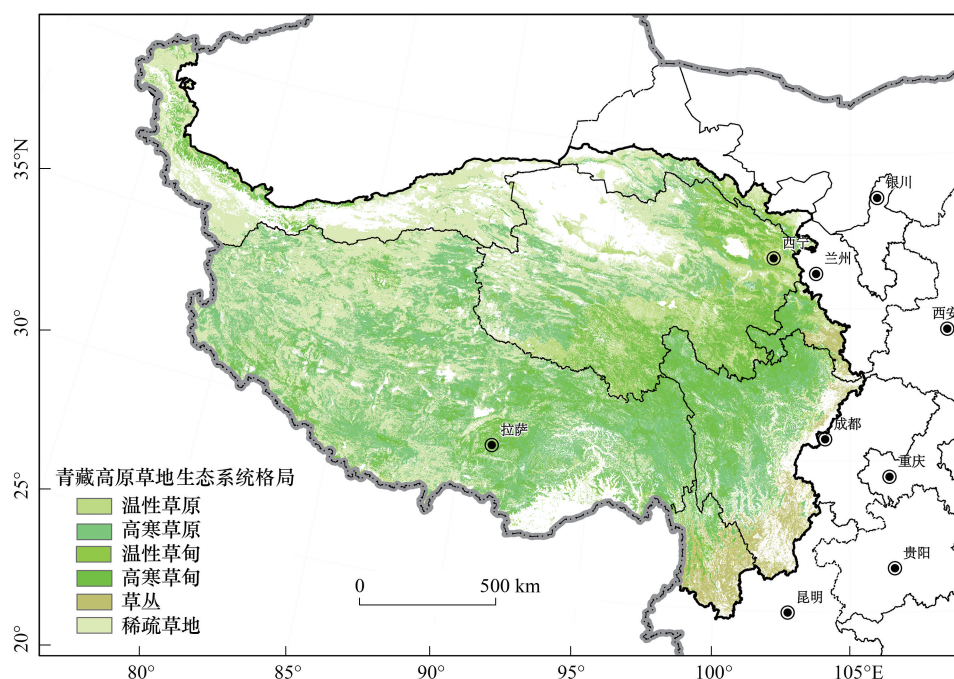


图 1 青藏高原草地生态系统格局示意图

Fig.1 Spatial distribution of grassland ecosystems in Qinghai Tibet Plateau

1.2 研究方法

在已有计算方法的基础上^[5],本研究进一步将计算公式进行提炼,方法如下:

(1) 理论载畜量:

$$CA = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (G_{ij} \times C_{ij})}{UG \times D} \quad (1)$$

式中, CA 为理论载畜量(羊单位); G_{ij} 为行政区 i 第 j 类草地的全年干草总量(kg); C_{ij} 为行政区 i 范围内牲畜对第 j 种草地所产牧草的利用率^[29]; UG 为每个羊单位每天需要的干草量(kg/d),数值为 1.8; D 为一年的天数,数值为 365。

(2) 全年标准干草产量

$$G_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{NPP_{ij} \times A_{ij}}{1000 \times S_{ij} (1 + SG_{ij})} \quad (2)$$

式中, NPP_{ij} 为行政区域 i 范围内第 j 种草地年总 NPP(kg); A_{ij} 为行政区域 i 范围内第 j 种草地总面积(km²); S_{ij} 为行政区域 i 范围内第 j 种草地的生物量到 NPP 的转换系数^[30]; SG_{ij} 为行政区域 i 范围内第 j 种草地地下

部分和地上部分生物量比例系数^[31]。

(3)产草量模型测算精度分析

选取已发表论文中与研究时间相近的青藏高原地区产草量数据,与本文进行对比,结果见表 1。本研究结果均在相应实测值的误差范围内,表明研究方法适用于本研究区。

表 1 本研究与已有结果对比
Table 1 Compared with the existing results

文献 References	地点 Sites	方法 Methods	时间 Time	结果 Result/(g/m ²)	本研究 This study/(g/m ²)
孙鹏飞等 ^[32]	称多县歇武镇	实测法	2014.8	89.43±28.5	103.00
党世彬等 ^[33]	达孜县曲尼帕	实测法	2017.7	84.34+13.84	79.92
赵禹臣等 ^[34]	那曲县和当雄县	实测法	2010.7	42	47.83
曹娟等 ^[25]	刚察县	NDVI+实测法	2010.7	116.59	109.12

(4)草畜平衡指数^[35]

$$BGLI = \frac{A - CA}{CA} \times 100\% \tag{3}$$

BGLI 是草畜平衡指数,A 为牲畜存栏量,CA 为理论载畜量。

当 BGLI≤10%,表示不超载;当 10%<BGLI≤15%时,表示临界超载;当 BGLI>15%时,表示超载。BGLI 越高,表示超载情况越严重。

(5)草畜平衡预警

在草畜平衡指数分级的基础上,以各县 2000—2010 年、2010—2015 年两个时间段的平衡指数变化为依据,分为持续改善型、波动改善型、波动恶化型和持续恶化型,再将承载状况进行预警等级划分,未超载状态下的持续改善型和波动改善型分为绿色无警区,波动恶化型和持续恶化型分为蓝色预警区;临界超载状态下的持续改善型和波动改善型分为黄色预警区,波动恶化型分为橙色预警区,持续恶化型分为红色预警区;超载状态下的持续改善型和波动改善型分为橙色预警区,波动恶化型和持续恶化型分为红色预警区,具体方法见表 2。

表 2 预警等级划分
Table 2 Early-warning classification

	持续改善型 Continuous decreasing type	波动改善型 Wave decreasing type	波动恶化型 Wave increasing type	持续恶化型 Continuous increasing type
超载 Overgrazed	橙色预警区	橙色预警区	红色预警区	红色预警区
临界超载 Critical overgrazed	黄色预警区	黄色预警区	橙色预警区	红色预警区
未超载 Not overgrazed	绿色无警区	绿色无警区	蓝色预警区	蓝色预警区

1.3 数据来源

(1)净初级生产力数据:来源于中国科学院空天信息创新研究^[36],数据基于 CASA 模型生产,为空间栅格数据,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为月。

(2)生态系统格局数据:来源中国生态系统评估与生态安全数据库(<http://www.ecosystem.csdb.cn>),空间分辨率 90 m。

(3)牲畜存栏量数据:来源于青海^[37]、西藏^[38]、新疆^[39]、甘肃^[40]、四川^[41]、云南统计年鉴^[42]和中国县域统计年鉴^[43],数据以县为单位。

2 结果与分析

2.1 青藏高原草地理论载畜量空间格局及变化趋势

草地生产力的评价指标有:干草产量和理论载畜量等^[5],本文以理论载畜量作为草地生产力的代表性指标。

青藏高原理论载畜量整体呈现东高西低格局(图2)。2015年总产草量达到11393.32万吨,相应的总理论载畜量为9451.53万羊单位,草地单位面积载畜量为59.51羊单位/km²。高寒草原和高寒草甸是青藏高原草地承载力的主要组成部分,其理论载畜量占全区的64.99%,分别为3429.08万羊单位和2713.12万羊单位;温性草原和温性草甸理论载畜量有1467.08万羊单位,占全区干草总产量的15.52%(图3),其单位面积理论载畜量高于高寒草原和高寒草甸(图4)。

与2000年相比,2010和2015年的草地生产力均呈增长趋势,总理论载畜量由8614.89万羊单位上升到9117.54万和9451.53万羊单位,增长区域以青藏高原东北部和中东部为主,下降区域以青藏高原中南部地区为主(图2)。干草总产量由2000年的10403.42万吨到2015年的11393.32万吨。

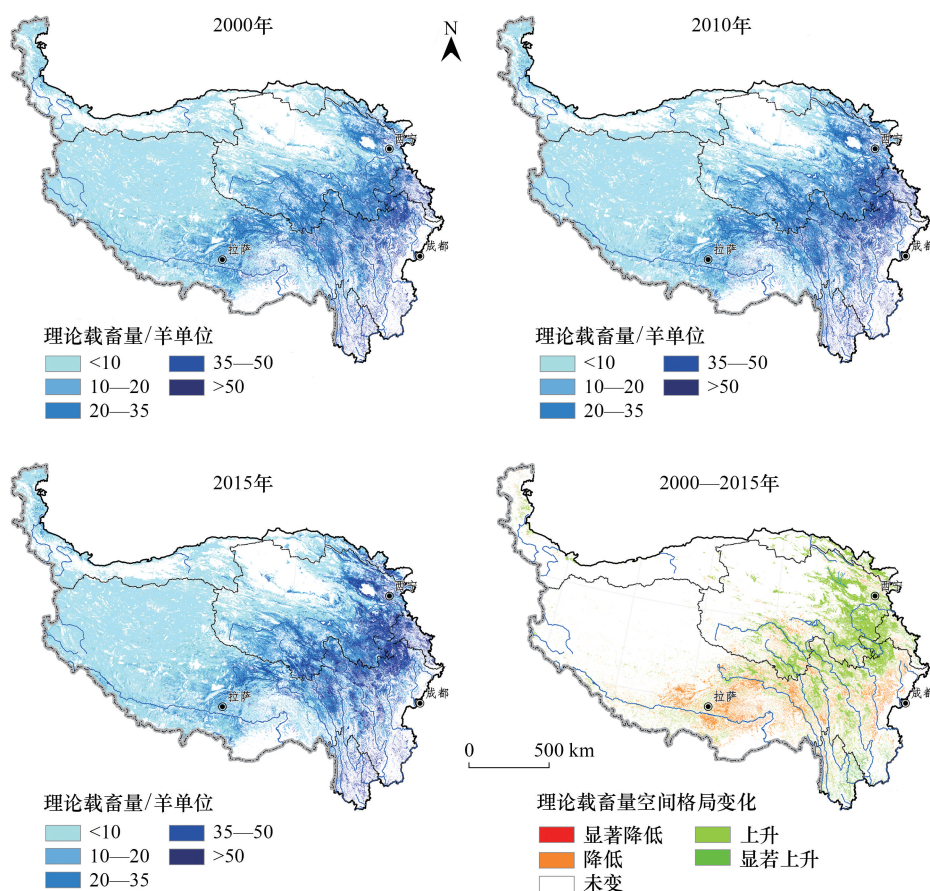


图2 2000—2015年青藏高原理论载畜量空间分布及变化

Fig.2 The spatial distribution and change of the theoretical carrying capacity from 2000 to 2015

2.2 青藏高原牲畜存栏量及变化趋势

2015年青藏高原牲畜存栏量合计15846.99万羊单位,存栏量密度(牲畜存栏量与草地面积的比值)为99.78羊单位/km²。有46个县(19.49%)超过100万羊单位,主要是传统的牧区与半牧区县,分布在青藏高原中东部及西部诸县;有53县(22.46%)低于25万羊单位,分布在青藏高原边缘诸县(图5)。

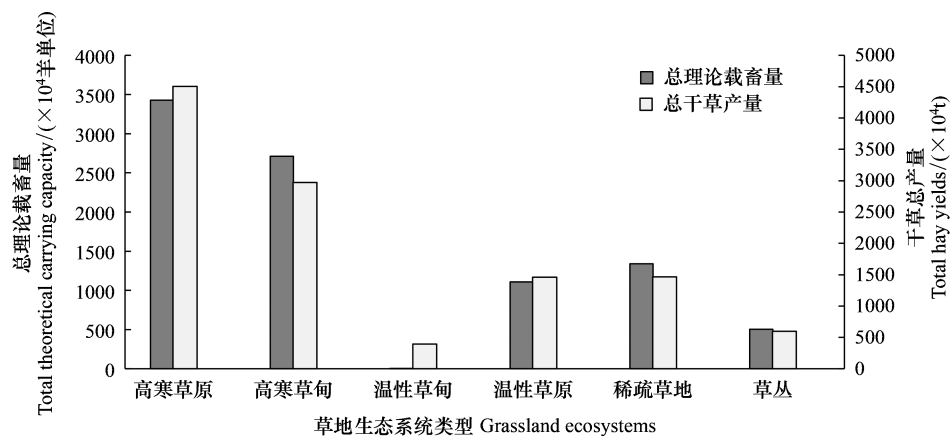


图3 2015年青藏高原各草地类型总理论载畜量和干草总产量

Fig.3 Total theoretical carrying capacity and hay yields of different grassland types in 2015

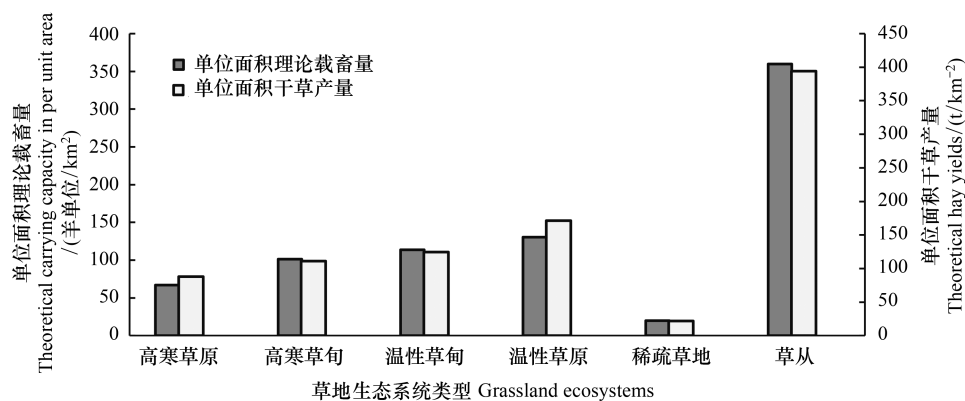


图4 2015年青藏高原各草地类型单位面积理论载畜量与单位面积产草量

Fig.4 Theoretical carrying capacity and hay yields of different grassland types in per unit area in 2015

与2000年相比,2010和2015年牲畜存栏量呈先升后降的趋势(图6),由14490.52万羊单位增至16385.26万羊单位,再降至15846.99万羊单位,增长区域为青藏高原中北部、北部边缘和东南部边缘诸县(图5),下降区域为中东部和西南部诸县。

2.3 青藏高原草畜平衡指数及变化趋势

2015年青藏高原整体的草畜平衡指数为67.91%,处于超载状态。2000和2010年草畜平衡指数也一直处于超载状态(图7),草畜平衡指数由67.88%增至79.90%,再降至67.91%。2010年的超载情况最为严重,主要原因是2000—2010年的牲畜存栏量增长过快(13.08%),而理论载畜量仅增长了5.83%,至2015年草畜平衡指数有所下降,主要是因为牲畜存栏量下降(-3.28%)以及同期草地承载力上升(3.66%)。

2015年超载的县有191个(80.93%),超载县集中分布在青藏高原东部和中南部诸县。与2000相比,2010和2015年超载的县数量呈先稳定后降低的趋势,由前两个年份的196个下降至191个(图8)。2000—2010年和2010—2015年两个时间段中,草畜平衡指数均增大的县有43个(18.22%),集中在青藏高原中南部(以西藏为主);草畜平衡指数均减小的县有42个(17.80%),集中在青藏高原东部(图7)。超载县在牧区与半牧区中有98个,与其他县相近(表3)。

2015年仅有41个县未超载(16.39%),分布在北部、西部和南部部分县。与2000相比,2010和2015年超载的县数量呈先减后增的趋势,从39个减至34个,再增至41个。未超载的县主要以牧区与半牧区县为主,

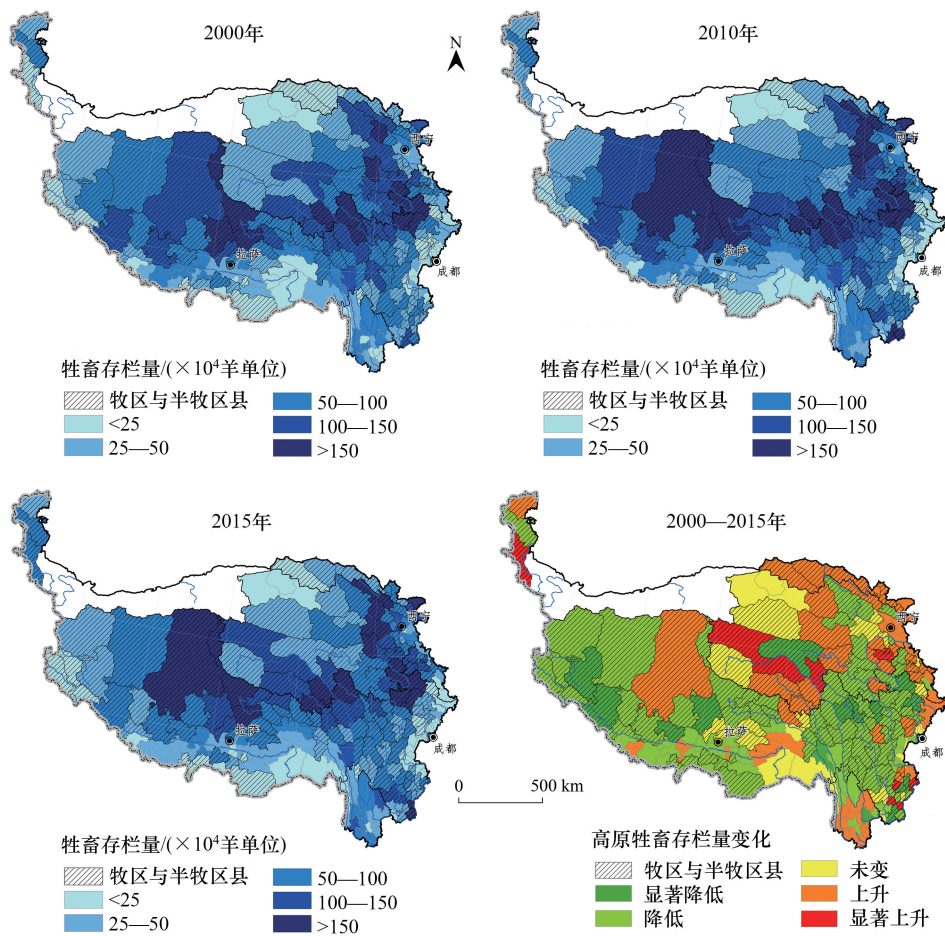


图 5 2000—2015 年牲畜存栏量及变化

Fig.5 The spatial distribution and change of livestock inventory in county from 2000 to 2015

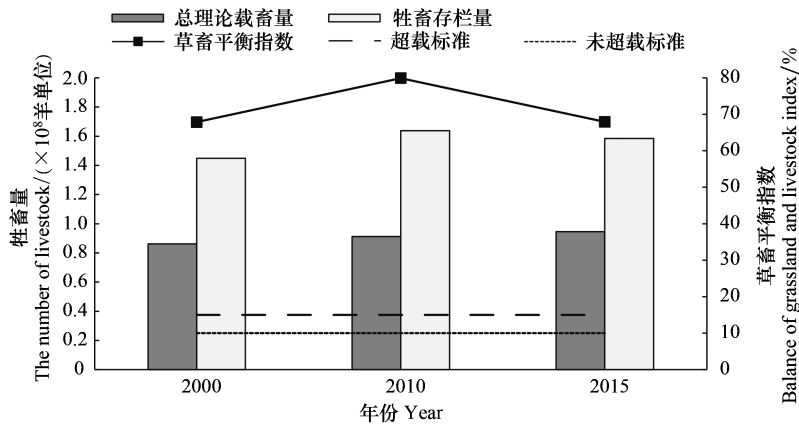


图 6 2000—2015 年草畜平衡指数 (BGLI)

Fig.6 The balance of grassland and livestock index (BGLI) from 2000—2015

其他县的比重较低(表 3)。

2.4 青藏高原草地承载力预警

青藏高原草畜平衡指数预警结果如图所示(图 9)。与表 1 对比发现,实际的预警结果中,临界超载状态

只包括黄色预警区,橙色和红色预警区均属于超载状态。

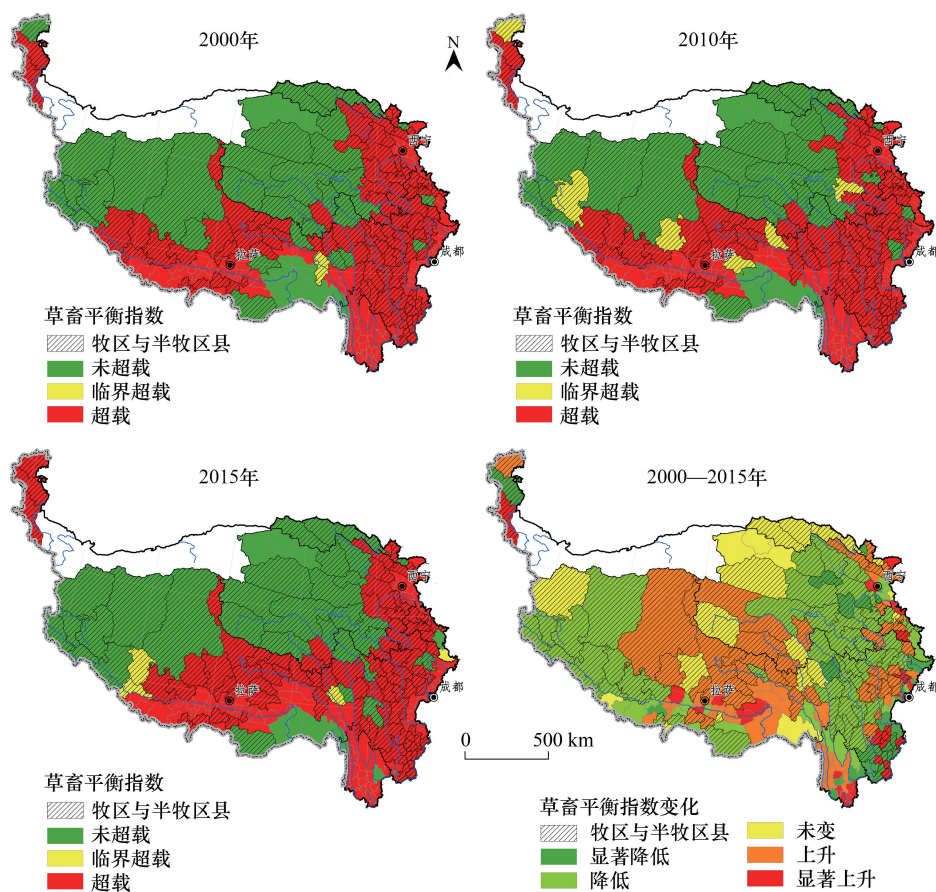


图7 2000—2015年草畜平衡指数及变化

Fig.7 The spatial distribution and change of BGLI from 2000 to 2015

因青藏高原县域面积的差异巨大,红色预警区诸县的面积共 43.84 万 km^2 ,绿色无警区诸县面积共 86.90 万 km^2 ,分别占青藏高原总面积(完整县域)的 17.28% 和 34.25%,前者约是后者一半,但红色预警区的县域数量合计 72 个,绿色无警区仅有 32 个,前者是后者的 2.25 倍。且红色预警区多分布于青藏高原中南部(以西藏为主)和东部,绿色无警区多分布于青藏高原西部及北部,中东部地区的草地承载力远高于西部及北部,呈现出草地承载力越强,超载情况越严重的空间分布格局。绿色无警区主要分布在牧区与半牧区县(73.17%),橙色预警区和红色预警区在两类县中的数量基本相当(表 4)。

红色预警区已经处于超载状态,且超载状态还在加剧,在未来畜牧业的管理中亟需重点关注;橙色预警区和黄色预警区的超载状况在改善中,未来需要进一步保持这一趋势,使之最终转为绿色无警区;蓝色预警区需要也需要得到相应的关注,避免恶化为橙色或红色预警区。青藏高原绿色无警区,是未来畜牧业调整发展的主要实施区域。

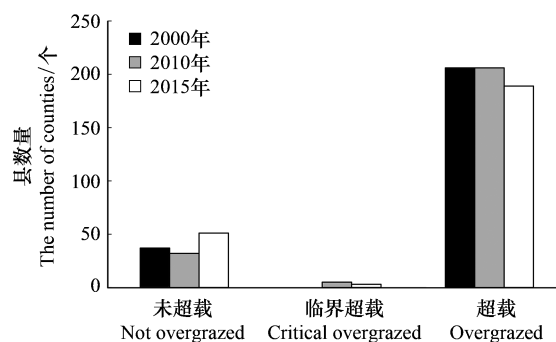


图8 县级草畜平衡指数汇总

Fig.8 Summary of BGLI at county level

表 3 各级草畜平衡指数分布

Table 3 The number in different BGLI level

草畜平衡指数 BGLI	牧区与半牧区县/个 Pastoral and semi pastoral counties	比例 Proportion/%	其他县/个 Other counties	比例 Proportion/%	小计 Subtotal
未超载 Not overgrazed	30	22.90	11	10.48	41
临界超载 Critical overgrazed	3	2.29	1	0.95	4
超载 Overgrazed	98	74.81	93	88.57	191
汇总 Total	131	100	105	100	236

表 4 各级预警区汇总

Table 4 The number of different early-warning level

预警等级 Early-warning level	牧区与半牧区县/个 Pastoral and semi pastoral counties	比例 Proportion/%	其他县/个 Other counties	比例 Proportion/%	小计 Subtotal
绿色无警区 Green no early-warning zone	24	18.32	8	7.62	32
蓝色预警区 Blue early-warning zone	6	4.58	3	2.86	9
黄色预警区 Yellow early-warning zone	3	2.29	1	0.95	4
橙色预警区 Orange early-warning zone	64	48.85	55	52.38	119
红色预警区 Red early-warning zone	34	25.95	38	36.19	72
汇总 Total	131	100	105	100	236

3 讨论与结论

3.1 讨论

基于 CASA 模型的草地净初级生产力研究目前已成熟,在不破坏草地的情况下,能够大范围的获得多年的草地生产情况,在中国的实地验证效果较好^[44–45],尤其在青藏高原地区,其拟合优度达 0.83^[46]和 0.92^[47],结合表 2 的多个地区产草量的验证结果,表明该模型及其结果适用于青藏高原地区。

青藏高原草地生产力分布格局与其自然本底条件和人口分布格局相一致^[15, 48–49],并在研究期间内相对稳定。青藏高原东部的草地生产力远高于西部及北部,该地区与中国的中亚热带、北亚热带和南温带相毗邻^[50],平均海拔低于 4000 m,平均气温为 6 ℃,年降水为 650 mm^[51];西部及北部主要由羌塘高原、三江源西部和柴达木盆地等组成,平均海拔超过 4600 m,平均气温差异较大,降水量低于 300 mm^[52]。集中分布于东部地区的高生产力草地面积为 26.32 万 km²,而集中分布于青藏高原西部及北部地区的低生产力草地面积为 53.49 万 km²,前者不足后者的一半,使得该区域草地承载力相对较低。青藏高原草地生产力在研究时间内保持增长趋势,主要原因可能与秦大河等人提出的在全球气候变化背景下,中国西部地区由“暖干化”趋向于“暖湿化”^[53]有关,但青藏高原草地生产力的格局仍然相对稳定。随着气温和降雨量的上升,未来青藏高原地区草地生产力将进一步提升,相应的草地承载力也会进一步增长。因此可充分利用该气候变化趋势,积极扩展草地面积,提高草地质量,避免草地承载压力进一步加重。

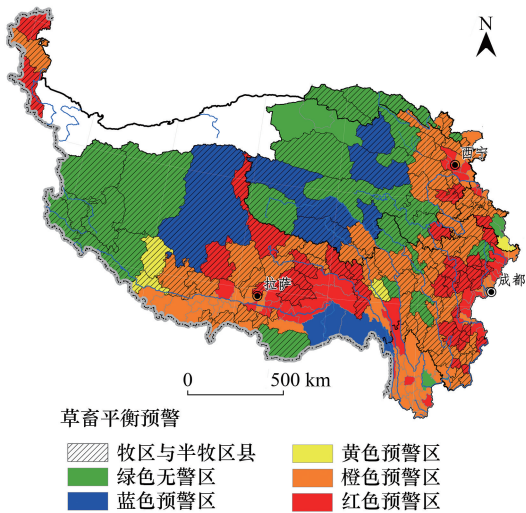


图 9 青藏高原草畜平衡预警

Fig.9 Early-warning of BGLI

青藏高原草地超载状况要得到有效缓解乃至消除,必须依靠多种措施的结合。青藏高原的牲畜存栏量远高于本地区草地承载力,其中牲畜存栏量是决定该地区草畜平衡指数的主要因素。青藏高原草畜平衡指数在研究时间内均处于超载状态,且十分严峻,呈现出草地承载力越强,超载情况越严重的格局。虽然草地承载力增长了 9.71%,但同期牲畜存栏量增长了 9.36%,两者的增长幅度相近,因此仅通过依靠气候变化以提高草地生产力而提高草地承载力的方法,无法彻底解决青藏高原地区的超载状况。未来随着生态保护工程在青藏高原地区的进一步实施及居民收入要求的进一步提高,将对该地区的草畜平衡提出更严峻的挑战^[54]。鉴于 2000、2010 和 2015 年末超载的县还有 39、34 和 41 个,可以调整未超载县的牲畜存栏量,优化畜牧产业布局。但应该优先控制处于红色预警区的牲畜存栏量,避免其超载状况进一步恶化。

目前的研究是以县域为单位的草地承载力空间分布和预警,但牲畜并非是均匀分布在所有草地中,要更加精确的研究栅格尺度的草地承载力状况,还需要结合人口密度、坡度和净初级生产力等因素将实际牲畜存栏量进行栅格化^[55]。同时本研究将草地的所有植物物种纳入了研究结果,但并非所有物种均可被牲畜采食,因此有效区分不可采食区域,对于进一步提高理论载畜量计算精度,以便于提出更加精细化的管理措施,是未来研究的重要方向。

3.2 结论

本文核算了青藏高原地区的 2000—2015 年的草地生产力,结合相应年份的县域牲畜存栏量,获得了青藏高原全域的草畜平衡指数,并根据其变化趋势对青藏高原草地承载力进行预警,结论如下:

(1) 青藏高原草地承载力整体呈东高西低的格局,其中高寒草原和高寒草甸是该地区草地承载力的主要组成部分;

(2) 青藏高原地区草地承载力呈上升趋势,理论载畜量由 8613.35 万羊单位增至 9437.70 万羊单位;

(3) 青藏高原整体处于超载状态,2000—2010 年超载状况加剧,至 2015 年超载状况稍有缓解,草畜平衡指数由 67.88%增至 79.90%,再降至 67.91%。其中红色预警区的县有 72 个,亟需优先调控其牲畜存栏量。

参考文献 (References):

- [1] 欧阳志云,徐卫华,肖慈. 中国生态系统格局、质量、服务与演变. 北京: 科学出版社, 2016: 83-119.
- [2] 欧阳志云,郑华. 生态安全战略. 北京: 学习出版社,海南出版社, 2014: 111-117.
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2001—2013. 北京: 中国统计出版社, 2001-2013.
- [4] 尹礼唱,王晓峰,张琨,肖飞艳,程昌武,张欣蓉. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同. 地理研究, 2019, 38(9): 2162-2172.
- [5] 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.
- [6] Sala O E, Parton W J, Joyce L A, Lauenroth W K. Primary production of the central grassland region of the United States. *Ecology*, 1988, 69(1): 40-45.
- [7] 李英年. 高寒草甸牧草产量和草场载畜量模拟研究及对气候变暖的响应. 草业学报, 2000, 9(2): 77-82.
- [8] 刘明春,马兴祥,尹东,张惠玲. 天祝草甸、草原草场植被生物量形成的气象条件及预测模型. 草业科学, 2001, 18(3): 65-67, 69-69.
- [9] Wehrlage C, Gamon J A, Thayer D, Hildebrand D V. Interannual variability in dry mixed-grass prairie yield: a comparison of MODIS, SPOT, and field measurements. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 872.
- [10] 李刚,孙炜琳,张华,高春雨. 基于秸秆补饲的青藏高原草地载畜量平衡遥感监测. 农业工程学报, 2014, 30(17): 200-211.
- [11] 张存厚,王明玖,张立,杨丽萍. 呼伦贝尔草甸草原地上净初级生产力对气候变化响应的模拟. 草业学报, 2013, 22(3): 41-50.
- [12] McInnes W S, Smith B, McDermid G J. Discriminating native and nonnative grasses in the dry mixedgrass prairie with MODIS NDVI time series. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(4): 1395-1403.
- [13] 徐斌,杨秀春,陶伟国,覃志豪,刘海启,缪建明. 中国草原产草量遥感监测. 生态学报, 2007, 27(2): 405-413.
- [14] Seaquist J W, Olsson L, Ardö J. A remote sensing-based primary production model for grassland biomes. *Ecological Modelling*, 2003, 169(1): 131-155.
- [15] Qian S, Wang L Y, Gong X F. Climate change and its effects on grassland productivity and carrying capacity of livestock in the main grasslands of China. *The Rangeland Journal*, 2012, 34(4): 341-347.
- [16] 黄敬峰,王秀珍,王人潮,胡新博. 天然草地牧草产量遥感综合监测预测模型研究. 遥感学报, 2001, 5(1): 69-74.
- [17] Moghaddam S M, Mosaedi A, Mesdaghi M, Jankju M. Modeling forage production by using climatic factors and drought indices in humid and arid regions of Iran. *Grassland Science*, 2015, 61(3): 153-159.
- [18] 王琪,吴成永,陈克龙,张肖,张乐乐,丁俊霞. 基于 MODIS NPP 数据的青海湖流域产草量与载畜量估算研究. 生态科学, 2019, 38(4): 178-185.

- [19] 杨改河. 西藏“一江两河”牧草载畜量与开发潜力研究. 西北农业大学学报, 1995, 23(1): 59-63.
- [20] 王涛, 沈渭寿, 林乃峰, 欧阳琰. 西藏草地生长季产草量动态变化及可持续发展策略. 自然资源学报, 2016, 31(5): 864-874.
- [21] 畅慧勤, 徐文勇, 袁杰, 吕继照, 张硕新. 西藏阿里草地资源现状及载畜量. 草业科学, 2012, 29(11): 1660-1664.
- [22] 祁英香. 青海湖地区草地载畜量及畜牧业可持续发展研究. 安徽农业科学, 2009, 37(33): 16551-16553.
- [23] 刘生梅. 青海大通县饲草资源及合理利用. 安徽农业科学, 2006, 34(24): 6523-6523, 6526-6526.
- [24] 万里强, 李向林, 何峰. 玛曲草地初级生产力及载畜能力的评价. 中国农学通报, 2012, 28(32): 6-10.
- [25] 曹娟, 张勇娟, 李新一, 王加亭, 负旭江, 徐丽君, 辛晓平, 毛平平. 遥感技术在青海刚察县草畜平衡研究中的应用. 中国农业资源与区划, 2020, 41(10): 138-146.
- [26] Zhang J P, Zhang L B, Liu W L, Qi Y, Wo X. Livestock-carrying capacity and overgrazing status of alpine grassland in the Three-River Headwaters region, China. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(2): 303-312.
- [27] 赵卫, 沈渭寿, 刘波, 林乃峰, 王涛. 西藏地区草地承载力及其时空变化. 科学通报, 2015, 60(21): 2014-2028.
- [28] 姚檀栋, 邹光剑, 徐柏青, 王伟财, 高晶, 安宝晟. “亚洲水塔”变化与影响. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209.
- [29] 中华人民共和国农业部. NY/T 635—2015 天然草地合理载畜量的计算. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [30] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 129-139.
- [31] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 肖玉. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491-498.
- [32] 孙鹏飞, 崔占鸿, 刘书杰, 柴沙驼, 郝力壮, 王迅. 三江源区不同季节放牧草场天然牧草营养价值评定及载畜量研究. 草业学报, 2015, 24(12): 92-101.
- [33] 党世彬, 次仁曲珍, 普布次仁, 扎西, 洛桑催成, 平措班旦, 巴桑吉巴, 格桑加措, 德庆卓嘎, 张立. 西藏达孜县草地产草量与营养价值分析. 中国畜牧杂志, 2018, 54(7): 82-85.
- [34] 赵禹臣, 孟庆翔, 参木有, 柴沙驼, 任丽萍, 周振明. 西藏高寒草地冷暖季牧草的营养价值和养分提供量分析. 动物营养学报, 2012, 24(12): 2515-2522.
- [35] 自然资源部办公厅. 自然资源部办公厅关于印发《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)》的函. (2020-01-19). http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200121_2498502.html.
- [36] 吴炳方, 曾源, 赵旦. 中国生态参数遥感监测方法及其变化格局. 北京: 科学出版社, 2019.
- [37] 青海统计局, 国家统计局青海调查总队. 青海统计年鉴 2001—2016. 北京: 中国统计出版社, 2001—2016.
- [38] 西藏统计局, 国家统计局西藏调查总队. 西藏统计年鉴 2001—2016. 北京: 中国统计出版社, 2001—2016.
- [39] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴 2001—2016. 北京: 中国统计出版社, 2001—2016.
- [40] 甘肃省统计局. 甘肃统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001—2016.
- [41] 四川省统计局, 国家统计局四川调查总队. 四川统计年鉴 2001—2016. 北京: 中国统计出版社, 2001—2016.
- [42] 云南省统计局. 云南统计年鉴 2001—2016. 北京: 中国统计出版社, 2001—2016.
- [43] 国家统计局农村社会经济调查司. 2001—2016 中国县域统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001—2016.
- [44] Lai C G, Li J, Wang Z L, Wu X Q, Zeng Z Y, Chen X H, Lian Y Q, Yu H J, Wang P, Bai X Y. Drought-induced reduction in net primary productivity across mainland China from 1982 to 2015. Remote Sensing, 2018, 10(9): 1433.
- [45] Wei X X, Yan C Z, Wei W. Grassland dynamics and the driving factors based on net primary productivity in Qinghai province, China. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8(2): 73.
- [46] Xu H J, Wang X P, Zhang X X. Alpine grasslands response to climatic factors and anthropogenic activities on the Tibetan Plateau from 2000 to 2012. Ecological Engineering, 2016, 92: 251-259.
- [47] 张懿铨, 祁威, 周才平, 丁明军, 刘林山, 高俊刚, 摆万奇, 王兆锋, 郑度. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异. 地理学报, 2013, 68(9): 1197-1211.
- [48] Wang Z Q, Zhang Y Z, Yang Y, Zhou W, Gang C C, Zhang Y, Li J L, An R, Wang K, Odeh I, Qi J G. Quantitative assess the driving forces on the grassland degradation in the Qinghai-Tibet Plateau, in China. Ecological Informatics, 2016, 33: 32-44.
- [49] 戚伟, 刘盛和, 周亮. 青藏高原人口地域分异规律及“胡焕庸线”思想应用. 地理学报, 2020, 75(2): 255-267.
- [50] 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 郝志新, 尹云鹤, 廖要明. 1981—2010 年中国气候区划. 科学通报, 2013, 58(30): 3088-3099.
- [51] Tang Z L, Sun G, Zhang N N, He J, Wu N. Impacts of land-use and climate change on ecosystem service in eastern Tibetan Plateau, China. Sustainability, 2018, 10(2): 467.
- [52] 徐丽娇, 胡泽勇, 赵亚楠, 洪潇宇. 1961—2010 年青藏高原气候变化特征分析. 高原气象, 2019, 38(5): 911-919.
- [53] 秦大河. 中国西部环境演变评估: 第 1 卷. 北京: 科学出版社, 2002: 54-67.
- [54] Du A, Xu W H, Xiao Y, Cui T, Song T Y, Ouyang Z Y. Evaluation of prioritized natural landscape conservation areas for national park planning in China. Sustainability, 2020, 12(5): 1840.
- [55] 林余, 张稳, 黄耀. 中国动物源 CH₄ 排放空间分布和时间变化研究. 环境科学, 2011, 32(8): 2212-2220.