DOI: 10.5846/stxb202106261702

孙红,方国飞,阮琳琳,李斯楠,张丽.亚洲半干旱区碳水通量时空格局及驱动因素.生态学报,2022,42(12):4742-4757. Sun H, Fang G F, Ruan L L, Li S N, Zhang L.Spatial-temporal pattern and driving factors of carbohydrate flux in semi-arid region of Asia. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12):4742-4757.

亚洲半干旱区碳水通量时空格局及驱动因素

孙 红^{1,2},方国飞^{1,2},阮琳琳^{3,4},李斯楠^{3,5,*},张 丽³

1 国家林业和草原局森林和草原病虫害防治总站(国家林草局林草防治总站), 沈阳 110034

2林草有害生物监测预警国家林业和草原局重点实验室, 沈阳 110034

3 中国科学院空天信息创新研究院 数字地球重点实验室,北京 100094

4 中国科学院大学 资源与环境学院,北京 100094

5.中铁第五勘察设计院集团有限公司,北京 102600

摘要:亚洲半干旱区生态系统敏感,环境问题突出,作为全球近 30 年来碳水通量变化最大的区域,明确其碳水通量的时空分布 格局和驱动因素对区域资源管理与可持续发展、全球气候变化等领域具有重要意义。基于植被与土壤湿度的联合同化产品 (LPJ-Vegetation and soil moisture Joint Assimilation, LPJ-VSJA),结合研究区植被及气象数据,分析了亚洲半干旱区 2010— 2018 年碳水通量植被总初级生产力(GPP)、蒸散发(ET)和水分利用效率(WUE)的时空变化、年际变化贡献率以及驱动因素。 结果表明:(1)2010—2018 年亚洲半干旱区年均 GPP、ET、WUE 空间格局总体呈"双夹型",中高纬度与低纬度地区的碳水通量 值大于中纬度区域。(2)2010—2018 年 GPP、ET 和 WUE 的年际变化总体都呈现增长趋势,但只有 GPP 呈现显著增长趋势(P< 0.05),增速为 7.82 g C m⁻² a⁻¹。(3) WUE 的年际变化表现为总体先增加后减少,正值中农田对 WUE 年际变化贡献率最大 (54.6%),森林生态系统在面积占比仅有草原五分之一的情况下仍有与草原相近的贡献率。(4)在亚洲半干旱区被植被所覆盖 的 40%区域中,WUE 与温度、降水和光合有效辐射(PAR)显著相关(P<0.05),降水为亚洲半干旱区 WUE 的主导气象因素,降 水和 PAR 共同影响了大部分区域植被的生长状况,对 WUE 多为负向影响;温度对 WUE 主要为正向影响。气象因子对 WUE 影 响的区域差异性较明显。研究结果可为亚洲半干旱区制定植被和水资源管理策略、实现可持续发展提供参考。 关键词:亚洲半干旱区;碳水通量;水分利用效率;驱动因素

Spatial-temporal pattern and driving factors of carbohydrate flux in semi-arid region of Asia

SUN Hong^{1,2}, FANG Guofei^{1,2}, RUAN Linlin^{3,4}, LI Sinan^{3,5,*}, ZHANG Li³

1 General Station of Forest and Grassland Pest Management, National Forestry and Grassland Administration, Shenyang 110034, China

2 Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forest and Grassland Pest Monitoring and Warning, Shenyang 110034, China

3 Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

4 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 China Railway Fifth Survey And Design Institute Group CO., LTD. Beijing 102600, China

Abstract: The semi-arid region of Asia is sensitive to ecosystem and has prominently environmental problems. As the region with the largest change of carbon and water fluxes in the past 30 years, it is of great significance to clarify the spatial and temporal distribution pattern and driving factors of carbon and water fluxes for regional resource management and sustainable development, global climate change and other fields. Based on the combined assimilation product of vegetation and soil moisture (LPJ-Vegetation and soil moisture joint assimilation, LPJ-VSJA), combined with the vegetation and

收稿日期:2021-06-26; 采用日期:2022-03-10

基金项目:国家重大科技专项"高分辨率对地观测系统"重点专项(21-Y30B02-9001-19/22);国家自然科学基金项目(41771392)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lisn@ aircas.ac.cn

meteorological data of the study area, this paper analyzed the spatiotemporal variation, annual variation contribution rate and driving factors of carbon and water fluxes Gross Primary Productivity (GPP), Evapotranspiration (*ET*), and Water use efficiency (WUE) in the Asian semi-arid region from 2010 to 2018. The results show that: 1) the spatial patterns of GPP, *ET* and WUE in the Asian semi-arid region from 2010 to 2018 were "Double Clip", and the carbon and water fluxes in the mid-high and low latitudes were greater than those in the middle latitudes. 2) From 2010 to 2018, the annual changes of GPP, *ET* and WUE showed a growth trend, but only GPP showed the significant growth trend (P < 0.05), with a growth rate of 7.82 g C m⁻² a⁻¹. 3) The contribution rate of farmland to WUE was the largest (54.6%), and the contribution rate of forest ecosystem was similar to that of grassland when the area of forest ecosystem accounted for only one fifth of grassland. 4) The WUE was significantly correlated with temperature, precipitation and photosynthetically active radiation (PAR) in 40% of the semi-arid areas of Asia covered by vegetation (P < 0.05). Precipitation was the dominant meteorological factor of WUE in the Asian semi-arid region. Precipitation and PAR affected the growth of vegetation in most regions, and had a negative impact on WUE; Temperature has a positive effect on WUE. The influence of meteorological factors on WUE had obviously regional differences. The results of this study can provide reference for formulating vegetation and water resources management strategies, as well as achieving sustainable development in Asian semi-arid region.

Key Words: Asia semi-arid region; carbon and water fluxes; water use efficiency; driving factors

碳循环与水循环之间具有极强的耦合性^[1],是陆地生态系统物质循环与能量交换的重要过程^[2]。碳水 循环对区域水资源管理、生态系统调节及可持续发展具有重要指导价值,尤其是在生态系统脆弱^[3]、水资源 短缺的半干旱区^[4]。人类活动与气候变化使得碳水循环格局发生改变^[5],不同尺度的碳水通量时空变化及 其驱动因素受到广泛关注^[6]。而半干旱生态系统是全球碳汇年际和趋势变化的主导驱动因素与异常来 源^[7-8],其植被生产力受表层土壤湿度控制的影响也更为明显^[9]。因此,研究半干旱区陆地生态系统碳水通 量时空变化格局及其对气候因子的响应对区域资源管理与可持续发展、全球气候变化等领域具有重要意义。

植被总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)、蒸散发(Evapotranspiration, *ET*)和水分利用效率 (Water use efficiency, WUE)是研究陆地生态系统碳循环^[10]、水循环^[11]以及碳水循环耦合程度的常用指标^[12]。其中,宏观尺度的WUE通常定义为GPP和*ET*的比值,表示生态系统耗费每单位质量水所固定的碳量或生产的干物质^[13]。WUE是了解生态系统生产力对外部环境响应的关键变量,其对温度、降水和辐射的响应都存在临界值^[14],并且受土壤湿度控制^[15],对LAI呈现积极响应^[16]。目前全球通量观测网络可以获取高精度长时间序列的GPP、*ET*和WUE数据^[17],但区域尺度扩展困难,尤其半干旱地区观测站点分布较为稀疏。基于站点通量观测数据,可以通过模型模拟或是模型-观测数据同化方法获取大尺度长时间序列的碳水通量数据。模型模拟方法考虑了生态系统机理过程,但结果依赖于输入参数以及输入数据,具有较大不确定性。而模型-观测数据同化方法可以基于观测数据控制模型估算结果,降低模型的不确定性,已被广泛应用于陆地碳水循环研究中^[18-20]。

亚洲半干旱区是全球半干旱区中近 30 年来碳水通量变化幅度最大的区域^[21],生态系统敏感,并且受气候环境变化与人类活动影响较大^[22]。该区域内的中亚及其它地区存在土壤荒漠化、盐碱化和生态多样性下降等环境问题^[23-24]。多种因素使得亚洲半干旱区碳水通量时空变化幅度较大,不确定性较高。目前针对亚洲半干旱区碳水通量时空动态变化及驱动因素的研究主要集中于中亚^[25]等局部地区。张建财等^[26]应用 LPJ 模型(Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model)模拟了 1982 至 2012 年中亚地区的 NPP 和 *ET*,模拟结果表明两者呈波动上升趋势并且具有相似的空间分布,低值分布区主要位于荒漠及哈萨克中部草地,高值分布区位于林地、草林地混合区及耕地。郝海超等^[27]基于 MODIS 数据产品,分析了中亚地区 2000 至 2018 年 GPP、*ET* 和 WUE 的时空变化趋势,发现在研究时段年序列上,GPP 与 *ET* 都具有略微增加的趋势,而 WUE 却呈现小幅度下降。中亚地区 WUE 显著上升区域少于显著下降区域,对气候因子的敏感性具有明显的空间

差异。邹杰等分析中亚地区 WUE 对干旱的响应后发现^[28],WUE 在干旱发生时一般为负面响应,结束后为正 面响应,具有滞后效应。Zhou 等发现在中亚地区人类社会制度与经济变化对植被的负面影响主要是因为土 地废弃和水资源短缺^[29],而作物类型改变、放牧的减少和水资源的增加会对植被有正面影响,中亚地区气候 变化对植被有显著影响并且有地区差异^[30]。Han 等发现在 1979 至 2011 年间,放牧降低了中亚地区 的 WUE^[31]。

目前针对整个亚洲半干旱区的研究较少,缺乏对该地区的碳汇能力、蒸散以及水分利用效率的时空格局分析以及不同因子影响下碳水循环变化的系统性研究。因此,本研究以亚洲半干旱区为研究区,采用 LPJ-VSJA(LPJ-Vegetation and soil moisture Joint Assimilation)联合同化产品^[32]分析亚洲半干旱地区 2010—2018 年 生态系统植被碳水通量时空格局及其驱动机制,研究结果可为亚洲半干旱区制定植被和水资源管理策略、实现可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

亚洲半干旱区包括中亚,中国内蒙古草原,俄罗斯南部以及印度被大部分农田覆盖的半干旱区。研究区 深入大陆远离海洋,位于10°—130°E和0°—60°N之间,纵跨寒带、温带和热带,主要受西风气候的影响。其 东南部有高原山区,大部分是草原,沙漠的平原地区,以季风气候为主。研究区中部主要集中在从里海往东到 中国内蒙古中部。该地区受周边青藏-帕米尔高原和天山山系对太平洋、印度洋暖湿气流的阻挡,气候类型 为典型的温带大陆性气候,冬季寒冷,夏季炎热干燥,气温日变化和季节变化都较大,在中亚的北纬40°地带 夏季光照强烈,与热带地区相当,较低的空气湿度和高温导致了大量的水分蒸发。其年降水的空间分布由东、 西两边向亚洲半干旱区中部逐渐减少,东部降水主要集中在夏季,受季风控制;西部降水主要集中在冬季,受 西风控制。

灌木、草原、农田等地广泛分布于亚洲半干旱地区(图1)。草原是主要的土地覆盖类型,其中哈萨克斯坦 草原面积达196km²,占领土面积的72%。耕地其次,主要集中在俄罗斯西南部和印度的大部分地区。研究区 内人类活动频繁(垦荒、放牧、灌溉等),部分地区的生态环境明显退化。近几十年印度与中国地区的植树造 林使得绿度大面积增加^[33],对研究区水分利用效率变化有着明显的影响^[34]。

1.2 数据

1.2.1 GPP、ET 和 WUE 数据

2010—2018年的 GPP、ET、WUE 的数据来源于 Li 等在 2020年的研发的 LPJ-VSJA(LPJ-Vegetation and soil moisture Joint Assimilation)联合同化产品^[32]。该产品是通过将 GLASS(Global Land Surface Satellite) LAI 产品与 SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity)和 SMAP(Soil Moisture Active and Passive)土壤湿度数据在 LPJ-PM(LPJ-DGVM(Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model)动态植被模型与 PT-JPL_{SM}(the updated Priestley Taylor-Jet Propulsion Laboratory)蒸散模型进行耦合)耦合模型中进行联合同化生成,时间分辨率为每日,空间分辨率为 0.25°纬度×0.25°经度。该同化产品经过站点以及空间产品的验证,被证明在全球大尺度区域可以较为准确的模拟时间序列的碳水通量,尤其是在受水分限制的地区具有较高的精度(*R*=0.75, RMSD=0.72 mm/d)^[32],因此可以对气候变化下的碳水循环趋势进行预测与空间分析。

1.2.2 自然因素数据

本文选取了温度、降水、光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)、土壤湿度、叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI)这五个因子,利用相关分析来探讨气象因子和植被、土壤参量对该区域植被 WUE 的影 响作用。为统一数据集的空间尺度,采用双线性插值方法将其重采样到 0.25°,与 LPJ-VSJA 联合同化产品具 有一致的空间分辨率。

气象及 PAR 数据来源于 The Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications version 2



土地覆盖数据来源于 MODIS MCD12Q1 数据产品,图中亚洲边界内覆盖区域为研究区

(MERRA-2)全球高分辨率再分析日尺度气候数据,包括降水,温度,PAR,云量等(https://www.esrl.noaa.gov/psd/)。该数据集由 NASA 全球建模与数据同化办公室(NASA's global modeling and assimilation office, GMAO)生产与更新,空间分辨率为 0.5°纬度×0.667°经度。第二版与第一版 MERRA 产品相比,不仅通过辐射 以及同化偏差校正使降水以及不同垂直水平的大气相关数据得到了较大的改善^[35],还利用 NASA 对于气溶 胶与温度的观测与其他物理过程进行交互式分析,更好的表示大气循环过程。多项研究对其进行了质量评估 与不确定性分析,并证明了其可靠性^[36-39]。

土壤水分和海洋盐度(Soil Moisture and Ocean Salinity, SMOS)卫星于 2010 年由欧洲航天局发射,与土壤 水分主被动卫星(Soil Moisture Active and Passive, SMAP)类似, SMOS 使用的辐射计仪器在 L 波段工作^[40]。 与具有恒定的观测入射角的 SMAP 卫星相比, SMOS 测量的是一个观测入射角范围内的亮度温度。该角度信 息可用于上方土壤和植被信号的分离。SMOS-L2 SSM 数据可以从欧空局数据网站中获取(https://earth.esa. int/eogateway/missions/smos/data)。

叶面积指数(LAI)来源于全球陆表特征参量产品(GLASS)LAI产品。GLASS LAI产品是通过结合地面观 测和 MODIS、CYCLOPES LAI 信息,再利用 MODIS 反射率对融合的 LAI 使用广义回归神经网络法(General Regression Neural Networks, GRNNs)进行训练生成,经过验证该方法可以提高长时间序列的 LAI 的反演精 度^[41-42]。该产品已广泛应用于全球和区域地表 LAI产品的生产,以及植被覆盖的动态监测,可为全球植被生态监测和变化规律等提供科学数据支持^[42-43]。本文使用的数据时间范围为 2010—2018 年,空间分辨率为 5km,时间分辨率 8 天,投影方式为正弦投影。

1.2.3 生态系统分类数据

本文所使用的生态系统分类数据包括全球植被覆盖数据和干湿地区分类数据,利用 MCD12Q1(The MODIS Land Cover Type Product)的土地覆盖数据对结果分植被类别进行解释分析。该产品分辨率为 500m, 通过高精度训练样本进行监督分类生成^[44]。文中所指的灌丛类型是由 MODIS IGBP (the International Geosphere-Biosphere Programm)分类方案中的郁闭灌丛和稀树灌丛合并而成,森林植被类型是由混合森林,落

叶阔叶林,落叶针叶林,常绿针叶林,常绿阔叶林组成。

区分干旱区与湿润区的依据为 Middleton 等^[45] 对全球干湿区域的分类系统,利用"干旱指数"划分不同 干湿区域。干旱指数定义为降水和潜在蒸散量的比值。干旱指数在 0.2—0.65 之间的地区被定义为半干旱 地区。

1.3 研究方法

1.3.1 时间序列分析方法

本文采用线性回归及变异系数,探讨不同尺度半干旱区生态系统碳水通量变化趋势和幅度。

① 线性回归斜率估计采用一元线性方程,对碳水通量进行回归分析。

$$y = a + bx + \varepsilon \tag{1}$$

式中, y 为表示植被碳水通量, x 表示时间, 斜率 b 为依据线性回归方程对通量随时间变化的量化指标, a 和 e 分别代表截距和误差。利用最小一乘法(Least Absolute Deviation, LAD)确定回归模型的相关系数, 采用观测 值与拟合值绝对偏差之和最小的标准计算回归模型参数:

$$\Delta = \min \left(\sum_{i=1}^{k} |y_i - \hat{y}_i| \right)$$
 (2)

式中, y_i 为观测值, \hat{y}_i 为模型拟合值, i 为观测值个数, k 为观测值总数。

对于研究空间时间序列图像和时间序列统计值,本文均采用一元线性回归拟合趋势分析。

②本研究采用变异系数(coefficient of variation, *CV*)分析区域碳水通量随时间的波动强度。变异系数(*CV*),又称"离散系数",其定义为时间序列值标准差(*SD*)与平均值(*MN*)之比:

$$CV = \frac{SD}{MN} \tag{3}$$

变异系数是一个无量纲量,可以消除多组数据因为单位或者平均数量级不同对变异程度的影响。

1.3.2 驱动因子相关分析方法

为研究亚洲半干旱区植被碳水通量对全球变化的响应关系,本文采用复相关分析、偏相关分析研究各驱 动要素(如气象、人文等)与碳水通量之间的相关性,探讨不同尺度半干旱区的碳水通量动态变化的主控 因子。

(1)复相关分析

通过计算相关系数来反映不同驱动因子(叶面积指数和表层土壤湿度)对 GPP, ET 和 WUE 之间的相关性。公式中, y_i表示驱动因子在第i年的平均值, x_i表示第i年的碳水通量(GPP、NEP、ET、WUE); R_{xy}为复相关系数,其数值愈大,变量间的关系愈密切^[46-47]。

$$R_{xy} = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} (x_i \times y_i) - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{\sqrt{n \times \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} x_i)^2} \sqrt{n \times \sum_{i=1}^{n} y_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} y_i)^2}}$$
(4)

采用 T 检验来进行相关性的显著性检验,计算公式如下:

$$T = \frac{R \times \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}} \tag{5}$$

式中,R表示相关系数,n为年数8年。

(2) 偏相关分析

简单相关无法反映单独的气象因子对 WUE 的影响,因此进一步采取偏相关分析研究 WUE 对温度,降水和光合有效辐射(PAR)剔除各自影响后的响应作用^[48]。

$$r_{x_{1}y,x_{2}} = \frac{r_{x_{1}y} - r_{x_{1}x_{2}} r_{x_{2}y}}{\sqrt{1 - r_{x_{1}x_{2}}^{2}} \sqrt{1 - r_{x_{2}y}^{2}}}$$
(6)

http://www.ecologica.cn

 $r_{x_{1y}}$ 、 $r_{x_{2y}}$ 、 $r_{x_{1x_{2}}}$ 分别为 WUE 与其中一个因子、WUE 与其他因子、该因子与其他因子之间的简单相关关系。 $r_{x_{1y,x_{2}}}$ 表示去除控制变量 x_{2} 影响之后, x_{1} 变量和其他变量之间的直线相关。

(3) 水分利用效率年际变化(Inter-annual Variability, IAV)贡献率计算

本研究中的水分利用效率(WUE)由 GPP 与 *ET* 的比值得出,单位为 g C/m² H₂O。此处年际变化 IAV 的 定义为 WUE 的距平值,即去除一阶线性趋势后的 WUE 值^[7]。

$$X_{\text{IAV}-i} = X_i - \overline{X} \tag{7}$$

式中 X_{IAV-i} 为i年某土地覆盖类型 WUE 的距平值, X_i 是土地覆盖类型对应年份的数值, \bar{X} 为该土地覆盖类型 WUE 的多年平均值。

j 植被类型区域(或每个栅格区域)对研究区全局 WUE IAV 的贡献值定义为^[7]:

$$f_j = \frac{\sum_{i} \frac{X_{ji} |X_i|}{X_i}}{\sum_{i} |X_i|}$$
(8)

式中: x_{j_i} 为 t年的 j 类植被覆盖 WUE 距平, X_i 为全局 WUE 距平, f_j 为该植被区域的 WUE 相对距平。根据定 义: $\sum_{j} f_j = 1$ 。本文中的贡献率以百分率表示。公式(7)可应用于所有去除趋势之后的数据集,即各分量之和 为总体通量即可。因此 GPP 与 *ET* 也可以作为因子来计算各自对 WUE 年际变化的贡献率。

2 结果与讨论

2.1 亚洲半干旱区碳水通量时空格局分析

2.1.1 总体时空变化特征

2010—2018 年亚洲半干旱区年均 GPP、ET、WUE 空间分布趋势总体一致(图 2),三者的高值区(GPP > 1300g C m⁻²a⁻¹, ET > 350 mm/a, WUE > 2.3g C m⁻² H₂Oa⁻¹)多分布于印度和俄罗斯位于亚洲地区的西南部的农林交错带以及中南部的混合林覆盖区域。低值区(GPP < 600 g C m⁻²a⁻¹, ET < 200 mm/a, WUE < 1.3 g C Kg⁻¹ H₂O a⁻¹)大体分布在中亚,蒙古和中国内蒙古草原地带,其中途径黄河流域的 ET 值相对较高(约 350 mm/a)。高低值的空间分布一般与气候和人为因素有关,低值区多为暖干型气候,其中中亚降水量常年在200 mm 以下。蒙古与内蒙古草原地区生态环境脆弱,且草地相比农田与森林来说,对气候变化更为敏感^[49]。除此之外,其人为放牧,草场退化,土壤侵蚀等人为干扰也都导致了较低的碳水通量。整体来说,亚洲半干旱区碳水通量空间分布格局成"双夹"型,即中高纬度与低纬度地区的碳水通量值大于中纬度区域的分布特点。

图 3 为 GPP、ET、WUE 的时间变化趋势和其与表层土壤湿度的经纬度分布规律。分别对 GPP,ET 的空间 栅格值进行二次线性插值后重采样到 1°的空间格网中,以 1°为分隔单位,来分析亚洲半干旱区的 GPP 与 ET 和表层土壤湿度(SMOS 产品)年均值的经纬度分布规律。总体来说,ET 和 GPP 的经度带分布规律与土壤湿度分布规律大体一致,但在某些区域(如 70°—85°E 带)变化趋势出现差别。东部(ET 为 154.59 mm/a,GPP 为 681.82 g C m⁻² a⁻¹)和西部(ET 为 136.90 mm/a ,GPP 为 592.34 C m⁻² a⁻¹)碳水通量均值小于中部(70—90°E,ET 为 201.17 mm/a,GPP 为 938.28 g C m⁻² a⁻¹),这是由于中部地区跨纬度较大,且植被类型较丰富。在 70°—85°E 带之间,土壤湿度没有明显变化,但是 GPP 与 ET 波动较大,说明该地区土壤湿度不是其主控因子,而是其他气候因素(温度,光照等)控制着 GPP 和 ET 的变化。从纬度分布上来说,GPP 与 ET 的分布符合其空间分布格局特点,土壤湿度在中高纬度出现最高值,却没有对应 GPP 和 ET 的最高值,这是由于中高纬度带受到低温的限制。在 30°—40°N 纬度带间,GPP 和 ET 与土壤湿度呈现出了相反的变化趋势,主要涉及到的区域是印度的灌溉农田与灌木区以及阿富汗和巴基斯坦的灌木区。在印度的水田区域,地面及地下水被大量用于灌溉,成熟的集约化耕作制度再加上大量化肥的使用^[50-51],使得农作物消耗尽量小的水分来获得最大的生产力,从而水分利用效率较高,其表层土壤湿度不是最主要的影响因素^[52-53]。



图 2 2010—2018 年亚洲半干旱植被区年均 GPP、ET、WUE 空间分布图 Fig.2 Spatial distribution of annual average GPP, ET and WUE in semiarid area of Asia from 2010 to 2018 GPP: 总初级生产力 Gross primary productivity;ET: 蒸散发 Evapotranspiration;WUE: 和水分利用效率 Water use efficiency

从统计上来说,GPP 表现出显著的增长趋势(P<0.05),增速为 7.82 g C m⁻² a⁻¹。而 ET 和 WUE 的增长趋势不显著,ET 在 2017 年出现最低值,为 349.2 mm。WUE 在 2010 年的空间平均值与 2018 年基本持平,在1.31 g C m⁻² H₂O a⁻¹左右。

从变化趋势空间图(图4)中可以看出,GPP 和 ET 在大部分地区都呈现出显著上升的趋势,GPP 显著增长面积占所有植被区的 19.3%,主要分布在草原土地覆盖类型和印度河流域的农田区域。显著下降区域占比为 15.3%,主要分布在灌木土地覆盖类型以及印度中部的农田区域。ET 显著增长的面积占植被区的 25.9%,呈现显著下降的面积占比为 7.2%,其空间分布特点与 GPP 大体相同。WUE 变化趋势的空间分布与均值空间分布相一致,即 WUE 较低的区域出现显著下降趋势(占植被区域的 8.3%),较高区域出现显著增加趋势(占所有植被区域的 14.6%)。其中印度中部的农田区域在 GPP 和 ET 的空间变化趋势图中显示出显著下降的趋势,而在 WUE 中表现出显著增长的趋势,这说明其 ET 与 GPP 相比下降幅度更大。变异系数空间分布则反映了通量的变化强度,可以概括为中亚西部,西亚的灌木区域以及蒙古草原的东部碳水通量变化最为剧烈。结合两者的分析结果可以说明,变异系数大的区域,如果碳水通量表现出显著上升或下降趋势,则是时间序列内的波动性上升或下降;反之,则是持续性的上升或者下降。



图 3 亚洲半干旱植被区 GPP、ET、WUE 空间平均值年际变化与经纬度分布图

Fig.3 Interannual variation of spatial mean values of GPP, *ET* and WUE and their longitude and latitude distribution in semiarid area of Asia

SM: 土壤湿度 Soil moisture

2.1.2 不同土地覆盖类型中植被的碳水通量时空变化特征

亚洲半干旱区土地覆盖类型主要有森林(8.6%)、灌木(9.4%)、草地(43.8%)、农田(22.5%)。从区域总体以及不同土地覆盖类型中植被的碳水通量平均值看(图5),森林与农田的GPP,ET和WUE相对较高,草原的碳水通量最低,且低于总体区域平均值。各类土地覆盖类型的GPP都呈现增加趋势,其中草原作为区域的主要土地覆盖类型,和总体区域的GPP都呈现显著增加的趋势(P<0.01)。农田也表现出比较显著的增长趋势(P=0.06),其显著增长面积占比最大,主要分布在印度河流域的水田区域,而印度半岛以及德干高原的耕地大部分呈现显著下降的趋势。灌木土地覆盖类型的GPP显著增长占比(5.9%)与显著降低占的比例相差不大,甚至显著降低占的比例略大(6.1%),主要分布在阿富汗和巴基斯坦的高原和山地区域以及印度河平原。在过去,研究区内人类活动频繁,过度放牧、毁林毁草开荒等行为对区域内生态环境有负面影响^[54],加重了植被退化、土地荒漠化等生态问题。但1990年以后亚洲多个国家开始实行植树造林^[55],随后又推行退耕退牧政策,郭岩等研究发现2000—2017年中亚地区植被退化趋势改善,人类活动对植被特征有积极影响^[56],人为积极的干预可以有效保护甚至是提高植被生态系统生产力。

对比 ET 不同植被类型的年际变化趋势和面积占比,发现所有植被类型的总体 ET 年际变化都不显著,但 是空间上的 ET 显著增长面积占比超过 20%,显著降低的面积仅占 7.2%。农田在 WUE 中有着较高的显著增 长面积,其 ET 显著增长和降低的区域与 GPP 相同。与 ET 的年际变化趋势相同,近 8 年 WUE 所有植被类型



42 卷





的总体年际变化都不显著,灌木类型呈现下降趋势。从森林的 GPP 和 ET 的变化趋势可以看出,其 ET 的显 著下降面积较多,而 GPP 的显著增长面积百分比高于 ET,因此会影响一部分区域的 WUE 呈现增长趋势。总 体而言,2010—2018 年 GPP、ET 和 WUE 的总体年际变化都呈现增长趋势,并且大部分植被类型的显著增长 面积百分比高于显著降低的百分比。

2.2 不同土地覆盖类型中植被对 WUE 年际变化的贡献率分析

亚洲半干旱区各个土地覆盖类型年 WUE IAV 总体年际变化波动性较大(图6),呈现出 WUE 先增加后减 少的状态。各土地覆盖类型与总体 WUE IAV 并不具有同样的趋势,尤其是灌木类型,8 年里 6 年都与总体年 际变化趋势相反,甚至在 2010 年与 2014 年与其他土地覆盖类型的 WUE 年际变化趋势都相反,这也对应了其 贡献率为负值。

从各个土地覆盖类型对 WUE IAV 的贡献分布图可以看出(图6),灌木的贡献率最大,但是为负值。研究 区中的灌木主要分布在乌兹别克斯坦东部、伊朗东北部和伊拉克、叙利亚北部附近。2000—2018 年间灌木的 WUE 呈现下降的趋势,Wei 等研究发现 2000—2014 年间中亚地区灌木受干旱影响会导致 WUE 的下降^[57]。 研究区内 2003—2015 年间中亚地区干旱发生的时间更长、程度更为严重^[58],而许多灌木可能在长期的干旱 中死亡^[59]。研究区中的灌木可能在未受到有效保护及管理措施的情况下,相比其他土地覆盖类型波动较大 从而导致其 WUE 年际变化幅度较大,且为负值。正值中农田的贡献率最大,为54.6%。森林与草原的贡献率 相差不大,分别占全局的 34.1%和 40.1%,但森林的面积占比仅为草原的五分之一,这表明森林生态系统对半 干旱区水分利用效率具有很大的影响。研究区中的森林要集中分布于俄罗斯与哈萨克斯坦国界处的农林交 错带以及俄罗斯中部的混合林覆盖区域,在 2001—2015 年间大部分地区较为稳定,少部分地区受火灾的扰



图 5 研究区与不同植被区域碳水通量变化趋势及显著变化面积比统计图(P<0.05) Fig.5 Change trend of carbon and water fluxes in the study area and different vegetation areas and statistical chart of significant change area ratio (P<0.05)

动^[60],可能会使得 WUE 减少,距平值为负。^[61]农田在人类管理下受到气候影响的变化较小,农田灌溉及施肥 方式的合理选择^[62],耕作方式的改进^[63],农作物品种改良^[64]等措施有利于农田水分利用效率的提高。

2.3 亚洲半干旱区 WUE 年际变化驱动力分析

2010—2018年,亚洲半干旱区 WUE 年际变化波动程度不大,范围在 1.28—1.34 g C/m² H₂O 之间。然而 不同区域不同植被类型之间 WUE 的年际变化空间差异显著。

三个气象因子(温度、降水、PAR)与 WUE 的相关系数空间分布如图 7 所示,总体而言,2010—2018 年间, 研究区 WUE 对三个气象因子表现出显著相关的区域(P<0.05)占植被区域的 40%。降水对 WUE 多为负向影 响,主要出现在哈萨克斯坦南部、东南部和内蒙古的草原以及印度河平原的农田区域。这与 Zhang 等^[65]的研 究结果相一致,其发现在水分限制地区,降水增加会导致 ET 高于光合作用,从而使 WUE 下降,并且在水热同 步的印度河平原耕地,水分不是主要限制因素。因为降雨会使土壤蒸发增大,进而降低 WUE。PAR 对 WUE 也主要为负相关,主要集中在哈萨克斯坦的中部草原和印度河平原的农田区域,小部分正相关区域分布于内





Fig.6 WUE IAV of different landcover types in the study area from 2010 to 2018 and contribution rate of each landcover type to WUE IAV IAV: 年际变化 Inter-annual variability

蒙古草原以及俄罗斯的森林区域。

大部分研究认为 WUE 随着 PAR 的增加而增加,但是达到某一数值后会随着 PAR 的增加呈现下降趋势, 且容易受到多种因素的影响(如气溶胶)^[6,66]。WUE 对气候因子的响应会随着地区不同而变化,出现负面响 应可能是由于在长时间强光照射以及干旱条件下,研究区内植被的 GPP 值不再随着 PAR 而增加,但是 ET 依 旧保持增加的趋势,导致 PAR 与 WUE 负相关^[67]。温度对 WUE 主要为正向影响,多分布在哈萨克斯坦的中 部草原,在这个区域中温度对 WUE 的影响与 PAR 对其的影响相反。除了中亚,温度的负相关区域与降水的 负相关区域大体一致。此外,从相关系数的区域统计直方图中也可以得出相应的结论。

分析三个气象变量对 WUE 的综合影响(图 7,表 1)可以发现,降水是亚洲半干旱区 WUE 最重要的影响 因素,这与 Zhang 等^[21]和 Liu 等^[68]的研究结果相同。约有 12.4%的植被受到降水的显著影响,仅降水就影响 了 5.6%的区域。中亚南部和内蒙古草原中部受降水的影响较大。PAR 是影响 WUE 的第二大气象因素,约 9.3%的植被区域受 PAR 显著影响,其中仅 PAR 单独影响区域占比为 3.5%,PAR 是印度耕地区域 WUE 变化 的主导气象因素。温度对 WUE 的影响区域较小,有 5.6%的植被区域受温度的显著影响,其单独影响占比仅 为 1.9%,主要分布在中高纬度植被区域。降水与温度、降水与 PAR、温度与 PAR 以及三者的综合效应分别占 亚洲半干旱植被区的 1.4%、3.6%、0.4%和 1.8%。综上,降水为亚洲半干旱区 WUE 的主导气象因素,降水和 PAR 共同影响了大部分区域植被的生长状况,且气象因子对 WUE 的影响具有明显的区域差异性。全球气候 变化所带来的极端气候事件(长时间强降雨、干旱等)以及地区降雨特征变化(降雨量、频率等)可能会使得区 域碳水耦合循环机制受到影响^[69],水分利用率发生改变。因此,对区域气候的监测以及对极端气候事件的采 取响应措施对维持水分利用率具有重要意义。

植被参量(LAI)与土壤参量(表层土壤湿度(SSM))对 WUE 的空间相关性如图 7 所示。从对应的统计直 方图也可以看出,LAI与 SSM 在大部分区域与 WUE 呈现显著正相关,尤其是 LAI 的显著正相关区域达到了 约 37%,负相关区域仅占 2.8%。自 21 世纪以来,在卫星监测下的印度绿化趋势明显,仅仅耕地就贡献了印度 LAI 变化的 82%^[33]。SSM 主要在中高纬度农田和草原,以及印度河流域的水田区域与 WUE 为显著正相关 (23%),负相关区域(8.3%)主要分布在森林植被类型中。总体来说,LAI 与 SSM 共同控制着 WUE 的年际变 化。LAI 和 SSM 与生态系统水分利用效率的相关性总体较好,表明利用 LAI 和土壤湿度可以简单地预测亚洲 半干旱生态系统水分利用效率。

在半干旱区生态系统中,GPP 和 ET 大多是呈现强耦合特征的。因此本文利用偏相关系数探讨 GPP 和 ET 分别对 WUE 的影响强度,图 7 中分别表示了剔除 ET、GPP 的影响。从图 7WUE 与 GPP、ET 的偏相关系数 空间分布图中可以看出,GPP 和 ET 与 WUE 都表现出强烈的相关性。GPP 与 WUE 为正相关,ET 与 WUE 为 负相关,相关系数都在 0.9 以上。而在巴基斯坦的灌丛区域和中亚南部的草原,GPP 与 WUE 的相关性稍弱。

该地区也是 WUE 显著下降区域,这说明了导致该地区 WUE 下降的原因更多的在于 ET 的增加,而不是 GPP 的下降。利用公式(7)计算得出整个研究区中 GPP 对 WUE 的贡献率为 57%,而 ET 为 51%,GPP 的变化更多 地影响着 WUE 的变化。因此,可以通过退耕还林、退耕还草等措施增加植被固碳能力和碳储量,从而提高区 域水分利用效率^[70]。



http://www.ecologica.cn

偏相关系数 _____1.0 偏相关系数 WUE与GPP偏相关系数空间分布 WUE与ET偏相关 -0.9 系数空间分布 0.95 -0.95 1.0 P > 0.050.9 0 1046 km 1.0 1.0 WUE-GPP P<0.01 WUE-ET P<0.01 Percentage of area/% 70 0.0 9.0 8.0 9.0 8.0 /% 0.8 面积占比 面积占比 0.90 0.92 0.94 0.96 0.98 -0.98 -0.96 -0.94 -0.92 -0.90 1.00 -1.00相关系数 Correlation coefficient 相关系数 Correlation coefficient

图 7 2010—2018 年植被 WUE 对不同气象, 叶面积指数, 土壤湿度及 GPP 和 ET 的相关性系数及其直方图分布

Fig.7 Correlation coefficient and histogram distribution of vegetation WUE to different Meteorological factors, leaf area index, soil moisture, GPP and *ET* in 2010–2018

WUE-multi 代表 WUE 受降水、温度和 PAR 三个因素的综合影响; LAI: 叶面积指数 Leaf area index; PAR: 光合有效辐射 Photosynthetically active radiation

表1 WUE 与降水,温度,辐射通量显著相关(单独影响与综合影响)占总植被区域的面积百分比

Table 1 WUE was significantly correlated with precipitation, temperature and radiation flux (single effect and combined effect) as a percentage of total vegetation area

0				
影响因素占比 Proportion	降水 Precipitation	温度 Temperature	光合有效辐射 PAR	综合 Comprehensive
降水 Precipitation	5.60%	1.40%	3.60%	1.80%
温度 Temperature	1.40%	1.90%	0.40%	
光合有效辐射 PAR	3.60%	0.40%	3.50%	
	12.40%	5.60%	9.30%	

PAR: 光合有效辐射 Photosynthetically active radiation; WUE: 和水分利用效率 Water use efficiency

3 结论

本研究基于 LPJ-VSJA 联合同化产品,结合研究区植被及气候数据,分析了亚洲半干旱区 GPP、ET 和 WUE 的时空变化、年际变化贡献率以及驱动因素。主要结论如下:

(1)2010—2018 年年均 GPP、ET、WUE 空间格局总体趋于一致,分布特点为中高纬度与低纬度地区的碳水通量值大于中纬度区域。ET和 GPP 的经度带分布规律与土壤湿度分布规律大体一致,纬度带分布规律与 空间分布特点一致。

(2)2010—2018 年 GPP、*ET* 和 WUE 的总体年际变化都呈现增长趋势,只有 GPP 呈现显著的增长趋势 (*P*<0.05),增速为 7.82 g C m⁻² a ⁻¹,显著增长面积占所有植被区的 19.3%,显著下降面积占 15.3%。WUE 较低的区域出现显著下降趋势,较高区域出现显著增加趋势。

(3)农田在 GPP、ET 和 WUE 中都显示出较高的显著增长面积,尤其是在 WUE 中。WUE 的年际变化表现为总体先增加后减少。分土地覆盖分析,灌木对 WUE 年际变化的贡献率为负值,即与年际变化趋势相反。 正值中农田的贡献率最大,为 54.6%。森林生态系统虽然面积较小,但是对半干旱区水分利用效率的影响相 对较大。

4754

(4) 在驱动力分析中, 研究区 WUE 对三个气象因子表现出显著相关的区域(P<0.05) 占植被区域的40%。降水为亚洲半干旱区 WUE 的主导气象因素, 降水和 PAR 共同影响了大部分区域植被的生长状况, 对WUE 多为负向影响; 温度对 WUE 主要为正向影响。且气象因子对 WUE 的影响的区域差异性较明显。LAI 与 SSM 对 WUE 主要表现为正相关性, 分别占总植被区域的 37%和 23%。GPP 相对于 ET 对 WUE 的贡献更大。

本文基于 LPJ-VSJA 联合同化产品探讨了亚洲半干旱区碳水通量时空变化及其自然驱动因子。对于生态 环境敏感且受水分限制的亚洲半干旱区,降水作为区域 WUE 的主导气象因素,地区降雨特征变化以及极端 气候事件可能会对 WUE 产生影响,因此有必要考虑区域气候监测和对极端气候事件的响应机制。同时 GPP 对 WUE 变化的贡献较大,退耕还林、退耕还草等可以增加植被固碳能力和碳储量的措施有助于提高区域水 分利用效率。本文的研究结果有助于理解研究区碳水循环发展状况与循环机制,可为区域水资源管理、生态 系统发展和全球气候变化应对提供参考。

参考文献(References):

- [1] Gentine P, Green J K, Guérin M, Humphrey V, Seneviratne S I, Zhang Y, Zhou S. Coupling between the terrestrial carbon and water cycles—a review. Environmental Research Letters, 2019, 14(8): 083003.
- [2] 于贵瑞, 王秋凤, 于振良. 陆地生态系统水——碳耦合循环与过程管理研究. 地球科学进展, 2004, 19(5): 831-839.
- [3] Huang J P, Ji M X, Xie Y K, Wang S S, He Y L, Ran J J. Global semi-arid climate change over last 60 years. Climate Dynamics, 2016, 46(3/4): 1131-1150.
- [4] Zhang T, Peng J, Liang W, Yang Y T, Liu Y X. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000-2010. Science of the Total Environment, 2016, 565: 105-122.
- [5] Reichle D E. Chapter 11-Anthropogenic alterations to the global carbon cycle and climate change, in The Global Carbon Cycle and Climate Change, D.E. Reichle, Editor. 2020, Elsevier. p. 209-251.
- [6] Zhu X J, Yu G R, Wang Q F, Hu Z M, Zheng H, Li S G, Sun X M, Zhang Y P, Yan J H, Wang H M, Zhao F H, Zhang J H, Shi P L, Li Y N, Zhao L, Zhang F W, Hao Y B. Spatial variability of water use efficiency in China's terrestrial ecosystems. Global and Planetary Change, 2015, 129: 37-44.
- [7] Ahlström A, Raupach M R, Schurgers G, Smith B, Arneth A, Jung M, Reichstein M, Canadell J G, Friedlingstein P, Jain A K, Kato E, Poulter B, Sitch S, Stocker B D, Viovy N, Wang Y P, Wiltshire A, Zaehle S, Zeng N. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. Science, 2015, 348(6237): 895-899.
- [8] Poulter B, Frank D, Ciais P, Myneni R B, Andela N, Bi J, Broquet G, Canadell J G, Chevallier F, Liu Y Y, Running S W, Sitch S, van der Werf G R. Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. Nature, 2014, 509(7502): 600-603.
- [9] Liu L B, Gudmundsson L, Hauser M, Qin D H, Li S C, Seneviratne S I. Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally. Nature Communications, 2020, 11(1): 4892.
- [10] Anav A, Friedlingstein P, Beer C, Ciais P, Harper A, Jones C, Murray Tortarolo G, Papale D, Parazoo N C, Peylin P, Piao S L, Sitch S, Viovy N, Wiltshire A, Zhao M S. Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: a review. Reviews of Geophysics, 2015, 53(3): 785-818.
- [11] Mu Q Z, Zhao M S, Heinsch F A, Liu M L, Tian H Q, Running S W. Evaluating water stress controls on primary production in biogeochemical and remote sensing based models. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2007, 112(G1): G01012.
- [12] Waring R H, Running S W. Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales. 3rd ed. New York: Academic Press, 2010.
- [13] 胡中民,于贵瑞,王秋凤,赵风华. 生态系统水分利用效率研究进展. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1507.
- [14] 杜晓铮, 赵祥, 王吴宇, 何斌. 陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展. 生态学报, 2018, 38(23): 8296-8305.
- [15] Liu X F, Feng X M, Fu B J. Changes in global terrestrial ecosystem water use efficiency are closely related to soil moisture. Science of the Total Environment, 2020, 698: 134165.
- [16] Li Y, Shi H, Zhou L, Eamus D, Huete A, Li L H, Cleverly J, Hu Z M, Harahap M, Yu Q, He L, Wang S Q. Disentangling climate and LAI effects on seasonal variability in water use efficiency across terrestrial ecosystems in China. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123(8): 2429-2443.
- [17] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw U K T, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [18] Rayner P J, Scholze M, Knorr W, Kaminski T, Giering R, Widmann H. Two decades of terrestrial carbon fluxes from a carbon cycle data

assimilation system (CCDAS). Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(2): GB2026.

- [19] Scholze M, Buchwitz M, Dorigo W, Guanter L, Quegan S. Reviews and syntheses: systematic Earth observations for use in terrestrial carbon cycle data assimilation systems. Biogeosciences, 2017, 14(14): 3401-3429.
- [20] Smith W K, Fox A M, MacBean N, Moore D J P, Parazoo N C. Constraining estimates of terrestrial carbon uptake: new opportunities using long term satellite observations and data assimilation. New Phytologist, 2020, 225(1): 105-112.
- [21] Zhang L, Xiao J F, Zheng Y, Li S N, Zhou Y. Increased carbon uptake and water use efficiency in global semi-arid ecosystems. Environmental Research Letters, 2020, 15(3); 034022.
- [22] Jiang L L, Jiapaer G, Bao A M, Guo H, Ndayisaba F. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. Science of the Total Environment, 2017, 599-600; 967-980.
- [23] Yu Y, Pi Y Y, Yu X, Ta Z J, Sun L X, Disse M, Zeng F J, Li Y M, Chen X, Yu R D. Climate change, water resources and sustainable development in the arid and semi-arid lands of Central Asia in the past 30 years. Journal of Arid Land, 2019, 11(1): 1-14.
- [24] 刘春静,张丽,周宇,张炳华,侯小丽.中国新疆及中亚五国干旱区草地覆盖度反演与分析.草业科学,2016,33(5):861-870.
- [25] 邹杰, 丁建丽, 杨胜天. 近 15 年中亚及新疆生态系统水分利用效率时空变化分析. 地理研究, 2017, 36(9): 1742-1754.
- [26] 张建财,张丽,郑艺,田向军,周宇.基于 LPJ 模型的中亚地区植被净初级生产力与素散模拟. 草业科学, 2015, 32(11): 1721-1729.
- [27] 郝海超,郝兴明,花顶,秦景秀,李玉朋,张齐飞.2000—2018年中亚五国水分利用效率对气候变化的响应.干旱区地理,2021,44(1): 1-14.
- [28] 邹杰, 丁建丽, 秦艳, 王飞. 遥感分析中亚地区生态系统水分利用效率对干旱的响应. 农业工程学报, 2018, 34(9): 145-152.
- [29] Zhou Y, Zhang L, Xiao J F, Williams C A, Vitkovskaya I, Bao A M. Spatiotemporal transition of institutional and socioeconomic impacts on vegetation productivity in Central Asia over last three decades. Science of the Total Environment, 2019, 658: 922-935.
- [30] Zhou Y, Zhang L, Fensholt R, Wang K, Vitkovskaya I, Tian F. Climate contributions to vegetation variations in central asian drylands: pre- and post-USSR collapse. Remote Sensing, 2015, 7(3): 2449-2470.
- [31] Han Q F, Li C F, Zhao C Y, Zhang Y Q, Li S B. Grazing decreased water use efficiency in Central Asia from 1979 to 2011. Ecological Modelling, 2018, 388; 72-79.
- [32] Li S N, Zhang L, Ma R, Yan M, Tian X J. Improved ET assimilation through incorporating SMAP soil moisture observations using a coupled process model: a study of U.S. arid and semiarid regions. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125402.
- [33] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122-129.
- [34] Xia L, Wang F, Mu X M, Jin K, Sun W Y, Gao P, Zhao G J. Water use efficiency of net primary production in global terrestrial ecosystems. Journal of Earth System Science, 2015, 124(5): 921-931.
- [35] Rienecker M M, Suarez M J, Gelaro R, Todling R, Bacmeister J, Liu E, Bosilovich M G, Schubert S D, Takacs L, Kim G K, Bloom S, Chen J Y, Collins D, Conaty A, Da Silva A, Gu W, Joiner J, Koster R D, Lucchesi R, Molod A, Owens T, Pawson S, Pegion P, Redder C R, Reichle R, Robertson F R, Ruddick A G, Sienkiewicz M, Woollen J. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. Journal of Climate, 2011, 24(14): 3624-3648.
- [36] Gelaro R, McCarty W, Suórez M J, Todling R, Molod A, Takacs L, Randles C A, Darmenov A, Bosilovich M G, Reichle R, Wargan K, Coy L, Cullather R, Draper C, Akella S, Buchard V, Conaty A, Da Silva A M, Gu W, Kim G K, Koster R, Lucchesi R, Merkova D, Nielsen J E, Partyka G, Pawson S, Putman W, Rienecker M, Schubert S D, Sienkiewicz M, Zhao B. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). Journal of Climate, 2017, 30(14): 5419-5454.
- [37] Reichle R H, Liu Q, Koster R D, Draper C S, Mahanama S P P, Partyka G S. Land surface precipitation in MERRA-2. Journal of Climate, 2017, 30(5): 1643-1664.
- [38] Bosilovich M G, Robertson F R, Takacs L, Molod A, Mocko D. Atmospheric water balance and variability in the MERRA-2 reanalysis. Journal of Climate, 2017, 30(4): 1177-1196.
- [39] Hinkelman L M. The global radiative energy budget in MERRA and MERRA-2: evaluation with respect to CERES EBAF data. Journal of Climate, 2019, 32(6): 1973-1994.
- [40] Wigneron J P, Jackson T J, O'neill P, De Lannoy G, de Rosnay P, Walker J P, Ferrazzoli P, Mironov V, Bircher S, Grant J P, Kurum M, Schwank M, Munoz-Sabater J, Das N, Royer A, Al-Yaari A, Al Bitar A, Fernandez-Moran R, Lawrence H, Mialon A, Parrens M, Richaume P, Delwart S, Kerr Y. Modelling the passive microwave signature from land surfaces: a review of recent results and application to the L-band SMOS & SMAP soil moisture retrieval algorithms. Remote Sensing of Environment, 2017, 192; 238-262.
- [41] Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, Xiang Y, Zhao X, Song J L. Long-time-series global land surface satellite leaf area index product derived from MODIS and AVHRR surface reflectance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(9): 5301-5318.
- [42] Liang S L, Zhao X, Liu S H, Yuan W P, Cheng X, Xiao Z Q, Zhang X T, Liu Q, Cheng J, Tang H R, Qu Y H, Bo Y C, Qu Y, Ren H Z, Yu K, Townshend J. A long-term Global LAnd Surface Satellite (GLASS) data-set for environmental studies. International Journal of Digital Earth, 2013, 6(S1): 5-33.
- [43] Li W T, Du J K, Li S F, Zhou X B, Duan Z, Li R J, Wu S Y, Wang S S, Li M H. The variation of vegetation productivity and its relationship to

temperature and precipitation based on the GLASS-LAI of different African ecosystems from 1982 to 2013. International Journal of Biometeorology, 2019, 63(7); 847-860.

- [44] Sulla-Menashe D, Friedl M A. User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1) Product. Sioux Falls, SD, USA: NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2018.
- [45] Middleton N, Thomas D. World Atlas of Desertification. 2nd ed. London: Arnold, 1997.
- [46] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 高等教育出版社, 2002.
- [47] 李传华,周敏,王玉涛,朱同斌,孙皓,殷欢欢,曹红娟,韩海燕.西北干旱区植被净初级生产力年际变化及其时空和气候因子的贡献——以河西走廊为例.生态学杂志,2020,39(10):3265-3275.
- [48] 邵周玲,周文佐,李凤,周新尧,杨帆. 2003—2018 年米仓山地区植被物候时空变化及对气候的响应. 生态学报, 2021, 41(9): 3701-3712.
- [49] Yao Y T, Wang X H, Li Y, Wang T, Shen M G, Du M Y, He H L, Li Y N, Luo W J, Ma M G, Ma Y M, Tang Y H, Wang H M, Zhang X Z, Zhang Y P, Zhao L, Zhou G S, Piao S. Spatiotemporal pattern of gross primary productivity and its covariation with climate in China over the last thirty years. Global Change Biology, 2018, 24(1): 184-196.
- [50] Ambika A K, Wardlow B, Mishra V. Remotely sensed high resolution irrigated area mapping in India for 2000 to 2015. Scientific Data, 2016, 3: 160118.
- [51] Lu C Q, Tian H Q. Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half century: shifted hot spots and nutrient imbalance. Earth System Science Data, 2017, 9(1): 181-192.
- [52] Wang W S, Wang X W, Huo Z L, Rong Y, Huang Q Z, Huang G H. Variation and attribution of water use efficiency in sunflower and maize fields in an irrigated semi arid area. Hydrological Processes, 2021, 35(3): e14080.
- [53] Bhimala K R, Rakesh V, Prasad K R, Mohapatra G N. Identification of vegetation responses to soil moisture, rainfall, and LULC over different meteorological subdivisions in India using remote sensing data. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 142(3/4): 987-1001.
- [54] Chen T, Tang G P, Yuan Y, Guo H, Xu Z W, Jiang G, Chen X H. Unraveling the relative impacts of climate change and human activities on grassland productivity in Central Asia over last three decades. Science of the Total Environment, 2020, 743: 140649.
- [55] 陈耀亮,罗格平,叶辉,王渊刚,黄小涛,张琪,蔡鹏. 1975—2005年中亚土地利用/覆被变化对森林生态系统碳储量的影响. 自然资源 学报, 2015, 30(3): 397-408.
- [56] 郭岩,何毅,张立峰,邱丽莎,张国强,张志华. 2000—2017年中亚地区植被变化遥感监测.中国农学通报, 2021, 37(8): 123-131.
- [57] Wei W, Li H, Wang B T, Zhang K B. Rain-and water-use efficiencies of a shrub ecosystem and its resilience to drought in the Central Asia region during 2000-2014. Global Ecology and Conservation, 2019, 17: e00595.
- [58] Guo H, Bao A M, Liu T, Jiapaer G, Ndayisaba F, Jiang L L, Kurban A, De Maeyer P. Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966-2015. Science of the Total Environment, 2018, 624: 1523-1538.
- [59] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears D D, Hogg E H, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim J H, Allard G, Running S W, Semerci A, Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. Forest Ecology and Management, 2010, 259(4): 660-684.
- [60] Curtis P G, Slay C M, Harris N L, Tyukavina A, Hansen M C. Classifying drivers of global forest loss. Science, 2018, 361(6407): 1108-1111.
- [61] Zou J, Ding J L, Welp M, Huang S, Liu B H. Using MODIS data to analyse the ecosystem water use efficiency spatial-temporal variations across Central Asia from 2000 to 2014. Environmental Research, 2020, 182: 108985.
- [62] 孙仕军,杨金鑫,万博,谷健,刘泳圻,赵旺,尹光华.不同滴灌方式对辽西半干旱区春玉米生长及产量的影响.沈阳农业大学学报, 2021,52(1):32-39.
- [63] 方彦杰,张绪成,于显枫,侯慧芝,王红丽,马一凡,张国平,雷康宁.立式深旋松耕对半干旱区饲草玉米水分利用和产量的影响.草业 学报,2020,29(10):161-171.
- [64] 刘化涛,黄学芳,黄明镜,张冬梅,张伟,赵聪.不同基因型玉米品种产量、抗旱性及水分利用效率差异研究.中国农学通报,2020,36 (33):12-18.
- [65] Zhang F M, Ju W M, Shen S H, Wang S Q, Yu G R, Han S J. How recent climate change influences water use efficiency in East Asia. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 116(1/2): 359-370.
- [66] Xue B L, Guo Q H, Otto A, Xiao J F, Tao S L, Li L. Global patterns, trends, and drivers of water use efficiency from 2000 to 2013. Ecosphere, 2015, 6(10): 1-18.
- [67] 冯朝阳, 王鹤松, 孙建新. 中国北方植被水分利用效率的时间变化特征及其影响因子. 植物生态学报, 2018, 42(4): 453-465.
- [68] Liu Y B, Xiao J F, Ju W M, Zhou Y L, Wang S Q, Wu X C. Water use efficiency of China's terrestrial ecosystems and responses to drought. Scientific Reports, 2015, 5: 13799.
- [69] 白玉洁. 中国旱区典型生态系统水分利用效率动态特征及其生物物理调控[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [70] 邵蕊,李垚,张宝庆.黄土高原退耕还林(草)以来植被水分利用效率的时空特征及预测.科技导报,2020,38(17):81-91.