

DOI: 10.5846/stxb201811112442

李艳菊, 丁建丽, 张钧泳, 武鹏飞. 基于 LUCC 的 2001—2015 年天山北坡植被覆盖对干旱的响应. 生态学报, 2019, 39(17): - .
Li Y J, Ding J L, Zhang J Y, Wu P F. Response of vegetation cover to drought in the northern slope of the Tianshan Mountains during 2001—2015 based on the land-use and land-cover change. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

基于 LUCC 的 2001—2015 年天山北坡植被覆盖对干旱的响应

李艳菊^{1,2,3}, 丁建丽^{1,2,3,*}, 张钧泳^{1,2,3}, 武鹏飞⁴

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 新疆大学资源与环境科学学院智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046

4 新疆乌鲁木齐气象卫星地面站, 乌鲁木齐 830011

摘要:天山北坡生态系统脆弱, 易受干旱影响, 全球变暖和不合理的人类活动加剧了干旱的影响, 评估植被覆盖对干旱的响应, 为改善生态环境和减轻干旱影响提供科学参考。基于 MODIS-NDVI 遥感数据以及气象数据, 计算了 2001—2015 年天山北坡多尺度标准化降水蒸散发指数(SPEI)和植被覆盖度, 总结出植被覆盖度与多尺度 SPEI 时空动态变化规律, 从土地利用/土地覆盖(LUCC)的角度分析了植被覆盖度对气候干旱的响应。结果表明: (1)天山北坡绝大部分区域呈湿润状态, 中部(石河子、呼图壁)、西北部(克拉玛依市)呈轻度干旱。3 个月、6 个月、12 个月时间尺度 SPEI 均表现出干旱化增强的年际变化趋势; (2)天山北坡植被覆盖度整体上属中低覆盖, 总体呈南高北低, 天山山区、城市绿洲内部高的分布特点。2001—2015 年天山北坡植被覆盖度变化总体呈下降趋势; (3)年尺度天山北坡植被覆盖度与 SPEI 整体呈正相关关系。不同土地利用/土地覆盖的植被覆盖度与 12 个月时间尺度 SPEI(SPEI 12)的相关性不同, 大小依次为: 草地 > 未利用地 > 城乡用地 > 林地 > 水域 > 耕地; (4)季节尺度夏季和春季干旱对植被覆盖度的影响最明显, 不同季节干旱对不同土地利用/土地覆盖植被覆盖度影响程度不同。

关键词:天山北坡; 植被覆盖度; 标准化降水蒸散发指数; 土地利用/土地覆盖

Response of vegetation cover to drought in the northern slope of the Tianshan Mountains during 2001—2015 based on the land-use and land-cover change

LI Yanju^{1,2,3}, DING Jianli^{1,2,3,*}, ZHANG Junyong^{1,2,3}, WU pengfei⁴

1 College of Resource and Environment Science, Xingjiang University, Urumqi 830046, China

2 Ministry of Education Key Laboratory of Oasis Ecology, Xingjiang University, Urumqi 830046, China

3 Key Laboratory of Wisdom City and Environmental Modeling Department of Education, Urumqi 830046, China

4 Urumqi Meteorological Satellite Ground Station, Urumqi 830011, China

Abstract: The ecosystems on the northern slope of the Tianshan Mountains is fragile and vulnerable to drought. Global warming and damaging human activities exacerbate the effects of drought. Here, we assess the response of the vegetation cover to drought, and provide a scientific basis for improving the ecological environment and mitigating the effects of drought. Based on the normalized difference vegetation index of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS-NDVI) and meteorological observation data, standardised precipitation-evapotranspiration index (SPEI) and vegetation coverage on the northern slope of the Tianshan Mountains were calculated. Then, the temporal and spatial dynamics of

基金项目:国家自然科学基金项目(U1303381, 41261090); 自治区重点实验室专项基金项目(2016D03001); 自治区科技支疆项目(201591101); 新疆大学博士生科技创新项目(XJUBSCX-2016015)

收稿日期:2018-11-11; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: watarid@xju.edu.cn

vegetation coverage and multi-scale SPEI over the period from 2001 to 2015 were analyzed. Finally, in the perspective of land-use and land-cover change (LUCC), the correlation between them is discussed. The experimental results demonstrated that most of the northern slope of the Tianshan Mountains is in a humid state, with mild drought in the central (Shihezi, Hutubi) and northwest (Kenamayi) regions. The SPEI of three, six, and twelve months showed an inter-annual variation trend of enhanced aridification. The vegetation coverage of the northern slope in Tianshan Mountains was generally low to medium, of which with higher coverage level in the mountains and urban oases, with the overall height trend being high in the south and low in the north. From 2001 to 2015, the vegetation coverage of the northern slope of the Tianshan Mountains showed a downward trend, and this was positively correlated with drought. The vegetation coverage of different land-use and land-cover types was different from SPEI 12, and the order was: grassland > unutilized land > urban and rural land > forest land > water area > cultivated land. The influence of drought on vegetation coverage in summer and spring is the most obvious seasonal effect. The drought in different seasons had different degrees of influence on vegetation coverage of different land-use and land-cover types.

Key Words: The northern slope of the Tianshan Mountains; Vegetation coverage; Standardised precipitation-evapotranspiration index (SPEI); Land-use and land-cover change (LUCC)

植被是连接土壤、大气和水分的“自然纽带”。植被覆盖度在一定程度上量化了地表植被状况。在研究气候变化对区域生态环境的影响时,常将植被覆盖度作为评价区域生态环境的重要指标^[1]。

干旱是水分持续亏缺的一种异常气象现象,是所有气候因子作用于生态环境中的综合反映^[2]。干旱指数被用来综合表征气候的干旱程度。干旱是一种多尺度现象,所以,用干旱指数评估干旱必须与多时间尺度相关联^[3]。

植被对气候变化的响应一直是全球气候变化与陆地生态系统关系的研究的热点。随着“一带一路”战略的实施,作为“丝绸之路经济带”的重要组成部分,天山北坡干旱化问题开始被人们关注。天山北坡生态系统脆弱,水资源有限,适应能力低,易受干旱影响,全球变暖和不合理的人类活动加剧了干旱的影响^[4]。植被对气象参数敏感,降水缺乏会导致水分胁迫,而高温会给植被健康带来热应力^[5],因此,植被可能受到干旱的高度影响。植被活动对干旱的响应及其机制尚不清楚^[6],在这种背景下,评估干旱对植被的潜在影响的需求越来越迫切。了解不同土地利用/土地覆盖植被覆盖度对干旱的响应时间尺度以及抗旱性差异,加深我们对干旱目前和未来对天山北坡植被影响的理解,为改善生态环境和减轻干旱影响提供科学参考。许多关于植被覆盖度对气候变化的响应的研究中,多数学者分析了单独的气候因子与植被覆盖度的相关关系^[2,7-10],其气候因子主要为温度和降水量,研究尺度单一且不全面,并不能综合反映气候变化。不同土地利用/土地覆盖的地表生态环境存在差异^[1],从而对干旱的响应程度不同。因此,需要从更细致的角度分析植被覆盖度对气候变化的响应。

本文基于土地利用/土地覆盖(LUCC),使用2001—2015年MODIS的NDVI产品获取天山北坡的植被覆盖情况,并结合由2001—2015年天山北坡16个气象站点的气象数据得到的干旱指数,从时空上分析不同LUCC植被覆盖度变化对多尺度干旱的响应,探讨气象干旱对天山北坡陆地生态系统的影响作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文所取的天山北坡研究区以行政区划为界,包括克拉玛依市市辖区、克拉玛依市、昌吉市、阜康市、呼图壁县、玛纳斯县、奎屯市、乌苏市、沙湾县、石河子市、乌鲁木齐市11个市(县)(图1)。

天山北坡地处天山山麓中段、准噶尔盆地南部。地势南高北低,南部为天山山区,中部为冲积平原,北部为古尔班通古特沙漠,属于大陆性气候,年均气温7.4℃,年均降水量181.99mm,年均蒸发量1948mm。主要农作物有棉花、小麦、玉米。作为“丝绸之路经济带”的重要组成部分,天山北坡具有得天独厚的区位优势 and

能源优势,发展潜力巨大,但作为典型的干旱绿洲经济区,面临水资源短缺、生态环境脆弱、资源环境承载力较低等挑战^[11]。

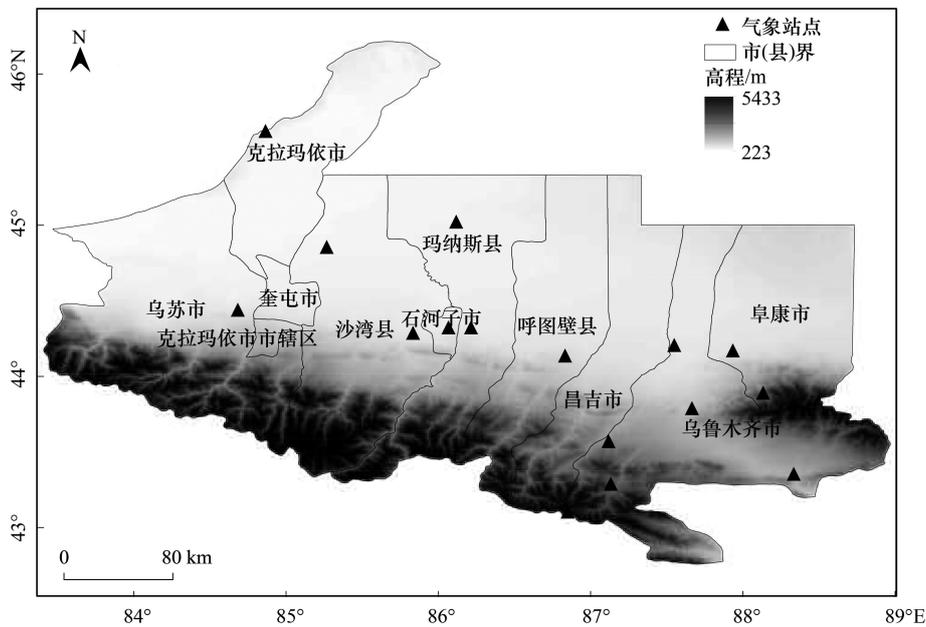


图 1 天山北坡位置及气象站点分布

Fig.1 The location of Northern Tianshan area and the distribution of meteorological stations

1.2 数据来源与预处理

本文选取 2001—2015 年空间分辨率为 250 m 的 MODIS NDVI 16 日数据产品,在 ENVI 中使用国际通用的最大值合成法(MVC),排除云、大气和太阳高度角的干扰,得到月 NDVI 栅格数据,利用研究区范围矢量图裁剪得到天山北坡 2001—2015 年 180 个月 NDVI 数据。

气象基础数据来源于中国气象数据网^[12],共选用 2001—2015 年天山北坡区域 16 个气象站点的平均气温、日照时数、降水量的日数据。

天山北坡土地利用/土地覆盖(LUCC)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),本研究选用 2001 年,30 m 分辨率的土地利用/土地覆盖(LUCC)数据,经重分类生成耕地、林地、草地、水域、城乡用地、未利用地 6 类研究区土地利用/土地覆盖类型图(图 2)。

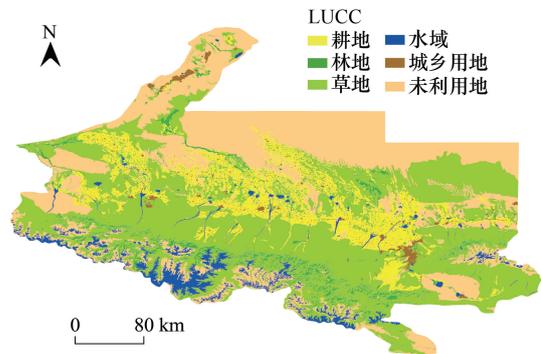


图 2 研究区土地利用/土地覆盖类型图

Fig.2 Land use or land cover types map (LUCC) of the study area

1.3 标准化降水蒸散发指数 SPEI 的计算

标准化降水指数(SPI)^[13]、Palmer 干旱指数(PDSI)^[14]、标准化降水蒸散发指数(SPEI)^[15]被广泛用于监测和评估干旱程度^[16-20],SPEI 基于每月水平衡(P-ET),结合了 SPI 的多尺度效用与 Palmer 干旱严重指数(PDSI)对温度和降水的敏感性^[15,20-21],是研究气候变暖条件下干旱的有效工具^[22]。因此,本文中用 SPEI 来评估研究区气候的干旱程度。其计算步骤为^[23]:

(1)计算潜在蒸散量

$$PET = 16 \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{NDM}{30} \right) \left(\frac{10T}{I} \right)^m \tag{1}$$

其中, T 为月平均温度 ($^{\circ}\text{C}$), N 为最大日照时数, NDM 为当月天数, I 为热指数。热指数计算为 12 个月指数 i (公式 2) 的和, m 由公式 (3) 得到:

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (2)$$

$$m = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.492 \quad (3)$$

(2) 确定不同时间尺度降水量 (P) 与蒸散量 (PET) 的差值累积;

(3) 对 (2) 得到的结果使用 log-logistic 概率分布, 得到了 SPEI 系列。

根据计算得到的 SPEI 数据使用 ArcGIS 地统计分析工具中的 IDW 空间插值方法得到历年的 SPEI 栅格数据。基于 SPEI 根据表 1 划分不同干旱等级, SPEI 越小, 干旱程度越强。

表 1 基于 SPEI 的干旱等级划分^[24]

Table 1 SPEI standard of drought

标准化降水蒸散发指数 Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index	干旱等级 Drought level	标准化降水蒸散发指数 Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index	干旱等级 Drought level
$0 < \text{SPEI}$	无干旱	$-2 < \text{SPEI} \leq -1.5$	严重干旱
$-1 < \text{SPEI} \leq 0$	轻度干旱	$\text{SPEI} \leq -2$	极端干旱
$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1$	中度干旱		

1.4 植被覆盖度的计算

利用像元二分模型基于像元线性分解计算植被覆盖度, 遥感传感器获取的地表光谱信息分解成两部分, 纯植被像元的信息 NDVI_v 和纯土壤像元的信息 NDVI_s 。植被覆盖度 (f_v) 计算公式如下:

$$f_v = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_s) / (\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s) \quad (4)$$

在实际计算过程中, 不同影像的 NDVI_s 和 NDVI_v 会有一定程度的差异, 所以采用 0.5% 置信度截取 NDVI 的上下阈值。将 NDVI 数值最大的 0.5% 区域求平均值作为 NDVI_v , 将 NDVI 数值最小的 0.5% 区域求平均值作为 NDVI_s 。

1.5 SPEI 与植被覆盖度的趋势分析及相关性计算

Theil-Sen 斜率估计是一种非参数估计方法, 常用于长时间序列趋势变化分析。本文采用 Theil-Sen 斜率估计的方法分析研究区 2001—2015 年 SPEI 和植被覆盖度的变化趋势, 计算公式如下:

$$\text{TS}_{\text{slop}} = \text{medium} \left(\frac{x_j - x_i}{t_j - t_i} \right) \quad (5)$$

其中, median 表示中位数函数; x_i 、 x_j 为序列数据, 表示不同年份的植被覆盖度或 SPEI; t_i 、 t_j 为与序列数据对应的时间序列数据; 序列长度为 n , 有 $i < j \leq n$ 。

本文基于像元尺度进行 SPEI 与植被覆盖度的相关分析, 运用 SPEI 与植被覆盖度的栅格数据, 有效分析天山北坡多尺度 SPEI 与植被覆盖度的相关关系。SPEI 与植被覆盖度相关系数计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

其中, R 为 x 、 y 两变量的相关系数; x_i 为第 i 年的植被覆盖度; y_i 为第 i 年的年平均 SPEI。

2 结果与分析

2.1 天山北坡干旱时空动态分析

2.1.1 基于不同时间尺度 SPEI 的气候年际变化分析

2001—2015 年天山北坡不同尺度 SPEI 的变化趋势如图 3 所示。1 个月尺度的 SPEI (SPEI 1) 变化趋势

不明显,3个月(SPEI 3)、6个月(SPEI 6)、12个月尺度(SPEI 12)的SPEI均呈现下降的线性趋势,即干旱化趋势加强。不同时间尺度SPEI年际变化的显著性明显不同,时间尺度越大,干湿交替变化周期变长,SPEI年际变化趋势越显著,SPEI 6、SPEI 12变化趋势分别通过了0.05、0.01的显著性检验。1961—2015年新疆气温呈变暖趋势,降水量减少,1997年以后保持稳定。气候变暖,降水减少加剧了新疆干旱的严重程度^[3]。

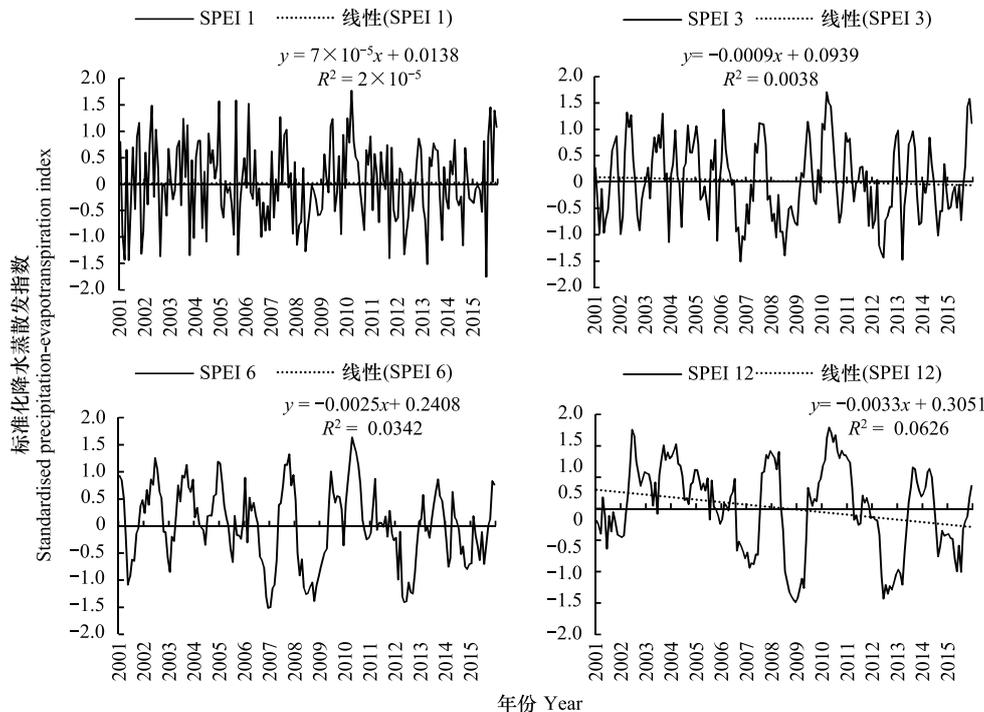


图3 天山北坡多时间尺度SPEI长期动态特征

Fig.3 Long-term dynamic characteristics of multi-time scale SPEI

从图3可以看出,SPEI 3对短期降水和温度变化较敏感,其数值波动较大;SPEI 6受多雨期和少雨期的影响,数值波动也比较大。2001—2015年天山北坡干旱持续时间达半年及以上的发生频率较高,1个月尺度上,2001—2002年,2005—2008年,2012—2015年的干旱频率较高,且干旱持续时间较长,2008年出现全年干旱,干旱程度多达到中度干旱;3个月尺度上,2001—2002年,2005—2006年,2013—2015年的干旱频率较高,且干旱持续时间较长,2008年、2012年出现全年干旱,干旱程度多达到轻度干旱;6个月尺度上,2001年,2005—2006年,2014—2015年的干旱频率较高,且干旱持续时间较长,2008年、2012年出现全年干旱,干旱程度多为轻度干旱;12个月尺度上2001年,2007—2009年,2012—2015年干旱频率较高,且干旱持续时间较长,2001年,2012年出现全年干旱,干旱程度多为轻度干旱。综上所述,多时间尺度的SPEI可以有效地反映天山北坡干旱程度及其持续时间,并且不同时间尺度的SPEI表现出了不同程度的年际震荡和年际变化特征,1个月尺度上无明显震荡周期,3个月尺度上震荡周期为8年,6个月和12个月尺度上震荡周期表现为9年,更长的时间步长可以消弱单月水平平衡差异,从而更突出干旱的季节、年变化特征,但总体上其变化的方向是一致的。

2.1.2 月、季节、年尺度SPEI年际变化分析

从图3可以看出,年内各月SPEI的变化情况存在年际差异,谷值所在月份也不尽相同。取16个气象站点的SPEI 1的平均值,如图4,可以看到SPEI月变化趋势为先减小后增大,谷值在5、7月份,表现为轻度干旱,5月份降水量少,7月份降水有所增加,但气温较高,蒸散量高于降水量。

SPEI 3可以反映干旱的季节变化特征,分别选取2月、5月、8月、11月的16个站点的SPEI 3平均值来反映冬、春、夏、秋季的干旱状况(图5)。可以发现,2001—2015年15年间春、夏、秋、冬四季均接近半数的年份

表现为干旱。春秋季干旱表现为轻度干旱,少数年份为中度干旱;夏冬季均为轻度干旱;秋季在 2005—2008 年出现连年干旱;2008 年四季均表现为轻度干旱。春季和秋季 SPEI 年际变化无明显趋势,夏季和冬季 SPEI 年际变化呈下降趋势,干旱程度加强。2001—2015 年季节水平的干旱强度为冬季 > 夏季 > 春季 > 秋季。

从年尺度 SPEI 年际变化趋势(图 6)可以看出,2001—2015 年 15 年来天山北坡 SPEI 以 0.025/年的速率下降,干旱趋势增强,最干旱年份为 2008 年。

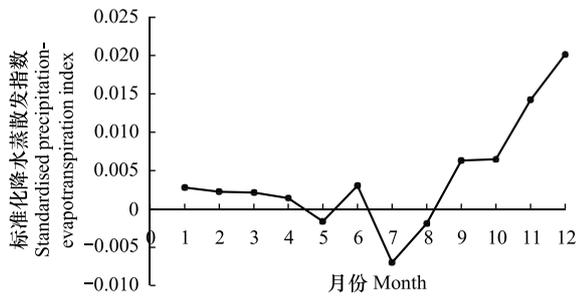


图 4 2001—2015 年天山北坡月均 SPEI 变化

Fig.4 Variations of monthly average SPEI during 2001 to 2015

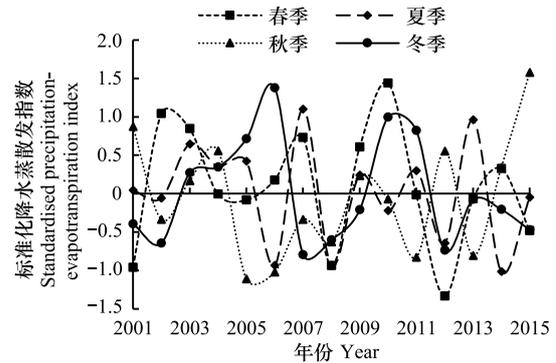


图 5 天山北坡季节尺度 SPEI 长期动态特征

Fig.5 Long-term seasonal dynamic characteristics of SPEI

2.1.3 SPEI 的空间动态变化分析

根据 2001—2015 年的 SPEI 12 数据,得到天山北坡不同土地利用/土地覆盖的 SPEI 空间动态变化(图 7)。由图 7a、图 7c 得到,15 年间天山北坡绝大部分区域呈湿润状态,中部(石河子、呼图壁)、西北部(克拉玛依市)呈轻度干旱。不同土地利用/土地覆盖 SPEI 大小依次为:水域 > 林地 > 草地 > 耕地 > 未利用地 > 城乡用地。根据 SPEI 的变化情况(图 7b、图 7c),西南部(克拉玛依市市辖区、乌苏市)SPEI 呈增加趋势,最大达到 0.047/年,说明气象干旱条件呈减弱趋势,湿润化增强,其他区域 SPEI 呈下降趋势,最大达到-0.075/年,说明区域干旱程度呈增加趋势,2001—2015 年 15 年间天山北坡整体上呈干旱化增强趋势。不同土地利用/土地覆盖的 SPEI 均呈下降趋势,即干旱化趋势增加,大小依次为:耕地 > 城乡用地 > 水域 > 林地 > 未利用地 > 草地,表明不同土地利用/土地覆盖对气候的调节作用程度不同。地表植被的变化影响地表的水蒸发量和热辐射强度,天然森林、草地对促进蒸发和减少热辐射的作用要远高于耕地或城市地区,对减轻旱灾、遏制全球变暖重要意义^[25]。

3.2 2001—2015 年植被覆盖度时空动态分析

3.2.1 2001—2015 年植被覆盖度年际变化分析

分析 2001—2015 年天山北坡植被覆盖度年际变化趋势(图 8),天山北坡植被覆盖度 2001—2015 年整体呈下降趋势,下降速率为 0.04/10 年,2001、2006、2009 和 2014 年出现植被覆盖度低值,最低出现在 2001 年(40%),最高出现在 2002 年(50%)。15 年间,植被覆盖度动态变化波动明显,2001 年至 2009 年过程波动较大,2009 年至 2015 年波动较平稳。

3.2.2 2001—2015 年植被覆盖度季节变化

分析基于不同土地利用/土地覆盖植被覆盖度的季节变化(图 9),植被覆盖度季节变化明显,2001—2015 年天山北坡夏季植被覆盖度最高,春季和秋季次之。耕地、林地、草地、城乡用地植被覆盖度季节变化明显,夏

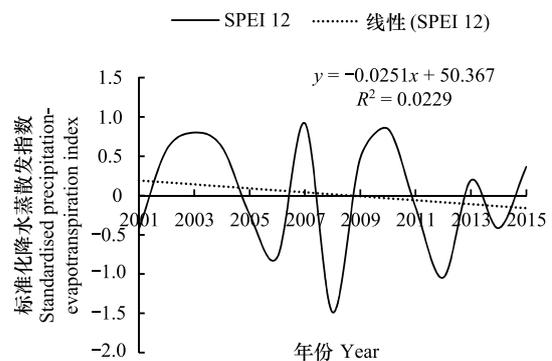


图 6 天山北坡 2001—2015 年尺度 SPEI 年际变化

Fig.6 Inter-annual variation of SPEI during 2001 to 2015

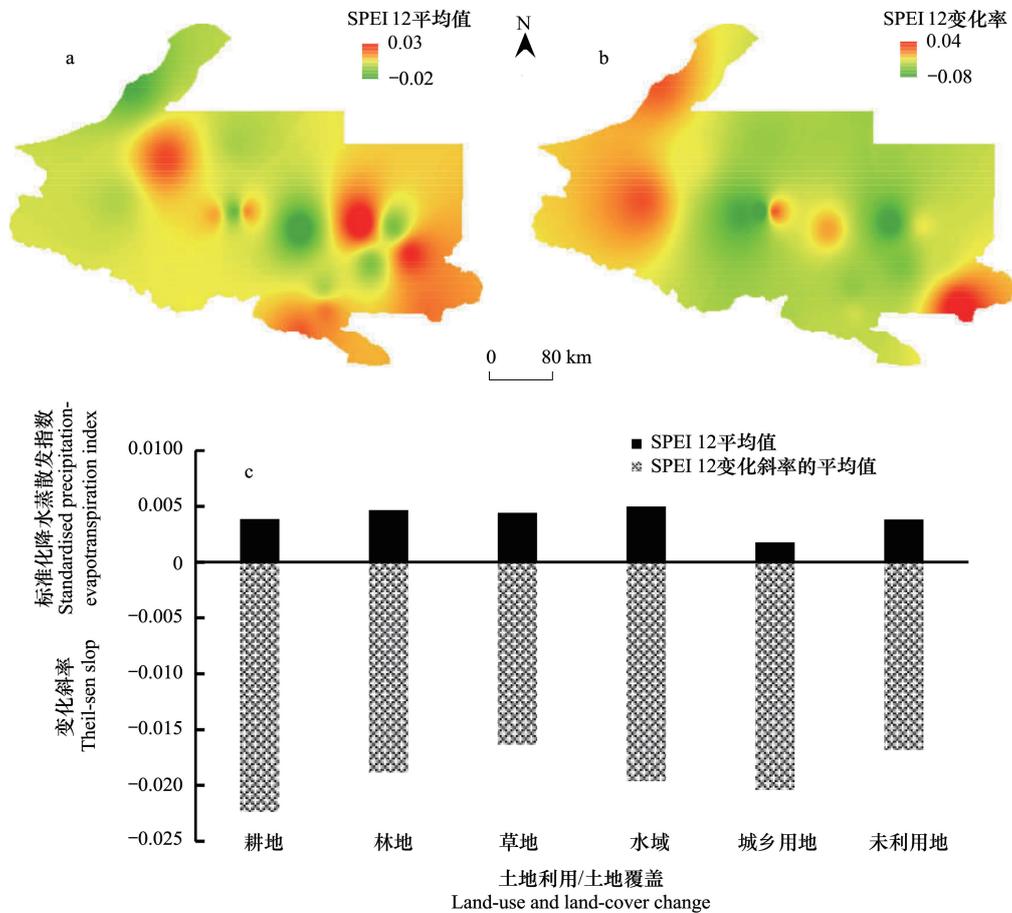


图 7 2001—2015 年天山北坡不同土地利用/土地覆盖 SPEI 空间动态变化
 Fig.7 Spatial distribution and variation of SPEI during 2001 to 2015

季其植被覆盖度远高于春秋两季,春秋两季其植被覆盖度相当。同季节不同土地利用/土地覆盖类型植被覆盖度差异显著,春季林地等天然植被覆盖度高于耕地;夏季耕地植被覆盖度远高于其他土地利用/土地覆盖类型,秋季植被覆盖度林地 > 耕地 > 草地,这与春季林地、草地等天然植被开始生长,夏季是农作物的主要生长期有关。

3.2.2 2001—2015 年植被覆盖度空间变化分析

根据 2001—2015 年植被覆盖度数据,得到天山北坡不同土地利用/土地覆盖植被覆盖度空间分布情况(图 10a),2001—2015 年天山北坡平均植被覆盖度区域差异性显著,准噶尔盆地、古尔班通古特沙漠南部地区

植被覆盖度较小,天山北部山区植被覆盖较高,其余城市绿洲内部及安集海河、玛纳斯河、呼图壁河和头屯河流域植被覆盖度较高,15 年整个研究区的平均植被覆盖度为 43%,属中低覆盖,高覆盖区域植被覆盖类型主要为耕地和林地,中覆盖区域植被覆盖类型主要为草地。15 年不同土地利用/土地覆盖类型植被覆盖度(图 10c)大小依次为耕地 > 林地 > 城乡用地 > 草地 > 未利用地 > 水域,耕地、林地平均植被覆盖度分别为 70% 和 65%,属于高度覆盖,草地和城乡用地平均植被覆盖度分别为 45% 和 48%,属于中度覆盖,耕地农作物密度

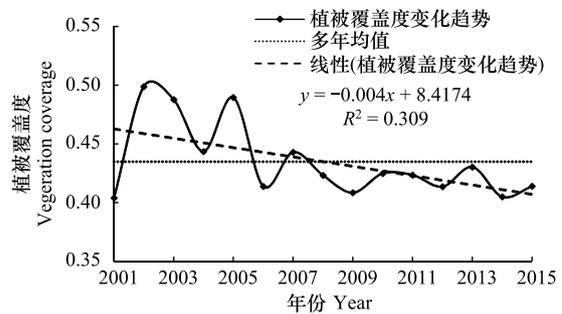


图 8 2001—2015 年天山北坡植被覆盖度年际变化趋势
 Fig.8 The inter-annual change of vegetation coverage during 2001 to 2015

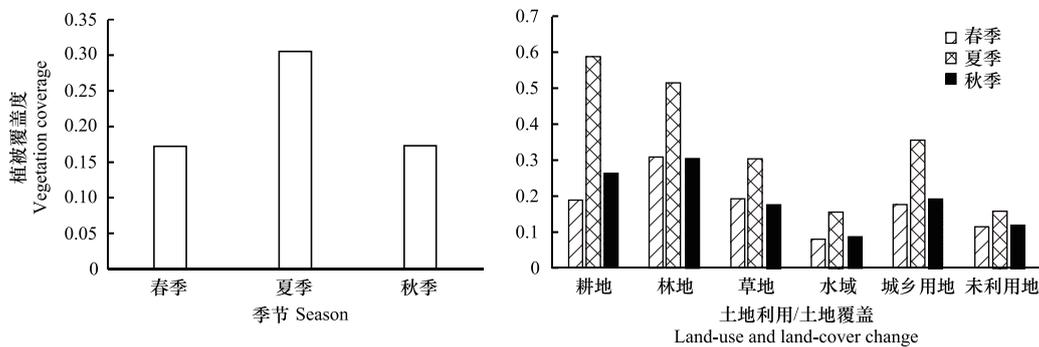


图9 2001—2015年天山北坡不同土地利用/土地覆盖植被覆盖度季节变化

Fig.9 The seasonal change of vegetation coverage during 2001 to 2015

高,植被覆盖度最高。

分析2001—2015年植被覆盖度的变化趋势(图10b),研究区中变化趋势为正和为负的区域分别占33%和67%,研究区绝大部分区域植被覆盖度呈下降趋势,下降率最高达 $-0.09/\text{年}$ 。城市绿洲内部植被覆盖度有明显的升高趋势,天山北坡山区及北部荒漠草原植被覆盖度也有升高趋势,而克拉玛依东北部、乌苏西部、乌鲁木齐中部以及零星分布在各大城区周边植被退化,表明天山北坡城市化进程对植被覆盖度有影响。

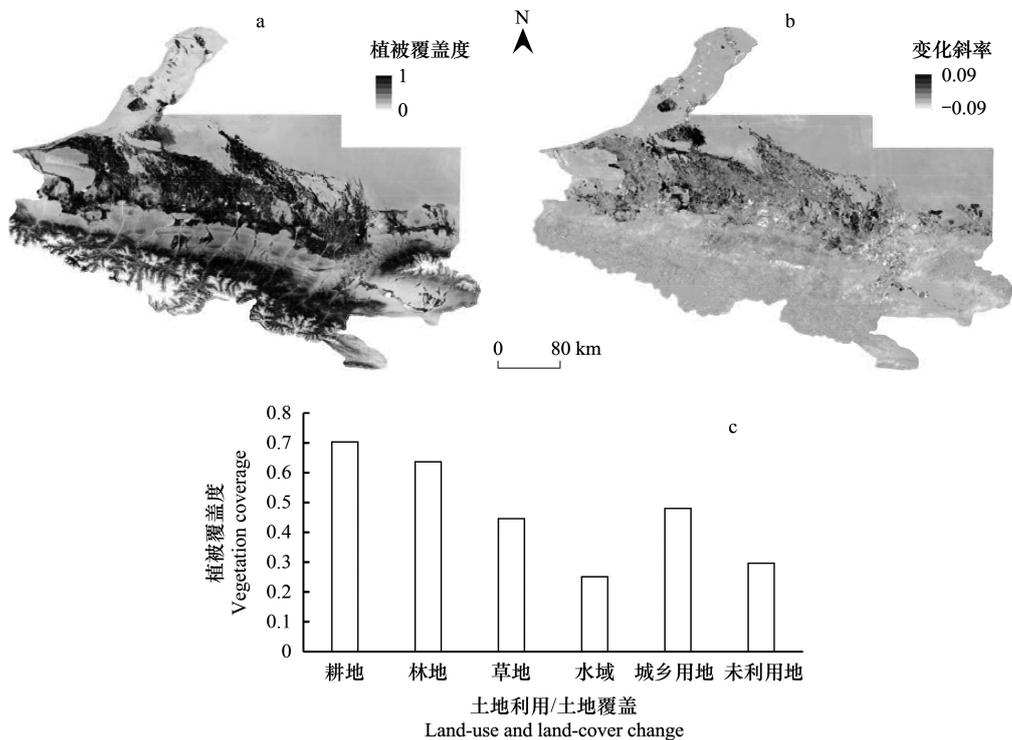


图10 2001—2015年天山北坡不同土地利用/土地覆盖植被覆盖度空间动态变化空间分布

Fig.10 Spatial distribution and variation of vegetation coverage during 2001 to 2015

2.3 植被覆盖对于干旱指数的响应

2.3.1 年尺度 SPEI 与植被覆盖度的相关性分析

使用公式(6)对2001—2015年植被覆盖度数据以及年均SPEI数据进行基于像元的相关分析,如图11a所示,正相关区域占79%,主要集中在草地区域(40%),负相关区域占21%;9%的区域通过了0.05显著性水平检验,表明气象干旱与植被覆盖度之间有相关关系;整个研究区的平均相关系数为0.28,即整体上植被覆盖

度与 SPEI 呈正相关关系, SPEI 越大, 干旱趋势越弱, 植被覆盖度越高。对于不同土地利用/土地覆盖类型, 植被覆盖度和 SPEI 相关性存在显著差异(图 11b)。不同土地利用/土地覆盖类型植被覆盖度与 SPEI 的相关性均呈正相关, 大小依次为: 草地 > 未利用地 > 城乡用地 > 林地 > 水域 > 耕地。土地利用/土地覆盖是自然与人文共同作用的结果, 气候变化影响植被的生长状况, 发生未利用地、草地、林地相互转换, 又因为经济发展, 人为作用下土地利用类型由耕地向建设用地转型^[26], 所以草地、未利用地、林地等受人为干扰少的土地利用/土地覆盖类型植被覆盖度对气候条件变化敏感, 相关关系非常显著, 耕地、城乡用地受人类活动影响较大的土地利用/土地覆盖类型植被覆盖度对气候条件变化的响应不明显。

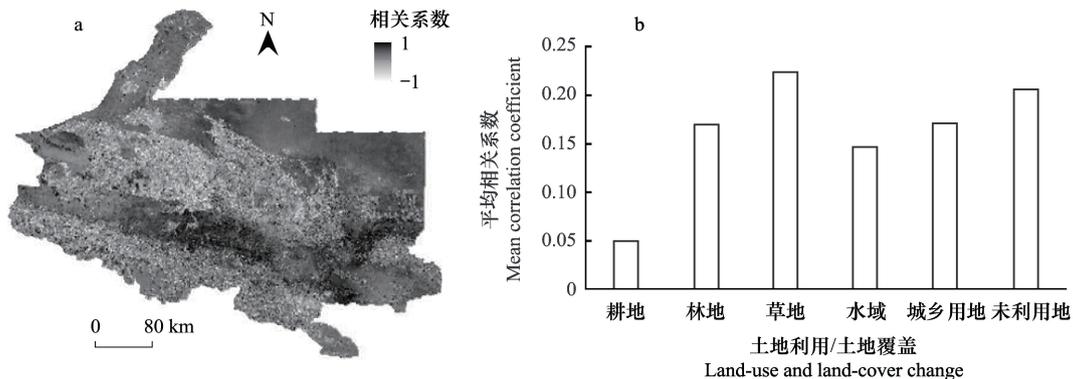


图 11 2001—2015 年天山北坡不同土地利用/土地覆盖植被覆盖度与 SPEI 的相关关系

Fig.11 Correlation between vegetation coverage and SPEI during 2001—2015

2.3.2 季尺度 SPEI 与植被覆盖度的相关性分析

从季节尺度分析各季 SPEI 变化对植被覆盖度的影响(图 12), 春季(图 12a) SPEI 与植被覆盖度正相关区域占 53%, 其中 12% 通过 0.05 的显著性水平检验; 夏季(图 12b) SPEI 与植被覆盖度正相关区域占 66%, 其中 8% 通过 0.05 的显著性水平检验, 6% 过 0.01 的显著性水平检验; 秋季(图 12c) SPEI 与植被覆盖度正相关区域占 32%, 其中 6% 通过 0.05 的显著性水平检验, 2% 过 0.01 的显著性水平检验; 季节尺度气象干旱程度对植被覆盖度的影响依次为夏季 > 春季 > 秋季, 植被覆盖度越高, 通过显著性检验的区域越大, SPEI 与植被覆盖度的相关关系越显著, 干旱程度对植被覆盖度的影响最明显。

季节尺度分析不同土地利用/土地覆盖 SPEI 对植被覆盖度的影响(图 12e), 春季不同土地利用/土地覆盖类型植被覆盖度对干旱程度的响应相当, 夏季草地、林地植被覆盖度对干旱程度的响应最明显, 耕地较弱, 可能原因是夏季耕作区除自然气候条件作用外, 还受灌溉、人为引水的影响, 所以 SPEI 不能完全反映地表干旱程度^[2], 其相关性也相对减弱。秋季城乡用地植被覆盖度对干旱程度的响应最明显。总体上草地、林地、耕地、未利用地植被覆盖度对夏季的干旱指数响应最明显, 水域、城乡用地的植被覆盖度对各季节的干旱指数响应相当。其中, 正相关区域中 50% 为草地, 说明草地植被覆盖度与各季节干旱程度的相关性最明显, 天然植被区植被覆盖度对气候条件变化响应敏感, 城乡用地区域仅占 1%, 其植被覆盖度与 SPEI 相关性不大, 可能原因是这类区域人类活动影响过大, 与自然环境干旱条件的相关性并不明显。

3 结论与讨论

3.1 讨论

SPEI 具有多尺度特征, 不同时间尺度反映的干旱趋势基本一致, 但 1 个月尺度对干旱趋势的反映并不明显, 尺度越大, 受短期降水和温度的影响越小, 干旱趋势越明显, 这与之前的研究结果一致^[7]。

在干旱、半干旱气候中, 用植被覆盖度和 SPEI 之间的相关系数评估植被覆盖度对气象干旱的响应是最为有效的^[6], 植被覆盖度对气象干旱的敏感性与之前的研究结果一致^[27-28]。不同土地利用/土地覆盖类型的地

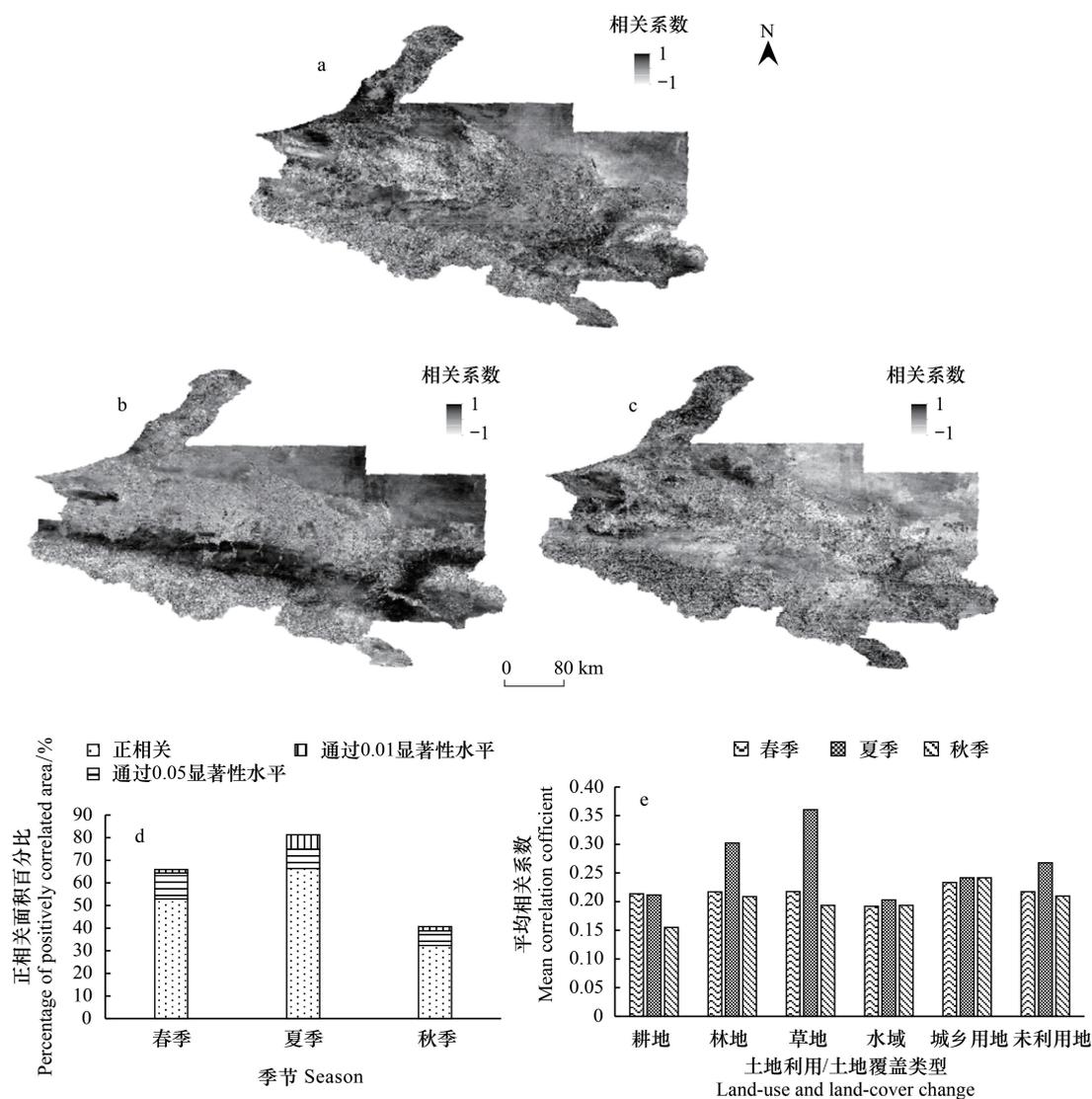


图 12 不同土地利用/土地覆盖类型不同季节植被覆盖度与 SPEI 的平均相关系数

Fig.12 Average correlation between vegetation coverage and SPEI in different seasons

表生态环境存在差异,对气候干旱条件的响应程度不同。本研究从不同土地利用/土地覆盖角度出发分析干旱易发生态系统类型及干旱对植被影响的主导时间尺度,草地对于干旱条件的反应最为明显,干旱易发生,浅根草通常从上层和中层吸收土壤水分,对降雨量的变化有快速的反应^[29],而且,草本植物的木质部系统对水和碳的储存能力较低,因而对干旱的耐受性较差^[30];其次为林地,与草地相比,林地物种根系较深,在严重干旱条件下,可以利用储存在深层土壤中的水^[31],而深层土壤水分随降水变化的时间滞后效应可能导致干旱期延长,从而延缓树木的生长响应^[32]。耕地、城乡用地等由于有人类活动的干扰,对干旱条件的反应较弱,例如,作物改良和节水灌溉技术可以提高用水效率和抗旱能力^[33]。干旱对天山北坡不同土地利用/土地覆盖植被覆盖度影响的主导时间尺度为 3 个月(季尺度)左右,即天山北坡植被活动主要受短时干旱时间尺度的影响。

人类活动影响植被覆盖度从而干扰植被覆盖度与 SPEI 的相关性,从 3.2.2 可以看到,15 年内由于城市扩张,城市周边植被退化,而城市绿洲内部因为城市绿化建设植被改善^[34]。所以,在进行植被覆盖度及变化分析时要考虑人类活动的影响。

3.2 结论

(1) 天山北坡绝大部分区域呈湿润状态,中部(石河子、呼图壁)、西北部(克拉玛依市)呈轻度干旱。3 个

月、6 个月、12 个月时间尺度 SPEI 均表现出干旱化增强的年际变化趋势,时间尺度越大,变化趋势越大。

(2) 天山北坡植被覆盖度整体上属中低覆盖,总体呈南高北低、天山山区、城市绿洲内部高的分布特点。2001—2015 年天山北坡植被覆盖度变化总体呈下降趋势。植被覆盖季节变化明显,夏季植被覆盖度最高。同一季节不同土地利用/土地覆盖类型植被覆盖度差异显著。

(3) 年尺度天山北坡植被覆盖度与气候干旱整体呈正相关关系。不同土地利用/土地覆盖的植被覆盖度与 SPEI12 的相关性不同,大小依次为:草地 > 未利用地 > 城乡用地 > 林地 > 水域 > 耕地,草地、林地等天然植被对气候条件变化较敏感,相关关系显著。

(4) 季节尺度夏季和春季干旱程度对植被覆盖度的影响最明显,不同季节气候干旱对不同土地利用/土地覆盖植被覆盖度影响程度不同,草地、林地、未利用地植被覆盖度对夏季的干旱指数响应最明显,耕地植被覆盖度对春季和夏季干旱指数响应最明显,水域、城乡用地的植被覆盖度对各季节的干旱指数响应相当。

参考文献 (References):

- [1] 贺肖芳. 基于 LUCC 的盐城海岸带植被覆盖度动态变化及生态环境效应研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
- [2] 赵舒怡, 宫兆宁, 刘旭颖. 2001—2013 年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析. 地理学报, 2015, 70(5): 717-729.
- [3] Yao J Q, Zhao Y, Chen Y N, Yu X J, Zhang R B. Multi-scale assessments of droughts: A case study in Xinjiang, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 444-452.
- [4] Qi J G, Bobushev T S, Kulmatov R, Groisman P, Gutman G. Addressing global change challenges for Central Asian socio-ecosystems. *Frontiers of Earth Science*, 2012, 6(2): 115-121.
- [5] Guo H, Bao A M, Ndayisaba F, Liu T, Jiapaer G, El-Tantawi A M, De Maeyer P. Space-time characterization of drought events and their impacts on vegetation in Central Asia. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 1165-1178.
- [6] Xu H J, Wang X P, Zhao C Y, Yang X M. Diverse responses of vegetation growth to meteorological drought across climate zones and land biomes in northern China from 1981 to 2014. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 262: 1-13.
- [7] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. 生态学报, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [8] 崔林丽, 史军, 肖风劲, 范文义. 中国东部 NDVI 的变化趋势及其与气候因子的相关分析. 资源科学, 2010, 32(1): 124-131.
- [9] 李春晖, 杨志峰. 黄河流域 NDVI 时空变化及其与降水/径流关系. 地理研究, 2004, 23(6): 753-759.
- [10] 刘世梁, 田韞钰, 尹艺洁, 安南南, 董世魁. 云南省植被 NDVI 时间变化特征及其对干旱的响应. 生态学报, 2016, 36(15): 4699-4707.
- [11] 宋文杰, 张清, 刘莎莎, 杨江宁. 基于 LUCC 的干旱区人为干扰与生态安全分析——以天山北坡经济带绿洲为例. 干旱区研究, 2018, 35(1): 235-242.
- [12] 国家气象信息中心. 中国气象数据网. <http://data.cma.cn/>. 2012.
- [13] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, California: American Meteorological Society, 1993: 179-184.
- [14] Palmer W C. Meteorological Drought. Research Paper No.45. Washington DC: U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [15] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [16] Zhang Q, Li J F, Singh V P, Bai Y G. SPI-based evaluation of drought events in Xinjiang, China. *Natural Hazards*, 2012, 64(1): 481-492.
- [17] Moreira E E, Paulo A A, Pereira L S, Mexia J T. Analysis of SPI drought class transitions using loglinear models. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(1/2): 349-359.
- [18] 卫捷, 陶诗言, 张庆云. Palmer 干旱指数在华北干旱分析中的应用. 地理学报, 2003, 58(S1): 91-99.
- [19] 卫捷, 马柱国. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较. 地理学报, 2003, 58(S1): 117-124.
- [20] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, Angulo M, El Kenawy A. A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer drought severity index. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(4): 1033-1043.
- [21] Wang H J, Chen Y N, Pan Y P. Characteristics of drought in the arid region of northwestern China. *Climate Research*, 2015, 62(2): 99-113.
- [22] Vicente-Serrano S M, Lopez-Moreno J I, Beguería S, Lorenzo-Lacruz J, SanchezLorenzo A, García-Ruiz J M, Azorin-Molina C, Morán-Tejeda E, Revuelto J, Trigo R, Coelho F, Espejo F. Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(4): 044001.
- [23] T hornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 1948, 38(1): 55-94.

- [24] 张岳军, 郝智文, 王雁, 李明明, 陈二萍, 李芬, 张永瑞. 基于 SPEI 和 SPI 指数的太原多尺度干旱特征与气候指数的关系. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1418-1424.
- [25] 屈瑞洁. 黄淮海平原土地利用/覆盖变化对地表气温的影响[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- [26] 高志强, 刘纪远. 1980—2000 年中国 LUCC 对气候变化的响应. 地理学报, 2006, 61(8): 865-872.
- [27] Yang Q, Li M X, Zheng Z Y, Ma Z G. Regional applicability of seven meteorological drought indices in China. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(4): 745-760.
- [28] Zhang L, Xiao J F, Zhou Y, Zheng Y, Li J, Xiao H. Drought events and their effects on vegetation productivity in China. *Ecosphere*, 2016, 7(12): e01591.
- [29] Knapp A K, Carroll C J W, Denton E M, La Pierre K J, Collins S L, Smith M D. Differential sensitivity to regional-scale drought in six central US grasslands. *Oecologia*, 2015, 177(4): 949-957.
- [30] Craine J M, Ocheltree T W, Nippert J B, Towne E G, Skibbe A M, Kembel S W, Fargione J E. Global diversity of drought tolerance and grassland climate-change resilience. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 63-67.
- [31] Davidson E A, Verchot L V, Cattânio J H, Ackerman I L, Carvalho J E M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 53-69.
- [32] Anderegg W R L, Schwalm C, Biondi F, Camarero J J, Koch G, Litvak M, Ogle K, Shaw J D, Shevliakova E, Williams A P, Wolf A, Ziaco E, Pacala S. Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models. *Science*, 2015, 349(6247): 528-532.
- [33] Deng X P, Shan L, Zhang H P, Turner N C. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. *Agricultural Water Management*, 2006, 80(1/3): 23-40.
- [34] Yang J, Huang C H, Zhang Z Y, Wang L. The temporal trend of urban green coverage in major Chinese cities between 1990 and 2010. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13(1): 19-27.