DOI: 10.20103/j.stxb.202306141271

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.生态学报,2023,43(24):10295-10307. Chen S, Zhao W W, Han Y.Spatio-temporal variation of vegetation precipitation use efficiency and influencing factors in arid and semi-arid areas of China. Acta Ecologica Sinica,2023,43(24):10295-10307.

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

陈 硕1,赵文武^{2,3,*},韩 逸^{2,3}

1山东农业大学资源与环境学院,泰安 271000

2 北京师范大学地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875

3 北京师范大学地理科学学部 陆地表层系统科学与可持续发展研究院,北京 100875

摘要:植被的降水利用效率(Precipitation use efficiency, PUE)是表征植被生产力对降水量时空动态变化响应特征的重要指示器,对了解干旱环境下植被生产力的变化尤为关键。基于中国干旱半干旱区 2000—2020 年的植被净初级生产力、降水量、气温、土地利用类型和地形等数据,分析了中国干旱半干旱区植被降水利用效率的时空特征及其变化趋势,探究了植被 PUE 与气候因子的关联以及气候变化下土地利用和地形对植被 PUE 的影响。研究结果表明:(1)2000—2020 年中国干旱半干旱区植被平均 PUE 为 0.41 g C m⁻² mm⁻¹,不同土地利用类型下植被 PUE 的大小顺序为:草地<湿地<灌木<耕地<林地。(2) 植被 PUE 年际变化整体呈现波动上升趋势,上升速率为 0.004 g C m⁻² mm⁻¹,其中呈现显著改善趋势的面积占总面积的 12.24%。(3) 气温升高在不同程度上对大多数植被 PUE 起到促进作用,而降水增多则会抑制绝大多数区域的植被 PUE。植被较少的区域,植被降水利用效率与气温、降水两气候因子基本无关。(4) 随着海拔的升高,植被 PUE 呈现出先减后增再减的趋势。随着海拔的变化,气温依然与植被 PUE 呈正相关,降水依然与植被 PUE 呈负相关。研究结果可为中国干旱半干旱区生态系统保护、恢复以及可持续利用提供科学参考。

关键词: 植被降水利用效率; 净初级生产力; 气候变化; 土地利用类型; 中国干旱半干旱区

Spatio-temporal variation of vegetation precipitation use efficiency and influencing factors in arid and semi-arid areas of China

CHEN Shuo¹, ZHAO Wenwu^{2,3, *}, HAN Yi^{2,3}

1 College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China

2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 Institute of Land Surface System and Sustainable Development, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Precipitation is a main factor that controlling the dynamic change of ecosystem structure and affecting the ecosystem biodiversity. In the arid and semi-arid areas of China, precipitation plays a particularly important role in the growth of vegetation. Vegetation is one of the most important indicators of ecological environment change, and it is also the most active and important components of the ecosystem in arid and semi-arid areas. Precipitation use efficiency (PUE) of vegetation is an index that represents the response characteristics of vegetation productivity to precipitation changes and the ability of vegetation to convert precipitation into biomass. More and more researches have been conducted on the PUE of vegetation precipitation. Nowadays, based on remote sensing data and model estimation, there are still few studies on the

基金项目:国家自然科学基金项目(41991232)

收稿日期:2023-06-14; 采用日期:2023-11-13

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhaoww@ bnu.edu.cn

impact analysis of the PUE in arid and semi-arid areas of China which need to be further improved. Based on the data of average annual precipitation, air temperature, land use type, topographic, and net primary productivity of vegetation in arid and semi-arid areas of China from 2000 to 2020, this study analyzed spatial and temporal characteristics of vegetation precipitation use efficiency in arid and semi-arid areas. The results showed that: (1) The average PUE of all vegetation in arid and semi-arid areas of China from 2000 to 2020 was 0.41 g C m⁻² mm⁻¹, and the order of PUE of different vegetation was grassland < wetlands < bush < arable land < forest land. (2) The inter annual variation of vegetation PUE showed an overall fluctuating upward trend, with an increasing rate of 0.004 g C m⁻² mm⁻¹. For trend analysis, the area of significant improvement trend accounted for 12.24% of the total area. (3) Increasing temperature promoted the PUE of most vegetation to varying degrees while increasing precipitation inhibited the PUE increase of vegetation in most regions. In the area with less vegetation, the two climatic factors of temperature and precipitation almost did not affect the use efficiency of vegetation precipitation. (4) With the increasing of altitude, the PUE of vegetation showed a trend of first decrease, then increase, and then decrease. The maximum of the PUE of vegetation occured when the elevation gradient was 3001-4000 m, and the minimum vegetation PUE occured when the elevation gradient was 5001-6928 m. With the change of altitude, air temperature was still positively correlated with vegetation PUE, while precipitation was still negatively correlated with vegetation PUE. The results can provide scientific reference for the protection, restoration and sustainable utilization of ecosystems in arid and semi-arid areas in China.

Key Words: precipitation use efficiency; net primary productivity; climate changes; land use types; arid and semiarid areas

降水是控制生态系统结构与功能动态变化,影响生态系统生物多样性的关键因素^[1]。在干旱半干旱区, 降水对植被的生长起着尤为重要的作用。植被作为生态环境变化的指示器,是干旱半干旱区生态系统最活 跃、最重要的组成部分之一。植被降水利用效率(Precipitation use efficiency, PUE)被定义为植被净初级生产 力(Net primary productivity, NPP)与降水量的比值,反映了植被利用水分将营养物质转化为生物量的能力,能 够反映当地生态环境的变化^[1]。研究 PUE 时空特征及其变化的驱动因素可为植被退化监测、气候变化风险 预警奠定基础,并为减缓植被退化、改善干旱区生态环境提供参考,是气候变化对干旱半干旱区生态系统影响 研究的重要议题^[2]。

对于干旱半干旱地区植被降水利用效率的相关研究,近年来国内外学者^[1-13]大致从两个方面来进行:植 被 PUE 的时空特征及其变化的驱动因素;不同植被类型 PUE 的差异研究。对于植被 PUE 的变化趋势分析, 有研究认为中国干旱区自然植被的 PUE 呈衰减趋势^[3-4],相反,在其他研究中^[5-6]中国干旱区自然植被 PUE 却整体表现出增大趋势。可见由于研究所选取的空间尺度的差异,得到的结论并不统一。对于 PUE 变化的 驱动因子研究,先前的结果表明,在一定空间内植被的 PUE 会随降水等自然因素的变化而变化^[1],目前对于 驱动植被 PUE 变化的影响因素研究主要集中在干旱程度、潜在蒸散量、降水、气温等因素上。研究表明,在一 定空间内随着干旱程度和潜在蒸散量的增加会导致植被 PUE 呈降低趋势^[7]。通常认为,对生态系统而言,随 着降水量的增加,PUE 呈下降趋势^[1,7]。但是基于实测数据研究^[2]和通过模拟相关性分析^[3]的研究发现中国 干旱区自然植被 PUE 与年降水呈正相关。事实上,沿一定的降水梯度,植被 PUE 呈先上升后下降的趋势,且 在一定的降水量会达到峰值^[8],两者相关性不会一直呈正相关或负相关。而对于气温因子的研究,一般认为 PUE 对降水的响应敏感性强于气温^[5],PUE 年际波动与降水呈强相关,与气温则无明显相关性^[6];其他研究 则表明气温与植被 PUE 呈负相关^[9]。由于区域实测数据和气象数据的缺乏、误差等原因,以上研究在选取研 究区域、分析气象因子对植被 PUE 的影响时,可能受到了不同程度的限制,从而在得出相关结论时存在差异。

通常来说,不同植被除了气候变化外,也会因自身群落结构差异、地形等因素造成植被 PUE 的差异^[1],同时地形变化也可能会影响气候因子对植被 PUE 的作用能力。一般认为,在海拔高度相同时,各植被类型 PUE

均值大小会有较大差异,导致此现象的原因是植被自身结构的影响^[9]。研究表明,海拔高度越高时,植被的PUE 越低^[9],但也有研究认为植被 PUE 的分布随着海拔的不断升高,呈现先升高后降低的变化趋势^[10],可见 当前研究关于海拔对植被 PUE 影响的意见尚不统一,且缺少因地形变化导致的气候因子对植被 PUE 的影响 分析。近年来在中国干旱半干旱地区的人类活动越来越剧烈也造成了土地利用格局的变化^[11],甚至导致了 土地荒漠化等问题^[12],导致受影响植被的生产能力下降。然而,基于遥感数据和模型估算的,针对地形和不 同土地利用类型对中国干旱半干旱地区植被 PUE 影响分析的研究还较少,有待于进一步完善。

中国干旱半干旱区是对气候变化非常敏感的区域^[13],在我国生态安全、资源保护方面占据着极其重要的 地位。当前全球气候变化、人为活动造成的土地利用格局变化,在深刻影响着陆地植被,尤其是干旱半干旱区 植被的生长变化。目前对于中国干旱半干旱区的长时序植被 PUE 时空特征及其驱动因子的研究和探讨较 少。本研究以中国干旱半干旱区为研究对象,结合遥感影像数据和降水、温度、地形等数据,解析植被降水利 用效率在 2000—2020 年的时空分布格局,识别降水及温度因子的变化以及不同土地利用类型下植被类型和 不同地形对植被降水利用效率的影响及调控作用,有利于深化对中国干旱半干旱地区植被降水利用效率的认 识,为全球变化背景下干旱、半干旱区生态系统保护、植被恢复与生态可持续提供科学依据。

1 数据准备与研究方法

1.1 研究区概况

研究区(图1)为中国干旱半干旱地区(73°33′E—124°30′E,31°58′N—50°1′N),该区域包括新疆、青海、 甘肃、宁夏全境和陕西秦岭以北、内蒙古西部以及山西西部地区,约占中国陆地国土面积的53%。本文干旱 半干旱区范围根据多年平均干旱指数(降水量与潜在蒸散量的比值,Aridity Index,AI)界定。干旱区通常依据 干旱指数分为四个梯度:干旱半湿润区(0.5<AI≤0.65)、半干旱区(0.2<AI≤0.5)、干旱区(0.05<AI≤0.2)、极 端干旱区(AI≤0.05)^[14],本文选取干旱指数处于0-0.5之间的区域作为研究区。研究区以温带大陆性气候 为主,年平均降水量呈从东南向西北递减的特征,年平均气温呈西南低北部高的特征(图2)。该区域年均降 水量为210.39 mm,年均温为4.65℃。土地利用类型主要以草原和荒漠为主,植被类型多为旱生丛生禾草、旱 生和超旱生小半灌木及灌木。

1.2 数据来源与预处理

本研究所采用数据如表1所示,其中降水数据集采用中国逐月降水量数据,气温数据集为中国逐月温度



Fig.1 The scope of the study area

http://www.ecologica.cn



43 卷



图 2 2000—2020 年中国干旱半干旱区年均降水量图、年均温图 Fig.2 Annual Average Precipitation and Annual Average Temperature in arid and semi-arid areas of China during 2000—2020

数据^[15-18]。土地利用类型数据来源于中国土地覆盖数据集产品(China Land Cover Dataset, CLCD)。本研究 所用 2000—2020 年 LAI(Leaf Area Index)和 NPP 数据来自北京师范大学生产的 GLASS-LAI 和 GLASS-NPP 数据集^[19], FPAR 和 FVC 数据是由 GLASS-LAI 数据利用植被冠层辐射传输模型计算得到^[20-21]。GLASS 数 据集是目前全世界时间跨度最长的全球地表特征产品之一,是基于多源遥感数据和地面实测数据,反演得到 的高精度的全球地表遥感产品。数据空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 8 d。中国海拔高度(DEM)空间分 布数据来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission,SRTM)数据。本 研究运用 Matlab 平台对上述数据进行批量拼接、投影转换、裁剪、重采样等预处理,利用最大值合成法将 NPP 合成为年度数据,并利用累计求和的方法将降水和气温数据合成为年度数据,再利用最邻近法将 NPP、土地 利用类型数据、叶面积指数数据重采样为 1000 m 分辨率。

	Table 1	Data used in this study	
数据名称	空间分辨率	时间序列	数据来源
Data name	Spatial resolution	Time series	Data sources
逐月降水量	1000	2000 2020 年	国家青藏高原科学数据中心
Monthly precipitation	1000 m	2000-2020 +	https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/
逐月平均气温	1000	2000 2020 在	国家青藏高原科学数据中心
Monthly mean temperature	1000 m	2000-2020 +	https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/
逐年叶面积指数	500	2000 2020 年	全球陆表特征参量(GLASS)产品
Annual leaf area index	300 m	2000—2020 平	http://www.glass.umd.edu/Download.html
逐年 NPP 数据	500	2000 2020 年	全球陆表特征参量(GLASS)产品
Annual NPP data	300 m	2000—2020 平	http://www.glass.umd.edu/Download.html
土地利用类型	20	2000 2020 年	年度中国土地覆盖数据集
Land use type	30 m	2000—2020 平	https://essd.copernicus.org/articles/13/3907/2021/
全国 DEM 数据	1000	2000年	资源环境科学与数据中心
National Digital elevation model	1000 m	2000 年	https://www.resdc.cn/

表 1	研究所需数据表	

1.3 研究方法

1.3.1 植被 NPP 模型与估算

本研究采用 MuSyQ-NPP^[22](Multi-source data Synergized Quantitative remote sensing production system-Net Primary Productivity)模型估算植被 NPP。MuSyQ-NPP 中将 GPP 的形成与自养呼吸过程看作两个相对独立的 过程。其中 GPP 通过光能利用率模型来进行计算,主要取决于植被的光合有效辐射和光能利用率。GPP 中 扣除自养呼吸的部分即为 NPP,计算公式如下:

$$GPP = \varepsilon_{e} \times FPAR \times PAR \times f_{1}(T) \times f_{2}(\beta)$$
(1)

$$NPP = GPP - R_a \tag{2}$$

式中, ε_{g} 为植被最大光能利用率,本研究 ε_{g} 取值参考 MODIS NPP 算法取值^[22-23]; PAR 为光合有效辐射。

FPAR 为植物吸收的光合有效辐射比例,是植被冠层吸收的 PAR 占入射 PAR 的比例; f1(T)为依据 CASA 模 型^[24]计算公式得出的温度胁迫因子;f₂(β)为通过地表实际蒸散量与潜在蒸散量的比值求得的水分胁迫因 子,实际蒸散量采用 Penman-Monteith 公式,利用 FVC、LAI 及比湿数据进行计算,潜在蒸散则采用 Priestley-Taylor 方程^[22]计算;自养呼吸 R_a计算公式^[25]如下:

$$R_a = R_m + R_g = \sum R_{m,i} + Rg \tag{3}$$

$$R_{m,i} = M_i r_{m,i} Q_{10,i} \qquad (4)$$

$$R_{x} = \gamma (\text{GPP} - R_{y}) \tag{5}$$

式中, R_m 为维持呼吸, R_a 为生长呼吸。i代表植被的根、茎、叶三部分。 M_i 为植被i部分参与呼吸的生物量, r_{m_i} 为植被第i部分的维持呼吸系数, Q_{10} 为植被i部分的温度敏感因子, T_i 为基温,T为平均温度。其中 γ 为生长 呼吸系数, R₄与温度无关, 与总初级生产力成一定的比例关系^[25]。

1.3.2 PUE 计算

PUE 为年净初级生产力(NPP)与年降水量的比值:

$$PUE = \frac{NPP}{PPT}$$
(6)

式中,NPP、PPT 为年植被净初级生产力(g C m⁻² a⁻¹)和年降水量(mm)。

1.3.3 Pearson 相关系数

本研究运用 Pearson 相关系数表征降水和气温与 PUE 的相关性,该系数在植被与气候变化响应的研究中 应用广泛^[26-28]。本研究基于 MATLAB R2022a 软件平台进行编程,从而实现逐像元相关系数的计算,其中 Pearson 相关系数计算公式如下:

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

式中,n为总的年数,x,和y,分别表示第i年的气候因子(降水、气温)和植被物理量,x和y分别为气象因子和 植被物理量的均值,r_{xx}表征 x 与 y 的相关系数。通过 P<0.1 的相关性结果可以通过显著性检验。本研究采 取的相关系数 r 判断标准如表 2 所示^[29]:

表 2 相关系数划分表

Table 2 Correlation coefficient divisions							
相关系数 r 取值范围 The range of correlation coefficient r	相关程度 The degree of relatedness	相关系数 r 取值范围 The range of correlation coefficient r	相关程度 The degree of relatedness				
r<-0.4	强负相关	0.1 <r<0.4< td=""><td>正相关</td></r<0.4<>	正相关				
-0.4< <i>r</i> <-0.1	负相关	r>0.4	强正相关				
-0.1 <r<0.1< td=""><td>基本无关</td><td></td><td></td></r<0.1<>	基本无关						

1.3.4 Theil-Sen median 与 Mann-Kendall 趋势分析

Theil Sen median 与 Mann-Kendall 趋势分析法是目前基于植被长时间序列趋势分析判断的一种非参数统 计的有效计算方法^[30-32]。本研究采用 Theil Sen median 与 Mann-Kendall 趋势分析法分析植被降水利用效率 的时间变化趋势。时间序列数据趋势的计算如下:

$$\beta = \operatorname{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \, \forall_j > i \tag{8}$$

式中, β 为时间序列数据趋势性大小的计算值; x_i 和 x_i 为时间序列数据中年份 i和j所对应的数值^[20-22]。

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j - x_i)$$
(9)

$$\operatorname{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1, & x_i - x_j > 0\\ 0, & x_i - x_j = 0\\ -1, & x_i - x_j > 0 \end{cases}$$
(10)

$$VAR(S) = (n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{mi-1} t_i(t_i - 1)(2t_i + 5))/18$$
(11)

sgn(*x_j*-*x_i*)是符号函数,检验统计量*S*是由公式(9)计算得出,当*n*<10时,若*S*>0,认为序列存在上升趋势;*S*=0时,无趋势;*S*<0认为序列存在下降趋势。当*n*≥10时,统计量*S*大致服从正态分布,Var(*S*)是*S*统计量的方差,其计算见公式(10),检验统计量*Z*由公式(11)计算。

Man-Kendall 非参数检验法计算统计量 Z:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & S > 0\\ 0, & S = 0\\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & S < 0 \end{cases}$$
(12)

式中,对于序列 $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, ,先确定所有对偶值 $(x_i, x_j, j > i)$ 中 $x_i = x_j$ 的大小关系(设为 S),

本研究将 Theil-Sen median 趋势分析结果和 Mann-Kendall 检验结果进行叠加,得到 PUE 变化趋势数据, 并将结果划分为如表 3 中的 5 种变化类型:

Table 3 Classification criteria of trend change							
S pue	Z 值 Z Value	PUE 趋势变化 The trend variation of PUE	S pue	Z 值 Z Value	PUE 趋势变化 The trend variation of PUE		
≥0.0005	≥1.96	显著增加	<-0.0005	-1.96-1.96	轻微减少		
≥0.0005	-1.96-1.96	轻微增加	<-0.0005	<-1.96	显著减少		
-0.0005-0.0005	-1.96-1.96	稳定不变					

表 3 趋势变化分类标准表

Spue:PUE 的 slope 值

2 结果分析

2.1 NPP 与 PUE 空间分布特征

中国干旱半干旱区植被 NPP 的空间分布格局总体上为东南向西北递减,其中西北部新疆天山、阿尔泰山 地区 NPP 较高。PUE 具有明显的空间异质性^[1](图 3),PUE 高值区域主要分布在内蒙古高原东部、塔里木河 沿河区域、天山、阿尔泰山附近,空间分布格局总体表现出 NPP 高则 PUE 高的规律(图 3)。

根据 PUE 的计算结果,2000—2020 年中国干旱半干旱区平均 PUE 为 0.41 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹。图 3 表明, 祁连山脉东部、天山、阿尔泰山、昆仑山西段 PUE 大多高于 2.0 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹;内蒙古地区东部、黄土高原 PUE 多处于 0.5—2.0 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹范围;研究区中西部塔里木盆地、吐鲁番盆地、准噶尔盆地、柴达木盆 地,内蒙古高原西部和青藏高原西北部大部分区域 PUE 总体小于 0.5 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹。

2.2 植被 PUE 时间变化特征与趋势

图 4 表明,2000—2020 年研究区内 PUE 平均值整体上呈现波动上升趋势,上升速率为 0.004 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹,多年的平均值为 0.415 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹,其中最大值出现在 2020 年,达到 0.479 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹,最



图 3 2000—2020 年中国干旱半干旱区年均 NPP 空间格局、年均 PUE 空间格局

Fig.3 Annual Spatial pattern of NPP and annual Spatial pattern of PUE in arid and semi-arid areas of China during 2000—2020 NPP:植被净初级生产力;PUE:植被降水利用效率

小值出现在 2003 年,为 0.325 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹。

将 PUE 变化趋势根据以往研究经验和研究区 S_{PUE} 的实际情况,按照 PUE 趋势变化分类表(表 3)划分为 显著增加、轻微增加、稳定不变、轻微减少、明显减少等 5 个等级^[33]。如图 5 所示,明显增加和轻微增加集中在 黄河流域上游地区和黄土高原附近,分别占研究区面积 的 12.24%和 26.36%;稳定不变趋势占研究区面积的 44.47%,主要分布在塔里木盆地、内蒙古高原中西部和 柴达木盆地;显著减少和轻微减少区域主要集中在内蒙 古高原东部和华北平原北部,分别占研究区面积的 1.81%和 15.12%。

2.3 植被 PUE 与气候变化的关联

以 2000—2020 年中国干旱半干旱区 PUE 与年降 水量、年平均气温进行 Pearson 相关性分析,识别植被 PUE 与气候因子的关联程度(图 6)。相关分析显示,气 温与 PUE 的相关系数介于在-0.87—0.89 间,降水与 PUE 的相关系数介于-0.98—0.77 区间内,气温、降水 同 PUE 间的相关系数的平均值分别为 0.08 和-0.18。 气温与 PUE 间呈现显著相关(*P*<0.1)的区域占总面积 的 64.18%,降水与 PUE 间呈现显著相关(*P*<0.1)的 区 域占总面积的 82.22%。

- 2.4 气候变化背景下植被 PUE 的影响因素
- 2.4.1 土地利用对植被 PUE 的影响

在全球气候变化背景下,气候因子是影响植被 PUE 的重要因素^[1]。由表 4 可知,不同土地利用类型 植被的 2000—2020 年平均 PUE 差异较大,植被 PUE 均





China during 2000—2020



图 5 2000—2020 年中国干旱半干旱区植被 PUE 的变化趋势 Fig.5 Variation trend of vegetation PUE in arid and semi-arid areas of China from 2000 to 2020



图 6 2000—2020 年中国干旱半干旱区植被 PUE 与降水的相关系数、PUE 与气温的相关系数

Fig.6 Correlation coefficient between vegetation PUE and precipitation, correlation coefficient between PUE and air temperature in arid and semi-arid areas of China from 2000 to 2020

值范围 0.41—1.22 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹。其中林地平均 PUE 最高,达到 1.22 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹,植被 PUE 由小到 大依次为:草地<湿地<灌木<耕地<林地。

表 4	不同土地利用类型植被平均 PUE
Table 4	Average PUE of different vegetation

土地利用类型	草地	湿地	灌木	耕地	林地
Land use type	Grassland	Wetland	Shrub	Cultivated land	Woodland
$PUE/(g C m^{-2} mm^{-1})$	0.61	0.71	0.97	1.14	1.22

PUE:植被降水利用效率 Precipitation use efficiency

总体来看,中国干旱半干旱区不同土地利用类型年均 PUE 变化的差异显著(图 7)。耕地、灌木、湿地、建设 用地的植被 PUE 呈现上升趋势,其余土地利用类型的植被 PUE 维持不变。林地和耕地年平均 PUE 在所有土地 类型中均大于 1.00 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹,林地年平均 PUE 为 1.00—1.40 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹范围内,维持在 1.20 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹左右;耕地年平均 PUE 为 1.00—1.20 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹范围内,有波动上升的趋势,在 2014 年和 2020 年 出现超过林地 PUE 的现象;灌木年平均 PUE 在 0.80—1.00 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹范围内,在 2008—2020 年内变化幅度 小,维持在 1.00 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹总体趋向稳定;湿地植被的 PUE 在 2000—2019 年处于 0.40—0.80 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹,在 2019—2020 年增大到 1.3 0g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹,变化幅度较大;草地 PUE 维持在0.60 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹,波动





Fig.7 Annual PUE changes of different vegetation types in arid and semi-arid areas of China from 2000 to 2020

幅度较稳定。

如表5所示,不同土地利用类型的植被PUE与气温均呈正相关,相关系数范围为0.02—0.23,正相关强度 大小依次为湿地<草地<耕地<灌木<林地,不同土地利用类型的植被PUE与降水均呈负相关,相关系数范围 为-0.50—-0.26,负相关强度大小依次为湿地<草地<灌木<耕地<林地。

Table 5	Average PUE of different ve	egetation's c	orrelation with tem	perature and	precipitation	
土地利用类型 Land use type		草地 Grassland	湿地 Wetland	灌木 Shrub	耕地 Cultivated land	林地 Woodland
PUE 与气温的平均相关系数 The average correlation coefficient between PUE and air temperature		0.12	0.02	0.21	0.20	0.23
PUE 与降水的平均相关系数 The average correlation coefficient between PUE and precipitation		-0.27	-0.26	-0.32	-0.49	-0.50

表 5 不同土地利用类型植被平均 PUE 与气温、降水的相关性

2.4.2 地形对植被 PUE 的影响

地形是 PUE 的另一个重要影响因素。不同海拔下的植被 PUE,呈现先减后增再减的趋势(表 6),在 5001m 及以上海拔时植被 PUE 为最小值 0.03 g C m⁻² mm⁻¹,在 3001—4000m 海拔时植被 PUE 达到最大值 0.64 g C m⁻² mm⁻¹。

表 6 不同海拔下植被的平均 PUE

Table 6 Average PUE of vegetation at different altitude								
海拔 Height/m	0—1000	1001—2000	2001—3000	3001—4000	4001—5000	5001—6928		
PUE/(g C m ⁻² mm ⁻¹)	0.58	0.43	0.62	0.64	0.27	0.03		

表 7 表明,不同海拔的植被 PUE 与气温均呈正相关,相关系数范围为 0.01—0.14,不同海拔的植被 PUE 与降水均呈负相关,相关系数范围为-0.32—-0.01。

Table 7 Average PUE o	f vegetation at di	fferent altitude a	nd its correlation	n with temperatu	re and precipitati	ion
海拔 Height/m	0—1000	1001—2000	2001-3000	3001—4000	4001—5000	5001—6928
PUE 与气温的平均相关系数 The average correlation coefficient between PUE and air temperature	0.14	0.08	0.06	0.05	0.08	0.01
PUE 与降水的平均相关系数 The average correlation coefficient between PUE and precipitation	-0.32	-0.16	-0.23	-0.22	-0.19	-0.01

表 7 不同海拔下植被平均 PUE 与气温、降水的相关性

总体来看,不同海拔高度下的植被 PUE 差别较大(图 8),其中 0—1000 m、2001—3000 m 和 3001—4000 m三个海拔梯度的植被 PUE 值较大,且伴随着较大的波动;而 1001—2000 m、4001—5000 m 和 5001—6928 m 三个海拔梯度下植被 PUE 较小,波动也相对稳定。

3 讨论

3.1 中国干旱半干旱地区 PUE 时空特征

中国旱区植被 PUE 的空间分布具有明显的空间分异。塔里木盆地存在 PUE 环状高值集中区域,原因可能是塔里木河流域自然条件相对较好,又由于干旱地区植物根系发达,利用下层的土壤水分的能力强^[1],同



图 8 2000—2020 年中国干旱半干旱区不同海拔下植被 PUE 变化趋势 Fig.8 Annual PUE changes of different altitude's vegetation in arid and semi-arid areas of China from 2000 to 2020

时具有低冠层导度,每消耗单位水量的生产量较高,因而生态系统的 PUE 较高^[34];黄土高原北部 PUE 稍高, 主要原因是该地区地处内陆,气候干旱少雨,但紧邻黄河流域,植被生产能力受水的促进作用显著,植被生产 量较高^[35],NPP 稍高于其他区域,以致表现出极高的 PUE;内蒙古高原地区东部 PUE 相对较低,原因是植被 NPP 增加速率小于降水增加速率^[34],与欧阳玲^[36]的研究结果相似。

降水、水资源和人为因素是干旱半干旱区影响植被的重要因素,也会在时间尺度上造成植被 PUE 的增加 或减少。本研究发现内蒙古高原东部存在大面积显著减少区域和轻微减少区域,其原因可能是由于受人类放 牧活动和气候变化等多重因素影响,使该区域损失草地面积远大于恢复面积[36];祁连山西部出现集中连片的 PUE显著减少区域,原因是该区域内大量的农田灌溉挤占了有限的生态用水^[37],加剧了该地区水源紧张,随 着水资源的减少,导致该地区荒漠植被趋于旱化类型,湿生、中生植物减少^[38],从而导致该地区植被 PUE 呈 现显著减少的趋势;此外,伊犁河谷也出现了 PUE 轻微减少的破碎区域,过度放牧、乱砍滥伐等人类活动造成 的植被破坏也是 PUE 变化的重要驱动因素^[39],牲畜存栏的快速增长以及由此而产生的长期过度放牧是导致 伊犁河谷草地减少持续加剧的主要原因^[39-41]:华北平原北部 PUE 呈现显著下降趋势则是由于近年来该区域 城市化进程的加快,人类影响的土地利用快速扩张是致使植被 NPP 损失的重要原因,所以 PUE 呈现显著下 降趋势[42];塔里木盆地、内蒙古高原中西部和柴达木盆地为稳定不变区域,原因可能是该区域具有大面积的 荒漠地区以及稀少的降水量[43-45],气候条件稳定,植被的类型以及生长状况基本不变[4];天山北坡地区、准 噶尔盆地、青藏高原北部、黄河流域上游地区和黄土高原呈现 PUE 增加趋势,原因可能是近些年生态修复提 高了植被覆盖度有关,也可能是黄土高原的暖湿化趋势增加了植被生长条件^[46],同时,植被恢复工程的实施 可以增加植被生长条件,进而提升植被 PUE,如天山北坡地区随着"退耕还林"等政策和生态工程的实施,使 植被覆盖度呈现增加趋势^[47],而植被覆盖度增加会促进植被净初级生产力增加^[48],进而促进 PUE 的增加。 3.2 气候变化对植被 PUE 的影响

气候变化是导致植被 PUE 变化的一大因素。气候变化是首要驱动因子,而降水和气温是关键的气候驱 动因子^[4]。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^[2]。本研究表明,气温、降水与植被 PUE 的相关性为基本无关的区域主要分布于塔里木盆 地、内蒙古高原西部地区(图7),该区域植被较少,多为荒漠,对气温和降水的变化响应不敏感,因此气候变化 对于上述区域植被的影响较小。在植被相对较多的区域,降水与 PUE 多呈强负相关,这与潘换换^[3]和滑永 春^[6]等得出的研究结果是一致的。上述现象产生的机制可能是由于中国干旱半干旱地区降水量稀少,而降 水是一定的生态系统内植被生长的主要限制因子,降水量的增加会在一定程度上提升植被的生产力^[49],但同 时也会增强植被的呼吸作用^[4],植被 NPP 反而可能会下降,进而导致植被 PUE 的降低。此机制与 Bai^[2]等通 过实测数据得出的结论类似,这可能与植被的保水保肥的能力有关,是由于降水量高使得土壤表面冲刷而带 走更多的营养物质,而高降水量会使得植被生产力相应提高,呼吸消耗进而增强^[2]。另外还有研究表明,降 水所致的土壤水分可能对植物根系供氧产生抑制^[5],从而影响到植被生长^[50],进而降低植被 NPP,从而影响 植被的 PUE;对于气温因素,本研究发现,气温多与植被 PUE 呈正相关(0.02<r<0.23),这与黄小涛等^[51]对于 青海高原植被 PUE 的研究结果一致,不过其正相关相对微弱(r=0.15)。上述现象产生的原因可能是气温的 升高可能导致光合的增加幅度大于蒸散的增加幅度^[52],从而提高植被净生产量,进而使植被 PUE 提高。

3.3 土地利用和地形对 PUE 的影响

植被 PUE 的变化会受到人为土地利用变化的影响^[53]。不同土地利用类型的植被类型差异较大^[1],是导 致不同土地利用类型植被 PUE 差异以及影响气候因子作用于植被 PUE 的能力的重要因素之一。对中国干 旱半干旱地区的不同土地利用类型植被 PUE 的分析表明,林地的植被平均 PUE 是最大的,耕地的植被 PUE 次之,其次是灌木、湿地和草地的植被 PUE,这与仇洁^[9]对于植被 PUE 值及其大小顺序的研究结果较为接近, 不同的是上述研究未研究湿地、沼泽等容易受混合像元、插值精度等干扰的土地利用类型植被。林地植被 PUE 最高的原因可能是部分区域夏季冰雪融水丰富^[54],且树木根系较深可以汲取地下水,因而林地植被固定 和转化光合产物的效率高,PUE 也较大。耕地植被 PUE 值也较大可能是由于农田化肥的施用或多数农田能 够得到灌溉,由此促进了 PUE 值相对较高^[55]。一般情况下,灌木丛生长的土壤表层沙土比例较高,降水的渗 入率也随之增加,灌木区土壤表层松散的沙土层能使灌木增加对水分的吸收得到提高植被生产率^[34],这可能 是灌木植被 PUE 相对较高的原因。

关于气温和降水对不同土地利用类型植被 PUE 的影响,本研究发现湿地植被 PUE 是对气温和降水两因 子最不敏感的,正相关和负相关强度均最低(图5),原因可能是湿地常年不缺乏水分,且保水调温、自我调节 功能相对较强,因此外界变化对其内部植被 PUE 的影响作用相对较小,这与郭斌等^[56]研究结果相一致。林 地植被 PUE 是对气温和降水两因子最敏感的,正相关和负相关强度均最高(图5),原因可能是林地区域过于 干旱,水分条件是林地植被生长的主要限制条件,而气温在一定程度上可以提高或缓解干旱程度^[51],故林地 植被的 PUE 对气温和降水的变化响应相对其他土地利用类型植被来说更敏感。

海拔也是直接影响植被 PUE 的因素之一^[51-52],也会间接影响气温、降水对植被 PUE 的作用能力。海拔 的变化深刻地影响着水热组合条件的差异。研究表明,在海拔高度相同时,植被 PUE 受植被类型影响较 大^[9]。本研究发现,不同海拔的植被 PUE 与气温均呈正相关,说明在不同海拔影响下,气温始终对不同土地 利用类型植被 PUE 的影响一致;不同海拔的植被 PUE 与降水均呈负相关,说明在不同海拔影响下,降水始终 对不同土地利用类型植被 PUE 的影响一致。一般来说,海拔越低,水热组合条件越好,随着海拔的升高,PUE 应呈现降低趋势。研究发现,在 0—1000 m 海拔梯度时,植被的 PUE 并不是最大的,其原因可能是干旱半干 旱区植被 NPP 较低,该海拔梯度降水量相对较高,由于降水对植被 PUE 呈现负相关关系^[3,5],所以植被 PUE 在一定程度上减小了。这与黄小涛^[51]等的研究结果存在差异,这可能与选择的研究区域之间的差异有关。 在海拔梯度 2001—3000 m 和 3001—4000 m 时,植被 PUE 相对较高且比较接近。该海拔梯度下植被 PUE 较 高的原因可能是因为海拔升高,降水减少,由于降水与植被 PUE 负相关程度增大(表 7),导致了植被 PUE 的 增大;而 PUE 比较接近的原因可能是植被类型多样,植被 PUE 大小受到植被类型的影响要比海拔高度的影 响要大^[9],这与仇洁^[9]等对青藏高原植被 PUE 的研究结果相似。

3.4 结果的不确定性与研究展望

本研究计算植被 PUE 以及探究驱动因素过程中使用了不同空间分辨率的遥感数据,空间分辨率的差异 在一定程度上加大了研究的不确定性;植被 PUE 的影响因素是复杂的,本研究侧重于气候因子对植被 PUE 的影响分析,其他因素如地形起伏、干旱状况、大规模人类生态工程、人为治理等因素暂未考虑入内;此外,气 候条件对于植被 PUE 的影响可能存在滞后性,但是受数据时间分辨率的影响,暂难以分析滞后性带来的

影响。

未来可以考虑基于时空分辨率更高的数据开展研究,以便进一步探究植被物候变化与气候变化的关联对 植被 PUE 的影响,识别气候条件对植被 PUE 影响的滞后性与累积效应。此外,还可以考虑将干旱状况和人 类活动纳入到驱动因素分析中,从而为气候变化和人类活动背景下的植被保护与利用提供更多的依据。

4 结论

本研究计算了中国干旱半干旱区的植被降水利用效率,探讨了该区域植被降水利用效率的时空特征及其 气候驱动因素。研究发现 2000—2020 年中国干旱半干旱区植被平均 PUE 为 0.415 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹,植被 PUE 的空间分布总体上为东南向西北递减。植被 PUE 年际变化整体呈现波动上升趋势,上升速率为 0.004 g C m⁻² mm⁻¹ a⁻¹。各土地利用类型植被间的 PUE 差异较大,植被 PUE 从小到大的顺序为:草地<湿地<灌木< 耕地<林地,不同土地利用类型的植被 PUE 在时间变化趋势上存在差异。在中国干旱半干旱区的植被分布 区,气温和降水显著影响植被 PUE。气温升高主要对植被 PUE 起不同程度的促进作用。降水增多会抑制中 国干旱半干旱区绝大多数植被的 PUE。植被较少的区域,植被 PUE 与气温、降水两气候因子基本无关。随着 海拔的升高,植被 PUE 呈现出先减后增再减的趋势。海拔的变化不会影响气温、降水对植被 PUE 的影响方 向,但随着海拔的上升,植被 PUE 与气候因子的相关性整体呈减弱趋势。研究结果可为中国干旱半干旱地区 生态保护、恢复以及可持续利用提供科学参考。

参考文献(References):

- [1] 穆少杰,游永亮,朱超,周可新.中国西北部草地植被降水利用效率的时空格局.生态学报,2017,37(5):1458-1471.
- [2] Bai Y F, Wu J G, Xing Q, Pan Q M, Huang J H, Yang D L, Han X G. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia Plateau. Ecology, 2008, 89(8): 2140-2153.
- [3] 潘换换,刘雪佳,杜自强,武志涛,张红.中国干旱区自然植被降水利用效率的时空格局.山西大学学报:自然科学版,2021,44(1): 184-193.
- [4] 刘辉, 宋孝玉, 贾琼, 祝德名. 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. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3253-3262.
- [5] 同琳静,刘洋洋,王倩,李晓宇,李建龙.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.干旱地区农业研究,2019,37(5): 226-234.
- [6] 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.中国沙漠,2021,41(4):51-58.
- [7] Zheng H, Lin H, Zhou W J, Bao H, Zhu X J, Jin Z, Song Y, Wang Y Q, Liu W Z, Tang Y K. Revegetation has increased ecosystem water-use efficiency during 2000-2014 in the Chinese Loess Plateau: evidence from satellite data. Ecological Indicators, 2019, 102: 507-518.
- [8] Jiang T G, Wang X L, Afzal M, Sun L, Luo Y. Vegetation productivity and precipitation use efficiency across the Yellow River Basin: spatial patterns and controls. Remote Sensing, 2022, 14(20):5074.
- [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. 复旦学报: 自然科学版, 2014, 53(1): 126-133.
- [10] 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.
- [11] 贡璐,张海峰,安尼瓦尔・阿木提,韩春鲜.干旱区内陆河流域典型绿洲土地利用格局变化中的人为影响空间分异研究.干旱区地理, 2009, 32(4):585-591.
- [12] 李香云,杨君,王立新.干旱区土地荒漠化的人为驱动作用分析——以塔里木河流域为例.资源科学,2004,26(5):30-37.
- [13] Huang J P, Yu H P, Guan X D, Wang G Y, Guo R X. Accelerated dryland expansion under climate change. Nature Climate Change, 2016, 6 (2): 166-171.
- [14] Li C J, Fu B J, Wang S, Stringer L C, Wang Y P, Li Z D, Liu Y X, Zhou W X. Drivers and impacts of changes in China's drylands. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(12): 858-873.
- [15] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z M, Chen Y M, Cao Y, Ren J Y. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 183-194.
- [16] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901–2100. Sustainability, 2020, 12(2): 477.
- [17] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, Li Z. 1-km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [18] Peng S Z, Gang C C, Cao Y, Chen Y M. Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100. International Journal of Climatology, 2018, 38(5): 2250-2264.
- [19] Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, Chen P, Yin X J, Zhang L Q, Song J L. Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time-series MODIS surface reflectance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 209-223.

- [20] Xiao Z Q, Liang S L, Sun R, Wang J D, Jiang B. Estimating the fraction of absorbed photosynthetically active radiation from the MODIS data based GLASS leaf area index product. Remote Sensing of Environment, 2015, 171: 105-117.
- [21] Xiao Z Q, Wang T T, Liang S L, Sun R. Estimating the fractional vegetation cover from GLASS leaf area index product. Remote Sensing, 2016, 8 (4): 337.
- [22] Cui T X, Wang Y J, Sun R, Qiao C, Fan W J, Jiang G Q, Hao L Y, Zhang L. Estimating vegetation primary production in the Heihe River Basin of China with multi-scurce and multi-scale data. PLoS One, 2016, 11(4): e0153971.
- [23] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. Science, 2010, 329 (5994): 940-943.
- [24] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [25] 刘刚,孙睿,肖志强,崔天翔. 2001—2014年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系. 生态学报, 2017, 37(15): 4936-4945.
- [26] 黄春晓, 胡顺石, 黄英. 湖南省 NDVI 时空变化特征及影响因子分析. 生态科学, 2023, 42(3): 114-126.
- [27] 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利. 2000—2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征. 环境科 学, 2022, 43(6): 3230-3240.
- [28] 雷茜, 胡忠文, 王敬哲, 张英慧, 邬国锋. 1985—2015年中国不同生态系统 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2023, 43 (15): 6378-6391.
- [29] 陈月庆,周诗恬,朱明,武黎黎.河南省植被覆盖变化与驱动因子的相关性分析.信阳师范学院学报:自然科学版,2021,34(3): 401-407.
- [30] 孔锋,孙劭,王一飞,吕丽莉.近56 a 来中国东部地区雨涝事件时空演变特征.长江流域资源与环境,2018,27(7):1554-1564.
- [31] 王静, 万红莲, 张翀. 基于 MODIS 数据的宝鸡地区植被覆盖时空变化及影响因素分析. 江西农业学报, 2018, 30(1): 127-133.
- [32] 牟乐, 芦奕晓, 杨惠敏, 冯琦胜. 1981—2015年中国西北牧区植被覆盖的时空变化. 干旱区研究, 2018, 35(3): 615-623.
- [33] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 2013, 33 (24): 7798-7806.
- [34] 穆少杰,周可新,齐杨,陈奕兆,方颖,朱超.内蒙古植被降水利用效率的时空格局及其驱动因素.植物生态学报,2014,38(1):1-16.
- [35] 张艳芳, 王妹. 黄土高原植被降水利用效率对植被恢复/退化的响应. 干旱区地理, 2017, 40(1): 138-146.
- [36] 欧阳玲,马会瑶,王宗明,王昭伟,于显双.气候变化与人类活动对内蒙古东部草地净初级生产力的影响.生态学报,2020,40(19): 6912-6924.
- [37] 许守卫,孙桂仁.略论石羊河流域水资源可持续利用.农业科技与信息,2022(11):23-25.
- [38] 赵鹏,徐先英,姜生秀,徐高兴,柴成武,张逸君,马玉莲,戚福俊,高德才,张国平.石羊河下游不同衰退程度多枝柽柳灌丛水分利用 格局研究.生态学报,2022,42(17):7187-7197.
- [39] 闫俊杰,刘海军,崔东,陈晨.近15年新疆伊犁河谷草地退化时空变化特征.草业科学,2018,35(3):508-520.
- [40] 齐亚霄,张飞,陈瑞,王一山. 2001-2015 年天山北坡植被覆盖动态变化研究. 生态学报, 2020, 40(11): 3677-3687.
- [41] 王健, 张约翰. 伊犁河谷天然草原退化原因及其对策. 新疆畜牧业, 2010(4): 54-55.
- [42] 史晓亮,张娜,陈冲,尚雨,吴梦月.淮河流域植被降水利用效率时空格局分析.人民长江,2019,50(4):124-129.
- [43] 张计琛, 刘志, 赵晓英, 温成志, 孟庆华, 吴风巨. 内蒙古地区土地沙漠化及荒漠化防治. 内蒙古草业, 2008, 20(4): 37-39.
- [44] 刘畅,李诚志,李胜辉,付小磊,师庆东.基于栅格累加法的塔里木盆地沙漠化分析.干旱区地理, 2021, 44(1): 197-207.
- [45] 陈贵林. 柴达木盆地都兰县荒漠化和沙化土地现状监测评价. 林业调查规划, 2017, 42(4): 37-40.
- [46] 范瑛, 李小雁, 李广泳. 基于 MODIS/EVI 的内蒙古高原西部植被变化. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1671-1677.
- [47] 原媛,母艳梅,邓钰洁,李鑫豪,姜晓燕,高圣杰,查天山,贾昕. 植被覆盖度和物候变化对典型黑沙蒿灌丛生态系统总初级生产力的影响. 植物生态学报, 2022, 46(2):162-175.
- [48] 王思,张路路,林伟彪,黄秋森,宋亦心,叶脉.基于 MODIS-归一化植被指数的广东省植被覆盖与土地利用变化研究.生态学报,2022, 42(6):2149-2163.
- [49] Yan Y C, Liu X P, Wen Y Y, Ou J P. Quantitative analysis of the contributions of climatic and human factors to grassland productivity in Northern China. Ecological Indicators, 2019, 103: 542-553.
- [50] 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.兰州大学学报:自然科学版,2016,52(4): 466-474.
- [51] 黄小涛,姚步青,马真,周华坤.青海高原草地净初级生产力和降水利用效率时空特征.草地学报,2021,29(S1):19-26.
- [52] 米兆荣, 陈立同, 张振华, 贺金生. 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. 植物生态学报, 2015, 39(7): 649-660.
- [53] 李春娥, 刘秋荣, 张丽君. 新疆 2000—2012 年 NDVI、降水和 RUE 的时空特征. 草业科学, 2015, 32(11): 1740-1747.
- [54] 孔晶晶, 昝梅, 王雪梅, 杨雪峰. 新疆玛纳斯河流域植被水分利用效率时空格局及影响因素研究. 水资源与水工程学报, 2022, 33(6): 196-203, 212.
- [55] 叶辉, 王军邦, 黄政, 齐述华. 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. 植物生态学报, 2012, 36(12): 1237-1247.
- [56] 郭斌, 王珊, 王明田. 1999-2015 年若尔盖草原湿地净初级生产力时空变化. 应用生态学报, 2020, 31(2): 424-432.