

中国土壤水和饱和水汽压差 对植被物候始期的影响

薛盈盈^{1,2},白晓永^{2,3,4},谭秋¹,冉晨²,张思蕊²,熊练²,杜朝超²,李姿霖^{1,2},
龙明康²,罗青¹,张小芸¹,李明会¹,沈晓倩¹,杨姝¹

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 3. 中国科学院第四纪与全球变化卓越研究中心, 陕西 西安 710061; 4. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:在全球变暖气候背景下,由于气温升高而导致的植被春季物候提前已经被熟知。气候变暖的同时加剧了土壤水分(Soil Moisture, SM)和饱和水汽压差(Vapor Pressure Deficit, VPD)亏缺,二者作为植被生长必要的水分条件,对植被春季物候的影响尚不明晰。为此,研究基于日光诱导叶绿素荧光数据集通过多项式-导数法、双逻辑-曲率最大值法和Timesat法提取了2001-2018年以来中国植被春季光合物候始期(Start Of Season, SOS)的参数;其次,运用近地面气象驱动数据集和彭曼公式计算了研究期内的VPD值;最后,采用Teil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall检验、敏感性分析法,阐明了SOS、VPD和SM的时空变化规律,揭示了春季SM和VPD对SOS的影响机制。结果表明:①SOS先随着纬度的上升逐渐推迟,在35°N以北开始平稳波动,平均SOS在第130 d;②中国春季SM和VPD呈大面积不显著干旱化趋势,土壤水以0.037 m³/(m³·10 a)的速度干化,VPD以0.34 hPa/10 a的速度升高,SOS呈大面积不显著提前趋势,以5.1 d/10 a的速度提前;③干旱地区的SOS对春季SM和VPD的变化最敏感,并且随着春季SM梯度的降低,VPD对SOS的重要性逐渐增加,SM的重要性逐渐减少。研究对于理解和预测全球变暖背景下植被生长对水分条件变化的响应,以及对于制定应对气候变化的政策至关重要,可为我国生态环境建设提供科学依据。

关键词:植被物候始期;土壤湿度;大气饱和水汽压差;干旱;中国

中图分类号:K903 **文献标识码:**A **DOI:**10.12396/znsd.240425

薛盈盈,白晓永,谭秋,等.中国土壤水和饱和水汽压差对植被物候始期的影响[J].中国农村水利水电,2024(11):12-20. DOI:10.12396/znsd.240425.

XUE Y Y, BAI X Y, TAN Q, et al. Effects of soil moisture and vapor pressure deficit on the start of the season in China[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(11):12-20. DOI:10.12396/znsd.240425.

Effects of Soil Moisture and Vapor Pressure Deficit on the Start of the Season in China

XUE Ying-ying^{1,2}, BAI Xiao-yong^{2,3,4}, TAN Qiu¹, RAN Chen², ZHANG Si-rui²,
XIONG Lian², DU Chao-chao², LI Zi-lin^{1,2}, LONG Ming-kang², LUO Qing¹,
ZHANG Xiao-yun¹, LI Ming-hui¹, SHEN Xiao-qian¹, YANG Shu¹

(1. College of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, Guizhou Province, China;

收稿日期:2024-03-15 接受日期:2024-05-19

基金项目:国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U22A20619,42077455,42367008);中国科学院“西部之光”交叉团队项目(xbzgzs-202101);中国科学院战略性先导科技专项项目(XDB40000000,XDA23060100);贵州省省级科技计划项目(黔科合支撑[2022]一般198);贵州省高层次人才项目(黔科合平台人才-GCC[2022]015-1;黔科合平台人才[2016]5648);贵州省补助资金项目(GZ2020SIG)。

作者简介:薛盈盈(1998-),女,硕士,主要从事自然地理与生态水文过程研究。E-mail:2461759369@qq.com。

通讯作者:白晓永(1978-),男,博士,研究员,研究方向为喀斯特与全球变化。E-mail:baixiaoyong@vip.sklg.cn。

2. Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou Province, China; 3. Center of Excellence for Quaternary and Global Change, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, Shaanxi Province, China; 4. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou Province, China)

Abstract: In the context of global warming, the advancement of vegetation spring phenology due to rising temperatures is well documented. Climate warming also leads to increases in soil moisture (SM) deficit and vapor pressure deficit (VPD). However, as necessary water conditions for vegetation growth, their effects on vegetation spring phenology remain unclear. Therefore, based on the solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) data set, this study extracted the parameters of the start of the season (SOS) of vegetation in spring in China from 2001 to 2018 through the Polyfit-derivative method, the double-logistic Maximum Curvature method and the Timesat method. Secondly, the VPD values of the study period were calculated by using the China meteorological forcing dataset and Penman formula. Finally, Tei-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall test and sensitivity analysis were used to clarify the spatio-temporal variation rules of SOS, VPD and SM, and to reveal the influence mechanism of spring SM and VPD on SOS. The results show that: ① SOS first gradually delays with the increase of latitude, and starts to fluctuate steadily at the north of 35°N, with an average SOS on the 130th day of the year; ② In spring, SM and VPD showed a large area of non-significant drying trend, soil moisture decreased at a rate of 0.037 m³/(m³·10 a), VPD increased at a rate of 0.34 hPa/10 a, and SOS showed a large area of non-significant advance trend at a rate of 5.1 d/10 a. ③ SOS in arid areas were most sensitive to the changes of SM and VPD in spring, and with the decrease of SM gradient in spring, the importance of VPD to SOS gradually increased, and the importance of SM gradually decreased. This study is important for understanding and predicting the response of vegetation growth to the change of water conditions under the background of global warming, and for formulating policies to deal with climate change, and can provide scientific basis for ecological environment construction in China.

Key words: start of season; soil moisture; vapor pressure deficit; drought; China

0 引言

植被物候,即植被在自然环境中的周期性生长发育的重复过程,是气候变化最敏感的指标^[1,2],对陆地生态系统的碳循环、水循环、能量交换产生强烈的影响并进一步反馈给气候^[3]。

卫星监测和地面观测均揭示了近几十年来气候变暖提前了春季物候始期(SOS)^[4-6]。与此同时,全球气候变暖也会增加干旱频率和大气蒸发需求^[7]。干旱胁迫对陆地生态系统的影响表现为低土壤水分(SM)亏缺的土壤干旱和高饱和水汽压差(VPD)亏缺的大气干旱^[8,9]。SM是植被的直接水库,决定着植被根系可汲取的水量^[10]。VPD是饱和水汽压与实际水汽压之间的差值,即空气的干燥程度^[11]。高VPD可以使植被关闭气孔以减少叶片的水分损失,这会降低植被的光合作用,限制植被生长^[12]。FU等^[8]表明在土壤干旱并不会总是导致总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)的损失,而大气干旱始终导致GPP的损失。LI等发现土壤水分供应不足可能导致植被生产力的下降并且降低了植被在生长季中后期干旱中恢复的能力^[13],YUAN等^[11]利用四个全球气候数据集和两个基于卫星的模型来量化VPD对全球陆地初级生产力的影响,并得出全球VPD的持续增加会促进植被退化的结论。LU等^[14]发现未来低SM和高VPD导致的复合干旱会进一步对植被生长产生负面影响。这些研究说明SM和VPD的状态是植被生长重要的因素,然而SM与VPD与植被物候始期之间的研究还相对较少,SM和VPD怎样影响植被物候始期目前还不清楚。

以往基于大尺度的春季物候的研究主要集中在温带和北方地区^[2,13,15],特别是通过检验与绿色度相关的植被指数在时间序列的变化,如叶面积指数,归一化差异植被指数,增强型植被指数等,将叶片变绿的时间定义为SOS^[16,17]。然而,绿色指数仅能检测叶片的颜色变化,无法捕捉光合活动^[18],且常绿植被

的绿色度动态并不明显,其生理物候(即基于光合作用的物候)经历季节性变化,而上冠层(即叶片绿色)保持稳定^[19],因此常用的植被指数无法检测其物候。最近基于卫星反演的日光诱导叶绿素荧光(Solar-Induced chlorophyll Fluorescence, SIF)数据为SOS的计算提供了一种新的方法^[1],SIF是光合作用一小部分被吸收的辐射的再发射,遥感SIF与原地生态系统光合作用之间存在密切的近线性关系可以作为光合作用的代表^[20],因此,基于卫星的SIF观测提供了另一种基于生理学的植被功能的替代观点,可作为估算植被光合作用物候的替代数据工具。

研究基于SIF数据和多种方法计算了2001-2018年中国植被SOS的时空格局,研究了植被物候始期对SM与VPD的响应。研究目的是:①评估近年来中国植被物候始期变化的大小、空间格局和动态趋势。②揭示土壤水和饱和水汽压差对SOS的影响机制。

1 研究区概况及方法

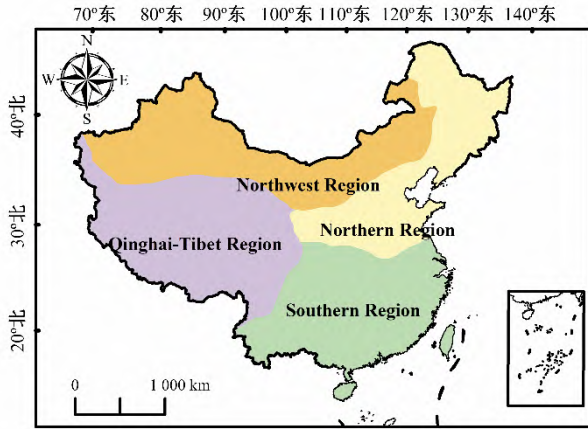
1.1 研究区概况

中国地域辽阔,从南到北地跨热带,亚热带,暖温带和温带;从东到西包括了湿润,半湿润,半干旱,干旱和极干旱地区。中国温度梯度由南向北下降较大,降水由南向北梯度较大^[21]。因此,中国是在区域层面上考察物候对气候变化响应的理想选择。将研究区分为四大区域:北方地区(Northern Region, NR),西北地区(NorthWest China, NWR),青藏地区(Qinghai-Tibet Region, QTR),南方地区(Southern Region, SR),见图1。

1.2 数据来源

1.2.1 日光诱导叶绿素荧光数据集(SIF)

作为光合作用的代表,本研究用SIF数据来计算中国植被物候始期,现有的SIF时空分辨率较低,限制了SIF的应用,



注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2023)2767号标准地图制作,底图边界无修改。

图1 研究区位置图

Fig.1 Location map of the study area

ZHANG等^[22]基于轨道碳观测站(OCO-2)卫星检索到的SIF还有Terra和Aqua卫星上的中分辨率成像光谱仪的表面反射率,运用机器学习和神经网络算法生成了全球连续的CSIF产品,该数据与OCO-2和全球臭氧监测实验2(GOME-2)的每日SIF一致^[22],时间分辨率为4 d,空间分辨率为0.5°。该数据已发表在国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/en/>)。

1.2.2 气候数据

为计算2001年至2018年的VPD,每月气候数据(包括气温,气压和比湿度)来自中国区域地面气象要素驱动数据集(China Meteorological Forcing Dataset, CMFD)(<https://data.tpdc.ac.cn/>)。CMFD是中国最广泛使用的气候数据集之一,与GLDAS全球陆地数据同化系统相比,CMFD具有连续的时间覆盖范围和一致的质量^[23]。

1.2.3 土壤水数据

ZHENG等基于利用多源光学遥感数据构建机器学习算法,率先生成了首套2000–2020年全球时空连续1公里分辨率地表土壤水分数据集。经全球2346个地面观测站点的验证,结果表明该产品具有较好的精度(相关系数为0.89,均方根误差为0.045 m³/m³)^[24],该数据可在国家青藏高原科学数据中心获取(<https://data.tpdc.ac.cn/en/>)。

1.2.4 土地利用与覆被变化数据(Land Use and Land Cover Change, LUCC)

由于耕地物候受人为主观影响较大,为保证研究的准确性本研究根据资源与环境科学数据中心提供的LUCC数据将耕地地类剔除(<https://www.resdc.cn/>)。

1.3 方法

1.3.1 VPD的计算

每月饱和水汽压(SVP)减去每月实际水汽压(AVP)计算得到每月VPD(hPa)。根据Penman公式和先前的研究计算SVP和AVP^[25, 26]。

$$VPD = SVP - AVP \quad (1)$$

$$SVP = 6.11 \times e^{\left(\frac{17.27 \times T}{273.3 + T}\right)} \quad (2)$$

$$AVP = \frac{shum \cdot pres}{0.622 + shum} \quad (3)$$

式中:shum表示比湿度,g/g;pres表示气压,hPa;T表示空气温度,°C。

1.3.2 植被物候始期的计算

研究使用3种方法对整个研究区域1月至12月4天的CSIF时间序列数据与相应的日期之间的关系进行拟合,获得了每个像素的年度CSIF时间序列平滑的季节曲线,然后用3种物候日期测定方法提取物候指,为了减少不确定性,使用这些方法的平均值来研究SM和VPD对春季物候的影响。

多项式-导数法:多项式-导数方法使用六次多项式过滤SIF时间序列^[16, 27]。随后,重建的数据用于识别SOS:

$$SIF = a + a_1x^1 + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n, n = 6 \quad (4)$$

在这里x对应SIF一年中的某一天,a为系数。然后对一元六次多项式进行差分求导数,导数f'(t)最大处为SOS^[28]:

双逻辑-曲率最大值法:

$$f(t) = a_1 + \frac{a_2}{1 + e^{-\theta_1(t - \beta)}} - \frac{a_3}{1 + e^{-\theta_2(t - \beta_2)}} \quad (5)$$

式中:参数a₁、a₂和a₃代表季节周期的最小值,前后季节周期的振幅;θ₁和θ₂是决定植被生长和衰老速度的系数;β₁和β₂是拟合参数。曲率升高最大的一天计算为SOS^[29]。

Timesat-SG方法:Timesat是目前广泛应用于时间序列重建的方法。该平滑滤波器采用基于非对称高斯函数拟合的数字序列去噪^[30]:

$$CSIF(t) = \frac{\sum_{f=-m}^{f+m} C_f CSIF_{f+1}}{N} \quad (6)$$

式中:CSIF(t)是第t天的拟合CSIF值;C_f是滤波器的归一化SIF点的系数;N是卷积整数的数量。SOS日被确定为插值的SIF序列中当SIF值从其最低水平增加其幅度的20%时的一天^[31]。

1.3.3 Theil-Sen Median 趋势分析和Mann-Kendall 检验

研究用Theil-Sen Median研究了2001–2018年像元尺度上SOS、SM和VPD的趋势,公式如下:

$$\beta M = Median \left(\frac{M_j - M_i}{j - i} \right) (2001 \leq i \leq j \leq 2020) \quad (7)$$

式中:βM为n(n-1)/2个数据组合的斜率的中位数,βM>0时,表示自变量M在研究期间的变化趋势在增加,反之亦然。通常与Mann-Kendall检验一起使用进一步判断趋势的显著性,其优点是计算样本不用遵循特定的规律分布。结果在p<0.05水平上显著变化^[32]。

1.3.4 敏感性分析

基于一阶差分的多元线性回归模型计算SOS对春季SM和VPD的敏感性。一阶差分是一种常见的去趋势的方法,优点是减少其他因素影响而造成的生态指标长期趋势的影响^[33, 34]。首先计算SOS、SM、VPD的趋势,然后计算连续两年的趋势的绝对差值(ΔY=Y_{year+1}-Y_{year}),ΔY代表SOS或SM、VPD的年度变化,最后将差值结果用于构建回归模型来估计SOS对VPD和SM的敏感性,公式如下:

$$\Delta SOS = S_{SM} \Delta SM + S_{VPD} \Delta VPD + int \quad (8)$$

ΔSOS、ΔSM、ΔVPD分别是SOS、SM、VPD连续两年的差值。

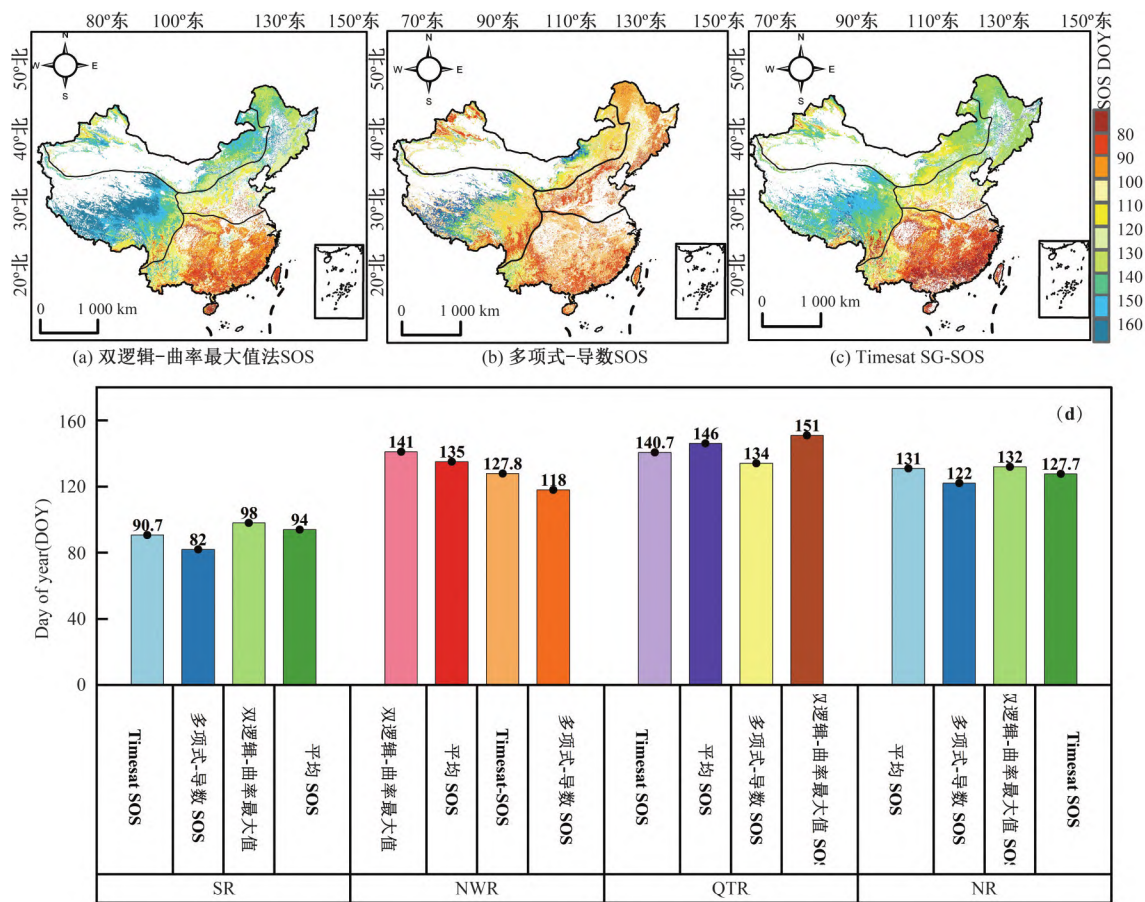
S_{SM}, S_{VPD} 代表物候对 SM, VPD 的敏感性, int 为截距。

2 结果与分析

2.1 中国植被物候始期的空间分布

3 种方法计算的 SOS 在空间和海拔上的变化规律基本一

致,随着纬度和海拔的升高 SOS 逐渐延迟[图 2(a)~(c)]。对 4 个区域用 3 种方法计算的 SOS 进行统计[图 2(d)],发现多项式-导数方法计算出的 SOS 最早,双逻辑-曲率最大值计算出的 SOS 最迟[图 2(d)]。3 种方法均显示 SR 地区的 SOS 出现时间最早、QTR 地区的 SOS 出现时间最迟[图 2(d)]。为了减少计算的不确定性使用 3 种方法的均值进行后续分析。



注:基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2023)2767 号标准地图制作,底图边界无修改;DOY 表示一年中的第几天(day of year)。

图 2 不同方法计算的 SOS 空间分布图和 4 个区域的统计图

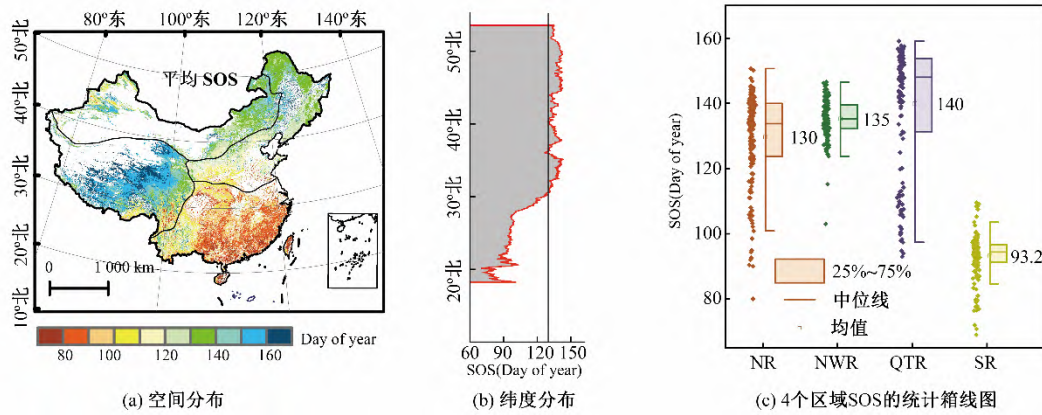
Fig.2 Spatial distribution of SOS calculated by different methods and statistical diagram of four regions

图 3(a)展示了 3 种方法求均值后的平均 SOS。整体而言中国植被 SOS 纬度差异较大, SOS 先随着纬度的上升逐渐推迟,然后在 35°N 以北开始平稳波动[图 3(b)],平均 SOS 在第 130 d。SOS 出现最早的区域是 SR 地区,集中在第 80~110 d[图 3(a)],平均出现在第 93.3 d[图 3(c)],最迟的区域是 QTR 地区,集中在第 140~180 d[图 3(a)],平均出现在第 140 d[图 3(c)]。NWR 地区的 SOS 集中在第 120~140 d[图 3(a)],平均出现在第 135 d[图 3(c)]。NR 地区的 SOS 集中在第 100~140 d[图 3(a)],平均出现在第 130 d[图 3(c)]。

2.2 春季土壤水、饱和水汽压差和植被物候始期的时空趋势

根据 SOS 发生的时间和前人的研究,本文将 3~5 月定义为春季,从年际趋势来看,春季土壤水以 0.037 m³/(m³·10 a) 的速度干化,春季 VPD 以 0.34 hPa/10 a 的速度升高[图 4(a), (b)]。说明 2001~2018 年中国春季的土壤和大气均呈现干旱的趋势。SOS 以 5.1 d/10 a 的速度提前[图 4(c)]。

从空间趋势上来看,春季土壤水分干化的区域占研究区面积的 63.5%,经过 Mann-Kendall 检验,显著干旱的区域占比 25.3%,主要分布在长江中下游平原、四川盆地、小兴安岭区域[图 5(a)]。此外,还有 36.5% 的区域存在土壤水湿化的趋势,主要分布在 NWR 地区和 QTR 东北部[图 5(a)]。春季 VPD 干旱化(升高)区域占研究区面积的 72%。经过 M-K 检验,VPD 显著升高的区域占比 15.8%,主要分布在整个 NWR 地区和 NR 地区[图 5(b)]。VPD 降低的区域占比 28%,主要分布在云贵高原、东南沿海和青藏高原东北部地区[图 5(b)]。整体而言中国春季 SM 和 VPD 呈大面积不显著干旱化趋势。79.6% 的 SOS 像元存在提前趋势[图 5(c)],经过 MK 检验其中显著提前的像元占比 25.3%,主要分布在 QTR 东部、SR 中部, NR 和 NWR 区域的北部[图 5(c)],仅有 20.4% 的像元存在延迟趋势,大多数像元以 0~0.5 d 每年的趋势提前。总体而言中国 SOS 整体呈大面积不显著提前趋势[图 5(c)]。



注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2023)2767号标准地图制作,底图边界无修改。

图3 平均SOS空间分布,纬度分布,4个区域SOS的统计箱线图

Fig.3 Average SOS spatial distribution, latitude distribution, and statistical box plots of SOS in four regions

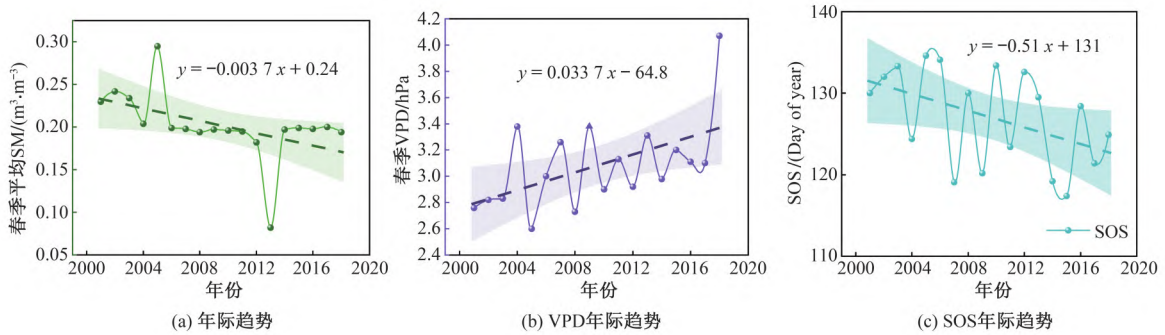
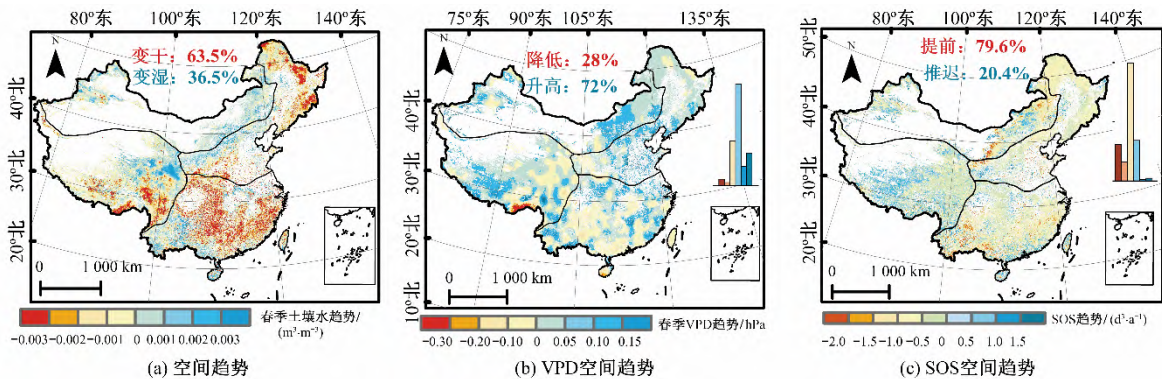


图4 春季SM的年内趋势,VPD年内趋势,SOS年内趋势

Fig.4 Interannual trend of SM, VPD and SOS in spring



注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2023)2767号标准地图制作,底图边界无修改。

图5 春季SM空间趋势,VPD空间趋势,SOS空间趋势

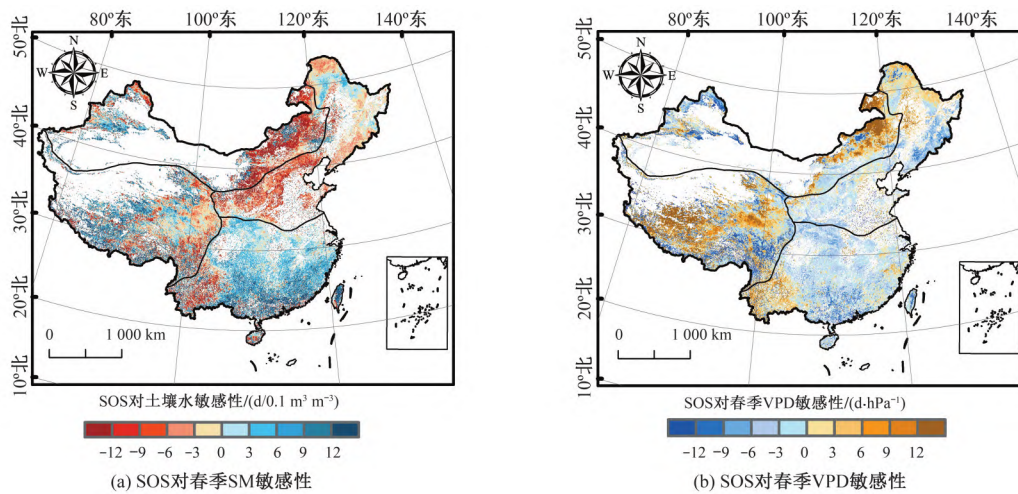
Fig.5 Spatial trend of SM, VPD and SOS in spring

2.3 土壤水和饱和水汽压差对春季植被物候始期的影响及相对重要性

在空间上 SOS 对 SR 大部地区和 QTR 边缘地区的春季 SM 呈正敏感性[图 6(a)],表明在这些区域春季 SM 越多 SOS 反而会延迟,对 NR 和 NWR 大部地区的春季 SM 呈现负敏感性[图 6(a)],说明在这些区域春季 SM 的增加会提前 SOS。SOS 对春季 VPD 的敏感性在 SR 地区和 NR 的大部分地区呈现负敏感性[图 6(b)],意味着这些区域高 VPD 会导致 SOS 的提前,在 QTR 西部、NWR 东北部、SR 西南部和 NR 的北部呈正敏感性[图 6(b)]。

4 个区域 SOS 对春季 SM 和 VPD 的敏感性如图 7(a)所示, SOS 对 NWR 地区的春季 SM 变化最敏感,表现为负敏感性,平均春季 SM 减少 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$, SOS 约推迟 4.27 d [图 7(a)]。其次是 NR 地区, SOS 对春季 SM 变化表现为负敏感性,平均春季 SM 减少 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$, SOS 约推迟 3.3 d [图 7(a)]。最后是 SR 地区和 QTR 地区, SOS 对春季 SM 变化均表为正敏感性,春季 SM 减少 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$, SOS 分别提前约 2.42 d 和 1.36 d [图 7(a)]。

SOS 对 NWR 地区的春季 VPD 变化也最敏感,表现为正敏感性,平均 VPD 增加 1 hPa , SOS 约推迟 2.3 d [图 7(a)]。其次是 SR 地区表现为负敏感性,春季 VPD 增加 1 hPa SOS 约提前约



注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2023)2767号标准地图制作,底图边界无修改。

图6 SOS对春季SM敏感性和SOS对春季VPD敏感性

Fig.6 Sensitivity of SOS to spring SM and sensitivity of SOS to spring VPD

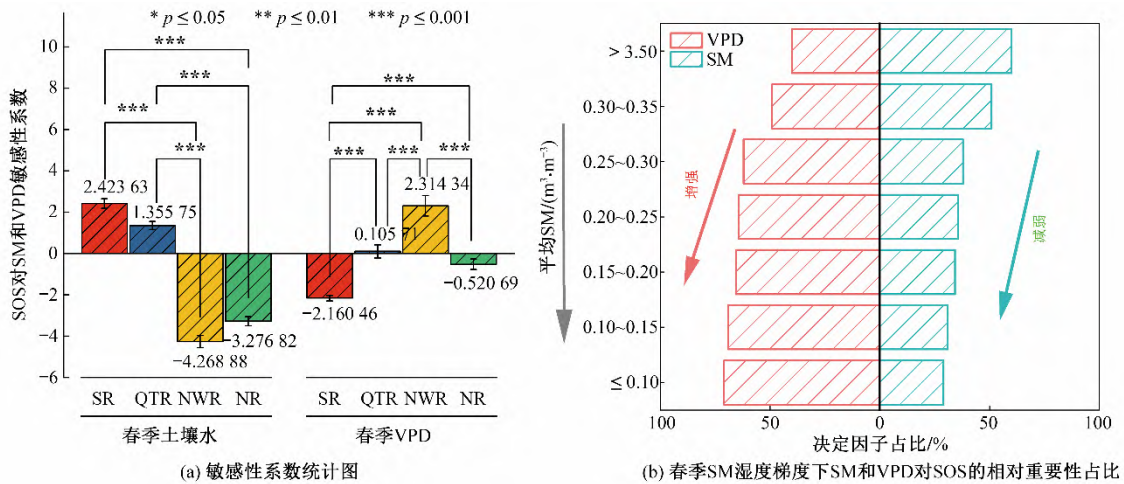


图7 敏感性系数统计图和春季SM湿度梯度下SM和VPD对SOS的相对重要性占比

Fig.7 Statistical plot of sensitivity coefficient, proportion of relative importance of SM and VPD to SOS under SM humidity gradient in spring

2.1 d[图7(a)],QTR和NR地区对春季VPD变化的敏感性较小敏感性系数分别为0.1和-0.52[图7(a)]。

相对重要性定义为春季SM和VPD对SOS敏感性系数绝对值最大的像元,不同春季土壤湿度梯度下SM和VPD的相对重要性如图7(b)所示,随着春季SM梯度的降低,VPD的重要性逐渐增加,SM的重要性逐渐降低[图7(b)]。

3 讨论

3.1 SOS的时空格局对比

我们将本研究计算的SOS与其他学者计算的结果进行了比较,以进一步证实结果的可靠性。本文的研究结果在空间和海拔上的结果与先前的研究相似^[35-40],并且大体呈现SOS提前的趋势。ZHANG等^[36]基于荟萃分析分析了近40年中国植被物候,发现SOS正在以2.3±4.7 d/10 a的速度提前,我们的研究结果在其范围内。LUO和YU等^[41]基于MOD13A7数据发现中国植被SOS正在以3.4 d/10 a的速度延后,这一结果略小于我们的

研究结果(5.1 d/10 a),这可能是因为MOD13A2的物候产品是基于绿色度变化来测定物候指标,而我们的研究是基于SIF的光合活动计算的光合物候,所以导致计算结果的差异。LI等^[19]用SIF数据和多种方法计算出的中国亚热带区域常绿森林的SOS为87±7 d,我们的结果在其范围内。

3.2 春季土壤水和饱和水汽压差对植被物候始期的影响和相对重要性

在全球变暖的气候背景下,VPD升高和土壤水分降低往往同时发生,这种复合干旱是影响植被生长过程中最常见的非生物胁迫之一^[42]。不同水分条件下的SOS对春季SM和VPD的响应有很大差别,例如湿润的SR和干旱的NWR地区。

较为干旱的NWR地区对SM和VPD的变化最敏感,高VPD和低SM均不利于其SOS的提前。首先,地表温度不断升高和太阳辐射的增加导致了大气的相对湿度降低,VPD随之升高。叶水势代表植被在土壤或相邻细胞中吸收水分以维持其正常生理活动的的能力^[43],对VPD的变化非常敏感。VPD升高加强了

植被的蒸腾作用使叶水势迅速下降,为防止水分亏缺对植被生理活动的影响,植被气孔会关闭^[12],这就导致了植被的光合速率下降,限制了光合物候始期(即SOS)的提前。其次,NWR地区年降水量少且集中在夏季,春季土壤水分含量低,VPD升高导致的蒸腾作用变强而散失的水分不能从土壤水中及时得到补充,这不仅会导致植被气孔关闭^[44],还会使叶片内水分失衡、叶片细胞间距变大,不利于二氧化碳在细胞间的传输,最终导致光合速率下降^[45],限制了SOS的提前。最后,土壤水分的减少会降低蒸散发,从而导致近地面大气越来越干燥,导致了更高的VPD,更高的VPD会继续通过蒸腾作用加剧SM的消耗^[9],这种陆-气反馈使得NWR地区的SOS提前受到水分限制。

湿润的SR地区对SM和VPD的敏感性与NWR地区相反,高VPD和低SM反而有利于区域SOS的提前。这可能是因为SR地区的大气和土壤均较为湿润,一方面,即使在高VPD的情况下叶片也可以从土壤水中得到水分补给^[46]。另一方面,SR地区的VPD多年平均值较低,VPD的增加不会降低气孔导度,反而增加了蒸腾作用和CO₂的吸收而增强了光合作用^[47],是SOS提前的有利条件。最后,SR地区是中国森林覆盖最密集的区域,森林具有发达的根系,即使在高VPD的情况下森林也可以吸收深层土壤水保持较高的气孔开放度^[48]。土壤水增加不利于SR地区的SOS提前的原因在于土壤含水量过剩反而影响土壤通气性,使得植物根系缺氧、窒息、最后死亡^[49]。综上,SR地区的SOS提前并不受水分条件的约束,先前的研究也表明在湿润的地区植被物候不会受到水分限制而是受到光照和热量的限制^[50]。

3.3 不足与展望

本文以日光诱导叶绿素荧光数据为基础,研究了近年来中国植被物候始期的时空格局和及其对土壤水和大气饱和水汽压差的响应,对于理解和预测全球变暖背景下植被生长的变化具有重要意义,但是我们的研究仍然存在一些不确定性和局限性。研究存在以下几点不足:

(1)由于与深根植物相关的根区土壤湿度无法在大空间尺度上直接测量,本研究对于深根植被物候与其土壤水的相互作用还不清楚,未来还需进一步研究。

(2)在数据方面,本研究中采用的数据分辨率不一致,采用arcgis 10.8重采样成相同的分辨率,统一分辨率能在一定程度上降低尺度不一致的影响,但在进行数据预处理的时候可能会产生一些误差,从而对计算结果产生较小的影响。

(3)本研究基于一阶差分的敏感性计算了SOS对SM和VPD的敏感性,但是目前尚无法解释二者的单一贡献,需要在未来的研究中进一步探索。

4 结论

研究评估了2001-2018年以来植被物候始期、春季土壤水和饱和水汽压差的时空格局并揭示了春季土壤水和饱和水汽压差对植被物候始期的影响,结果如下。

(1)SOS先随着纬度的上升逐渐推迟,在35°N以北开始平

稳波动,平均SOS在第130 d。

(2)中国春季SM和VPD呈大面积不显著干旱化趋势,土壤水以0.037 m³/(m³·10 a)的速度降低,VPD以0.34 hPa/10 a的速度升高,SOS整体呈大面积不显著提前趋势,以5.1 d/10 a的速度提前。

(3)干旱地区的SOS对春季SM和VPD的变化最敏感,并且随着春季SM梯度的降低,春季SM对SOS的重要性逐渐减少,VPD的重要性逐渐增加。

研究揭示了未来气候变暖背景下水分变化对植被生长的重要性,可以为物候对未来水热变化的响应有更深入的了解。

参考文献:

- [1] PIAO S L, LIU Q, CHEN A P, et al. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 1 922-1 940.
- [2] SHEN M G, WANG S P, JIANG N, et al. Plant phenology changes and drivers on the Qinghai - Tibetan Plateau [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 633-651.
- [3] RICHARDSON A D, KEENAN T F, MIGLIAVACCA M, et al. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169: 156-173.
- [4] 赵心睿, 刘冀, 杨少康, 等. 北方地区典型林草地物候时空变化特征及其对气象因子的响应 [J]. *生态学报*, 2023, 43(9): 3 744-3 755. (ZHAO X R, LIU J, YANG S K, et al. Spatio-temporal variations of typical woodland and grassland phenology and its response to meteorological factors in Northern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3 744-3 755.)
- [5] LIU Q, FU Y H, ZHU Z C, et al. Delayed autumn phenology in the Northern Hemisphere is related to change in both climate and spring phenology [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(11): 3 702-3 711.
- [6] GU H S, QIAO Y X, XI Z X, et al. Warming-induced increase in carbon uptake is linked to earlier spring phenology in temperate and boreal forests [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3 698.
- [7] ZHOU S, ZHANG Y, PARK WILLIAMS A, et al. Projected increases in intensity, frequency, and terrestrial carbon costs of compound drought and aridity events [J]. *Science Advances*, 2019, 5(1): eaau5740.
- [8] FU Z, CIAIS P, PRENTICE I C, et al. Atmospheric dryness reduces photosynthesis along a large range of soil water deficits [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 989.
- [9] ZHAO D Y, ZHANG Z Y, ZHANG Y G. Soil moisture dominates the forest productivity decline during the 2022 China compound drought-heatwave event [J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(17).
- [10] ZHOU S, WILLIAMS A P, BERG A M, et al. Land-atmosphere feedbacks exacerbate concurrent soil drought and atmospheric aridity [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(38): 18 848-18 853.
- [11] YUAN W P, ZHENG Y, PIAO S L, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth [J]. *Science*

- Advances, 2019, 5(8): eaax1396.
- [12] LIU L B, GUDMUNDSSON L, HAUSER M, et al. Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4 892.
- [13] LI Y, ZHANG W, SCHWALM C R, et al. Widespread spring phenology effects on drought recovery of Northern Hemisphere ecosystems[J]. *Nature Climate Change*, 2023, 13: 182–188.
- [14] LU H B, QIN Z C, LIN S R, et al. Large influence of atmospheric vapor pressure deficit on ecosystem production efficiency [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1 653.
- [15] 崔红婧, 褚琳, 尹雅琦, 等. 1990–2020年三峡库区植被物候时空格局及其演变机制[J]. *生态学报*, 2024, 44(9): 3 775–3 790. (CUI H J, CHU L, YIN Y Q, et al. Spatio-temporal patterns of vegetation phenology and their evolutionary mechanisms in the Three Gorges Reservoir Area from 1990 to 2020 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(9): 3 775–3 790.)
- [16] 张晶, 郝芳华, 吴兆飞, 等. 植被物候对极端气候响应及机制[J]. *地理学报*, 2023, 78(9): 2 241–2 255. (ZHANG J, HAO F H, WU Z F, et al. Response of vegetation phenology to extreme climate and its mechanism [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(9): 2 241–2 255.)
- [17] WANG T, OTTLÉ C, PENG S S, et al. The influence of local spring temperature variance on temperature sensitivity of spring phenology[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1 473–1 480.
- [18] LUO X Z, CROFT H, CHEN J M, et al. Improved estimates of global terrestrial photosynthesis using information on leaf chlorophyll content[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(7): 2 499–2 514.
- [19] LI X X, FU Y H, CHEN S Z, et al. Increasing importance of precipitation in spring phenology with decreasing latitudes in subtropical forest area in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 304: 108 427.
- [20] CHEN A P, MAO J F, RICCIUTO D, et al. Moisture availability mediates the relationship between terrestrial gross primary production and solar-induced chlorophyll fluorescence: Insights from global-scale variations [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(6): 1 144–1 156.
- [21] LI L, ZHA Y. Satellite-based spatiotemporal trends of canopy urban heat islands and associated drivers in China's 32 major cities [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(1): 102.
- [22] ZHANG Y, JOINER J, HAMED ALEMOHAMMAD S, et al. A global spatially contiguous solar-induced fluorescence (CSIF) dataset using neural networks [J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(19): 5 779–5 800.
- [23] HE J, YANG K, TANG W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 25.
- [24] ZHENG C L, JIA L, ZHAO T J. A 21-year dataset (2000–2020) of gap-free global daily surface soil moisture at 1-km grid resolution [J]. *Scientific Data*, 2023, 10(1): 139.
- [25] CHENG Y M, LIU L, CHENG L, et al. A shift in the dominant role of atmospheric vapor pressure deficit and soil moisture on vegetation greening in China [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 615: 128 680.
- [26] DING J Z, YANG T, ZHAO Y T, et al. Increasingly important role of atmospheric aridity on Tibetan alpine grasslands [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(6): 2 852–2 859.
- [27] XIONG L, BAI X Y, ZHAO C W, et al. High-resolution data sets for global carbonate and silicate rock weathering carbon sinks and their change trends [J]. *Earth's Future*, 2022, 10(8): e2022EF00 2746.
- [28] CONG N, PIAO S L, CHEN A P, et al. Spring vegetation green-up date in China inferred from SPOT NDVI data: A multiple model analysis [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 165: 104–113.
- [29] ZHOU X C, GENG X J, YIN G D, et al. Legacy effect of spring phenology on vegetation growth in temperate China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 281: 107 845.
- [30] SAVITZKY A, GOLAY M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures [J]. *Analytical Chemistry*, 1964, 36: 1 627–1 639.
- [31] QIU P H, XIA Z M, YOU L. Process monitoring ROC curve for evaluating dynamic screening methods [J]. *Technometrics*, 2020, 62(2): 236–248.
- [32] KENDALL M G. A new measure of rank correlation [J]. *Biometrika*, 1938, 30(1–2): 81–93.
- [33] LIU Y J, CHEN Q M, GE Q S, et al. Modelling the impacts of climate change and crop management on phenological trends of spring and winter wheat in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 518–526.
- [34] DING H, YUAN Z, SHI X L, et al. Soil moisture content-based analysis of terrestrial ecosystems in China: Water use efficiency of vegetation systems [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 150: 110 271.
- [35] ZHANG Y, LI L, WANG H B, et al. Land surface phenology of Northeast China during 2000–2015: Temporal changes and relationships with climate changes [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(11): 531.
- [36] ZHANG J, CHEN S Z, WU Z F, et al. Review of vegetation phenology trends in China in a changing climate [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2022, 46(6): 829–845.
- [37] CHENG W Y, LI Z, YAN L M. Uniforming spring phenology under non-uniform climate warming across latitude in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 762: 143 177.
- [38] CONG N, WANG T, NAN H J, et al. Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: A multimethod analysis [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 881–891.
- [39] ZHAO Z H, WANG X Y, LI R J, et al. Impacts of climate extremes on autumn phenology in contrasting temperate and alpine grasslands in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 336: 109 495.
- [40] WU S, WU W. Understanding spatio-temporal variation of autumn phenology in temperate China from 1982 to 2018 [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2024, 11: 1 332 116.

- [41] LUO Z H, YU S X. Spatiotemporal variability of land surface phenology in China from 2001–2014 [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(1):65.
- [42] 於嘉禾, 王卫光, 陈泽峰. 全球旱地饱和水汽压差和根区土壤水分变化对植被生产力的影响及其成因[J]. *生态学报*, 2024, 44(11):4 808–4 819. (YU J H, WANG W G, CHEN Z F. Influences of vapor pressure deficit and root-zone soil moisture changes on vegetation productivity and its causes across global drylands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11):4 808–4 819.)
- [43] 陈德朝, 涂胜, 吴世磊, 等. 草原植物叶片水势的研究综述[J]. *种子科技*, 2022, 40(6): 17–19+108. (CHEN D C, TU S, WU S L, et al. *Seed Science & Technology*, 2022, 40(6): 17–19+108.)
- [44] SPERRY J S, HACKE U G, OREN R, et al. Water deficits and hydraulic limits to leaf water supply [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2002, 25(2):251–263.
- [45] QADERI M M, KUREPIN L V, REID D M. Effects of temperature and watering regime on growth, gas exchange and abscisic acid content of canola (*Brassica napus*) seedlings [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 75:107–113.
- [46] BASTOS A, CIAIS P, FRIEDLINGSTEIN P, et al. Direct and seasonal legacy effects of the 2018 heat wave and drought on European ecosystem productivity [J]. *Science Advances*, 2020, 6(24): eaba2724.
- [47] YU T, JIAPAER G, BAO A M, et al. Disentangling the relative effects of soil moisture and vapor pressure deficit on photosynthesis in dryland Central Asia [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 137:108 698.
- [48] 金佳鑫, 蔡裕龙, 郭熙, 等. 中国亚热带植被蒸腾驱动力解耦分析[J]. *地理学报*, 2023, 78(7):1 779–1 791. (JIN J X, CAI Y L, GUO X, et al. Decoupled driving forces of variabilities of transpiration in Chinese subtropical vegetation based on remote sensing data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(7):1 779–1 791.)
- [49] PIAO S L, ZHANG X P, CHEN A P, et al. The impacts of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: A review [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(10):1 551–1 563.
- [50] GAO S, LIANG E Y, LIU R S, et al. An earlier start of the thermal growing season enhances tree growth in cold humid areas but not in dry areas [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2022, 6(4):397–404.

~~~~~

(上接第11页)

- [21] 李桂君, 李玉龙, 贾晓菁, 等. 北京市水-能源-粮食可持续发展系统动力学模型构建与仿真[J]. *管理评论*, 2016, 28(10):11–26. (LI G J, LI Y L, JIA X J, et al. Establishment and simulation study of system dynamic model on sustainable development of water-energy-food nexus in Beijing [J]. *Management Review*, 2016, 28(10):11–26.)
- [22] 李成宇, 张士强. 中国省际水-能源-粮食耦合协调度及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(1):120–128. (LI C Y, ZHANG S Q. Chinese provincial water-energy-food coupling coordination degree and influencing factors research [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(1):120–128.)
- [23] 李可欣, 曹永强, 范帅邦, 等. 东北三省“水-能源-碳”系统仿真模拟: 基于系统动力学模型[J]. *生态学报*, 2023, 43(17): 6 999–7 011. (LI K X, CAO Y Q, FAN S B, et al. Simulation of water-energy-carbon in Northeast China based on system dynamics model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(17):6 999–7 011.)
- [24] FENG M Y, ZHAO R Q, HUANG H P, et al. Water-energy-carbon nexus of different land use types: The case of Zhengzhou, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 141:109 073.
- [25] WANG T, YANG Z P, HAN F, et al. Assessment of tourism socio-ecological system resilience in arid areas: A case study of Xinjiang, China [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 159:111 748.
- [26] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水-土-能-碳”耦合作用机制分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(9): 1 613–1 628. (ZHAO R Q, LI Z P, HAN Y P, et al. The coupling interaction mechanism of regional water-land-energy-carbon system [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9):1 613–1 628.)
- [27] 杨永春, 张旭东, 穆焱杰, 等. 黄河上游生态保护与高质量发展的基本逻辑及关键对策[J]. *经济地理*, 2020, 40(6): 9–20. (YANG Y C, ZHANG X D, MU Y J, et al. The basic logic and core strategies of ecological protection and high-quality development in the upper reaches of the Yellow River [J]. *Economic Geography*, 2020, 40(6):9–20.)
- [28] 李昭楠. 甘肃经济增长与能源消耗关系及优化路径研究[J]. *兰州学刊*, 2017(12):198–208. (LI Z N. A study of relation and optimized path on economic growth and energy consumption in Gansu [J]. *Lanzhou Academic Journal*, 2017(12):198–208.)
- [29] 郝军, 吴晓光, 刘佳雨, 等. 生态文明背景下内蒙古耕地发展对策研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(12):49–56. (HAO J, WU X G, LIU J Y, et al. Countermeasures for cultivated land development in Inner Mongolia under the background of ecological civilization [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(12):49–56.)
- [30] 张洪亮, 杨玉广, 边晓南, 等. 基于PCA的德州市水资源承载力评价[J]. *人民黄河*, 2022, 44(增2): 69–71+74. (ZHANG H L, YANG Y G, BIAN X N, et al. Evaluation of water resource carrying capacity in Dezhou City based on PCA [J]. *People's Yellow River*, 2022, 44(S2):69–71+74.)
- [31] WANG Y T, XIE J K, XU Y P, et al. Scenario-based multi-objective optimization of reservoirs in silt-laden rivers: A case study in the Lower Yellow River [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 829:154 565.
- [32] 刘冰, 孙作人, 孙华臣. 消费总量控制下的能源空间配置路径及优化策略[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(1): 96–106. (LIU B, SUN Z R, SUN H C. Path and optimization strategy of energy space allocation under the control of total consumption [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(1): 96–106.)