

秦岭陕西段南北坡植被对干湿变化响应 敏感性及其空间差异

齐贵增^{1,2,3}, 白红英^{1,2,3}, 赵 婷^{1,2,3}, 孟 清^{1,2,3}, 张善红^{1,2,3}

(1. 西北大学陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 2. 西北大学秦岭研究院, 西安 710127; 3. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: 秦岭位于暖温带与亚热带交界处, 也是中国南北地理分界线, 秦岭南北坡植被对干湿变化响应敏感性, 可以折射出暖温带、亚热带地区主要植被类型对干湿变化的响应规律和机制特征, 对深入理解不同气候带植被变化规律具有重要意义。本文利用秦岭山地 32 个气象站点的气象数据和 MODIS NDVI 时间序列数据集, 探讨了 2000—2018 年秦岭南北坡 NDVI 和 SPEI 时空变化特征, 揭示了南北坡植被对干湿变化响应敏感性及其空间差异。结果表明: ① 2000—2018 年秦岭植被覆盖情况整体显著改善, 但秦岭南坡 NDVI 上升幅度和面积占比均高于北坡, 南坡植被比北坡改善情况好。秦岭湿润化趋势不显著, 但秦岭北坡湿润化速率和面积占比均大于南坡。② 秦岭北坡植被比南坡植被更易受干湿变化影响, 秦岭北坡植被对 3—6 月总体干湿变化最为敏感, 南坡植被对 3—5 月 (春季) 干湿变化最为敏感。秦岭南北坡植被主要受 3~7 个月尺度干湿变化影响, 对 11~12 个月尺度的干湿变化响应较弱。③ 秦岭有 90.34% 的区域 NDVI 与 SPEI 呈正相关, 大部分地区春季湿润化能促进全年植被生长; 随海拔上升, 植被对干湿变化响应敏感性先上升再下降, 海拔 800~1200 m 是植被响应最敏感的海拔段, 海拔 1200~3000 m 随海拔上升植被响应敏感性下降; 南北坡草均是对于干湿变化响应最为敏感的植被类型, 但秦岭北坡多数植被类型对干湿变化响应比南坡敏感。

关键词: 秦岭陕西段; NDVI; SPEI; 敏感性; 空间差异

DOI: 10.11821/dlxb202101004

1 引言

植被是陆地生态系统的重要组成部分, 其在大气、土壤和水分等相互调节和生态系统服务优化等方面都发挥着重要的作用^[1-2]。植被与气候变化之间具有密不可分的联系, 植被不仅可以反映气候变化趋势, 同时也对气候变化具有一定适应性^[3], 因此植被对气候变化具有很好的指示作用^[4]。目前归一化植被指数 (NDVI) 是较为常用的一种反映植被生长状况的指数, 与植被初级生产力、叶面积指数等密切相关, 能够较好的地反映植被覆盖情况和生长状况^[5], 在植被时空变化及其对气候波动响应的研究中已得到了广泛应用。已有研究表明在全球气温持续升高的背景下, 水循环加快, 同时地表蒸发、植物蒸腾等水分平衡过程也发生改变^[6], 干旱发生频率、严重程度和持续时间出现显著的上升趋势

收稿日期: 2019-12-02; 修订日期: 2020-10-21

基金项目: 陕西省重点研发计划(2019ZDLSF05-02, 2020SF-400); 陕西省水利科技计划(2020slkj-13) [Foundation: Key Research and Development Program of Shaanxi Province, No.2019ZDLSF05- 02, No.2020SF- 400; Shaanxi Province Water Conservancy Science and Technology Project, No.2020slkj-13]

作者简介: 齐贵增(1994-), 男, 硕士, 主要从事区域气候变化与植被响应方向研究。E-mail: 1553271382@qq.com

通讯作者: 白红英(1962-), 女, 博士, 教授, 主要从事全球变化生态学、自然地理学。E-mail: hongyingbai@163.com

势^[7-8]。干湿变化对植被生长产生的影响越来越明显, 已成为当今研究的热点问题。目前常用标准化降水蒸散指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)^[9]来表征干湿状况, 其具备帕尔默干旱指数 (Palmer Drought Severity Index, PDSI)^[10]对温度的敏感度和标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI)^[11]多尺度特征的优点, 在很多地区都能够较为准确评估区域干湿变化特征^[12-14], 因此选用 SPEI 指数并结合 NDVI 指数来探究植被对干湿变化响应敏感性。

很多学者针对不同区域植被与气候因子之间的关系进行了研究, 结果表明在中国北方地区和青藏高原地区水分是对 NDVI 控制较显著的气候因子, 在华东、华中及西南地区则是温度起主导作用, 升温加快会通过加剧干旱等机制对植被生长产生抑制效果^[2]。中国大多数地区 SPEI 等干旱指数上升都对 NDVI 具有促进作用, 中高海拔地区尤为显著, 但长江流域东南部、珠江流域下游等降水相对丰沛区域和黑龙江东北部等高寒区域 NDVI 受 SPEI 影响较小^[15]。华北地区的草原和中高海拔区域植被对 SPEI 响应敏感^[16], 在季节上华北地区夏季干湿变化对植被影响最大^[16]; 而在天山北坡春季和夏季干湿变化对植被影响最为明显^[17]。以上研究表明不同区域植被对气候响应存在显著时空差异, 但中国南北过渡带不同气候条件下植被对气候变化响应机制及其存在的差异尚不明朗。

秦岭处于温带季风气候和亚热带季风气候交界处, 也是中国重要的南北地理分界线, 其南北气候带和植被带变化差异显著^[18], 使得秦岭山地成为小区域视角下研究不同气候带植被对气候变化响应规律的理想地区。本文基于秦岭南北坡 2000—2018 年 MODIS NDVI 遥感数据集和 32 个气象站点的气象数据, 探讨了秦岭南北坡植被 NDVI 和 SPEI 指数时空变化、植被对干湿变化响应敏感性及其空间差异, 可以由此折射出亚热带、暖温带地区主要植被类型对干湿变化的响应规律和机制特征, 以期为秦岭生态文明建设 and 生态系统对气候波动响应研究提供科学依据。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究区概况 with 数据来源

本文中秦岭指狭义的秦岭, 即秦岭陕西省部分, 介于 32°40'N~34°35'N 和 105°30'E~111°3'E, 总面积 6.19 万 km², 海拔 195~3767.2 m。秦岭山地为气候变化敏感区域^[18], 也是中国南北地理分界线, 大体与年 800 mm 等降水量线、1 月 0 °C 等温线和 2000 h 日照时数线基本一致, 秦岭北麓陡峭, 为暖温带半湿润气候, 南麓缓长, 为北亚热带湿润气候^[19-21]。

气象数据由陕西省气象局和中国气象数据网提供 (<http://data.cma.cn/>), 并进行了一致性检验和质量控制, 包括 2000—2018 年秦岭南北坡 32 个气象站点的月平均气温和月降水量数据和 2013—2015 年太白山高海拔 11 个气象站点气象数据 (用于空间插值检验)。气象站点分布如图 1 所示。DEM 数据源于国家测绘局, 其空间分辨率为 25 m×25 m。

2000—2018 年归一化植被指数来自美国国家航天局 (NASA) MOD13Q1 (MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid) 产品的 MODIS NDVI 数据集, 空间分辨率为 250 m×250 m, 时间分辨率为 16 d。采用 MRT 进行图像拼接、投影和格式转换, 利用最大合成法 (Maximum Value Composite, MVC) 能有效消除云、大气和太阳高度角产生的影响合成月 NDVI 数据^[22]。植被覆盖类型数据是由中国科学院资源环境科学数据中心提供 (<http://www.resdc.cn>), 其分辨率为 1:10 万。

2.2 研究方法

(1) 本文多时间尺度干湿变化表达如下: SPEI-1 (1 个月尺度) 为月干湿水平,

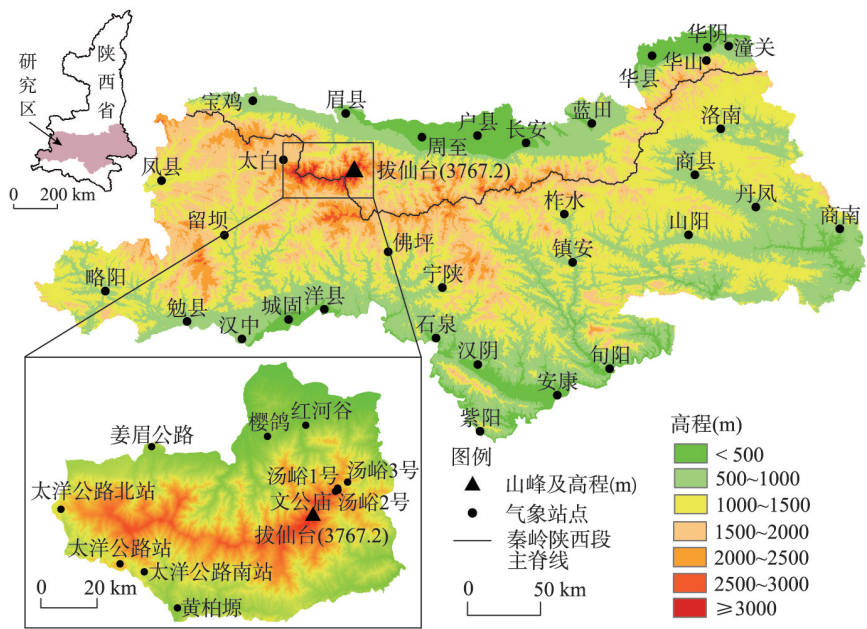


图 1 秦岭南北坡范围及气象站点的分布

Fig. 1 Geographical environment and distribution of meteorological stations on the southern and northern slopes of the Qinling Mountains

SPEI-3 为季节干湿水平, SPEI-4 为 4 个月尺度干湿水平, SPEI-12 为年干湿水平^[23]。如 5 月份 SPEI-3 表示春季 (3—5 月) 综合干湿水平、6 月份 SPEI-4 表示 3—6 月综合干湿水平。

SPEI 指数的空间分布采用 ANUSPLIN 法插值获得^[24]。ANUSPLIN 法空间插值适用于气象要素插值处理^[25], 在复杂山地环境下插值精度误差小^[26], 目前, 此方法在秦岭山地为较为优秀的插值方法^[27], 同时 ANUSPLIN 法对 SPEI 指数空间插值也有很好的应用^[28], 因此本文选用了 ANUSPLIN 法对秦岭 SPEI 指数进行空间插值。依据秦岭山地气候特征本研究春季为 3—5 月, 夏季为 6—8 月, 秋季为 9—11 月, 冬季为 12—次年 2 月。

采用 2013—2015 年太白山 11 个气象站点 SPEI 值, 通过平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 对空间插值精度进行检验。MAE 和 RMSE 值越小, 表明空间插值结果越优秀^[29]。结果表明, 年 SPEI 和春季 SPEI 空间插值精度较高, 符合本研究所需 (表 1)。

(2) 对 NDVI 和 SPEI 指数采用一元线性回归趋势分析方法计算其倾向率, 并分析其显著性, 其倾向率计算公式为:

$$slope = \frac{n \sum_{i=1}^n ix_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \tag{1}$$

表 1 秦岭南北坡 SPEI 空间插值验证结果

Tab. 1 Results of SPEI spatial interpolation on the southern and northern slopes of the Qinling Mountains

年份	MAE		RMSE	
	年插值检验	春季插值检验	年插值检验	春季插值检验
2013	0.137	0.140	0.171	0.173
2014	0.043	0.062	0.064	0.093
2015	0.240	0.343	0.318	0.449

式中: n 为时间序列; x_i 为第 i 年的值 (NDVI 或 SPEI 指数); 其中 $slope > 0$ 或 $slope < 0$ 表示 x 呈现上升或下降趋势。

(3) 基于站点数据和像元尺度判断两个变量之间是否具有相关性或相关性的大小, 其计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中: R_{xy} 表示变量 SPEI 与变量 NDVI 之间的相关系数; x_i 表示变量 SPEI 第 i 年的值, y_i 表示变量 NDVI 第 i 年的值, \bar{x} 、 \bar{y} 分别表示变量 SPEI、NDVI 的平均值。

变化趋势和相关性检验均采用 t 检验确定显著性, 其结果划分为极显著 ($p \leq 0.01$)、显著 ($0.01 < p \leq 0.05$)、弱显著 ($0.05 < p \leq 0.1$) 和不显著 ($p > 0.1$) 4 个等级。

3 结果与分析

3.1 秦岭南北坡年 NDVI 和年 SPEI 空间变化特征

图 2 为 2000—2018 年秦岭南北坡年 NDVI 倾向率及显著性空间分布图。由图 2a 可知, 2000—2018 年秦岭年 NDVI 变化速率为 $-0.37 \sim 0.21 / 10a$, 其中有 90.88% 的区域为上升趋势, 仅有 9.12% 的区域为下降趋势 (南北坡两侧低海拔、地势平缓地带, 以北坡长安、户县和南坡汉中、安康等地为代表)。通过显著性检验得出 (图 2b), 秦岭共有 72.36% 的区域年 NDVI 上升趋势达到显著性, 表明秦岭植被覆盖情况改善显著。

秦岭北坡年 NDVI 平均变化速率为 $0.017 / 10a$, 其中有 79.31% 的北坡区域为上升趋势, 呈显著性上升的区域占比为 53.15%; 秦岭南坡年 NDVI 平均变化速率为 $0.031 / 10a$, 有 93.92% 的南坡区域为上升趋势, 呈显著性的上升区域占比为 77.39%。2000—2018 年秦岭南坡 NDVI 上升幅度和面积占比都要高于北坡, 植被改善情况南坡比北坡明显。

图 3 为 2000—2018 年秦岭南北坡年 SPEI 倾向率及显著性空间分布图, 由图 3a 可知, 秦岭年 SPEI 倾向率为 $-0.54 \sim 0.77 / 10a$, 有 74.68% 的区域为上升趋势, 有 25.32% 的区域为下降趋势, 表明 2000—2018 年秦岭湿润化面积远远高于干旱化面积。

由显著性空间分布 (图 3b) 可知, 秦岭有 96.63% 的区域 SPEI 为不显著变化。由南北坡对比可得, 秦岭北坡年 SPEI 平均变化速率为 $0.13 / 10a$, 有 87.18% 的北坡区域 SPEI

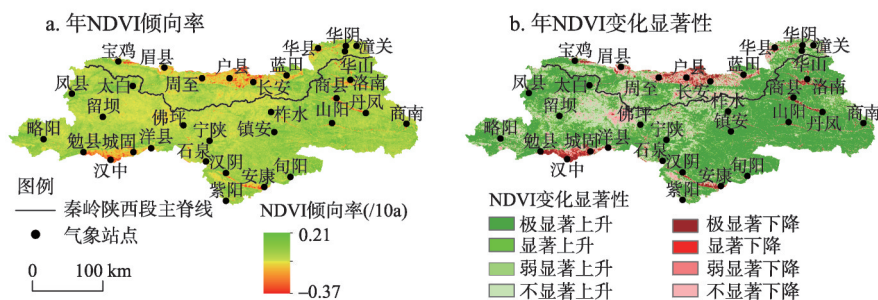


图 2 2000—2018 年秦岭南北坡 NDVI 倾向率及显著性空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of trend and the significance for NDVI on the southern and northern slopes of the Qinling Mountains during 2000-2018

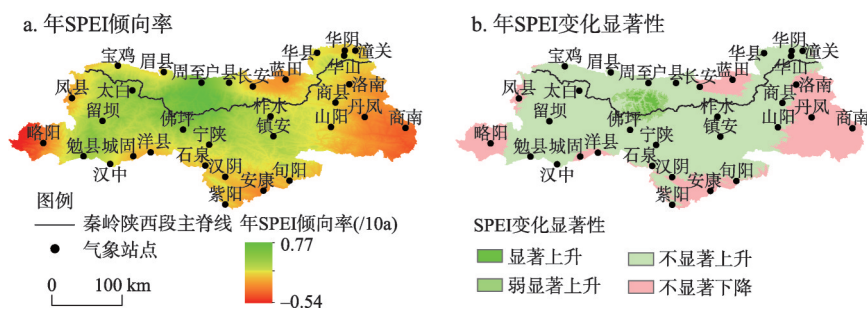


图3 2000—2018年秦岭南北坡年SPEI倾向率及显著性空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of trend and significance for SPEI on the southern and northern slopes of the Qinling Mountains during 2000-2018

为上升趋势；秦岭南坡年SPEI平均变化速率为0.022 /10a，有71.43%南坡区域SPEI为上升趋势。以上表明秦岭整体干湿变化较为稳定，湿润化趋势不显著，但秦岭北坡湿润化速率及面积占比都大于南坡。

3.2 秦岭南北坡植被对多尺度干湿变化响应敏感性差异

图4为2000—2018年秦岭南北坡年NDVI与各月多尺度SPEI相关性平面及立体图。由图4a和图4b可知，秦岭南北坡植被对多时间尺度干湿变化响应存在明显规律性：南北坡正相关主要集中于3—7月份，负相关主要集中在1、2和8—12月份；正相关达到显著性的主要为5月份和6月份的3~7个月尺度；随SPEI月份变化，相关性由负相关转为正相关再转为负相关，随SPEI时间尺度的增大，相关性减弱。表明秦岭南北坡植被生长主要受5月份和6月份中短时间尺度（3~7个月）干湿变化影响，受长时间尺度（11~12个月）干湿变化影响较小。

由图4a和图4b对比可知，秦岭北坡和南坡植被对干湿变化响应敏感性存在差异。秦岭北坡年NDVI对干湿变化响应呈显著或极显著的月份和尺度明显多于南坡；北坡NDVI与各月多尺度SPEI相关性呈显著或极显著关系主要集中在6月份的不同时间尺度，而南坡主要集中在5月份。以上表明秦岭北坡植被比南坡植被对不同月份多尺度干湿变化响应更为敏感，北坡植被主要受6月份多尺度干湿变化影响，而南坡植被主要受5月份多尺度干湿变化影响严重。

由SPEI单月尺度可知，图4a和图4b第一列分别为秦岭北坡和南坡年NDVI与单月SPEI（SPEI-1）相关系数，秦岭北坡年NDVI分别与3月、4月、5月和6月的SPEI-1均呈明显正相关且3月SPEI-1与年NDVI相关关系达到显著性，但从7月开始转为负相关；南坡年NDVI分别与3月、4月和5月的SPEI-1均呈明显正相关且5月SPEI-1与年NDVI相关关系达到显著性，6月开始转为负相关。因此在单月尺度的干湿变化中，秦岭南北坡植被对干湿变化响应差异主要为：秦岭北坡，3月湿润化能显著促进植被生长，7月及以后湿润化会抑制植被生长；秦岭南坡，5月湿润化会显著促进植被生长，6月及以后湿润化会抑制植被生长。

由SPEI多月尺度可知（图4a和图4b的第2~12列），秦岭北坡年NDVI与6月份SPEI-4（3—6月综合干湿水平）相关系数最高且呈极显著正相关（ $r = 0.68$, $p \leq 0.01$ ）。年NDVI与6月份SPEI-5和SPEI-6也均呈极显著正相关，但相关系数有所减小，因为6月份SPEI-5（2—6月综合干湿水平）包括6月份SPEI-4（3—6月综合干湿水平），所以表现出极显著正相关；秦岭南坡年NDVI与5月份SPEI-3（春季SPEI，3—5月综合干湿水平）

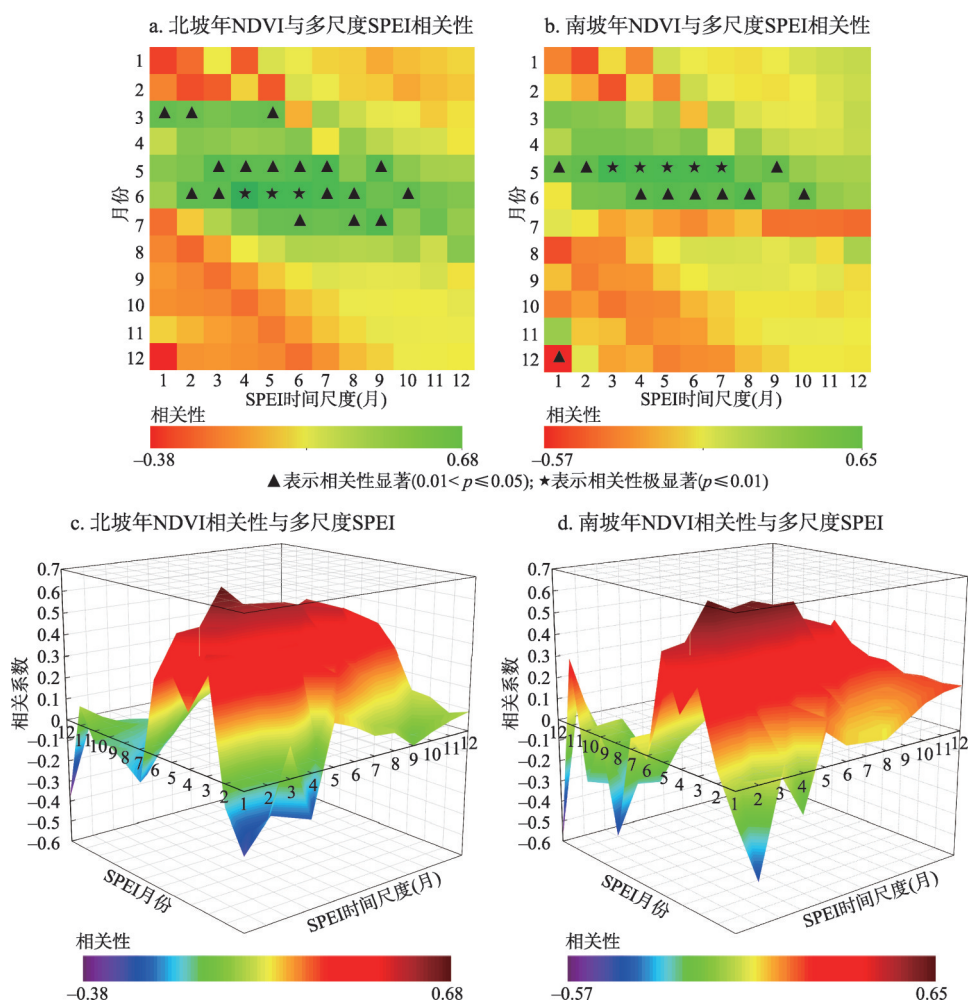


图4 年NDVI与各月份多尺度SPEI相关性

Fig. 4 Correlation coefficients between annual NDVI and SPEI of each month

相关系数最高且呈极显著正相关 ($r = 0.65$, $p \leq 0.01$), 而5月份SPEI-4、SPEI-5、SPEI-6及SPEI-7也是由于包括春季SPEI的原因表现为极显著正相关。以上表明秦岭北坡植被生长对3—6月总体干湿变化最为敏感, 南坡植被生长对春季(3—5月)干湿变化最为敏感。此结论与树木年轮学研究得出3—6月气候因子与秦岭天然林径向生长最为密切且对秦岭地区全年NPP影响显著的结论一致^[30-32]。

为更加全面揭示秦岭南北植被生长与各月多尺度干湿情况的关系, 将其相关系数图做三维处理, 由图4c和图4d可得, 秦岭南北坡年NDVI与3—7月份多时间尺度SPEI均呈正相关, 与1—2月份和8—12月份的多时间尺度SPEI呈负相关, 但秦岭北坡正相关系数变化幅度大于南坡, 而南坡负相关系数变化幅度大于北坡, 由此可知, SPEI上升对北坡年NDVI促进作用较为明显, 对南坡年NDVI抑制作用较为明显。

综上所述, 秦岭北坡植被对6月SPEI-4总体干湿变化最为敏感, 3—6月是植被生长关键期; 南坡植被对5月SPEI-3干湿变化最为敏感, 3—5月(春季)是植被生长关键期。秦岭南北植被生长主要受中短时间尺度(3~7个月)干湿变化影响, 受长时间尺度(11~12个月)干湿变化影响较弱。

3.3 秦岭南北坡植被对干湿变化响应空间差异

3.3.1 秦岭南北坡 NDVI 与 SPEI 相关性空间分布 由上文可知秦岭南北坡植被生长对干湿变化响应在时间尺度上存在差异,为进一步探讨其空间差异,选取了秦岭南北坡年 NDVI 与春季 SPEI (5月 SPEI-3) 相关性做进一步分析。探讨秦岭南北坡植被生长对干湿变化响应空间差异,需要选取相同 SPEI 的时间尺度,以更加准确反映空间差异性,且秦岭南北坡年 NDVI 与其春季 SPEI 相关性均达到显著,因此以春季 SPEI 与年 NDVI 相关性为基础来探讨秦岭南北坡植被对干湿变化响应空间差异性。

图 5 为秦岭南北坡年 NDVI 与春季 SPEI 相关性空间分布图,由图 5a 可知,秦岭 NDVI 与 SPEI 相关系数空间分布范围是 $-0.84 \sim 0.88$,有 90.34% 的区域为正相关关系,仅有 9.66% 的区域为负相关。其中呈负相关的区域主要分布在南北坡平缓地带,除了气候因素外还可能与城市扩张导致植被破坏严重有关。综上所述,秦岭大多数地区春季 SPEI 上升对全年植被生长有明显促进作用。

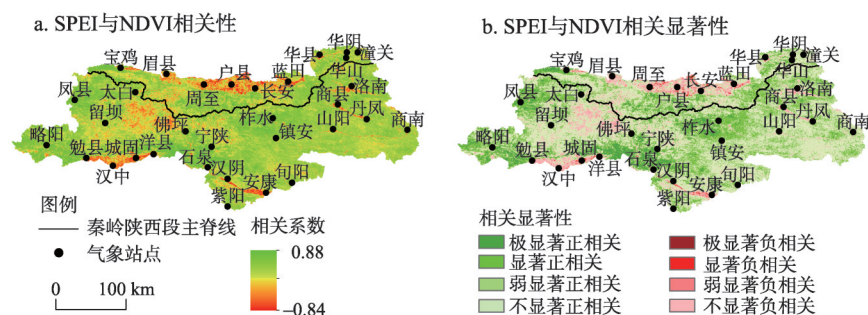


图 5 NDVI 与 SPEI 相关系数及显著性空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of correlation coefficients and significance between NDVI and SPEI

秦岭南北坡对比可知,秦岭北坡 NDVI 与 SPEI 平均相关系数为 0.24,有 81.05% 的区域为正相关,呈显著性正相关的区域占比为 23.29%;秦岭南坡 NDVI 与 SPEI 平均相关系数为 0.34,有 92.80% 的区域为正相关,呈显著性正相关的区域占比为 29.30%。表明湿润化对秦岭南坡植被生长促进作用大于北坡。值得注意的是,秦岭南坡“太白—留坝—佛坪”三角区域内 NDVI 与 SPEI 呈明显负相关关系,表明此区域春季湿润化会抑制全年植被生长,此区域地形复杂海拔较高,人类活动较少,气候因素是植被变化的最主要原因,已有研究指出秦岭山地高海拔区的植被(如巴山冷杉)大量死亡^[22],这可能与 2000—2018 年秦岭春季的湿润化有关。

3.3.2 秦岭南北坡主要植被类型对干湿变化响应差异 本文依据秦岭植被覆盖类型和国际地圈生物圈计划植被覆盖分类方案对秦岭南北坡植被进行汇总重新分类^[16, 33](表 2)。根据秦岭南北坡植被覆盖类型对 NDVI 与 SPEI 相关系数空间分布进行按掩膜提取,得到不同植被覆盖类型的 NDVI 与 SPEI 相关系数(表 3),表明秦岭南北坡主要植被类型生长对干湿变化响应均为正向,草丛对于干湿变化响应最为敏感,其次是灌丛,最后是阔叶林、针叶林和高山草甸。树木根系发达,干湿变化对林地影响比草丛和灌丛小。由于农田植被有人为影响的加入(如灌溉等),对于干湿变化响应敏感性降低。而在湿地中水分大多数时间不是限制因素,高山草甸区域有效积温可能是决定植被生长的重要因子,因此其对于干湿变化敏感性较差。裸地主要为岩石等,植被稀少,其相关系数意义偶然性较大。城市植被对干湿变化响应最弱,其原因主要是人为影响较为严重。

表 2 植被类型重分类
Tab. 2 Vegetation types re-classification

植被类型	重分类	植被类型	重分类
山地寒温性常绿针叶林	针叶林	高山、亚高山草甸	高山草甸
山地寒温性落叶针叶林		典型草甸	草丛
山地温性常绿针叶林		温带疏灌草坡	
山地落叶阔叶林		作物	农田作物
典型落叶阔叶林	阔叶林	冰雪	水体
暖性常绿针叶林		水体	
暖温性常绿阔叶落叶混交林		湿地	湿地
温带落叶阔叶林		建设用地	城市
高山亚高山常绿草叶灌丛	灌丛	裸地	裸地
亚高山落叶阔叶灌丛			
暖性落叶阔叶灌丛			
温带落叶灌丛			
温性落叶阔叶灌丛			

表 3 秦岭南北坡不同植被覆盖类型 NDVI 与 SPEI 相关系数
Tab. 3 Correlation coefficients between NDVI and SPEI of different vegetation types on the southern and northern slopes of the Qinling Mountains

	草丛	灌丛	阔林地	针叶林	高山草甸	农田作物	裸地	水体	城市
北坡	0.35	0.35	0.33	0.30	0.20	0.06	0.23	0.09	-0.07
南坡	0.37	0.33	0.31	0.28	0.19	0.31	0.09	0.18	-0.02

从秦岭南北坡主要植被类型对干湿变化响应对比上看，不同植被的响应有所差异，秦岭南坡的草丛比北坡响应更敏感，草丛根系不发达只能利用表层土壤水分且南坡草丛密度要比北坡大，对水分要求相对较高，所以更加敏感；而灌丛、阔叶林、针叶林和高山草甸均是北坡对干湿变化更敏感。灌丛和阔叶林在秦岭南坡多为常绿植被，秦岭北坡多为落叶植被，水分是主导气候因子，因此相关系数更大。综上表明秦岭北坡多数植被类型对干湿变化响应比南坡敏感。

3.3.3 植被对干湿变化响应垂直差异

(1) 植被对干湿变化响应垂直差异分布

探究秦岭南北坡植被对干湿变化响应在海拔变化上的差异性，将秦岭南北坡海拔以 50 m 为间隔划分进行重分类，结合 NDVI 与 SPEI 相关系数空间分布图通过 ArcGIS 中按掩膜提取实现。其中海拔 500 m 以下主要为城市群区域，人为活动为主要影响因素，所以此部分重点分析海拔 500 m 以上部分。图 6 为 NDVI 与 SPEI 相关系数随海拔变化图，由图 6 可知，随海拔上升秦岭南北坡 NDVI 与 SPEI 相关系数均是先上升后下降。具体均划分为 6 部分：① 海拔 500~800 m：随海拔上升秦岭南北坡相关系数快速上升，表明植被对干湿变化均越来越敏感，但其相关系数南坡比北坡大。② 海拔 800~1200 m：秦岭南北坡 NDVI 与 SPEI 相关系数均达到最高值，表明在海拔 800~1200 m 范围内秦岭南北坡植被对干湿变化响应均为最敏感区域，南北坡相关系数接近。③ 海拔 1200~1900 m：随海拔上升南北坡相关系数快速下降，植被对干湿变化敏感度随海拔上升而下降，北坡比南坡相关系数大，植被响应更加敏感。④ 海拔 1900~2500 m：植被 NDVI 与 SPEI 相关系数出现了下降“减缓”阶段，随海拔变化相关系数保持基本稳定，但秦岭南北坡差异较大，秦岭北坡相关系数上升，南坡相关系数下降。⑤ 海拔 2500~3000 m：秦岭南北坡随

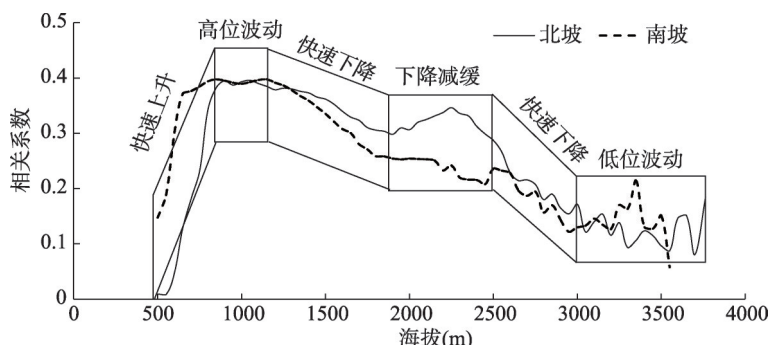


图6 秦岭南北坡NDVI与SPEI相关系数随海拔变化情况

Fig. 6 Correlation coefficients between NDVI and SPEI with altitude on the southern and northern slopes of the Qinling Mountains

海拔上升相关系数均快速下降。⑥ 海拔3000 m以上：秦岭南北坡NDVI与SPEI相关系数均为低位波动，表明干湿水平可能不是此海拔区域植被生长的主要限制因子。

(2) 秦岭植被对干湿变化响应垂直差异原因分析

秦岭500~800 m区域主要为植被低矮农作物、果树、草丛、灌丛和常绿阔叶林等，秦岭北坡可能是城市群扩张较快，植被对气候响应较弱；而南坡植被较多，对气候响应较强因此南坡的相关系数较大。随海拔上升果树、草丛和灌丛等占比上升，低矮农作物等占比下降^[34]，过渡到落叶阔叶林。秦岭南北坡到800~1200 m区域植被主要为灌丛、草丛、落叶阔叶林（如栓皮栎林）等植被类型^[34]，其对水分较为敏感。因此海拔1200 m以下，植被NDVI对干湿变化敏感性随海拔上升而越来越敏感，海拔800~1200 m区域是植被生长对干湿变化最为敏感的区域。

海拔1200~1900 m区域是由草丛、灌丛和栓皮栎林等逐渐转变为锐齿栎林和辽东栎林等天然林为主要植被类型，所以植被生长对干湿变化敏感性降低。海拔1800~2500 m植被NDVI与SPEI相关系数出现了下降“减缓”现象，可能因为此海拔段是落叶阔叶林逐渐向针阔混交林过渡区，针叶林相较于阔叶林对干湿变化响应要小得多。加之已有研究指出在1600~2700 m是温度对植被生长由抑制转变为促进^[35]，由于植被生长与温度关系的转变且秦岭北坡这种关系的转变比南坡更加明显，导致温度和降水对植被生长共同促进作用，因此秦岭南北坡随海拔上升NDVI与SPEI相关系数均出现了下降“减缓”现象，且北坡出现相关系数上升。

海拔2500~3000 m区域主要植被由针阔叶混交林向针叶林（如巴山冷杉和太白红杉等）过渡，针叶林相对于阔叶林对水分需求较低，导致随海拔上升NDVI与SPEI相关系数下降。海拔3000 m以上区域主要植被类型为太白红杉和高山草甸等，可能因为海拔高，温度低，热量成为植被生长的主要限制因素^[35]，因此NDVI与SPEI相关系数最低。

综上所述，秦岭植被生长对干湿变化敏感性在垂直方向上存在差异，一方面可能是由于山地效应导致水热分配差异所致，另一方面是可能秦岭植被类型垂直分布差异所致。

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 2000—2018年秦岭植被覆盖情况整体显著改善，秦岭南坡NDVI上升幅度和面积占比都要高于北坡，南坡比北坡植被改善情况好。秦岭北坡年NDVI平均变化速率为0.017/10a，有79.31%的区域NDVI为上升趋势，呈显著性上升的区域占比为53.15%；秦

岭南坡年NDVI平均变化速率为0.031/10a, 有93.92%的区域为上升趋势, 呈显著性的区域占比为77.39%。

(2) 秦岭整体湿润化趋势不显著, 而秦岭北坡湿润化速率和面积占比都大于南坡。秦岭南北年SPEI有96.63%的区域为不显著变化。秦岭北坡年SPEI平均变化速率为0.13/10a, 有87.18%的区域SPEI为上升趋势; 秦岭南坡年SPEI平均变化速率为0.022/10a, 有71.43%的区域SPEI为上升趋势。

(3) 秦岭北坡植被对6月SPEI-4总体干湿变化最为敏感, 3—6月是植被生长关键期; 南坡植被对5月SPEI-3干湿变化最为敏感, 3—5月(春季)是植被生长关键期。秦岭南北坡植被生长主要受中短时间尺度干湿变化影响, 对长时间尺度干湿变化响应较弱, 但秦岭北坡植被比南坡植被更易受干湿变化影响。秦岭北坡植被生长主要受6月份多尺度干湿变化影响严重, 南坡植被生长主要受5月份多尺度干湿变化影响严重。

(4) 秦岭有90.34%的面积NDVI与SPEI呈正相关, 随海拔上升植被对干湿变化敏感性先上升再下降, 海拔800~1200 m是植被响应最敏感的海拔段, 海拔1200~3000 m随海拔上升植被响应敏感性下降。秦岭南北坡草丛均是对干湿变化最为敏感的植被类型, 但秦岭北坡多数植被类型对干湿变化响应比南坡敏感。

5.2 讨论

秦岭为中国南北地理分界线, 位于暖温带与亚热带交界处, 全年气候四季分明, 降水量时空分布不均, 本文系统探讨了秦岭南北坡植被对干湿变化响应敏感性及其空间差异, 揭示了秦岭南北坡干湿变化对植被生长影响的关键期, 同时分析了不同植被类型对干湿变化响应敏感性及其植被响应的垂直差异。可反映出暖温带、亚热带地区主要植被类型对干湿变化的响应规律和机制特征。同时有助于进一步理解气候波动下中国南北过渡带植被的响应差异及植被脆弱性, 对提高陆地植被对气候变化预测精度和深入理解不同气候带植被变化规律具有重要意义。全球变化背景下秦岭山地陆地生态系统发生着积极的变化, 研究结果将对秦岭山地植被保护和林业、农业的管理与规划提供重要理论依据。

同时在研究中也发现一些问题, 希望随着研究数据的充实在后续研究中能够解决:

① 在空间分布上, 干湿变化对全年植被活动影响呈显著相关关系的区域占比不是很高, 一方面可能由于可获取数据精度、时段和空间范围的影响, 秦岭地区高海拔气象站点不多且建站时间较短可利用数据有限, 因此数据精度可能受到影响, 在后期研究中需延长气象数据序列, 尤其高海拔地区气象数据的加入会使得研究结果更加可靠; 另一方面可能由于秦岭地形复杂植被生长对干湿变化响应存在滞后性, 而且滞后时长在空间范围可能存在差异。② 有研究表明人为因素对植被NDVI的影响已越来越严重^[22, 36], 如退耕还林政策的实施使黄土高原地区NDVI快速上升^[37], 在政策和气候的共同作用下可以使得区域植被覆盖程度改善较快, 这些地区主要为中低山区和低山丘陵区^[35, 38]。虽然秦岭山地不同于黄土高原等地区是退耕还林还草重点区域, 但除气候因素外, 退耕还林还草等政策的实施也是不可忽视的因素。但在退耕还林还草等工程实施使得区域植被得到显著改善的同时, 也应对植被改善后对区域气候产生的反馈效应加以探讨, 如蒸散发加剧对水资源影响, 是否会增加干旱发生的概率, 这些是不容忽视的关键问题而且对于如何量化人类活动对植被覆盖变化的影响在后续研究中要重点关注。

参考文献(References)

- [1] Fu Bojie, Yu Dandan, Lü Nan. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 341-348. [傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. *生态学报*, 2017, 37(2): 341-348.]
- [2] Gao Jiangbo, Jiao Kewei, Wu Shaohong. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China

- during 1982-2013. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 534-543. [高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982—2013年中国植被NDVI空间异质性的气候影响分析. *地理学报*, 2019, 74(3): 534-543.]
- [3] Liu Shiliang, Tian Yunyu, Yin Yijie, et al. Temporal dynamics of vegetation NDVI and its response to drought conditions in Yunnan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4699-4707. [刘世梁, 田钰钰, 尹艺洁, 等. 云南省植被NDVI时间变化特征及其对于干旱的响应. *生态学报*, 2016, 36(15): 4699-4707.]
- [4] Thuiller W, Lavorel S, Araújo M B, et al. Climate change threats to plant diversity in Europe. *PNAS*, 2005, 102(23): 8245-8250.
- [5] Hou Meiting, Zhao Haiyan, Wang Zheng, et al. Vegetation responses to climate change by using the satellite-derived normalized difference vegetation index: A review. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(3): 353-364. [侯美亭, 赵海燕, 王箏, 等. 基于卫星遥感的植被NDVI对气候变化响应的研究进展. *气候与环境研究*, 2013, 18(3): 353-364.]
- [6] Stocker T F, Qin D H, Plattner M, et al. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 866-871.
- [7] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58.
- [8] Huang J P, Ji M X, Xie Y K, et al. Global semi-arid climate change over last 60 years. *Climate Dynamics*, 2016, 46(3-4): 1131-1150.
- [9] Vicenteserrano S M, Beguería S, Lópezmoreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [10] Palmer W C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. *Weatherwise*, 1968, 21(4): 156-161.
- [11] Mckee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration of time scales. The 8th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society: Anaheim, California, 1993, 174-184.
- [12] Byakatonda J, Parida B P, Moalafhi D B, et al. Analysis of long term drought severity characteristics and trends across semiarid Botswana using two drought indices. *Atmospheric Research*, 2018, 213: 492-508.
- [13] Tong S Q, Lai Q, Zhang J Q, et al. Spatiotemporal drought variability on the Mongolian Plateau from 1980-2014 based on the SPEI-PM, intensity analysis and Hurst exponent. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 1557-1565.
- [14] Qi Guizeng, Bai Hongying, Meng Qing, et al. Climate change in the Qinling Mountains in spring during 1959-2018. *Arid Zone Research*, 2019, 36(5): 1079-1091. [齐贵增, 白红英, 孟清, 等. 1959—2018年秦岭南北春季气候时空变化特征. *干旱区研究*, 2019, 36(5): 1079-1091.]
- [15] Kong Dongdong, Zhang Qiang, Gu Xihui, et al. Vegetation responses to drought at different time scales in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24): 7908-7918. [孔冬冬, 张强, 顾西辉, 等. 植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析. *生态学报*, 2016, 36(24): 7908-7918.]
- [16] Yang Siyao, Meng Dan, Li Xiaojuan, et al. Multi-scale responses of vegetation changes relative to the SPEI meteorological drought index in North China in 2001-2014. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 1028-1039. [杨思遥, 孟丹, 李小娟, 等. 华北地区2001—2014年植被变化对SPEI气象干旱指数多尺度的响应. *生态学报*, 2018, 38(3): 1028-1039.]
- [17] Li Yanju, Ding Jianli, Zhang Junyong, et al. 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): 6206-6217. [李艳菊, 丁建丽, 张钧泳, 等. 2001—2015年天山北坡植被覆盖对干旱的响应: 基于土地利用/土地覆盖分析. *生态学报*, 2019, 39(17): 6206-6217.]
- [18] Kang Muiyi, Zhu Yuan. Discussion and analysis on the geo-ecological boundary in Qinling Range. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2774-2784. [康慕宜, 朱源. 秦岭山地生态分界线的论证. *生态学报*, 2007, 27(7): 2774-2784.]
- [19] Deng Chenhui, Bai Hongying, Gao Shan, et al. Comprehensive effect of climatic factors on plant phenology in Qinling Mountains region during 1964-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 917-931. [邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 1964—2015年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应. *地理学报*, 2018, 73(5): 917-931.]
- [20] Zhang Yang, Bai Hongying, Su Kai, et al. Spatial variation of extreme temperature change on southern and northern slopes of Shaanxi section in Qinling Mountains during 1960-2013. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1296-1308. [张杨, 白红英, 苏凯, 等. 1960—2013年秦岭陕西段南北坡极端气温变化空间差异. *地理学报*, 2018, 73(7): 1296-1308.]
- [21] Lu Fuzhi, Lu Huayu. A high-resolution grid dataset of air temperature and precipitation for Qinling-Daba Mountains in central China and its implications for regional climate. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 875-888. [陆福志, 鹿化煜. 秦岭—大巴山高分辨率气温和降水格点数据集的建立及其对区域气候的指示. *地理学报*, 2019, 74(5): 875-

- 888.]
- [22] Deng Chenhui, Bai Hongying, Gao Shan, et al. Spatial-temporal variation of the vegetation coverage in Qinling Mountains and its dual response to climate change and human activities. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(3): 425-438. [邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 425-438.]
- [23] Vicenteserrano S M, Beguería S, Lópezmoreno J I, et al. A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscale drought index: Comparison with current drought index datasets based on the Palmer drought severity index. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(4): 1033-1043.
- [24] Hutchinson M F, Xu T. *Anusplin Version 4.4 User Guide*. 2013.
- [25] Liu Zhihong, Tim R M, van Niel T G, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN. *Meteorological Monthly*, 2008(2): 92-100. [刘志红, Tim R M, van Niel T G, 等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用. *气象*, 2008(2): 92-100.]
- [26] Xu Xiang, Xu Yao, Sun Qingqing, et al. Comparison study on meteorological spatial interpolation approaches in Kangdian region of China. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2018, 52(1): 122-129. [徐翔, 许瑶, 孙青青, 等. 复杂山地环境下气候要素的空间插值方法比较研究. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 52(1): 122-129.]
- [27] Meng Qing, Bai Hongying, Guo Shaozhuang. Spatial-temporal variation of precipitation in Qinling area in recent 50 years based on Anusplin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(2): 206-212. [孟清, 白红英, 郭少壮. 基于 Anusplin 秦岭地区近 50 多年来的降水时空变化. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 206-212.]
- [28] Dong J W, Liu J Y, Zhang G L, et al. Climate change affecting temperature and aridity zones: A case study in eastern Inner Mongolia, China from 1960-2008. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, 113(3): 561-572.
- [29] Bai Hongying, Ma Xiping, Gao Xiang, et al. Variations in January temperature and 0 °C isothermal curve in Qinling Mountains based on DEM. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1443-1450. [白红英, 马新萍, 高翔, 等. 基于 DEM 的秦岭山地 1 月气温及 0 °C 等温线变化. *地理学报*, 2012, 67(11): 1443-1450.]
- [30] Chen Lan, Li Shuheng, Hou Li, et al. Response of *Larix chinensis* radial growth to climatic factors based on the Vaganov-Shashkin model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2470-2480. [陈兰, 李书恒, 侯丽, 等. 基于 Vaganov-Shashkin 模型的太白红杉径向生长对气候要素的响应. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2470-2480.]
- [31] Hou Li, Li Shuheng, Chen Lan, et al. Reconstruction of the historical temperature from February to April of the Qinling Mountains in recent 200 years. *Geographical Research*, 2017, 36(8): 1428-1442. [侯丽, 李书恒, 陈兰, 等. 近 200 年来秦岭 2—4 月历史气温重建与空间差异. *地理研究*, 2017, 36(8): 1428-1442.]
- [32] Qin Jin, Bai Hongying, Liu Rongjuan, et al. Reconstruction of March-June mean air temperature along the timberline of Mount Taibai, Qinling Mountains, Northwest China, over the last 144 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7585-7594. [秦进, 白红英, 刘荣娟, 等. 近 144 年来秦岭太白山林线区 3—6 月平均气温的重建. *生态学报*, 2017, 37(22): 7585-7594.]
- [33] Bai Hongying, Liu Kang, Wang Jun, et al. *Vegetation Response and Adaptation in the Qinling Mountains under Climate Change Background*. Beijing: Science Press, 2019: 16-18. [白红英, 刘康, 王俊, 等. 气候变化背景下秦岭山地植被响应与适应. 北京: 科学出版社, 2019: 16-18.]
- [34] Zhu Xiaoqin, Liu Kang, Li Jianguo, et al. Analysis on vegetation-environment gradient correlation in Qinling Mountain based on GIS. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(2): 169-175. [朱晓勤, 刘康, 李建国, 等. GIS 支持下的秦岭山地植被分布与环境梯度关系研究. *水土保持研究*, 2009, 16(2): 169-175.]
- [35] Chen Chaonan, Zhu Lianqi, Tian Li, et al. Spatial-temporal changes in vegetation characteristics and climate in the Qinling-Daba Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3257-3266. [陈超男, 朱连奇, 田莉, 等. 秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析. *生态学报*, 2019, 39(9): 3257-3266.]
- [36] Tang Jian, Cao Huiqun, Chen Jin. Effects of ecological conservation projects and climate variations on vegetation changes in the source region of the Yangtze River. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(1): 76-86. [唐见, 曹慧群, 陈进. 生态保护工程和气候变化对长江源区植被变化的影响量化. *地理学报*, 2019, 74(1): 76-86.]
- [37] Zhao Anzhou, Zhang Anbing, Liu Haixin, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of Grain for Green Project in the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 449-460. [赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析. *自然资源学报*, 2017, 32(3): 449-460.]
- [38] Zhang Yinping. Vertical distribution and comparison of forests in the north and south slope of Qinling Mountains [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017. [张银屏. 秦岭南北坡森林垂直分布对比及变化分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.]

Sensitivity and areal differentiation of vegetation responses to hydrothermal dynamics on the southern and northern slopes of the Qinling Mountains in Shaanxi province

QI Guizeng^{1,2,3}, BAI Hongying^{1,2,3}, ZHAO Ting^{1,2,3}, MENG Qing^{1,2,3}, ZHANG Shanhong^{1,2,3}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Institute of Qinling Mountains, Northwest University, Xi'an 710127, China; 3. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: The Qinling Mountains, located at the junction of warm temperate and subtropical zones, serves as the boundary between North and South China. Exploring the sensitivity of vegetation response to hydrothermal dynamics can be conducive to understanding the pattern and dynamics of main vegetation types and the mechanism of their response to changes in temperature and moisture. Importance should be attached to the laws of vegetation change in different climate zones. To reveal the sensitivity and areal differentiation of vegetation responses to hydrothermal dynamics, the spatial and temporal variation characteristics of NDVI and SPEI on the southern and northern slopes of the Qinling Mountains from 2000 to 2018 are explored using the meteorological data from 32 meteorological stations and the MODIS NDVI datasets. The results show that: (1) The overall vegetation coverage of the Qinling Mountains improved significantly from 2000 to 2018. The NDVI rise rate and area ratio on the southern slope were higher than those on the northern slope, and the vegetation on the southern slope exhibited better improvement than that on the northern slope. The Qinling Mountains showed an insignificant humidification trend. The humidification rate and humidification area of the northern slope were greater than those on the southern slope. (2) Vegetation on the northern slope of the Qinling Mountains was more sensitive to hydrothermal dynamics than that on the southern slope. Vegetation was most sensitive to hydrothermal dynamics from March to June on the northern slope, and from March to May (spring) on the southern slope. The vegetation on the northern and southern slopes was mainly affected by hydrothermal dynamics on a scale of 3-7 months, and it responds weakly to hydrothermal dynamics on a scale of 11-12 months. (3) 90.34% of NDVI and SPEI were positively correlated in the Qinling Mountains. Spring humidification in most parts of the study area could promote the growth of vegetation all the year round. The sensitivity of vegetation responses to hydrothermal dynamics with increasing altitude increased first and then decreased. The altitude of 800 to 1200 m was the most sensitive altitude for vegetation response to hydrothermal dynamics. The sensitivity of vegetation response at the elevation of 1200-3000 m decreased with the increasing altitude. The grass was the most sensitive vegetation type to hydrothermal dynamics on the northern and southern slopes of the Qinling Mountains, but most of other vegetation types on the northern slope were more sensitive to hydrothermal dynamics than those on the southern slope.

Keywords: the Qinling Mountains in Shaanxi province; NDVI; SPEI; sensitivity; spatial difference