

DOI: 10.5846/stxb201911262562

刘超, 闫小月, 姜逢清. 天山北坡前山带降水分布型对荒漠植被的影响——基于逐日降水数据和 NDVI 分析. 生态学报, 2020, 40(21): 7790-7804.
Liu C, Yan X Y, Jiang F Q. Influence of precipitation distribution on desert vegetation of Northern Piedmont, Tianshan Mountains—analysis based on daily NDVI and precipitation data. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7790-7804.

天山北坡前山带降水分布型对荒漠植被的影响 ——基于逐日降水数据和 NDVI 分析

刘 超^{1,2,3}, 闫小月^{1,2,3}, 姜逢清^{1,3,*}

1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

摘要:降水分布型对荒漠植被的影响规律的揭示是理解全球气候变化下干旱区地表植被覆盖变化过程的基础。基于新疆天山北坡前山带 1999—2014 年生长季 MODIS 1B 逐日遥感资料和 7 个气象站点降水观测数据, 运用 GIS 软件提取出气象站点周围荒漠植被的归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 值, 利用相关分析、决策树判识分析等方法, 系统分析天山北坡前山带生长季荒漠植被 NDVI 在不同量级降水和降水型下的时空变化及其持续性等特征, 并探究两者的相关程度。研究表明: 生长季 NDVI 在不同时间、空间尺度上对降水存在一定规律的响应特征。从时间尺度来看, NDVI 对降水的响应延迟现象随时间越来越不明显, 两者相关性先增后减, 在生长季中期相关性最强; 空间尺度上, 各区域差异较大, NDVI 对降水的响应快慢与研究区各地的降水量大小明显相关。不同地区的年内 NDVI 变化趋势也不相同, 18 天以上的干期长度影响显著。无论研究区域中任一地区年均降水量大小, 都一致表现出在生长季期间降水较多的时期, 植被覆盖普遍出现为基本不变或轻微改善的趋势, 相反在降水较少的时期, 植被覆盖普遍出现轻微退化或基本不变 (趋势斜率为负的极小值) 的趋势。未来可以通过计算体现某地区植被覆盖变化趋势的值, 来判断这一时期该地区大气的干湿程度。另外不同量级降水和降水分布型对 NDVI 变化影响明显, 在生长季早、中期, 降水量在 6.1—12.0 mm 时对荒漠植被的生长最为有利, NDVI 增长幅度在 0.15 以上, 并且对生长季早、中期植被生长最佳的降水分布型分别为 B 型降水 (指连续两天出现降水且第一天的降水量大于第二天的降水量) 和 A 型降水 (指连续两天出现降水, 第一天的降水量小于第二天的降水量)。揭示 NDVI 对降水的响应规律, 可为干旱区、半干旱区合理生产灌溉、节约用水、生态恢复与重建等提供理论依据。

关键词: NDVI; 降水; 相关分析; 响应变化; 天山北坡前山带

Influence of precipitation distribution on desert vegetation of Northern Piedmont, Tianshan Mountains: analysis based on daily NDVI and precipitation data

LIU Chao^{1,2,3}, YAN Xiaoyue^{1,2,3}, JIANG Fengqing^{1,3,*}

1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

Abstract: Revealing the influence characteristics of precipitation distribution on desert vegetation is helpful for understanding the process of vegetation cover change in arid area under the background of global climate change. Spatio-temporal pattern of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and its possible relations to precipitation in the northern piedmonts of the Tianshan Mountains were analyzed based on MODIS 1B data and daily precipitation data in

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171378)

收稿日期: 2019-11-26; 网络出版日期: 2020-09-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangfq@ms.xjb.ac.cn

1999—2014 from 7 meteorological stations. The results show that there are regular characteristics in the NDVI responding to precipitation at different time and spatial scales in the growing season. The lags of NDVI responding to precipitation become less and less obvious over time. The correlation between daily precipitation and NDVI increases firstly, then decreases, and reaches the maximum value in the medium term of the growing season. Lag of NDVI is clearly related to the precipitation of the region. The annual NDVI of each region is also different. When dry length is over 18 days, the significant effect on NDVI can be found. Overall, whether the annual precipitation in the study region is large or small, the vegetation all brings out essentially unchanged or slight improvement tendency during periods of heavy precipitation in growing season. Conversely, it all brings out degradation tendency or essentially unchanged (the slope of the trend is a negative relative minimum) during periods of little precipitation. Therefore, it can be estimated by the exploration of vegetation changes how dry and wet of atmosphere. Furthermore, precipitation and distribution type have obvious influence on NDVI. Precipitation of 6.1—12.0 mm is the most favorable condition for the growth of desert vegetation, and it can increase NDVI by more than 0.15. B type (referring to two consecutive days of precipitation, and precipitation on the first day more than next day) and A type (referring to two consecutive days of precipitation, and precipitation on the first day less than next day) respectively are the best distribution types of rainfall in the early and middle of the growing season. Exploration of the response pattern of NDVI to precipitation can not only offer a scientific basis for rational irrigation and water conservation, but it can also provide important theoretical guidance for restoration of damaged ecosystem in northern piedmonts of the Tianshan Mountains.

Key Words: NDVI; precipitation; correlation analysis; responding change; Northern piedmonts of the Tianshan Mountains

降水是影响干旱区植被分布的主要气候因子^[1]。荒漠植被作为干旱区最具代表性的植被类型,生长所需用水主要来源之一是天然降水。因此,荒漠植被的生长状况在一定程度上能够很好地反映当地降水情况,可以作为干旱区干湿现状的“晴雨表”。干旱区荒漠植被对降水变化的响应过程研究是理解全球降水格局变化下干旱区地表植被覆盖变化的必要基础性工作,在区域应对降水变化导致的旱涝灾害、牧草与农作物减产等危害上具有重要意义。

天山是贯穿新疆东西的宏伟山系,为新疆南北疆两个自然区的天然分界线。高耸的山体阻挡西来气流,使北坡的降水明显多于南坡。在山脉和盆地的交界处,尤其是天山北坡前山带发育有狭长的荒漠植被带。这一植被带由于单纯依靠天然降水而生存,因而对降水的变化极为敏感。有关天山区域植被对降水的响应问题,国内学者已做过一些研究,如 Chen 等^[2]研究发现天山北坡山区和平原的降水量普遍呈现上升趋势,因而该地区总体植被指数在增长;高军等^[3]指出天山北坡不同区域的植被净初级生产能力与温度和降水都相关,但不同区域的相关性不同;尼加提·伊米尔等^[4]对天山北坡地区 2000—2015 年间的植被覆盖变化趋势进行分析,指出天山北坡生长季的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)与降水量和气温的年际变化规律;Sun 等^[5]研究了 1981—2009 年新疆天山北部地区气候—植被的相互作用关系,指出研究区内降水是植被变化的重要驱动力,除天山北坡外植被和降水变化趋势基本一致,植被对降水的反馈效应在不同的地区存在差异;Liu 等^[6]分析了天山山脉 2001—2013 年 NDVI 的空间格局,发现在此期间天山山脉 NDVI 空间分布特征存在显著差异,NDVI 在春季呈下降趋势,夏季呈上升趋势,气温、降水、土壤水分等主要因子都对植被变化产生了显著影响;王桂钢等^[7]通过分析天山地区气候参数对草地季节变化影响的滞后性特征,指出当旬降水和之前一个月(0—3 旬)降水累积量对于草地长势的影响最大;李杨等^[8]分析了 2002—2007 年天山北坡生长季逐月 NDVI 变化的区域分异规律,得出绿洲与荒漠过渡带降水偏相关性强,主要以降水影响为主;徐丽萍等^[9]通过对天山北坡 NDVI 动态变化与气温、降水变化的响应特征及敏感性进行分析,发现当月 NDVI 与前月气温呈负相关,与前月降水存在极显著正相关,NDVI 对降水的敏感性较高;刘艳等^[10]对天山地区影响 NDVI 变化的主要水热因子进行了量化分析,指出该地区草地生态系统受气候环境因子的影响程度很

大;赵玲^[11]通过研究天山山区 MODIS 植被指数与气候因子的关系,指出气候因子对不同草地类型影响的差异。对以上少量研究的梳理可见,以往研究中在考虑影响因子时均未排除人为影响因素(如灌溉等),并且集中于探究区域植被覆盖年际、月际时空变化格局及与气候因子之间的关系,而对区域植被与其主导降水因子关系的研究尚不深入。此外,比较特定时期(如年、生长季、月等)的降水观测值可知,天山北坡前山带降水不仅具有数量上的时空异质性,而且在降水分布(型)上也存在差异,表现出很强的随机性。不同量级降水和不同的降水分布型显然都会对依赖天然降水为生的荒漠植被产生影响,而以往对此的研究还明显缺乏。为弥补以上研究不足,本文采用 1999—2014 年生长季(4—10 月)的逐日 NDVI 数据和降水数据,分析新疆天山北坡前山带生长季荒漠植被 NDVI 对降水的时滞响应特征,探讨不同量级降水和降水分布型对 NDVI 的影响。重点研究该类植被对不同量级降水和降水型的响应不仅有助于理解全球气候变化对于干旱区植被的影响过程,研究结果也可于干旱区植被覆盖变化趋势的预测提供新思路,为全球气候变化大背景下干旱区农牧业生产灌溉、生态恢复与重建、荒漠化治理提供一定的科学依据。

1 研究区域与数据源

1.1 研究区域

天山北坡前山带位于天山山脉与准噶尔盆地的过渡地带(图 1),海拔较低(约 500—1500 m)、地域狭长,与天山山脉之间或直接接触或有洼地阻隔^[12]。行政区划上包括科克达拉、博尔塔拉蒙古自治州、克拉玛依、石河子、昌吉、乌鲁木齐、奇台及巴里坤等地区。受天山山脉的阻挡作用,该地带降水较多,发育有典型的荒漠草原植被,为传统的春秋牧草地。该地带依靠天然降水维系的牧业发展基础薄弱,并且还不时受到干旱、风沙、虫鼠害等的威胁,对气候变化十分敏感。因此该地区是研究荒漠植被对气候变化响应的理想之地。

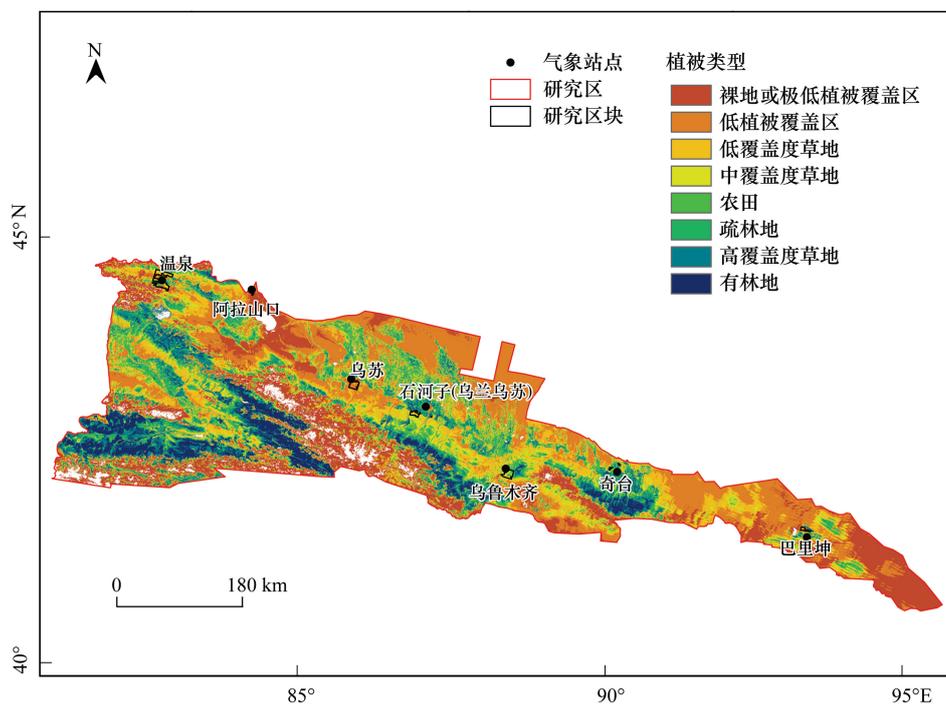


图 1 研究区地理位置、植被类型及气象站点

Fig.1 The location of study area and its vegetation types, meteorological stations

1.2 数据来源及处理

遥感卫星影像能够有效反映出整个区域空间和时间尺度上的连续变化信息,采用遥感卫星不同波段反射

值计算的 NDVI 已被广泛用于直观表现植被覆盖变化^[13-14]。故本文也采用此指数分析天山北坡前山带荒漠植被覆盖的变化。文中利用的遥感卫星数据为 1999—2014 年新疆区域 MODIS 1B 反射率原始数据 (MOD02QKM), 数据来源于 NASA 网站 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 时间范围为每年 4 月 1 日至 10 月 31 日, 共 214×16 景影像, 空间分辨率为 250 m×250 m。前期主要工作是利用每日的反射率数据提取 NDVI 指数, 为此先进行了几何校正、格式和投影转换、大气校正以及图像拼接等一系列预处理, 预处理后进行波段计算得到了每日 NDVI 初步数据。由于厚云遮蔽、地物复杂等原因, 需要对 NDVI 进行属性裁剪, 去除非 NDVI 数据。降水数据源于国家气象中心提供的新疆地区气象测站 1999—2014 年逐日降水数据。地形数据采用来自于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>) 的 DEM 数字高程数据产品 SRTMDEMUTM, 分辨率为 90 m。

为了保证数据的连续性, 在所有位于天山北坡的 12 个国家基本站中剔除了位于天山北坡的部分数据不完整的气象站, 只保留日气象数据连续的气象站, 因此, 本研究只针对温泉、阿拉山口、乌苏、石河子、乌鲁木齐、奇台、巴里坤七个气象站点开展研究。为达到数据的有效使用, 本文根据前人的相关研究经验^[15-18], 在时空尺度分析上分别以站点为中心, 在 NDVI 遥感图上取站点周围 24 km×24 km 范围中的格点且植被类型为荒漠草地的 NDVI 平均值作为与该气象站点对应的 NDVI 值, 其中将该区域历年的土地利用遥感监测图 (来自中国科学院环境科学数据中心 <http://www.resdc.cn/>) 与气象站点图进行叠加, 确定出各气象站点及周围对应的荒漠植被范围, 并且为避免其他因素的干扰, 通过谷歌卫星地图的帮助和现场考察, 在 NDVI 影像图上有效去除林地、人工植被、湖泊河流等常年水分有保障的区域, 最大程度体现降水这一单一变量对 NDVI 变化产生的影响。通过比较生长季时期 (4—10 月) 降水与 NDVI 的日变化, 将所研究站点的降水数据做成逐年日降水数据图, 并根据 NDVI 平均值的差异, 将生长季划分成三个阶段: 早期 (91—120)、中期 (121—280)、晚期 (281—304), 括号中的数字为距 12 月 31 日的天数。

2 研究方法

2.1 相关分析

采用相关系数来表征两个因子之间的相关程度。为分析降水与 NDVI 的关系及其影响的滞后性, 运用 SPSS 软件计算降水与及时、滞后 1 天和滞后 2 天 NDVI 的相关系数, 并且进行显著性检验, 比较相关性^[19-22]。

2.2 决策树判识分析法

决策树算法是数据挖掘中重要的分类方法, 根节点、分支以及叶节点是决策树的必要组成部分, 每个内部节点表示在一个属性上的检测, 每个分支代表一个检测的输出, 每个树的叶节点代表一个类或者类分布^[23]。其中, C4.5 算法是大数据决策树算法中广泛使用的一种分类模型方法, 是根据信息熵的理论基础方法递归构建决策树的, 其计算简易、数据处理效率高且生成的决策树易于被理解, 在大数据条件判别中被广泛使用^[24]。正因为决策树判识分析法的上述特性, 因此本文采用该方法在明确判识因子后建立判识分析模型, 对降水导致出现的 NDVI 变化进行判识分析并且通过概率统计最终得到不同降水型对应的 NDVI 变化型。

C4.5 算法的原理基础: 设 S 为包含 s 个数据样本的数据集, $C_i (i = 1, 2, 3 \dots m)$ 为样本的 m 个分类, s_i 是属于类 c_i 的样本数量。样本的信息量计算如下:

$$I(s_1, s_2, \dots, s_m) = - \sum_{i=1}^m \frac{s_i}{s} \log_2 \left(\frac{s_i}{s} \right) \quad (1)$$

利用属性 A 将数据集 S 进行划分 $\{S_1, S_2, \dots, S_\omega\}$ (设属性 A 有 ω 个不同的值), 信息熵计算公式为:

$$E(A, S) = - \sum_{j=1}^{\omega} \frac{s_{1j} + s_{2j} + \dots + s_{mj}}{s} I(s_{1j}, \dots, s_{mj}) \quad (2)$$

从而得到属性 A 的信息增益为:

$$G(A, S) = I(s_1, s_2, \dots, s_m) - E(A, S) \quad (3)$$

然后算出信息增益率,再根据信息增益率的大小递归选择每个节点的影响因子。本文无需取舍影响因子,因此不计算信息增益率。

2.3 趋势分析法

对 NDVI 在 16 年间时空尺度上的变化趋势及变化幅度的研究,本文采用较为成熟的一元线性趋势分析法,基于像元尺度对 NDVI 变化趋势进行拟合,综合每个像元时间变化特征及区域空间变化,以反映出该区域在全球气候变化背景下 NDVI 的长期时空格局演变^[25]。与差分法、极差法等相比,一元线性趋势分析法不仅考虑端点值,能够结合每日 NDVI 的影响,并且可以消除研究时段内偶发性异常因素对植被长势的影响,更真实地反映长时间序列植被覆盖的演化趋势^[25-29]。一元线性趋势线斜率的计算公式如下。

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{j=1}^n j \times \text{NDVI}_j - \sum_{j=1}^n j \sum_{j=1}^n \text{NDVI}_j}{n \times \sum_{j=1}^n j^2 - \left(\sum_{j=1}^n j\right)^2} \quad (4)$$

式中, n 为研究数据的时间长度; NDVI_j 为第 j 天的 NDVI 均值; θ_{slope} 为像元回归方程趋势线斜率,若 $\theta_{\text{slope}} > 0$, 研究时段内 NDVI 变化趋势增加,反之,则呈减少趋势^[30]。为了更好地从整体上判断研究区荒漠植被覆盖的动态变化趋势,根据 θ_{slope} 值的大小,可定义 7 个 NDVI 趋势变化等级^[31-32]:严重退化($\theta_{\text{slope}} < -0.009$)、中度退化($-0.009 \leq \theta_{\text{slope}} < -0.0045$)、轻微退化($-0.0045 \leq \theta_{\text{slope}} < -0.001$)、基本不变($-0.001 \leq \theta_{\text{slope}} < 0.001$)、轻微改善($0.001 \leq \theta_{\text{slope}} < 0.0045$)、中度改善($0.0045 \leq \theta_{\text{slope}} < 0.009$)以及明显改善($\theta_{\text{slope}} \geq 0.009$)。

3 研究结果与分析

3.1 NDVI 对降水滞后响应特征

3.1.1 时间尺度上的特征

天山北坡前山带主要分布无叶或短叶假木贼、角果藜、伊犁绢蒿、鳞茎早熟禾等草本植物,根系相对较浅,对水分反应敏感。由于不同的植物及其不同生长阶段对降水量存在明显地时间响应差异,这在 NDVI 指数上会表现出及时、滞后增大或减小的现象。为探究荒漠植被整体对降水时间响应的时滞特征,并出于简明性考虑,本文将 NDVI 对降水的时间响应界定为三种,即及时、滞后 1 天和滞后 2 天。为了分析不同量级降水对天山北坡前山带荒漠植被 NDVI 的影响,需要对日降水量的量级进行划分。实际发现中国降雨量级划分标准定得偏高,在研究区不适用。由此本文沿用肖开提·多莱特在 2004 年提出来的新疆降水量级新标准^[33],这一标准结合了中国降水量级标准,又根据新疆的实际情况,增加了划分等级。按此标准,24 小时内降水量在 0.0—0.2 mm、0.3—6.0 mm、4.5—9.0 mm、6.1—12.0 mm、9.1—18.0 mm 的分别是微雨、小雨、小到中雨、中雨、中到大雨。表 1 统计了由不同单日降水量引起的 NDVI 变化及时、滞后 1 天或 2 天各自出现的频数(研究区域降水主要集中在生长季早中期,生长季晚期降水稀少);表 2 示出了生长季早期、中期、晚期降水与及时、滞后 1 天或 2 天 NDVI 的相关系数。

由表 1 和表 2 可知:在生长季早期,NDVI 对降水的响应时间滞后一天的频率最高,为 64.82%,与降水的相关系数为 0.670;其次是及时响应的频率为 31.15%,与降水的相关系数为 0.760;滞后 2 天的频率最低为 4.03%,与降水的相关系数为 0.690,这说明在生长季早期荒漠植被对降水的响应大概率上会延迟 1 天,并且表现为降水量级越大,这种规律越明显。在生长季中期,NDVI 及时响应的频率总体上略大于增长滞后一天的频率,它们分别是 51.29% 和 43.11%,与降水的相关系数分别是 0.778 和 0.783,滞后 2 天的频率最低为 5.60%,相关系数为 0.783,说明在生长季中期,即植被生长最旺盛时期,荒漠植被对降水响应以及时性为主,植被生长对降水比较敏感。但当降水量超过 12.0 mm 时,NDVI 滞后一天响应的概率增大,这很大程度上可能是由于降水量超过一定量时,过量的降水会通过影响土壤通气性而在某种程度上抑制荒漠草类的生长。由表 2 还可知,生长季早期的荒漠植被 NDVI 与降水的相关系数在 0.7 左右,相对于生长季中期整体较小。在生长季晚期,降水稀少,但存在很明显的规律性,即 NDVI 及时响应的频率最大,为 86.61%,与降水的相关系数是

0.637, 响应滞后现象出现的频率很小, 与降水的相关性为 0.511, 这表明在生长季晚期荒漠植被对降水极度敏感, 这一时期的降水对植被的影响最直接。

表 1 不同单日降水量引起的 NDVI 变化及时、滞后 1 天或 2 天各自出现的频数

Table 1 The frequency of NDVI changes caused by different daily precipitation occurring in time or delayed by 1 or 2 days respectively

时滞/d Time lag	降水量级 Precipitation levels/mm	早期 Early stage (91—120)				中期 Medium stage (121—280)				晚期 Late stage (281—304)		
		4.5—9.0		9.1—18.0		4.5—9.0		9.1—18.0		4.5—9.0		
		<0.2	0.3—6.0	6.1—12.0	12.1—25.0	<0.2	0.3—6.0	6.1—12.0	12.1—25.0	<0.2	0.3—6.0	6.1—12.0
0			9		66			424		43		44
		113	187	75	19	198	1381	131	39	38	18	41
1			196		140			207		17		1
		36	373	224	187	201	1120	56	93	3	12	0
2			16		0			24		0		0
		0	51	0	0	0	191	0	0	0	0	0

(1) 共统计了 4787 个降水日, 其中属于早期的有 1265 个, 属于中期的有 3410 个, 属于晚期的有 112 个; (2) 对表 1 的分析出现的频率是由表中列出的对应的频数(或频数和)除以对应生长季时期的统计总数得到的; 64.82% 由 $(36+373+224+187)/1265 \times 100\%$ 计算得到, 31.15% 由 $(113+187+75+19)/1265 \times 100\%$ 计算得到, 4.03% 由 $(0+51+0+0)/1265 \times 100\%$ 计算得到, 51.29% 由 $(198+1381+131+39)/3410 \times 100\%$ 计算得到, 43.11% 由 $(201+1120+56+93)/3410 \times 100\%$ 计算得到, 5.60% 是由 $(0+191+0+0)/3410 \times 100\%$ 计算得到, 86.61% 是由 $(38+18+41)/112 \times 100\%$ 计算得到

表 2 荒漠植被 16 年生长季日平均 NDVI 变化与降水的相关系数

Table 2 The correlation coefficient between the daily average NDVI change and precipitation in the 16 years growing season of desert vegetation

生长季阶段 Growing season stage	及时响应 Prompt response	滞后 1 天 Delay 1 day	滞后 2 天 Delay 2 days
早期 Early stage	0.760	0.670	0.690
中期 Medium stage	0.778	0.783	0.783
晚期 Late stage	0.637	0.511	/

及时、滞后 1 天、滞后 2 天的样本数分别为 2240、2305、242; 相关分析结果全部显著 ($P < 0.05$)

以上结果和分析表明, 在整个生长季(4—10 月), 虽然荒漠植被生长的主要影响因素是降水, 但不同时期植被对降水的响应程度存在较大差异。在早期(4 月), 荒漠植被对降水的敏感度(植被对降水响应的时滞)最小, 表现为 NDVI 对降水的反应延迟性最大, 相关性较弱。从数据分析结果来看, 日降水在 6.0 mm 以内, 植被对降水的反应快。在中期(5—10 月初), 植被对降水的敏感度大幅提高, 这一时期植被对降水的延迟性明显下降, 两者的相关性也最强, 因此在这段时间水分对荒漠植被的生长起到了显著的促进作用。从降水量来看, 日降水在 6.1—12.0 mm 时, 对植被生长的促进作用最为明显, 降水量小于 6.0 mm 表现为降水不足, 植被生长迟缓, 降水量大于 12.0 mm 时植被生长对降水的响应也表现为迟缓。在生长季晚期(10 月), 虽然植被对降水的敏感度达到最大, 延迟性最差, 但与降水的相关性却下降到最低, 这与荒漠植被处于生长末期、生长力不足有关, 因此在这一时期 NDVI 与降水量大小无明显关系。

3.1.2 空间尺度上的特征

在空间尺度上本文主要分析 16 年间年均降水量不同的区域, 荒漠植被生长对降水响应的差异。利用研究区内的 12 个国家气象站的逐日降水数据得到各测站的年平均降水量值, 然后利用 ArcGIS 工具对站点年平均降水量进行 Kriging 空间插值, 通过数据掩膜, 获取研究区年降水量的栅格图像^[34](图 2)。

从图 2 中可以看出各个站点的年均降水量存在明显差异, 年降水量最大出现在天山北坡前山带中段(乌鲁木齐、石河子地区), 年降水量在 300 mm 左右, 天山北坡前山带西段(温泉)、中段东部(奇台)和天山北坡前山带东段(巴里坤地区)年降水量较少, 在 200 mm 左右, 天山北坡前山带中段中北部(乌苏、阿拉山口地区)年降水量最少, 在 150 mm 左右。年降水量的多少反映了该地区的干湿程度, 其对荒漠植被的生长必然产生影响。

本研究通过比较分析总结出不同地区在各自降水情况下 NDVI 变化的差异(表 3), 反映出降水对 NDVI

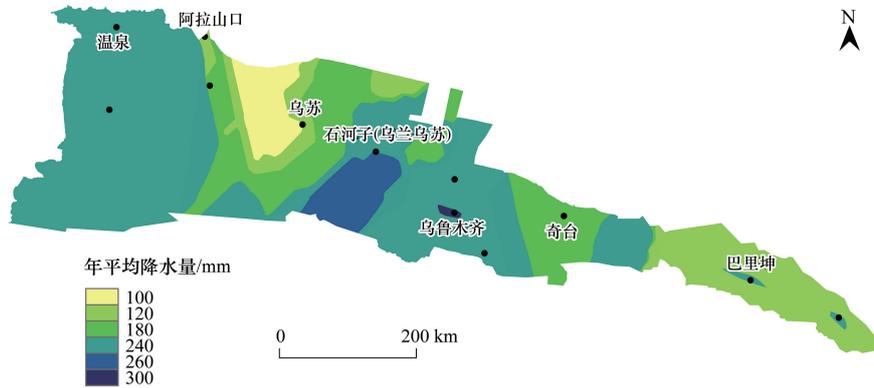


图2 研究区域年均降水量的分布图

Fig.2 The average annual precipitation distribution map of the study area

影响的空间差异。如表3所示,研究发现乌鲁木齐、石河子地区的荒漠植被对降水的响应是基本一致的,在生长季早期主要表现为滞后1天,两地出现这一滞后特征的频率分别为84.96%和81.65%,而及时响应小概率出现(15.04%和18.35%);在生长季中期,两地出现滞后1天的频率还是最大,但分别减小为53.23%和56.44%,及时响应的频率分别增大到37.38%和40.08%;在晚期两地出现滞后1天与及时响应的频率大致相等,无滞后2天的现象。对于年降水量在200mm左右的地区,地处前山带西段的温泉区域和地处前山带东段的巴里坤地区年均降水量都为240mm,在生长季早期和中期,两地区荒漠植被对降水的及时响应和滞后1天响应出现的频率都基本相等,温泉地区早期两者的频率分别是48.41%和50.00%,中期两者为44.48%和42.91%,巴里坤地区早期(52.53%和47.47%),中期(44.38%和47.19%);在生长季晚期两地以及及时响应为主。而地处前山带中段东部的奇台地区年均降水量在180mm左右,在生长季早期荒漠植被对降水的响应大概率表现为滞后1天,频率在95%以上,在中期及时响应的频率增大为59.26%,滞后1天的频率相应减小为40.74%,在晚期滞后1天的频率又占主导作用。对年降水量在150mm左右的地区,如乌苏(年降水量160mm),这一区域在生长季早期出现及时响应的频率(40.40%)略大于滞后1天的频率(32.32%),并存在较大频率的滞后2天的现象(27.27%),在中期滞后1天的频率最大为49.67%,其次是及时响应为48.16%,在晚期还是以及时响应为主;阿拉山口地区降水较少(120mm),在生长季早期和晚期荒漠植被对降水的响应与乌苏地区表现一致,但在中期以及及时响应为主,频率增大到73.16%。

表3 不同地区降水引起的NDVI变化及时、滞后1天或2天各自出现的频数

Table 3 The frequency of NDVI changes caused by precipitation in different regions occurring in time or delayed by 1 or 2 days respectively

生长季阶段 Growing season stage	时滞/d Time lag	阿拉山口	温泉	乌苏	乌鲁木齐	石河子	奇台	巴里坤
早期 Early stage	0	52/44.44%	122/48.41%	40/40.40%	34/15.04%	40/18.35%	2/1.29%	104/52.53%
	1	45/38.46%	126/50.00%	32/32.32%	192/84.96%	178/81.65%	153/98.71%	94/47.47%
	2	20/17.09%	4/1.59%	27/27.27%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%
中期 Medium stage	0	616/73.16%	254/44.48%	222/48.16%	191/37.38%	196/40.08%	128/59.26%	142/44.38%
	1	209/24.82%	245/42.91%	229/49.67%	272/53.23%	276/56.44%	88/40.74%	151/47.19%
	2	17/2.02%	72/12.61%	10/2.17%	48/9.39%	17/3.48%	0/0%	27/8.44%
晚期 Late stage	0	24/92.31%	31/100%	12/100%	8/57.14%	3/60.00%	1/25.00%	18/90.00%
	1	2/7.69%	0/0%	0/0%	6/42.86%	2/40.00%	3/75.00%	2/10.00%
	2	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%

表中/前为频数,/后为对应的频率

从上述分析来看,天山北坡前山带中段降水充沛,虽然在生长季降水对植被起到主导作用,但滞后现象出现的频率较大,说明这一地区的逐日降水量一定程度上超过了荒漠植被的水分需求量,导致植被生长受一次或两次降水的影响不明显。前山带西段和东段降水较为充沛,荒漠植被的及时响应与滞后响应基本持平,说明该区域的逐日降水量可能恰好使荒漠植被的水分需求量达到饱和。天山北坡前山带中段东部和中部降水适中,且在生长季早期降水较为集中,故在早期滞后响应明显,但在生长季中期荒漠植被的及时响应完全超过滞后响应,这说明这一区域中期的降水量比较有利于植被的生长。对于前山带中段北部的阿拉山口,植被对降水的及时响应最为显著,说明该区域的降水量对植被的生长起到了明显主导作用。

3.2 干期长度与 NDVI 长期动态变化趋势

3.2.1 NDVI 动态变化趋势

为了对 NDVI 在长时间尺度上的趋势有明确的认识,本文采用一元线性趋势分析法对 NDVI 长期变化趋势进行分析,首先分析 16 年间每年生长季早中晚期植被覆盖的变化趋势,比较每年不同时期植被覆盖的改善退化程度,从而得出某一地区每年降水时间分布和降水量差异的影响,反之它也可以反映出历年大气的干旱程度。结果发现 θ_{slope} 位于 -0.0026 和 0.0063 之间,天山北坡前山带各区域的荒漠植被覆盖情况的变化趋势并不一致(图 3)。从图 3 中可以得出,在每年的生长季早期,阿拉山口、温泉、巴里坤地区 2005 年之前出现植被轻微退化的频率较大,在 2005 年之后植被覆盖基本是保持不变或轻微改善;乌苏、乌鲁木齐、石河子(乌兰乌苏)地区在 2010 年之前植被覆盖基本是保持不变或轻微改善,在 2010 年之后植被覆盖出现轻微退化的现象;而对于奇台地区,除 2004 年、2011 年出现轻微退化现象外,在其他年份的生长季早期植被覆盖表现为保持不变或轻微改善。

在每年的生长季中期,所有地区的植被覆盖都表现为基本不变,但在变化趋势上也存在差异,最为明显的是在 2009 年温泉、乌苏、乌鲁木齐、奇台地区的 θ_{slope} 都是比较大的负值,而其他年份所有地区以正值为主。在每年的生长季晚期,最为明显的特征是在 2000—2002 年间所有地区的植被覆盖趋于改善,在 2003—2010 年间阿拉山口、温泉、乌苏地区植被覆盖以轻微退化为主,其他地区为基本不变,而在 2011—2012 年所有地区的植被覆盖以基本不变为主,2013—2014 年所有地区的植被覆盖又以轻微退化为主。

从上述结果分析来看,虽然不同地区每年的 NDVI 变化趋势都存在较大差异,但通过结合各地区每年降水数据发现,对整个研究区域来说,无论其中任一地区年均降水量是多是少,都表现出在生长季期间降水较多的时期,植被覆盖普遍出现为基本不变或轻微改善的趋势,相反在降水较少的时期,植被覆盖普遍出现轻微退化或基本不变的趋势。如乌鲁木齐地区年均降水量在 300 mm 以上,属于降水较充沛区域,在 2002 年年降水量达到 340 mm,但由于降水分布严重不平衡,生长季早期降水集中,植被覆盖变化趋势为轻微改善,在生长季中期降水较少,并且连续无雨日较多,植被覆盖变化趋势是基本不变但 θ_{slope} 为负的极小值,在晚期降水很少,植被覆盖变化趋势为轻微退化;阿拉山口地区年均降水量在 120 mm 以下,属于降水较稀少地区,在 2000 年年降水量为 75 mm,降水分布同样不平衡,在生长季早期降水几乎为 0,其植被覆盖变化趋势表现为轻微退化,在生长季中期降水增加但降水量较少,植被覆盖变化趋势同样表现为基本不变且 θ_{slope} 为负的极小值,在晚期降水集中且充沛,植被覆盖变化趋势为轻微改善。因此,我们可以反过来通过计算体现某地区植被覆盖变化趋势的 θ_{slope} 值,来判断这一时期该地区大气的干湿程度。

3.2.2 干期与干期结束后的第一次降水对 NDVI 的影响

干期是指一年内连续多日无降水的时段。对每年内不同长度的干期进行提取分析,计算从干期内及干期结束第一次降水后 NDVI 的变化趋势,分析干期长度及第一次降水量对 NDVI 变化有无显著影响。通过统计发现研究区干期长度从 2 天到 20 天以上都有出现,并且时间长度相近的干期对 NDVI 的变化趋势的影响程度趋于一致。结合逐日降水数据和 NDVI 值,进一步研究发现对整个生长季而言,大于等于 18 天的干期使植被出现退化的频率(85.00%)明显大于其他干期长度,13—17 天的干期使植被出现退化的频率明显减小(58.33%),8—12 天及以上干期大概率使植被生长趋于稳定,小概率会出现改善或退化(不超过 10.00%),

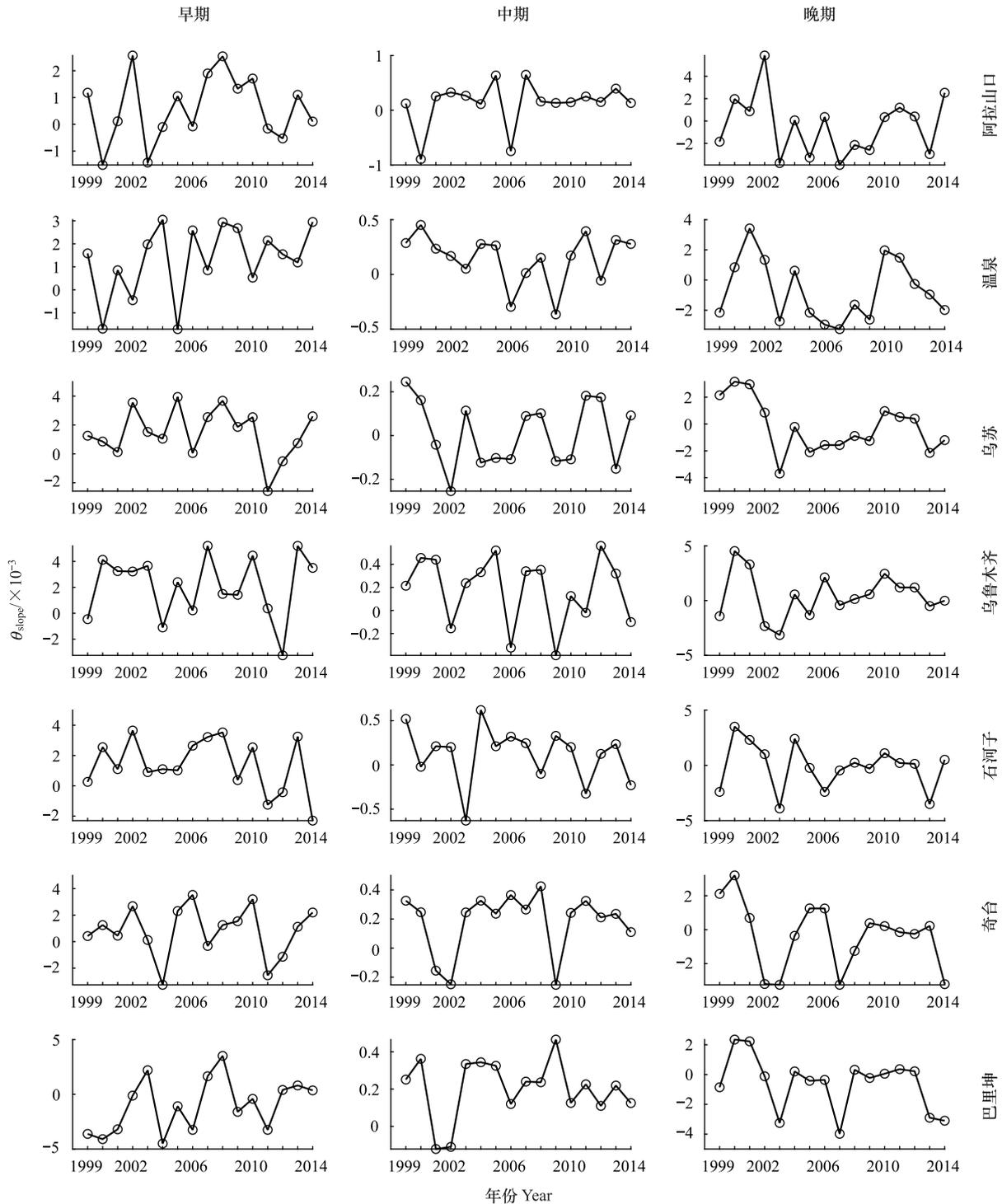


图3 16年生长季各时期日均NDVI变化趋势的 θ_{slope} 值

Fig.3 θ_{slope} value of daily NDVI variation trend in each period of 16 years' growing season

7天及以内的干期使植被出现改善的频率最大(66.67%)因此本文将干期长度划分为2—7、8—12、13—17、18天及以上4个区间(表4)。

从表4中可以看出,在生长季早期,干期结束后第一次降水量在6.0 mm以下时,无论干期长短,植被覆盖趋势都是轻微退化甚至中度退化;第一次降水量在6.1—12.0 mm之间,干期长度在18天以内时,植被覆盖趋

势基本表现为明显改善或轻微改善;当干期长度在 18 天以上时表现为基本不变;当第一次降水量超过 12.0 mm 后,无论干期长短,植被覆盖趋势以中度或轻微退化为主。在生长季中期,第一次降水量小于 0.2 mm 时,植被覆盖趋势全部表现为轻微退化甚至中度退化,当第一次降水量在 0.3—6.0 mm 之间,干期长度小于 18 天时,植被覆盖趋势基本表现为明显改善或轻微改善,干期长度超过 18 天后,植被覆盖趋势表现为轻度退化,当第一次降水量超过 6.0 mm 时全部表现为轻微退化甚至严重退化。在生长季晚期,第一次降水量在 6.0 mm 以下时,无论干期长短,植被覆盖趋势以轻微退化甚至中度退化为主,当第一次降水量在 6.1—12.0 mm 之间,干期长度在 18 天以内时,植被覆盖趋势表现为轻微改善或基本不变,当干期长度在 18 天以上时表现为中度退化,第一次降水量超过 12.0 mm 后全部表现为退化。总之,生长季干期长度在 18 天以内,对植被覆盖影响不明显,干期长度超过 18 天,会影响植被覆盖的变化趋势。

表 4 不同长度干期期间的 NDVI 变化趋势

Table 4 Change trend of NDVI during different dry period

首次降水量 First precipitation/mm	生长季干期长度 Length of dry season/d											
	早期 Early stage(91—120)				中期 Medium stage(121—280)				晚期 Late stage(281—304)			
	2—7	8—12	13—17	≥18	2—7	8—12	13—17	≥18	2—7	8—12	13—17	≥18
≤0.2	-0.0044	-0.0062	-0.0045	-0.0030	-0.0215	-0.0071	-0.0081	-0.0070	-0.0078	-0.0081	-0.0140	-0.0220
0.3—6.0	-0.0095	-0.0056	-0.0021	-0.0035	0.0039	0.0021	0.0016	-0.0016	0.0175	-0.0033	-0.0093	-0.0059
6.1—12.0	0.0107	0.0034	0.0010	-0.0006	-0.0050	-0.0129	-0.0044	-0.0160	0.0043	0.0021	-0.0003	-0.0085
>12.0	-0.0076	-0.0019	-0.0027	-0.0014	-0.0350	-0.0095	-0.0015	-0.0020	-0.0012	-0.0047	-0.0082	-0.0046

为研究干期长度能否对 NDVI 对降水的滞后响应产生影响,结合逐日 NDVI 值和 3.1.1 的研究结果,统计干期结束后的第一次降水属于同一降水量级的各个干期的 NDVI 对第一次降水的滞后响应特征,发现在生长季早、中期干期长度在 8 天及其以内时,NDVI 及时响应降水的频率都略大于滞后 1 天的频率,当干期长度大于 8 天时,NDVI 响应降水滞后 1 天的频率超过及时响应,且滞后 1 天的频率随干期长度的增加而逐渐增大,干期长度超过 13 天后,NDVI 滞后 1 天的频率能够达到 67.00%左右。在生长季晚期,干期长度对 NDVI 对降水的滞后现象无明显规律。

3.3 连日降水分布型的影响

对于每年生长季中的降水分布,单日降水较多,连日降水较少且全部集中在生长季的早中期,统计发现连日降水对 NDVI 的影响更复杂,因此值得分析研究。首先,依据五个站点的日降水量数据,总结出三种连日降水型(图 4),分别是图 4 所示的 A 型(2 天)、B 型(2 天)、C 型(多天),三种连日降水型在所有统计数据中出现的频率分别为 26.9%、51.5%、21.6%。

由上面三种降水分布引起的 NDVI 变化可归纳为下面所示的 4 种类型(图 5)。

NDVI 除了由不同降水型引起的上面这四种变化类型外,还会出现几种频率极小的变化,初步认定为是偶然性因素干扰造成的,为保证研究的严谨性,本文将其全部归类为“ θ 型”,最后根据是否落入置信区间判定取舍。

为找到不同降水型和 NDVI 变化型的最佳对应关系,构建基于 C4.5 决策树算法的判别分析模型^[24],这一部分是在 SPSS 软件中完成的。模型构建过程如下:

根据前期对样本的归纳首先选取了 $NDVI_0$ 、 $NDVI_1$ 、 $NDVI_2$ 、 $NDVI_3$ 这四个特征要素,它们分别表示第 0、1、2、3 天的 NDVI 值,然后根据下列公式计算得到三个判别因子: f_1 、 f_2 、 f_3 :

$$\begin{cases} f_1 = NDVI_0 - NDVI_1; \\ f_2 = NDVI_1 - NDVI_2; \\ f_3 = NDVI_2 - NDVI_3; \end{cases} \quad f_1, f_2, f_3 \neq 0 \quad (5)$$

从而建立判别分析模型(图 6)。

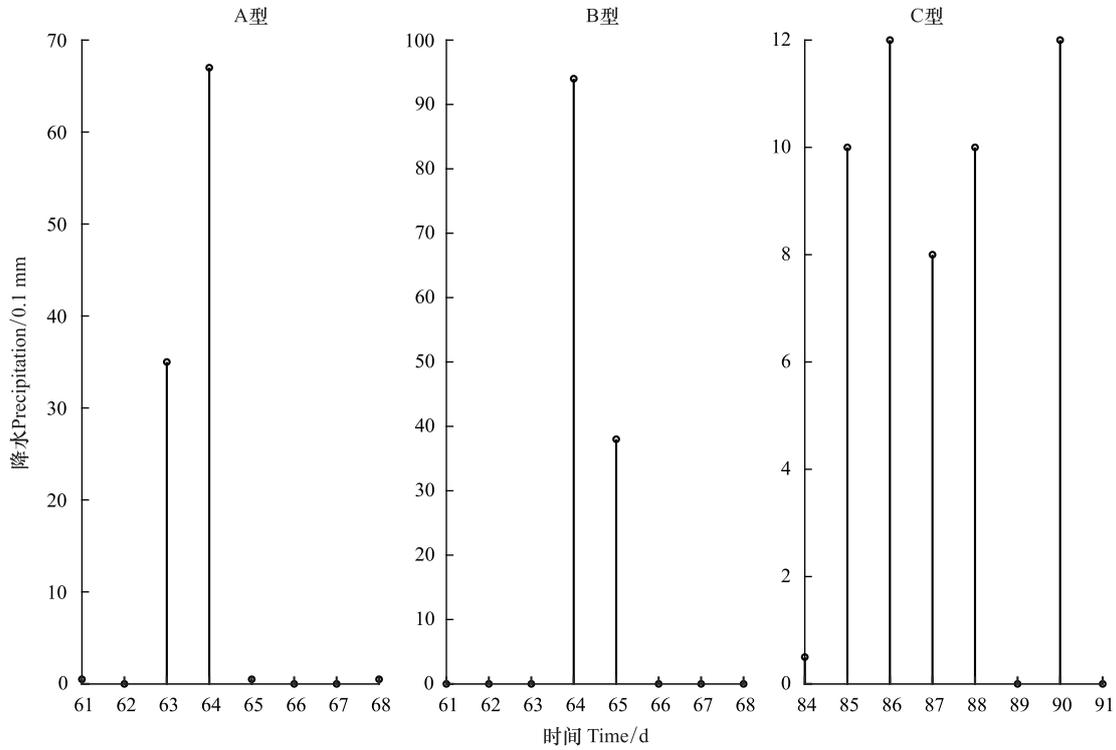


图4 三种连日降水型

Fig.4 Three types of continuous precipitation

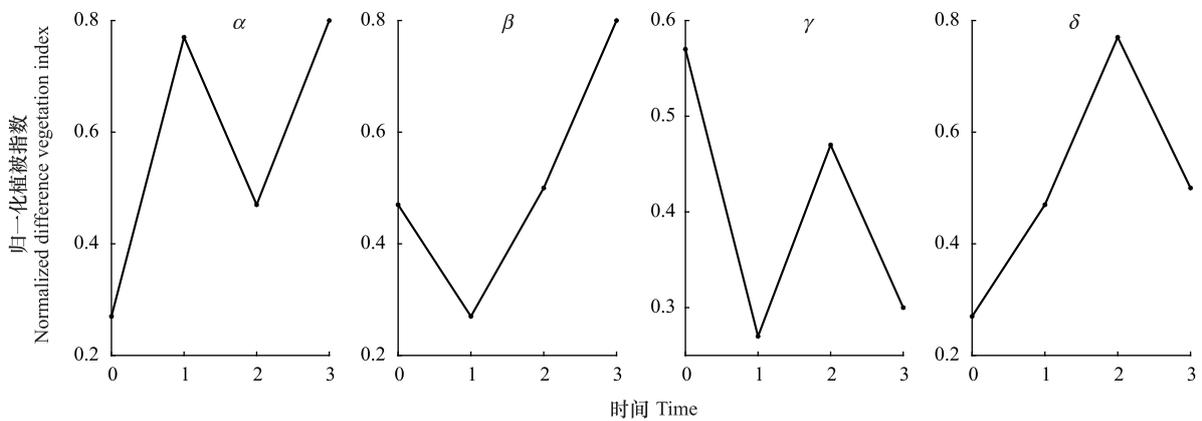


图5 NDVI变化型

Fig.5 NDVI change type

图中横轴第0天表示降水前一天,第1天表示降水第一天,第2天表示降水末一天,第3天表示降水后一天

将三种降水型对应的 NDVI 变化分别带入模型中,输出结果并计算每一个结果的置信度,最终确定每种降水型导致的 NDVI 变化型。通过确定以 $P=0.05$ 为置信度的置信区间,观察每一个结果是否在置信区间内,结果发现所有 θ 型全都落在置信区间外,即降水型导致它们出现的频率低于 5%,在这一研究中认为不可信,故不加考虑。图 7 显示了三种降水型引起的 NDVI 四种变化类型 α 、 β 、 γ 、 δ 出现的频率。

在上述研究中,生长季早期 A 型、B 型、C 型降水分别出现了 112 次、176 次和 56 次,生长季中期 A 型、B 型、C 型降水分别出现了 185 次、376 次和 178 次,这三种降水型导致的 NDVI 变化在不同时期显然不同,下面

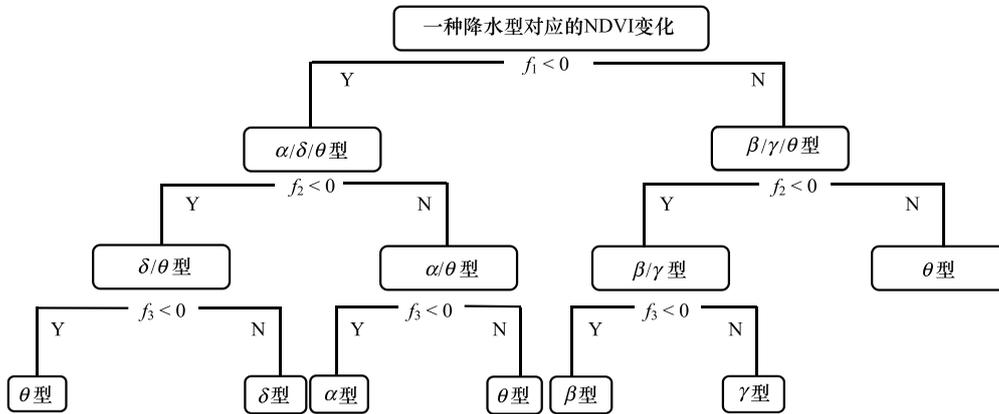


图 6 基于 C4.5 决策树算法的判别分析模型
 Fig.6 Discriminant analysis model based on C4.5 algorithm

依然按照 5% 的置信度进行分析。

从图 7 中可以看出,在生长季早期,A 型降水主要导致 NDVI 出现 γ 变化型($P=0.140$),其次是 α 变化型($P=0.093$);B 型降水在早期导致的 NDVI 变化较为复杂, α 变化型($P=0.186$)、 γ 变化型($P=0.186$)、 δ 变化型($P=0.093$)都有可能出现;C 型降水在早期主要使 NDVI 的变化表现为 γ 变化型($P=0.093$)。在生长季中期,A 型降水除了和在早期一样导致 NDVI 出现 γ 变化型($P=0.089$)外,所导致的 NDVI 变化型发生了变化,由 α 变化型换成了 β 变化型($P=0.089$);B 型降水导致的 NDVI 变化和 A 型一样,与早期相比 α 变化型换成了 β 变化型($P=0.198$),主要变化型还是 γ 变化型($P=0.286$),但 δ 变化型不再出现;C 型降水在中期和早期一样主要使 NDVI 的变化表现为 γ 变化型($P=0.110$),但在中期也会出现 β 变化型($P=0.089$)。

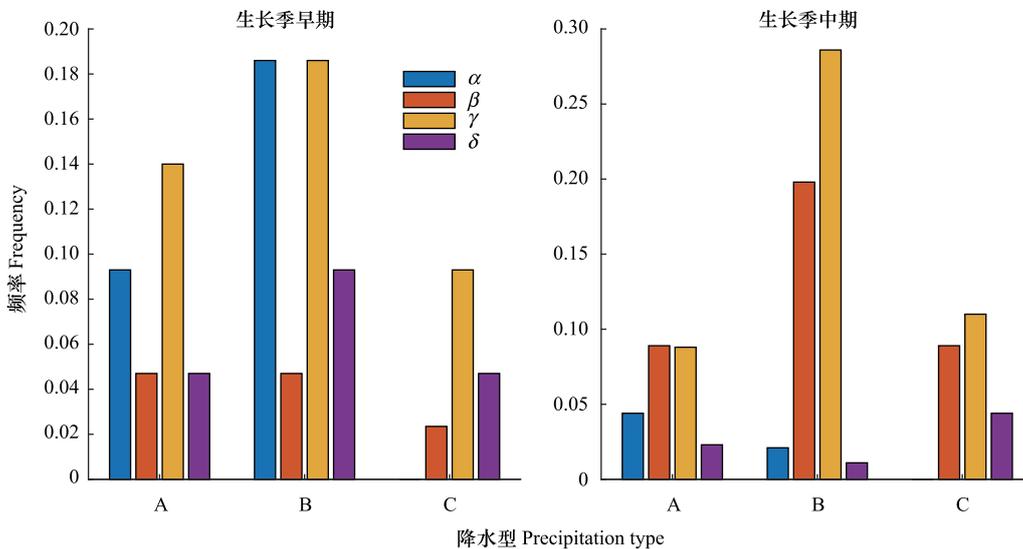


图 7 不同降水型引起的 NDVI 的变化类型出现频率
 Fig.7 The frequency of NDVI variation types caused by different precipitation patterns
 图中横轴 A 表示 A 型降水, B 表示 B 型降水, C 表示 C 型降水

分析结果表明, B 型降水出现的频率最大, 在生长季早中期一共出现了 552 次, 占比达到一半以上, A 型、C 型降水出现的频率大致相同, 并且发现无论哪种降水型都有可能引起 γ 变化型, 但为增大植被及时连续生长的概率, 有效利用降水, 通过观察这四种 NDVI 变化型, 发现应该尽可能增大 α 、 β 、 δ 变化型出现的概率, 因

为这三种变化型以增长为主,其中以 β 变化型最佳。首先针对 B 型降水导致的 NDVI 变化,在 $P=0.05$ 的置信度条件下,研究得出当出现 B 型降水时,NDVI 有 50% 的概率会发生 γ 变化型的变化,而对于其他三种 NDVI 变化型而言,在生长季早期,B 型降水除不会使 NDVI 出现 β 变化型外,其他两种变化都存在较大的可能。在中期,NDVI 变化出现明显变化趋势, β 变化型出现而其他两种变化型消失。究其原因可能是由于在这一时期荒漠植被生长旺盛,对水分需求量大,因此出现降水后 NDVI 连续增长的概率增大。A 型、C 型降水两者出现的频率较小,在早期,A 型降水除导致 γ 变化型变化外,出现 α 变化型的频率也很大,C 型降水只能使 NDVI 出现 γ 变化型变化,在中期,A 型和 C 型降水都使得 NDVI 出现 γ 变化型变化和 β 变化型变化,但 A 型降水导致 β 变化型的概率较大。

综上所述,在生长季早期,降水应该以 B 型降水为主的情况下,植被趋于生长茂盛;在生长季中期,降水以 A 型降水为主的情况下,能够大概率有效维持植被繁茂的趋势。

3.4 降水量与 NDVI 值增幅的关系

为分析日降水量级对 NDVI 的影响,统计了降水后的 NDVI 的增幅情况(表 5)。从表 5 可以看出,在生长季早期降水量小于 0.2 mm 时,NDVI 增幅集中在 0.1 以内,频率达 92.25%,出现 NDVI 增幅大于 0.15 的情况的频率很小;当降水量在 0.3—6.0 mm 之间时,NDVI 增幅值在 0.15 及以上的频率增大到 22.59%,当降水量在 6.1—12.0 mm 之间时,NDVI 增幅越来越向 0.15 及以上集中,频率达到了 41.53%,而当降水量超过 12.0 mm 时,NDVI 增幅值在 0.15 及以上的频率下降到 24.68%;在生长季中期,降水量小于 0.2 mm 和在 0.3—6.0 mm 之间时,NDVI 增幅值的随机性较大,在 0.15 及以上的频率分别为 30.80%、30.96%;当降水量在 6.1—12.0 mm 之间时,NDVI 增幅在 0.15 及以上的频率达到最大,为 64.96%,而当降水量超过 12.0 mm 时,NDVI 增幅值在 0.15 及以上的频率又下降到 49.51%;在生长季晚期,降水量在 6.0 mm 以下时,NDVI 增幅在 0.15 及以上的频率为 51.69%,当降水量在 6.0 mm 以上时,NDVI 增幅有表现为较强的随机性。

表 5 降水量导致的不同 NDVI 增幅出现的频数

Table 5 The frequency of different NDVI increases caused by precipitation

NDVI 增幅值 Increase value	降水量级 Precipitation levels/mm	早期 Early stage(91—120)				中期 Medium stage(121—280)				晚期 Late stage(281—304)		
		4.5—9.0		9.1—18.0		4.5—9.0		9.1—18.0		4.5—9.0		
		<0.2	0.3—6.0	6.1—12.0	12.1—25.0	<0.2	0.3—6.0	6.1—12.0	12.1—25.0	<0.2	0.3—6.0	6.1—12.0
≤0.025			23		23		75		40			1
		23	57	29	27	128	208	51	20	11	0	4
0.05			79		6		75		3			7
		67	93	54	5	146	285	17	9	3	8	5
0.1			22		8		117		47			19
		29	35	24	26	54	214	96	23	13	22	3
≥0.15			100		27		220		208			23
		10	54	76	19	146	317	304	51	10	51	3

共统计了 2589 个降水日,下文对表 5 的分析中出现的频率是由表中列出的对应的频数(或频数和)除以对应降水量的统计总数得到的:92.25%由 $(23+67+29)/(23+67+29+10) \times 100\%$ 计算得到,22.59%由 $54/(57+93+35+54) \times 100\%$ 计算得到,41.53%由 $76/(29+54+24+76) \times 100\%$ 计算得到,24.68%由 $19/(27+5+26+19) \times 100\%$ 计算得到,30.80%由 $146/(128+146+54+146) \times 100\%$ 计算得到,30.96%是由 $317/(208+285+214+317) \times 100\%$ 计算得到,64.96%是由 $304/(51+17+96+304) \times 100\%$ 计算得到,49.51%由 $51/(20+9+23+51) \times 100\%$ 计算得到,51.69%是由 $(10+51)/(11+0+3+8+13+22+10+51) \times 100\%$ 计算得到

从上述结果可以发现这一部分的研究与前面 NDVI 响应降水延迟部分的研究结果相对应,即在生长季早、中期,降水量在 6.1—12.0 mm 时对荒漠植被的生长最有利,降水量在 0.2 mm 以下时,NDVI 增长幅度较小,植被生长速度较慢,在 0.3—6.0 mm 时,NDVI 增幅在 0.1 左右,长势较强,但当降水量达到 12.0 mm 后,降水对荒漠植被生长的促进作用出现明显下降;而在生长季晚期,降水量对植被的影响不显著,NDVI 增幅值的随机性较大。

4 结论

整体上,天山北坡前山带荒漠植被生长的主要影响因素是降水,在生长季 NDVI 对降水的响应在时间、空

间尺度以及直观表现上均存在较大差异。通过分析获得以下几点结论:

(1) 在生长季早期,NDVI 对降水的反应延迟性最强,相关性较弱,在中期 NDVI 对降水的敏感度大幅提高,相关性最强,且在这一时期日降水在 6.1—12.0 mm 时,对植被生长促进效果最明显,在晚期虽然植被对降水的敏感度达到最大,但和降水的相关性却下降到最低。从空间上看,天山北坡前山带中段南部降水充沛,滞后现象明显,前山带西段和东段降水较为充沛,及时响应与滞后响应基本持平,天山北坡前山带中段东部和中部降水适中,生长季早期滞后明显,中期滞后不明显,前山带中段北部及时响应最为显著。

(2) 虽然不同地区每年的 NDVI 变化趋势都存在较大差异,但无论研究区域中任一地区年均降水量是多是少,都表现出在生长季期间降水较多的时期,植被覆盖普遍出现为基本不变或轻微改善的趋势,相反在降水较少的时期,植被覆盖普遍出现轻微退化或基本不变(θ_{slope} 为负的极小值)的趋势,未来可以通过计算体现某地区植被覆盖变化趋势的 θ_{slope} 值,来判断这一时期该地区大气的干湿程度。

(3) 干期长度在 18 天以内时对植被覆盖变化趋势影响不明显,干期长度超过 18 天会影响植被覆盖的变化趋势,而且在早、中期干期越长(>8) NDVI 对降水响应的滞后性越强。

(4) 连日降水型对 NDVI 的影响明显,在生长季早期,B 型降水最有利于荒漠植被生长,在中期,A 型降水最有利于荒漠植被生长。在生长季早、中期,降水量在 6.1—12.0 mm 时对荒漠植被的生长最有利,NDVI 增长幅度在 0.15 以上,植被生长速度迅速,而在生长季晚期,降水量对植被的影响不显著,NDVI 增幅的随机性较大。

NDVI 对降水的响应规律可以在一定程度上指导草场灌溉、农业种植活动。人们可以通过掌握上述规律实现更加合理的生产灌溉,节约用水,科学规划。大致上,在生长季早期(4 月),按 B 型降水的灌溉方式,灌溉量在 6 mm 以内,灌溉间隔在 7 天以内最佳;在生长季中期(5—9 月),按 A 型降水的灌溉方式,灌溉量 6—12 mm,灌溉间隔在 13 天以内最佳等。这样既有利于作物生长,又能够节约用水,可有效弥补自然力的不足。此外还可以通过 NDVI 的变化预测区域降水的变化趋势,为气候变化预报提供了一种新方式。然而,为全面理解荒漠植被对气候变化的响应,还需要在今后的研究中,尽可能对降水、温度、土壤湿度以及植物生理等因素进行定量化协同分析,为干旱区荒漠植被带植被保护和恢复提供全面的科学依据。

参考文献 (References):

- [1] 郑艺,张丽,周宇,张炳华. 1982—2012 年全球干旱区植被变化及驱动因子分析. 干旱区研究, 2017, 34(1): 59-66.
- [2] Chen X, Luo G P, Xia J, Zhou K F, Lou S P, Ye M Q. Ecological response to the climate change on the northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 48(6): 765-777.
- [3] 高军,尹小君,汪传建,张雅. 天山北坡植被 NPP 时空格局及气候因子驱动分析. 新疆农业科学, 2018, 55(2): 352-361.
- [4] 尼加提·伊米尔,满苏尔·沙比提,玉苏甫·买买提. 天山北坡植被 NDVI 时空变化及其与气候因子的关系. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1250-1260.
- [5] Sun Q M, Liu T, Han Z Q, Wu Y P, Li B L. Effects of changes in vegetation on precipitation in the northern Tianshan Mountains evaluated using multiple time scales. Journal of Earth System Science, 2016, 125(3): 507-519.
- [6] Liu Q, Yang Z P, Han F, Wang Z G, Wang C R. NDVI-based vegetation dynamics and their response to recent climate change: a case study in the Tianshan Mountains, China. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(16): 1189.
- [7] 王桂钢,周可法,孙莉,李雪梅,秦艳芳. 天山山区草地变化与气候要素的时滞效应分析. 干旱区地理, 2011, 34(2): 317-324.
- [8] 李杨,刘艳,马丽云,张璞. 天山北坡气候因子对植被影响的空间分异性研究. 干旱区资源与环境, 2011, 25(7): 91-95.
- [9] 徐丽萍,郭鹏,刘琳,张正勇,李慧婷. 天山北坡 NDVI 对气候因子响应的敏感性分析. 湖北农业科学, 2014, 53(21): 5116-5120, 5125-5125.
- [10] 刘艳,聂磊,杨耘. 2001—2015 年天山地区草地 NDVI 时空演变和气候驱动特征分析. 生态环境学报, 2018, 27(5): 802-810.
- [11] 赵玲. 天山山区气候变化及其对草地植被的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012.
- [12] 程维明,周成虎,汤奇成,姚永慧,张百平. 天山北坡前山带景观分布特征的遥感研究. 地理学报, 2001, 56(5): 541-548.
- [13] 李运刚,何大明. 红河流域 NDVI 时空变化及其与气候因子的关系. 山地学报, 2009, 27(3): 333-340.
- [14] 苏里坦,宋郁东,张展羽. 近 40a 天山北坡气候与生态环境对全球变暖的响应. 干旱区地理, 2005, 28(3): 342-346.

- [15] Zhang Y L, Wang X, Li C H, Cai Y P, Yang Z F, Yi Y J. NDVI dynamics under changing meteorological factors in a shallow lake in future metropolitan, semiarid area in North China. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 15971.
- [16] 毛飞, 卢志光, 张佳华, 侯英雨. 近 20 年藏北地区 AVHRR NDVI 与气候因子的关系. *生态学报*, 2007, 27(8): 3198-3205.
- [17] 崔林丽, 史军, 杨引明, 范文义. 中国东部植被 NDVI 对气温和降水的旬响应特征. *地理学报*, 2009, 64(7): 850-860.
- [18] 罗玲, 王宗明, 宋开山, 张柏, 刘殿伟, 任春颖, 张素梅. 1982—2003 年中国东北地区不同类型植被 NDVI 与气候因子的关系研究. *西北植物学报*, 2009, 29(4): 800-808.
- [19] 王永锋, 靖娟利. 广西近 15a 植被覆盖变化及其对气候因子的响应. *农业现代化研究*, 2017, 38(6): 1086-1096.
- [20] 朴世龙, 方精云. 1982—1999 年我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.
- [21] Chu H S, Venevsky S, Wu C, Wang M H. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 650(2): 2051-2062.
- [22] 曾波, 谌芸, 王钦, 徐金霞. 1961—2016 年四川地区不同量级不同持续时间降水的时空特征分析. *冰川冻土*, 2019, 41(2): 444-456.
- [23] 史达伟, 耿焕同, 吉辰, 黄超. 基于 C4.5 决策树算法的道路结冰预报模型构建及应用. *气象科学*, 2015, 35(2): 204-209.
- [24] 苗春生, 何东坡, 王坚红, 史达伟. 基于 C4.5 算法的长江中下游地区夏季降水预测模型研究及应用. *气象科学*, 2017, 37(2): 256-264.
- [25] 慈晖, 张强. 新疆 NDVI 时空特征及气候变化影响研究. *地球信息科学学报*, 2017, 19(5): 662-671.
- [26] 李明杰, 侯西勇, 应兰兰, 路晓, 朱明明. 近十年黄河三角洲 NDVI 时空动态及其对气温和降水的响应特征. *资源科学*, 2011, 33(2): 322-327.
- [27] 侯西勇, 应兰兰, 高猛, 毕晓丽, 路晓, 朱明明. 1998—2008 年中国东部沿海植被覆盖变化特征. *地理科学*, 2010, 30(5): 735-741.
- [28] 李佳秀, 陈亚宁, 刘志辉. 新疆不同气候区的气温和降水变化及其对地表水资源的影响. *中国科学院大学学报*, 2018, 35(3): 370-381.
- [29] Du J Q, Shu J M, Yin J Q, Yuan X J, Jiaerheng A, Xiong S S, He P, Liu W L. Analysis on spatio-temporal trends and drivers in vegetation growth during recent decades in Xinjiang, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 38: 216-228.
- [30] Gao J B, Jiao K W, Wu S H. Investigating the spatially heterogeneous relationships between climate factors and NDVI in China during 1982 to 2013. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(10): 1597-1609.
- [31] 田义超, 陈志坤, 梁铭忠. 北部湾海岸带植被覆盖时空动态特征及未来趋势. *热带地理*, 2014, 34(1): 76-86.
- [32] 宋怡, 马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 89-93, 173-173.
- [33] 肖开提·多莱特. 新疆降水量级标准的划分. *新疆气象*, 2005, 28(3): 7-8.
- [34] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 刚成诚, 周伟, 居为民. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(9): 1255-1268.