doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.010

云南省现状草原植被净初级生产力和降水利用效率的空间分布格局研究

饶 昕,吴 鹏,索 默,岳丽兴,傅俊涛,李舒婷,陈 斌,刘金凤
(云南省林业调查规划院昆明分院,云南 昆明 650299)

摘要:以 MOD17A3HGF 的 NPP 产品为基础数据,基于变异函数进行气象插值,研究云南省现状草原植被净初级生产力 NPP 与植被降水利用率 PUE 空间分布规律,分析地形和气候因子对其的影响。结果表明,云南省现状草原 NPP 均值为 976.88 gC/(m^2·a),空间分布总体上由南向西北递减,最高为西双版纳州,最低为迪庆州;PUE 分布有较强的空间异质性,均值为 1.08 gC/(m^2·mm·a),最高为大理州,最低为迪庆州。8 个天然草原类中热性草丛 NPP 均值最高,为 1 078.34 gC/(m^2·a);山地草甸 PUE 均值最高,为 1.11 gC/(m^2·mm·a);高寒草甸 NPP 和 PUE 均值最低,为 537.05 gC/(m^2·a)和 0.62 gC/(m^2·mm·a)。云南现状草原 NPP 和 PUE 同时受气候、地形、人为活动、草原盖度共同影响,NPP 随海拔上升而降低,随气温和降水增加而增加;PUE 随气温和海拔上升呈先上升后下降趋势,NPP 和 PUE 在不同气温、降水和海拔区间均差异显著($P<0.05$)。NPP 和 PUE 随坡度增加呈先上升后下降趋势,具有显著的坡向效应,总体上为从西坡至东南坡逐渐增加,阳坡和阴坡 NPP 和 PUE 均差异显著($P<0.05$)。

关键词:植被降水利用效率(PUE);植被净初级生产力(NPP);空间格局;草原类;云南省

中图分类号:S718.556;S718.512.3;S812 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-3168(2025)06-0070-09

引文格式:饶昕,吴鹏,索默,等. 云南省现状草原植被净初级生产力和降水利用效率的空间分布格局研究[J]. 林业调查规划,2025,50(6):70-78. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.010

RAO Xin, WU Peng, SUO Mo, et al. Spatial Patterns of Net Primary Productivity and Precipitation Utilization Efficiency in Grassland of Yunnan Province[J]. Forest Inventory and Planning, 2025, 50(6): 70-78. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.010

Spatial Patterns of Net Primary Productivity and Precipitation Utilization Efficiency in Grassland of Yunnan Province

RAO Xin, WU Peng, SUO Mo, YUE Lixing, FU Juntao, LI Shuting, CHEN Bin, LIU Jinfeng
(Kunming Branch of Yunnan Institute of Forest Inventory and Planning, Kunming 650299, China)

Abstract: Using the NPP product of MOD17A3HGF as base data and employing meteorological interpolation based on the variation function, this study investigated the spatial patterns of net primary productivity (NPP) and precipitation utilization efficiency (PUE) in grassland of Yunnan Province, and analyzed the effects of topographic and climatic factors. The results showed that the mean value of NPP in the current grassland of Yunnan Province was 976.88 gC/(m^2·a), and the spatial distribution decreased from

收稿日期:2024-08-02;**修回日期**:2024-09-05
基金项目:云南省林业调查规划院昆明分院科技研究项目(KF KJXM 2015-014).
第一作者:饶昕(1992-),男,硕士,工程师. 从事林业和草原调查规划工作. Email:394242551@qq.com
责任作者:刘金凤(1995-),女,硕士,工程师. 从事林业和草原调查规划工作. Email:2805744130@qq.com

south to northwest, with the highest NPP in Xishuangbanna Prefecture and the lowest NPP in Deqen Prefecture; the distribution of PUE showed strong spatial heterogeneity, with an average value of 1.08 gC/(m^2·mm·a), being highest in Dali Prefecture and lowest in Deqen Prefecture. Among the eight natural grassland types, the mean value of NPP in tropical grassland was the highest, which was 1 078.34 gC/(m^2·a); the mean value of PUE in mountain meadow was the highest, which was 1.11 gC/(m^2·mm·a); the mean values of NPP and PUE in alpine meadow were the lowest, which were 537.05 gC/(m^2·a) and 0.62 gC/(m^2·mm·a) respectively. Both NPP and PUE of grassland in Yunnan were affected by climate, terrain, human activities and grassland coverage. NPP decreased with increasing altitude but increased with temperature and precipitation; PUE showed an initial increase followed by a decrease with rising temperature and altitude, and NPP and PUE were significantly different in different air temperature, precipitation and altitude ($P < 0.05$). Both NPP and PUE initially increased and then decreased with increasing slope, demonstrating significant slope direction effect, generally increasing from western to southeastern slopes, and significant differences ($P < 0.05$) in NPP and PUE were found between sunny and shady slopes.

Key words: precipitation utilization efficiency (PUE); net primary productivity of vegetation (NPP); spatial pattern; grassland type; Yunnan Province

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)反映了植被的健康状况和物质生产能力,植被降水利用效率(precipitation utilization efficiency, PUE)是评价 NPP 对年降水动态响应的重要指标,对了解自然状态下植被生产力的变化尤为关键。

草原净初级生产力(NPP)是指植物光合作用产生的干物质,反映了植被的生产能力[1]。草原 NPP 为农牧民畜牧业发展提供相对稳定的物质基础,也反映出草地生态系统的健康状况,具有重要的经济、生态参考价值[2]。研究云南省现状草原 NPP 的空间分布格局及其影响因素对草原生态系统的保护、合理利用及可持续发展具有重要的理论和现实意义。目前,国内对草原植被 NPP 进行了大量研究工作,主要集中于草原 NPP 的时空变化及其影响因素研究[3-5]以及干旱胁迫[6]、放牧强度[7]等对草原 NPP 的影响。气候变化是影响草原 NPP 的主要因素,气温、降水、地形等交互作用共同影响着草原的分布,人类活动在其中也扮演着重要角色。以往的研究多集中在单一草原类型[8]、单一草本植物[9]、年际变化[10]中,对固定区域不同草原类型 NPP 的分类研究较少。

植被降水利用效率(PUE)是植被对降水的利用能力,指植物光合作用产生的干物质(NPP)与年降水量之间的比值,可反映植被生态系统碳循环状况,是植被退化评估的参考指标[11-12]。云南省降水在季节上和地域上的分配极不均匀,干湿季节分明,雨季(5—10 月)集中了 85%的降雨量;旱季(11 月至次年 4 月)降水量仅占全年的 15%;全省降水的地域分布差异大,降雨最多的区域年降水量可达 2 200~2 700 mm,最少的仅 584 mm,大部分地区年降水量在 1 000 mm 以上[13]。利用 PUE 评估草原生态系统的健康状况,揭示气候变化、人类活动和地形因子对云南省草地 PUE 的影响是保障区域草地生态系统稳定性和可持续发展的重要研究方向[14]。前人的研究表明,PUE 的影响因素包括植被结构[15]、非季节性降水[16]、生长季节降水[17]、气候变化[14]等方面,对特定生态系统的特定植被而言,PUE 的空间分布及影响因素有各自特点[15]。

云南省以山地和高原地形为主,约占全省总面积的 94%,坝子仅占比 6%[18],气候类型复杂多样,生物多样性丰富。目前对云南植被 NPP 和 PUE 的研究多集中在单一区域,如典型矿区[19]、断陷盆地[20],或全省植被 NPP 在长时间序列上的研究[21],对现状不同类别草原的 NPP 和 PUE 研究较少。本文通过研究现状草原 NPP 和 PUE 在全省的空间分布格局以及 8 个天然草原类的分布状况,分析影响 NPP 和 PUE 空间分布的因素,可为云南省草原健康与退化评估、生态修复项目规划、可持续发展提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

云南省地处中国西南边陲,北回归线横贯南部,属低纬度内陆地区。全省东西最大横距 864.9 km,南北最大纵距 990 km,介于东经 97°31′~106°11′,北纬 21°8′~29°15′范围,全省土地面积 3.83×10^7 hm^2,草

原面积 1.32×10^6 hm^2，占土地面积的 3.45%[13,22]。其中现状草原面积 1.31×10^6 hm^2，占国土“三调”草原面积的 98.96%。本文以天然现状草原为研究对象，探究云南省现状草原净初级生产力和降水利用率的空间分布格局。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 净初级生产力(NPP)数据

使用的 NPP 数据为美国国家航空航天局(NASA)2018 年发布的对地观测系统/中分辨率成像光谱仪(EOS/MODIS)遥感数据(MOD17A3HGF V061)，来源于 NASA 地球科学数据系统(www. earthdata. nasa. gov)。该数据利用 BIOME-BGC 模型与光能利用率模型建立的 NPP 估算模型模拟得到陆地生态系统年 NPP，已在全球和区域 NPP 与碳循环研究中得到广泛应用[23]。数据空间分辨率为 0.005 8°，数据格式为 hdf。进行拼接、几何校正、坐标转换和 Nodata 填补等处理。

1.2.2 其他数据

气象数据来源于云南省 125 个气象站采集的年均温、年均降水量，数据格式为 txt，使用 ArcGIS Pro 进行矢量化。地形数据使用哥白尼数字高程模型(COP-DEM)，空间分辨率为 30 m，数据格式为 GeoTiff，来源于哥白尼 panda 网站(https://panda. copernicus. eu/panda)，提取海拔、坡度、坡向等 3 项地形因子。单位面积生产总值(GDP)、单位面积人口(POP)数据来源于资源环境科学数据注册与出版系统[24-25]。使用云南省草原基况监测成果提取全省现状草原范围和草原类型。所有栅格数据分辨率均重采样至与 NPP 一致。

1.3 研究方法

使用 NASA 的 MOD17A3HGF 产品作为净初级生产力(NPP)数据，基于变异函数分析对全省 125 个气象站点数据进行空间插值，提取和计算云南省现状草原的 NPP 和植被降水利用效率，结合云南省草原基况监测成果和地形数据，分析其空间分布规律；使用 Pearson 相关系数分析现状草原的 NPP 和植被降水利用效率空间异质性的原因。

1.3.1 空间插值

由于气象数据为点状分布，缺乏空间连续性，无法直接用于统计分析。克里格法(Kriging)是根据待插值点与临近实测高程点的空间位置，对待插值点的高程值进行线性无偏最优估计，并得到对应位置高程的插值图来估计拓展目标区域的原始地形[26]，在复杂的气象数据空间插值中有较高效率和准确度[27]。

变异函数是进行克里格空间插值的理论基础[28]，通过定量描述地理信息的空间自相关性，以表征区域化变量的空间分布格局，变异函数公式为：

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)] \quad (1)$$

式中：$N(h)$ 为距离 h 时的点对数。

变异函数有 4 个重要参数：块金值、变程、基台值、偏基台值。常用的模型有球状模型、指数模型、高斯模型和线性模型 4 种。

研究使用地学分析软件 GS+9 对待插值数据进行变异函数分析，以模型决定系数(R^2)和块金系数(C_0/C_0+C)对模型进行评价，块金系数越接近 0，说明空间变异程度越低、空间自相关性越好，引起空间变异的主要是结构性因素；块金系数越接近 1 则说明空间变异程度越高、空间自相关性差，引起空间变异的主要为随机因素。进行地统计空间插值的前提是块金系数小于 0.75。

1.3.2 植被降水利用效率

植被降水利用效率(PUE)为年净初级生产力与年降水量的比值[29]，公式为：

$$PUE=\frac{NPP}{PPT} \quad (2)$$

式中：NPP、PPT 分别为年净初级生产力(gC/(m^2·a))和年降水量(mm)。

1.3.3 地形、气候因子分类

参照《全国生态状况调查评估技术规范—森林生态系统野外观测(HJ 1168—2021)》标准[11]，结合云南省现状草原分布情况，将海拔划分为：<1 000 m、≥1 000~2 000 m、≥2 000~3 000 m、≥3 000~4 000 m、≥4 000 m 5 个等级。坡度划分为：平坡(0°~5°)、缓坡(≥5°~15°)、斜坡(≥15°~25°)、陡坡(≥25°~35°)、急坡(≥35°~45°)和险坡(≥45°)共 6 个等级。坡向划分为：北坡(337°~360°，0°~22°)、东北坡(22°~67°)、东坡(67°~122°)、东南坡(122°~157°)、南坡(157°~202°)、西南坡(202°~247°)、西坡(247°~292°)、西北坡(292°~337°)共 8 个方向。年均温、年均降水量根据草原范围采用自然断点法划分为 5 类。

1.3.4 数据处理

采用 WPS 对数据进行统计分析；采用 ArcGIS Pro 对遥感数据进行处理；采用 SPSS 27 对数据进行 Pearson 相关性分析和单因素方差分析[30]，采用新复极差法对平均数进行多重比较。采用 Origin Pro 和 ArcGIS 10.8 绘图。

2 结果分析

2.1 气象插值

变异函数分析结果表明,年均温最优模型为指数模型,年均降水量最优模型为球状模型,2 个因子最优模型的 R^2 均大于 0.9,有较好的拟合精度;块金系数均小于 0.1,表明其由空间自相关性引起的异质性在总空间异质性占比超 90%,而由随机因素引起的空间变异性占比小于 10%,符合克里格插值条件。使用 ArcGIS Pro 软件以最优模型及对应参数进行克里格插值,最优模型和插值结果见表 1 和图 1。

表 1　气象插值最优模型

Tab. 1　Meteorological interpolation optimal model

气象因子	最优模型	决定系数 R^2	块金值 C_0	基台值 C_0+C	偏基台值 C	变程 a	块金系数 $C_0/(C_0+C)$
年均温	指数模型	0.969	1.63	18.14	16.51	17.631	0.09
年均降水量	球状模型	0.979	9100	117800	108700	3.008	0.08

2.2 NPP 和 PUE 空间分布格局

2.2.1 全省 NPP 和 PUE 分布规律

云南省现状草原的 NPP 空间分布格局总体上由南向西北递减,与年均温分布格局相近,NPP 较高区在北回归线以南,NPP 较低区集中分布在滇西北横断山脉,滇池、洱海、金沙江下游区域 NPP 也普遍低于周边。由于云南复杂的地形和气候,PUE 表现出较强的空间异质性,PUE 较低区集中分布在横断山脉和怒江流域,最低为迪庆州;滇中偏西地区普遍较高,特别是大理州东部 PUE 明显高于周边地区(图 2)。

2.2.2 各地州 NPP 和 PUE 均值

各州(市)与各草原类的 NPP 和 PUE 均值见图 3。

从图 3 可知,NPP 均值最高的是西双版纳州,达到 1 426.57 gC/(m²·a),但其 PUE 均值仅为 1.02 gC/(m²·mm·a),低于全省平均值(1.08 gC/(m²·mm·a)),德宏州情况与之类似;迪庆州 NPP 和 PUE 均值均为全省最低,为 710.37 gC/(m²·a) 和 0.79 gC/(m²·mm·a);大理州 NPP 均值接近全省平均值(976.88 gC/(m²·a)),为 1 002.51 gC/(m²·a),但 PUE 均值全省最高,达 1.39 gC/(m²·mm·a),特别是东部祥云县和宾川县内存在 PUE 超过 2 gC/(m²·mm·a)的区域。

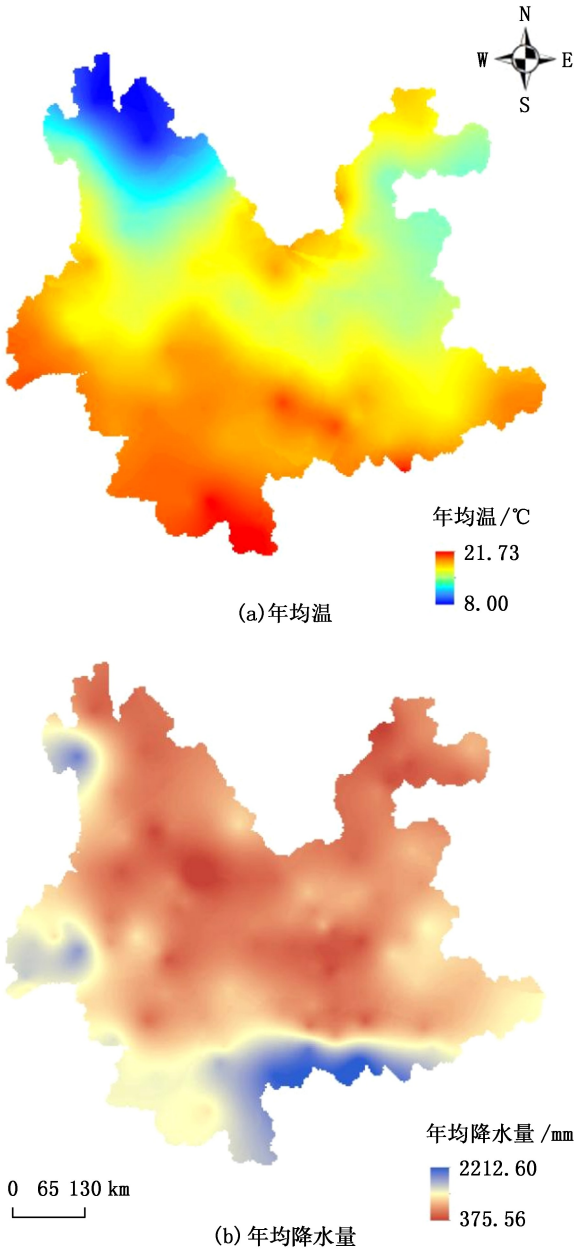


图 1　云南省气象因子插值

Fig. 1　Meteorological factor interpolation in Yunnan Province

2.2.3 各草原类 NPP 和 PUE 均值

云南省 8 个天然草原类中,热性草丛类主要分布在滇南水热充沛区,NPP 均值最高,为 1 078.34 gC/(m²·a);山地草甸类是面积最大的草原类,全省均有分布,PUE 均值最高为 1.11 gC/(m²·mm·a);干热稀树草原类主要分布在楚雄州和红河州部分区域,NPP 均值为 842.85 gC/(m²·a),但 PUE 均值较高,达 1.04 gC/(m²·mm·a);高寒草甸类 NPP、PUE 均值均为最低,为 537.05 gC/(m²·a) 和 0.62 gC/(m²·mm·a)。NPP 均值除低地草甸类和暖性灌草丛类外,均差异显著($P<0.05$);PUE 均值除高寒

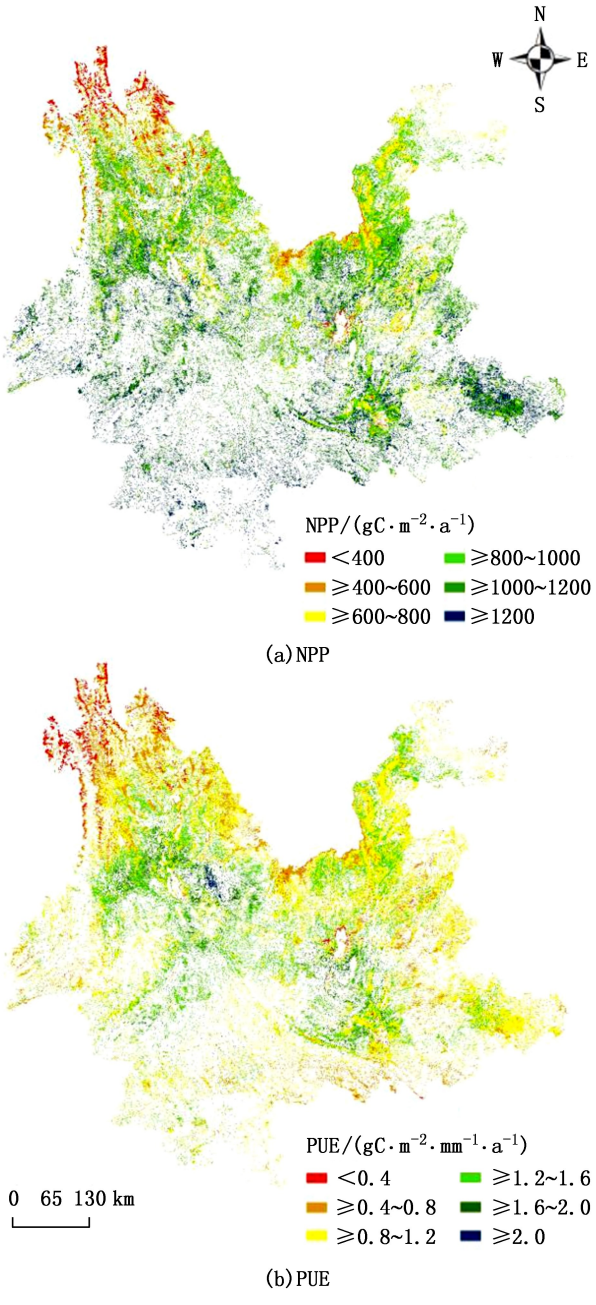
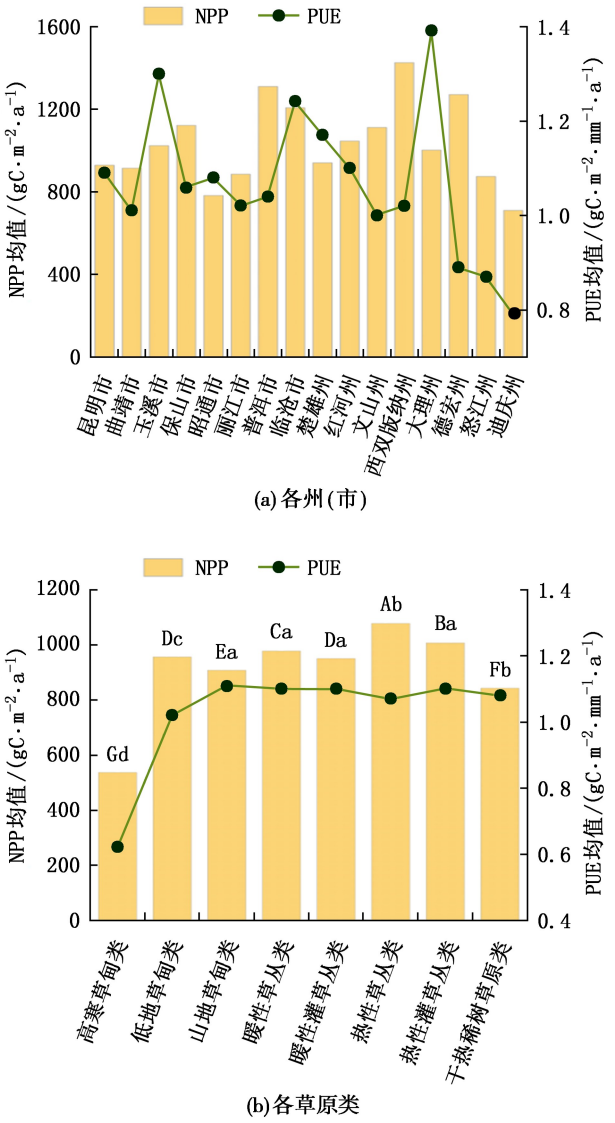


图 2　云南省现状草原 NPP 和 PUE 空间分布

Fig. 2　Distribution map of NPP and PUE in grassland of Yunnan Province



注:不同大写字母表示 NPP 差异显著(P<0.05),不同小写字母表示 PUE 差异显著(P<0.05)。

图 3　各州(市)与各草原类的 NPP 和 PUE 均值

Fig. 3　Mean value of NPP and PUE in each city and grassland type

草甸类显著低于其他草原类(P<0.05),其余差异不显著。

2.3 影响因素分析

为探究影响 NPP 和 PUE 的因素,提取气象、地形、社会经济、人为活动、草原盖度等 8 项因子与 NPP、PUE 值进行 Pearson 相关性分析,以获取相关系数 r 量化因子与 NPP 和 PUE 高低的相关度(表 2)。

从表 2 可知,除单位面积国民生产总值 GDP 外,NPP 与其余 7 项因子均呈显著相关(P<0.01),表明 NPP 同时受气象、地形、人为活动、草原盖度共同影响,与社会经济状况相关性不强;其中气温是正相关性最强的因子,降水量也表现出较强正相关性,海拔是负相关性最强的因子,这与全省 NPP 分布规律相一致。

PUE 与坡度无相关性,与其余 7 项因子均呈显著相关(P<0.01),气温与海拔对 PUE 的影响与 NPP 基本一致,但降水量表现出较强的负相关性。

2.3.1 气候的影响

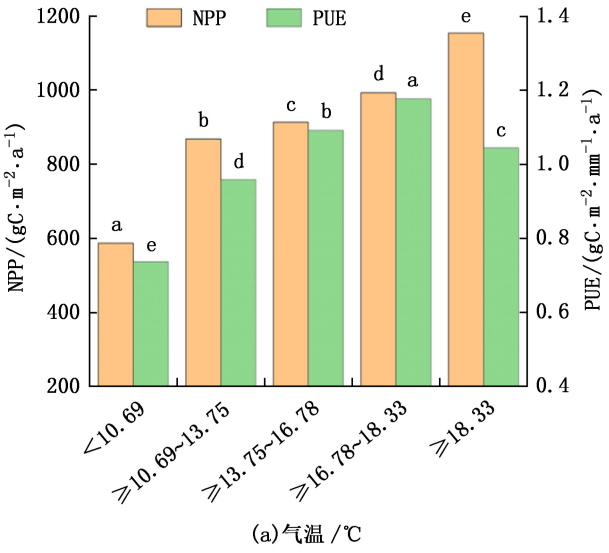
现状草原 NPP 随气温和降雨量的增加而升高(图 4)。PUE 随气温呈先上升后下降趋势,随降水

表 2　NPP、PUE 与影响因素 Pearson 相关系数

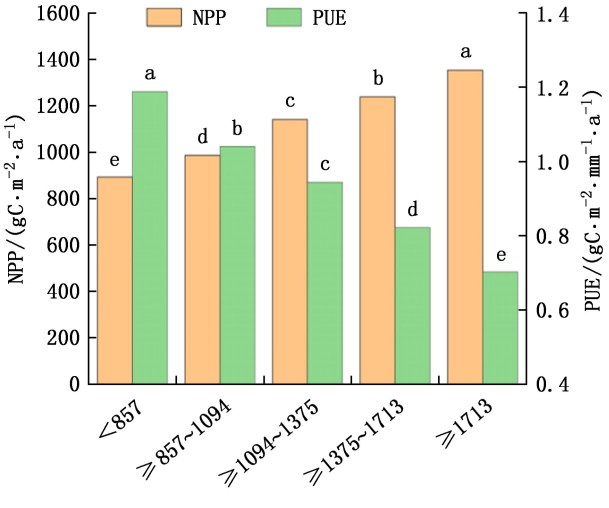
Tab. 2　Pearson correlations coefficient of NPP, PUE and influencing factors

影响因素	NPP	PUE
草原盖度	0. 278 **	0. 151 **
海拔	−0. 437 **	−0. 33 **
坡度	0. 046 **	0. 000
降水量	0. 363 **	−0. 276 **
气温	0. 563 **	0. 432 **
POP	0. 068 **	0. 142 **
GDP	0. 004	0. 045 **

注:** 表示 $P<0.01$ 的显著性水平。



(a)气温 /℃



(b)年降水量 /mm

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

图 4　云南省现状草原 NPP 和 PUE 的气温和降水特征

Fig. 4　Temperature and precipitation characteristics of NPP and PUE in current grassland of Yunnan Province

量增加而降低,当气温为 16. 18~18. 33℃时 PUE 最高,为 1. 18 gC/(m²·mm·a),不同气温和降水量区间的 NPP 和 PUE 均差异显著($P<0.05$)。

2. 3. 2　海拔的影响

现状草原 NPP 随海拔上升呈降低的趋势(图 5)。PUE 呈先上升后下降趋势,当海拔为 2 000~3 000 m 时 PUE 最高,为 1. 17 gC/(m²·mm·a);当海拔≥4 000 m 时,NPP 和 PUE 均为最低值,分别为 463. 8 gC/(m²·a)和 0. 56 gC/(m²·mm·a),不同海拔区间 NPP 和 PUE 均差异显著($P<0.05$)。

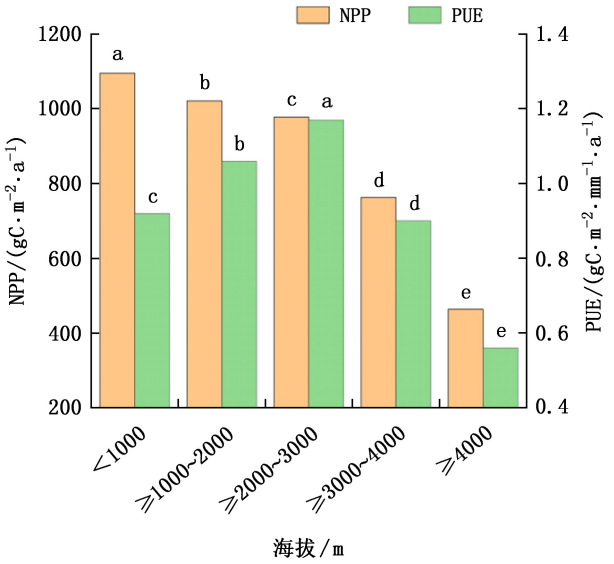


图 5　云南省现状草原 NPP 和 PUE 的海拔特征

Fig. 5　Altitude characteristics of NPP and PUE in current grassland of Yunnan Province

2. 3. 3　坡度的影响

现状草原 NPP 和 PUE 随坡度增加呈先上升后下降趋势(图 6)。斜坡的 NPP 和 PUE 值最高,分别为 1 009. 67 gC/(m²·a)和 1. 12 gC/(m²·mm·a),平坡的 NPP 和 PUE 值最低,分别为 855. 32 gC/(m²·a)和 0. 96 gC/(m²·mm·a)。不同坡度级的 NPP 和 PUE 均差异显著($P<0.05$)。

2. 3. 4　坡向的影响

云南省现状草原各坡向 NPP 介于 955. 11~987. 91 gC/(m²·a)范围,PUE 介于 1. 07~1. 10 gC/(m²·mm·a)范围,虽然不同坡向之间绝对值差异不大,但表现出显著的坡向效应,总体上从西坡至东南坡 NPP 和 PUE 逐渐增加,阳坡和阴坡 NPP、PUE 差异显著($P<0.05$)(图 7)。

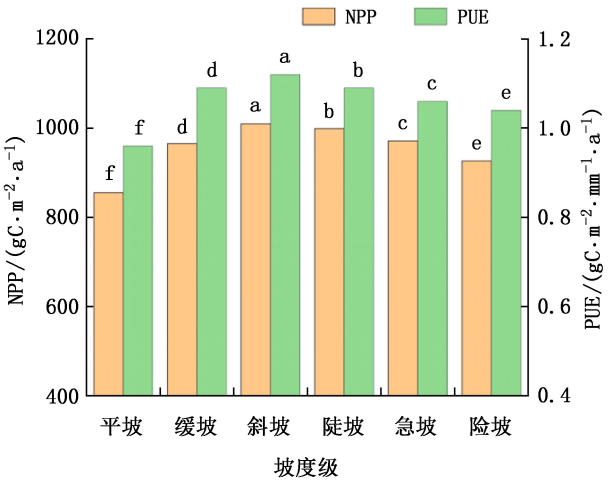
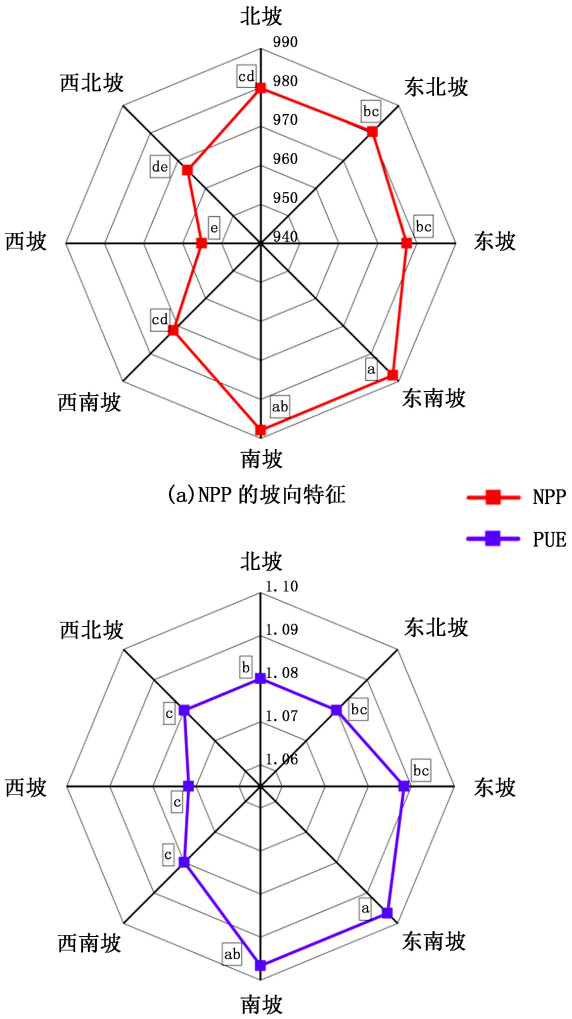


图 6　云南省现状草原 NPP 和 PUE 的坡度特征

Fig. 6　Slope characteristics of NPP and PUE in current grassland of Yunnan Province



(a)NPP 的坡向特征

(b)PUE 的坡向特征

图 7　云南省现状草原 NPP 和 PUE 的坡向特征

Fig. 7　Aspect characteristics of NPP and PUE in current grassland of Yunnan Province

3 讨　论

3.1 云南省现状草原 NPP 和 PUE 空间分布格局

从全省看，现状草原的 NPP 空间分布格局与年均温分布格局相似，总体表现为随年均温的降低，草原的 NPP 值下降，这与郑洁茹[21]等的研究结果相似，PUE 值较低区域集中分布在海拔较高的横断山脉和怒江流域，区域主要草原类型为高寒草甸和山地草甸，草本植物高度较低，NPP 和 PUE 平均值较小。云南省现状草原 NPP 均值为 976.88 gC/(m^2·a)，PUE 均值为 1.08 gC/(m^2·mm·a)，在全国范围均属于极高值[31-33]，表明云南省独特的自然条件对草原生态系统发育有极强的驱动力。

从各州市 NPP 和 PUE 的分布来看，德宏州、西双版纳州、普洱市是草原 NPP 均值最高的 3 个地区，PUE 均值反而低于全省平均值，原因可能是地处滇南水热充沛、适宜植物生长区域，当降水量远超过草原植被生长所需量时，草原植被 NPP 不再随降水量增加而增加，因此 PUE 均值偏低。大理州草原 NPP 均值中等，但 PUE 均值为全省最高，原因可能是草原生长于坝区周边，虽然自然降水较少(图 1)，但频繁的农业生产用水和区域小地形导致空气湿度较高，一定程度补充了植物生长所需水分。

3.2 各草原类的差异性分析

草原类是草原分类系统的基本单位，以生物气候要素中的水热组合为指标[34]，云南省气候和地理的多样性造就了丰富的草原类。热性草丛类的 NPP 均值最高，因热性草丛类水热条件优越，草群生长旺盛，植株较为高大。干热稀树草原类 PUE 排序明显高于 NPP 排序，原因是干热稀树草原主要分布在楚雄州和红河州的干热河谷区域，较少的降水导致植物根系比较发达，利用地下土壤水分的能力较强[35]。低地草甸类 PUE 排序明显低于 NPP 排序，低地草甸类以隐域性分布在地下水丰富的湿润低洼地，受地表径流汇聚的影响，自然降水超过了生长需求，因此 PUE 均值较低。高寒草甸类集中分布在滇西北海拔大于 3 800 m 的高原，较极端的生境导致高寒草甸类的 NPP 和 PUE 均值显著低于其他 7 个草原类($P<0.05$)。差异明显的生境是各草原类的 NPP 差异显著的原因，PUE 差异不显著可能是因不同草原类对水分的利用具有内在的趋同性[17]。

3.3 气候对 NPP 和 PUE 空间分布格局的影响

气温对草原 NPP 和 PUE 具有显著正相关性($P<0.01$)，降水量对 NPP 均值呈显著正相关($P<0.01$)，

说明丰富的水热条件会促进植物生产力;但降水量对草原 PUE 均值表现出较强的负相关性($P<0.01$),说明云南省降水量普遍能满足草原植物生长所需,当降水量继续增加导致土壤水分过量,可能对植物根系供氧产生抑制,影响到植物的生长[36]。气温和降水对植被 NPP 和 PUE 具有重要影响,这与叶辉[37]等的研究有一定的相似性。在干燥少雨的中北部,地区气候影响了植物对干物质的积累导致 NPP 偏低,但由于干热地区深根植物较强的水利用能力,PUE 反而较高。

3.4 地形对 NPP 和 PUE 空间分布格局的影响

除气候因子外,海拔也是影响草原 NPP 和 PUE 的重要因素,随海拔升高草原 NPP 呈下降趋势,PUE 呈先升高后下降趋势,这与潘换换[38]、仇洁[35]等的研究结果相似。云南省现状草原 NPP 和 PUE 随坡度的增加呈先上升后下降趋势,斜坡的 NPP 和 PUE 均值最高,这与黄少平[39]等研究结果一致,符合云南省草原 56.13%分布在斜坡上以及人为活动少对草原原生植被的影响小的实际情况。现状草原 NPP 和 PUE 值表现出显著的坡向效应,西坡 NPP 和 PUE 值最小,东南坡最大,与赵浩然[11]等研究结果相似。阳坡和阴坡 NPP 和 PUE 差异显著,可能是阳坡具有更多的日照和热量资源,因此植物进行光合作用的能力和效率均明显优于阴坡。云南省不同海拔区间、不同坡度级、阳坡和阴坡的 NPP 和 PUE 均存在显著差异($P<0.05$),表明云南复杂立体多样的地形条件造就了丰富多彩的草原生态系统。

3.5 数据不确定性

本研究所采用 NPP 数据为遥感采集参数,利用 BIOME-BGC 模型与光能利用率模型模拟计算得到,遥感易受到大气作用、太阳高度角、地形起伏和传感器特性的影响,模型的计算也会进一步放大不确定性;气象数据由空间插值获得,云南省共有 125 个气象站点,存在站点稀少、分布不均和地形复杂的问题,可能会对插值结果的精度产生一定影响。本研究为 2022 年云南省现状草原 NPP 和 PUE 空间分布格局,还需要长时序地研究来论证气候因子、地形因子等环境因素对 NPP 和 PUE 空间分布的影响。

4 结　论

分析云南省现状草原净初级生产力(NPP)和降水利用效率(PUE)时空特征和气候驱动因素。研究结果表明,云南省现状草原 NPP 均值为 976.88 gC/(m^2·a),空间分布总体上由南向西北递减,PUE 分布有较强的空间异质性,均值为 1.08 gC/(m^2·mm·a)。各草原类间 NPP 和 PUE 差异较大,NPP 均值从大到小顺序为:热性草丛类>热性灌草丛类>暖性草丛类>低地草甸类>暖性灌草丛类>山地草甸类>干热稀树草原类>高寒草甸类;PUE 均值从大到小顺序为:山地草甸类>暖性草丛类>暖性灌草丛类>热性灌草丛类>干热稀树草原类>热性草丛类>低地草甸类>高寒草甸类。

云南省现状草原 NPP 和 PUE 同时受气候、地形、人为活动、草原盖度共同影响。气温升高对现状草原 NPP 和 PUE 起不同程度的促进作用,降水量在一定程度范围内对 NPP 起促进作用,降水增多会抑制 PUE,NPP 与海拔具有强负相关性,PUE 随海拔上升呈先上升后下降趋势,NPP 和 PUE 随坡度增加呈先上升后下降趋势,总体上为从西坡至东南坡逐渐增加,阳坡和阴坡 NPP 和 PUE 差异显著。基于云南省现状草原 NPP 和 PUE 分布规律,可为云南省草原生态系统的健康与退化评估、保护与修复及可持续利用提供科学参考。

参考文献:

[1] KEELING C D,CHIN J F S,WHORF T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO_2 measurements[J]. Nature,1996,382:146-149.

[2] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报,2012,67(1):3-12.

[3] 范蒙恩,王佩尧,陈宇,等. 未来不同气候情景下全球草地生态系统及净初级生产力时空动态分析[J]. 草地学报,2023,31(12):3597-3607.

[4] 陈底,许玉凤. 天山北坡经济带稳定草地净初级生产力时空变化特征及其驱动力[J]. 草业科学,2023,40(5):1154-1167.

[5] 吴丽媛,神祥金,刘奕雯,等. 青藏高原草本沼泽植被净初级生产力时空变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学报,2024,44(5):2115-2126.

[6] 小红,王永芳,郭恩亮,等. 干旱对锡林郭勒草原植被净初级生产力的影响[J]. 气候与环境研究,2024,29(1):90-102.

[7] 闫卫民,张世彬,杨元武. 放牧强度对高寒草甸物种多样性和生产力关系的影响[J]. 草业科学,2024,41(3):539-547.

[8] 王志鹏,张宪洲,何永涛,等. 降水变化对藏北高寒草原化草甸降水利用效率及地上生产力的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(6):1822-1828.

[9] 陈林,陈高路,宋乃平,等. 宁夏东部荒漠草原猪毛蒿光

和特征和水分利用效率对降水变化的响应[J]. 草业学报,2022,31(10):87-98.
[10] 吴丽媛,神祥金,刘奕雯,等. 青藏高原草本沼泽植被净初级生产力时空变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学报,2024,44(5):2115-2126.
[11] 赵浩然,曹生奎,曹广超,等. 2000—2020 年青海湖流域植被降水利用效率时空变化特征[J]. 生态学报,2024(8):1-17.
[12] 滑永春,马秀枝,斯钦毕力格. 内蒙古荒漠草原植被降水利用效率的时空特征[J]. 中国沙漠,2021,41(4):51-58.
[13] 陈宗瑜. 云南气候总论[M]. 北京:气象出版社,2001.
[14] 刘辉,宋孝玉,贾琼,等. 近 20 年内蒙古鄂托克旗草地降水利用效率时空演变的驱动力量化[J]. 应用生态学报,2022,33(12):3253-3261.
[15] 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.
[16] 张洛梓,梁彪,陈清,等. 非生长季降水对内蒙古草原生产力和物种组成的影响[J]. 天津师范大学学报(自然科学版),2021,41(1):42-47.
[17] 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.
[18] 明庆忠,童绍玉. 中国省市区地理·云南地理[M]. 北京:北京师范大学出版社,2016.
[19] 孙应龙,钱拴,延昊,等. 2000—2018 年云南省典型矿区植被生态时空变化特征:以临沧市为例[J]. 生态环境学报,2019,28(12):2381-2389.
[20] 张鑫形,吴秀芹. 基于 CASA 模型的 2005—2019 年云南断陷盆地 NPP 时空变化研究[J]. 地球学报,2021,42(3):426-434.
[21] 李恒凯,欧彬,刘雨婷. 基于 MOD17A3 的南岭山地森林区植被 NPP 时空分异分析[J]. 西北林学院学报,2017,32(6):197-202.
[22] 云南省第三次全国国土调查领导小组办公室,云南省自然资源厅,云南省统计局. 云南省第三次全国国土调查主要数据公报[R]. 2021.
[23] 李登科,王钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J]. 生态环境学报,2018,27(3):397-405.
[24] 徐新良. 中国 GDP 空间分布公里网格数据集[EB/OL]. (2017-11-01)[2021-10-24]. https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=33.
[25] 徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集[EB/OL]. (2017-11-01)[2021-10-24]. https://www.resdc.cn/doi/doi.aspx?DOIid=32.
[26] 王智,师庆东,常顺利,等. 新疆地区平均气温空间插值方法研究[J]. 高原气象,2012,31(1):201-208.
[27] 谭剑波,李爱农,雷光斌. 青藏高原东南缘气象要素 Anusplin 和 Cokriging 空间插值对比分析[J]. 高原气象,2016,35(4):875-886.
[28] 杨泽至,舒清态,邱霜,等. 基于 ICESat-2/ATLAS 数据结合克里格插值进行区域尺度森林 LAI 估测[J]. 云南大学学报(自然科学版),2023,45(5):1157-1170.
[29] 陈硕,赵文武,韩逸. 中国干旱半干旱区植被降水利用效率时空变化特征及影响因素分析[J]. 生态学报,2023,43(24):10295-10307.
[30] 樊嵘,孟大志,徐大舜. 统计相关性分析方法研究进展[J]. 数学建模及其应用,2014,3(1):1-12.
[31] 李登科,王钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J]. 生态环境学报,2018,27(3):397-405.
[32] 穆少杰,游永亮,朱超,等. 中国西北部草地植被降水利用效率的时空格局[J]. 生态学报,2017,37(5):1458-1471.
[33] 童珊,曹广超,陈真,等. 近 30 年祁连山南坡生长季植被降水利用效率时空变化[J]. 生态科学,2020,39(5):124-133.
[34] 任继周. 分类、聚类与草原类型[J]. 草地学报,2008(1):4-10.
[35] 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.
[36] 王倩,杨太保,杨雪梅. 伊犁河流域归一化植被指数的时空变化及其对气候的季节响应[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2016,52(4):466-474.
[37] 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.
[38] 潘换换,刘雪佳,杜自强,等. 中国干旱区自然植被降水利用效率的时空格局[J]. 山西大学学报(自然科学版),2021,44(1):184-193.
[39] 黄少平,陈俊毅,肖衡林,等. 不同坡度植被边坡降雨入渗和径流侵蚀规律的试验研究[J]. 岩土力学,2023,44(12):3435-3447.

责任编辑:许易琦
校　　对:许易琦,杨焌焓