

DOI: 10.5846/stxb201806291436

王静, 万红莲, 姚顺波. 生长季川陕不同地带植被覆盖对气候变化的时空响应. 生态学报, 2019, 39(14): - .

Wang J, Wan H L, Yao S B. Spatial and temporal response of vegetation cover to climate change in different zones of Sichuan-Shaanxi area during growing season. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): - .

生长季川陕不同地带植被覆盖对气候变化的时空响应

王 静^{1,2,3}, 万红莲^{1,2,*}, 姚顺波³

1 宝鸡文理学院, 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721013

2 宝鸡文理学院地理与环境学院, 宝鸡 721013

3 西北农林科技大学资源经济与环境管理研究中心, 杨凌 712100

摘要:川陕地区处于中国 800mm 等降水量线过渡带的南北两侧,区内分山、川、原 3 种地形,是退耕还林(草)最早实施区域。基于 2001—2014 年的 MODIS、气温和降水量数据,选取 10 种植被地带数据,采用 Sen+MK 检验和时滞偏相关等方法,结合重分类后的 4 种地貌类型和 6 类土地利用/覆盖数据,分年内生长季、年际生长季和非生长季的对比、以及植被生长最好的 8 月与 5 月、6 月、7 月、8 月、5—6 月、6—7 月、7—8 月、5—8 月共 8 个时间段的相关性 3 种时间尺度,对川陕地区植被 NDVI 与气候因子的关系进行了深入探讨。结果表明:1)川陕、陕西和四川年均气温分别以 0.02℃/10a、0.01℃/10a 和 0.03℃/10a(通过 0.01 显著性水平)的线性速度增加,低于近 50 年来(1951—2001 年)全国的气温增速(0.22℃/10a);2)川陕、陕西、四川尺度上,植被 NDVI 与同季气温、降水量的相关性一致,与上季的相关性不具一致性。植被 NDVI 与上季气温、降水量的相关性均高于同季,相较于降水量,与气温呈现出更多的负相关性,其中陕西地区最为显著;3)川陕地区气温变化趋势与全球变暖不同步,植被生长受气温的影响较小或无影响;降水量相较于气温对陕西地区植被生长的影响更大;气温是四川植被生长的主要限制因素。植被覆盖与气温、降水量的相关性在草地、林地和农耕地最为显著。

关键词:植被 NDVI;生长季;气温;降水量;相关性;川陕

Spatial and temporal response of vegetation cover to climate change in different zones of Sichuan-Shaanxi area during growing season

WANG Jing^{1,2,3}, WAN Honglian^{1,2,*}, YAO Shunbo³

1 Shaanxi Key Laboratory of Disasters Monitoring & Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China

2 College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China

3 Northwest A&F Univ., College Economics & Management, Yangling 712100, China

Abstract: Sichuan-Shaanxi area is located in the north and south sides of the transition zone of 800mm isohyet in China. The area is divided into three terrains including mountain, river, and grassland, which is the earliest implementation area of returning farmland to forest (grass). Based on the data of MODIS, temperature, and precipitation in 10 vegetation zones from the year 2001 to 2014, the methods of Sen+MK test and time-delay partial correlation are adopted. Combined with 4 geomorphologic types and 6 types of re-classified land use/cover data, the relationship between the NDVI of the vegetation in Sichuan-Shaanxi zone and climatic factors was discussed at three time scales: the comparison within annual growing season, interannual growing season, and non-growing season, the August with the best vegetation growth, and the correlation of eight periods, including May, June, July, August, May—June, June—July, July—August. The results are

基金项目:国家自然科学基金项目(41601016);教育部人文社科规划基金项目(18YJA810004);退耕还林工程效益监测、评估与优化技术“林业公益性行业科研专项经费资助”(201504424);陕西省哲学社会科学基金项目(2017E003);宝鸡文理学院自然地理学陕西省重点学科基金

收稿日期:2018-06-29; **修订日期:**2019-05-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: <http://www.ecologica.cn>

as follows: 1) The annually average temperature in Sichuan-Shaanxi, Shaanxi, and Sichuan increased linearly at $0.02^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $0.01^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, and $0.03^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (at 0.01 significant level), which was lower than the national growth rate of temperature ($0.22^{\circ}\text{C}/10\text{a}$) in last 50 years (1951—2001); 2) In the areas of Sichuan-Shaanxi, Shaanxi, and Sichuan, the correlation between vegetation NDVI and temperature, precipitation in the same season was consistent, but the correlation with that last season was inconsistent. The correlation between vegetation NDVI and the temperature, precipitation in last season was higher than that in the same season. Compared with the precipitation, the vegetation NDVI showed more negative correlation with temperature, and it was the most significant in Shaanxi; 3) The change of temperature in Sichuan-Shaanxi region showed no same trends with global warming, and the vegetation growth was less or not affected by temperature. The influence of precipitation on vegetation growth in Shaanxi was greater than that of temperature. Temperature is a main limited factor in determining vegetation growth in Sichuan. The correlation between vegetation cover and temperature, precipitation was the most significant in grassland, woodland, and farming area.

Key Words: Vegetation Normal Difference Vegetation Index; growth season; temperature; precipitation; correlation; Sichuan-Shaanxi area

高覆盖的地表植被对区域生态环境、气候等具有一定的调节作用。在生态文明建设大背景下,陆地地表植被覆盖变化会直接或间接的影响局地气候变化及区域生态的平衡^[1],植被覆盖变化是当前生态环境研究的重要内容之一,以归一化植被指数(Normal Difference Vegetation Index, NDVI)的应用最为广泛,能直观反映植被群落的生长态势^[2]。植被 NDVI 的研究尺度中,季尺度的长时间变化监测^[3-9]有利于人类更细致地理解及揭示全球气候变化的规律^[10-12]。

川陕地区是中国退耕还林政策最早实施地区,全国 800m 等降水量线是干旱(陕西)和湿润(四川)的分界线。从地形上来看,依傍秦岭南北,造就了陕西北-南的黄土高原、关中平原、秦岭山地的“南北高、中部低”的独特地形地貌^[13],又有川西高原和川东平原由西向东位于我国第一、第二地形阶梯过渡带的四川^[14]。独特的地理位置以及秦岭显著的垂直地带性植被分布特征,使得该地区拥有丰富多样的植被生态系统类型。因而植被覆盖变化影响机理的比较研究对于该地区具有重要的现实意义。

目前,国内关于 NDVI 与气候因子相关性的研究较多,并多集中在 NDVI 与气候变化的关系探讨方面,而针对不同地带植被生长季 NDVI 的变化特征分析尚不多见。如张善红等^[15]分析了 5 月植被 NDVI 与气温在太白山秦巴山区不同海拔高度地带所占比例的相关性,发现随着海拔的升高,各植被带 NDVI 对温度的变化更为敏感。本研究依据徐振锋^[16]、周靖靖^[17]的研究,划分 5—10 月为植被生长季,选取 MODIS NDVI 数据并结合川陕地区 2001—2014 年 77 个地面气象站点气温降水量数据,采用 Sen+MannKendall 趋势分析和时滞偏相关等方法,结合高程和土地利用/覆盖数据,参考陕西和四川生长季资料^[13-14,18],分 10 种植被地带从年内、年际、月 3 个尺度详细探讨川陕地区植被覆盖与气温和降水量的相关性和滞后效应,并进一步分析 2001 年以来研究区植被覆盖恢复状况,以此解释植被覆盖和气候系统变化机理之间的相互作用,为探究生态修复政策退耕还林(草)实施下植被覆盖对全球气候变化的响应提供案例。

1 研究区概况

川陕地区介于 $97^{\circ}21'E$ — $111^{\circ}15'E$, $26^{\circ}03'N$ — $39^{\circ}35'N$, 包括陕西、四川(东北-西南走向)两省共 276 个(陕西 99 县,四川 178 县)行政区划县(市区)(图 1)。因秦岭山脉的阻隔,研究区从东北到西南(秦岭南北)的气温和降水量差异较大。陕西地处我国西北地区,区内年均温 7 — 16°C ,年降水量由北向南依次为 400 — 600mm (陕北)、 500 — 700mm (关中)、 700 — 900mm (陕南)^[13,19];四川南-北跨青藏高原、四川盆地、秦巴山地几大地貌单元,由川西高山高原、川西南山地(川西和川西南统称川西地区)和川东盆地 3 部分组成。川东地区年均温 15 — 18°C ,川西在 12 — 15°C 之间,年降水量呈西增东减的趋势,平均为 478.91 — 909.59mm (川西 800 —

1000mm, 川东 1000—1200mm)^[14]。

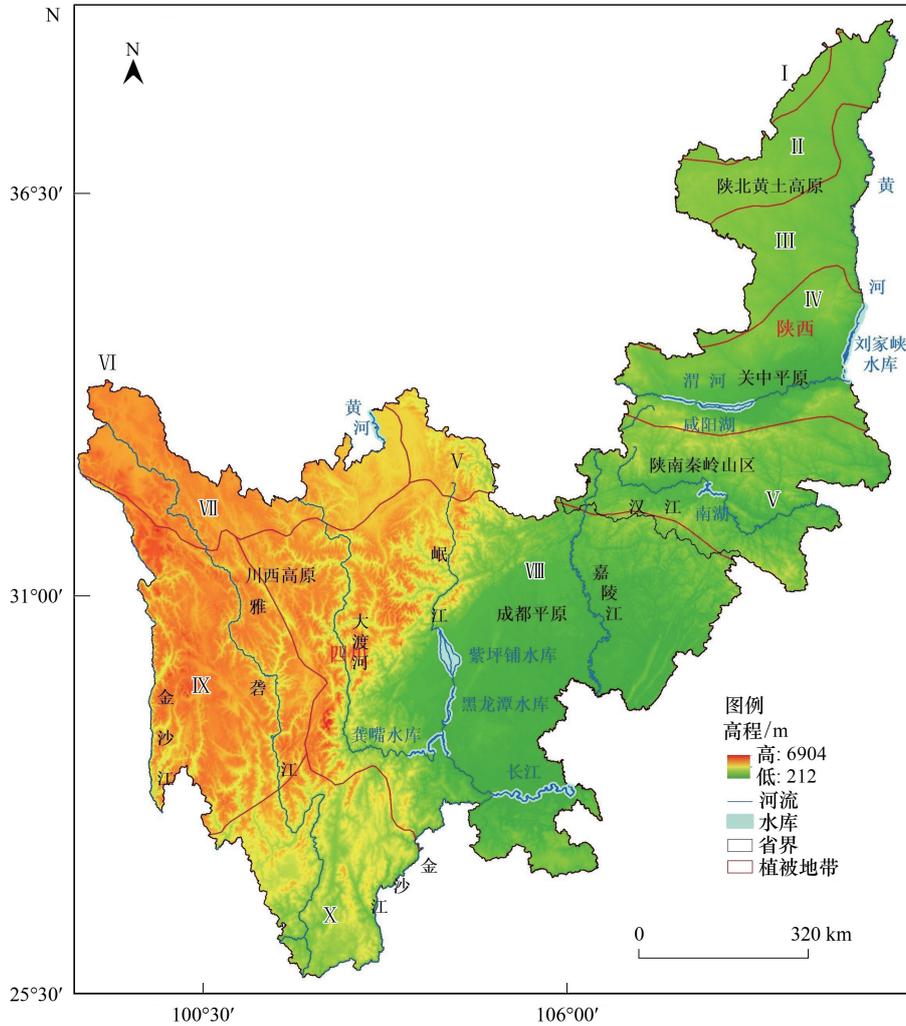


图 1 研究区概况

Fig.1 Study area overview

I. 温带南部典型草原亚地带; II. 温带南部森林(草甸)草原; III. 暖温带北部落叶栎林地; IV. 暖温带南部落叶栎林地; V. 北亚热带常绿、落叶阔叶混交林; VI. 高寒草甸地带; VII. 高寒灌丛、草甸地带; VIII. 中亚热带常绿阔叶林北部亚地带; IX. 亚热带山地寒温性针叶林地; X. 中亚热带常绿阔叶林地; I、II、III、IV、V、VI、VII、VIII、IX、X, 即罗马数字 1—10

2 数据与方法

2.1 数据信息

主要包括气象数据、MODIS NDVI 数据(可表征植被覆盖度、植被生长状态)、高程数据、土地利用/覆盖数据(表 1), 经 ArcGIS 软件处理, 将数据参数统一转换为分辨率 1000m 且为 WGS_1984 投影的月栅格数据。在合成的数据基础上进一步分析川陕地区植被覆盖与水热条件的时滞偏相关、标准化处理、偏相关关系等。

2.2 研究方法

2.2.1 Sen+Mann-Kendall 趋势分析

长时间、持续性过程的变化一般采用时序变化研究, Theil Sen+Mann-Kendall 法是目前植被长时间序列数据变化趋势分析判断的最有效方法^[20-21]。计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (1)$$

式中, i, j 为时间序数; 第 i, j 时间序列的 NDVI 值分别为 NDVI_i 和 NDVI_j 。其中, 当趋势度 $\beta > 0$ 时, 表示气候因子随时序增大而增加, 反之则减少。

表 1 研究所用数据源

Table 1 Data sources in this study

类别 Type	名称 Name				
	气象数据 Meteorological data	MODIS NDVI	高程数据 DEM	植被地带数据 Vegetation zone data	土地利用/覆盖数据 Land use/cover data
来源 Source	气象站点	LP DAAC	地理空间数据云	1:100 万中国植被图	1:10 比例尺专题数据库
数据类型 Data type	气温、降水量	MOD13A3	GDEMDEM	矢量	Landsat TM/ETM
分辨率 Resolution	月	1000m	1000m	/	30m
处理方法 Processing method	CoKriging	MAC	坡度计算	矢量提取	重分类
合成数据 Synthetic data	月气温、降水量空间分布数据	月植被 NDVI 空间分布数据	坡度空间分布数据	川陕地区 10 种植被地带空间矢量数据	川陕地区 6 类土地利用/覆盖类型数据

本研究通过置信度为 0.05 的 Mann-Kendall 检验法^[22]对 Sen 趋势进行检验。

2.2.2 时滞偏相关法

基于 MODIS NDVI 月数据, 在计算植被覆盖与水热条件的响应时剔除了另一个因素的干扰^[23]。偏相关系数计算公式如下:

$$R_{z_{x-y}} = \frac{R_{z_x} - R_{z_y} R_{x_y}}{\sqrt{(1 - R_{z_y}^2)(1 - R_{x_y}^2)}} \quad (2)$$

$$R_{z_{y-x}} = \frac{R_{z_y} - R_{z_x} R_{x_y}}{\sqrt{(1 - R_{z_x}^2)(1 - R_{x_y}^2)}} \quad (3)$$

式中, $R_{z_{x-y}}$ 表示不同时滞下植被覆盖与降水量的偏相关系数; $R_{z_{y-x}}$ 表示不同时滞下植被覆盖与气温的偏相关系数; R_{z_x} 与 R_{z_y} 分别表示不同时滞下植被覆盖与降水量、气温的相关系数; R_{x_y} 表示气温与降水量在不同时滞下的相关系数。

根据经验滞后时间应小于等于时间序列的 1/4, 文中是对生长季月数据的相关分析, 滞后时间最大值取 1。

3 结果分析

3.1 川陕地区生长季年代际植被 NDVI 对气温和降水量的响应

3.1.1 气候因子时空变化及 Sen-M-K 趋势

从时间上来看(图 2a、图 2b), 2008 年和 2009 年分别为 2001—2014 年近 14a 来川陕地区生长季气温和降水量变化趋势的转折点, 2008 年以前气温波动较大, 最低距平(2004 年 $-0.68 \text{ m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$) 偏离正常年的程度大于最高温(2006 年 $0.50 \text{ m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$), 2008 年以来变化较为平稳。2009 年以前降水匮乏, 2009 年以来有逐年增多的变化趋势。最低降水距平(2006 年 $-16.16 \text{ m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$) 偏离正常年的程度小于最高降水(2012 年 $124.71 \text{ m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$)。

2001—2014 年生长季川陕地区年际气温在 $17.79\text{--}19.16\text{ }^\circ\text{C}$ 波动, 呈下降(2001—2003($-0.03\text{ }^\circ\text{C/a}$))

、上升(2003—2006($0.04\text{ }^\circ\text{C/a}$))、下降(2006—2008($-0.04\text{ }^\circ\text{C/a}$))、平稳波动(2008—2014($-0.01\text{ }^\circ\text{C/a}$)) 的变化趋势(图 2a)。川陕、陕西和四川年均气温分别为 $18.47\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $19.57\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $17.61\text{ }^\circ\text{C}$, 以 $0.02\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.01\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.03\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$ (通过 0.01 显著性水平)的线性速度增加, 低于近 50a 来(1951—2001 年)全国的气温增速

(0.22 °C/10a)^[24]。

生长季川陕地区年降水量介于 91.78mm—124.71mm,呈显著下降(2001—2005(-0.08mm/a))、显著上升(2005—2009(0.07mm/a))、较小波动(2009—2014(0.11mm/a))的变化趋势(图 2b)。川陕、陕西和四川年降水量分别为 1124.89mm(0.05mm/10a)、963.52mm(0.13mm/10a)和 1252.49mm(0.02mm/10a)(通过 0.01 显著性水平)。主要是因为川陕分别位于秦岭南北两侧,陕西属于干旱半干旱气候区,因此降水量对区域植被生长的影响更强。四川除川西北高山高原属高寒气候区,水热不足外,其余大部分地区属于亚热带湿润半湿润气候区^[25],因而相较于降水,气温对区内植被生长的影响更为显著。

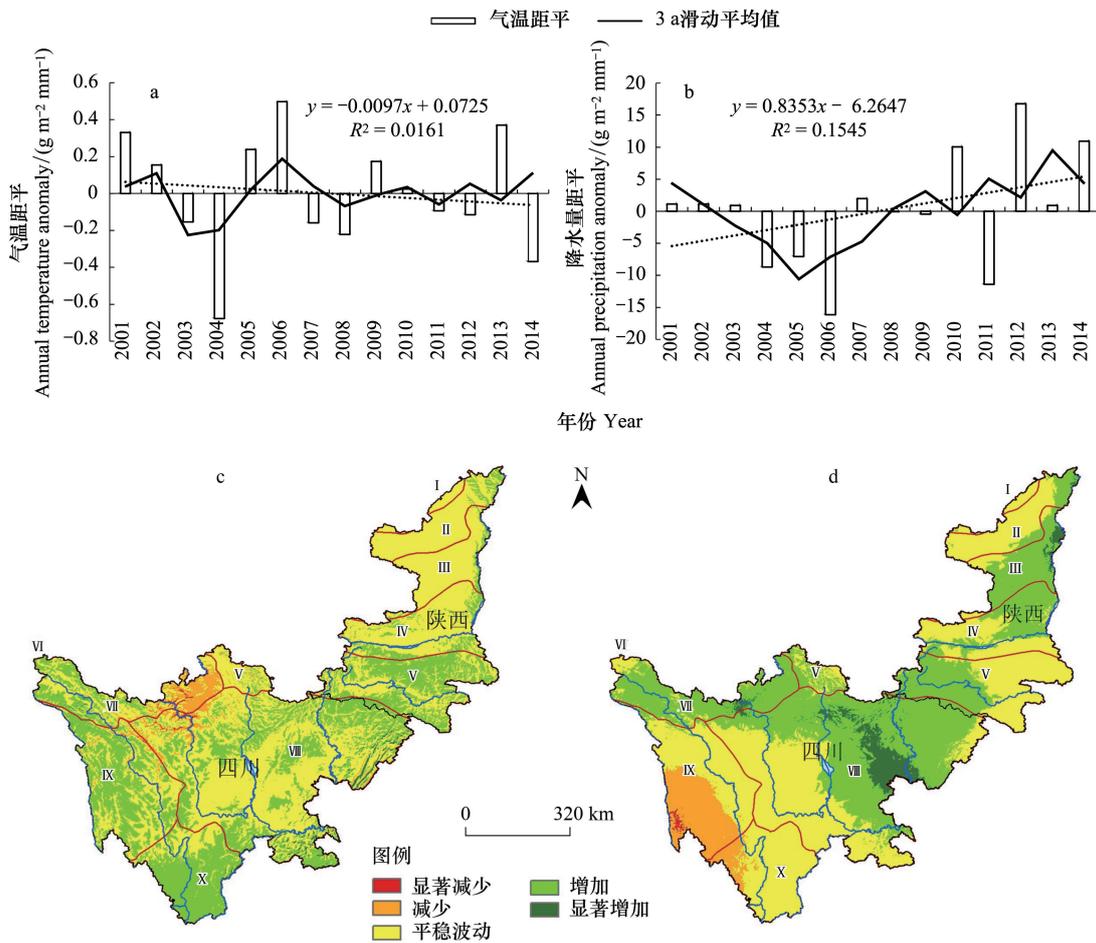


图 2 生长季川陕地区气温和降水量距平及 Sen-M-K 趋势

Fig.2 Temperature and precipitation anomalies and Sen-MannKendall trends in the growing season of Sichuan-Shaanxi area

空间上,气温呈现平稳波动和增加的变化趋势交错分布于宝鸡全区(平稳波动的面积占比为 59.79%,增加为 34.84%)(图 2c),气温降低的区域集中在 VII 的东部地区,面积占比为 4.21%。与气温变化趋势相同(平稳波动的面积占比为 48.02%,增加为 41.05%),降水量平稳波动和增加的变化趋势分布集中(图 2d),前者集中于 I、II、IV 的西部地区、V 的东部地区、VI、VIII 的西部地区、IX 的北部及 X 地带,后者集中在 III、IV 的东部地区、V 的西部地区、VII、VIII 的中东部。其中,显著增加趋势集中于 III 的黄河沿岸和 VIII 的成都平原地区,面积占比为 4.19%。对比图 2c 和图 2d 可知,降水增加的区域气温在降低。从地形地貌角度来看,降水增加区域由北向南依次为关中平原、秦岭山地、成都平原及 VI 和 VII 所处的巴颜喀拉山地区,该区域拥有黄河最大支流渭河、长江上游的重要支流岷江及“2 湖 4 库 1 江”(咸阳湖、南湖、刘家峡水库、紫坪铺水库、黑龙潭水库、龚嘴水库、长江)等水域。由于陕西地区自 1999 年以来退耕地还林(草)面积逐年增加,因此呈现出气温下降、降水量增加的变化趋势。此外,降水量在气温增加的 IX 地带金沙江沿岸表现出减少的变化趋势。与陈媛等^[26]的

研究结果相似,金沙江流域年均气温以 $0.173^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率显著升高(1960—2004年),1980年以后最为明显,年际变化较大;降水年际变化较小,干流下游和支流上游出现降水减少的变化趋势。

3.1.2 植被 NDVI 与气温和降水量的最大时滞偏相关

基于生长季植被 NDVI 与月均温的最大时滞偏相关系数如图 3a 所示。经 ArcGIS 区域统计模块得到两者的相关系数,利用 SPSS 计算其与年均温、年降水量、年均 NDVI 在各植被地带的 Pearson 相关系数,分别为 $-0.117(P>0.1)$ 、 $-0.360(P>0.1)$ 和 $-0.138(P>0.1)$,表明生长季年内植被覆盖与气温相关程度不受年均温、年降水、年 NDVI 空间分布的影响。从各植被地带来看,植被 NDVI 与气温的最大时滞偏相关系数大于 0.5 的区域成片分布于 III、IV、V、VI、VII、VIII 地带,面积占比为 20.63%。这些地区为秦岭山地和四川盆地,水热条件较好,气候条件适宜,植被生长状况良好。陕北黄土高原(II、III 的北部地区)、四川西南边界的唐古拉山脉(IX)及横断山脉(X)地区相关系数小于 0.25,主要原因是国家对于陕北黄土高原(我国生态最为脆弱的地区之一)的防治水土流失、退耕还林(草)工程、天然林保护工程、耕地占补平衡制度等^[22]政策的实施力度较大,人为因素对植被恢复的作用显著,削弱了气候因素的影响。

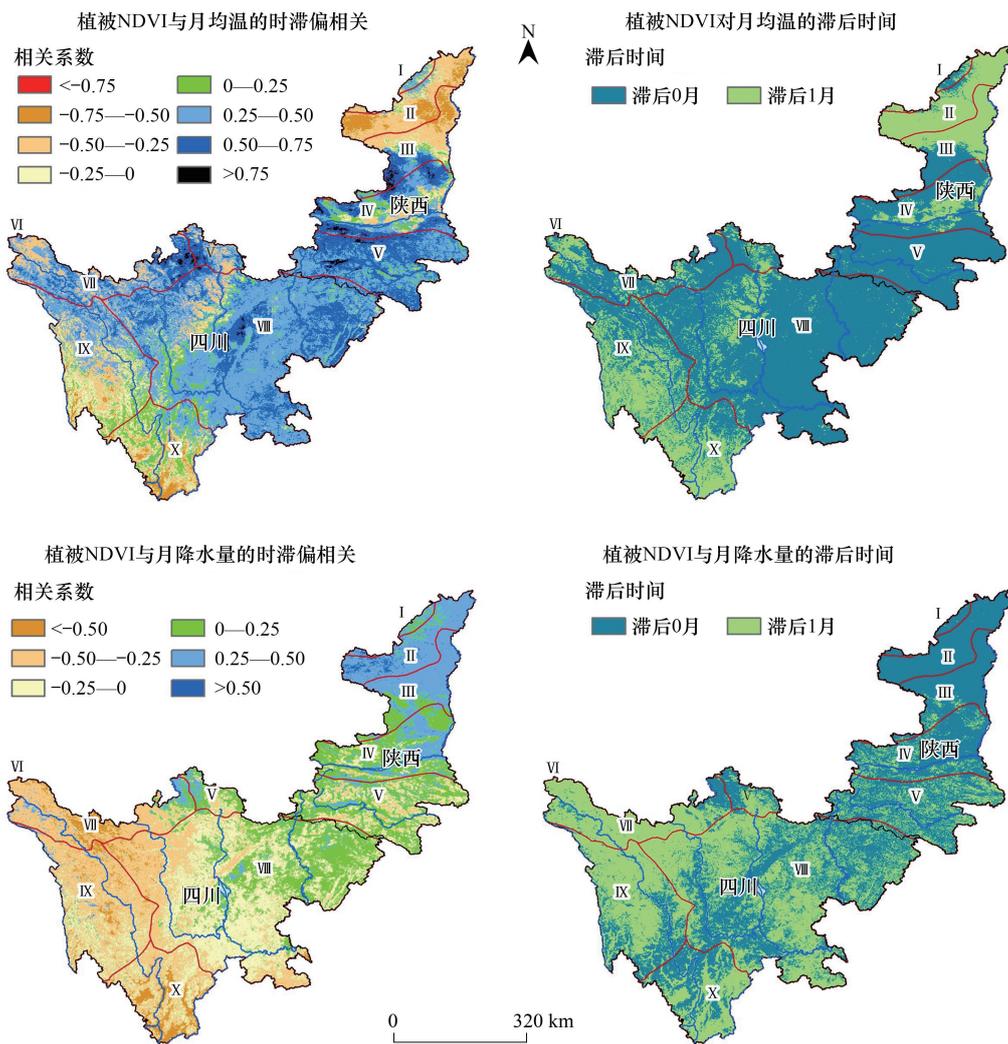


图 3 生长季川陕地区植被覆盖与气温和降水量的最大偏相关系数与滞后时间

Fig.3 Maximum correlation and lag time between vegetation cover and temperature and precipitation in the growing season of Sichuan-Shaanxi area

同图 3a NDVI 与气温的 Pearson 相关系数结果一致,川陕地区生长季年内植被覆盖与降水量的相关程度

(图 3c)不受年气温($-0.003(P>0.1)$)、年降水($-0.148(P>0.1)$)、年 NDVI($-0.088(P>0.1)$)空间分布的影响。NDVI 与降水量的最大时滞偏相关系数大于 0.25 的区域集中分布在 II(陕北黄土高原)、III(关中平原)地带(面积占比 16.86%),干旱的气候条件下,降水会直接增加陕北黄土高原生态脆弱区人工植树造林成活率及覆盖率的效果;关中平原人口密度大,植被表现以农作物种植较为普遍,因此在生长季植被 NDVI 与降水相关性最大。相关系数小于 0.25 的区域集中于大渡河以西川西高原地区,面积占比为 34.07%。

为了进一步探究植被生长对气候变化可能存在的滞后效应,计算 NDVI 对气温(图 3b)和降水量(图 3d)的影响时效,从图 3b、图 3d 来看,滞后 0 月和 1 月的空间分布差异较为明显,滞后 0 月的面积占比分别为 71.15%和 52.34%。其中,植被 NDVI 对气温滞后 1 月的区域集中分布于 II 和 III 的北部地区及 IX 和 X 的金沙江沿岸,为黄土高原(II 和 III)和横断山脉(IX 和 X)地区,近 14a 来黄土高原植被生长季气温平稳波动但降水呈增加趋势,横断山脉气温增加但降水减少甚至呈现显著减少趋势,植被因区内水热空间分布不均衡的影响从而限制了其生长,因此滞后 1 月的面积占比高达 93.63%、61.68%、52.49%、63.23%。秦岭山地(V)、巴颜喀拉山(VI)和四川盆地(VIII)水热条件较好,植被 NDVI 对气温滞后 0 月的面积占比最高,分别为 94.74%、100%和 91.15%。I 地带滞后 0 月和滞后 1 月面积占比相差无几。

植被 NDVI 对降水量滞后 0 月的区域集中在 I(98.87%)、II(99.93%)、III(94.62%)和 IV 的大面积地区(81.48%),滞后 1 月最高面积占比集中于 VI、VII 和 IX 地带,分别为 95.00%、83.41%和 70.93%。V 滞后 0 月的面积占比稍高于滞后 1 月, VIII 和 X 地带滞后 0 月的面积占比稍低于滞后 1 月,但基本处于平衡状态。

3.2 植被-气候季相关性分析

以 ArcGIS 软件为平台,利用像元统计模块得到每年生长季与非生长季的植被 NDVI 值。NDVI 与气温、降水量变化的偶合程度经 SPSS 软件标准化处理获取(图 4)。研究区生长季与非生长季年均气温和年降水量的变化趋势一致,属雨热同期。2001、2005、2011、2013 年生长季及 2004、2005、2010、2012、2013 年非生长季,气温和降水均达到最大值,NDVI 的最大值基本均高于气温和降水量,表明在这些年份雨热同期,植被生长较好;2006 年生长季,气温出现最大值但降水出现最小值,NDVI 的变化与气温变化趋势较为一致,表明 2006 年

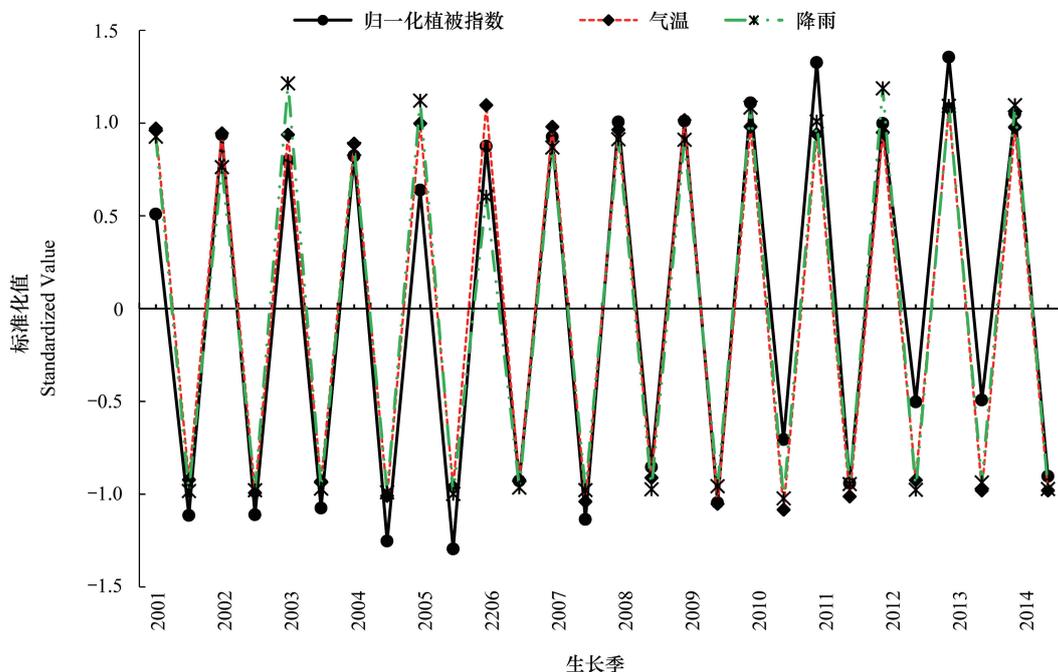


图 4 植被指数与气温、降水量关系

Fig.4 Relationship between vegetation index and temperature and precipitation

NDVI, 即归一化植被指数(Normal Difference Vegetation Index, NDVI); T, 即气温(Temperature); P, 即降水量(Precipitation)

植被生长受气温影响显著;2003 年和 2012 年生长季降水均出现最大值,NDVI 与气温的最大值基本对应,说明气温是植被生长的主要影响因素。

表 2 为川陕、陕西、四川 3 个空间尺度上的 Pearson 相关系数,总体来看,生长季和非生长季植被 NDVI 分别与同季、上季气温和降水量在川陕、陕西和四川 3 个区域尺度上以正相关性为主($P>0.1$)。

从生长季和非生长季与同季、上季气温和降水量的相关性来看,生长季 NDVI 与上季气温在川陕和陕西地区均呈负相关性,与同季降水量在陕西和四川地区均呈负相关性;非生长季 NDVI 在陕西地区与同季、上季降水量均呈负相关性,在四川地区仅与同季降水量呈负相关性。川陕和陕西地区,生长季 NDVI 与上季气温呈负相关,但非生长季 NDVI 与上季气温呈正相关性(尤以陕西地区呈显著正相关性($P<0.05$));陕西地区生长季 NDVI 与同季降水量呈负相关性,但与上季降水量呈显著正相关性($P<0.05$);四川地区生长季和非生长季 NDVI 与同季降水量的相关性陕西地区正负性一致,与上季降水量的相关性陕西地区刚好相反。可见,川陕地区气温变化趋势与全球变暖^[27]不同步,植被生长受气温的影响较小,同时人类对城市的绿化建设、退耕还林(草)工程、封山育林等措施在一定程度上提高了植被覆盖度。

从川陕、陕西、四川 3 个区域尺度来看,植被 NDVI 与气温、降水量同季的相关性一致,上季的相关性不具一致性(降水量仅在川陕地区相关性一致)。植被 NDVI 与上季气温、降水量的相关性均高于同季,相较于降水量,与气温呈现出更多的负相关性,其中陕西地区最为显著。主要是因为陕西地区由北至南依次为干旱区—半湿润区^[13],与西北干旱区相比,水热条件较好^[28],但其北部地处黄土高原中部,土壤蓄水能力差,因此,降水量的驱动作用尤为突出。四川地区为我国的湿润区(年均降水量 800mm 以上),降水量较为充足^[14],对于植被生长而言气温更易成为其主要驱动因素,尤其是在植被生长季。故生长季植被 NDVI 分别与同季和上季的降水量呈负相关性,非生长季均呈正相关性。

表 2 川陕、陕西、四川不同季节的植被 NDVI 与同季、上季气温和降水量的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient of growth season and non-growing season vegetation NDVI and the same season, last season and precipitation in different seasons of whole region, Shaanxi, Sichuan area

季节 Season	同季 Same season T1	上季 Last season T1	同季 Same season P1	上季 Last season P1	同季 Same season T2	上季 Last season T2	同季 Same season P2	上季 Last season P2	同季 Same season T3	上季 Last season T3	同季 Same season P3	上季 Last season P3
生长季 Growing season	0.206	-0.390	0.156	0.496	0.170	-0.042	-0.120	0.576 *	0.163	0.085	-0.122	-0.219
非生长季 Non-growing season	0.082	0.355	0.268	0.342	0.421	0.632 *	-0.143	-0.363	0.379	0.246	-0.500	0.144

T1: 川陕气温;P1 川陕降水量;T2 陕西气温;P2 陕西降水量;T3 四川气温;P3 四川降水量; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

进一步分析川陕地区近 14a 来生长季和非生长季植被 NDVI 变化趋势发现,生长季呈“中部高,两边缘低”的显著变化特征,最高值(NDVI 大于 0.8)集中在南湖沿岸的秦岭山地 V,较高值(NDVI 大于 0.6)几乎遍布全区,面积总占比达 75.52%;非生长季呈“中部高,北(陕)、西北(川)低”,较高值(NDVI 大于 0.6)成片分布在四川盆地,占 26.48%。这与上述数据分析结果吻合。再对比生长季 2001 年和 2014 年植被 NDVI 空间分布数据发现,由关中平原至四川盆地跨 III、IV、V 及 VIII 4 个位于研究区中部的植被地带,14a 来植被覆盖有显著的改善趋势,最高值像元面积百分比由 2001 年的 10.72%增加至 2014 年的 30.06%,较高值由 67.11%增加至 73.14%。由此可见,国家生态恢复相关政策的实施效果较好,但“集中性”过于明显,难以表征整体的恢复特征。因此,除此 4 个植被地带的其余 6 个地带,尤其是川西高山高原和陕北黄土高原地区应加快加大国家生态恢复相关政策的实施力度,从而达到整体改善的目的。

3.3 月气温和降水量对植被覆盖的影响

8 月的植被覆盖最好^[29-30],选取 5 月、6 月、7 月、8 月、5—6 月、6—7 月、7—8 月、5—8 月共 8 个时间段,分别计算 8 月 NDVI 与其气温(图 5)和降水量(图 6)的响应关系。整体来看,植被 NDVI 与气温的相关性呈“四川强陕西弱”的空间分布态势,与降水量呈“陕西强四川弱”的分布特征(均通过 0.05 显著性水平),这与生长

季气候与植被覆盖关系的实际情况相符。

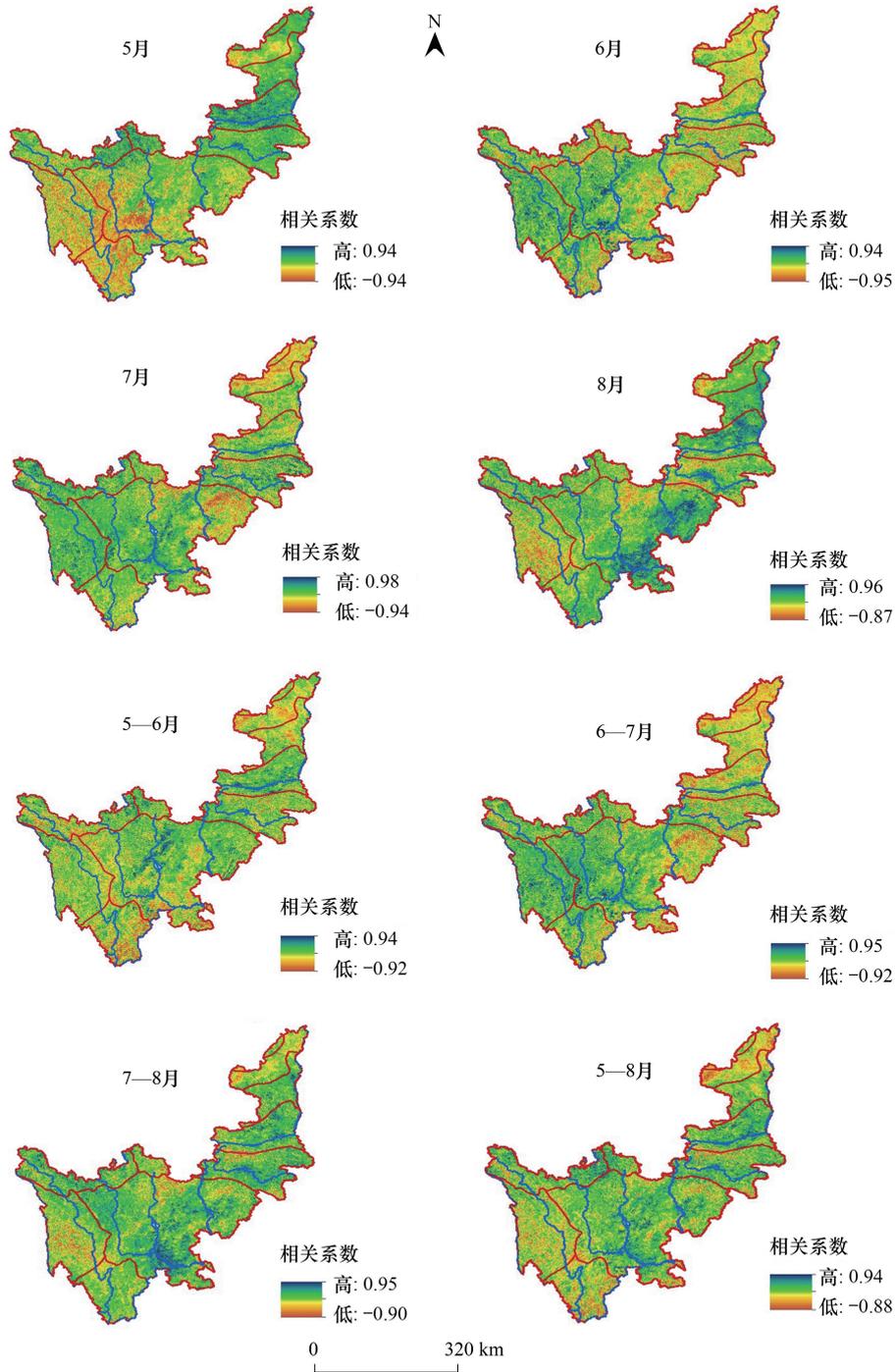


图 5 8月植被 NDVI 与 8 个时间段气温的最大偏相关系数

Fig.5 Maximum correlation coefficient between vegetation NDVI in August and temperature in 8 time periods

海拔是植被生长的基础环境^[31],土地利用类型直接决定植被的覆盖程度^[32]。基于研究区高程数据,结合研究区的地形地貌特征,运用重分类方法将其划分为 212—500m、500—2000m、2000—4000m、4000—6904m 共 4 种海拔高程类型(图 7)。依据国家尺度 1:10 比例尺土地利用/覆盖专题数据库 LUC 数据分类体系,经重分类绘制成 6 类土地利用/覆盖,包括耕地、林地、草地、水域、城乡用地、未利用土地(图 8)。

仅考虑气温(图 9a)、降水量(图 9b)的滞后效应时,7 月和 6 月气温与 8 月 NDVI 呈极显著正相关,面积

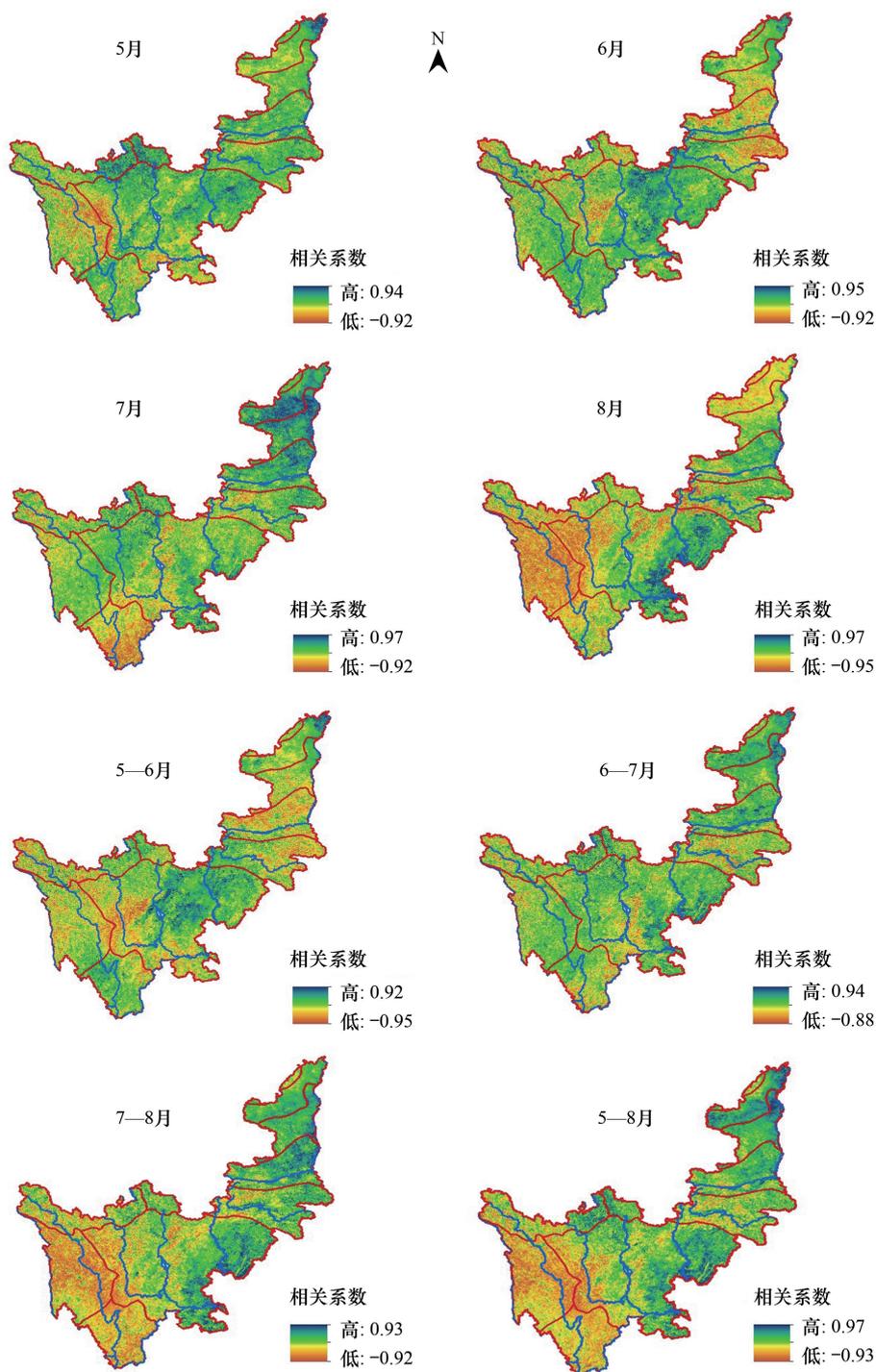


图6 8月植被NDVI与8个时间段降水量的最大偏相关系数

Fig.6 Maximum correlation coefficient between vegetation NDVI in August and precipitation in 8 time periods

占比达7.53%和7.50%,集中分布在Ⅷ大渡河以西及Ⅸ中部草地和林地地区。可见,7月和6月气温对8月植被覆盖影响最大。结合图5、图6,8月植被生长受气温的影响较降水量强烈,尤以7月降水量的负相关性最为显著(占23.80%),集中于海拔较高的陕北黄土高原地区(2000—4000m)的Ⅱ植被地带,土地类型以草地为主,夹杂着零散分布的耕地。

当考虑累积效应时,NDVI与气温(图9c)和降水量(图9d)的相关性均较好,均滞后0—3个月。其中,气温滞后0月(8月)和滞后1月(7—8月)最为显著,降水量滞后1月(7月)和滞后3月(5月)最为显著。这一

结果与图 3b 生长季植被对月均温的滞后时间和图 3d 植被对月降水量的滞后时间的空间数据分析结果基本一致。

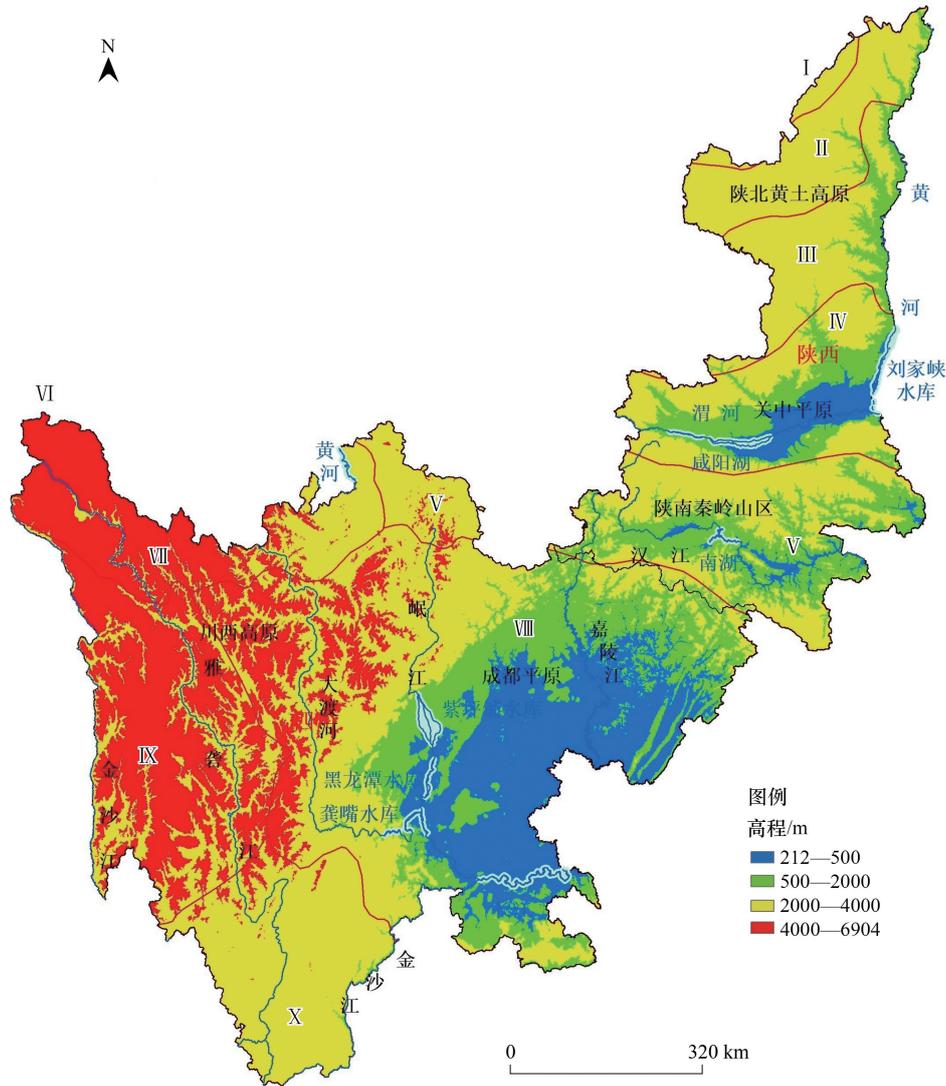


图 7 川陕地区高程重分类图
Fig.7 Reclassify map of the Sichuan-Shaanxi area

总体上,8月植被 NDVI 与气温和降水量在 8 个时间尺度上正相关的面积占比由高到低的空间变化差异较大。其中,与气温的正相关面积占比由高到低依次为 75.77%(8月)、74.08%(7—8月)、59.30%(5—8月)、54.83%(7月)、51.19%(6—7月)、44.07%(6月)、40.49%(5月)、38.62%(5—6月)。结合图 9a 和图 9c 可知,8月 NDVI 与 6月、7月、6—7月气温在 4000—6904m 海拔地带相关性表现最好,与其他月份在 210—500m 和 500—2000m 海拔地带表现最好。8月植被 NDVI 与 5月、5—6月、5—8月气温在城乡用地上的相关性较好,集中分布在 IV 渭河以北及 VIII 岷江沿岸;与 6月、7月、6—7月的气温在水域的相关性较好,集中在 VIII 长江沿岸及 VIII 和 IX 交界的大渡河和雅砻江之间的地区;与 8月、7—8月气温在耕地上的相关性最好,集中在 VIII 大渡河以西及 IX 中部地区。8月 NDVI 与降水量的正相关面积占比由高到低依次为 72.09%(6—7月)、68.21%(7月)、66.38%(5月)、54.46%(6月)、50.21%(5—8月)、47.63%(7—8月)、37.26%(5—6月)、34.34%(8月)。8月植被 NDVI 与降水量在 212—500m 之间的相关性最好,其次为 500—2000m,4000—6904m 海拔高度上的相关性均值波动起伏较大,最高月(7月)和最低月(8月)相差 0.51,与 0 值的增减数值大小基本相同。在 6

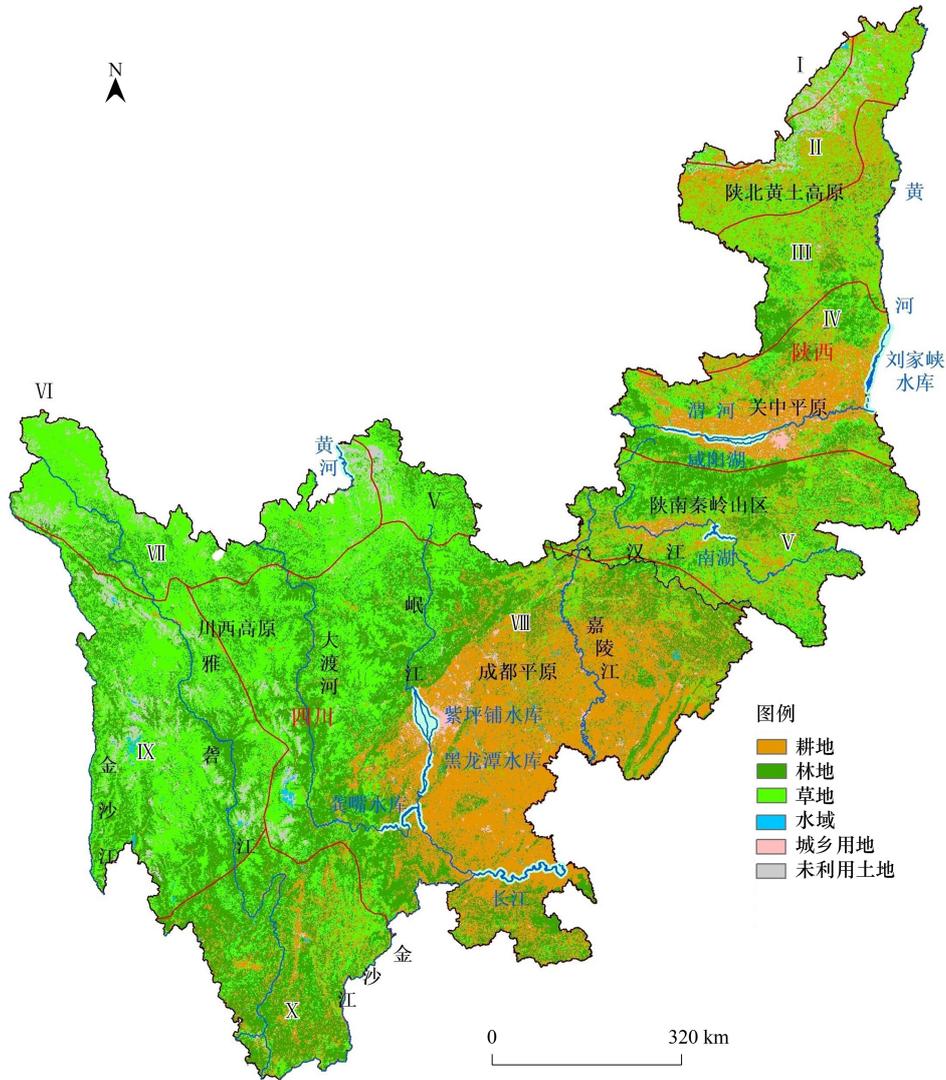


图 8 川陕地区土地利用/覆盖类型图

Fig.8 Land use/land cover map of the Sichuan-Shaanxi area

种土地利用/覆盖类型上,波动也较显著,整体来看,耕地上的相关性最好。

综上所述,植被覆盖高且水热条件较好的农耕区与草地、林地地区,植被 NDVI 均对气温与降水量的年内响应敏感,相反则敏感程度降低。川陕地区植被覆盖的年内变化在陕西地区受降水影响较大,在四川地区主要是由气温主导。川西西北高山高原和川西西南山地地区,陕北黄土高原中部地区,渭河以南的陕南秦岭山地大面积地区,植被在气候因子综合影响下的生长状况较好。

4 讨论

四川和陕西是我国生态修复政策退耕还林(草)最早试点地区,处于中国 800mm 等降水量线过渡带的南北两侧,区内分山、川、原 3 种地形,植被类型丰富多样,对川陕地区气候变化及其对植被覆盖的响应研究可以综合全面的评价第一轮退耕还林(草)政策生态修复效果。本研究选取多尺度下的不同植被地带 2001—2014 年生长季的 MODIS NDVI 数据对植被覆盖时滞进行了分析,与张善红^[15]的 5 月植被 NDVI 时间尺度上的植被 NDVI 与气温的 Pearson 相关研究有所不同。为了表征川陕地区水热条件对植被覆盖的敏感性,选取了 1km 月 NDVI 数据、77 个地面气象站点月气温和降水量数据,更好的反映了生长季植被覆盖对水热条件时空尺度

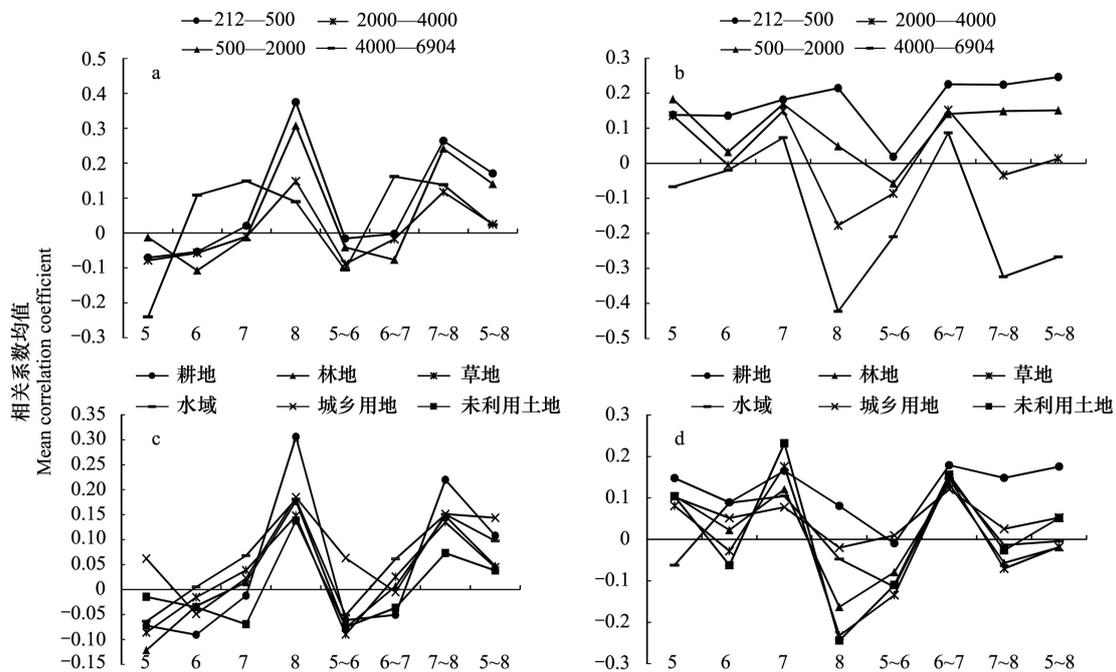


图9 不同海拔(a,b)和不同土地利用/覆盖类型(c,d)的8月植被NDVI与8个时间段气温和降水的相关系数均值

Fig.9 Mean correlation coefficient of vegetation NDVI in August temperature and precipitation in 8 time periods in different altitudes (a and b) and land use/land cover types (c and d)

的响应。同时,文章采用重分类后的4种地貌类型和6类土地利用/覆盖数据,分别与植被NDVI在8个时间尺度上做了进一步的细化研究。从年内、年际、月3个尺度分析,有助于提高研究结果的全面性和普适性。

5 结论

1) 2008年和2009年分别为2001—2014年近14a来川陕地区生长季气温和降水量变化趋势的转折点,2008年以前气温波动较大,2008年以来变化较为平稳。2009年以前降水匮乏,2009年以来有逐年增多的变化趋势。

2) 8月植被NDVI与8月气温呈极显著正相关(26.60%),与8月降水量呈极显著负相关(27.38%)。I、II、III陕北黄土高原地区为干旱半干旱气候,土地利用类型以草地为主,植被稀疏、土质疏松、水土保持效果较差,且7月是植被生长最旺盛的时期,8月植被覆盖度达到最高值,因此8月植被生长受7月降水量和8月气温的影响较强。VIII西南部和IX川西高原地区,紧靠高海拔的唐古拉山脉和横断山脉,遍布着寒温性针叶林,因此气温是8月植被生长的主要限制因素。

3) 时空尺度上,川西西北高山高原和川西西南山地地区、陕北黄土高原中部地区、渭河以南的陕南秦岭山地大面积地区,由于年均温和年均降水量均低于川陕地区平均值,水热条件空间分布不均衡导致了植被与气温在这些地区滞后1月。

参考文献 (References):

- [1] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, Gaillard J M, Tucker C J, Stenseth N C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(9): 503-510.
- [2] 万红莲, 王静. 多尺度下宝鸡地区干旱动态格局演变及其与植被覆盖的关系. *生态学报*, 2018, 38(19): 6941-6952.
- [3] Mao D H, Wang Z M, Luo L, Ren C Y. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 18: 528-536.
- [4] Potter C S, Brooks V. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. *International Journal of Remote*

- Sensing, 1998, 19(15): 2921-2948.
- [5] 张惜伟, 汪季, 高永, 吴颌弟, 丁延龙, 宝成, 阿如汗. 近 15 年呼伦贝尔沙质草原植被覆盖变化对气候因子的响应. 草地学报, 2018, 26(1): 62-69.
- [6] Wang T, Lu Y. Spatial and temporal changes in inter-annual and seasonal NDVI in the Qinling mountains of China. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 94: 012-034.
- [7] 王静, 万红莲, 张翀. 2001-2013 年宝鸡地区植被 NDVI 对气温和降水量的季节响应特征. 水土保持通报, 2017, 37(5): 235-240.
- [8] 武正丽, 贾文雄, 赵珍, 张禹舜, 刘亚荣, 陈京华. 2000-2012 年祁连山植被覆盖变化及其与气候因子的相关性. 干旱区地理, 2015, 38(6): 1241-1252.
- [9] 宋富强, 康慕谊, 杨朋, 陈雅如, 刘阳, 邢开雄. 陕北地区 GIMMS, SPOT-VGT 和 MODIS 归一化植被指数的差异分析. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 72-80.
- [10] 谢建群, 欧阳禹杰, 陈秀芸, 赵美霞, 陈特固. 1880-2015 年汕头降水量变化趋势与全球气候变暖的关系. 热带地理, 2016, 36(6): 895-900.
- [11] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.
- [12] 成方妍, 刘世梁, 尹艺洁, 吕一河, 安南南, 刘昕明. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其主要驱动因素. 生态学报, 2017, 37(3): 788-797.
- [13] 何艳芳, 张晓. 陕西省 1980-2006 年气候变化时空特征研究. 干旱区资源与环境, 2011, 25(11): 59-63.
- [14] 杜华明, 延军平. 四川省气候变化特征与旱涝区域响应. 资源科学, 2013, 35(12): 2491-2500.
- [15] 张善红, 白红英, 高翔, 贺映娜, 任园园. 太白山植被指数时空变化及其对区域温度的响应. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1377-1386.
- [16] 徐振锋. 川西亚高山林线交错带典型优势物种物候与生长对模拟增温的初期响应[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.
- [17] 周靖靖. 刺槐林叶面积指数特征及其遥感影像反演[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [18] 张君, 延军平. 1982-2013 年陕西不同植被类型 NDVI 变化特征分析. 干旱区资源与环境, 2017, 31(4): 86-92.
- [19] 李登科, 范建忠, 王娟. 陕西省植被覆盖度变化特征及其成因. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2896-2903.
- [20] Theil H. A rankinvariant method of linear and polynomial regression analysis I. Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie Wetenschappen, Series A Mathematical Sciences, 1950, 53: 386-392.
- [21] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [22] Kendall M G. Rank Correlation Methods. London: Griffin, 1970.
- [23] 张翀, 任志远, 韦振锋. 近 12 年来黄土高原植被覆盖对年内水热条件的响应. 资源科学, 2013, 35(10): 2017-2023.
- [24] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 初子莹, 张莉, 邹旭凯, 李庆祥, 刘小宁. 近 50 年中国地面气候变化基本特征. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956.
- [25] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2007.
- [26] 陈媛, 王文圣, 王国庆, 王顺久. 金沙江流域气温降水变化特性分析. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 51-56.
- [27] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G, Nemani R R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. Nature, 1997, 386(6626): 698-702.
- [28] 崔林丽, 史军, 杨引明, 范文文. 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.
- [29] 王茜, 陈莹, 阮玺睿, 李小冬, 王小利, 史健宗, 王志伟. 1982-2012 年中国 NDVI 变化及其与气候因子的关系. 草地学报, 2017, 25(4): 691-700.
- [30] 蒲蕾, 任志远. 陕西省不同地区 NDVI 变化与气候因子的关系及响应研究. 水土保持通报, 2013, 33(2): 265-269, 275-275.
- [31] 赵海迪, 刘世梁, 董世魁, 苏旭坤, 张翔. 基于植被覆盖度的藏羚羊栖息地时空变化研究. 生态学报, 2014, 34(12): 3285-3292.
- [32] Zhang D J, Jia Q Q, Xu X, Yao S B, Chen H B, Hou X H. Contribution of ecological policies to vegetation restoration: a case study from Wuqi county in Shaanxi province, China. Land Use Policy, 2018, 73: 400-411.