

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.

内蒙古荒漠草原植被降水利用效率的时空特征

滑永春,马秀枝,斯钦毕力格

(内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: 植被降水利用效率(PUE)是评价干旱、半干旱地区植被对降水响应的重要指标。利用1982—2015年GIMMS NDVI3g NDVI数据及同期气象数据反演内蒙古荒漠草原的PUE,研究荒漠草原不同植被类型、不同地区PUE时空变化,并分析了PUE与气候因子的相关关系。结果表明:(1)1982—2015年间荒漠草原年均PUE为 $0.51 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$,PUE的分布呈现出一定的空间异质性。荒漠草原PUE极显著增大和显著增大的面积分别占草原总面积的35.88%、55.41%,荒漠草原PUE极显著减小的面积占草原总面积的8.70%,荒漠草原PUE整体呈现增大趋势。(2)荒漠草原不同植被类型PUE均值范围 $0.34—0.56 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。各种植被类型中,东方针茅草原PUE最大,镰芒针茅草原PUE最小。除了镰芒针茅草原与其他植被类型差异显著以外,其他植被类型间差异不太显著。从PUE变化看,除了东方针茅草原PUE呈现下降趋势,其他植被类型PUE都呈现增大的趋势。(3)荒漠草原PUE与降水有很强的负相关性;草地年PUE与年均气温相关性不太明显;草地年PUE与年均太阳辐射呈正相关关系。

关键词: 荒漠草原; PUE; CASA模型; 相关关系

文章编号: 1000-694X(2021)04-051-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00039

中图分类号: Q948.11

文献标志码: A

0 引言

植被降水利用效率(Precipitation utilization efficiency, PUE)描述植被对降水的利用水平,是植被净初级生产力与降水量之比,可以反映植被生态系统碳水循环,也是干旱半干旱地区土地退化的重要参考指标^[1-4]。

降水是绝大多数陆地生态系统水分的直接来源,尤其对于干旱半干旱地区植被生长具有至关重要的作用,是决定植被生长的关键因素^[5-8]。因此,PUE作为植被对降水利用效率的重要指标,在干旱半干旱区植被研究中备受学者们的关注^[9-11]。Houerou^[12]对突尼斯干旱区近30年的PUE值进行研究,发现降水量越低的地区相应的PUE值越小,植被PUE随降水的增加而增加。潘焕焕等^[13]对中国干旱区PUE值进行估算,认为荒漠植被PUE呈减少趋势,荒漠草原PUE轻微增加,干旱区植被PUE与年降水量显著负相关,与年平均气温正相关。穆少

杰等^[14]利用MODIS数据对中国西北七省草地PUE进行了分析,发现温带草地PUE草甸草原>灌丛>典型草原>荒漠草原>荒漠,高寒草原的PUE高于高寒草甸。

荒漠草原是草原区向荒漠区过渡的旱生化草原生态系统,在内蒙古约占草原总面积的10.7%^[15-16],该地区干旱少雨,属于典型的生态脆弱带,稳定性差,极易遭到破坏,对全球变化的响应十分敏感^[17-19]。以往植被PUE的研究集中在植被一级分类水平上,草原PUE的研究也是以不同草原类型PUE作为研究尺度,针对同一草原不同植被类型PUE的研究目前还没看到相关报道。本文利用1982—2015年GIMMS NDVI3g NDVI数据及同期降水、气温、太阳总辐射数据反演内蒙古荒漠草原的PUE,探讨荒漠草原PUE时空变化规律,并进一步分析PUE与气候因子的关系,旨在为干旱半干旱区荒漠草原生态环境变化及其水资源的可持续利用提供参考。

收稿日期:2020-08-27; 改回日期:2021-03-26

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA20050103);内蒙古农业大学高层次人才引进项目(170014);双一流建设项目(DC2000001008)

作者简介:滑永春(1981—),男,山西大同人,讲师,主要从事荒漠化植被遥感研究。E-mail: 398721962@qq.com

通信作者:马秀枝(E-mail: luckmxy@imau.edu.cn)

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古荒漠草原(37°—46°N、105°—115°E)总面积约 11.2 万 km², 占全区草地总面积的 10.7%(图 1)。主要分布在阴山北麓和西鄂尔多斯, 是内蒙古干旱区代表性植被类型, 面积辽阔, 占据了乌兰察布高原大部及西鄂尔多斯。与荒漠带紧邻, 在典型草原和草原化荒漠之间呈带状由东北向西南分布。主要类型为戈壁针茅(*Stipa tianschanica*)草原、沙生针茅(*Stipa glareosa*)草原和短花针茅(*Stipa breviflora*)等组成的草原群落。

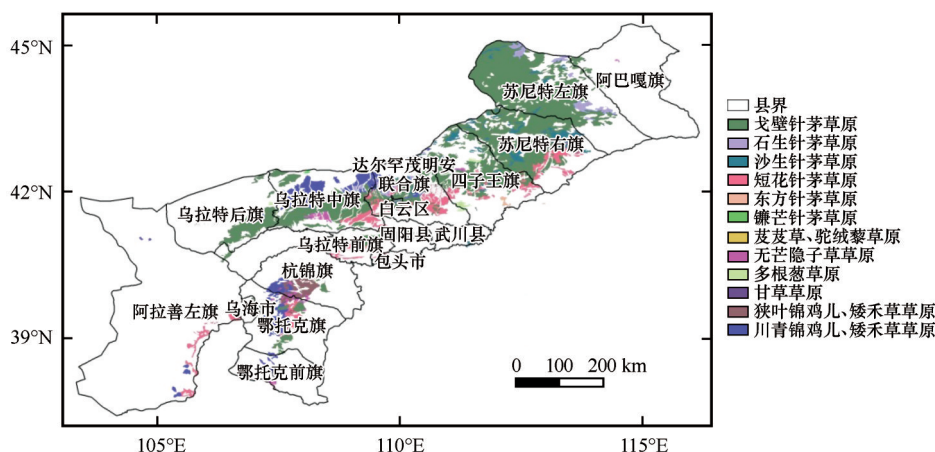


图1 内蒙古荒漠草原植被分布

Fig.1 Vegetation distribution map of desert steppe in Inner Mongolia

ERA5气象数据。本文选用的气象再分析资料为ECMWF公开的ERA5数据(<http://apps.ecmwf.int/datasets/>), ERA5是迄今最强大的全球气候监测数据集, 与之前的ERA-Interim产品相比, ERA5具有更高的时空分辨率, 时间分辨率为1 h, 空间分辨率高达0.125°。本文选用覆盖内蒙古草地1982—2015年1—12月0.125°的ECMWF-ERA5气象模式温度、降水、太阳总辐射数据。使用Matlab对数据进行格式转换、年度合成、图像裁剪、Albers等面积投转换等处理。

草原植被数据。在中国科学院植物研究所2000年制作的1:100万全国植被类型数据基础上, 完成对内蒙古地区荒漠草原植被类型的提取。并对矢量图进行投影转换、栅格化等处理, 获得投影和分辨率与遥感数据一致的数字化产品。

1.2.2 研究模型及方法

植被的降水利用效率可以用植被单位面积单位降水所固定的有机碳来表示^[20], 根据数据类型及

1.2 数据与研究方法

1.2.1 数据获取及预处理

GIMMS NDVI3g获取及处理。植被指数数据为美国宇航局(NASA)最新提供的第三代NDVI数据集(GIMMS NDVI3g V1.0) (<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/>), 该数据集时间跨度为1982—2015年, 时间分辨率15 d, 空间分辨率8 km, 经过几何精校正、辐射校正、大气校正、图像增强等预处理。使用Matlab对1982—2015年覆盖内蒙古草地的GIMMS NDVI3g数据进行格式转换、图像镶嵌、图像裁剪、Albers等面积投转换等处理, 形成涵盖内蒙古草地的月度NDVI时空数据集。

研究目的不同, 植被降水利用效率的计算方法也不尽相同。在区域尺度上多采用PUE作为水分利用率的量度^[21], 本文采用植被净初级生产力与年降水量计算植被的降水利用效率^[22]。

$$PUE = NPP/PPT \quad (1)$$

式中: PUE为植被降水利用效率(gC·m⁻²·mm⁻¹); NPP为年净初级生产力; PPT为年降水量(mm)。

CASA模型是利用光能利用率来估计NPP的代表性模型, 也是在全球NPP估计中使用最多、最成熟的模型。本文采用朱文泉等^[23]改进的光能利用率模型计算NPP。

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (2)$$

式中: APAR(x, t)代表像元x在t月吸收的光合有效辐射(MJ·m⁻²); $\varepsilon(x, t)$ 代表像元x在t月的实际光能利用率(gC·MJ⁻¹)。

植被吸收的光能有效辐射由太阳总辐射和植被本身的特性决定。

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times 0.5 \times FPAR(x, t) \quad (3)$$

式中： $SOL(x, t)$ 为 t 时间在像元 x 处的全日照总辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{t}^{-1}$)；而 $FPAR(x, t)$ 为植被对入射光合有效辐射(PAR)的吸收量；常数0.5为植被所能利用的太阳有效辐射，即光合有效辐射(波长 $0.4\text{—}0.7\text{ }\mu\text{m}$)，是总日照量的百分比。

光能转化率指植物的光合作用吸收以光合作用PAR为单位固定的干物质总量，单位为 $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。表示将被吸收的光合作用PAR转换为有机碳的植被的效率，即对能量使用的固定效率。在实际条件下，光能利用率(ε)要受温度和降水的影响。

$$\varepsilon(x, t) = T_e(x, t) \times W_e(x, t) \times \varepsilon_{\max} \quad (4)$$

式中： $T_e(x, t)$ 为温度对光能利用率胁迫系数； $W_e(x, t)$ 为水分对光能利用率胁迫系数； ε_{\max} 为非现实条件下植物的最大光能转化率，取值因植被类型的不同而有所不同。本文依据包刚等^[24]对内蒙古草原植被最大光能利用率研究结果， ε_{\max} 取值为 $0.511\text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。

基于像元的一元线性回归分析，模拟34年来研究区植被的变化趋势。

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times C_i - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \times \left(\sum_{i=1}^n C_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (5)$$

式中： θ_{slope} 为趋势变化率， $n=34$ (监测年数)； C_i 为荒漠草原第 i 年的植被PUE。 $\theta_{\text{slope}} < 0$ 表示草地PUE降低，反之则表示草地PUE上升。采用F检验对草地PUE的年际趋势变化进行显著性检验。

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \times \frac{n-2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\quad} \quad (6)$$

式中： y_i 、 \hat{y}_i 分别表示研究区第 i 年草地PUE的实际值与回归值， \bar{y} 为34年植被PUE的年际平均值，并根据F检验的结果将荒漠草原PUE的变化趋势分为6个变化等级：极显著减小($\theta_{\text{slope}} < 0, P < 0.01$)，显著减小($\theta_{\text{slope}} < 0, P < 0.05$)，不显著减小($\theta_{\text{slope}} < 0, P > 0.05$)，不显著增大($\theta_{\text{slope}} > 0, P > 0.05$)，显著增大($\theta_{\text{slope}} > 0, P < 0.05$)，极显著增大($\theta_{\text{slope}} > 0, P < 0.01$)。

利用皮尔逊(Pearson)相关系数分析PUE与气候因子之间的相关性。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中： r 为相关系数； \bar{x} 、 \bar{y} 为各自变量的平均值。相

关系数 r 的取值范围为 $[-1, 1]$ ，其值越偏接近-1或1说明变量之间的相关性越高。

相关系数的检验采用 t 检验法。

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \quad (8)$$

式中： n 为样本数， $n=34$ 。

2 结果与分析

2.1 荒漠草原PUE时空格局

2.1.1 荒漠草原PUE的空间分布特征

过去34年研究区年草地PUE的平均值为 $0.51\text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，PUE的分布呈现出一定的空间异质性特征(图2)。结合图3可知，包头市区、武川县处于植被年PUE的高值区，年均PUE $\geq 0.75\text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，但草原面积较小；包头白云区、乌拉特中旗、苏尼特右旗、乌拉特前旗、鄂托克旗、苏尼特左旗、阿巴嘎旗等地是PUE中值区，年均PUE为 $0.50\text{—}0.59\text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ；阿拉善左旗、乌拉特后旗、达尔罕茂明安联合旗、鄂托克前旗、杭锦旗、四子王旗等地是低值区，年均PUE $< 0.50\text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

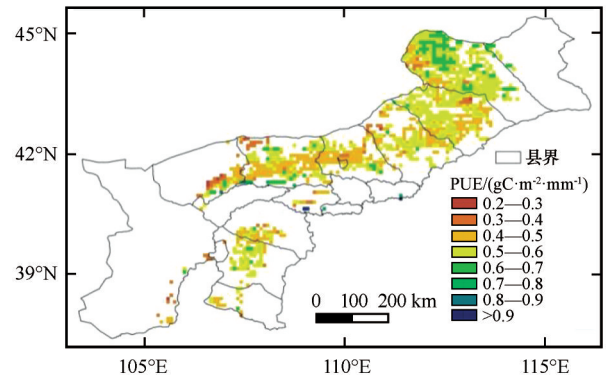


图2 内蒙古荒漠草原1982—2015年年均PUE空间分布

Fig.2 Spatial distribution of average annual PUE in desert steppe of Inner Mongolia from 1982 to 2015

2.1.2 不同植被类型PUE的差异

1982—2015年间内蒙古荒漠草原不同植被类型PUE均值范围 $0.34\text{—}0.56\text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ (图4)。各种草原植被类型中，PUE值东方针茅草原>石生针茅草原>川青锦鸡儿、矮禾草原>沙生针茅草原>芨芨草、驼绒藜草原>戈壁针茅草原>短花针茅草原>无芒隐子草草原>狭叶锦鸡儿、矮禾草原>甘草草原>多根葱草原>镰芒针茅草原。从显著性方

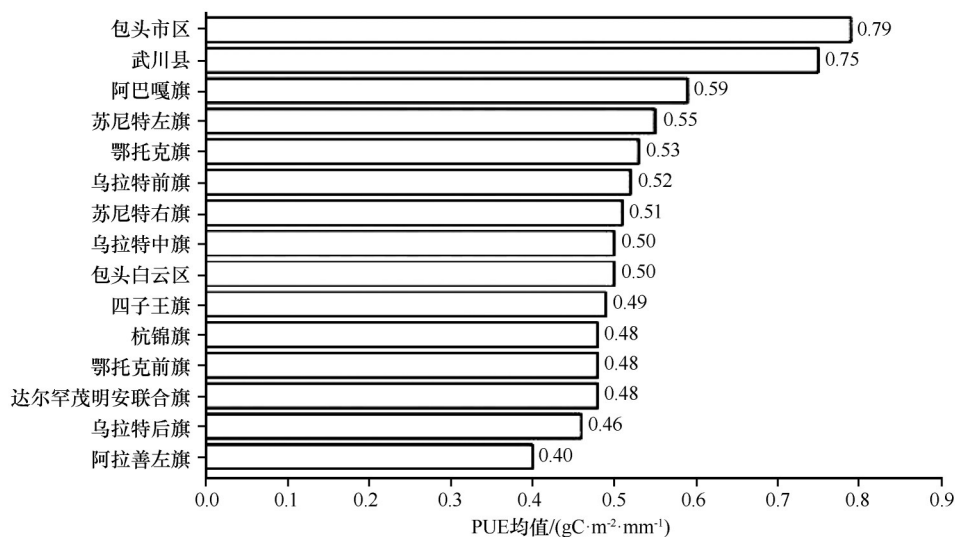
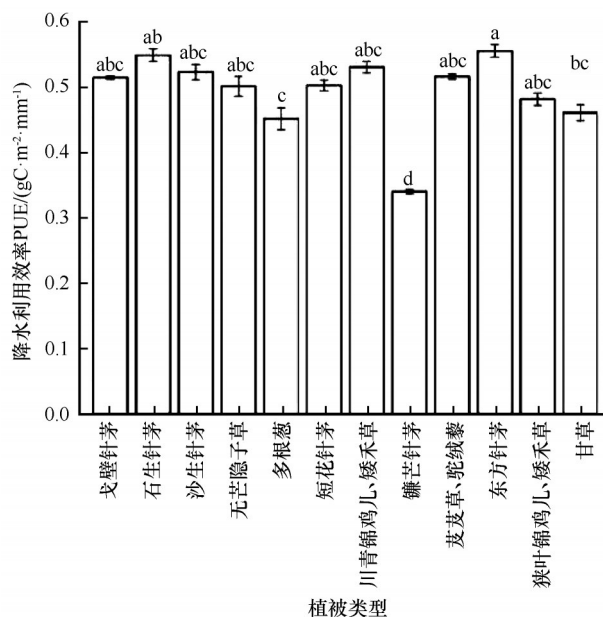


图3 内蒙古各地区荒漠草原PUE平均值

Fig.3 Average PUE of desert steppe in different regions of Inner Mongolia



不同小写字母表示不同类型植被的PUE显著差异, $P < 0.05$

图4 1982—2015年内蒙古荒漠草原不同植被类型的PUE (平均值±标准误差)

Fig.4 PUE of different vegetation types in desert steppe of Inner Mongolia from 1982 to 2015 (mean±SE)

面来看,除了镰芒针茅草原与其他植被类型差异显著以外,其他植被类型间差异不太显著。

2.1.3 荒漠草原PUE变化趋势

为定量描述1982—2015年间荒漠草原PUE值变化趋势,将研究区的PUE变化划分6等级(显著减小值为0,图5)。荒漠草原PUE极显著增大和显著增大的面积占草原总面积的35.88%、55.41%。主要分布于锡林郭勒盟的阿巴嘎旗、苏尼特左旗、苏尼特右旗

南部、四子王旗的北部、达尔罕茂明安联合旗西部以及乌拉特中旗东部等地区;荒漠草原PUE极显著减小的面积占草原总面积的8.70%,零星分布于整个荒漠草原。由表1可见芨芨草、驼绒藜草原PUE增大的面积和减少面积相等,东方针茅草原PUE呈现下降趋势。其他植被类型PUE都是显著或极显著增大的面积要大于极显著减小的面积,PUE呈现增大的趋势,其中,镰芒针茅草原、狭叶锦鸡儿、矮禾草草原、甘草草原PUE只有增加的面积,减少的面积为0。

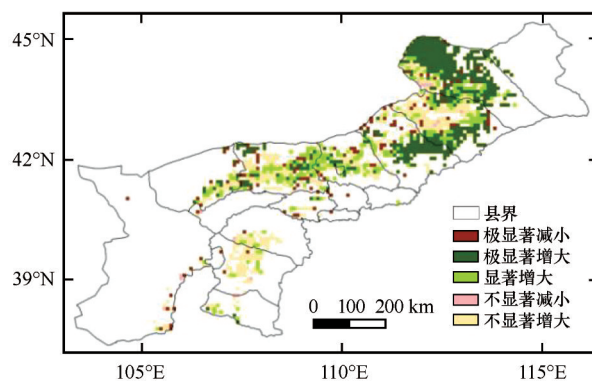


图5 PUE变化趋势及显著性检验

Fig.5 Change trend and significance test of PUE

2.2 荒漠草原PUE与气候因子的关系

2.2.1 PUE与降水的相关关系

在研究时段内,荒漠草原年PUE与年降水量在年际波动上呈现相反的趋势(图6),说明降水在一定程度上对草地PUE的波动起到反向作用。草地年PUE与年降水量相关性通过显著性检验($P < 0.1$)

表 1 荒漠草原不同植被类型 PUE 变化趋势(单位:%)
Table 1 Change trend of PUE under different vegetation types (unit:%)

变化趋势	植被类型												总计
	戈壁 针茅	石生 针茅	沙生 针茅	无芒隐 子草	多根 葱	短花 针茅	川青锦 鸡儿、 矮禾草	镰芒 针茅	芨芨 草、驼 绒藜	东方 针茅	狭叶锦 鸡儿、 矮禾草	甘草	
极显著减小	4.81	0.42	0.50	0.14	0.07	1.56	1.06	0.00	0.07	0.07	0.00	0.00	8.70
极显著增大	28.38	2.05	1.42	0.07	0.21	3.33	0.28	0.07	0.00	0.00	0.00	0.07	35.88
显著增大	12.53	0.71	1.20	0.42	0.14	2.26	1.70	0.00	0.07	0.00	0.21	0.28	19.53
不显著减小	0.57	0.00	0.14	0.00	0.00	0.14	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.13
不显著增大	19.11	0.57	1.70	1.06	0.35	3.54	5.94	0.00	0.00	0.28	1.84	0.35	34.75
总计	65.39	3.75	4.95	1.70	0.78	10.83	9.27	0.07	0.14	0.35	2.05	0.71	100.00

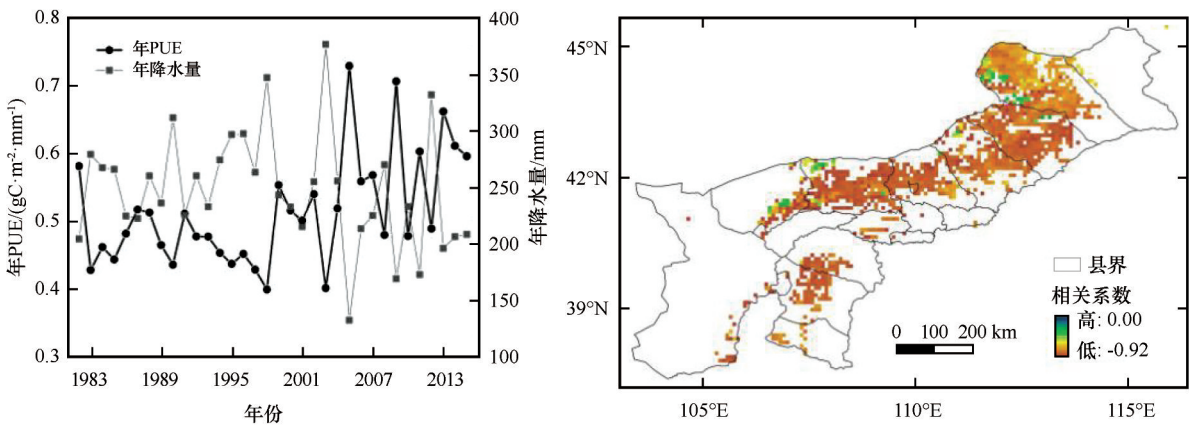


图 6 内蒙古荒漠草原年 PUE 与降水量的变化及相关系数分布
Fig.6 Change of annual PUE and annual total precipitation and the distribution of correlation in desert steppe of Inner Mongolia

的区域占总面积的 88.96%,几乎覆盖了整个荒漠化草原。平均相关系数为-0.76,说明降水与草地植被水分利用率有很强的负相关性,小幅降水的增加并不能提高草地用水的效率。

2.2.2 PUE 与气温的相关关系

在研究时段内,荒漠草原年 PUE 与年均气温在年际变化趋势上表现出一定的一致性(图 7),说明气温在一定程度上影响研究区草地 PUE 的波动。草地年 PUE 与年均气温相关性通过显著性检验($P<0.1$)的区域占总面积的 56.05%,主要分布于锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗、四子王旗以及达尔罕茂明安联合旗、乌拉特中旗、乌拉特后旗等局部地区。平均相关系数为 0.23,说明气温对荒漠草原植被降水利用率作用不是太明显。

2.2.3 PUE 与太阳辐射的相关关系

在研究时段内,荒漠草原年 PUE 与年均太阳辐射在年际变化趋势上表现出高度的一致性(图 8),

说明太阳辐射对草地 PUE 的波动起到较大的作用。草地年 PUE 与年均太阳辐射相关性通过显著性检验($P<0.1$)的区域占总面积的 88.60%,覆盖整个草原地区。平均相关系数为 0.50,说明太阳辐射对荒漠草原植被降水利用率有明显的促进作用。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文利用 1982—2015 年 GIMMS NDVI3g NDVI 数据及同期降水、气温、太阳总辐射数据反演的内蒙古荒漠草原的 PUE,分析了区域内草地 PUE 时空变化,并进一步探讨了 PUE 与气候因子的关系。

过去 34 年荒漠草原年均 PUE 为 $0.51\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$, PUE 的分布呈现出一定的空间异质性特征。荒漠草原 PUE 极显著增大和显著增大的面积分别占草原总面积的 35.88%、55.41%。荒漠草原 PUE 极显著

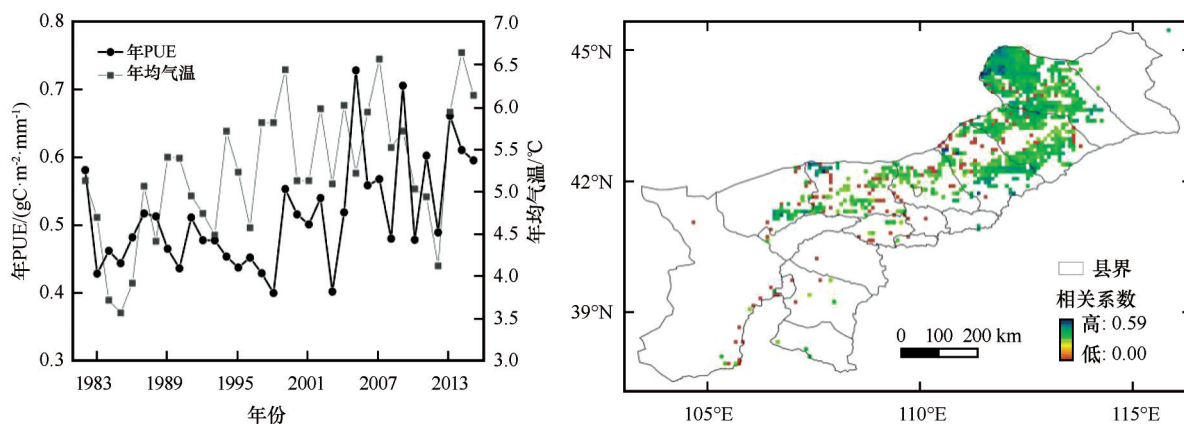


图7 内蒙古荒漠草原年PUE与气温的变化及相关系数分布

Fig.7 Change of annual PUE and annual average temperature and the distribution of correlation in desert steppe of Inner Mongolia

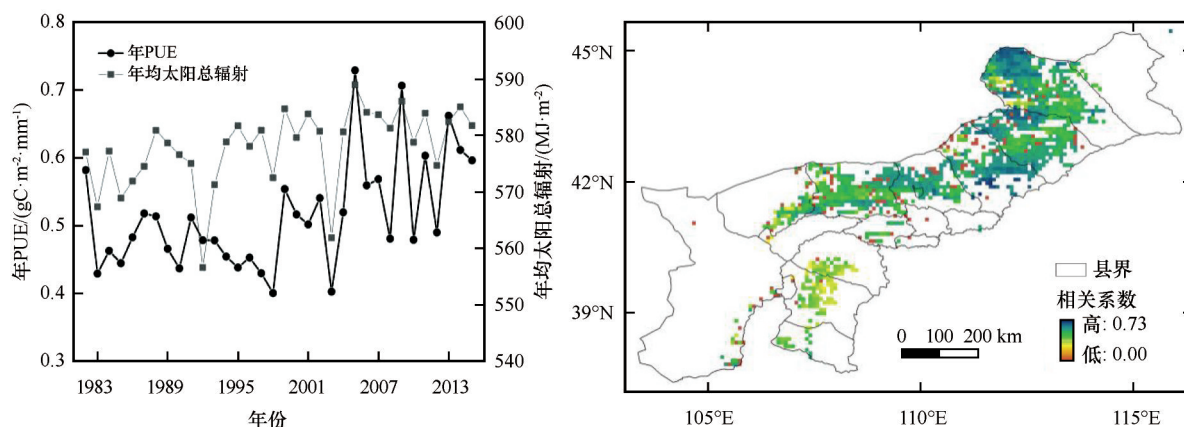


图8 内蒙古荒漠草原年PUE与太阳辐射的变化及相关系数分布

Fig.8 Change of annual PUE and annual average solar radiation and the distribution of correlation in desert steppe of Inner Mongolia

减小的面积占草原总面积的8.70%,荒漠草原PUE整体呈现增大趋势。

1982—2015年间内蒙古荒漠草原不同植被类型PUE均值0.34—0.56 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。各种草原植被类型中,PUE值东方针茅草原>石生针茅草原>川青锦鸡儿、矮禾草草原>沙生针茅草原>芨芨草、驼绒藜草原>戈壁针茅草原>短花针茅草原>无芒隐子草草原>狭叶锦鸡儿、矮禾草草原>甘草草原>多根葱草原>镰芒针茅草原。除了镰芒针茅草原与其他植被类型差异显著以外,其他植被类型间差异不太显著。从PUE变化看,除了东方针茅草原PUE呈现下降趋势,其他植被类型PUE都呈现增大的趋势。

荒漠草原PUE与气候因子的关系中,降水与草地PUE有很强的负相关性,平均相关系数为-0.76;草地年PUE与年均气温平均相关系数为0.23,气温

对植被降水利用率作用不是太明显;草地年PUE与年均太阳辐射平均相关系数为0.50,太阳辐射对荒漠草原植被降水利用率有明显的促进作用。

3.2 讨论

为了解释草地PUE空间分布的异质性和PUE变化的主导因素,将PUE作为自变量,气候因子(34年的年降水量、年平均气温、年均太阳总辐射)、土壤因子、植被类型因子作为因变量,进行多元线性逐步回归分析,得到的最佳多元回归模型为 $\text{PUE} = 0.803 \times \text{年降水量} - 0.124 \times \text{年均太阳总辐射} + 1.073$,回归模型调整后的 R^2 为0.71,其中年降水量 R^2 为0.46,年均太阳总辐射 R^2 为0.25。由此可见降水和太阳辐射是决定草地PUE空间分布和变化的主导因子。与前面分析不同植被类型PUE差异不显著、气温与

PUE相关性不显著、降水和太阳辐射与PUE关系显著的结论一致。

穆少杰等^[14]基于MODIS数据估算了2001—2010年间内蒙古荒漠草原的PUE为 $0.59 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$,与本文34年荒漠草原年均PUE($0.51 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)比较接近。潘换换等^[13]认为过去30多年来内蒙古锡林郭勒盟、集宁、鄂尔多斯市等地区PUE处于增加的趋势,本文也得出了相同的结论。潘换换等^[13]发现干旱区植被PUE与年降水量之间是负相关关系,可能的原因是降水量增加将带走土壤中的N、P等营养元素,提高植被的生产力,呼吸作用也得到了增强,引起PUE与降水量出现负相关关系。穆少杰等^[20]发现年均气温与植被PUE没有显著相关性。李文娟^[25]认为石羊河流域太阳辐射与植被PUE呈正相关。这些结论与本文对内蒙古荒漠草原PUE与气候因子的相关关系研究结论一致。但气候因素对植被PUE的影响存在着很强的区域差异性,同一气候因子对不同地区植被作用程度有着明显的差异^[26-27]。

总之,荒漠草原PUE空间分布、年际变化受众多因素的影响,本研究采用8 km空间分辨率的GIMMS NDVI3g遥感数据,而ECMWF-ERA5气象数据可以达到12 km多,会对结论有一定的影响。同时人为因素对植被降水利用率也会产生很大的影响。PUE反演的精度问题以及实测数据的缺乏,需要更多的实测数据作为支撑。这些都有待于下一步的研究和改进。

参考文献:

- [1] Xia L, Wang F, Mu X, et al. Water use efficiency of net primary production in global terrestrial ecosystems[J]. *Journal of Earth System Science*, 2015, 124(5): 921-931.
- [2] Fensholt R, Rasmussen K. Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 438-451.
- [3] 卢玲, 李新, 黄春林, 等. 中国西部植被水分利用效率的时空特征分析[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(5): 777-784.
- [4] 仇洁, 张慧, 沈渭寿. 青藏高原1982—2007年植被PUE空间格局特征分析[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2014, 53(1): 126-133.
- [5] Li F, Zhao W, Liu H. Productivity responses of desert vegetation to precipitation patterns across a rainfall gradient[J]. *Journal of Plant Research*, 2015, 128: 283-294.
- [6] Hao Y B, Wang Y F, Mei X R, et al. The response of ecosystem CO_2 exchange to small precipitation pulses over a temperate steppe[J]. *Plant Ecology*, 2010, 209: 335-347.
- [7] 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.
- [8] 卢乔倩, 江涛, 柳丹丽, 等. 中国不同植被覆盖类型NDVI对气温和降水的响应特征[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(1): 23-34.
- [9] 冯金朝, 刘新明. 干旱环境与植物的水分关系[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [10] 位贺杰, 张艳芳, 董孝斌, 等. 渭河流域植被WUE遥感估算及其时空特征[J]. *自然资源学报*, 2016(8): 1275-1288.
- [11] Liu Z J, Huang M. Assessing spatio-temporal variations of precipitation-use efficiency over Tibetan grasslands using modis and in-situ observations[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2016, 10(4): 784-793.
- [12] Houerou H N L. Rain use efficiency: a unifying concept in arid-land ecology[J]. *Journal of Arid Environments*, 1984, 7(3): 213-247.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 吴永胜, 马万里, 李浩, 等. 内蒙古退化荒漠草原土壤有机碳和微生物生物量碳含量的季节变化[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 312-316.
- [16] 黄琛, 张宇, 王静, 等. 不同放牧强度下短花针茅荒漠草原植被的空间异质性[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(11): 1184-1193.
- [17] 刘朋涛, 杨婷婷, 姚国征, 等. 不同放牧强度下荒漠草原碳密度的变化[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(7): 157-162.
- [18] 李香云, 岳平, 郭新新, 等. 荒漠草原植物群落光合速率对水氮添加的响应[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 116-124.
- [19] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 14-22.
- [20] 穆少杰, 周可新, 齐杨, 等. 内蒙古植被PUE的时空格局及其驱动因素[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(1): 1-16.
- [21] 仇宽彪. 中国植被总初级生产力、蒸散发及水分利用效率的估算及时空变化[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [22] 阚飞. 半干旱区典型农田生态系统水、碳、光能利用效率研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [23] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于GIS和RS的区域陆地植被NPP估算: 以中国内蒙古为例[J]. *遥感学报*, 2005, 9(3): 300-307.
- [24] 包刚, 辛晓平, 包玉海, 等. 内蒙古草原植被最大光能利用率取值优化研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(10): 3280-3286.
- [25] 李文娟. 基于RS和GIS的石羊河流域植被降水利用效率的时空特征分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015.
- [26] Bai Y F, Wu J G, Qi X, et al. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia Plateau

[J].Ecology,2008,89(8):2140–2153.

格局及其对降水和气温的响应[J].植物生态学报,2012,36

[27] 叶辉,王军邦,黄玫,等.青藏高原植被降水利用效率的空间

(12):1237–1247.

Spatial and temporal characteristics of precipitation utilization efficiency of desert steppe vegetation in Inner Mongolia

Hua Yongchun, Ma Xiuzhi, Bilige Siqin

(College of Forestry, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010019, China)

Abstract: vegetation precipitation-use efficiency is an important index to evaluate the response of vegetation to precipitation in arid and semi-arid areas. In this paper, we will use GIMMS ndvi3g NDVI data and meteorological data from 1982 to 2015 to retrieve PUE of desert steppe in Inner Mongolia, to study the temporal and spatial changes of PUE in different vegetation types and different regions, and to analyze the correlation between PUE and climate factors. The results showed that: (1) the average annual PUE of desert steppe was $0.51 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ from 1982 to 2015, and the distribution of PUE showed certain spatial heterogeneity. The area of desert steppe PUE increased significantly ($P < 0.01$) and increased significantly ($P < 0.05$) accounted for 35.88% and 55.41% of the total grassland area, and the area of desert steppe PUE decreased significantly ($P < 0.01$) accounted for 8.70% of the total grassland area, and the PUE of desert steppe showed an increasing trend. (2) The average PUE of different vegetation types in desert steppe ranged from 0.34 to $0.56 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$. Among all vegetation types, the PUE of Gramineae grassland was the largest, and that of *Stipa caucasica* was the smallest. In terms of significance, except for *S. caucasica*, the difference between vegetation types is not very significant. From the change of PUE, except for Gramineae grassland, PUE of other vegetation types showed an increasing trend. (3) There is a strong negative correlation between PUE and precipitation in desert steppe; the correlation between annual PUE and annual average temperature is not obvious; PUE is positively correlated with annual average solar radiation. The purpose of this study is to provide a theoretical basis for the sustainable utilization of vegetation water resources in arid desert steppe.

Key words: desert steppe; PUE; CASA model; correlation