

吴倩倩, 张晓, 徐书兴, 等. 亚洲内陆干旱区NDVI与树木生长的气候响应及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4): 1-10.

# 亚洲内陆干旱区NDVI与树木生长的气候响应及其影响因素

吴倩倩, 张晓, 徐书兴, 杨晓晖, 刘艳书, 李瀚之, 时忠杰

(中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091)

**摘要:** 基于亚洲内陆干旱区的树木年轮宽度指数(RWI)、归一化差异植被指数(NDVI)和气候数据, 采用空间统计方法和相关分析法分析了NDVI和RWI变化的一致性, 探讨了NDVI和RWI对气候的响应, 揭示了影响NDVI和RWI气候响应的相关因素。结果表明: 1982—2000年亚洲内陆干旱区的树木生长和NDVI均呈增加趋势, 生长季NDVI与RWI大多具有同步性变化特征, 大多数地区5、6月NDVI受同期气温的影响, 而4、5月NDVI主要受同期降水的影响; RWI主要受6—7月气温和4、6月和7月降水或帕默尔干旱指数(PDSI)的影响; 大部分地区的NDVI和RWI对气温的响应具有一致性, 但它们对降水或PDSI的响应存在很大差异; 海拔和水热条件对不同地区的NDVI和RWI的气候响应有较大的影响。本研究对于认识亚洲内陆干旱区植被与树木生长的气候响应及其影响因素具有一定的科学意义。

**关键词:** 树木年轮; NDVI; 气候响应; 影响因素; 亚洲内陆干旱区

**文章编号:** 1000-694X(2022)04-001-10

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00222

**中图分类号:** Q948

**文献标志码:** A

## 0 引言

最近几十年来全球变暖趋势明显, 对全球很多生态系统, 特别是脆弱区生态系统的初级生产产生了较大影响<sup>[1]</sup>。植物叶片和木质部组织是生态系统能量、水和碳循环中不可或缺的部分, 叶片是与环境相互作用的主要器官, 而树干是碳的主要长期生物贮存库, 植物通过叶片光合作用固定二氧化碳, 光合产物通过韧皮部运到树干中, 并以有机物的形式存储<sup>[2-3]</sup>。这两个生长部分紧密相连, 并与气候变化密切相关, 使植物能够优化对资源的吸收和分配<sup>[4-5]</sup>。然而, 对植被冠层绿度与树木径向生长之间关系的深入认识还较少。本研究在以往研究的基础上进行了补充说明, 为环境变化背景下森林生态系统管理提供理论依据。

卫星遥感已被用于测量冠层植被绿度与植被生产力的变化。归一化差异植被指数(NDVI)是指示植被冠层绿色动态的良好指标<sup>[6-8]</sup>。树木年轮由

于其高时间分辨率、样本分布广泛、环境变化指示意义明确等优势, 反映了树木对过去环境变化的生态记忆, 已被广泛作为指示森林生态系统如何响应环境变化研究的工具<sup>[9-11]</sup>。

众所周知, 虽然树木径向生长和其所处区域的植被受共同的气候要素的影响, 但树木径向生长和NDVI之间存在着很复杂的关系。很多研究认为生长季或夏季NDVI与树木径向生长之间存在着较高的正相关性。如 Berner 等<sup>[12]</sup>发现俄罗斯高纬度地区夏季森林NDVI与树木年轮宽度指数呈正相关; 王文志等<sup>[13]</sup>发现祁连山树轮宽度指数与该区NDVI具有较高的一致性; 王瑞丽等<sup>[14]</sup>发现北亚热带马尾松年轮宽度与9月的NDVI一致性较高; 然而也有研究认为树木径向生长与NDVI没有关系或呈负相关性<sup>[15]</sup>。由此可见, 不同地区NDVI与树木径向生长之间的关系是复杂的, 目前我们对此的认识还较少。

在不同的时空尺度上, 树木径向生长和NDVI

收稿日期: 2021-11-19; 改回日期: 2021-12-28

资助项目: 科技基础资源调查专项课题(2017FY101301); 国家自然科学基金项目(32071558, 32061123005, 41971061, 31670715)

作者简介: 吴倩倩(1997—), 女, 内蒙古兴安盟人, 硕士研究生, 研究方向为树轮生态与生态遥感。E-mail: wqq1119@163.com

通信作者: 时忠杰(E-mail: shijie1204@163.com)

之间的关系存在着很大的差异性。Vicente-Serrano等<sup>[16]</sup>研究了155个地点树木生长与NDVI的关系,发现二者之间总体正相关,但存在很大的空间差异,这主要归因于森林类型和区域气候的差异。而对西班牙的树木生长与NDVI关系的研究表明NDVI年际变化与树木年轮生长之间普遍存在正相关,但是,树木径向生长与NDVI年际变化之间的关系在森林类型和环境条件之间存在很大差异<sup>[17]</sup>。Coulthard等<sup>[18]</sup>在塞浦路斯的研究表明降水、海拔和土地覆盖类型之间的相互作用影响了树木径向生长与NDVI之间的关系。高海拔区森林的径向生长与NDVI的变化的气候驱动因素不同,但低海拔旱地的树木径向生长与NDVI具有很强的相关性。然而,目前这些研究还很难准确揭示树木径向生长与NDVI的关系以及它们的影响因素。

亚洲内陆干旱区深居亚欧大陆中央,条件恶劣,环境脆弱,对气候变化非常敏感,有利于研究树木生长对气候变化的响应,然而目前对其植被NDVI与树木径向生长的影响因素及其变化一致性的认识还不够深入。为此,本研究目的为分析亚洲内

陆干旱区树木径向生长和NDVI变化趋势及其对气候变化的响应特征与差异性,并探讨海拔和平均气候状况在树木径向生长/NDVI对气候变化响应时起到的作用,以期揭示树木生长与植被NDVI变化的驱动因素,为认识未来气候变化背景下亚洲内陆干旱区森林动态影响提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于亚洲内陆35°—58°N、77°—110°E,包括中国新疆,蒙古中北部,俄罗斯图瓦、布里亚特、戈尔诺-阿尔泰斯克等地区,吉尔吉斯斯坦的伊塞克湖州,哈萨克斯坦阿拉木图市等(图1)。本区植被以森林和草原为主,属森林-草原交错带,气候属典型的温带大陆性气候,季节分明<sup>[19]</sup>,年均气温-2.6℃,最高约3.8℃,最低约-9.4℃。1982—2000年,气温均呈上升趋势,其线性增长趋势率分别为0.85℃/10a、0.71℃/10a、0.77℃/10a。年降水量约325mm,年均干旱指数为0.19,1982—2000年呈上升趋势,其线性增长趋势率达0.89/10a。主要树木种类包括落叶松、云杉、松树等。

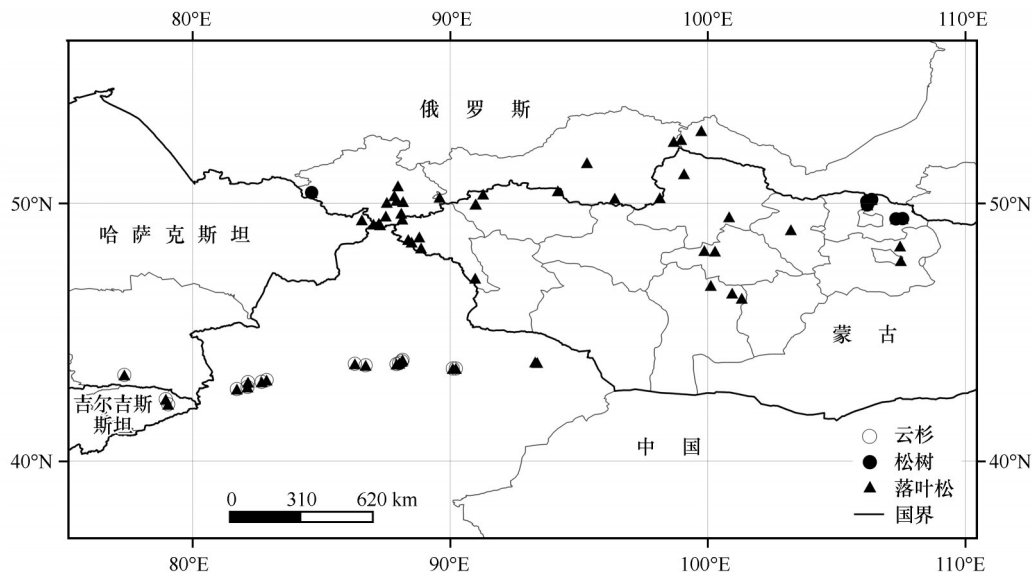


图1 树轮样点位置示意图

Fig.1 Spatial distribution of the tree-ring dataset available in inland Asia

## 2 数据来源与处理

### 2.1 树轮数据

树轮数据来源于国际树木年轮数据库(<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring>),本研究选取了包含1982—

2000年的树轮样点62个。获取数据后,利用AR-STAN处理来制作每一个树轮样点的标准年表。标准年表通过树轮宽度的标准化,剔除与树龄有关的生长趋势,得到年轮宽度指数(RWI),再根据指数序列与主序列间的相关系数,剔除相关差的标本,最后采用双权重平均法合并得到<sup>[20]</sup>。

## 2.2 NDVI数据

归一化差异植被指数(NDVI)数据来源于美国航天局(NASA)全球监测与模型研究组(Global Inventor Modeling and Mapping Studies, GIMMS<sub>3g</sub>)发布的15 d最大合成数据(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>),空间分辨率为8 km,投影方式为Albers Conical Equal Area。首先利用ArcGIS软件基于最大合成法获取每月NDVI数据,然后利用Python脚本语言批量提取了62个树轮取样点1982—2011年的NDVI数据,最后将NDVI按年(1—12月)、春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12—2月)和生长季(4—9月)获取各时间尺度的NDVI时间序列。

## 2.3 气候数据

气候数据主要来源于英国东安格利亚大学的CRU TS 3.23数据集(<https://crudata.uea.ac.uk/>)<sup>[21]</sup>,空间分辨率为0.5°,该数据集是基于全球4 000多个气象站点的观测值,利用空间自相关函数插值而得。研究所用气候因子为平均气温( $T$ )、最高气温( $T_{MX}$ )、最低气温( $T_{MN}$ )、降水( $P$ )和帕默尔干旱指数(PDSI)。PDSI代表土壤干旱程度,是常用的干旱指标,广泛应用于农业和气象等领域。它是基于包含降水量、蒸散量、径流量和土壤有效水分储存量在内的土壤水分供需模型,能够很好地判断长期干旱,正负数分别表示湿润程度和干燥程度<sup>[22]</sup>。各树轮样点的气候数据利用ArcGIS的Python脚本语言进行批量提取,得到各样点1982—2000年的逐

月气候数据(最高气温、最低气温、降水和干旱指数)。

## 2.4 数据分析

本文利用Pearson相关分析来检验NDVI和RWI之间以及它们与气候因子( $T$ 、 $T_{MX}$ 、 $T_{MN}$ 、 $P$ 和PDSI)的关系,并进行显著性检验。利用相关分析法检验海拔、多年平均气候因子与NDVI和RWI的气候响应之间的相关性,以揭示海拔及多年平均气候状况对NDVI和RWI的气候敏感性影响。利用Excel进行统计分析,制图通过R语言、ArcGIS和Origin 2018完成。

# 3 结果

## 3.1 NDVI和RWI的变化趋势及一致性

### 3.1.1 变化趋势

1982—2000年,研究区RWI和生长季NDVI均呈增加趋势,其中RWI线性变化趋势率达0.066/10a( $r=0.506$ ,  $n=19$ ,  $P<0.05$ ),呈增加趋势的样点占80.6%,显著增加的样点占30.6%(图2);而对不同树种来说,落叶松RWI在1982—2000年间呈显著增加趋势,其增加趋势率达0.073/10a( $r=0.444$ ,  $n=19$ ,  $P<0.05$ ),约32.5%的样点呈显著增加趋势,但云杉和松树在同期大多数样点也呈增加趋势。而对生长季NDVI来说,其线性趋势率达0.013/10a( $r=0.808$ ,  $n=19$ ,  $P<0.05$ ),其中约74.2%的样点呈增加趋势,约41.9%的样点达到显著增加水平( $P<0.05$ )。

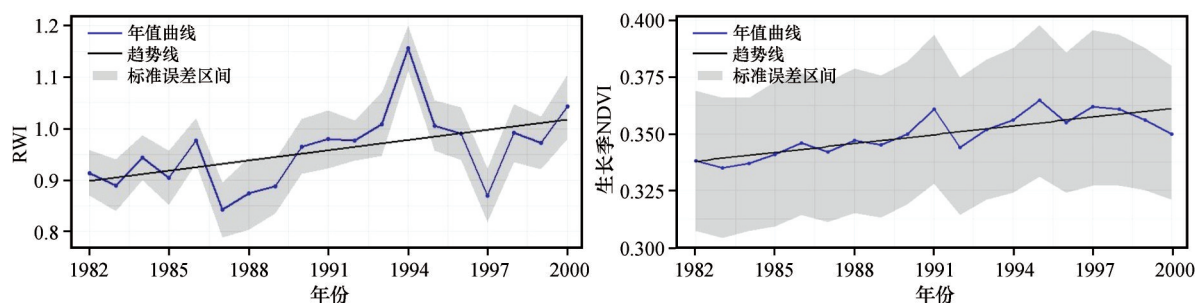


图2 RWI与生长季NDVI变化趋势

Fig.2 Change trend chart of annual average RWI and growing season NDVI

### 3.1.2 变化同步性

NDVI与RWI之间的关系是比较复杂的(图3)。在1982—2000年整个生长季期间(4—9月),62个样点的NDVI与RWI的平均相关系数为0.20,约

77.4%的样点呈同步变化趋势,其中约17.7%的样点达到显著水平( $P<0.05$ )。对不同月份来说,5、6、7月的NDVI与年RWI的相关性较高,二者平均相关系数分别为0.114、0.240和0.142;NDVI与RWI正相



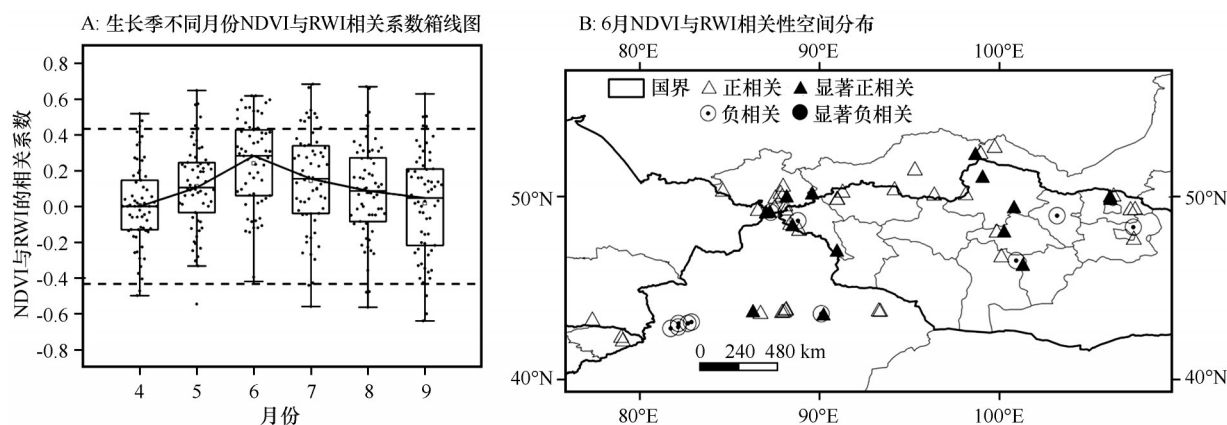


图3 1982—2000年RWI与NDVI的相关关系

Fig.3 The correlation between RWI and NDVI from 1982 to 2000

关的样点分别占总样点的72.6%、82.3%和71.0%，但其中仅8.1%、21.0%和14.5%的取样点呈显著正相关( $P < 0.05$ )，这表明二者之间在生长旺盛季节具有相似的趋势。从落叶松来看，其RWI与5—7月的NDVI的平均相关系数分别为0.077、0.283和0.159，呈正相关的取样点分别占总样点数的65.0%、87.5%和72.5%，而其中显著正相关的取样点分别占7.5%、27.5%和15.0%；对云杉来说，其RWI与5—7月的NDVI的平均相关系数分别为0.143、0.102和0.021，呈正相关的取样点分别占总样点数的81.3%、62.5%和56.3%，但未见显著性正相关；对松树来说，其RWI与5—7月的NDVI的平均相关系数分别为0.283、0.318和0.352，并且全部取样点均呈正相关性。

### 3.2 NDVI和RWI的气候响应

#### 3.2.1 对气温的响应

气温是影响植被生长的重要气候因素。由图4A—F、图5可见，1982—2000年，5、6月的NDVI与同期的气温（最高、最低和平均）的相关系数均较大，平均相关系数均在0.20以上，约70%以上的NDVI与气温（最高、最低和平均）正相关，其中25.8%—30.6%的样点达到显著正相关( $P < 0.05$ )；然而，RWI与气温（最高、最低和平均）的平均相关系数小于NDVI与气温的平均相关系数。RWI与6、7月的气温（最高、最低和平均）的相关系数均较高，除7月外，平均相关系数均在0.13以上，而且61%以上的RWI与6、7月的气温（最高、最低和平均）呈正相关性，其中11.3%—21.0%的样点达到显著正相关( $P < 0.05$ )。由图6可见，落叶松RWI主要受6、7月气温（最高、最低和平均气温）

的影响，6月的平均相关系数达0.218—0.256，7月的平均相关系数为0.150—0.209，大约25%以上的样点对气温的响应达到显著性水平；云杉RWI对7月平均最低气温和8月平均最高、最低气温的响应较为敏感；而松树RWI对6月的最高、最低气温和平均气温的响应较为敏感。

#### 3.2.2 对降水和PDSI的响应

降水和干旱也是影响植被生长的重要因素。图4G、I、图5显示，1982—2000年期间，生长季（4—9月）的降水和PDSI对植被NDVI的影响较小，4、5月的降水与同期NDVI呈负相关，平均相关系数分别为-0.10和-0.16，分别有11.3%和16.1%的样点达到显著负相关水平；而PDSI对NDVI的影响特别复杂，在4—6月约有55%的样点呈负相关性，而7—9月约有56%的样点呈正相关性，但达到显著相关的样点数较少。

对RWI来说（图4H、J），降水和PDSI对RWI的影响与其对NDVI的影响相反，大多正相关。在4月，降水和PDSI与RWI的平均相关系数分别为0.16和0.14，分别有74.2%和62.9%的样点呈正相关性，但仅有4.8%和9.7%的样点达到显著水平；而6月的降水和PDSI对RWI的影响相对较小，但达到显著正相关的样点较多，分别占总站点的11.3%和12.9%。对不同树种来说（图6），落叶松RWI对4、6月和7月的降水和PDSI响应较为敏感，并且大部分站点均呈正相关。特别是6月，RWI对降水和PDSI响应达到显著水平的站点分别占10%和12.5%；云杉RWI对降水和PDSI的响应多不敏感，而松树RWI对4—6月的降水和PDSI响应相对较为敏感。

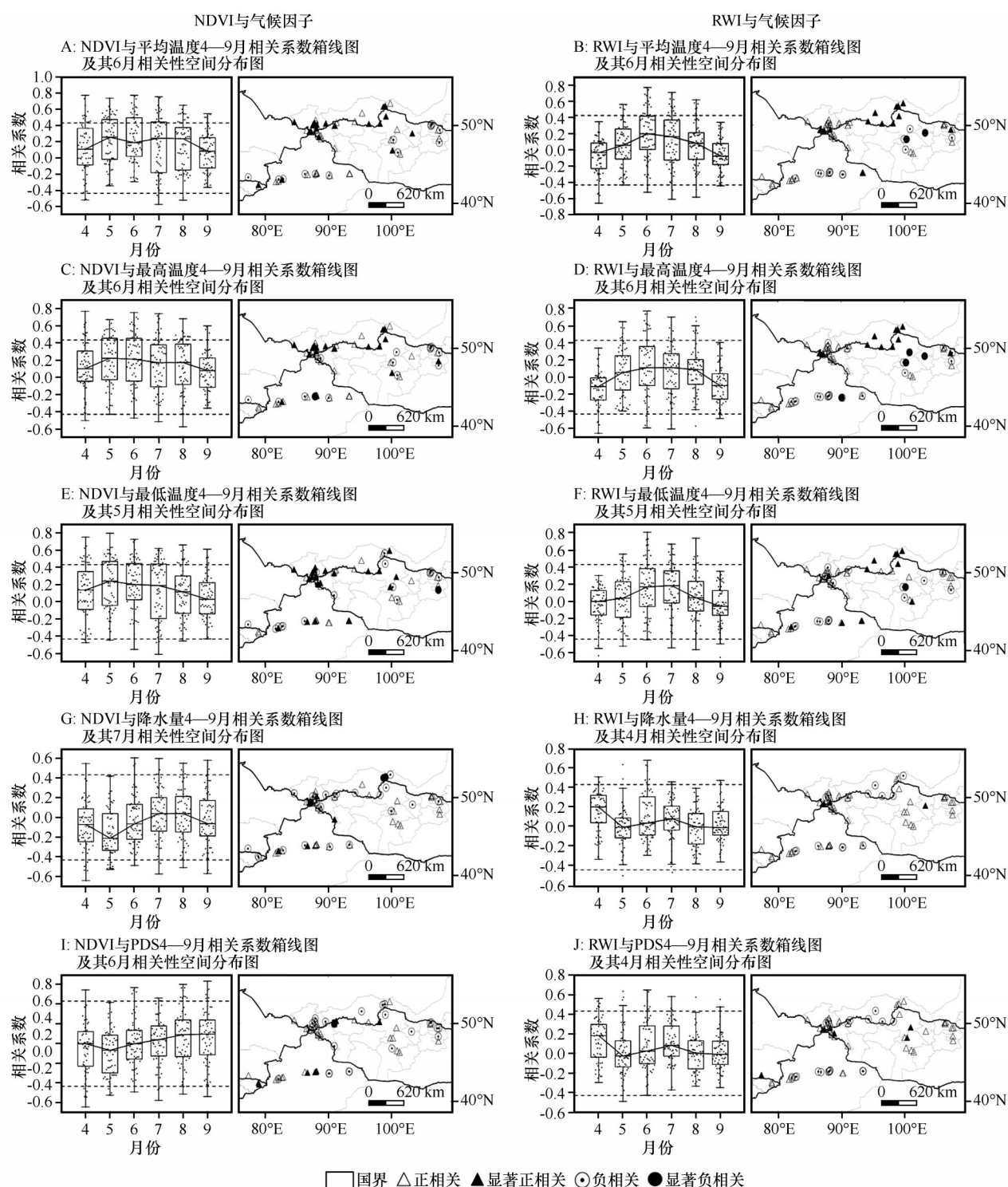


图4 1982—2000年RWI/NDVI与气候因子的相关系数箱线图及相关最高月份的相关性空间分布图

Fig.4 Box-plot of the correlation between RWI/NDVI and climate factors from 1982 to 2000, and spatial distribution map in the months with the highest correlation from 1982 to 2000

### 3.3 NDVI和RWI对气候响应的影响因素

#### 3.3.1 海拔的影响

由图7A可知,海拔显著影响着6月NDVI对气温(平均、最高和最低气温)与5月对降水和PDSI的

响应关系。对气温来说,在低海拔地区,6月的NDVI与气温多负相关(即负响应),在高海拔地区,它们之间逐渐转为显著的正相关性(即正响应),也就是说,随着海拔的增加,影响NDVI的限制性因子逐渐转变为气温;而在5月,低海拔地区的NDVI对降

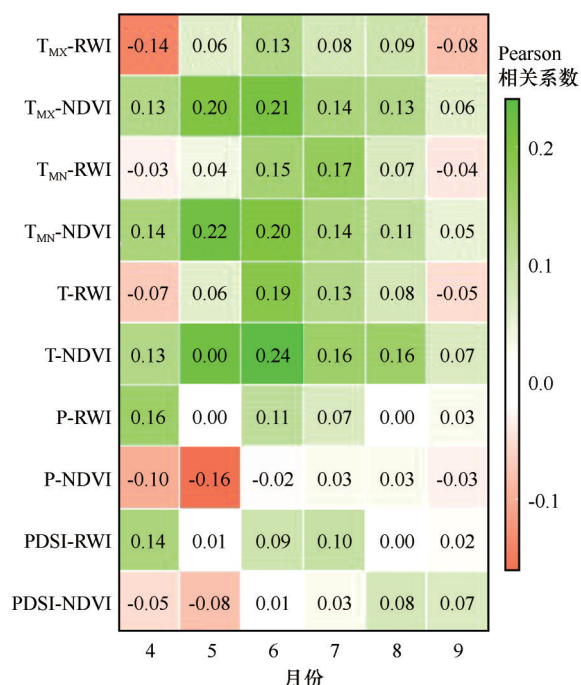


图5 1982—2000年RWI和NDVI与气候因子的平均相关系数热图

Fig.5 The heat map of average correlation coefficient between RWI/NDVI and climate factors from 1982 to 2000

水多呈正响应,高海拔地区逐渐转变为负响应,也即低海拔地区NDVI的限制性因子主要为降水。

而对RWI来说,海拔主要影响4、5、7月的树木生长对气温(平均、最高和最低气温)和5、6月对降水和PDSI的响应。这说明NDVI和RWI在低海拔地区均受水分(降水和PDSI)的限制,在高海拔地区均受气温(平均、最高和最低气温)的限制,并且海拔对二者的气候响应影响集中在5、6月。如图7G所示,随海拔的增加,RWI对5月平均气温的响应逐年由负相关转变为正相关,其相关系数线性增加率为每100 m 0.02 ( $r=0.462$ ,  $n=62$ ,  $P<0.05$ ),即在5

月低海拔地区RWI对平均气温多为负响应,而在高海拔地区RWI对平均气温多为正响应。

总体来说,在5、6月,随着海拔的升高,树木生长的限制因子由降水转变为气温。在低海拔地区,NDVI/RWI与降水,PDSI呈显著正相关;在高海拔地区,NDVI/RWI与气温(平均、最高和最低气温)呈显著正相关。

### 3.3.2 多年平均气温的影响

不同地区的多年平均气温也会影响NDVI和RWI对气候响应的关系。由图7B—D可见,4月不同地点的多年平均气温、最高和最低气温与NDVI的气温响应呈显著正相关性,即表明在4月,随多年平均气温的升高,NDVI的气温响应由负响应关系逐渐转变为正响应关系;而在5—7月,多年平均气温与NDVI的气温响应多呈显著负相关关系,这表明在此期间,随多年平均气温的升高,NDVI的气温响应由正响应关系逐渐转变为负响应关系;而多年平均气温与7月和8月NDVI的降水响应之间的关系多为显著正相关,多年平均最高气温与5月和6月NDVI、PDSI响应之间呈显著正相关,但多年平均最低气温的影响不明显。综合分析表明,多年平均气温较低的地点,NDVI更多受气温限制,多年平均气温较高的地点,NDVI更多受降水限制。

而对于RWI来说,多年平均气温与5、6、7月RWI的气温(平均、最高和最低气温)响应均为负相关,特别是6、7月多达到显著负相关性,即在多年平均气温较低的地点,RWI对气温的响应多为正相关,而多年平均气温较高地点的RWI对气温的响应多为负相关。例如,由图7H可见,随不同地点多年平均气温的增加,RWI对6月最高气温的响应由正相关转变为负相关,其相关系数线性变化率达 $-0.469/10^{\circ}\text{C}$  ( $r=0.528$ ,  $n=62$ ,  $P<0.05$ )。多年平均气

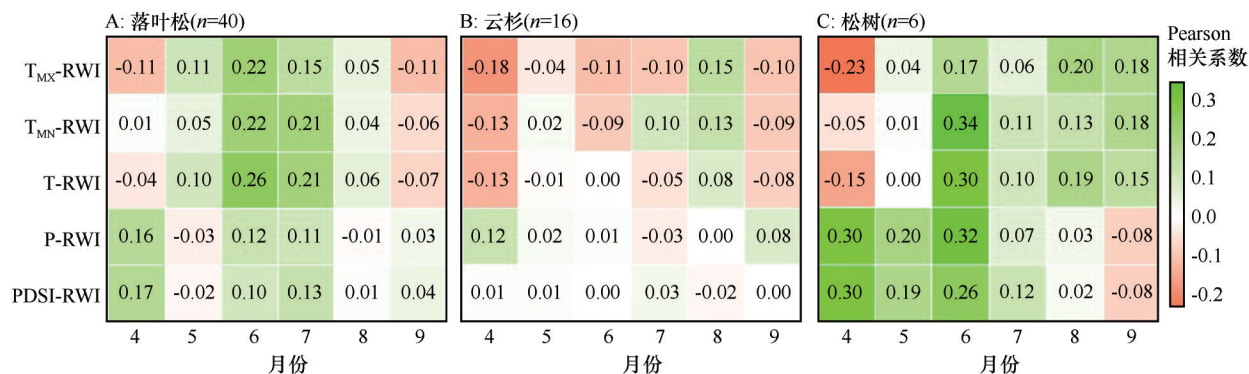


图6 1982—2000不同树种RWI与气候因子的平均相关系数热图

Fig.6 The heat map of average correlation coefficient between RWI of different tree species and climate factors from 1982 to 2000



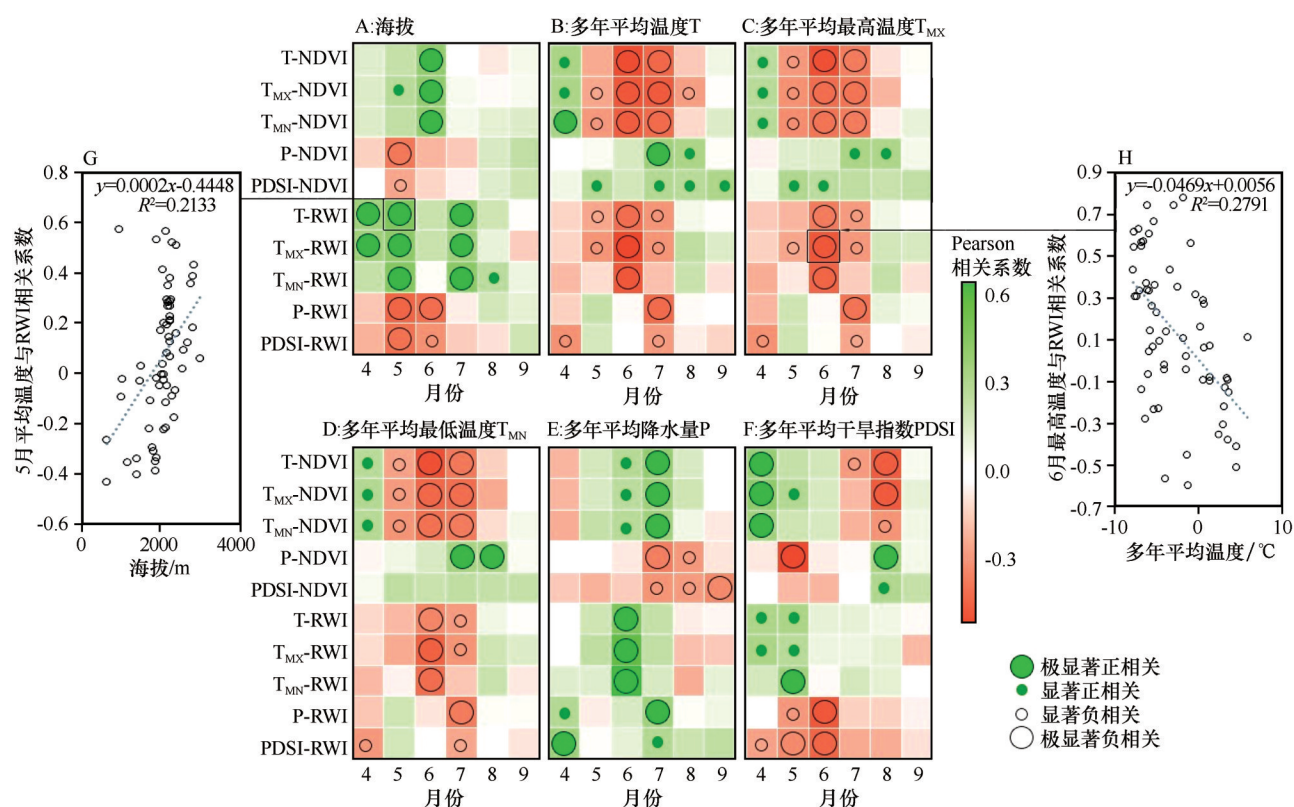


图7 水热状况与NDVI/RWI对气候响应的相关系数热点图

Fig.7 Heat map of correlation coefficient between hydrothermal condition and NDVI or RWI to climate response

温与7月RWI的降水响应和4、7月的PDSI响应之间呈显著负相关关系,这一关系与其对NDVI的降水和PDSI响应关系相反。综合分析表明,多年平均气温较低的地点,RWI同时受气温、降水和PDSI的限制,而在多年平均气温较高的地点,RWI的限制性因子不明确。

### 3.3.3 多年平均水分状况的影响

不同地点的多年平均降水和干旱状况也是影响NDVI和RWI的气候响应的重要因素。随多年平均降水量增加,6、7月NDVI对气温(平均、最高和最低气温)的响应越来越明显。但7、8月NDVI对降水和PDSI的响应却逐渐降低,说明,在多年平均降水量较低的地点,NDVI主要受7、8月降水的限制,在多年平均降水量较高的地点,NDVI主要受6、7月气温的限制。而对RWI来说,随不同地点的多年平均降水量增加,RWI对6月气温(平均、最高和最低气温)的响应越加明显,即多年平均降水量越高的地点,RWI与6月气温的正相关性越大;我们还发现,不同地点多年平均降水对RWI的4、7月降水和PDSI响应均呈显著正相关性,这说明在多年平均降水越大的地点,4、7月的降水和PDSI对RWI的影响较大(图7E、F)。

由图7E、F可见,不同地点多年平均PDSI与NDVI对4月平均最高、最低和平均气温,5月最高气温、8月降水和PDSI的响应之间呈显著正相关关系,但与对8月的气温和5月降水的响应之间呈显著负相关关系;而不同地点多年平均PDSI与RWI对4、5月气温(最高、最低和平均)的响应之间呈显著正相关关系,而与RWI对5、6月降水、PDSI的响应之间呈显著负相关性。这表明在水分条件较好的地点,NDVI主要受4月气温和8月降水/PDSI的限制,RWI主要受4、5月气温限制,在水分条件较差的地点,NDVI主要受5月降水和8月气温的限制,而RWI主要受5、6月的降水和PDSI限制。

## 4 讨论

### 4.1 NDVI与RWI的关系

本研究发现1982—2000年亚洲内陆干旱区大部分地区NDVI和RWI均呈增加趋势,这与亚欧大陆很多区的研究结果相似<sup>[6,23-24]</sup>,这或许表明NDVI和RWI之间具有较强的同步性特征。本研究分析发现,在生长季尺度上,约77.4%的NDVI与RWI之间变化具有一定的同步性(即二者呈正相关性);而

在月尺度上,69.4%的NDVI和RWI的最大相关系数集中在5—7月,特别是6月,这说明5—7月的NDVI与RWI的同步性较强,这种同步性模式在北半球的很多研究中也类似发现。例如在中国云南横断山区研究发现RWI和NDVI在7月显著正相关,但在旱季负相关<sup>[3,23]</sup>。在呼伦贝尔地区樟子松RWI与5—7月NDVI显著正相关<sup>[25]</sup>,在新疆天山森林上限研究发现树轮宽度指数和6月NDVI显著正相关<sup>[26]</sup>。而在东北小兴安岭南端研究发现,红松、臭冷杉和蒙古栎RWI与当年7月的NDVI也呈显著正相关<sup>[27]</sup>。Vicente-Serrano等<sup>[17]</sup>在西班牙研究也发现NDVI的年际变化与树木年轮生长普遍正相关;Brehaut等<sup>[9]</sup>在美国阿拉斯加育空地区研究发现一些针叶林的RWI与生长季的NDVI正相关。这可能由于本研究区内树木在5—7月完成了早材生长,之后缓慢增加形成晚材,变化幅度不大;而植被冠层在5—7月也是其快速生长期,7—8月达到一年内的最大值,之后植被冠层叶活动开始逐渐减弱。另外,这可能与树种、采样点位置等有关。

然而,我们也发现有很多地区NDVI与RWI相关性很低,这在其他的研究也有一些类似结果。汪亮亮等<sup>[28]</sup>在新疆塔里木河研究胡杨RWI与NDVI关系,发现它们之间的相关性差;而郭艳飞等<sup>[26]</sup>在新疆天山森林下限研究发现,RWI与NDVI之间的相关性也较差;路俊伟等<sup>[29]</sup>发现石羊河上游地区生长季NDVI与树轮年表相关性较差。于健等<sup>[30]</sup>在长白山东坡的研究表明,长时间序列的年轮宽度数据并不能很好地反映NDVI的长时期变化。在美国阿拉斯加育空地区大多数地区,特别是落叶树种的RWI与NDVI之间相关性也很低<sup>[9]</sup>。RWI与NDVI之间关系差异的原因仍不清楚,这或许暗示它们之间存在着不同的气候驱动因素。

#### 4.2 NDVI和RWI对气候的响应

大量研究已经证明水热因子是影响植被或森林生长的主要因素,有些地区主要受气温的影响,也有很多地区主要受降水或干旱状况的影响<sup>[25,31-32]</sup>,并且在不同的地区,NDVI和RWI的影响因素也可能存在着很大的差异性<sup>[3,33]</sup>。本文研究认为亚洲内陆干旱区的NDVI主要与5—6月的气温正相关,与4—5月降水或PDSI负相关;RWI主要与6—7月的气温(平均、最高和最低)正相关,与4、6或7月的降水或PDSI正相关。我们对比生长季

NDVI和RWI对水热因子响应的一致性发现,二者对平均、最高和最低气温的响应大多具有一致性(一致性比率分别达66.1%、71.0%和66.1%),但是二者对降水和PDSI的响应的一致性相对较差(一致性比率分别仅为46.8%和56.5%)。由此可见,在亚洲内陆干旱区NDVI和RWI对热量因子响应的一致性较对水分因子响应的一致性更强,这表明二者的限制性因子在大多数地区是一致性,而大量不一致限制性因素可能是导致二者之间相关性减弱的原因之一。

NDVI和RWI对气候的响应存在很大的空间分异性,这或许与地形、水分和热量等条件有关<sup>[32-33]</sup>。在新疆东天山的研究表明,森林上限(高海拔)的树木RWI受气温的限制,而森林下限(低海拔)的RWI受PDSI的限制<sup>[26]</sup>。在横断山区的研究也表明云南松的径向生长在低海拔(<1 700 m)主要受降水的限制。但是在高海拔(>2 200 m)时转变为受气温的限制,年NDVI与气温显著正相关,与降水负相关,并且随着海拔的增加,NDVI与RWI的相关性减弱<sup>[3]</sup>。这些研究表明地形,特别是海拔会影响树木RWI或NDVI对气候的响应。本研究表明NDVI和RWI在低海拔地区均受水分(降水和PDSI)的限制,在高海拔地区主要受气温(平均、最高和最低气温)的限制,并且海拔对二者的气候响应影响集中在5、6月。

海拔变化最终反映水热因子的组合变化,很多情况下随海拔增加,降水会在一定程度上呈增加趋势,气温呈下降趋势。本文进一步分析发现,多年平均气温较低的地点,NDVI更多受气温限制,多年平均气温较高地区,NDVI更多受降水限制,但RWI在气温较低的地点同时受气温和水分因子的限制,而在气温较高的地区RWI的影响因子不是很明确。对于水分因子来说,在水分条件较好的地区,NDVI主要受4月气温和8月降水/PDSI的限制,RWI主要受4—5月气温限制,在水分条件较差的地区,NDVI主要受5月降水和8月气温的限制,而RWI主要受5—6月的降水或PDSI限制。由此可见,影响NDVI和RWI气候响应的因素是存在着一定的差异的,这或许也与不同地区的植被类型及其组合有关。本研究位于半干旱半湿润区,交错分布着森林与草原,由于影响森林与草原生长的气候因子、地形、生长季长短等存在较大的差异,这可能是影响NDVI和RWI的气候响应的差异性的重要原因。



## 5 结论

1982—2000年,亚洲内陆干旱区NDVI和RWI大多呈增加趋势,特别在5—7月,大多数地区的NDVI与RWI具有较好的变化同步性;大多数地区5、6月NDVI受同期气温的影响,而4、5月NDVI主要受同期降水的影响;RWI主要受6—7月气温和4、6、7月降水或PDSI的影响;大部分地区的NDVI和RWI对气温的响应具有一致性,但它们对降水或PDSI的响应存在很大差异;不同地区的海拔和水热条件也是影响NDVI和RWI的气候响应的重要因素。NDVI和RWI在低海拔地区主要受水分(降水和PDSI)的限制,在高海拔地区主要受气温的限制,并且海拔对二者气候响应的影响集中在5、6月。在多年平均气温较低地区,NDVI更多受气温限制,RWI更多地同时受气温和降水限制,而在多年平均气温较高地区,NDVI更多受降水限制,而RWI的影响因子不是很明确。在水分条件较好地区,NDVI主要受4月气温和8月降水/PDSI的限制,RWI主要受4—5月气温限制,在水分条件较差地区,NDVI主要受5月降水和8月气温的限制,而RWI主要受5—6月的降水或PDSI限制。

## 参考文献:

- [1] 赵东升. 气候变化对自然生态系统初级生产力的可能影响[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2009.
- [2] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, et al. Climate extremes and the carbon cycle[J]. *Nature*, 2013, 500(7462): 287–295.
- [3] Zhou Y, Yi Y J, Jia W F, et al. Applying dendrochronology and remote sensing to explore climate-drive in montane forests over space and time[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 237: 106292.
- [4] Gauthier S, Bernier P, Kuuluvainen T, et al. Boreal forest health and global change[J]. *Science*, 2015, 349(6250): 819–822.
- [5] Muraoka H, Noda H M, Nagai S, et al. Spectral vegetation indices as the indicator of canopy photosynthetic productivity in a deciduous broadleaf forest[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2013, 6(5): 393–407.
- [6] Piao S L, Wang X H, Ciais P, et al. Change in satellite derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228–3239.
- [7] 王宗明, 国志兴, 宋开山, 等. 中国东北地区植被NDVI对气候变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(6): 1041–1048.
- [8] 李秀花, 师庆东, 郭娟, 等. 中国西北干旱区1981–2001年NDVI对气候变化的响应分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(2): 12–16.
- [9] Brehaut L, Danby R K. Inconsistent relationships between annual tree ring-widths and satellite-measured NDVI in a mountainous subarctic environment[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 91(1): 698–711.
- [10] Tei S, Sugimoto A. Time lag and negative responses of forest greenness and tree growth to warming over circumboreal forests[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(9): 4225–4237.
- [11] 季倩雯, 郑成洋, 张磊, 等. 河北塞罕坝樟子松径向生长动态变化及其与气象因子的关系[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(3): 257–265.
- [12] Berner L T, Beck P S, Bunn A G, et al. Plant response to climate change along the forest-tundra ecotone in northeastern Siberia[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(11): 3449–3462.
- [13] 王文志, 刘晓宏, 陈拓, 等. 基于祁连山树轮宽度指数的区域NDVI重建[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(9): 1033–1044.
- [14] 王瑞丽, 程瑞梅, 肖文发, 等. 北亚热带马尾松年轮宽度与NDVI的关系[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5762–5770.
- [15] Beck P S A, Andreu-Hayles L, D'Arrigo R, et al. A large-scale coherent signal of canopy status in maximum latewood density of tree rings at arctic treeline in North America[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 100: 109–118.
- [16] Vicente-Serrano S M, Camarero J J, Olano J M, et al. Diverse relationships between forest growth and the normalized difference vegetation index at a global scale[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 187: 14–29.
- [17] Vicente-Serrano S M, Martín-Hernández N, Camarero J J, et al. Linking tree-ring growth and satellite-derived gross primary growth in multiple forest biomes. Temporal-scale matters[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105753.
- [18] Coulthard B L, Touchan R, Anchukaitis K J, et al. Tree growth and vegetation activity at the ecosystem-scale in the eastern Mediterranean[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(8): 84008.
- [19] 李辰乐. 亚洲中部干旱区生态地理格局研究[J]. *山西农经*, 2017(8): 61–62.
- [20] 白登忠. 祁连山青海云杉林线树木生长、更新的影响因素研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [21] Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations: the CRU TS3.10 Dataset[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 623–642.
- [22] Palmer W C. *Meteorological Drought* [M]. Washington, USA: Weather Bureau, U.S. Department of Commerce, 1965: 58.
- [23] 闫平, 徐健楠, 菊花, 等. 云南三江并流地区树轮宽度指数与NDVI关系研究[J]. *林业资源管理*, 2019(6): 42–48.
- [24] 汪青春, 时兴合, 刘义花, 等. 青海湖布哈河流域树轮宽度指数与NDVI植被指数的关系[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(6): 1424–1432.
- [25] Shi Z J, Xu L H, Dong L S, et al. Growth-climate response and drought reconstruction from tree-ring of Mongolian pine in Hulunbuir, Northeast China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2016, 9

- (1):51–60.
- [26] 郭艳飞,甘森,杨美琳,等.天山东部树木径向生长与NDVI的关系[J].干旱区资源与环境,2018,32(3):176–180.
- [27] 张旭,宋文琦,赵慧颖,等.小兴安岭南部臭冷杉红松林树轮指数记录的7月NDVI变化[J].北京林业大学学报,2018,40(12):9–17.
- [28] 汪亮亮,叶茂,高生峰,等.水热因子对塔里木河下游胡杨年轮指数和植被指数的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(5):85–91.
- [29] 路俊伟,王乃昂,侯迎,等.石羊河上游地区树轮年表与NDVI关系分析[J].干旱区研究,2012,29(4):667–673.
- [30] 于健,刘琪璟,徐倩倩,等.长白山东坡植被指数变化及其对气候变化的响应[J].应用与环境生物学报,2015,21(2):323–332.
- [31] Correa-Díaz A, Silva L C R, Horwath W R, et al. Linking remote sensing and dendrochronology to quantify climate-induced shifts in high-elevation forests over space and time [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(1):166–183.
- [32] Wang Z, Lyu L, Liu W, et al. Topographic patterns of forest decline as detected from tree rings and NDVI [J]. *CATENA*, 2020, 198(14):105011.
- [33] Seftigen K, Frank D C, Björklund J, et al. The climatic drivers of normalized difference vegetation index and tree-ring-based estimates of forest productivity are spatially coherent but temporally decoupled in Northern Hemispheric forests [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, 27(11):1352–1365.

## Climatic responses of NDVI and tree growth in the arid areas of inland Asia and their influencing factors

Wu Qianqian, Zhang Xiao, Xu Shuxing, Yang Xiaohui, Liu Yanshu, Li Hanzhi, Shi Zhongjie

(*Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*)

**Abstract:** Based on tree-ring width index (RWI), normalized differential vegetation index (NDVI) and climate data in the arid areas of inland Asia, spatial statistical and correlation analysis methods are used to analyze the consistency of NDVI and RWI changes, discuss the climatic response of NDVI and RWI, and reveal the related factors affecting the climate response of NDVI and RWI. The results showed that the growth of trees and vegetation in the arid areas of inland Asia showed an increasing trend in 1982–2000. Most of the NDVI and RWI in the growing season had the characteristics of synchronous changes. In most regions, NDVI in May and June was affected by the temperature of the same period, while the NDVI in April and May was mainly affected by the precipitation of the same period; RWI is mainly affected by temperature in June and July and precipitation or Palmer Drought Severity Index (PDSI) in April, June and July. The responses of NDVI and RWI to temperature are consistent in most regions, but there are great differences in their responses to precipitation or PDSI. The climatic responses of NDVI and RWI were significantly affected by altitude and hydrothermal conditions in different regions. This study has certain scientific significance for understanding the climate response and influencing factors of vegetation and tree growth in the arid areas of inland Asia.

**Key words:** tree-ring; NDVI; climatic response; influencing factors; arid areas of inland Asia