文章编号:1000-7601(2019)05-0226-09

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.05.33

# 青藏高原草地降水利用效率时空动态 及对气候变化的响应

同琳静,刘洋洋,王 倩,李晓宇,李建龙

(南京大学生命科学学院生态学系,江苏南京 210093)

摘 要:本研究利用 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型模拟了 2000—2013 年青藏高原草地净植被 生产力(Net Primary Production, NPP),结合实测数据、气象数据和土地覆被数据计算了草地降水利用效率(PUE),探 究其时空分布特征,以及不同草地类型 PUE 及其对气候变化的响应。结果表明:青藏高原草地 PUE 在研究年限内 呈现波动增加趋势,增加速率为每年 0.0035 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>,14 a 的平均值为 0.38 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>。PUE 的空间分布 具有明显的异质性,呈现东部高、中西部低的基本格局。PUE 分布在 0.2~0.4 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>之间的比例最大,占青 藏高原总面积的 55.63%,呈减少趋势的区域主要分布在青藏高原的北部和西部,以及东部的边界地区,呈增加趋势 的地区集中在研究区的中部和南部。研究年限内 PUE 的变异系数分布在 0.07~0.85 之间,变化稳定的区域所占面 积最大,为总面积的 43.43%,主要分布在唐古拉山脉和横断山脉附近。不同草地类型间 PUE 均值存在差异,具体表 现为:草甸(1.06 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>)>坡面草地(0.80 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>)>平原草地(0.30 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>)>高山与亚高山草 甸(0.29 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>)>荒漠草地(0.23 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>)>高山与亚高山草地(0.094 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>)。总体上,青藏 高原草地 PUE 与降水成负相关关系,而与气温呈正相关,PUE 的变化对降水响应更加敏感。

关键词:降水利用效率;时空动态;草地;青藏高原;气候变化;CASA 模型

中图分类号:S161.6 文献标志码:A

# Spatial-temporal dynamics of precipitation use efficiency in grassland and its relationship with climate changes on Qinghai-Tibet Plateau

TONG Lin-jing, LIU Yang-yang, WANG Qian, LI Xiao-yu, LI Jian-long

(Department of Ecology, School of Life Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: In this study, the Carnegie-Ames-Stanford Approach model was used to simulate the *NPP* of the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2013, *PUE* was calculated as the ratio of *NPP* to annual precipitation. Based on the measured data, meteorological data and land cover data, temporal and spatial distribution characteristics of *PUE*, *PUE* of different grassland type, and its response to climate change were also explored. The results showed: The *PUE* of the Qinghai-Tibet Plateau showed an increasing trend with fluctuation, with an annual increase rate of 0.0035 g  $\cdot$  m<sup>-2</sup>  $\cdot$  mm<sup>-1</sup>, and the average value of 14 a was 0.38 g  $\cdot$  m<sup>-2</sup>  $\cdot$  mm<sup>-1</sup>. The spatial distribution of *PUE* had obvious heterogeneity, and basically showed a decreasing pattern from the east to west. The grassland *PUE* mainly distributed between 0.2 and 0.4 g  $\cdot$  m<sup>-2</sup>  $\cdot$  mm<sup>-1</sup>, accounting for 55.63% of the total area of the Qinghai-Tibet Plateau, as well as the eastern border area. The regions showing increasing trend concentrated in the central and southern parts. The variation coefficient of *PUE* was between 0.07 and 0.85. The area with stable trend accounted for the largest area(43.43% of the total area), which mainly distributed in the Tanggula Mountains and Hengduan Mountains. The average *PUE* values of different grassland followed the order of:

收稿日期:2018-10-24 修回日期:2019-08-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800201);国家重点基础研究发展计划(973 计划:2010CB950702);国际 APN 全球变化项目 (ARCP2015-03CMY-Li)

作者简介:同琳静(1995-),女,陕西渭南人,硕士研究生,研究方向为生态遥感及陆地生态系统碳循环。E-mail:TLJ1654@163.com 通信作者:李建龙(1962-),男,长春市人,教授,博导,主要从事全球变化及陆地生态系统碳循环研究。Email: lijianlongnju@163.com

meadow(1.06 g · m<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>)>slope grassland(0.80 g · m<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>)>plain grassland(0.30 g · m<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>)>alpine and sub alpine meadow(0.29 g · m<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>)>dessert grassland(0.23 g · m<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>)>alpine and sub alpine grassland(0.094 g · m<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>). The grassland *PUE* was negatively correlated with precipitation but positively correlated with temperature. It was more responsive to precipitation.

Keywords: precipitation use efficiency; spatiotemporal dynamics; grassland; Qinghai-Tibet Plateau; climate change; Carnegie-Ames-Stanford Approach model

在全球背景下,气候变暖及降水格局的改变已 逐渐成为人类所关注的焦点<sup>[1-3]</sup>。全球 45%的陆地 面积属于干旱、半干旱地区,降水对于干旱、半干旱 陆地生态系统水分供给、生态系统结构和功能起着 关键作用<sup>[4]</sup>。降水利用效率(*PUE*)的概念是在水 分利用率(Water Use Efficiency, *WUE*)的基础上提 出的,*WUE* 指植物消耗单位水分所固定的干物质的 量,最初主要用于研究农作物的生理水平,而 *PUE* 定义为 *NPP* 与年降水的比值。*PUE* 是表征生态系 统碳水循环的综合性指标,同时能够预测全球气候 变化对生态系统所造成的影响<sup>[5-6]</sup>。

近年来,众多学者已对不同区域尺度 PUE 的时 空分布特征及其影响因素进行探究。Hu 等<sup>[6]</sup> 对我 国 4500 km 的草地样带的 PUE 进行了调查,研究得 出植被 PUE 不仅与降水存在较强的相关性,同时与 叶面积指数(LAI)和植被覆盖度(FVC)存在线性关 系,表明除气候条件外,植被的生物学特性也是 PUE 的影响因素。Bai 等<sup>[5]</sup> 基于 21 个站点的实测 数据,探究长时间序列的内蒙古草地 PUE 变化规 律,发现 PUE 对降水变化的响应在不同研究区域及 植被类型间存在差异,叶辉等<sup>[7]</sup>在对青藏高原 PUE 影响因素分析中也得到同样结论。穆少杰等<sup>[8]</sup> 通 过研究内蒙古不同降水梯度上的植被 PUE,发现在 不同的降水区间内,气温、降水与植被 PUE 之间的 关系存在较大差别。

青藏高原作为独立的地理单位,具有从湿润到 干旱、从热带到寒带等多样的气候及生态系统类型,是相应区域和全球气候变化的敏感地带,因其 特殊性引起了国内外学者的关注。草地是青藏高 原的主要植被类型之一,研究该区域草地 PUE 及其 对气候变化的响应对于草地保护、区域水土保持和 水源涵养具有重要意义。仇洁等<sup>[9]</sup> 对青藏高原植 被 PUE 进行探究,发现 PUE 呈现东部高、中西部低 的空间分布格局,且 PUE 受到植被类型和海拔的综 合影响。Yang 等<sup>[10]</sup>比较了不同草地类型 PUE,发 现青藏高原草地 PUE 低于全球草地 PUE 的均值。 尽管目前已有部分研究基础.但草地 PUE 对气候变 化的响应尚未完全明确。鉴于此,本研究以 2000— 2013 年为例,利用 CASA 模型,模拟了青藏高原草 地 NPP,并结合降水数据估算草地的 PUE 值,从区 域尺度探究 PUE 时空动态及其对气候变化的响应 机制,本研究结论对于青藏高原生态安全屏障建 设,深入了解高寒地区植被生产力的形成具有重要 意义,同时可为全球草地碳水循环对气候变化的响 应研究提供参考依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

青藏高原(25°N—40°N,74°E—104°E)平均海 拔4500m,面积达2.5724×10<sup>6</sup>km<sup>2</sup>,占全国陆地总 面积的26.8%,是中国面积最大、世界上海拔最高的 高原。其位于我国西南部,地势上呈现西北高、东 南低的基本格局,在我国境内南起喜马拉雅山脉, 北至昆仑山-祁连山北侧,西起帕米尔高原,东至横 断山脉。青藏高原地势较高,气候寒冷,太阳辐射 较强。气温和降水呈现从东南至西北的递减趋势, 气温随纬度和海拔的增加出现降低,日较差较大。 全年干湿季分明,60%~70%降水集中在5—9月,属 于我国西部和西南部的高寒干旱气候区<sup>[11]</sup>。

## 1.2 数据来源

1.2.1 NDVI 数据 NDVI 采用美国航天局(NASA) 提供的 EOS/MODIS NDVI 数据,下载网址为: http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/。 本研究选择其中 2000—2013 年的 MOD13A1 产品, 该数据集的空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 16 d。使用 MRT(MODIS Reprojection Tools)工具将从 HDF 格式转换成 Tiff 格式,并将 SIN 地图投影转换 成 WGS84/Albers Equal Area Conic 投影,之后进行 图像的拼接与重采样。采用最大合成法(Maximum Value Composite, MVC)对 16 d 的 MODIS-NDVI 数 据进行合成,得到月 NDVI 数据集,利用青藏高原边 界进行裁剪得到青藏高原 2000—2013 年逐月的 NDVI 栅格影像<sup>[8]</sup>。

1.2.2 气象数据 由中国气象数据网(http://cdc.

cma.gov.cn)下载全国 720 个站点的 2000—2013 年 月平均气温与降水数据,并通过 120 个辐射站点获 取全国月太阳总辐射数据。采用反距离权重法(Inverse Distance Weighted, IDW)进行气象数据的空间 插值,获得 2000—2013 年全国月平均气温、月平均 降水、月太阳总辐射的栅格数据集,利用青藏高原 边界进行数据掩膜,得到青藏高原逐月的气象数 据,该数据与 NDVI 数据采用统一的空间分辨率和 投影方式<sup>[9]</sup>。

1.2.3 土地覆盖数据 土地覆盖数据来自 GLC2000(Global Land Cover 2000)数据集中的中国 区域子集,该数据类型的分辨率为1km,分类精度 相比于 MODIS 和 IGBP 土地分类数据较高,草地分 类精度可达 66.95%<sup>[12]</sup>。在该数据中,青藏高原草 地被分为6类,分别为高山与亚高山草地、高山与亚 高山草甸、沙漠草地、草甸、平原草地和坡面草地<sup>[13]</sup>。 青藏高原不同草地类型分布见图 1(见 230 页)。

## 1.3 研究方法

1.3.1 草地 NPP 的估算 NPP 很难在全球或区域 尺度上进行测量,因此各国学者已根据研究尺度、 数据来源和研究基础建立了不同的植被 NPP 估算 模型,其中主要包括过程模型、参数模型和统计模 型<sup>[14]</sup>。CASA 是基于光合作用效率提出的过程模 型,该模型中主要涉及植物吸收的有效辐射(APAR) 和光能利用率(ε)两个变量,其计算方法如下:

 $NPP(x,t) = APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t)$ (1) 式中, NPP(x,t)、APAR(x,t) 和  $\varepsilon(x,t)$  分别表示 t 月份像元 x 内的植被 NPP(g·m<sup>-2</sup>)、吸收的光合有 效辐射(MJ·m<sup>-2</sup>) 及光能转换率(g·MJ<sup>-1</sup>)<sup>[15]</sup>。

$$APAR(x,t) = SOL(x,t) \times FPAR(x,t) \times 0.5$$
(2)

式中,SOL(x, t) 表示 t 月份像元 x 内的太阳总辐射 量( $MJ \cdot m^{-2}$ ),常数 0.5 代表植被所利用有效辐射 (0.4 ~ 0.7  $\mu$ m)占太阳总辐射的比例,FPAR(x, t)则表示植被对入射光合有效辐射(PAR)的吸收 比例<sup>[14]</sup>。

$$\varepsilon(x,t) = T_{\varepsilon_1}(x,t) \times T_{\varepsilon_2}(x,t) \times W_{\varepsilon}(x,t) \times \varepsilon_{\max}$$
(3)

式中, $T_{\varepsilon^1}(x,t)$ 和 $T_{\varepsilon^2}(x,t)$ 分别为低温和高温对光 能利用率造成的影响, $W_{\varepsilon}(x,t)$ 为水分条件对其的 影响, $\varepsilon_{max}$ 代表理想状态下光能转化率。传统的 CASA模型中应用的 $\varepsilon_{max}$ 的值一般为0.389 g·MJ<sup>-1</sup>, 在实际研究中会根据研究区内的植被状况对该参 数值进行修正。本研究采用朱文泉等<sup>[16]</sup> 估算模拟 的全国不同植被的最大光能利用率,其中草地的 $\varepsilon_{max}$ 为0.542 g·MJ<sup>-1</sup>。此外,*NPP*估算公式中的*FPAR*(x, t)、 $T_{e1}(x,t)$ 和 $T_{e2}(x,t)$ 的计算可参照文献<sup>[17]</sup>。 1.3.2 *PUE*的计算 因数据来源与研究方法的差 异,不同方法计算的*PUE*存在差异。但大部分学者 都采用净初级生产力(*NPP*)与年降水量(*PPT*)的 比值来定义*PUE*<sup>[5]</sup>,计算公式为:

$$PUE = \frac{NPP}{PPT} \tag{4}$$

式中,NPP采用 CASA 模型的模拟结果,PPT 通过气象数据空间插值得到。

1.3.3 趋势分析 采用一元线性回归法分析青藏 高原 PUE 及气温降水的变化趋势及变化速率<sup>[18]</sup>, 计算公式为:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} (i \times Var_i) - (\sum_{i=1}^{n} i) (\sum_{n=1}^{n} Var_i)}{n \times (\sum_{i=1}^{n} i^2) - (\sum_{i=1}^{n} i)^2}$$
(5)

式中,*slope* 表示变化斜率,*n* 表示研究年限(14 a),*i* 代表第*i*年,*Var<sub>i</sub>*代表第*i*年的变化量。若*slope* > 0, 表示变量呈现增加趋势,反之,则表示变量呈现减 少趋势。

对植被 NPP 进行显著性检验(F 检验),可知变 化趋势可信程度高低。计算公式为:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \tag{6}$$

$$U = \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$
(7)

$$Q = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2$$
 (8)

式中,*U*为误差平方和,*Q*为回归平方和, $\hat{y}_i$ 为其回归 值, $\bar{y}$ 代表 14 a 植被 *NPP* 平均值, $y_i$  表示第 *i* 年的植 被 *NPP*,*n* 表示研究年数 14 a。通过 *F* 检验将植被 *NPP* 的变化趋势划分为以下 6 个等级:极显著增加 (*slope* > 0,*p* < 0.01),显著增加(*slope* > 0,0.01 < *p* < 0.05),不显著增加(*slope* > 0,*p* > 0.05);不显著 减少(*slope* < 0,*p* > 0.05),显著减少(*slope* < 0,*p* < 0.01)。 1.3.4 稳定性分析 变异系数可反映观测值的变 异程度,本研究用以分析草地 *PUE* 变化的稳定 性<sup>[19]</sup>,公式具体如下:

$$Cv = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (PUE_i - \overline{PUE})^2}{n-1}}}{\frac{n-1}{\overline{PUE}}}$$
(9)

式中, Cv表示变异系数,  $PUE_i$ 代表第*i*年的 PUE值, *n*为研究年限(14 a),  $\overline{PUE}$ 为 PUE的平均值。根据 变异系数的大小可将其细分为4个等级:很不稳定 (Cv > 0.3), 不稳定( $0.2 < Cv \le 0.3$ ), 稳定( $0.1 < Cv \le 0.2$ ), 非常稳定( $Cv \le 0.1$ )。

1.3.5 相关性分析 草地 PUE 与气象因子的相关 性可以采用基于像元的空间分析法分析<sup>[20]</sup>,计算 PUE 与气温降水相关性的公式如下:

$$r_{xy} = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} (x_i \times y_i) - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{\sqrt{n \times \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} x_i)^2} \sqrt{n \times \sum_{i=1}^{n} y_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} y_i)^2}}$$
(10)

式中, $r_{xy}$ 表示草地PUE与气象因子的相关系数,n表示研究年限(14 a), $x_i$ 为第i年的PUE, $y_i$ 为第i年的平均气温和降水。

## 1.4 模型验证

因实测 NPP 获取较难,所以一般通过生物量换 算的 NPP 替代实测数据来进行模型验证<sup>[21]</sup>。本研 究实测的 NPP 数据来自 2012 年与 2013 年在研究 区内选取的 63 个样点数据,样地大小为 10 m×10 m,样方大小为 1 m×1 m,每个样地选取 5 个重复。 对样方内草地地上部分进行齐地刈割,然后放入到 70℃烘箱烘干至恒重。根据根冠比和地上部分重量 进行估算,取碳利用效率 0.475,最终得到实测 NPP <sup>[14]</sup>。实测数据和模拟数据进行比较来验证模型的 精度,经计算发现两者具有较强的相关性(*R*<sup>2</sup> = 0.69,*P*<0.01),说明 CASA 模型模拟的青藏高原的 NPP 数据精度较高,可用于该区 NPP 的估算(图 2)。

# 2 结果分析

## 2.1 青藏高原草地 PUE 的时空动态

2.1.1 *PUE* 年际变化特征 对青藏高原 2000—2013 年草地 *PUE* 进行统计分析可得,其值在 2002 年出现最小值 0.29 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>,2006 年达到最大值 0.41 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>,14 a 的平均值为0.38 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>。如图 3 所示,青藏高原草地 *PUE* 总体呈现波动增加趋势,研究年限内变化速率为每年 0.0035 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>,变化百分率为 7.95%,线性增

长趋势未达到显著性水平(P>0.05)。



#### 图 2 青藏高原草地 NPP 实测值和模拟值的比较

Fig.2 Comparisons between observed and simulated net primary productivity (*NPP*) on Qinghai-Tibet Plateau



Fig.3 Dynamics of annual grassland *PUE* on Qinghai–Tibet Plateau

2.1.2 PUE 空间分布特征及动态变化 图 4 为 青 藏高原草地 2000—2013 年草地 PUE 均值的空间分 布特征,总体上呈现东部高、中西部低的基本格局。 具体分布状况为:草地 PUE 小于 0.2 g · m<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup> 的区域在青藏高原分布较少,所占总面积的比例仅 为 0.01%。草地 PUE 在 0.2~0.4 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>之 间的区域占青藏高原总面积的55.63%,主要集中在 青藏高原北部的青海湖流域、柴达木山地、昆仑北 翼山地、昆仑高寒地区,西部的阿里山地区,和南部 的藏南山地,另在其余地区也有零星分布,荒漠草 地和高山与亚高山草地为该区的主要草地类型。 草地 PUE 在 0.4~0.8 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>之间的区域出 现在中部的青南高寒地区、果洛那曲高寒地区、川 西藏东山地及东喜马拉雅山脉南翼地区,高山与亚 高山草甸在该区分布较广。PUE大于 0.8 g·m<sup>-2</sup>· mm<sup>-1</sup>的区域主要集中在青藏高原的东部,面积达到 总面积的15.24%,主要草地类型为草甸和高山与亚 高山草甸(表1)。

青藏高原草地 PUE 的变化率分布在年均 -0.259~0.0863 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>之间,呈减少趋势的 区域主要集中在研究区北部和西部,以及东部的边 界地区,呈增加趋势的地区出现在该区的中部和南 部(图 5a)。对 PUE 的变化趋势进行显著性检验可 得,PUE 极显著和显著减少的区域较少,分别占青 藏高原总面积的 0.72%和 0.38%,主要分布在帕米尔











高原地区。PUE 未显著变化区域分布较广,面积达 到研究区总面积的 80.79%,在柴达木山地、青东祁 连山地、果洛那曲高寒地区、川西藏东山地、羌塘高 寒地区、阿里山地区、藏南山地、及东喜马拉雅山脉 南翼分布较多。草地 PUE 显著和极显著增加的区 域主要集中在唐古拉山脉和巴颜喀拉山脉附近,两 种类型分别占青藏高原总面积的 13.24%、4.87% (图 5b,表 2)。

2.1.3 草地 PUE 变化稳定性特征 2000—2013 年 青藏高原草地 PUE 的变异系数分布在 0.07~0.85 之间,根据变异值的高低将其划分为 4 个类别(表 3),具体分析可知,草地 PUE 变化很不稳定的区域 主要集中在帕米尔高原、昆仑山脉西侧、羌塘高寒 地区、喜马拉雅山脉的部分地区,该类型面积占青 藏高原总面积的 15.37%。不稳定变化区域在青藏 高原的分布比例为 40.20%,主要集中在青东祁连山 地、果洛那曲高寒地区、川西藏东山地和喜马拉雅 山脉的部分地区。变化稳定的区域在该区所占面 积最大,为总面积的 43.43%,主要在唐古拉山脉和 横断山脉附近分布。草地 PUE 变化很稳定的面积仅 为该区 1%,在研究区内呈零星分布(图 6)。

表1 青藏高原草地平均 PUE 分级

 Table 1
 Classification of average grassland

 PUE on Qinghai–Tibet Plateau

草地 PUE 分级 Class of grassland PUE	所占百分比/% Percentage
< 0.2	0.01
0.2-0.4	55.63
0.4-0.6	14.82
0.6-0.8	14.30
0.8-1.0	10.53
>1.0	4.71





Fig.5 Variation trends of grassland PUE (a) and its significant test (b) on Qinghai-Tibet Plateau

#### 表 2 草地 PUE 变化所占面积百分比统计

Tabl	le 2	Percenta	ge statistics	of .	PUE	variation	in	grassland	area
------	------	----------	---------------	------	-----	-----------	----	-----------	------

-			
	斜率及显著性	变化趋势	所占面积百分比/%
	Slope and significa	nce Trend	Percentage of area
减小	Slope<0; $P < 0.01$	极显著减少 Extremely significan reduction	t 0.72
吸少 Reduction	Slope<0; $0.01 < P < 0.05$	显著减少 Significant reduction	0.38
	Slope<0; P>0.05	未显著减少 No significant reducti	11.83
	Slope>0; P>0.05	未显著增加 No significant increas	68.96
增加 Increase	Slope>0; 0.01 <p<0.05< td=""><td>显著增加 Significant increase</td><td>13.24</td></p<0.05<>	显著增加 Significant increase	13.24
	Slope>0; $P < 0.01$	极显著增加 Extremely significan increase	t 4.87



图 6 青藏高原草地 PUE 变异系数的空间分布 Fig.6 Spatial distribution of PUE variation coefficient of grassland in Qinghai-Tibet Plateau

#### 表 3 青藏高原草地 PUE 的变异系数统计

Table 3 Statistic of variation coefficients of grassland

FUE on Unghai Tibel Flateau	PUE or	ı Qinghai	-Tibet	Plateau
-----------------------------	--------	-----------	--------	---------

PUE 变异系数	稳定程度	所占百分比/%
Variation coefficient of PUE	Stability	Percentage
<i>Cv</i> >0.3	很不稳定 Very unstable	15.37
$0.2 < Cv \le 0.3$	不稳定 Unstable	40.20
$0.1 < Cv \le 0.2$	稳定 Stable	43.43
$Cv \leq 0.1$	非常稳定 Very stable	1.00

2.1.4 不同草地类型 PUE 变化趋势 由图7可知. 青藏高原不同草地类型的 PUE 值及变化趋势存在 差异。不同草地类型的 PUE 均值表现为:草甸 (1.06 g · m<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>)>坡面草地(0.80 g · m<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>)>平原草地(0.30 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>)>高山与亚 高山草甸(0.29 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>)>荒漠草地(0.23 g ・m<sup>-2</sup>・mm<sup>-1</sup>)>高山与亚高山草地(0.094 g・m<sup>-2</sup>・ mm<sup>-1</sup>)。对每种草地变化趋势进行统计分析,荒漠 草地 ( $\gamma = 0.0018x - 3.48$ )、草甸 ( $\gamma = 0.0016x +$ 4.2257)、坡面草地(y=0.015x-29.02)的 PUE 呈现 波动增加趋势,高山与亚高山草地( $\gamma = -0.0032x +$ 6.46)、高山与亚高山草甸(y=-0.0021x+5.43)、平 原草地(y=-0.0016x+4.23)的 PUE 呈现波动减少 趋势,但变化趋势都未通过显著性水平检验。表4 对每种草地类型的显著性变化的面积进行了统计, 其中每种草地类型的 PUE 都为无显著变化面积占 草地总面积的比例最大,另外,PUE 呈极显著或显 著增加的区域面积均大于极显著减少和显著减少 的面积,坡面草地无极显著和显著减少的区域。







表 4	不同草地类型 PUE 变化显著性统计	
-----	--------------------	--

Table 4 Statistics of significance test of PUE variations for different grassland types								
百分比/% Percentage	坡面草地 Slope grassland	平原草地 Plain grassland	草甸 Meadow	荒漠草地 Dessert grassland	高山与亚高山草甸 Alpine and sub alpine meadow	高山与亚高山草地 Alpine and sub alpine grassland		
极显著减少 Extremely significant reduction	0.00	1.24	0.13	1.01	0.26	0.92		
显著减少 Significant reduction	0.00	0.58	0.13	0.45	0.14	0.48		
不显著减少 No significant reduction	2.94	9.37	56.22	9.29	7.78	7.87		
不显著增加 No significant increase	82.36	74.22	37.02	81.19	62.21	83.73		
显著增加 Significant increase	11.76	9.78	4.01	7.50	21.53	5.84		
极显著增加 Extremely significant increase	2.94	4.81	2.49	0.56	8.08	1.16		

#### 2.2 青藏高原草地 PUE 与气象因素的关系

2.2.1 青藏高原气温与降水的时空变化 图 8 为 青藏高原气温降水的年际变化和变化速率。气温 减少的区域在该区分布较广,气温增加区域集中在 研究区的中南部,其变化率在年均-0.27~0.073 ℃ 之间波动(图 8a)。年际变化上,气温呈现波动减小 趋势,年均变化速率为-0.0044℃,但变化趋势不显 著(P>0.05)。14 a 的平均气温为-0.84℃,2009 年 达到最大值-0.47℃,2008 出现最小值-1.12℃(图 8c)。年均降水的变化率分布在-12.96~13.54 mm 之间,降水变化率较高区域主要分布在青藏高原的 东部地区,变化率较低地区主要分布在中部和南部 (图 8b)。时间变化上,青藏高原降水呈现波动降低 趋势,年降水的变化速率为-0.59 mm,变化趋势未



图 8 青藏高原气温(a)、降水变化速率(b)及二者的年际变化(c) Fig.8 Temperature (a), precipitation (b) and their interannual variation (c) on Qinghai-Tibet Plateau

达到显著性水平(P>0.05)。降水量 2002 年达到最 大值 465.22 mm,2009 年出现最小值 385.73 mm,14 a 的平均降水量为 429.89 mm(图 8c)。

2.2.2 PUE 与气温、降水的相关性 本研究为分析 气候状况对草地 PUE 的影响,对 2000-2013 年的 草地 PUE 像元与气温、降水像元进行相关性分析并 对相关系数空间化显示,结果如图 9a 所示,草地 PUE 与气温呈正相关的面积占该区总草地面积的 70.15%,而呈负相关的比例为 29.85%,总体上可认 为青藏高原地区草地 PUE 与气温呈正相关。草地 PUE 与气温成负相关的区域主要包括祁连山脉、羌 塘高寒地区和藏南山地,而正相关关系中,PUE 与 气温的相关性系数分布在 0~0.4 之间的区域面积 最大,主要集中在昆仑山脉和横断山脉附近。相关 性在 0.8~1.0 之间的面积最小,所占比例不足 1%, 其余呈正相关的区域还分布在唐古拉山脉和喜马 拉雅山脉附近。分析每种草地类型与气温的相关 性,坡面草地、平原草地、高山与亚高山草地与草地 呈正相关,而草甸、荒漠草地、高山与亚高山草甸与 气温呈负相关关系,除草甸(P<0.05)外,其他草地 类型与气温的相关性均不显著(表5)。



Fig.9 The correlation coefficient between grassland *PUE* and temperature (a), precipitation (b)

Table 5 Correl	ation coefficient	between differe	nt grassiano	d PUL and tempe	rature and precipitati	lon
相关系数 Correlation coefficient	坡面草地 Slope grassland	平原草地 Plain grassland	草甸 Meadow	荒漠草地 Dessert grassland	高山与亚高山草甸 Alpine and sub alpine meadow	高山与亚高山草地 Alpine and sub alpine grassland
草地 PUE-气温 Grassland PUE between temperature	0.08	0.49	-0.19*	-0.20	-0.58	0.52
草地 PUE-降水 Grassland PUE between precipitation	-0.33	-0.50	-0.36	-0.51	0.20	-0.39

表 5 不同草地 PUE 与气温和降水的相关性系数 5 Correlation coefficient between different grassland PUE and temperature and preci-

注:\*表示相关性达到 P<0.05 水平。

Note: \* indicates that the correlation was significant at P < 0.05.

草地 PUE 与降水成负相关所占的区域面积明显大于呈正相关的区域面积,则可知总体上青藏高原草地 PUE 与降水成负相关。具体分析可知,PUE 与降水成负相关的区域主要包括祁连山脉、昆仑山脉南侧、横断山脉、唐古拉山脉、以及喜马拉雅山脉。呈正相关的区域所占比例较少,其面积仅为青藏高原总草地面积的 2.04%,集中在冈底斯山脉、阿里山附近、喜玛拉雅南翼等部分地区(图 9b)。表 5 对不同草地类型与降水的相关性进行了统计,除高山与亚高山草甸外,荒漠草地、高山与亚高山草地、草甸、平原草地、坡面草地的 PUE 都与降水成负相关,但每种草地类型与降水的相关关系均未达到显著性水平(P>0.05)。

# 3 讨 论

探究区域尺度的 PUE 时空分布特征及气候响 应模式对于研究植被生产力过程具有重要意义,同 时也是研究生态系统碳水循环的重要指标。时间 上,青藏高原 PUE 呈现波动增加趋势(图 3),说明 我国青藏高原的草地生长状态正不断得到改善,这 可能与国家近年来实施的退耕还林、退耕还草,以 及草地保护措施有关[22-23]。空间上,青藏高原草地 PUE 呈现由东向西递减的趋势(图 4),这与前人研 究结果一致<sup>[7,9]</sup>。不同草地类型的 PUE 大小可能 与不同草地类型的生理学特征、群落结构、以及所 处的经纬度、土壤条件、地形地貌、气候条件和人类 活动等多种因素有关<sup>[24-25]</sup>。本研究中不同草地类 型的 PUE 间存在差异,其中草甸的 PUE 均值最高, 高山与亚高山草地 PUE 的均值最低。Hu 等<sup>[6]</sup>对青 藏高原和内蒙古高原 4 500 km 的草地样带 PUE 进 行研究,也同样得到草甸具有最高的 PUE,而高山 与亚高山草甸具有最低值。叶辉<sup>[7]</sup>和 Yang 等<sup>[10]</sup>研 究得到青藏高原地区高寒草甸的 PUE 最高,但高寒 荒漠的 PUE 最低,结果出现部分差异可能与数据来 源、研究方法和研究年限差异有关。

青藏高原草地 PUE 与气温呈正相关的面积占 总草地面积的 70.15%, 与降水呈负相关的比例为 97.96%,说明该区 PUE 与气温呈正相关,而与降水 成负相关, PUE 对降水更加敏感(图 9)。2000-2013 年青藏高原 PUE 呈现增加趋势,可能与降水 的减少,加上气温的调节作用有关。不同学者也得 到相似的结论,米兆荣等<sup>[26]</sup>从年降水利用率、生长 季降水利用率和牛长季水分利用率等3方面分析了 青藏高原高寒草地的水分利用率,研究得出随着降 水量的增加.3个指标的值都呈现降低趋势。 Humax 等<sup>[27]</sup>结合美国 14 个站点数据研究地上部净 初级生产力(ANPP)对降水量变化的响应,结果表 明随着年降水量的增加植被 PUE 会出现下降:穆少 杰等<sup>[8]</sup>对内蒙 2000—2010 年植被 PUE 进行研究得 到,大部分地区的植被 PUE 与降水量间存在正相关 关系,与气温的呈正相关的比例大于负相关。不同 研究结果存在差异,可能与不同研究区域植被 PUE 对水热组合的响应模式不同造成。造成本研究结 果的原因可能为,过多的降水会抑制草地进行光合 作用,日易形成地表径流,土壤中植物牛长所需的 营养元素会流失:另外,在土壤水分过度饱和的情 况下,土壤根系无氧呼吸作用会增强,土壤微生物 活动也会受到抑制,影响植物有机物的积累;高生 产潜力植被用于生长性和维持性呼吸的消耗较多, 众多因素的综合作用可能导致 PUE 降低。但部分 荒漠草地分布地区,草地 PUE 与降水呈正相关,可 能原因为降水是限制该区植物生长的主要因素,荒漠 草地一般具有较为发达的根系,能够利用土壤下层水 分,自身的水分利用率较高。且气孔导度较低,因此 消耗单位水量积累的有机物质较多(图1,图9)。

综上所述,草地 PUE 的影响因素众多,本研究 仅探究了其对气温和降水的响应,其他因素的作用 机制还需要进行进一步探究。但本研究结论对于 明确高寒植被生产力形成过程以及全球气候变化 的相应机制具有重要意义。

# 4 结 论

本研究基于遥感数据、实测数据、气象数据和 土地覆被数据研究了 2000—2013 年青藏高原的草 地 PUE,并探究其时空变化特征及其影响因素,主 要得到以下结论:

(1)时间上,青藏高原草地 PUE 呈现波动增加 趋势,年均增加速率 0.0035 g·m<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>,但线性 增长趋势未达到显著性水平。

(2) 青藏高原草地 PUE 空间分布具有明显的 异质性,基本呈现由东向西递减的分布格局。草地 PUE 呈减少趋势的区域主要分布在青藏高原北部 和西部,以及东部的边界地区,呈增加趋势的地区 集中在中部和南部。依据变异系数进行分析,草地 PUE 稳定变化的区域在该区所占面积最大,其主要 分布在唐古拉山脉和横断山脉附近。

(3)不同草地类型的 PUE 均值间存在差异,具体表现为:草甸>坡面草地>平原草地>高山与亚高 山草甸>荒漠草地>高山与亚高山草地。时间变化 上,每种草地类型的变化趋势均不显著。

(4)总体上,青藏高原草地 PUE 与降水呈负相 关关系,与气温呈正相关,草地 PUE 对降水响应更 加敏感,但相关性关系会随着区域气候格局及草地 类型的变化而变化。

## 参考文献:

- [1] 张静,任志远,张嘉琪. 汾河中下游土地生态系统固碳释氧动态测 评[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 242-249.
- [2] Cubasch U D, Wuebbles D, Chen D, et al. Introduction climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [J]. Computational Geometry, 2013, 18(2):95-123.
- [3] 姚玉璧,杨金虎,王润元,等.黄河源地区植被净初级生产力对气候变化的响应[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):246-252.
- [4] 同琳静,刘洋洋,王倩,等.西北植被净初级生产力时空变化及其 驱动因素[J].水土保持研究,2019,26(4):367-374.
- [5] Bai Y, Wu J, Xing Q, et al. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia plateau [J]. Ecology, 2008, 89(8):2140-2153.
- [6] Hu Z, Yu G, Fan J, et al. Precipitation-use efficiency along a 4500 km grassland transect [J]. Global Ecology & Biogeography, 2010, 19 (6):842-851.
- [7] 叶辉, 王军邦, 黄玫, 等. 青藏高原植被降水利用效率的空间格局 及其对降水和气温的响应[J]. 植物生态学报, 2012, 36(12): 1237-1247.
- [8] 穆少杰,周可新,齐杨,等.内蒙古植被降水利用效率的时空格局

及其驱动因素[J]. 植物生态学报, 2014, 38(1):1-16.

- [9] 仇洁,张慧,沈渭寿.青藏高原1982—2007年植被降水利用效率空间格局特征分析[J].复旦学报(自然科学版),2014,53(1): 126-133.
- [10] Yang Y, Fang J, Fay P A, et al. Rain use efficiency across a precipitation gradient on the Tibetan Plateau [J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(15):78-82.
- [11] 孟梦,牛铮,马超,等.青藏高原 NDVI 变化趋势及其对气候的响应[J].水土保持研究, 2018, 25(3):360-372.
- [12] 李净,刘红兵,李龙,等.基于多源遥感数据集的近 30a 西北地区 植被动态变化研究[J].干旱区地理(汉文版),2016,39(2): 387-394.
- [13] Ran Y H, Li X, Lu L. Evaluation of four remote sensing based land cover products over China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(2):391-401.
- [14] 周伟, 牟凤云, 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): 4335-4345.
- [15] 杨东辉,赵军,张智慧,等.近10年甘南牧区草地净初级生产力 变化研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):257-263.
- [16] 朱文泉,陈云浩,徐丹,等.陆地植被净初级生产力计算模型研究进展[J].生态学杂志,2005,24(3):296-300.
- [17] 刘雪佳,赵杰,杜自强,等. 1993—2015 年中国草地净初级生产力 格局及其与水热因子的关系[J].水土保持通报,2018,38(1): 299-305.
- [18] 王钊,李登科. 2000—2015 年陕西植被净初级生产力时空分布特 征及其驱动因素[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6):1876-1884.
- [19] 王芳, 汪左, 张运. 2000—2015 年安徽省植被净初级生产力时空 分布特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(8):2754-2767.
- [20] 穆少杰,李建龙,周伟,等. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产 力的时空格局及其与气候的关系[J]. 生态学报,2013,33(12): 3752-3764.
- [21] Wang Z, Zhang Y, Yang Y, et al. Quantitative assess the driving forces on the grassland degradation in the Qinghai–Tibet Plateau, in China [J]. Ecological Informatics, 2016, 33:32-44.
- [22] 宋富强,杨改河,冯永忠.黄土高原不同生态类型区退耕还林 (草)综合效益评价指标体系构建研究[J].干旱地区农业研究, 2007,25(3):169-174.
- [23] 张镱锂, 祁威, 周才平, 等. 青藏高原高寒草地净初级生产力 (NPP)时空分异[J]. 地理学报, 2014, 68(2):1197-1211.
- [24] Lehouerou H N. Rain-Use Efficiency: a unifying concept in arid-Land ecology [J]. Journal of Arid Environments, 1984, 7(3):213-247.
- [25] Paruelo J M, Lauenroth W K, Burke I C, et al. Grassland precipitation-use efficiency varies across a resource gradient [J]. Ecosystems, 1999, 2(1):64-68.
- [26] 米兆荣,陈立同,张振华,等.基于年降水、生长季降水和生长季 蒸散的高寒草地水分利用效率[J].植物生态学报,2015,39(7): 649-660.
- [27] Huxman T E, Smith M D, Fay P A, et al. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency [J]. Nature, 2004, 429 (6992): 651-654.