

中国亚热带植被蒸腾驱动力解耦分析

金佳鑫^{1,2,7}, 蔡裕龙¹, 郭 熙³, 王龙浩⁴, 王 颖⁵, 刘元波⁶

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210024; 2. 河海大学水利部水利大数据技术重点实验室, 南京 210024;
3. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
5. 南京晓庄学院旅游与社会管理学院, 南京 211171; 6. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008;
7. 国家科技资源共享服务平台国家地球系统科学数据中心, 北京 100101)

摘要: 植被蒸腾(Tc)是水循环的重要组成部分。土壤水分(SM)和饱和水汽压差(VPD)是Tc的关键驱动因素,探讨其对Tc的影响有助于加深生态系统对气候变化响应机制的认识。然而有关VPD和SM对Tc变化的相对贡献尚不清楚,主要原因在于SM和VPD通过陆地—大气相互作用强烈耦合,阻碍了SM、VPD对Tc独立影响程度的量化。本文基于气象再分析资料、遥感土壤水分、蒸腾以及土地覆盖数据等多源数据,采用当前较为先进的“分箱解耦法”,分析2003—2018年中国亚热带植被蒸腾主导驱动力。通过对SM和VPD数据相关性解耦发现,研究区Tc随SM增加呈现出先上升后保持稳定的趋势,而随VPD增加Tc变化幅度较小;总体而言,SM对Tc变化的相对贡献更高,约为VPD对Tc相对贡献的5倍;不同植被类型Tc对SM和VPD的敏感性有所差异,尽管4种植被类型Tc对SM的敏感性均大于VPD的敏感性,但4种植被Tc对SM响应的阈值不同,其中森林(常绿阔叶林除外)的阈值最低(约为35%),短木植被的阈值最高(约为55%),表明不同植被生态对策的差异。此外,为验证结论的可信性,本文基于光合与蒸腾的强耦合关系,利用太阳诱导叶绿素荧光(SIF)指征Tc变化,经上述分析得到一致的结果。通过解耦SM-VPD对Tc的定量影响,本文进一步完善了气候变化生态水文效应的认知,为区域水循环模拟优化提供理论依据。

关键词: 植被蒸腾; 土壤水分; 饱和水汽压差; 解耦; SIF
DOI: 10.11821/dlxb202307016

1 引言

植被蒸腾(Transpiration, Tc)是陆地蒸散发的主要水通量,占陆地蒸散量的80%~90%,蒸腾作用每年将(62000±8000) km³的水再循环到大气中^[1-3]。蒸腾作用的主要水源来自土壤水,土壤水分(Soil Moisture, SM)的不足会影响植被的气孔导度,限制生产力甚至威胁植被的生存^[4-6]。Tc的另一个主要驱动因子为饱和水汽压差(Vapor Pressure Deficit, VPD),一方面VPD是植物大气需水量的重要驱动因素^[7-8],另一方面当VPD增加到一定阈值后,继续增加VPD会导致植被气孔导度降低直至关闭,进而减少Tc^[9-10]。因此,VPD也是决定植被蒸腾作用的关键变量^[8, 11-12]。在当前气候变暖背景下,全球VPD逐渐增加,而SM目前表现出逐渐减少的趋势^[8, 13],这可能会限制植被的蒸腾作用,为此厘清SM和VPD对蒸腾作用的影响有助于理解生态系统的水循环气候响应机制。

收稿日期: 2022-08-23; 修订日期: 2023-06-19

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0605402); 国家自然科学基金项目(41971374) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2018YFA0605402; National Natural Science Foundation of China, No.41971374]

作者简介: 金佳鑫(1986-), 男, 河北秦皇岛人, 教授, 博士, 主要从事生态水文遥感方面研究。

E-mail: jjaxinking@hhu.edu.cn

由于SM和VPD交互机制比较复杂,且时空异质性较高,对Tc相对作用仍存在一定争议^[14-15]。当前有关SM和VPD对于蒸腾作用影响的研究主要集中在站点等小尺度上^[16-17],比如Song等研究SM和VPD对于江西省亚热带针叶林蒸腾作用的独立影响,结果表明VPD对于植被蒸腾的限制大于SM限制。然而,SM和VPD对蒸腾作用的独立影响在区域和全球尺度探索较少,这阻碍了对生态系统水循环气候变化响应的深入认识^[11, 18]。近年来在区域和全球尺度上,已开展了大量有关光合作用对SM和VPD相对效应的研究^[14-15],考虑到光合与蒸腾的耦合作用^[1, 19-20],这对Tc研究具有一定参考价值。Liu等证明是SM控制着全球大多数植被地区生态系统生产,而不是VPD^[14]。Lu等认为在全球更多通量站点和更大区域,VPD而非SM主导着生态系统生产效率^[21]。Dang等认为在全球植被覆盖区,温度(Temperature, Ta)对生态系统生产力的贡献大于SM,在不同的植被类型中SM和Ta的重要性也不相同^[22]。

造成SM和VPD对于蒸腾、光合作用影响的争论在于SM和VPD之间的强耦合^[14, 18, 22],因此,分离SM和VPD之间的强耦合,并探究其对Tc的独立影响,对于理解生态系统水循环的气候响应机制至关重要。为探究SM、VPD对生态系统的影响,Liu等提出了“分箱解耦法”成功剥离了SM和VPD之间的相关性,该方法将数据按照SM和VPD百分位依次分箱,每个区间中SM和VPD基本是解耦的,在多因子独立贡献分析中有较好表现^[14]。Yu等借助“分箱解耦法”成功揭开了SM和VPD对中亚地区生态系统的相对影响^[15],该方法可为明晰VPD和SM对Tc的相对贡献提供有效途径。

近年来,中国南方亚热带地区经历了显著的气候变化,特别是SM下降、VPD增加,对区域Tc造成显著影响^[13, 23-24],进而对区域生态环境与社会经济带来潜在威胁。然而,SM、VPD对于Tc的独立贡献尚不清楚,严重限制了区域水循环气候变化响应规律认知与应对策略制定。本文选取中国亚热带区域作为研究区,借助相关性分析法、“分箱解耦法”,探讨VPD和SM变化对Tc的各自影响,进一步研究不同植被类型Tc对VPD和SM变化的响应敏感性差异。本文假设,如果SM在Tc中起主导作用,那么Tc对VPD的变化不是很敏感,高SM会促进Tc;相反,如果VPD在Tc中起主导作用,那么Tc对SM的变化不是很敏感,VPD会促进Tc。

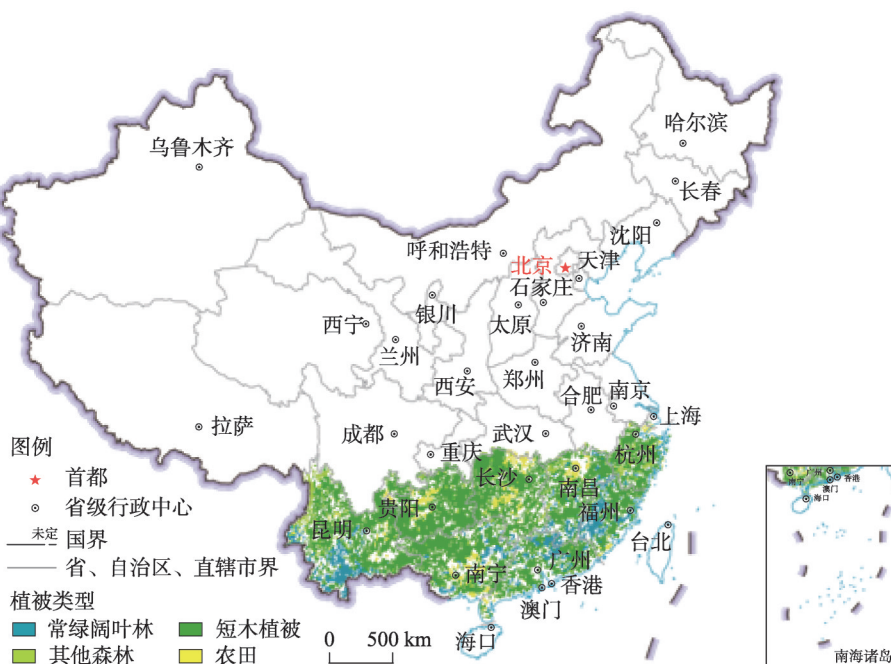
2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

本文研究区主要包括云南、贵州、广西、湖南、江西、广东、福建、浙江等亚热带地区省份(图1),位于长江以南,濒临东海与南海(96°45'E~123°57'E, 20°23'N~30°29'N)。地形以平原、丘陵、山地为主,气候以亚热带季风气候为主,高温高湿、雨热同期,年平均温度16~22℃,年降雨量800~1600 mm,植被类型主要以亚热带森林为主,该地区等水物种的水分利用策略不同于其他地区的典型响应^[25],并且经常受季节性干旱的影响。

2.2 数据来源

2.2.1 土壤湿度数据 土壤湿度数据选用国家青藏高原数据中心发布的“基于站点观测的中国1 km土壤湿度日尺度数据集”^[26](<https://doi.org/10.11888/Terre.tpd.c.272415>)。该数据集是通过机器学习得到,由中国1789个站点的现场测量数据,采用随机森林方法,利用ERA5-Land时间序列、叶面积指数、土地覆盖类型等作为预测因子,预测土壤湿度。相比于ERA5-Land和SAMP-L4产品,SMCI在中国区域精度更高,并且提供10 cm间隔0~100 cm的10层土壤湿度数据^[26]。该数据集的空间分辨率为0.1°,时间分辨率为日尺



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1823号标准地图制作，底图边界无修改。

图1 研究区及主要植被空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the main vegetation types over the study area

度，时间跨度为2000—2020年，为保证研究的准确性，本文选取10~20 cm、50~60 cm、90~100 cm 3层土壤湿度求平均^[14]，并将日尺度数据合并为月尺度，用于统计分析。

2.2.2 饱和水汽压差 本文所使用的VPD数据是利用温度、空气比湿、气压数据计算得出^[27]，气象数据来源于“中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集”(<https://doi.org/10.3972/westdc.002.2014.db>)，该数据集是以国际上现有Princeton再分析资料、GLDAS资料、GEWEX-SRB辐射资料，以及TRMM降水资料为背景，融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成^[28]。本文选用数据的时间跨度为2003—2018年月尺度数据，VPD计算公式如下：

$$e^0 = 6.108 \exp \frac{17.27T}{T+237.3} \quad (1)$$

$$e^a = \frac{pq}{62.2} \quad (2)$$

$$VPD = e^0 - e^a \quad (3)$$

式中：VPD是饱和水汽压差(hPa)； T 表示温度(℃)； q 表示空气比湿(kg kg^{-1})； p 表示气压(Pa)； e^0 和 e^a 分别为饱和水汽压和实际水汽压(hPa)，为了减小辐射的影响，剔除了VPD < 5 hPa的区域^[14]。

2.2.3 蒸腾数据 本文中使用的Tc数据来源于Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM) v3.5a产品(<https://www.gleam.eu/>)。GLEAM产品不仅提供蒸散发总量，还包括Tc等蒸散发分量，广泛应用于全球水循环定量研究^[29-30]。该模型利用Priestley和Taylor方程，根据观测到的地表净辐射和气温，计算出潜在Tc^[31-32]。对多种蒸散发遥感产品进行比较分析，发现GLEAM蒸腾数据具有较优的估算精度^[31, 33-34]。为量化VPD和SM变化对Tc的各自影响，本文数据的时间范围为2003—2018年，时间分辨率为1个月，空间分

辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 为与其他数据匹配, 需对 GLEAM Tc 原始数据进行降尺度处理。考虑到植被蒸腾与光合作用的强相关性^[35-36], 本文借助太阳诱导叶绿素荧光 (Solar-induced Chlorophyll Fluorescence, SIF) 遥感数据, 采用线性回归方法对 Tc 数据降尺度到 0.1° ^[36-39]。

2.2.4 植被类型数据 植被类型数据来自国际地圈—生物圈计划 (IGBP) 分类方案 (<https://lpdaac.usgs.gov/data/>) 的 MODIS MCD12C1 土地覆盖类型产品。该数据是结合 Terra 和 Aqua 两颗卫星获得的土地覆盖类型数据集, 空间分辨率为 0.05° 。本文依据 Chen 等提出的土地覆盖分类整合方案^[40], 将常绿针叶林、落叶阔叶林、混交林合并为其他森林; 多树的草原和草原合并为短木植被; 农田和天然植被嵌套合并为农田, 并将研究区植被类型像元个数小于 10 个的植被类型去掉。为了降低土地覆盖类型变化对本文的影响, 本文选取了 2002 年、2010 年、2018 年 3 期土地覆盖数据, 保留研究时段内土地覆盖类型未发生变化的像元, 作为本文的有效植被区域。

2.2.5 SIF 数据 荧光是叶绿素在光合作用过程中重新发射的长波辐射, 与光合作用密切相关, 考虑到光合与蒸腾作用通过叶片气孔紧密耦合, 因此荧光可以作为植被蒸腾的理想探针^[36, 41]。随着日光诱导叶绿素荧光 (SIF) 遥感的发展, 基于地面和遥感 SIF 观测的实例分析表明, SIF 与 Tc 有很强的相关性, 如 Maes 等利用卫星 SIF 和能量通量土壤冠层观测 (SCOPE) 模型研究了 SIF 和 Tc 之间的经验联系^[36], Lu 等根据通量塔测量发现温带森林的 SIF 与潜热通量密切相关^[41]。本文采用的 SIF 数据来源于 GOSIF 产品, 由中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 遥感数据和气象再分析数据生成^[42], 由于其具有更高的时空分辨率和全球连续覆盖率, 目前已广泛用于 SM 和 VPD 对于光合作用的影响研究^[15, 22]。本文中的 GOSIF 数据时间跨度为 2013—2018 年, 时间分辨率为月, 空间分辨率为 0.05° , 为了便于研究将数据升尺度至 0.1° 。本文的 GOSIF 数据主要有两个作用, 一方面利用 SIF 实现对 GLAME Tc 数据降尺度, 另一方面直接利用 SIF 来指征 Tc, 辅助验证本文的结果。

3 研究方法

本文选取 Spearman 相关性分析, 用于研究区内 Tc、VPD、SM、SIF 数据的相关性分析。Spearman 相关分析方法既能描述线性关系, 又能描述非线性关系, 对数据无需正态假设要求, 对异常值的敏感性低, 具有广泛应用^[43]。由于 GLEAM Tc 数据空间分辨率较粗, 为准确分析中国亚热带区植被蒸腾驱动力, 同时为保证数据空间分辨率的一致性, 需要对其进行降尺度处理。本文利用 GOSIF 数据, 逐像元建立 SIF 与 GLEAM Tc 数据的线性回归方程。基本过程为: 首先将 GOSIF 数据升尺度至 0.25° , 并与 GLEAM Tc 数据建立统计关系, 最终将回归方程应用于原始高分辨的 SIF 数据, 实现对 Tc 数据的预测, 达到降尺度处理目的。为了排除其他因素的干扰, 首先将研究区内温度小于 15°C , 光合通量密度小于 $500\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 数据去除掉^[44]。考虑到 SM 和 VPD 之间的强耦合性, 这使得本文无法通过常规方法量化 SM 和 VPD 对于 Tc 的影响。为此, 本文选用 Liu 等提出的“分箱解耦法”来分离 SM 与 VPD 之间的相关性^[14], 进而量化 SM 和 VPD 对于 Tc 的影响。首先将研究区内的 SM 和 VPD 数据, 按照数值由小到大进行排列, 将排列后的 SM 和 VPD 数据按照百分位各分成 10 个区间 (即 $0\sim 10\%$ 、 $10\%\sim 20\%$ 、……、 $90\%\sim 100\%$), 对 SM 和 VPD 区间取交集, 得到 10×10 个子区间, 本文中称之为“箱” (图 2)。在每个区间中 SM 和 VPD 基本上是解耦的, 因此便于各自量化 SM 和 VPD 对于 Tc 的影响。如果箱中的数据个数小于 10 个, 则删除该箱, 使用箱中的平均值来量化 SM 和 VPD 对于 Tc 的影

响。剥离SM-VPD的耦合性后,用 $Tc(VPD|SM)$ 来量化VPD对 Tc 的影响,即 $\Delta Tc(VPD|SM)$ 表征的是在保持SM不变或变化较小的情况下,随着VPD从最低值到最高值的 Tc 变化量($mm\ month^{-1}$);同理,用 $Tc(SM|VPD)$ 来量化SM对于 Tc 的影响,计算如下^[14]:

$$\Delta Tc(VPD|SM) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I Et_{i,n_{i,max}} - Et_{i,n_{i,min}} \quad (4)$$

$$\Delta Tc(SM|VPD) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J Et_{j,n_{j,max}} - Et_{j,n_{j,min}} \quad (5)$$

式中: $\Delta Tc(VPD|SM)$ 为每个SM区间中最高VPD箱和最低VPD箱的 Tc 之差; I 是SM区间的个数; i 是SM区间的编号 ($i=1, 2, \dots, 10$); $n_{i,max}$ 和 $n_{i,min}$ 是第 i 个区间中最大VPD和最小VPD所在箱的编号。 $\Delta Tc(SM|VPD)$ 为每个VPD区间中的 Tc 从低SM到高SM的变化; J 是VPD区间的个数; j 是VPD区间的编号 ($j=1, 2, \dots, 10$); $n_{j,max}$ 和 $n_{j,min}$ 是第 j 个VPD区间中最大SM和最小SM所在箱的编号。

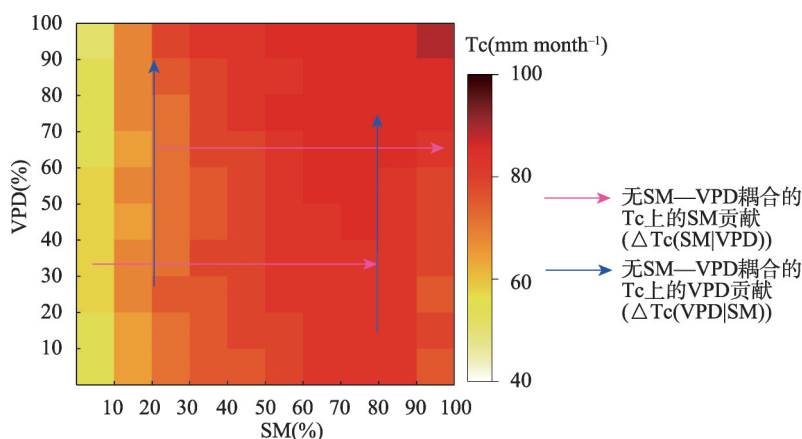


图2 “分箱解耦法”概念图

Fig. 2 Conceptual illustration of the decoupling approach by binning

4 结果与分析

4.1 Tc 与驱动因子相关性分析

图3展示了各研究变量之间相关性的空间分布,VPD与 Tc 总体上呈正相关,相关性均值约为0.57,正相关的区域约占91%,负相关的区域约占9%,VPD与 Tc 相关性在云南地区较低,均值约为0.1(图3a)。SM与 Tc 总体上呈正相关,相关性均值约为0.3,78%区域表现为正相关,具体而言正相关的区域主要集中在云南、华南等地区,负相关的区域集中在江西、浙江等地(图3b)。SM与VPD总体上呈负相关,相关性均值约为-0.2,负相关的区域约占79%,显著负相关($P < 0.05$)区域约占70%,主要集中在云南、浙江等地(图3c)。总体而言,SM与VPD存在很强的耦合性,在高SM和高VPD地区,SM与 Tc 的相关性可能是VPD与 Tc 之间相关性的副产品,或VPD与 Tc 的相关性可能是SM与 Tc 之间相关性的副产品。因此,在评估SM和VPD对 Tc 影响时,SM和VPD之间的相关性常常被忽视。此外,为了验证SIF数据降尺度的可靠性,本文在 0.25° 尺度上对GOSIF和GLEAM Tc 数据进行相关性分析,研究区SIF与 Tc 整体表现为较强的正相关(图3d),均值约为0.84,表明选用SIF数据进行降尺度是可行的。

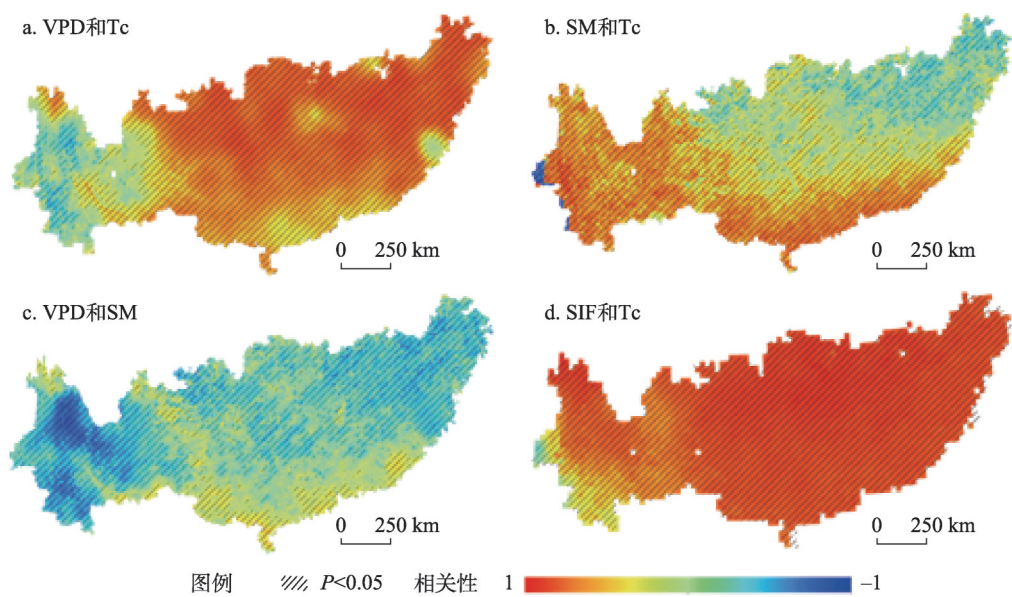


图3 2003—2018年中国亚热带地区各因子之间相关性空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of correlations between the selected variables in subtropical China from 2003 to 2018

SM和VPD之间的强耦合性(图3c),限制探究SM和VPD对Tc的独立影响。为了分离SM与VPD之间的强耦合性,本文采用“分箱解耦法”剥离SM和VPD之间的强耦合性。如图4所示,解耦前研究区SM和VPD之间的相关性中值为-0.21,按VPD、SM分箱后的中值分别为-0.04、-0.03,这为探究SM和VPD对Tc的独立影响奠定了基础。

4.2 VPD与SM变化对Tc的相对贡献

图5展示了实现SM和VPD之间的解耦后,研究区Tc随SM和VPD梯度增加的变化,总体上Tc随SM的增加表现出先上升后保持稳定的趋势,在SM小于35%的梯度,Tc随着SM的增加而逐渐增加,当SM大于35%梯度,Tc变化较小(图5a)。然而研究区Tc整体上受VPD的影响较小,在SM小于10%的区间中,Tc随VPD的增加而下降,在SM大于10%的区间中,Tc随VPD的增加呈现出相对上升的趋势(图5b)。这表明,在没有SM-VPD耦合的情况下,研究区高SM促进了Tc,而高VPD对Tc的促进作用不是很显著,换句话说,Tc与VPD相关性主要是SM-VPD耦合的副产品。图6展示了解耦后研究区SM和VPD对Tc、SIF的相对贡献,研究区SM对Tc的月平均相对贡献为23.54 mm,并且SM对Tc的相对贡献都为正贡献,这表明

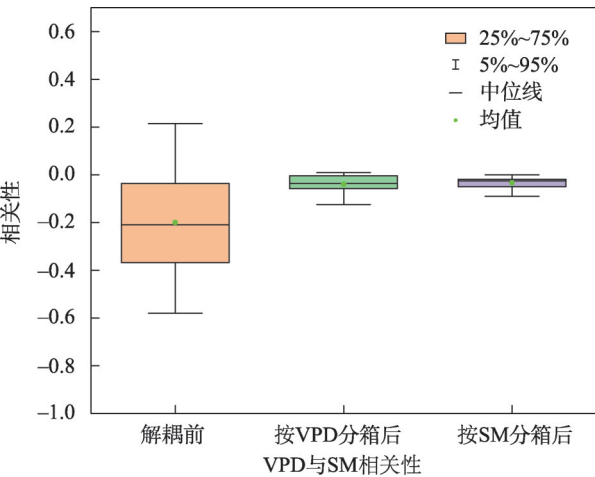
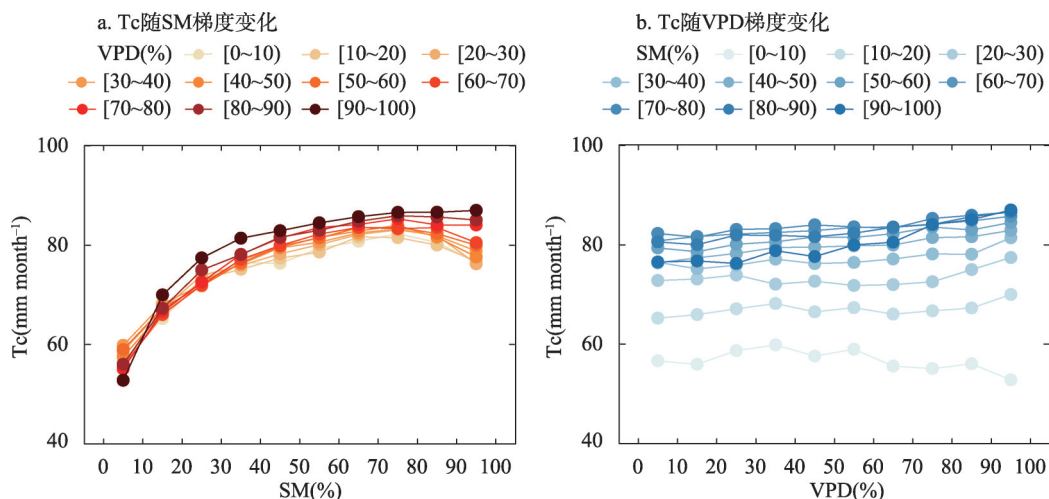


图4 2003—2018年中国亚热带区土壤湿度(SM)和饱和水汽压差(VPD)相关性统计

Fig. 4 Box-plots of the correlation coefficients between soil moisture (SM) and vapor pressure deficit (VPD) across the study area in subtropical China from 2003 to 2018



注：圆点表示每个SM-VPD箱中的Tc平均值,不同颜色表示不同的VPD或SM区间。

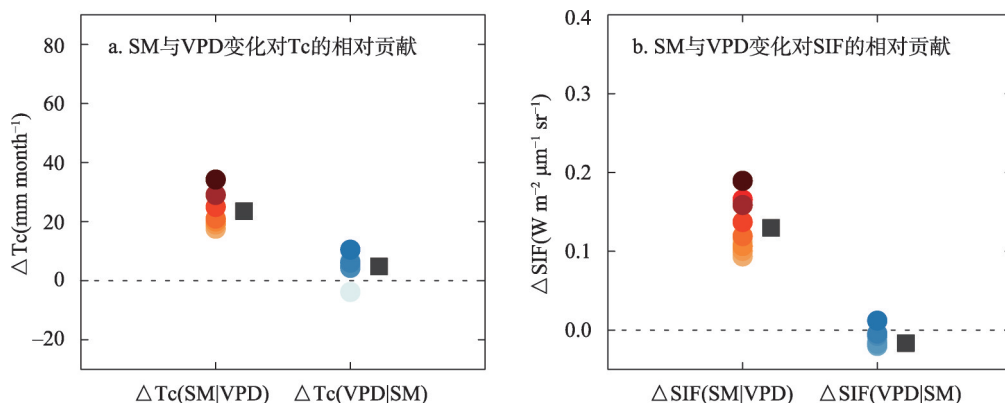
图5 SM-VPD解耦条件下Tc随SM、VPD梯度的变化

Fig. 5 Changes of Tc in the gradients of SM and VPD without SM-VPD coupling

在不同VPD梯度下, SM的增加都对Tc起促进作用, SM相对贡献的最大值为34.21 mm month⁻¹, 最小值为17.57 mm month⁻¹ (图6a)。研究区VPD对Tc的平均相对贡献为4.80 mm month⁻¹, 当SM位于0~10%区间, VPD对Tc的相对贡献最小, 约为-3.84 mm month⁻¹, SM在90%~100%区间, VPD对Tc相对贡献最大, 约为10.49 mm month⁻¹ (图6a)。为了进一步验证结果的可信性, 本文分析了研究区SM和VPD对SIF的相对贡献, 研究区SM和VPD对SIF的相对贡献分别为0.13 W m⁻² nm⁻² sr⁻¹、-0.02 W m⁻² nm⁻² sr⁻¹, 在VPD位于20%~30%的区间, SM对SIF的相对贡献值最小, 约为0.09 W m⁻² nm⁻² sr⁻¹, VPD对SIF的贡献随SM梯度增加而减小, 当SM位于80%~90%区间, VPD对SIF的相对贡献值最小 (图6b)。总体而言, 研究区SM和VPD对Tc的独立影响与SIF较为一致。

4.3 不同植被类型Tc对SM和VPD敏感性差异

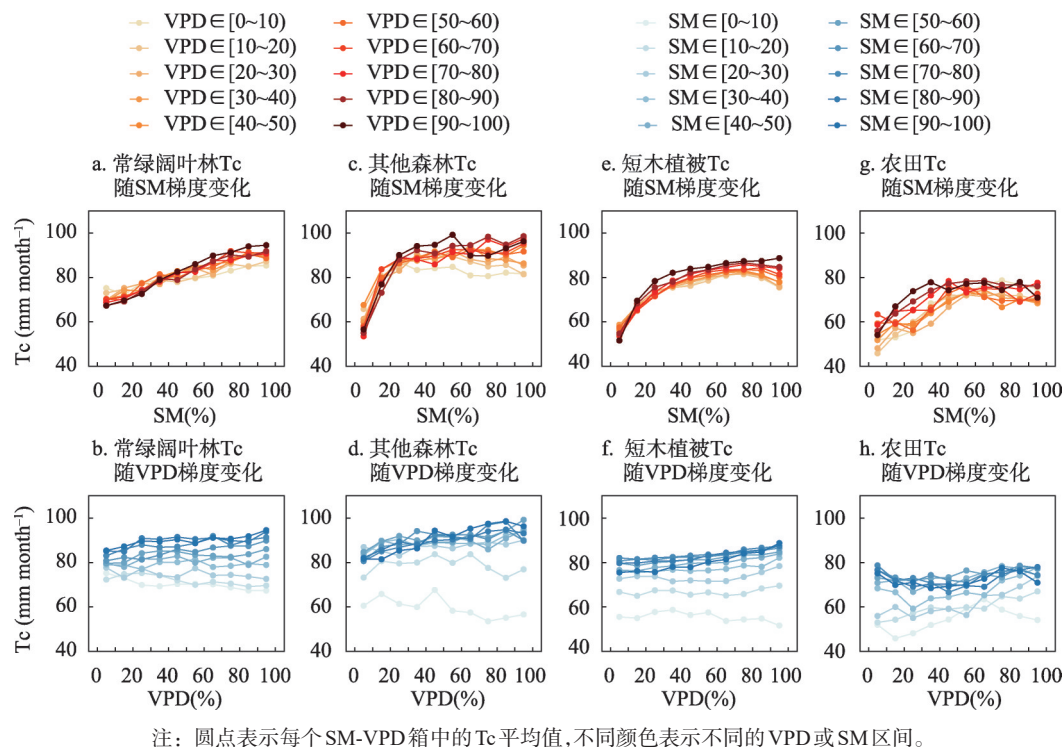
图7展示了不同植被类型Tc对SM和VPD的响应差异, 整体而言4种植被类型的Tc对SM的敏感性大于VPD的敏感性, Tc随SM的增加都表现出上升的趋势, 但不同植被



注：不同颜色表示不同的VPD或SM区间, 圆点表示每个区间中的SM或VPD贡献, 正方形表示相应的均值。

图6 VPD-SM解耦条件下SM与VPD变化对Tc的相对贡献

Fig. 6 Relative contributions of SM and VPD to Tc without SM-VPD coupling across the study area



注：圆点表示每个SM-VPD箱中的Tc平均值,不同颜色表示不同的VPD或SM区间。

图7 SM-VPD解耦条件下不同植被类型Tc随SM、VPD梯度的变化

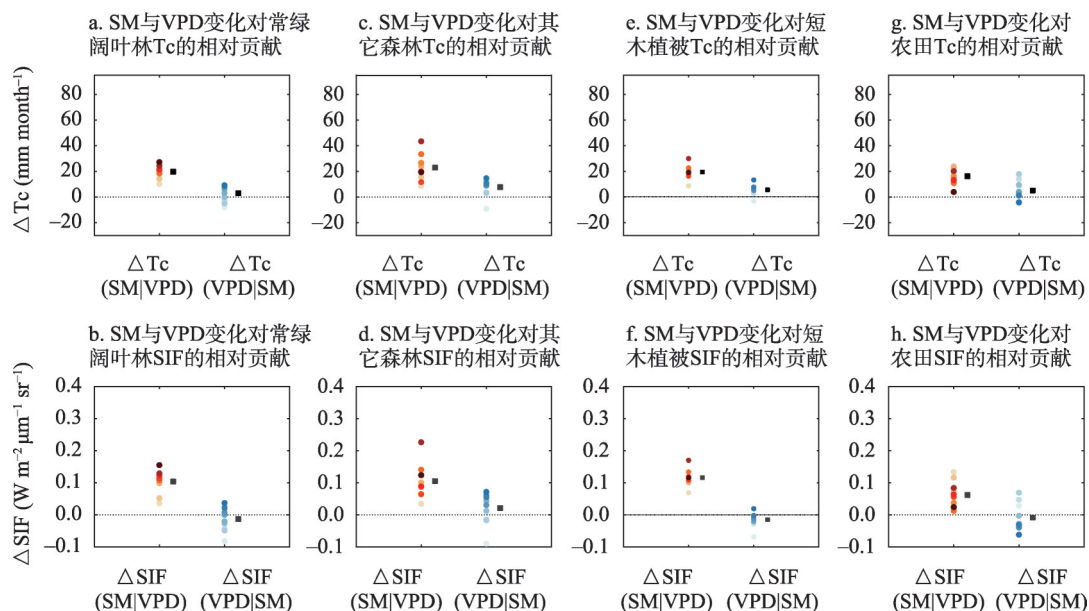
Fig. 7 Changes of Tc in the gradients of SM and VPD without SM-VPD coupling for the different vegetation types

类型的Tc对SM响应的阈值（即梯度响应曲线拐点）不同，其他森林的拐点最低约为35%，短木植被的拐点较高约为55%（图7c、7e）。4种植被Tc受VPD的影响都较小，在SM大于20%的区间内，其他森林Tc随VPD的增大而增大（图7d），但常绿阔叶林与农田的Tc随VPD的增加呈波动状态（图7b、7h）。图8展示了不同植被类型的SM和VPD对Tc、SIF的相对贡献，总体上4种植被类型的SM贡献均大于VPD的贡献，常绿阔叶林的SM、VPD对Tc的平均相对贡献分别为19.73 mm month⁻¹、2.90 mm month⁻¹，在SM位于0~40%区间中，VPD对Tc的相对贡献小于0 mm month⁻¹（图8a）。其他森林的Tc随着SM所属区间的增加逐渐上升，SM、VPD对其他森林Tc的平均相对贡献分别为22.88 mm month⁻¹、7.70 mm month⁻¹（图8c）。农田的SM、VPD对Tc的平均相对贡献分别为16.17 mm month⁻¹、5.07 mm month⁻¹（图8g），在相同的SM或VPD条件下，高VPD和高SM会导致农田的Tc下降，当VPD在90%~100%区间中，SM对Tc的相对贡献最小，约为3.91 mm month⁻¹。在不同的植被类型中，SM、VPD对Tc的相对贡献与SIF基本吻（图8b、8d、8f、8h）。不同植被类型Tc对SM和VPD的响应敏感性差异表明，在考虑SM和VPD的独立影响时，应注意区分不同的土地覆盖类型。

5 结论与讨论

5.1 讨论

气候变暖背景下，有关VPD和SM对于植被蒸腾变化驱动作用的认识仍有待完善，主要原因在于SM和VPD通过陆地一大气相互作用强烈耦合，限制了SM、VPD对Tc独



注: 不同颜色表示不同的 VPD 或 SM 区间, 圆点表示每个区间中的 SM 或 VPD 贡献, 正方形表示相应的均值。

图8 VPD-SM解耦条件下不同植被类型SM与VPD变化对Tc的相对贡献

Fig. 8 Relative contributions of SM and VPD to Tc without SM-VPD coupling for the different vegetation types

立影响的量化。“分箱解耦法”目前已被证实可以在全球和区域尺度上很好地将 SM 和 VPD 的强耦合性剥离^[14-15, 44], 相比之下相关性分析和多元线性回归等传统方法, 对 SM 与 VPD 之间的共线性解耦不充分^[14], 并且研究表明植物蒸腾作用对 SM 和 VPD 的响应可能是非线性的^[45-46], 该方法能够捕捉这种非线性^[22, 47]。使用该方法后本文的 SM 与 VPD 相关性呈现明显的下降 (图4), 为探究 SM、VPD 对 Tc 的独立影响提供了基础。本文分析了 SM、VPD 对中国亚热带地区植被 Tc 的独立影响, 发现 SM 对 Tc 的独立影响大于 VPD 的独立影响, 这支持了 Liu、Yu 等的结果, 强调 SM 对 Tc 的重要性^[14-15]。中国亚热带地区干旱频发^[48], SM 年际波动较大, 植被蒸腾更容易受 SM 的影响。然而, 最近有关中国亚热带地区 SM 和 VPD 对 Tc 的独立影响表明^[17], VPD 和 SM 对 Tc 的限制分别为 90.8%、9.2%, 造成这种差别的原因是研究时间尺度不同。因太阳辐射、VPD、温度都会对植被蒸腾造成影响^[49-50], 为了控制其他因素对研究的干扰, 本文将研究区温度小于 15 °C、VPD 小于 5 hPa、光合通量密度小于 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 像元数据进行了剔除^[14], 因此本文更多关注的是生长季内 (主要是夏季) VPD 和 SM 变化对 Tc 的相对作用。而 Song 考虑的范围为全年的 VPD 和 SM 季节变化对 Tc 的作用。考虑到中国亚热带地区 VPD 与 Tc 季节格局的相似性, 在年内尺度上 VPD 与 Tc 的相关性更高, 在一定程度上表现为 VPD 对 Tc 的主导作用。近年来已有研究表明陆地生态系统水分胁迫存在临界阈值^[51-52]。本文结果显示研究区 Tc 对 SM 的响应在 35% 阈值下, 其增加对 Tc 贡献很显著, 但在 35% 阈值上, SM 的变化对 Tc 的影响较小 (图 5a), 这表明植被对 SM 的响应存在阈值效应。值得注意的是, 虽然 VPD 的阈值响应不明显, 但当 SM 大于 10% 阈值时, 高 VPD 会促进 Tc, 相反当 SM 小于 10% 阈值, 高 VPD 会抑制 Tc 的增加 (图 5b), 表明 Tc 对 VPD 的响应受 SM 的调节^[53-54]。在其他森林中高 VPD 并不总是限制 Tc (图 7d), 这可能是由于森林根系发达, 在大气干旱情况下依然可以利用深层土壤水^[55-56], 相比之下农田由于根系较浅, 在水分胁迫下更倾向于气孔关闭来减少水分消耗^[57] (图 7h)。在相同 SM 或 VPD 条件下, 高 VPD 和

高SM对森林等植被的Tc起促进作用,但农田却表现出相反的趋势(图8a、8g),这些差异可能与森林、短木植被和农田生态系统的环境条件、土壤性质和根系系统有关^[57]。未来在生态系统水循环模拟的过程中,应适当考虑不同植被类型对SM和VPD的敏感性。此外,近年来已有大量研究表明SIF与Tc密切相关,可以用SIF来指征Tc的变化^[37-39],图3d和图8展示了用SIF来验证本文分析的可行性与结果的合理性。

尽管本文量化了中国亚热带地区VPD和SM对Tc的相对影响,但仍存在一定的局限性。首先,当前已有研究表明SM和VPD是影响Tc的最主要因素^[14-15, 17],然而温度、辐射、风速等也会对Tc产生影响,因此本文尝试设置控制条件,比如本文将研究区温度小于15℃、VPD小于5 hPa、光合通量密度小于500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 像元数据进行了剔除,尽可能减少其他因素对结果的干扰,但风速、植被生长结构等因素因缺乏数据未做考虑,未来需要对这些因素进行定量的分析。其次,尽管存在季节动态和年际动态等影响因素差异,本文重点关注了植被的平均状态,来表征常规年份植物响应特性,未来本文会关注年际变化和极端事件对Tc驱动力的影响。再次,研究区主要处在亚热带季风气候区,气候类型相对单一,这会造成研究结果的代表性不足,未来应探讨不同气候、以及不同干湿条件下植被Tc对SM、VPD的敏感性。本文为理解湿润地区SM和VPD对Tc的相对作用提供一定的借鉴,未来在气候变化的背景下,SM对该地区Tc的影响可能会进一步增加。

5.2 结论

本文基于多源遥感数据与气候再分析资料,利用“分箱解耦法”探究了VPD和SM对中国亚热带地区Tc变化的独立驱动作用,并进一步结合不同植被类型数据分析了Tc对SM和VPD响应的敏感性差异。结果表明,研究区SM对植被Tc的影响大于VPD对植被Tc的影响,总体而言SM对Tc的相对贡献约为VPD的5倍;不同植被类型对SM、VPD的敏感性不同,4种植被类型对SM的敏感性均大于VPD的敏感性,不同植被类型Tc对SM响应的阈值不同,其中森林(常绿阔叶林除外)的阈值最低。此外,本文基于光合和蒸腾作用的强耦合性,利用SIF遥感数据重复上述分析过程,得到与Tc一致的结果,证明了本文结论的可信性。以上结果表明,未来在考虑区域水循环气候变化响应规律认知与应对策略制定时,应适当考虑SM的作用,并关注不同土地覆盖类型的响应差异。

关联数据信息: 本文关联实体数据集已被国家地球系统科学数据中心收录,获取地址: <http://www.geodata.cn/data/datadetails.html?dataguid=186398731599357&docid=1260>、<http://www.geodata.cn/data/datadetails.html?dataguid=23671010189700&docid=1259>。

参考文献(References)

- [1] Jasechko S, Sharp Z D, Gibson J J, et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature*, 2013, 496(7445): 347-350.
- [2] Good S P, Noone D, Bowen G. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes. *Science*, 2015, 349(6244): 175-177.
- [3] Zhang Yongqiang, Kong Dongdong, Zhang Xuanze, et al. Impacts of vegetation changes on global evapotranspiration in the period 2003-2017. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 584-594. [张永强, 孔冬冬, 张选泽, 等. 2003—2017年植被变化对全球陆面蒸散发的影响. *地理学报*, 2021, 76(3): 584-594.]
- [4] Phillips O L, Aragao L E, Lewis S L, et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 2009, 323(5919): 1344-1347.
- [5] Peng C H, Ma Z H, Lei X D, et al. A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests. *Nature Climate Change*, 2011, 1(9): 467-471.
- [6] McDowell N G, Allen C D. Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. *Nature Climate Change*, 2015, 5(7): 669-672.

- [7] Rawson H M, Begg J E, Woodward R G. The effect of atmospheric humidity on photosynthesis, transpiration and water use efficiency of leaves of several plant species. *Planta*, 1977, 134(1): 5-10.
- [8] Yuan W P, Zheng Y, Piao S L, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science Advances*, 2019, 5(8): eaax1396. DOI: 10.1126/sciadv.aax1396.
- [9] Oren R, Sperry J S, Katul G G, et al. Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. *Plant Cell & Environment*, 1999, 22(12): 1515-1526.
- [10] Konings A G, Gentile P. Global variations in ecosystem-scale isohydricity. *Global Change Biology*, 2017, 23(2): 891-905.
- [11] Novick K A, Ficklin D L, Stoy P C, et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1023-1027.
- [12] Grossiord C, Buckley T N, Cernusak L A, et al. Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 2020, 226(6): 1550-1566.
- [13] Deng Y H, Wang S J, Bai X Y, et al. Variation trend of global soil moisture and its cause analysis. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105939. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105939.
- [14] Liu L B, Gudmundsson L, Hauser M, et al. Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4892. DOI: 10.1038/s41467-020-18631-1.
- [15] 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. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108698. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108698.
- [16] Ray J D, Gesch R W, Sinclair T R, et al. The effect of vapor pressure deficit on maize transpiration response to a drying soil. *Plant and Soil*, 2002, 239(1): 113-121.
- [17] Song X W, Lyu S D, Wen X F. Limitation of soil moisture on the response of transpiration to vapor pressure deficit in a subtropical coniferous plantation subjected to seasonal drought. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125301. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125301.
- [18] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(3-4): 125-161.
- [19] Beer C, Reichstein M, Ciais P, et al. Mean annual GPP of Europe derived from its water balance. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(5): L05401. DOI: 10.1029/2006GL029006.
- [20] Zhang Y Q, Kong D D, Gan R, et al. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002-2017. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 222: 165-182.
- [21] Lu H B, Qin Z C, Lin S R, et al. Large influence of atmospheric vapor pressure deficit on ecosystem production efficiency. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1653. DOI: 10.1038/s41467-020-18631-1.
- [22] Dang C Y, Shao Z F, Huang X, et al. Assessment of the importance of increasing temperature and decreasing soil moisture on global ecosystem productivity using solar-induced chlorophyll fluorescence. *Global Change Biology*, 2022, 28(6): 2066-2080.
- [23] Denissen J M C, Teuling A J, Pitman A J, et al. Widespread shift from ecosystem energy to water limitation with climate change. *Nature Climate Change*, 2022, 12(7): 677-684.
- [24] Wang P, Tong X L, Qiu J X, et al. Amplification effect of urbanization on atmospheric aridity over China under past global warming. *Earth's Future*, 2022, 10(5): e2021EF002335. DOI: 10.1029/2021EF002335.
- [25] Jiang P P, Meinzer F C, Wang H M, et al. Below-ground determinants and ecological implications of shrub species' degree of isohydry in subtropical pine plantations. *New Phytologist*, 2020, 226(6): 1656-1666.
- [26] Li Q L, Shi G S, Shangguan W, et al. A 1 km daily soil moisture dataset over China using in situ measurement and machine learning. *Earth System Science Data*, 2022, 14(12): 5267-5286.
- [27] Jin Jiaxin, Xiao Yuanyuan, Jin Junliang, et al. Spatial-temporal variabilities of the contrasting hydrometeorological extremes and the impacts on vegetation growth over the Yangtze River basin. *Advances in Water Science*, 2021, 32(6): 867-876. [金佳鑫, 肖园园, 金君良, 等. 长江流域极端水文气象事件时空变化特征及其对植被的影响. *水科学进展*, 2021, 32(6): 867-876.]
- [28] Chen Y Y, Yang K, He J, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116: D20104. DOI: 10.1029/2011JD015921.
- [29] Miralles D G, De Jeu R A M, Gash J H, et al. Magnitude and variability of land evaporation and its components at the global scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(3): 967-981.
- [30] Miralles D G, Van Den Berg M J, Gash J H, et al. El Niño-La Niña cycle and recent trends in continental evaporation. *Nature Climate Change*, 2014, 4(2): 122-126.

- [31] Martens B, Miralles D G, Lievens H, et al. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5): 1903-1925.
- [32] Wang Y P, Li R, Min Q L, et al. A three-source satellite algorithm for retrieving all-sky evapotranspiration rate using combined optical and microwave vegetation index at twenty AsiaFlux sites. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 235: 111463. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111463.
- [33] Talsma C J, Good S P, Jimenez C, et al. Partitioning of evapotranspiration in remote sensing-based models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 260: 131-143.
- [34] Miralles D G, Jiménez C, Jung M, et al. The WACMOS-ET project (Part 2): Evaluation of global terrestrial evaporation data sets. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(2): 823-842.
- [35] Mohammed G H, Colombo R, Middleton E M, et al. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111177. DOI: 10.1016/j.rse.2019.04.030.
- [36] Maes W H, Pagán B R, Martens B, et al. Sun-induced fluorescence closely linked to ecosystem transpiration as evidenced by satellite data and radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 249: 112030. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112030.
- [37] Feng H Z, Xu T R, Liu L Y, et al. Modeling transpiration with sun-induced chlorophyll fluorescence observations via carbon-water coupling methods. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 804. DOI: 10.3390/rs13040804.
- [38] Shan N, Zhang Y G, Chen J M, et al. A model for estimating transpiration from remotely sensed solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 252: 112134. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112134.
- [39] Pagán B R, Maes W H, Gentile P, et al. Exploring the potential of satellite solar-induced fluorescence to constrain global transpiration estimates. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 413. DOI: 10.3390/rs11040413.
- [40] Chen C, Riley W J, Prentice I C, et al. CO₂ fertilization of terrestrial photosynthesis inferred from site to global scales. *PNAS*, 2022, 119(10): e2115627119. DOI: 10.1073/pnas.2115627119.
- [41] Lu X L, Liu Z Q, An S Q, et al. Potential of solar-induced chlorophyll fluorescence to estimate transpiration in a temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 252: 75-87.
- [42] Li X, Xiao J F. A global 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO-2, MODIS, and reanalysis data. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 517. DOI: 10.3390/rs11050517.
- [43] Jin J X, Guo F S, Sippel S, et al. Concurrent and lagged effects of spring greening on seasonal carbon gain and water loss across the Northern Hemisphere. *International Journal of Biometeorology*, 2020, 64(8): 1343-1354.
- [44] 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. *Journal of Hydrology*, 2022, 615: 128680. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128680.
- [45] Green J K, Seneviratne S I, Berg A M, et al. Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake. *Nature*, 2019, 565(7740): 476-479.
- [46] Sage R F, Kubien D S. The temperature response of C₃ and C₄ photosynthesis. *Plant, Cell & Environment*, 2007, 30(9): 1086-1106.
- [47] Fu Z, Ciais P, Prentice I C, et al. Atmospheric dryness reduces photosynthesis along a large range of soil water deficits. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 989. DOI: 10.1038/s41467-022-28652-7.
- [48] Yuan W P, Cai W W, Chen Y, et al. Severe summer heatwave and drought strongly reduced carbon uptake in Southern China. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 18813. DOI: 10.1038/srep18813.
- [49] Granier A, Loustau D, Bréda N. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science*, 2000, 57(8): 755-765.
- [50] Bai Y, Zhu G F, Su Y H, et al. Hysteresis loops between canopy conductance of grapevines and meteorological variables in an oasis ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 214: 319-327.
- [51] Fu Z, Ciais P, Makowski D, et al. Uncovering the critical soil moisture thresholds of plant water stress for European ecosystems. *Global Change Biology*, 2022, 28(6): 2111-2123.
- [52] Fu Z, Ciais P, Feldman A F, et al. Critical soil moisture thresholds of plant water stress in terrestrial ecosystems. *Science Advances*, 2022, 8(44): eabq7827. DOI: 10.1126/sciadv.abq7827.
- [53] Zhang J W, Guan K Y, Peng B, et al. Sustainable irrigation based on co-regulation of soil water supply and atmospheric evaporative demand. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5549. DOI: 10.1038/s41467-021-25254-7.
- [54] Liu X S, Biondi F. Transpiration drivers of high-elevation five-needle pines (*Pinus longaeva* and *Pinus flexilis*) in sky-island ecosystems of the North American Great Basin. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 139861. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139861.
- [55] McDowell N, Pockman W T, Allen C D, et al. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do

some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 2008, 178(4): 719-739.

- [56] Zhang Y, Parazoo N C, Williams A P, et al. Large and projected strengthening moisture limitation on end-of-season photosynthesis. *PNAS*, 2020, 117(17): 9216-9222.
- [57] Chen N, Song C C, Xu X F, et al. Divergent impacts of atmospheric water demand on gross primary productivity in three typical ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 307: 108527. DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108527.

Decoupled driving forces of variabilities of transpiration in Chinese subtropical vegetation based on remote sensing data

JIN Jiaxin^{1,2,7}, CAI Yulong¹, GUO Xi³, WANG Longhao⁴, WANG Ying⁵, LIU Yuanbo⁶

(1. School of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 5. School of Tourism and Social Management, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China; 6. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 7. National Earth System Science Data Center, National Science and Technology Resource Sharing Service Platform, Beijing 100101, China)

Abstract: Transpiration (T_c) is a critical component of the global water cycle. Soil moisture (SM) and vapor pressure deficit (VPD) are key regulators of T_c , and exploring their contributions to changes in T_c can deepen our understanding of the mechanisms of water cycling in terrestrial ecosystems. However, the driving roles of VPD and SM in T_c changes remain debated because of the coupling of SM and VPD through land-atmosphere interactions which restrict the quantification of the independent effects of SM and VPD on T_c . By decoupling the correlations between SM and VPD using a novel binning approach, this study analyzed the dominant drivers of vegetation transpiration in subtropical China from 2003 to 2018 based on multi-source data, including meteorological reanalysis, remotely sensed soil moisture, transpiration, and land cover data. The results show that T_c first increased and then remained stable with an increase in SM across the study area but changed slightly with increasing VPD. Overall, the relative contribution of SM to the change in T_c was approximately five times that of VPD. The sensitivities of T_c to SM and VPD differed among vegetation types. Although the sensitivity of T_c to SM was greater than that of VPD for all four vegetation types, the thresholds of T_c in response to SM were different, with the lowest threshold (approximately 35%) for the other forests and the highest threshold (approximately 55%) for short wood vegetation. We infer that this is associated with the differences in ecological strategies. To verify the reliability of our conclusions, we used solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) data as a proxy for T_c based on the tight coupling between photosynthesis and transpiration. Consistent results were obtained by repeating the analyses. The results of this study, in which the impacts of SM and VPD on T_c were decoupled, are beneficial for further understanding the critical processes involved in water cycling in terrestrial ecosystems in response to climate change.

Keywords: transpiration; soil moisture; vapor pressure deficit; decoupling; SIF