

DOI: 10.5846/stxb201801250205

蒋超亮, 吴玲, 安静, 刘丹, 王绍明. 古尔班通古特沙漠旱生植物时空分布特征. 生态学报, 2019, 39(3): - .

Jiang C L, Wu L, An J, Liu D, Wang S M. Spatio-temporal distribution of xerophytes in the Gurbantunggut Desert. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): - .

古尔班通古特沙漠旱生植物时空分布特征

蒋超亮, 吴玲*, 安静, 刘丹, 王绍明

石河子大学生命科学学院, 石河子 832003

摘要: 根据 2000—2016 年 MODIS NDVI 数据提取旱生植物的时空格局, 并结合 MODIS 地表温度数据和 TRMM 降水数据, 我们分析了古尔班通古特沙漠旱生植物的空间分布和变化特征。结果表明: (1) 2000—2016 年间, 古尔班通古特沙漠旱生植物覆盖的年际波动明显, 但整体呈现缓慢上升趋势; (2) 沙漠中旱生植物覆盖空间分布具有明显的地区差异性, 位于南部靠近农田地区的覆盖最高, 中东部地区次之, 西北部最少; (3) 古尔班通古特沙漠反映旱生植物长势的 NDVI 值与温度及降水呈现正相关, 降水对 NDVI 的影响大于温度, 并且 NDVI 与温度或降水之间存在明显的滞后效应, 降水与 NDVI 之间的滞后效应更强。

关键词: 旱生植物; 归一化植被指数; 时空格局; 气候变化; 古尔班通古特沙漠

Spatio-temporal distribution of xerophytes in the Gurbantunggut Desert

JIANG Chaoliang, WU Ling*, AN Jing, LIU Dan, WANG Shaoming

College of Life Sciences, Shihezi University, Shihezi 832003, China

Abstract: The spatial distribution and variation of xerophytes in the Gurbantunggut Desert were analyzed based on the normalized difference vegetation index (NDVI) extracted from the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data from 2000 to 2016 combining MODIS surface temperature and TRMM precipitation data. The results showed that: (1) during 2000—2016, the coverage of xerophytes in the Gurbantunggut Desert fluctuated inter-annually, but steadily increased overall; (2) the spatial distribution of xerophytes in the desert showed obvious regional differences. The coverage was higher in the southern farmland area, lower in the central and eastern part, and lowest in the northwestern part; (3) the NDVI values reflecting the growth of xerophytes in the Gurbantunggut Desert was positively correlated with temperature and precipitation, and the effect of precipitation was greater than that of temperature. An obvious hysteresis effect existed between the NDVI value and temperature or precipitation, and was stronger between the NDVI value and precipitation.

Key Words: xerophyte; normalized difference vegetation index; temporal and spatial pattern; climate change; Gurbantunggut Desert

由于受外界生态因素的影响, 植物逐渐演化出适应生长环境的各种各样的形态和结构^[1]。近年来, 研究表明沙生植物不仅能够耐受干旱, 还能耐受“营养”缺失, 这也是这类植物能在生存条件极其严峻的沙漠地区生存的关键原因^[2]。另外, 沙漠地区的很多木本植物, 由于长期适应干旱, 多成灌木丛, 在沙漠生长也具有很多优越性。许多生长在盐碱地的盐生植物, 或旱—盐生植物, 由于生理上缺水, 也同样显出一般旱生的结构。

基金项目: 国家青年科学基金项目 (31300406); 新疆生产建设兵团社会发展科技攻关与成果转化计划项目 (2015AD023)

收稿日期: 2018-01-25; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lingw@shzu.edu.cn

旱生植物的研究涉及形态解剖学、生理学、生态学及分析生物学等诸多领域。Fahn^[3]研究发现沙漠中的藜科植物茎周围的异常维管束韧皮部具有水分疏导功能,以用来适应干旱环境。Jay^[4], Sandquist^[5], Pyankov^[6]也对旱生植物如何适应干旱环境及如何提高环境的适应能力进行了研究。我国关于植物抗旱性研究始于 20 世纪 60 年代。虽然起步较晚,但研究处于学科的前列。陈庆诚^[7]等研究了疏勒河荒漠植物的形态解剖学特征与环境的关系,开创了我国旱生植物形态解剖学研究之先河。王勋陵^[8],魏良民^[9],周智彬^[10]等探讨旱生植物生态适应的多样性。此外,李三相^[11],鲁艳^[12],包秀霞^[13]等不少学者基于“Na⁺”、“Ni²⁺”等对旱生植物抗旱性或种子萌发进行研究并将研究中存在的问题及研究进展做了综述,为今后耐旱植物抗旱机理的研究提供参考资料。但是他们的研究并没有说明一个地区旱生植物的时空分布动态变化,也不能对抗旱性研究成果野外验证。

有关古尔班通古特沙漠植物的研究,大部分是采取野外调查和实地监测的方法对植物种群、分布和发育等方面进行探讨,资料范围有限、时间序列短。只有李杨^[14],段呈^[15]等少数学者利用长时间序列遥感数据从区域尺度上对古尔班通古特沙漠植物或短命植物的时空变化进行研究。但是前人对古尔班通古特沙漠旱生植物时空分布的研究更是少之又少。因此,有必要对古尔班通古特沙漠旱生植物宏观尺度下时空格局进行研究。

本研究拟使用长时间序列遥感数据从区域尺度上对古尔班通古特沙漠旱生植物的时空变化进行研究,探讨旱生植物的时空变化情况及空间分布格局;准确了解该地区旱生植物信息可为干旱地区荒漠化程度及未来变化趋势提供基础的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

古尔班通古特沙漠地处半封闭的准噶尔盆地(44°11′—46°20′N, 84°31′—90°00′E;图 1),面积 5.113×10^4 km²,整个沙漠面积的 95%为固定、半固定风沙土,地貌类型以沙垄及树枝状沙垄为主,高度 10—50 m,是我国最大的固定与半固定沙漠^[16]。沙漠区深居我国内陆、远离海洋,四周高山环绕,为典型的温带干旱荒漠气候。沙漠腹地年降水量约为 70—120 mm,年潜在蒸发量 2000 mm 以上,地下水埋藏多在 30 m 以上。植物生长不能利用地下水,主要依靠降水。整个沙漠中沙生和旱生植物种类丰富、生活型多样^[17]。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 MODIS NDVI 数据

本研究使用的 MODIS NDVI 数据来源于 NASA 的 LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) 工作组处理发布的 MOD13Q1 (<https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products>) 产品,轨道号 h23v04, h24v04, 时间分辨率 16 d,空间分辨率 250 m,时间跨度从 2000 年到 2016 年。该数据为定标、畸变校正之后的数据,还需对数据进行提取、镶嵌、投影转换等处理。此流程由 NASA 免费提供的 MRT (MODIS Reprojection Tool) 软件完成,把 HDF 格式转换为 TIFF 格式,并将投影转换成 WGS84 地理坐标下的 Geographic Lat/Lon,同时完成图像的拼接和重采样。

1.2.2 气候数据

古尔班通古特沙漠面积广阔,沙漠中缺乏气象站观测数据,传统的气象站观测资料具有较强的局限性,很难获得满意的地表温度空间分布信息。遥感具有快速、经济、宏观和周期性等地观测特点,对获取连续的、

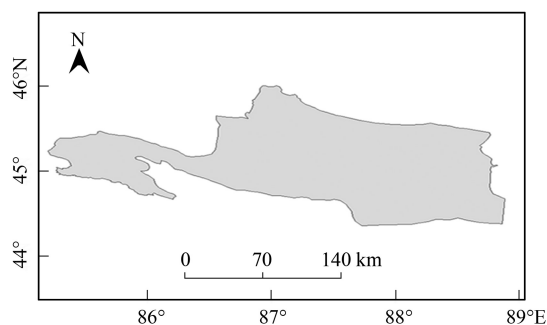


图 1 研究区示意图

Fig.1 Map of the study area

区域的地表温度信息和空间分布状况具有明显的优势,是目前获取大区域地表温度空间分布信息最有效的方法^[18]。本文采用温度数据为 MODIS 地表温度产品 (MOD11A2), 每幅产品周期 8 d, 空间分辨率 1000 m, 以 31、32 波段分裂窗算法的 LST (Land surface temperature) 遥感反演处理的基础上对各月资料进行加权平均法合成。同时,选取乌鲁木齐、奇点、富蕴、精河、和布克赛尔、克拉玛依、乌兰乌苏等 7 个气象站的 2016 年内月时间序列实际 LST 数据与 MOD11A2 数据在“点”的尺度上进行验证。

降水数据采用 TRMM 3B43 V7 月降水量产品来自于美国 NASA 网站 (<http://www.nasa.gov/>), 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间跨度从 2000 年到 2016 年。使用 ENVI/IDL5.3 工具将降水速率 (mm/h) 从 HDF 文件中提取, 生成月降水量栅格数据, 经过矢量裁剪得到古尔班通古特沙漠地区数据, 并转换投影为 WGS84 地理坐标下的地理经纬度 (Geographic Lat/Lon)。运用逐步回归分析及 BF 神经网络方法, 建立沙漠地区降水订正模型, 并利用 2013—2016 年沙漠周边七个气象站点 (同上) 月降水量进行检验。

1.3 研究方法

本文采用 MODIS 温度数据、TRMM 降水数据对旱生植物时空分布展开研究, 具体地, 采用逐步回归分析与 BF 神经网络统计分析方法, 以 2000—2016 年旱生植物 NDVI 时间序列为因变量, 温度数据和降水数据作为自变量, 分别进行回归分析, 从而得到逐年、逐月相关分析图。并选取古尔班通古特沙漠横、纵两个方向的 0—50 cm 土壤含水量平均值进行土壤含水量空间变化趋势分析。

2 结果与分析

2.1 古尔班通古特沙漠旱生植物物候特性及空间分布特征

古尔班通古特沙漠处于中亚荒漠与亚洲中部沙漠之间的过渡, 气候具有典型的温带内陆荒漠性质。植物生长期间, 水分供应明显不足, 只有那些能容忍极端干旱的植物才能获得生存, 干旱性是该沙漠绝大多数植物最显著的基本特征。沙漠中植被覆盖较好, 且沙丘表面常有生物结皮现象, 增加了表面的粗糙度, 有助于降低近地面的风沙活动强度^[19]。有不少学者研究表明, 古尔班通古特沙漠短命植物独特的时空分布规律对该地区沙漠环境的改善和沙面稳定具有重大意义^[15, 20-21]。但是, 短命植物每年 3 月下旬开始萌动直至 6 月绝大多数短命植物结束生长, 完成生活史。短命植物对于早春至初夏的古尔班通古特沙漠防风固沙具有较大价值。对于酷热的夏季与多沙尘天气的秋季来说, 旱生植物的存在极具价值。

据野外实地观测, 及查阅《新疆植物志》和《新疆植被及其利用》等书籍所得^[22], 沙漠内部半固定沙丘沙垄上分布白梭梭 (*Haloxylon persicum*)、沙蒿 (*Artemisia arenaria*) 形成的荒漠, 窝状沙丘多分布沙拐枣—白梭梭荒漠; 沙漠南缘较高沙丘上分布的旱生植物有白梭梭 (*Haloxylon persicum*)、二穗麻黄 (*Ephedra distachya*)、沙苔 (*Carex physodes*) 等, 较低沙丘及丘间薄沙地上多覆盖有梭梭柴 (*Haloxylon ammodendron*); 沙漠北缘主要分布有白杆沙拐枣 (*Calligonum leucocladium*)、地白蒿 (*Artemisia terrae-albae*)、二穗麻黄 (*Ephedra distachya*)、沙苔 (*Carex physodes*) 所形成的群落, 一些薄沙地上会有片状分布的优若藜 (*Eurotia ceratoides*) 群落; 沙漠东缘半流动沙丘主要分布的旱生植物是沙拐枣丛。其中, 梭梭柴 (*Haloxylon ammdoendorn*) 和白梭梭 (*Haloxylon persicum*) 荒漠, 分布广、面积大, 几乎占据整个大沙漠, 是该沙漠最具特色的景观植被。

2.2 旱生植物物候期内 NDVI 值提取及分析

从早春到初夏土壤水分较充足时, 古尔班通古特沙漠中大多数旱生植物萌芽、伸枝、开花, 夏季几乎停止生长, 直至秋季子房膨大结果, 11 月后进入冬季休眠期。而短命植物、多年生短命植物生长发育时间短暂, 只在春末夏初两个月时间内完成当年的生长发育, 夏季干旱来临前提前进入休眠期。沙漠中的旱生植物层片存在时间跨度更大的、易于与短命植物区别的一个明显的物候季相变化。但为更准确的反应沙漠中旱生植物 NDVI 值的变化, 排除周边绿洲—荒漠过渡带以及西部低值区域的干扰, 我们根据旱生植物的物候特性, 选取相关时间节点 (6—10 月), 并在沙漠中部地区划分出来一个东西长 150 km, 南北宽 100 km 的沙漠中 NDVI 值统计区域。

从图 2 可以看出。沙漠中旱生植物从 4 月份到 7 月份 NDVI 值有缓慢的增长,然后在 7 月后 NDVI 值持续的下降。其中,夏季(6—8 月)古尔班通古特沙漠气温、降水达到一年中的峰值,最大 NDVI 值在峰值附近,植被覆盖较好。

从图 3 可以看出,古尔班通古特沙漠地区,温度、降水与 NDVI 之间总体呈现正相关,且降水对植物的影响要大于温度。通过月相关性分析发现,该沙漠区域气温和降水与 NDVI 之间存在极其显著的相关性,并且 NDVI 值与温度和降水之间存在明显的滞后效应,降水与 NDVI 之间的滞后效应更强。

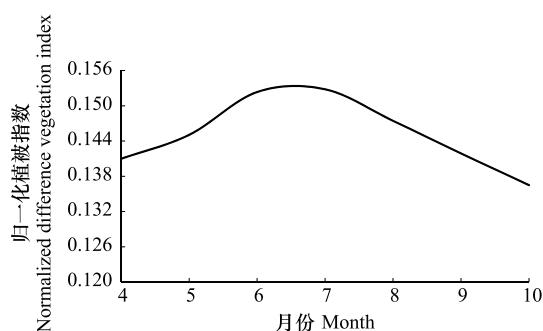


图 2 多年 4—10 月的 NDVI 平均值

Fig.2 Multi-year average NDVI from April to October

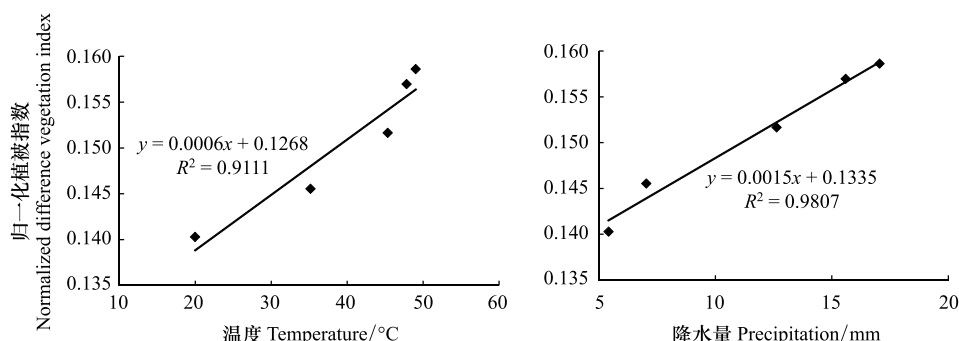


图 3 古尔班通古特沙漠旱生植物 NDVI 值与温度和降水相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of the NDVI of xerophytes in the Gurbantunggut Desert with temperature and precipitation

从年际变化情况来看,由图 4 可知,2000—2016 年古尔班通古特沙漠地区旱生植物覆盖呈现较为缓慢的增长趋势。其中,NDVI 最大值为 2016 年的 0.193,最小值为 2015 年的 0.135。相比上一年 NDVI 变化较大的年份为 2012 年和 2016 年,相对变化率分别为-16.62%和 30.23%;各年增长率变化统计分析后发现,相比上一年古尔班通古特沙漠地区旱生植物 NDVI 增长率为正的年份共有 9 年,增长率为负的年份共有 7 年。总之,从年际变化和增长率分布来看,古尔班通古特沙漠地区 NDVI 值在不断增加,旱生植物覆盖情况也不断改善。

根据图 5 的 NDVI 数据反映来看,旱生植物在整个古尔班通古特沙漠分布最高的区域是沙漠南缘,此区域靠近农耕区,水热条件相对较好,为旱生植物的生长提供了更有利的条件,中东部地区次之,西北部最少。

2.3 旱生植物时空分布气候因素影响分析

由图 6 可以看出,除 2001 年和 2015 年古尔班通古特沙漠旱生植物 NDVI 值与温度呈现负相关关系及 2004 年和 2008 年无显著相关性外,其余年份 NDVI 值与温度均为正相关关系,且 2003 年和 2013 年正相关性最为显著($P < 0.01$, $r = 0.973$; $P < 0.01$, $r = 0.972$)。同理,由图 7 可得,除 2000 年古尔班通古特沙漠旱生植物 NDVI 值与降水的关系为负相关及 2004 年、2005 年和 2015 年无显著相关性外,其余年份 NDVI 值与温度均为正相关关系,且 2000 年和 2013 年正相关性最为显著($P < 0.05$, $r = 0.958$; $P < 0.05$, $r = 0.922$)。

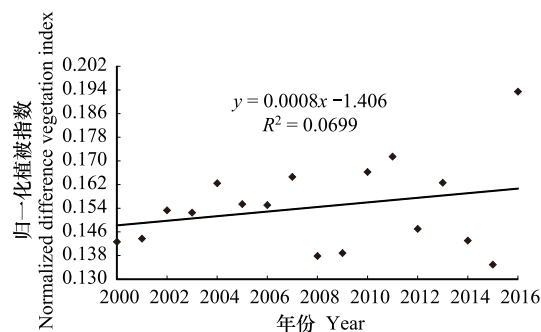


图 4 2000—2016 年古尔班通古特沙漠旱生植物 NDVI 变化趋势

Fig.4 Variation of annual NDVI of xerophytes in the Gurbantunggut Desert from 2000 to 2016

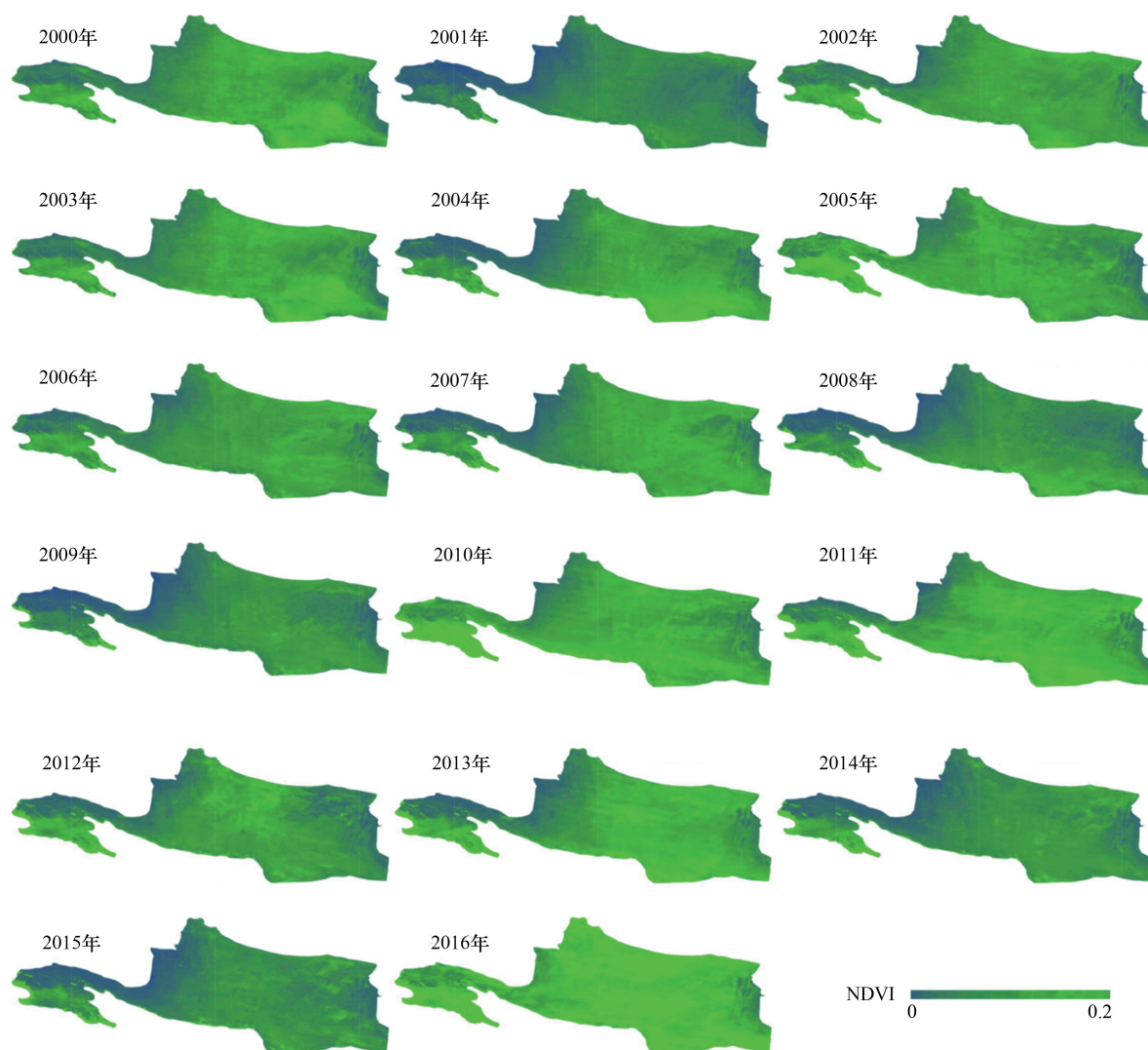


图5 2000—2016 年古尔班通古特沙漠旱生植物时空分布格局

Fig.5 The spatio-temporal distribution of xerophytes in the Gurbantungut Desert from 2000 to 2016

以 2015 年为例, NDVI 值与温度呈显著负相关关系, 与降水无显著关系, 致使 2015 年古尔班通古特沙漠旱生植物 NDVI 出现 2000 年之后的最低值。由此可知沙漠地区适宜的温度和充足的降水, 有利于旱生植物的生长, 持续的极高温胁迫反而会抑制植物的生长。

此外, 由于受到地形、地貌、人类活动等影响, 古尔班通古特沙漠土壤含水量存在明显的空间分布差异, 选取了沙漠横纵两个方向 0—50 cm 土壤含水量平均值作为空间变化趋势分析。如图 8 所示, 自西向东和自南向北两个方向, 土壤含水量均呈现下降趋势, 这是由于两个方向均由绿洲边缘向沙漠延伸。其中, 从西到东, 土壤含水量先上升后下降, 这是因为沙漠中西部油田区域的人工绿洲导致周围土壤含水量增加; 自南向北方向, 土壤含水量空间变化幅度较大, 最大值出现在沙漠南缘绿洲, 然后逐渐下降, 这种变化规律符合降水从南缘绿洲开始逐渐向沙漠中部过渡减少的地理空间分布规律。土壤含水量的空间差异性, 也受到局部区域因素的干扰, 该研究区干扰因素大致可以分为三类典型代表区域, 即沙漠—绿洲过渡带、沙漠腹地、人工干扰区(油气开采区)。由图 9 可以看出, 沙漠—绿洲过渡带土壤的含水量最高, 沙漠腹地次之, 人工干扰区域最低。在人工干扰区域, 土壤表层受到频繁的人类活动干扰且基本无植被覆盖, 该地区浅层土壤含水量受蒸发而减少, 但深层含水量则因隔绝大部分的蒸发得到储存; 在沙漠腹地, 由于缺乏地表径流, 沙地水分主要通过降水

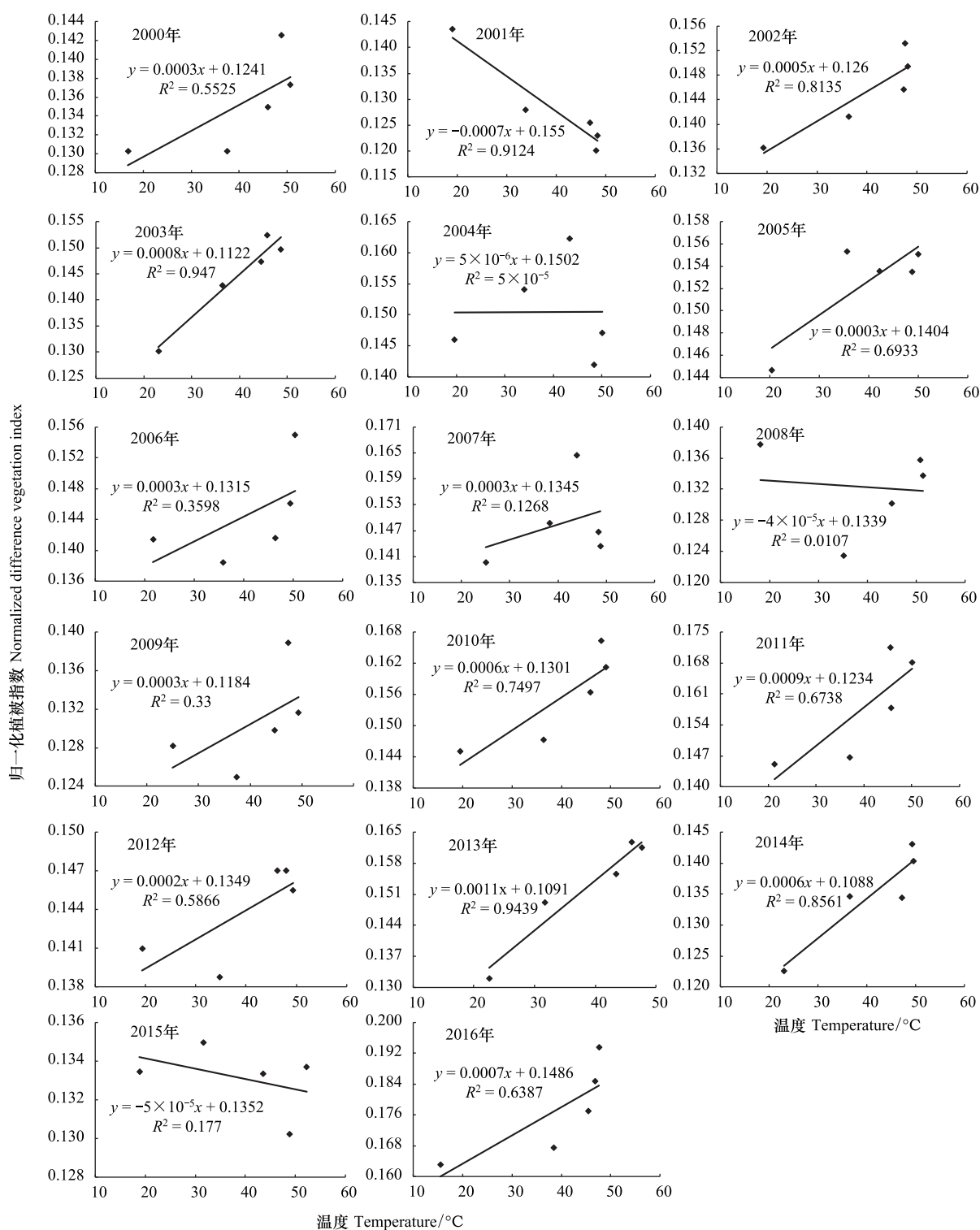


图6 2000—2016年古尔班通古特沙漠旱生植物NDVI值与温度的关系

Fig.6 Relationship between NDVI value and temperature of xerophytes in the Gurbantunggut Desert from 2000 to 2016

补给,仅能渗入表层并未深入底部;在沙漠—绿洲过渡带,植被覆盖较高,减少了表层水分蒸发,且受人类灌溉等活动的影响,导致含水量较高。

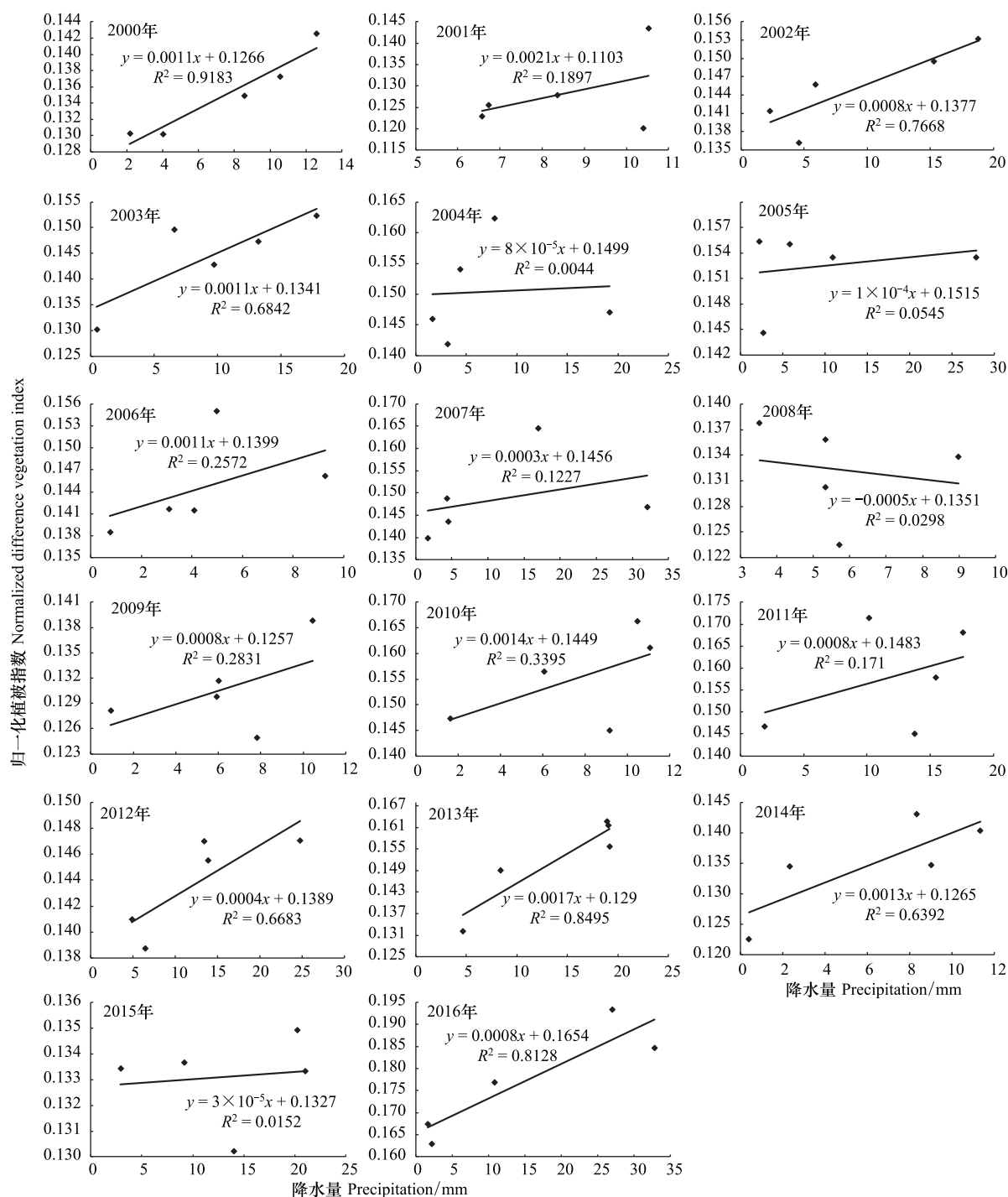


图7 2000—2016年古尔班通古特沙漠旱生植物NDVI值与降水的关系

Fig.7 Relationship between NDVI value and precipitation of xerophytes in the Gurbantunggut Desert from 2000 to 2016

3 讨论

3.1 古尔班通古特沙漠旱生植物层片特征及物候特性

由于调查范围及时间的限制,本文在调查中并未找到沙漠中的所有旱生植物,但根据张立运^[19]、刘彤^[23]等对古尔班通古特沙漠或沙漠南缘植物多样性野外调查研究,旱生植物物种丰富度较高。白梭梭群落是其典型代表,成为古尔班通古特沙漠最具景观意义和代表性的植物群落类型。此外,就旱生植物层片特征及物候

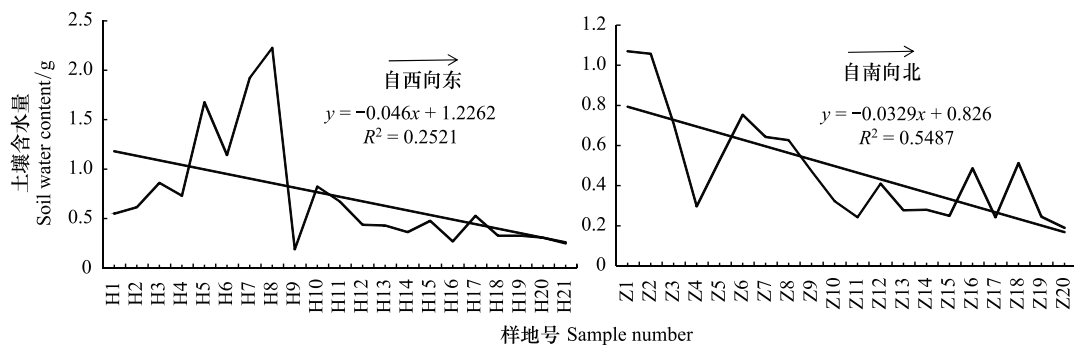


图8 0—50 cm 土壤含水量横向、纵向变化

Fig.8 Lateral and longitudinal changes of soil water content in 0—50 cm

“H”为“横”首字母,H1—H21为横向采样点,自西向东,所跨经度为85°15′—88°22′E;“Z”为“纵”首字母,Z1—Z20为纵向采样点,自南向北,所跨纬度为44°18′—45°25′N

特性而言,旱生植物最大覆盖度在7月左右,随后呈现显著下降。

3.2 旱生植物物候期内 NDVI 值提取及时空分析

根据旱生植物层片物候特征,本研究对2000—2016年的遥感影像中反映旱生植物长势的NDVI进行提取和空间分析。沙漠内部由于地表缺乏径流致使旱生植物的生长所需要的水分只能依靠大气降水补给,所以覆盖程度相对较低,而靠近绿洲—沙漠的过渡地带水分条件相对较好,旱生植物覆盖更高。尤其,沙漠南缘靠近农耕区表现最为明显。

3.3 气候变化对旱生植物时空变化的影响

为进一步研究温度和降水对旱生植物盖度、密度等的影响,本文采用偏相关分析的方法分析温度和降水对古尔班通古特沙漠旱生植物的影响。其中,NDVI值与温度呈现显著正相关关系,但持续的极高温胁迫会抑制植物的生长发育。该区域的旱生植物层片与温度的关系为春季的发芽、开花主要取决于气温的高低和日照的时长,果实生长期的积温影响果实或种子的成熟,秋季树叶的凋落由气温下降所致。另外,有研究表明,从年际尺度看,降水对古尔班通古特沙漠植物或旱生植物NDVI的年际变化影响较大^[24],这与本研究结果一致,降水丰沛的年份旱生植物生长茂盛,反之旱生植物生长缓慢、稀少。

4 结论

本文基于2000—2016年MODIS NDVI数据,并结合MODIS地表温度数据和TRMM降水数据,揭示古尔班通古特沙漠旱生植物的空间分布和变化特征,并对气候变化对旱生植物的影响进行分析,结论如下。

(1) 古尔班通古特沙漠旱生植物整体呈现出物种丰富、组成简单、覆盖度低的特点。2000—2016年间,古尔班通古特沙漠旱生植物覆盖在年际上波动明显,但整体呈现缓慢上升趋势。

(2) 古尔班通古特沙漠旱生植物覆盖具有明显的地区差异性。从空间分布来看,覆盖最高的区域位于南部靠近农田地区,中东部地区次之,西北部最少。这一分布规律与野外调查旱生植物时空分布状况基本一致。

(3) 古尔班通古特沙漠旱生植物分布与温度、降水总体呈现正相关,且降水对植物的影响要大于温度,并且NDVI值与温度和降水之间存在明显的滞后效应,降水与NDVI之间的滞后效应更强。但持续的极高温胁迫反而会抑制植物的生长。

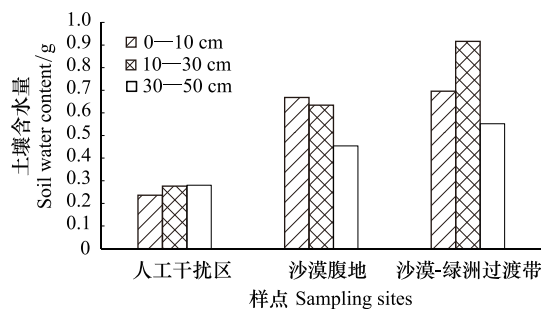


图9 研究区不同区域土壤含水量变化

Fig.9 Change of soil water content in different regions of the study area

(4) 植被覆盖变化缓慢而复杂, 需要从不同时空尺度进行长期监测研究。该研究中应用 MODIS NDVI 数据空间分辨率为 250 m, 时间跨度为 17 a, 在研究区内能够较为精确地反映旱生植物覆盖的发展变化过程。然而, 植被覆盖受地形、气候等自然条件和农田扩张^[25]、资源开发^[26]、工程建设^[27-28] 等高强度的人类活动综合作用。因此, 今后还需通过分析旱生植物与土壤含水量的关系、不同气候条件、人为干扰条件下旱生植物的种群动态、分布格局变化揭示旱生植物的种群发展趋势及对环境变化的响应机制。

参考文献 (References):

- [1] 李正理. 旱生植物的形态和结构. 生物学通报, 1981, (4): 9-12.
- [2] 刘家琼, 蒲锦春, 刘新民. 我国沙漠中部地区主要不同生态类型植物的水分关系和旱生结构比较研究. 植物学报, 1987, 29(6): 662-673.
- [3] Fahn A, Shchori Y. The organization of the secondary conducting tissue in species of the Chenopodiaceae. Phytomorphology, 1967, 17: 147-154.
- [4] Anderson J E. Factors controlling transpiration and photosynthesis in *Tamarax chinensis* Lour. Ecology, 1982, 63(1): 46-50.
- [5] Sandquist D R, Ehleringer J R. Intra specific variation of drought adaptation in brittlebush; leaf pubescence and timing of leaf loss vary with rainfall. Oecologia, 1998, 113(2): 162-169.
- [6] Pyankov V I, Gunin P D, Tsoog S, Black C C. C₄ plants in the vegetation of Mongolia; their natural occurrence and geographical distribution in relation to climate. Oecologia, 2000, 123(1): 15-31.
- [7] 陈庆诚, 孙仰文, 张国樑. 疏勒河中下游植物群落优势种生态—结构特性的初步研究. 兰州大学学报, 1961(2): 61-69.
- [8] 王勋陵, 马骥. 从旱生植物叶结构探讨其生态适应的多样性. 生态学报, 1999, 19(6): 787-792.
- [9] 魏良民. 几种旱生植物碳水化合物和蛋白质变化的研究. 干旱区研究, 1991, 8(4): 38-41.
- [10] 周智彬, 李培军. 我国旱生植物的形态解剖学研究. 干旱区研究, 2002, 19(2): 35-40.
- [11] 李三相. Na⁺与多聚旱生植物霸王抗旱性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [12] 鲁艳, 何明珠, 马全林, 赵昕, 苏延桂. 镍胁迫对 7 种旱生植物种子萌发及幼苗生长的影响. 种子, 2009, 28(6): 26-29, 33-33.
- [13] 包秀霞, 廉勇, 包秀平. 旱生植物抗旱机制研究进展. 北方农业学报, 2016, 44(6): 104-108.
- [14] 李杨, 刘艳, 张璞, 尹育红. 古尔班通古特沙漠 NDVI 时空变化特征. 干旱区研究, 2009, 26(5): 686-693.
- [15] 段呈, 吴玲, 王绍明, 贺凌云. 近 30 年古尔班通古特沙漠短命植物的时空格局. 生态学报, 2017, 37(8): 2642-2652.
- [16] 钟德才. 中国现代沙漠动态变化及其发展趋势. 地球科学进展, 1999, 14(3): 229-234.
- [17] Qian Y B, Wu Z N, Zhang L Y, Shi Q D, Jiang J, Tang L S. Impact of habitat heterogeneity on plant community pattern in Gurbantunggut Desert. Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(4): 447-455.
- [18] 李琴, 陈曦, 包安明, 王金林, Veroustraete F, Dong Q H. 干旱/半干旱区 MODIS 地表温度反演与验证研究. 遥感技术与应用, 2008, 23(6): 643-647.
- [19] 张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点. 生态学报, 2002, 22(11): 1923-1932.
- [20] 陈昌笃. 北疆古尔班通古特沙漠的植被特征及其边缘地区的沙化问题//白含熙. 荒漠沙漠化综合整治国际学术讨论会论文集. 广州: 人与生物圈国家委员会, 1984: 70-72.
- [21] 王雪芹, 蒋进, 雷加强, 张伟民, 钱亦兵. 古尔班通古特沙漠短命植物分布及其沙面稳定意义. 地理学报, 2003, 58(4): 598-605.
- [22] 中国科学院新疆综合考察队, 中国科学院植物研究所. 新疆植被及其利用. 北京: 科学出版社, 1978.
- [23] 张荣, 刘彤. 古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类. 生态学报, 2012, 32(19): 6056-6066.
- [24] 唐金, 李霞, 牛婷. 古尔班通古特沙漠南缘近 10 年 NDVI 变化趋势与气象因子的关系. 水土保持通报, 2011, 31(6): 171-174.
- [25] 黄婷, 杜清运, 邹金秋. 新疆农业景观格局演变对其生态系统服务价值的影响. 地理信息世界, 2017, 24(2): 26-31.
- [26] 厉良, 邵旭升, 王才川, 徐敏. 准噶尔盆地古尔班通古特沙漠地区油田的土地复垦研究. 安徽农业科学, 2013, 41(6): 2695-2697.
- [27] 王雪芹, 蒋进, 雷加强, 徐新文, 钱亦兵, 潘存文. 古尔班通古特沙漠重大工程扰动地表稳定性与恢复研究. 资源科学, 2006, 28(5): 190-195.
- [28] 钱亦兵, 张立运, 吴兆宁. 工程行为对古尔班通古特沙漠植被的破损及恢复. 干旱区研究, 2001, 18(4): 47-51.