

德令哈地区树轮宽度指数与草地植被指数的关系

何吉成^{①③} 邵雪梅^{①②*}

(① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ② 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; ③ 中国科学院研究生院, 北京 100039. * 联系人, E-mail: shaoxm@igsnr.ac.cn)

摘要 利用德令哈地区五条祁连圆柏树轮宽度指数序列和 1982~2001 年逐月 NOAA/AVHRR 的标准化植被指数(NDVI)数据及气候数据, 在分析树轮指数及草地 NDVI 与气候因子关系的基础上, 探讨了祁连圆柏树轮宽度指数序列与草地 NDVI 之间的关系. 结果表明, 德令哈地区树轮宽度指数及草地 NDVI 深受 6 月份的水热状况, 尤其是降水的影响, DLH1~DLH5 五条序列与草地 6~9 各月 NDVI 有显著的相关关系, 其中与 8 月份的 NDVI 相关性最强. 五条序列的第一主成分(PC1)与草地生长季各月 NDVI 值及生长季 NDVI 均值间存在显著的线性关系, 祁连圆柏树轮指数和草地 NDVI 变化的一致性体现了德令哈地区不同类型植被对水分胁迫的一致响应. 树轮指数与草地 NDVI 间的显著相关性为研究该地区草地过去的动态变化提供了基础, 本研究利用 PC1 重建了德令哈地区草地 8 月份 NDVI 的千年变化.

关键词 德令哈 树轮宽度指数 草地 植被指数

陆地生态系统对全球气候变化的响应及影响是全球变化研究的核心问题之一. 近几十年随着对地观测技术的发展, 利用遥感数据获取植被监测和土地覆被变化的研究日益增多. 由红光和近红外两个通道反射率组合而成的标准化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, 简称NDVI)是目前较为常用的植被指数, 它对植被的生长态势和生长量非常敏感, 在全球变化研究中, 为区域及全球生态环境监测提供了丰富的、真实性极强的信息. 在中国植被变化的研究中, NDVI数据常被用来监测植被季节变化^[1,2]、反演地表植被覆盖^[3~5]、进行植被宏观分类^[6]、计算植被生物量^[7]和净初级生产力^[8~10]、指示植被对气候变化的响应^[11~13]及其反馈作用^[14]. 虽然NDVI具有区域宏观性好、反映大尺度变化能力强的优势, 但是它在时间尺度上十分有限, 时间序列仅有 20 多年, 在研究植被的长期变化上无法满足研究要求.

树轮数据具有分辨率高、样本分布广泛、时间序列长、定年准确、环境变化指示意义明确且可定量等优势, 在过去全球变化研究中发挥着重要作用^[15,16]. 树轮宽度数据提供了树木生长对气候变化响应的丰富信息, 还可以用来计算森林NPP(Net Primary Productivity)和验证其他NPP模型的运算结果^[17,18]. 如果树轮指数能够指示植被NDVI的变化, 那么长时间序列的树轮数据将成为研究植被长期变化的很好的代用资料, 弥补NDVI数据在植被长期变化研究中的不足. 有研究发现, 树轮指数与NDVI之间有较强的相

关性, 如在美国阿拉斯加发现树轮轮宽数据与NDVI有显著的正相关关系^[19], 在北方针叶林地区, 树轮最大晚材密度与森林NDVI显著相关^[20]; 西伯利亚地区的树轮宽度指数从 1980~1999 年变化趋势与该地区 1981 年到 1999 年的生长季NDVI变化趋势有显著的正相关关系^[21]; Kaufmann等^[22]发现北美和欧亚大陆中高纬地区的树轮指数与森林 6, 7 月的NDVI相关; 在美国堪萨斯州东部地区, 也发现橡树(*Quercus* spp.)树轮宽度指数与NDVI相关^[23]. 但在中国尚未进行这方面的研究尝试, 此外, 上述研究多集中在树轮指数与森林NDVI间的关系探讨上, 而树轮指数和草地NDVI间的关系的研究尚未见报道.

德令哈位于柴达木盆地的东北部, 地处中国生态环境极为脆弱的西部干旱区, 草地是其主要植被类型, 该地多云阴雨天气极少, 容易获得晴朗的草地NDVI资料, 其境内的宗务隆山上零星生长着千年树龄的祁连圆柏(*Sabina przewalskii*). 在该地, 邵雪梅等^[24,25]建立了 5 条大复本量的千年长度的祁连圆柏树轮宽度指数序列, 这为研究该地树轮指数和草地NDVI的关系奠定了基础. 本研究将利用上述 5 条序列中 1982~2001 年的宽度指数、1982~2001 年德令哈地区的草场逐月NDVI数据及气候数据, 首先分析树轮宽度指数及草地NDVI与气候因子的关系, 而后探讨树轮宽度指数与草地NDVI的变化关系. 本研究的目的及意义在于: (i) 探讨中国干旱地区的树轮宽度指数能否指示该地区草地植被NDVI变化; (ii) 为

借助树轮指数通过NDVI来重建德令哈地区草地过去的NPP提供基础; (iii)为祁连圆柏树轮宽度指数指示中国西部干旱区草地的长期变化奠定基础.

1 研究地点与数据

1.1 研究区域概况

德令哈地区位于青海湖西面, 柴达木盆地东北边缘, 气候寒冷、干旱(年平均温度 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$, 年降水量为 $150\sim 200\text{ mm}$ [26]). 该区主要土壤类型是棕钙土, 主要草场类型有寒旱草原草场、山地荒漠草场和平原荒漠草场 [27]. 寒旱草原草场以寒冷、旱生的多年生密丛禾草为主要优势种, 滩、阶、坡地紫花针茅(*Stipa purpurea*)草地是其典型代表, 紫花针茅生长比较稀疏, 株高 $20\sim 40\text{ cm}$, 覆盖度在 60% 左右. 山地荒漠草场和平原荒漠草场植被以生长稀疏、粗糙具刺的超旱生灌木、半灌木为主, 山地荒漠草场主要分布在宗务隆山一带的坡地上, 植物优势种是盐爪爪(*Kalidium foliatum*), 株高 30 cm 左右, 覆盖度可达 50% , 平原荒漠草场主要分布在砂砾戈壁, 以膜果麻黄(*Ephedra przewalskii*)为主, 株高 $30\sim 60\text{ cm}$, 覆盖度 10% 左右. 其他草场植物有白刺(*Nitraria sibirica*)、驼绒藜(*Ceratoides compacta*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)和芨芨草(*Achnatherum splendens*)等. 祁连圆柏疏林主要分布在宗务隆山海拔高度约 $3500\sim 4000\text{ m}$ 左右的最大降水带上 [26], 宗务隆山为该树种分布的最西界 [28]. 树

轮采集点及NDVI提取区域如图1所示.

1.2 研究数据与处理方法

(i) 树轮数据. 邵雪梅等 [25]在青海柴达木盆地东北缘宗务隆山和沙利克山建立了 7 条大复本量千年长度的祁连圆柏年轮宽度序列, 并基于该序列重建了德令哈地区过去千年以来的年降水量变化历史. 用于本研究的轮宽指数数据是其中采自宗务隆山的 5 条序列(DLH1~DLH5), 采样点环境、采样方法、样芯处理及轮宽指数序列的建立在邵雪梅等 [25]文中有详细介绍. 需要说明的是, 由于祁连圆柏处在干燥寒冷的生长环境中, 加上该树种本身材质坚韧致密, 挥发香气, 所以虫害很少, 在所采的树芯中也未见火灾的痕迹. 为了最大限度地利用DLH1~DLH5 这 5 条树轮宽度指数序列所反映的大尺度空间和时间变化特征, 对它们进行了主成分分析, 提取变化方向一致的第一主成分(PC1)代表该研究区树木径向生长主要变化信息, PC1 的方差贡献高达 84.0% , 表明PC1 可以较好地反映研究区的公共变化信号. 本文进行分析的是序列的 1982~2001 年时段.

(ii) NDVI 数据. 本研究使用的卫星数据为 NOAA/ AVHRR 多年逐月的 NDVI 数字影像, 来自美国地球资源观测系统(Earth Resources Observation System, EROS)数据中心的探路者数据集(Pathfinder Data Set), 空间分辨率为 $8\text{ km}\times 8\text{ km}$, 时间段为 1982 年 1 月至

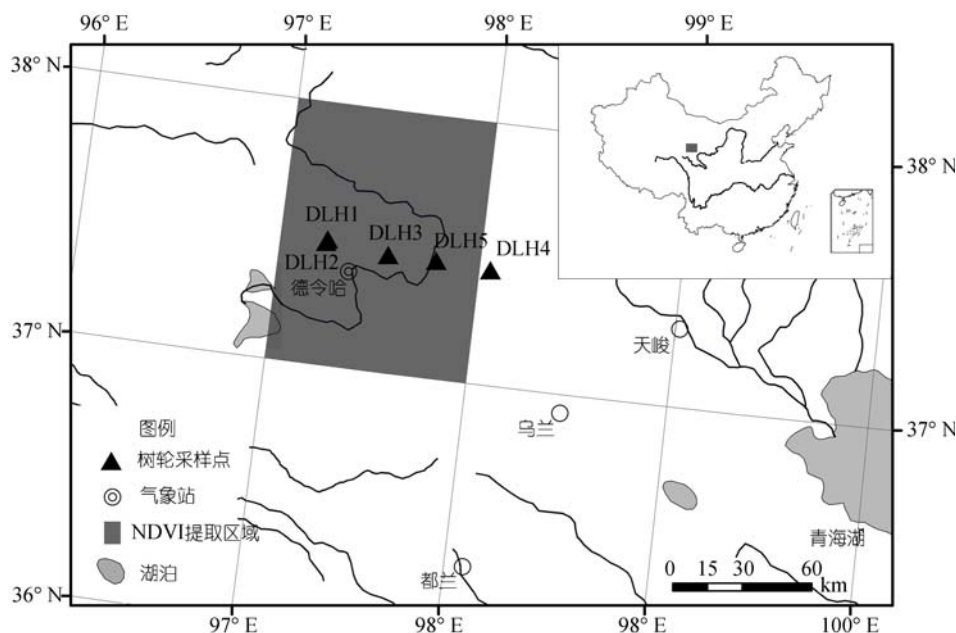


图1 树轮采样点及NDVI提取区域示意图

2001 年 9 月, 全部 NDVI 数据都经过国际通用的 MVC(最大值合成)纠正, 即图像中的每一像元用该月的最大 NDVI 值代替。所有的大气校正和质量控制等工作都在 EOS 数据中心完成, 该数据集的具体生成过程见文献[29]。NDVI 的定义为:

$$NDVI = (Ch2 - Ch1) / (Ch2 + Ch1)$$

式中, Ch1 和 Ch2 分别代表可见光通道(0.58~0.68 μm)和近红外通道(0.725~1.1 μm)的反射率。用于本研究的 NDVI 所在区域为 37°N~38°N, 97°E~98°E, 共计 308 个像元, 剔除 128 个沙漠戈壁、湖泊水体、裸露土地等非植被像元, 然后将 180 个植被像元 NDVI 值平均后得到逐年逐月 NDVI 均值序列。

(iii) 气候数据。所用气候资料来自距树轮采样点最近的德令哈气象站(37°22' N, 97°22' E, 2981.5 m), 图 2 反映了德令哈地区多年(1956~2001 年)月均温变化及年降水量在各月的分配状况。为了在时间上和 NDVI 数据统一, 本研究的分析中仅采用了德令哈气象站 1982~2001 年的气候数据, 在本文中所用的气候要素为月平均温度、月平均最高温度、月平均最低温度、月降水量、月蒸发量、月平均相对湿度和月平均水汽压。

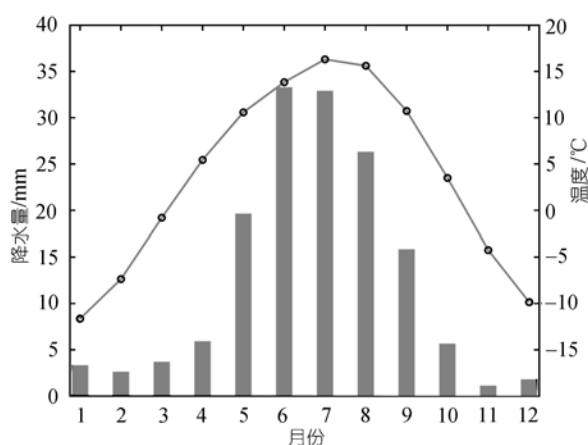


图 2 德令哈地区月平均气温和月降水量
■ 为降水, ○— 为温度

2 研究结果

2.1 德令哈地区草地逐月 NDVI 变化

青海省牧草生长季一般是 5~9 月¹⁾, 从德令哈地区草地多年平均的逐月 NDVI 变化可以看到(图 3), 1~5 月时 NDVI 值一直很低, 之后快速上升, 到了 6 月份, 其值已上升到 0.15 以上, 6 和 7 月份的 NDVI 增长

一直很快, 到 8 月份增长放缓并达到一年中的生长顶峰, 8 月份以后, NDVI 快速下降, 到 10 月份其值已跌落到 0.15 以下。NDVI 值第一次明显增大是 6 月份, 第一次剧烈下降是 9 月份, 通过草地各月 NDVI 值大小及其变化幅度可以确定 6~9 月是当地草地生长季中的青草期阶段, 6 月是草地的萌发(返青)期, 7 月是快速生长期, 包括分蘖(分枝)和拔节等生长活动, 8 月份就到了抽穗(现蕾)开花期, 9 月份属于结实和果后营养期, 10 月已到草地的枯黄期。在本文, 生长季是指 NDVI 所能反映的青草期阶段, 6~9 月份的 NDVI 是本文分析的重点。

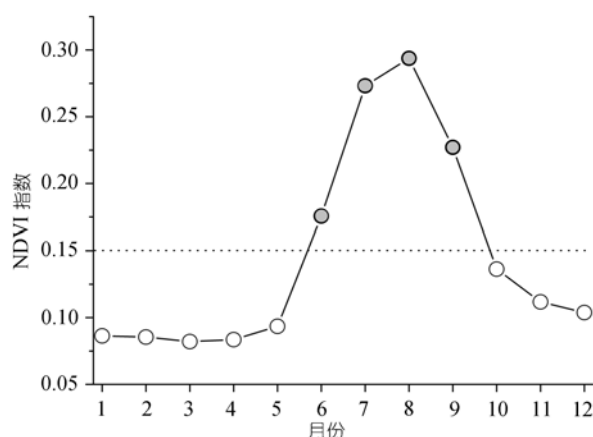
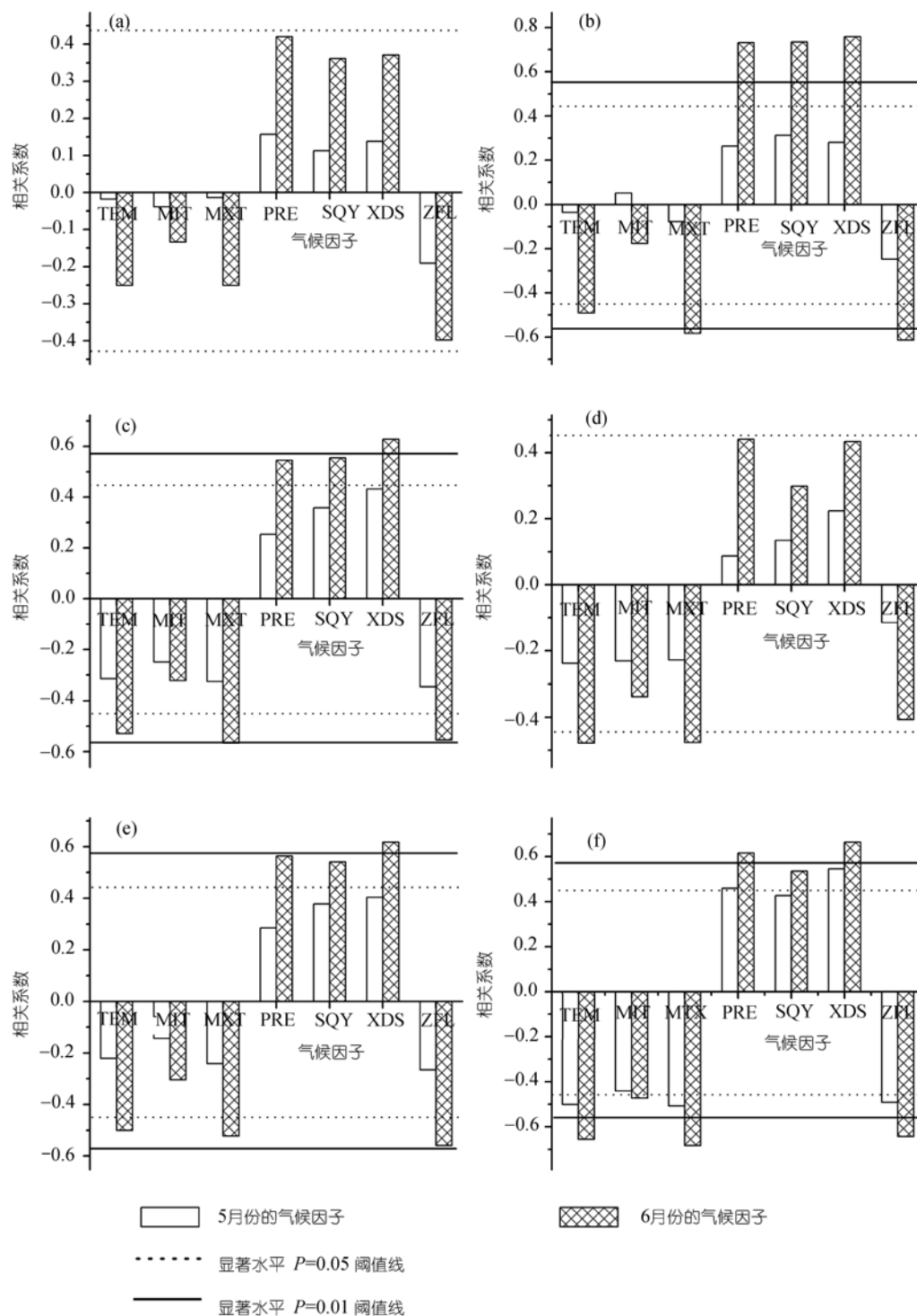


图 3 德令哈地区草地 NDVI 逐月变化

2.2 草地生长季 NDVI 及树轮宽度指数与气候因子的关系

对草地生长季各月 NDVI 及其生长季的 NDVI 均值与生长季各月的气候因子进行相关分析发现, 除 6 月份的气候因子外, 其他各月的气候因子与草地 NDVI 的相关性都很低。图 4 反映了草地 NDVI 与 5、6 月份气候因子的相关关系, 可见草地生长季 NDVI 与 5 月份的气候因子相关性较小, 与 6 月份的水热因子相关性较强, 与反映水分供应状况的气候因子如降水、相对湿度、水汽压呈正相关, 温度的升高会加强土壤水分蒸发和植物蒸腾, 导致水分的匮乏, 所以草地生长季 NDVI 就与月均温、月平均最高气温及蒸发量呈负相关。在整个草地生长季中, 各月的情况也不尽相同。6 月份是牧草的萌发(返青)期, 多年生牧草越冬后, 除依靠秋季贮藏的营养物质外, 还必须具备一定的水分、温度及光照条件, 才能萌发和返青 [30]。

1) 青海省草原总站, 青海草地资源, 1988 年



有研究表明^[31], 牧草返青期的早晚与上年度的气候, 土壤水分贮存量及牧草生长状况有关. 在牧草的返青期, 土壤水分处于低值期, 但 40~60 cm 土层是土壤水分的高值区, 土壤水分会不断向浅层输送^[32], 贮存在 40~60 cm 土层中的土壤水分可能来自返青期以前的土壤水分贮存. 如果前期土壤水分贮存较多, 返青期将会提前, 相应 6 月份的 NDVI 值会较大. 就德令哈地区而言, 牧草萌发(返青)所需的温度和光照条件容易得到满足, 但水分供应会成为萌发(返青)的关键因子, 萌发(返青)所需的水分除了当月降水能给予部分补给外, 还依赖于根系土壤中的贮存水分, 相关分析也发现, 上一年 7 月到当年 6 月的降水量与当年 6 月草地 NDVI 有显著的相关关系($r=0.494$, $P<0.03$). 由于牧草在返青期可以利用土壤贮存水, 因此 6 月份的水热条件对当月 NDVI 的影响没有对生长季其他月份 NDVI 的影响大, 相应的与 6 月份 NDVI 的相关系数也比其他月份小一些(图 4). 但到了 7 月份, 此时已进入草地的快速营养生长期, 拔节分蘖(分枝)等活动需水量大, 伴随气温升高, 土壤蒸发旺盛加之草地快速生长的蒸腾耗水, 水分供应成为草地生长限制因子, 因原有土壤贮存水分被萌发(返青)活动消耗, 此时利用的土壤水分主要靠 6 月份降水补给, 导致草地 7 月的 NDVI 与生长季中 6 月份的水热条件相关性很强, 其后 8 和 9 月份 NDVI 与 6 月份水热条件相关性逐渐减弱. 对草地而言, 尽管在不同的生长时期, 草地的生长对 6 月份的水分供应状况依赖程度不同, 但它决定了生长季里两个关键生长阶段——7、8 两月的生长状况, 因而 6 月的降水和整个生长季的 NDVI 平均值也有很好的相关关系, 从某种意义上可以说, 6 月份的降水状况基本决定了该年草地的生长形势.

通过 20 年的气候要素与祁连圆柏轮宽指数 PC1 之间的相关分析表明, 祁连圆柏的生长在主要受 6 月份气候因子影响的同时, 也受到了 5 月份气候因子的影响(图 4), 这一点与邵雪梅等^[25]用 46 年的气候数据和 7 条序列的 PC1 进行相关分析所得到的结论是相符的. 在德令哈地区, 祁连圆柏的形成层在 5 月末开始活动, 6 月初才开始形成早材细胞, 到 7 月初时, 大部分早材已经形成^[24,25]. 祁连圆柏所处生境土层较薄, 前期土壤水分贮存较少, 所以其生长主要依靠当年降水, 6 月份是

早材形成最活跃的时段, 在保证热量条件下, 水分成了祁连圆柏生长的必要条件. 虽然 6 月比 5 月的降水量已有增加, 并成为一年中降水最多的月份(图 2), 但旺盛的生长和干旱区较大的蒸腾、蒸发作用, 使得土壤水分条件往往不能满足祁连圆柏的生理要求, 这样生长季内 6 月份的降水对早材生长的限制作用更为突出. 早材宽度构成了树轮宽度的绝大部分, 所以 6 月份的水热条件直接影响到树轮宽度指数的大小.

通过上述草地 NDVI 及祁连圆柏树轮指数与气候要素的相关分析, 可以认为, 在德令哈地区, 6 月份降水状况将直接决定当年该地区树木和草地的生长状况, 我们可以借助轮宽指数和草地 NDVI 的变化来体现祁连圆柏和草地对 6 月份水分限制的响应(图 5).

2.3 德令哈地区草地生长季 NDVI 与树轮宽度指数的关系

在 DLH1~DLH5 与草地生长季(6~9 月)各月 NDVI 及生长季均值的相关关系中(表 1), 除了 5 个相关系数仅达到显著水平($P<0.05$)外, 其他相关系数均达到极显著水平($P<0.01$), 这表明五个树轮采样点祁连圆柏的年轮生长和草地 NDVI 变化有很好的一致性. 五个序列的 PC1 与生长季各月 NDVI 的相关性均很高, 其中与 8 月份 NDVI 的相关系数高达 0.79 ($P<0.0001$), 和生长季平均值的相关系数也达到 0.75 ($P<0.0003$), 故利用线性关系模式, 通过 PC1 可以反映草地 NDVI 的变化情况. 这表明在干旱的德令哈地区, 在区域尺度上, 综合多个采样点的祁连圆柏轮宽指数变化能够指示该地草地生长季 NDVI 的年际变化,

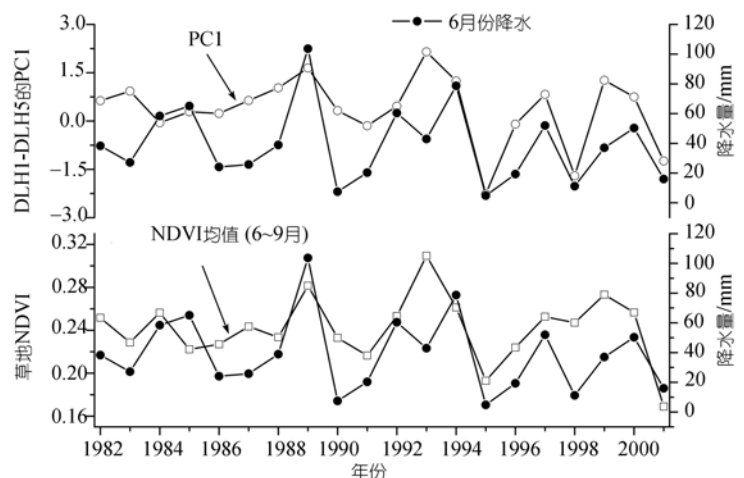


图 5 PC1 和 NDVI 均值(6~9 月)与 6 月份降水量的比较

而 NDVI 与草地叶面积指数和地上生物量有密切关系, 所以轮宽指数可以反映逐年生长季内草地的地上生物量动态, 尤其是生长季内的最大地上生物量(8 月份的生物量)和平均生物量. 鉴于草地遥感数据时间序列较短, 借助树轮数据的时间尺度长、定年准确及分辨率高的特点, 可以通过祁连圆柏轮宽指数来反演德令哈地区过去的草地逐年动态.

2.4 德令哈地区草地 NDVI 的千年变化

德令哈地区祁连圆柏树轮宽度指数与草地生长季 NDVI 和生长量达到顶峰的 8 月份 NDVI 有显著的相关关系, 我们可以利用树轮指数序列时间长的优势, 通过 DLH1~DLH5 的 PC1 来重建德令哈地区草地生长季和 8 月份的 NDVI 千年变化. 以 PC1 为自变量, 以 8 月份 NDVI 及 6~9 月份 NDVI 均值为因变量的重建方程分别为:

$$NDVI_8 = 0.2776 + 0.0198 \times PC1, \quad (1)$$
$$(r^2 = 0.63, P < 0.0001),$$

$$NDVI_{6-9} = 0.2253 + 0.0201 \times PC1, \quad (2)$$
$$(r^2 = 0.56, P < 0.001),$$

其中, $NDVI_8$ 和 $NDVI_{6-9}$ 分别为草地 8 月份 NDVI 值和生长季 NDVI 均值, PC1 为 DLH1~DLH5 的第一主成分值. 根据转换方程(1), (2), 我们重建了德令哈地区草地 NDVI 千年序列. 图 6(a)为校准时期 1982~2001 年间, 由 PC1 重建的草地 8 月份 NDVI 值与实际值的对比, 二者表现出很好的一致性. 就重建的 8 月份 NDVI 来说(图 6(b)), 千年平均值(mean)为 0.2776, 标准差(σ)为 0.0198. 本文定义草地生长较好的年份为: NDVI 大于 $mean + 1\sigma$, 生长较差的年份为: NDVI 小于 $mean - 1\sigma$. 经计算, 在 8 月份的重建序列中, 草地生长较好的

时段有 152 年, 占总年份的 15.2%; 生长较差的时段有 159 年, 占总年份的 15.9%. 从重建序列的 51 年滑动平均来看, NDVI 值高于平均值的时段有 1530~1630 年、1200~1260 年、1330~1420 年和 1840~2001 年. NDVI 值低于平均值的时段有 1420~1530 年、1640~1750 年、1090~1210 年和 1265~1330 年. 在邵雪梅重建德令哈地区千年降水变化一文中^[25], 1520~1633 年, 1207~1260 年, 1318~1428 年, 1840~1915 年和 1933~2001 年属于多降水期, 1429~1519 年, 1634~1741 年, 1097~1206 年和 1261~1317 年属于少降水期, 在本研究中草地生长较好和较差的时段与上述降水较多和较少的时段对应较好.

3 讨论

德令哈地区全年降水主要集中在 6~8 月(图 2), 这三个月的降水量占到全年降水量的 60%以上, 但草地

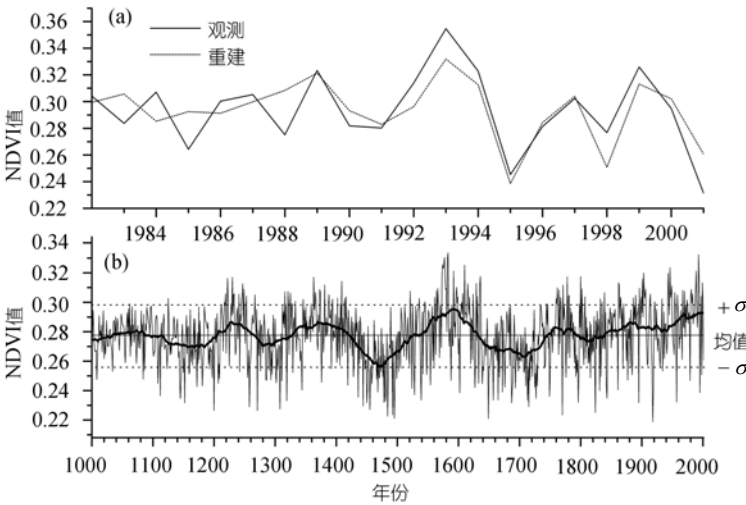


图 6 8 月份 NDVI 值重建
(a) 重建的 NDVI 值与实际值的比较; (b) 重建的德令哈地区草地 NDVI 值千年变化序列, 直线为 1002 a 平均值, 平滑曲线为 51 a 滑动平均

表 1 树轮宽度指数(DLH1~DLH5)及其 PC1 与草地 NDVI 值的相关系数

树轮指数序列	NDVI				
	6 月	7 月	8 月	9 月	生长季均值
DLH1	0.61**	0.53*	0.72**	0.66**	0.69**
DLH2	0.59**	0.71**	0.76**	0.64**	0.73**
DLH3	0.52*	0.67**	0.71**	0.60**	0.69**
DLH4	0.48*	0.49*	0.67**	0.50*	0.59**
DLH5	0.62**	0.60**	0.81**	0.69**	0.75**
PC1	0.61**	0.65**	0.79**	0.67**	0.75**

*表示 0.05 水平显著, **表示 0.01 水平显著

生长季NDVI和树轮指数与 7 和 8 月降水关系均不明显,其原因可能在于:祁连圆柏的早材部分在 7 月初已基本形成^[24],7 和 8 月份的降水可能会影响到晚材生长,而晚材宽度在树轮宽度中比例很小,导致树轮宽度指数与 7 和 8 月份的降水关系微弱;对于草地来说,7 和 8 月份生长所需的土壤水分可能主要来自 6 月份的降水补给,6 月份降水的多寡基本决定了这一年草地的生长状况,而 7,8 月份的降水对当年草地生长的影响较弱,它更多的是通过影响根系土壤中的水分贮留而对来年草地植被的萌发(返青)产生影响^[31],因此会出现草地NDVI与 7,8 月份的降水量相关性较低的现象。

在 Malmstrom 等^[19]的研究中,由纸桦(*Betula papyrifera*)和白云杉(*Picea × lutzii*)两个树种合成的树轮宽度指数与森林植被NDVI相关,在西伯利亚的 Taymir 半岛和美国阿拉斯加的 Silvertip 和 Twelve-Mile Summit 地区,只占整个森林一小部分的落叶松(*Larix gmelinii*)和北美云杉(*Picea glauca*),其最大晚材密度指数也与森林植被NDVI相关^[20]。在 Wang 等^[23]的NDVI提取区域内,橡树林仅占很小的面积,但发现橡树树轮指数与大面积上的NDVI变化有较强的相关关系。在德令哈地区,祁连圆柏零星分布在山体上,NDVI提取区域内的主要植被类型是草地,同样发现祁连圆柏的树轮宽度指数与草地NDVI有很强的相关性。综合上述研究,可以认为只要树木生长和其它植被生长受制于相同的气候因素,在没有受到其它非气候因子(如火灾、虫害等)干扰影响时,来自局地尺度上的树轮指数可以揭示与其处于相同生长气候条件下的大范围植被的NDVI变化。对于高纬度的西伯利亚和阿拉斯加研究点,温度是树木年轮形成和植被生长的主要限制因子,而对于干旱的德令哈地区来说,水分供应则是植被生长的主要约束条件,尤其是生长季初期的降水将直接决定该年树木和草地的生长状况,树轮宽窄及草地NDVI变化的一致性二者对 6 月份降水的一致响应。

在 Malmstrom 等^[19]和 D'Arrigo 等^[20](均为 9 年的 NDVI 数据:1982~1990)的研究中,树轮指数可以指示森林植被的NDVI,在 Wang 等^[23](7 年的NDVI 数据:1989~1992,1994~1996)和本研究(20 年的NDVI 数据:1982~2001)中,树轮指数则可以分别指示农田草场植被和荒漠草地植被的NDVI。相比而言,本研究的树轮指数与NDVI的关系最显著,同时,综合 5 个树轮

采样点树轮指数变化的PC1 的空间指示能力也最强。

尽管本文利用树轮指数数据对研究区植被指数进行了千年重建,但由于校准期较短,只有 20 年(1982~2001 年),校准方程的稳定性需要进一步检验。在利用重建的植被指数时,需要考虑到序列的稳定性。

4 结 论

本文利用 1982~2001 年的逐月 NDVI 数字影像,分析了德令哈地区草地逐月 NDVI 变化,确定 6~9 月为其生长季。通过比较德令哈地区祁连圆柏树轮宽度指数与草地 NDVI 的关系,发现 DLH1~DLH5 五个序列及其第一主成分与草地生长季(6~9 月)各月 NDVI 及平均 NDVI 值有显著的相关关系,多数达到极显著水平($P < 0.01$),其中与 8 月份的 NDVI 相关性最强。6 月份是德令哈地区主要降水月份,该月的降水量将直接决定当年该地区树木和草地的生长状况,树轮宽窄变化和草地生长季 NDVI 大小变化的一致性体现了德令哈地区不同植被对水分限制的一致响应。

本研究发现来自干旱区的树轮宽度指数与草地 NDVI 之间有很强的相关关系,对于干旱的德令哈地区,祁连圆柏树轮宽度指数能够指示当地草地 NDVI 的变化,长时间序列的祁连圆柏树轮宽度指数为研究该地草地的长期变化提供了新途径,从而可以弥补 NDVI 数据的不足,这对研究中国西部干旱区过去的长期生态环境变化具有重要的意义。

致谢 本工作受国家自然科学基金重点项目(批准号:40331006)和中国科学院地理科学与资源研究所创新工程(批准号: CXIOG-E01-05-02)资助。

参 考 文 献

- 1 符淙斌,温刚,周嗣松,等. 中国大陆植被变化的气象卫星遥感. 科学通报, 1992, 37(16): 1486—1488
- 2 肖乾广,陈维英,杜鹏,等. 用气象卫星对东亚季风区的生态过渡带的遥感监测研究. 植物学报, 1997, 39(9): 826—830
- 3 陈育峰. 中国土地覆被空间差异性的季相变化图式. 科学通报, 1998, 43(21): 2327—2329
- 4 徐奎奎,林朝晖,李建平,等. 利用卫星遥感资料对中国地表植被及荒漠化时空演变和分布的研究. 自然科学进展, 2001, 11(7): 699—703
- 5 方精云,朴世龙,贺金生,等. 近 20 年来中国植被活动在增强. 中国科学, C 辑, 2003, 33(6): 554—565
- 6 盛永伟,陈维英,肖乾广,等. 利用气象卫星植被指数进行中国植被的宏观分类. 科学通报, 1995, 40(1): 68—71
- 7 牛志春,倪绍祥. 青海湖环湖地区草地植被生物量遥感监测模型. 地理学报, 2003, 58(5): 695—702

- 8 肖乾广, 陈维英, 盛永伟, 等. 用 NOAA 气象卫星的 AVHRR 遥感资料估算中国的净第一性生产力. 植物学报, 1996, 38(1): 35—39
- 9 潘耀忠, 史培军, 朱文泉, 等. 中国陆地生态系统生态资产遥感定量测量. 中国科学, D 辑, 2004, 34(4): 375—384
- 10 李岩, 廖圣东, 迟国彬, 等. 基于 DEM 的中国东部南北样带森林、农田净初级生产力时空分布特征. 科学通报, 2004, 49(7): 679—685
- 11 赵茂盛, 符淙斌, 延晓冬, 等. 应用遥感数据研究中国植被生态系统与气候的关系. 地理学报, 2001, 56(3): 287—296
- 12 龚道溢, 史培军, 何学兆. 北半球春季植被 NDVI 对温度变化响应的区域差异. 地理学报, 2002, 57(5): 505—514
- 13 朴世龙, 方精云. 1982-1999 年中国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异. 地理学报, 2003, 58(1): 119—125
- 14 张井勇, 董文杰, 叶笃正, 等. 中国植被对夏季气候影响的新证据. 科学通报, 2003, 48(1): 91—95
- 15 Mann M, Bradley R S, Hughes M K. Northern hemisphere temperature during the last millennium: inferences, uncertainties and limitations. Geophysical Research Letters, 1999, 26: 759—762[DOI]
- 16 Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. Science, 2002, 295: 2250—2253[DOI]
- 17 Graumlich L J, Brubaker L B, Grier C C. Long-term trends in forest net primary productivity: Cascade mountains, Washington. Ecology, 1989, 70(2): 405—410[DOI]
- 18 Hasenauer H, Nemani R R, Schadauer K, et al. Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. Forest Ecology and Management, 1999, 122: 209—219[DOI]
- 19 Malmstrom C M, Thompson M V, Juday G, et al. Interannual variation in global-scale net primary production: testing model estimates. Global Biogeochemical Cycles, 1997, 11: 367—392[DOI]
- 20 D'Arrigo R D, Malmstrom C M, Jacoby G C, et al. Correlation between maximum latewood density of annual tree rings and NDVI based estimates of forest productivity. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21: 2329—2336[DOI]
- 21 Shishov V V, Vaganov E A, Hughes M K, et al. Spatial variation in the annual tree-ring growth in Siberia in the past century. Doklady Earth Sciences, 2002, 387A: 1088—1091
- 22 Kaufmann R K, D'Arrigo R D, Laskowski C, et al. The effect of growing season and summer greenness on northern forests. Geophysical Research Letters, 2004, 31, L09205, doi: 10.1029/2004 GL019608
- 23 Wang J, Rich P M, Price K P, et al. Relations between NDVI and tree productivity in the Central Great Plains. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25: 3127—3138[DOI]
- 24 邵雪梅, 方修琦, 刘洪滨, 等. 柴达木东缘山地千年祁连圆柏年轮定年分析. 地理学报, 2003, 58(1): 90—100
- 25 邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨, 等. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化. 中国科学, D 辑, 2004, 34(2): 145—153
- 26 杜庆, 孙世洲. 柴达木盆地地区植被及其利用. 北京: 科学出版社, 1990. 6—40
- 27 蔡照光, 黄葆宁, 郎百宁, 等. 青藏高原草场及草场主要植物图谱(青海部分). 北京: 农业出版社, 1989. 56—72
- 28 《青海森林》编委会. 青海森林. 北京: 中国林业出版社, 1993. 230—231
- 29 James M E, Kalluri S N V. The pathfinder AVHRR land data set: an improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15: 3347—3364
- 30 北京农业大学主编. 草地学. 北京: 农业出版社, 1982. 212—213
- 31 颜亮东. 青海省环湖地区天然牧草返青与气象条件的关系及其预报. 中国农业气象, 1998, 19(2): 42—45
- 32 张国胜, 徐维新, 董立新, 等. 青海省旱地土壤水分动态变化规律研究. 干旱区研究, 1999, 16(2): 36—40

(2005-12-20 收稿, 2006-03-03 接受)