

2001—2015 年青藏高原草地碳源/汇时空变化及其与气候因子的关系

周夏飞¹, 於方¹, 曹国志¹, 杨威杉^{1,2}, 周颖¹

(1. 环境保护部 环境规划院, 北京 100012; 2. 中国科学院 科技战略咨询研究院, 北京 100190)

摘要:净生态系统生产力(NEP)是估算区域植被碳源/汇的重要指标。以青藏高原为研究区,基于光能利用率模型,利用遥感数据、气象数据和基础地理数据测算了 2001—2015 年草地生态系统净初级生产力(NPP),同时,应用土壤呼吸模型估算了逐月平均土壤呼吸量(R_s),进而估算青藏高原草地净生态系统生产力(NEP)。研究揭示了 2001—2015 年青藏高原草地生态系统 NPP,NEP 时空格局及其与气候因子的关系。结果表明:(1) 2001—2015 年,青藏高原草地生态系统整体表现为碳汇,平均净碳汇总量为 1.82×10^{14} gC/a;(2) 2001—2015 年青藏高原草地生态系统 NEP 呈波动增加趋势,年平均值为 120.8 gC/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$),年平均增长率为 0.7 gC/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$);(3) 研究区草地 NPP 与温度、降水相关性不显著,NEP 与降水、温度均呈负相关。

关键词:青藏高原; 草地; 净生态系统生产力; 净初级生产力

中图分类号:S812.29

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0076-06

Spatiotemporal Features of Carbon Source-Sink and Its Relationship with Climate Factors in Qinghai-Tibet Plateau Grassland Ecosystem During 2001—2015

ZHOU Xiafei¹, YU Fang¹, CAO Guozhi¹, YANG Weishan^{1,2}, ZHOU Ying¹

(1. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2. Institute of Scientific and Technological Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Net ecosystem productivity (NEP) is an important factor for the regional estimation of carbon sources and carbon sinks. We adopted remote sensing data, meteorological data and basic geographic data to estimate the net primary productivity (NPP) in Qinghai-Tibet Plateau grassland ecosystem in the period from 2001 to 2015 based on a light use efficiency model. We analyzed the spatiotemporal distribution of NEP in grassland ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau based on the estimation of the NPP and soil respiration in the period from 2001 to 2015. We also analyzed the relationship between NPP/NEP and main meteorological factors. The results showed that: (1) grassland ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau overall had the function of carbon sink during the period from 2001 to 2015, and the amount of average net carbon sequestration was 1.82×10^{14} gC/a; (2) average NEP of grassland increased during the period from 2001 to 2015, with the average annual NEP of 120.8 gC/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$) and the growth rate of annual NEP of 0.7 gC/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$); (3) NPP of grassland had no significant correlation with precipitation and temperature; NEP of grassland was negatively correlated with precipitation and temperature.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau; grassland; NEP; NPP

定量评估陆地生态系统的碳收支现状是实施区域碳汇管理、减缓气候变化行动计划的基础。评估陆地生态系统碳源/汇强度的空间格局和动态变化,不

仅是生态系统与全球变化科学研究的重要内容,也是履行《联合国气候变化框架公约》、增强全球温室气体管理的重大科技需求^[1]。

收稿日期:2018-03-03

修回日期:2018-03-20

资助项目:国家重点研发计划重点专项(2016YFC0208800);国家自然科学基金(41371533);国家科技支撑计划课题(2015BAK12B02)

第一作者:周夏飞(1991—),男,湖南祁东县人,助理研究员,主要从事资源环境遥感、环境风险评估等研究。E-mail:zhouxf@caep.org.cn

通信作者:於方(1972—),女,山西太原人,研究员,主要从事环境经济核算、环境损害评估等研究。E-mail:yufang@caep.org.cn

草地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,具有防风固沙、水源涵养、水土保持等多方面重要的生态功能,同时也是陆地生态系统一个重要的碳库^[2-3]。青藏高原是一个特殊的地理单元,具有独特的高原气候,是受全球变化影响非常敏感的区域,被视为我国乃至全球气候变化的“天然实验室”^[4-6],而且草地生态系统是青藏高原的主体生态系统。因此,研究该区域草地碳源/汇与气候因子的关系对理解全球变化的影响具有重要的意义。

目前,草地生态系统的碳收支状况研究主要集中在净初级生产力(NPP)、净生态系统生产力(NEP)等的估算^[7-8]。其中 NEP 是量化分析草地生态系统碳源/汇的重要科学指标^[9],并广泛应用于碳循环研究中,如庞瑞等^[10]应用生态系统模型估算了 1954—2010 年西南高山地区净生态系统生产力(NEP)的时空变化,并分析了其与气候因子的关系,结果表明 NEP 的年际变化与年平均温度呈负相关,与年降水量呈正相关;李洁等^[11]基于 CEVSA 模型,对 1961—2010 年东北地区 NEP 的时空格局及变化趋势进行了分析,并探讨了气候变化与区域碳源/汇的关系,结果表明 NEP 的年际变化与温度呈负相关,与降水呈显著正相关;巩杰等^[12]结合 MODIS 与气象数据,对 2000—2013 年白龙江流域 NEP 时空变化及其影响因素进行了研究,结果表明地形是 NEP 主要影响因素。综上,不同地区、不同的气候带,其 NEP 变化的主要影响因素可能不同。而青藏高原是响应全球气候变化的重要区域,对全球气候变化具有重要的调节和指示作用^[4-6]。以往有关青藏高原碳循环对气候变化的响应相对较少。

基于此,本文基于光能利用率模型(CASA),利用遥感数据、气象数据和基础地理数据测算 2001—2015 年青藏高原植被净初级生产力(NPP),应用土壤呼吸模型估算了逐月平均土壤呼吸量(R_s),进而估算出青藏高原草地净生态系统生产力(NEP),并辅以一元线性回归、偏相关分析等方法,分析植被 NPP,NEP 时空变化格局及其与气候因子的关系,以期对青藏高原碳源/汇管理提供依据。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

青藏高原地处我国西南部,南起喜马拉雅山脉,北至昆仑山—祁连山北部,西部为帕米尔高原,东部与秦岭山脉相接,地理范围为 $26^{\circ}00'12''$ — $39^{\circ}46'50''$ N, $73^{\circ}18'52''$ — $104^{\circ}46'59''$ E。研究区草地面积约为 1.2 亿 hm^2 ,占研究区总面积的 46.7% (图 1)。研究区平

均海拔在 $4\,000\text{ m}$ 以上,年降水量在 $20\sim4\,500\text{ mm}$,高原腹地年平均温度在 0°C 以下,大片地区最暖月平均温度也不足 10°C ^[13-14]。

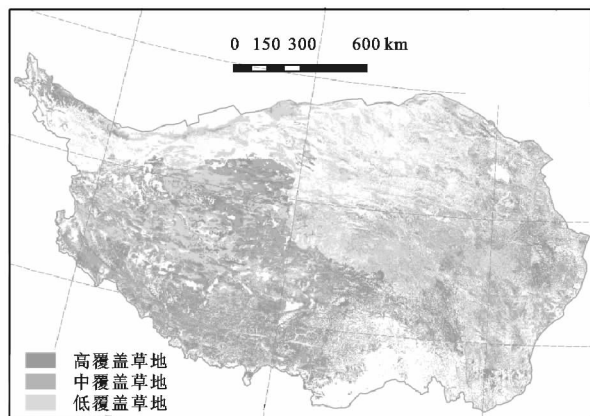


图1 青藏高原 2015 年草地分布

1.2 数据来源

(1) 遥感数据。本文采用的遥感数据为 2001—2015 年的 MOD13A3(NDVI)数据,来源于美国国家航空航天局(NASA)的 EOS/MODIS 数据产品(<http://e4ftl01.cr.usgs.gov>),空间分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$,时间分辨率为 1 个月。本研究首先利用 MRT(MODIS Reprojection Tools)将 6 景 MOD13A3 数据进行合并,并将其投影为 Albers 投影(Albers Conical Equal Area);然后利用研究区边界裁切 NDVI 影像,得到 2001—2015 年逐月 NDVI 影像。

(2) 土地利用类型数据。本文采用的 2015 年土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$;土地利用类型共分为耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地 6 个一级类型以及 25 个二级类型。

(3) 气象数据。本文采用的气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),时间为 2001—2015 年,数据内容为月降雨量、月平均温度、月太阳总辐射量,以及各气象站点的经度、纬度和海拔高度;计算 NPP 及 NEP 需要栅格化的气象数据,并从空间上与遥感数据相匹配。利用 GIS 的插值工具,根据各气象站点的经纬度信息,通过对气象数据进行 Kriging 插值和基于 DEM 的插值,获取像元大小与 NDVI 数据一致、投影相同的气象要素栅格图。

1.3 研究方法

1.3.1 NPP 估算方法 净初级生产力(NPP)是指单位时间、单位面积上,植被通过光合作用所产生的有机物总量中扣除自养呼吸后的剩余部分^[15]。近年来,关于 NPP 估算的研究较多,本研究采用朱文泉等^[16]改进的光能利用率模型来估算植被 NPP,NPP 主要由植被所吸

收的光合有效辐射与实际光能利用率两个变量确定,其详细计算过程参考朱文泉等相关文献^[16-17]。

1.3.2 NEP 估算方法 净生态系统生产力(NEP)是估算植被碳源、碳汇的重要指标,在区域尺度上NEP 常常作为碳汇大小的量度,如果不考虑其他自然和人为条件的影响,生态系统碳汇可以表示为NPP 与异养生物呼吸(Heterotrophic Respiration, R_h)消耗之间的差值,即:

$$NEP = NPP - R_h \quad (1)$$

土壤异养呼吸消耗 R_h 的估算采用 Bond-Lam-berty 等^[18]提出的土壤呼吸模型,即:

$$\ln(R_h) = 1.22 + 0.73 \ln(R_{sy}) \quad (2)$$

式中: R_h 为年土壤异养呼吸速率 $[\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$; R_{sy} 为年土壤呼吸速率 $[\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ 。

土壤呼吸速率 R_s 的估算采用 Raich 等^[19]研究的土壤呼吸模型,即:

$$R_{sm} = 1.25 \times e^{(0.05452 \times T_a)} \times [P / (4.259 + P)] \quad (3)$$

式中: R_{sm} 为月平均土壤呼吸速率 $[\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$; T_a 为月平均温度; P 为月降雨量 (cm) 。

1.3.3 NPP, NEP 年际变化趋势分析 本文采用一元线性回归分析方法分析青藏高原草地生态系统2001—2015年15 a 每个栅格 NPP 或 NEP 的变化趋势,计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times Y_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式中:Slope 为趋势线的斜率,即 NPP 或 NEP 的变化

趋势; Y_i 为栅格第 i 年的 NPP 或 NEP 值; n 为监测时段的年数($n = 15$);当 $\text{Slope} > 0$ 时,表明 NPP 或 NEP 呈增加趋势;当 $\text{Slope} < 0$ 时,表明 NPP 或 NEP 呈下降趋势。

1.3.4 偏相关分析 本文采用偏相关分析法,分析草地生态系统每个栅格 NPP, NEP 与温度、降水的偏相关性,计算公式如下:

$$R_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中: $R_{x,y}$ 为 x, y 两变量的相关系数; x_i 为第 i 年的 NPP 或 NEP; y_i 为第 i 年的降水量或平均温度; \bar{x} 为多年 NPP 或 NEP 的平均值; \bar{y} 为多年降水量或平均温度的平均值; n 为监测时段的年数($n = 15$)。

2 结果与分析

2.1 青藏高原草地多年平均 NPP 的空间分布格局

由2001—2015年青藏高原草地 NPP 平均值的空间分布(图2A)可知,青藏高原草地 NPP 总体呈现由东南至西北递减的空间格局,这主要是受青藏高原水热条件的制约,从东南到西北,气候明显地表现出高寒湿润、高寒半湿润、高寒半干旱和高寒干旱的水平地带性变化,因而草地植被大体上也呈现出由东南向西北依次出现亚高山、高山灌丛草甸—高寒草甸—高寒草原—高寒半荒漠—高寒荒漠。2001—2015年青藏高原草地 NPP 年平均值为 $302.1 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,多年平均草地 NPP 总值为 $4.56 \times 10^{14} \text{ gC/a}$ 。

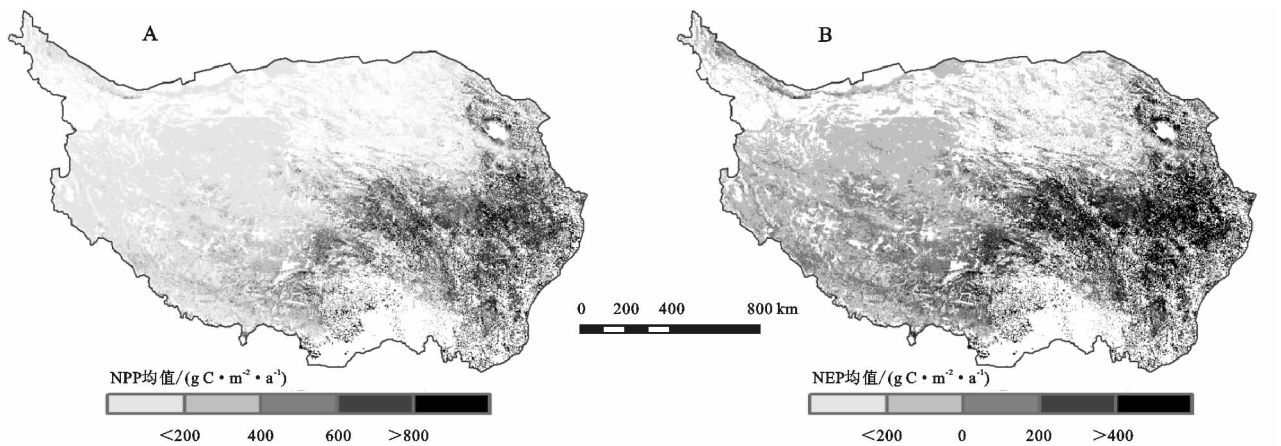


图2 2001—2015年青藏高原草地 NPP 及 NEP 平均值空间分布

2.2 青藏高原草地多年平均 NEP 的空间分布格局

由图2B可知,青藏高原草地 NEP 空间格局与 NPP 基本一致。2001—2015年青藏高原草地生态系统 NEP 年平均值为 $120.8 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,多年平均草地生态系统 NEP 总值为 $1.82 \times 10^{14} \text{ gC/a}$,整体表现为碳汇。2001—2015年青藏高原草地生态系统碳汇区

($\text{NEP} > 0$)面积约为 86.38 万 km^2 ,约占总草地面积的 57.3% ;碳源区($\text{NEP} < 0$)面积约为 64.47 万 km^2 ,约占总草地面积的 43.7% ;整个研究区多年平均固碳量为 $2.22 \times 10^{14} \text{ gC/a}$,多年平均碳释放量为 $4.0 \times 10^{13} \text{ gC/a}$ 。

2.3 青藏高原草地 NPP, NEP 的年际变化规律

由图3可知,2001—2015年青藏高原草地生态系统

NPP, NEP 波动较大, 总体上呈增加趋势。2001—2015 年青藏高原 NPP 年平均值在 $280 \sim 350 \text{ gC/m}^2$ 波动, 年

平均增长率为 1.0 gC/m^2 ; NEP 年平均值在 $90 \sim 170 \text{ gC/m}^2$ 波动, 年平均增长率为 0.7 gC/m^2 。

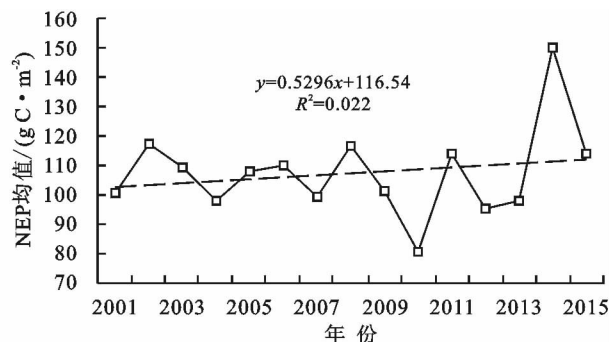
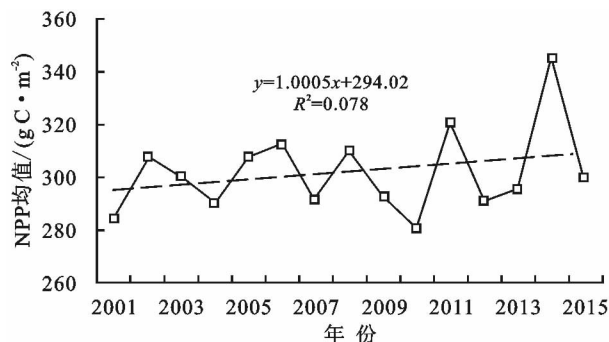


图3 2001—2015年青藏高原草地生态系统 NPP, NEP 的变化趋势

2.3.1 青藏高原草地 NPP 时空变化趋势分析 由附图 1 可知, 青藏高原大部分草地 NPP 呈增长趋势, 平均增长率为 $2.86 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot 15 \text{ a})$ 。NPP 呈增长趋势的草地面积为 99.32 万 km^2 , 占草地总面积的 65.8% , 其中, NPP 呈显著性增加趋势的草地面积占草地总面积的 13.9% , 有 55.2% 的草地 NPP 平均增长率在 $0 \sim 5 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot 15 \text{ a})$, 6.2% 的草地 NPP 平均增长率在 $5 \sim 10 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot 15 \text{ a})$, 仅有 4.4% 的草地 NPP 平均增长率在 $10 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot 15 \text{ a})$ 以上。NPP 呈减少趋势的面积为 51.53 万 km^2 , 占研究区草地总面积的 34.2% , 其中, NPP 呈显著性减少趋势的面积占研究区草地总面积的 3.3% , 有 28.7% 的草地 NPP 平均减少率在 $0 \sim 5 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot 15 \text{ a})$, 仅有 5.5% 的草地 NPP 平均增长率在 $5 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot 15 \text{ a})$ 。NPP 增长趋势较为明显的地区主要位于青藏高原东部, NPP 减少趋势较为明显的区域主要位于青藏高原的中部及西南部。

2.3.2 青藏高原草地 NEP 时空变化趋势分析 由附图 2 可知, 青藏高原大部分地区 NEP 呈增长趋势, 且时空变化格局与 NPP 的时空变化格局较为一致, 平均增长率为 $2.98 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot 15 \text{ a})$, 略高于 NPP 平均增长率, 这说明草地 NPP 的增加可以在一定程度上增加草地碳汇, 起到固碳的作用。NEP 呈增长趋势的面积为 86.89 万 km^2 , 占研究区草地总面积的 57.6% , 其中, NEP 呈显著性增加趋势的草地面积占草地总面积的 6.5% , 有 47.9% 的草地 NEP 平均增长率在 $0 \sim 5 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot 15 \text{ a})$, 5.4% 的草地 NEP 平均增长率在 $5 \sim 10 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot 15 \text{ a})$, 仅有 4.3% 的草地 NEP 平均增长率在 $10 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot 15 \text{ a})$ 以上。NEP 呈减少趋势的面积为 51.53 万 km^2 , 占研究区草地总面积的 42.4% , 其中, NEP 呈显著性减少趋势的草地面积占草地总面积的 4.6% , 有 34.7% 的草地 NEP 平均减少率在 $0 \sim 5 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot 15 \text{ a})$, 仅有 7.7% 的草地 NEP 平均增长率在 $5 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot 15 \text{ a})$ 。NEP 增长趋势较为明显

的地区主要位于青藏高原东部, NEP 减少趋势较为明显的区域主要位于青藏高原的中部及西南部。

2.4 青藏高原草地 NPP, NEP 与气候因子的相关关系

2.4.1 青藏高原草地 NPP 与温度、降水的相关关系 降水和气温等气候因子的变化对陆地植被的生长发育具有重要影响, 因此本文利用逐像元的相关分析方法, 分别对 2001—2015 年的草地年平均 NPP, NEP 与年降水量及年平均气温的偏相关系数进行分析, 从而在空间尺度分析草地 NPP, NEP 与主要气候因子的关系。

分析青藏高原草地生态系统 NPP 与降水的相关性, 发现青藏高原大部分地区与年降水量呈正相关。统计表明, 整个研究区 NPP 与年降水量的平均偏相关系数为 0.146 。NPP 与年降水量呈正相关的草地面积为 101.14 万 km^2 , 占研究区草地总面积的 67.0% , 主要分布在青藏高原中部及西南部。NPP 与年降水量呈负相关的草地面积为 49.71 万 km^2 , 占研究区草地总面积的 33.0% , 主要分布在青藏高原西北部及东南部。从显著性分布来看(附图 3A), 青藏高原草地 NPP 与年降水量显著性不明显, 表明降水并不是影响青藏高原草地 NPP 的主要气候限制因子。

分析青藏高原草地生态系统 NPP 与温度的相关性, 发现青藏高原大部分地区与年均温呈负相关, 统计表明, 整个研究区 NPP 与年均温的平均偏相关系数 -0.050 。NPP 与年均温呈正相关的草地面积为 66.37 万 km^2 , 占研究区草地总面积的 44.0% , 主要分布在青藏高原的中部及东南部。NPP 与年均温呈负相关的草地面积为 84.48 万 km^2 , 占研究区草地总面积的 56.0% , 主要分布在青藏高原西部。从显著性分布来看(附图 3B), 青藏高原草地 NPP 与年均温显著性不明显, 表明温度并不是影响青藏高原草地 NPP 的主要气候限制因子。

2.4.2 青藏高原草地 NEP 与温度、降水的相关关系 分析青藏高原草地生态系统 NEP 与降水的相关性,

发现青藏高原大部分地区与年降水量呈负相关。统计表明,整个研究区 NEP 与年降水量的平均偏相关系数为 -0.206 。NEP 与年降水量呈正相关的草地面积为 49.74 万 km^2 , 占研究区草地总面积的 33.0% , 主要分布在青藏高原西南及东北部。NEP 与年降水量呈负相关的草地面积为 101.11 万 km^2 , 占研究区草地总面积的 67.0% , 主要分布在青藏高原西北部及东南部。从显著性分布来看(附图 4A), 青藏高原草地 NEP 与年降水量呈负相关的草地主要分布在青藏高原西北部。

分析青藏高原草地生态系统 NEP 与温度的相关性,发现青藏高原大部分地区与年均温呈负相关。统计表明,整个研究区 NEP 与年均温的平均偏相关系数为 -0.313 。NEP 与年均温呈正相关的草地面积为 26.18 万 km^2 , 占研究区草地总面积的 17.4% , 主要分布在青藏高原西北及东北部。NEP 与年均温呈负相关的草地面积为 124.67 万 km^2 , 占研究区草地总面积的 82.6% , 主要分布在青藏高原中部及东南部。从显著性分布来看(附图 4B), 青藏高原草地 NEP 与年均温呈负相关的草地主要分布在青藏高原中部及东南部。

3 讨论

3.1 植被 NPP 估算可靠性分析

区域 NPP 模型模拟精度验证方法主要有两种:一种是与实测数据进行比较;另一种是与其他模型模拟结果进行比较。由于青藏高原实测数据相对较少,本文将模型估算的 2001—2015 年青藏高原草地平均 NPP 与其他模型模拟的结果进行比较(表 1)。由表 1 可知,本文模拟的平均 NPP 值其他模型估算的结果差距不大,表明本文估算的结果具有一定的可靠性。

表 1 本研究模拟的草地 NPP 均值与其他模型

模拟的 NPP 均值的比较 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$

| 植被 类型 | 青藏高原 | 中国 | | |
|----------|-------|--------------------|----------------------|----------------------|
| | 本文模型 | 陶波 ^[20] | 朱文泉等 ^[17] | Ni 等 ^[21] |
| 草地 | 302.1 | 414.6 | 226.2 | 230.6 |

3.2 植被 NEP 估算可靠性分析

本文估算的 NEP 结果存在一定的不确定性,主要由于土壤呼吸估算的不确定性。土壤呼吸是一个非常复杂的生态学过程,很难准确估算,本文虽采用 BondLamberty 等用 1 000 多组样本建立的土壤呼吸作用模型,但这些数据大多是以月为尺度,研究主要按照生长季节土壤呼吸量外推的方法用于获取一年的数据,存在一定的误差,进而导致 NEP 的估算结果存在一定的不确定性。

3.3 植被 NEP 估算结果与分析

2001—2015 年植被 NEP 空间分布上与年平均气温和年降水量均呈负相关,在年均温度的相关性上,与庞瑞等^[10]、李洁等^[11]研究结果一致,在年降水量的相关性上,与庞瑞等^[10]、李洁等^[11]研究结果相反,这表明不同地区,NEP 变化随气候因子的变化并不完全相同,这可能是由于影响 NEP 变化格局的不仅有温度、降水这两个气候因子,还包括地形因子、太阳辐射以及人类活动(放牧、围栏)等其他因子的影响。因此,在今后的研究中,还应将地形因子等其他因素考虑在内,综合探讨 NEP 变化。

青藏高原 NEP 的空间分布受植被类型的影响因素较大,总体呈现由东南向西北递减的格局,高值区主要为青藏高原东南部的亚高山、高山灌丛草甸,低值区主要为青藏高原西北部的高寒荒漠。

4 结论

(1) 2001—2015 年青藏高原草地生态系统 NPP, NEP 总体上呈现由东南向西北递减的分布格局。研究区 NPP 平均值为 $302.1 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。碳汇区($\text{NEP} > 0$)面积约占研究区草地总面积的 57.3% ;碳源区($\text{NEP} < 0$)面积约占研究区草地面积的 43.7% ;整个研究区多年平均固碳量为 $2.22 \times 10^{14} \text{ gC/a}$, 多年平均碳释放量为 $4 \times 10^{13} \text{ gC/a}$, 多年平均净碳汇量为 $1.82 \times 10^{14} \text{ gC/a}$ 。

(2) 从时间上看,2001—2015 年青藏高原草地生态系统的 NPP, NEP 总体上呈增长趋势,2001—2015 年青藏高原 NPP 年平均值在 $280 \sim 350 \text{ gC}/\text{m}^2$ 之间波动,年增长率为 $1.0 \text{ gC}/\text{m}^2$; NEP 年平均值在 $90 \sim 170 \text{ gC}/\text{m}^2$ 之间波动,年增长率为 $0.7 \text{ gC}/\text{m}^2$ 。

(3) 从空间分布上看,2001—2015 年青藏高原大部分草地 NPP, NEP 均呈增长趋势, NPP 呈增长趋势的草地面积占草地总面积的 65.8% , NEP 呈增长趋势的草地面积占草地总面积的 57.6% 。

(4) 青藏高原草地 NPP 与降水及温度具有一定的相关性,但相关性不大,表明降水及温度并不是影响青藏高原草地 NPP 的主要限制因子。青藏高原 NEP 与降水及温度呈较强的负相关关系,表明降水及温度是影响青藏高原草地碳汇的主要限制因子。

参考文献:

- [1] Wang Qiufeng, Zheng Han, Zhu Xianjin, et al. Primary estimation of Chinese terrestrial carbon sequestration during 2001—2010[J]. Science Bulletin, 2015, 60(6): 577-590.
- [2] Jmo Scurlock, Hall D O. The global carbon sink: a

- grassland perspective [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 229-233.
- [3] 戴尔阜, 黄宇, 吴卓, 等. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J]. *地理学报*, 2016, 71(1): 21-34.
- [4] 任小丽, 何洪林, 张黎, 等. 2001—2010年三江源区草地净生态系统生产力估算[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(1): 51-58.
- [5] Piao Shilong, Cui Mengdi, Chen Anping, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1599-1608.
- [6] Jin Zhenong, Zhuang Qianlai, He Jinsheng, et al. Phenology shift from 1989 to 2008 on the Tibetan Plateau: an analysis with a process-based soil physical model and remote sensing data [J]. *Climatic Change*, 2013, 119(2): 435-449.
- [7] 周伟, 牟风云, 刚成诚, 等. 1982—2010年中国草地净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系[J]. *生态学报*, 2017, 37(13): 1-11.
- [8] 张珺, 任鸿瑞. 人类活动对锡林郭勒盟草原净初级生产力的影响研究[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(7): 1125-1133.
- [9] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus Series B-Chemical & Physical Meteorology*, 1992, 44(2): 81-99.
- [10] 庞瑞, 顾峰雪, 张远东, 等. 西南高山地区净生态系统生产力时空动态[J]. *生态学报*, 2012, 32(24): 7844-7856.
- [11] 李洁, 张远东, 顾峰雪, 等. 中国东北地区近50年净生态系统生产力的时空动态[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1490-1502.
- [12] 巩杰, 张影, 钱彩云. 甘肃白龙江流域净生态系统生产力时空变化[J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 1-8.
- [13] 于惠. 青藏高原草地变化及其对气候的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [14] 刘宪锋, 任志远, 林志慧. 青藏高原生态系统固碳释氧价值动态测评[J]. *地理研究*, 2013, 32(4): 663-670.
- [15] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [16] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [17] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光利用率模拟[J]. *科学通报*, 2006, 51(6): 700-706.
- [18] Bond-Lamberty B, Wang C, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(10): 1756-1766.
- [19] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980—1994 [J]. *Global Change Biology*, 2010, 8(8): 800-812.
- [20] 陶波, 曹明奎, 李克让, 等. 1981—2000年中国陆地净生态系统生产力空间格局及其变化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2006, 36(12): 1131-1139.
- [21] Ni Jian, Zhang Xinshi, Scurlock J M O. Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forests [J]. *Annals of Forest Science*, 2001, 58(4): 351-384.

(上接第75页)

- [18] 江玉梅, 胡琳玉, 林娣, 等. 鄱阳湖湿地4种植物群落土壤碳含量和酶活性[J]. *湿地科学*, 2017, 15(6): 802-808.
- [19] 张鑫, 耿玉清, 徐明, 等. 鄱阳湖湖滨湿地土壤酶活性及影响因素[J]. *北京林业大学学报*, 2014, 36(1): 34-40.
- [20] 靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 等. 起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较[J]. *环境科学*, 2016, 37(1): 335-341.
- [21] 黄利东, 汪丽军, 王月. 植被类型对滨海湿地土壤酶活性的影响研究[J]. *土壤通报*, 2015, 46(6): 1447-1452.
- [22] 文东新, 杨宁, 杨满元. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复模式对土壤微生物量及酶活性的影响[J]. *草地学报*, 2016, 24(6): 1241-1247.
- [23] 闫钟清, 齐玉春, 彭琴, 等. 降水和氮沉降增加对草地土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(9): 3019-3027.
- [24] 严岩, 文波龙, 徐惠风. 除草剂苄嘧磺隆对盐碱化沼泽芦苇生长及土壤酶活性影响的试验研究[J]. *湿地科学*, 2016, 14(1): 117-121.
- [25] 朱海强, 李艳红, 李发东. 艾比湖湿地典型植物群落土壤酶活性季节变化特征[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1145-1154.
- [26] 高艳娜, 戚志伟, 仲启钺, 等. 长江口芦苇湿地土壤酶活性对长期模拟升温的响应[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(3): 535-541.
- [27] 朱美玲, 贡璐, 张龙龙. 塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析[J]. *环境科学*, 2015, 36(7): 2678-2685.