

近 15 年来青海湖流域气温、降水变化对 植被物候驱动分析

王志刚^{1,2,3}, 曹生奎^{1,2,3}, 曹广超^{2,3}

(1.青海师范大学 地理科学学院, 西宁 810008; 2.青海师范大学 青海省自然地理与环境过程重点实验室,
西宁 810008; 3.青海师范大学 青海省人民政府—北京师范大学 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008)

摘 要:研究气候变化对植被物候的驱动分析,对于深入理解高寒植被适应全球气候变化具有重要意义。选取 MCD12Q2 植被物候数据,利用相关分析和 GIS 空间分析,对近 15 年来青海湖流域气温、降水变化与植被物候关系进行了研究。结果表明:近 15 年来青海湖流域植被返青期(start of growing season,SOS)、植被生长期长度(Length of growing season,LOS)、休眠期(Dormancy of growing season,DOS)与年均气温呈显著相关关系,其偏相关系数分别为 $-0.57\sim 0.36$, $-0.89\sim 0.81$ 和 $-0.29\sim 0.51$;与年均降水量偏相关系数分别为 $-0.58\sim 0.38$, $-0.82\sim 0.93$ 和 $-0.23\sim 0.23$,表明流域植被 SOS 和 LOS 变化主要受年均气温和降水量共同影响,DOS 变化主要受年均气温影响。青海湖流域植被 SOS,LOS 和 DOS 在空间上受气温、降水及其共同驱动的区域占比分别为 33.7%,22.5%和 36.67%,其受非气温—降水驱动的区域占比分别为 66.3%,77.5%和 63.33%;沿海拔梯度方向上(海拔每上升 100 m),年均气温上升 1℃,植被 SOS 提前 0.35 d,植被 LOS 延长 0.15 d,植被 DOS 推迟 0.25 d;年均降水量增加 1 mm,植被 SOS 推迟 4 d,植被 LOS 缩短 1.69 d;植被 DOS 提前 2.85 d。可见,近 15 年气温、降水变化对青海湖流域植被物候的驱动在空间上存在差异性,空间上植被物候主要受非气温—降水影响,海拔梯度上植被物候受气温和降水影响显著。

关键词:青海湖流域;气温降水变化;植被物候;驱动分析

中图分类号:K903;Q142.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0249-07

Analysis on the Drive of Temperature and Precipitation Changes to Vegetation Phenology of the Qinghai Lake Basin in the Past 15 Years

WANG Zhigang^{1,2,3}, CAO Shengkui^{1,2,3}, CAO Guangchao^{2,3}

(1.College of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China;

2.Qinghai Provincial Key Laboratory of Physical and Environmental Processes, Qinghai

Normal University, Xining 810008, China; 3.Academy of Plateau Science and Sustainability,

People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University, Xining 810008, China)

Abstract: Analysis of drive of climate change on vegetation phenology is of great significance for in-depth understanding of the adaptation of alpine vegetation to global climate change. We used MCD12Q2 vegetation phenology data, correlation analysis method and GIS spatial analysis method to study the relationship between temperature and precipitation changes and vegetation phenology in the Qinghai Lake Basin in the past 15 years. The results showed that in the past 15 years, the annual average temperature in the Qinghai Lake Basin had a significant correlation with the start of growing season (SOS), the length of growing season (LOS), and the dormancy of growing season (DOS); the partial correlation coefficients were $0.36\sim 0.57$, $-0.89\sim 0.81$ and $-0.29\sim 0.51$, respectively; the partial correlation coefficients with the average annual precipitation were $-0.58\sim 0.38$, $-0.82\sim 0.93$ and $-0.23\sim 0.23$, respectively; SOS and LOS of the vegetation in the Qinghai Lake Basin were mainly affected by the combined effect of the annual average temperature and precipitation, while the DOS was affected by the annual average temperature; in the past 15 years, SOS, LOS and DOS of the vegetation in the Qinghai Lake Basin were mainly driven by temperature and precipitation, the proportions of the regions driven by temperature, precipitation and their combination were 33.7%, 22.5%

收稿日期:2021-04-11

修回日期:2021-04-27

资助项目:国家自然科学基金(42061008);青海省“高端创新人才千人计划”项目(青人才字[2016]11号)

第一作者:王志刚(1996—),男,安徽安庆人,硕士,主要从事 GIS 应用方面研究。E-mail:Wzg_gis@163.com

通信作者:曹生奎(1979—),男,青海西宁人,教授,主要从事生态水文方面研究。E-mail:caoshengkui@163.com

and 36.67%, respectively, the proportions of the regions driven by non-temperature-precipitation were 66.3%, 77.5% and 63.33%, respectively; along the altitude gradient, the vegetation phenology was mainly affected by temperature and precipitation, the annual average temperature rose by 1°C, the vegetation SOS was advanced by 0.35 day, and the vegetation LOS was extended by 0.15 day; the average annual precipitation increased by 1 mm, the vegetation SOS was delayed by 4 days, the vegetation LOS was shortened by 1.69 days, and the vegetation DOS was advanced by 2.85 days. The drives of changes in temperature and precipitation to vegetation phenology in the Qinghai Lake Basin in the past 15 years had the spatial differences. The vegetation phenology in space was mainly affected by non-temperature precipitation, and the vegetation phenology along the altitude gradient was significantly affected by temperature and precipitation.

Keywords: Qinghai Lake Basin; temperature and precipitation changes; vegetation phenology; drive analysis

近 100 年来全球气候变暖已受到全人类的高度关注^[1], 青藏高原近 47 年来年平均气温增速为 0.37°C/10 a, 年平均降水量增速为 9.1 mm/10 a^[2-3], 正经历着快速变暖变湿^[4]。在此气候变化背景下, 青藏高原植被物候对其气候变化的响应受到广泛关注^[5-7]。目前对青藏高原植被物候的研究主要集中在植被物候的时空分布特征、变化趋势以及对气候变化的响应等^[8-11]。丁明军等^[8]、孔冬冬等^[9]研究表明, 青藏高原植被返青期 (start of growing season, SOS) 整体呈提前趋势, 休眠期 (Dormancy of growing season, DOS) 呈推迟趋势; 周玉科等^[10]发现, 青藏高原东南部呈现 SOS 和 DOS 推迟、LOS (Length of growing season, LOS) 呈延长趋势; 西南部呈 SOS 推迟、DOS 提前、LOS 呈缩短的趋势, 植被物候存在明显的地域差异性。植被物候的变化能够直观地反映全球气候变化, 直接影响着陆地生物多样性格局^[11-12], 并引起土壤—植物—大气系统碳水热交换的变化, 进而影响气候变化^[13]。因此, 深入理解气候变化对青藏高原植被物候的驱动作用, 有助于深入了解植被物候对全球气候变化的适应方式, 可为应对未来气候变化提供一定理论参考。

位于青藏高原东北部的青海湖流域不仅是特殊生态功能区, 也是全球气候变化生态敏感区之一^[14-15], 前人研究结果表明气候变化是驱动该区域植被物候变化的主要因素之一^[5,15], 李广泳等^[15]认为青海湖流域年均温度升高背景下流域内植被平均 SOS 并未表现出提前趋势, 年降水量在一定程度上影响着流域植被枯黄期; 苏芬等^[16]利用青海湖流域气象站点观测记录, 揭示青海湖流域牧草返青期主要受气温影响, 牧草枯落期主要受降水影响, 生长期是受气候与降水的共同影响; 宋春桥等^[17]通过遥感监测研究了藏北高原植被物候时空动态变化认为返青期提前及生长季延长主要受气温升高的影响; 汪青春等^[18]认为牧草返青期不但受气温影响, 秋季和春季的降水量也对其具有明显的影响。可见, 青海湖流域

气候变化对植被物候的驱动作用的认识依然存在分歧, 且前人研究主要基于站点尺度较少探讨空间上植被物候与气候因子的关系。青海湖流域空间尺度上气候变化如何驱动植被物候变化仍不清晰。因此, 本文选取青海湖流域高寒植被为研究对象, 研究近 15 a 来青海湖流域气温、降水变化对植被物候的驱动分析, 并在空间和海拔梯度上探讨青海湖流域植被物候变化的主要气候驱动因素, 以期青海湖流域生态保护与可持续发展提供参考建议。

1 研究区概况

青海湖流域位于青海省东北部 (36°15'—38°20'N, 97°50'—101°20'E), 流域四周为高山环绕, 形成一个完整的封闭型高原内陆盆地 (图 1), 海拔在 3 169~5 268 m, 总面积约 2.96 万 km²^[19-21]。2001—2015 年青海湖流域年均气温和年均降水量年际变化特征呈明显上升趋势, 年均气温和年均降水量增加速率分别为 0.03°C/a 和 1.42 mm/a, 青海湖流域年均气温在 -1.34~-0.1°C 变化, 最低值出现在 2004 年, 最大值出现在 2010 年; 年均降水量在 335.13~514.48 mm 变化, 最低值出现在 2015 年, 最大值出现在 2009 年, 气候变化暖湿趋势明显。近 15 a 流域年均气温在空间上呈现东南高西北低; 年均降水量空间上呈中部低北部高。

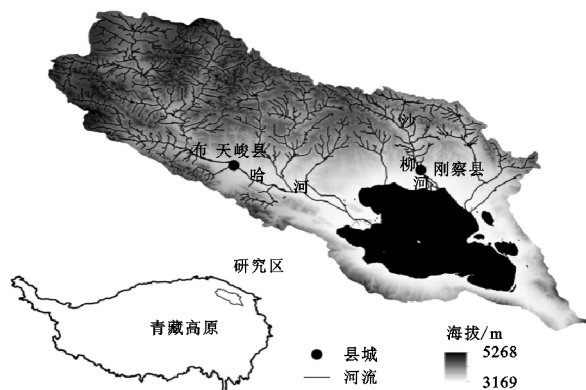


图1 青海湖流域位置

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

青海湖流域植被物候数据集来源于美国 NASA 网 (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>) 的 MODIS MCD12Q2 植被物候动态变化产品数据,MCD12Q2 已被广泛用来研究植被物候变化^[22-25],空间分辨率为 500 m,该数据需要对 EVI 时间序列数据进行去云、辐射校正、大气校正和几何校正等步骤,消除云、雪和气溶胶等影响。其数据中的植被物候确定是利用连续时相的 EVI 值来判断不断降低和升高的区间,如果区间振幅和极大值符合阈值条件,就定义升高与降

低区间为一个生长周期。接着对每个生长周期进行 Logistic 函数拟合,通过曲率值变化确定生长开始,EVI 不断增长的中点为成熟期,EVI 持续降低的终点为生长结束。

数据利用 MRT 软件进行批量处理,将数据格式转换成 geotiff 格式,坐标系转换成 WGS84 坐标,再利用 ENVI5.3 软件和 ArcGIS 10.3 对其进行拼接、裁剪和影像解译。年降水量和年气温数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/DOD>),并通过 ArcGIS 软件进行数据统计得到每年年均气温和降水量(图 2)再通过其栅格计算得到近 15 a 青海湖流域年均气温和降水量(图 3)。

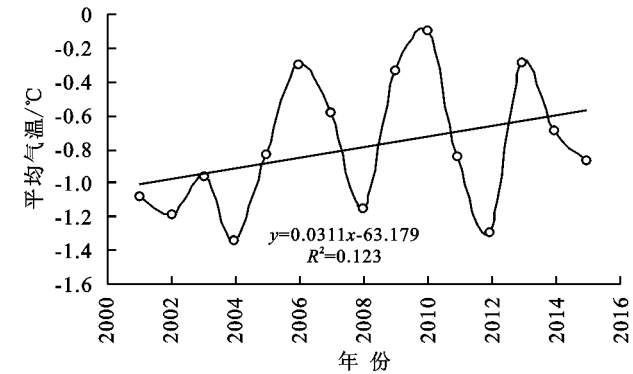


图 2 2001—2015 年青海湖流域年均气温和年均降水量变化趋势

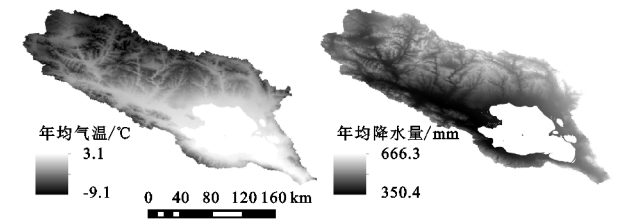


图 3 2001—2015 年青海湖流域年均气温和年均降水量空间分布

2.2 相关性分析

在相关分析中,偏相关系数能真实反映变量 x 和 y 之间的相关性,其计算公式为^[26-27]:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)}\sqrt{(1-r_{yz}^2)}} \quad (1)$$

式中: $r_{xy,z}$ 为自变量 z (降水或气温) 固定后因变量 x (物候) 与自变量 y (降水或气温) 的偏相关系数。实际上,某个要素的变化受多个因子的综合影响,偏相关分析不能很好反映各要素的综合影响,复相关分析可以解决上述问题。复相关的计算公式如下^[26-27]:

$$r_{xy,z} = \sqrt{1 - (1 - r_{xy}^2)(1 - r_{xz,y}^2)} \quad (2)$$

式中: $r_{xy,z}$ 表示因变量 x 和自变量 y, z 的复相关系数; r_{xy} 表示 x 与 y 的线性相关系数, $r_{xz,y}$ 表示固定自变量 y 之后因变量 x 与自变量 z 的偏相关系数。本文用 T 检验对偏相关系数进行显著性检验,用 F 检验对复相关系数进行显著性检验其计算公式为^[26-27]:

$$T = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{1 - r_{xy,z}^2}} \sqrt{n - m - 1} \quad (3)$$

$$F = \frac{r_{xy,z}^2}{1 - r_{xy,z}^2} \times \frac{n - k - 1}{k} \quad (4)$$

式中: n 为样本数(时间序列为 2001—2015 年、即 $n = 15$); m 和 k 为自变量个数。

2.3 植被物候变化的气候因子驱动分区方法

参考已有研究成果的研究方法^[28]:(1) 计算植被物候与降水、温度的偏相关系数以及复相关系数;(2) 利用 T 和 F 检验进行显著性检验(显著相关 $p < 0.05$);(3) 满足复相关显著且植被物候与降水偏相关显著的像元定义为降水驱动型;满足复相关显著且植被物候与气温偏相关显著的像元定义为气温驱动型;(4) 满足复相关显著且植被物候与降水偏相关不显著、植被物候与温度偏相关不显著的像元定义为气温、降水驱动型;(5) 不满足复相关显著的像元定义为非气温—降水驱动型^[26,28]。

3 结果与分析

3.1 青海湖流域植被物候与年均气温、年均降水量的偏相关关系

2001—2015 年青海湖流域植被 SOS, LOS, DOS 与年均气温和降水量偏相关系数结果显示(图 4 和图 5), 植被 SOS, LOS 和 DOS 与年均气温偏相关系数分别为

-0.57~0.36, -0.89~0.81 和 -0.29~0.51。SOS 与年均气温呈负相关关系的区域几乎全域分布(占总面积 99.21 %),呈正相关关系的区域零星分布在流域西北部(占总面积 0.79%);LOS 与年均气温呈正相关关系的区域主要分布在流域东南部、北部及西北部地区(占总面积 65.62 %),呈负相关关系的区域主要分布在布哈河谷低海拔地区(占总面积 34.38%);DOS 与年均气温呈正相关关系的区域广泛(占总面积 96.89%),与年均降水量呈负相关关系的区域主要分布在西北高海拔区域(占总面积 3.11%)。植被物候与年均气温偏相关关系表明,年均气温的升高会导致 SOS 提前、LOS 延长和 DOS 推迟。植被 SOS、LOS 和 DOS 与年均降水量偏相关系数

分别为-0.58~0.38, -0.82~0.93 和 -0.23~0.23。SOS 与年均降水量呈正相关关系的区域主要分布于流域西北部地区,呈负相关关系的区域主要分布于流域的东南部,其分别占比 39.69%和 60.31%;LOS 与年均降水量呈正相关关系的区域主要分布在青海湖流域东南部和西北部地区,呈负相关关系的区域主要分布在刚察县南部地区,其分别占比 66.85%和 33.15%;DOS 与年均降水量呈正相关关系的区域主要分布于流域西北部地区,呈负相关关系的区域主要分布于流域的东南部,其分别占比 70.02%和 29.98%。植被物候与年均降水量偏相关关系表明,年均降水量的增多会导致 SOS 提前、LOS 延长和 DOS 推迟。

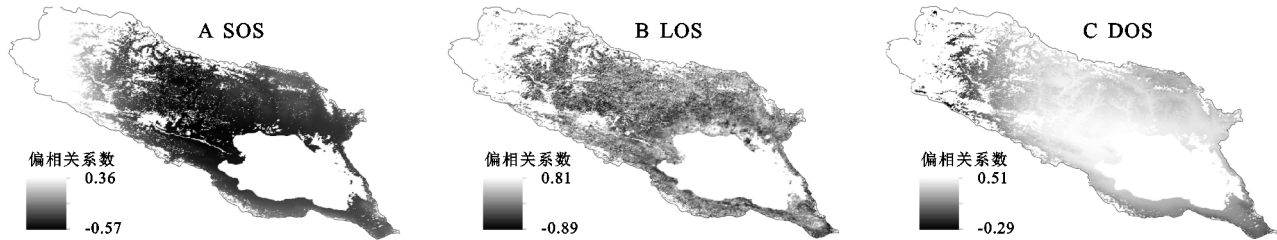


图 4 青海湖流域植被 SOS、LOS 和 DOS 与年均气温偏相关系数

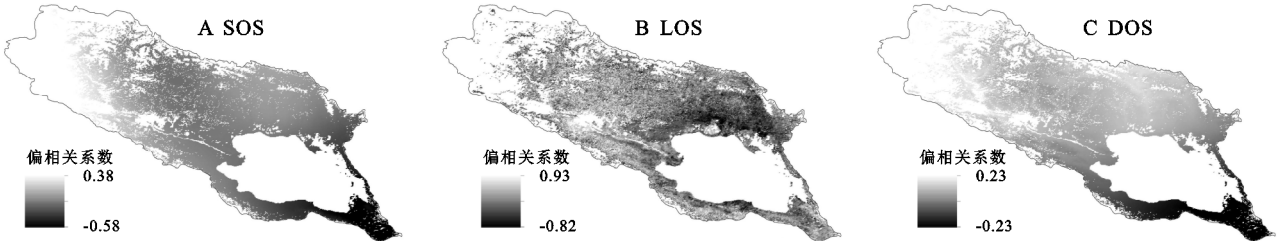


图 5 青海湖流域植被 SOS、LOS 和 DOS 与年均降水量偏相关系数

3.2 植被物候与年均气温和降水量的复相关关系

2001—2015 年青海湖流域植被 SOS、LOS 和 DOS 与年均气温和降水量的复相关系数分别为 0.04~0.73, 0.01~0.93, 0.13~0.56(图 6)。

SOS 在刚察县的西部、北部以及天峻县的北部和东南部地区复相关性较强;其西北部高海拔地区复相关性弱(图 6A);LOS 在流域的西北部高海拔地区、南部低海拔地区以及刚察县南部湖滨等地区复相关性较强(图 6B);DOS 在青海湖流域中部复相关性较强;在流域西北部高海拔地区、南部以及东南部低

海拔地区较弱(图 6C)。

植被 SOS、LOS 和 DOS 与年均气温和降水量呈显著相关关系(图 7)的区域分别占 33.18%, 8.04% 和 27.48%, 呈不显著相关关系的区域分别占 66.82%, 91.96% 和 72.52%。上述分析表明,植被物候与气温降水复相关关系具有一定显著相关性,LOS 的相关性较差, SOS 和 DOS 呈显著相关区域占比高,显著相关区域分布特征均是以青海湖西岸为中心向两侧延伸;DOS 呈显著相关区域占比比 SOS 的高,LOS 中显著不相关区域面积较大,存在分布差异性。

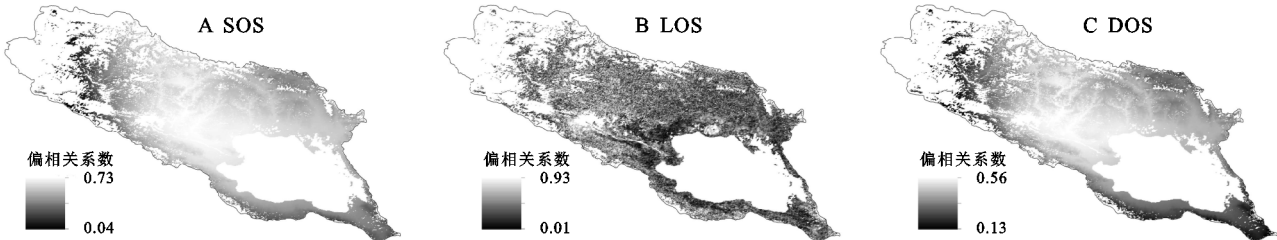


图 6 青海湖流域植被物候因子与年均气温和降水量的复相关系数

3.3 青海湖流域气温、降水对植被物候的驱动分析

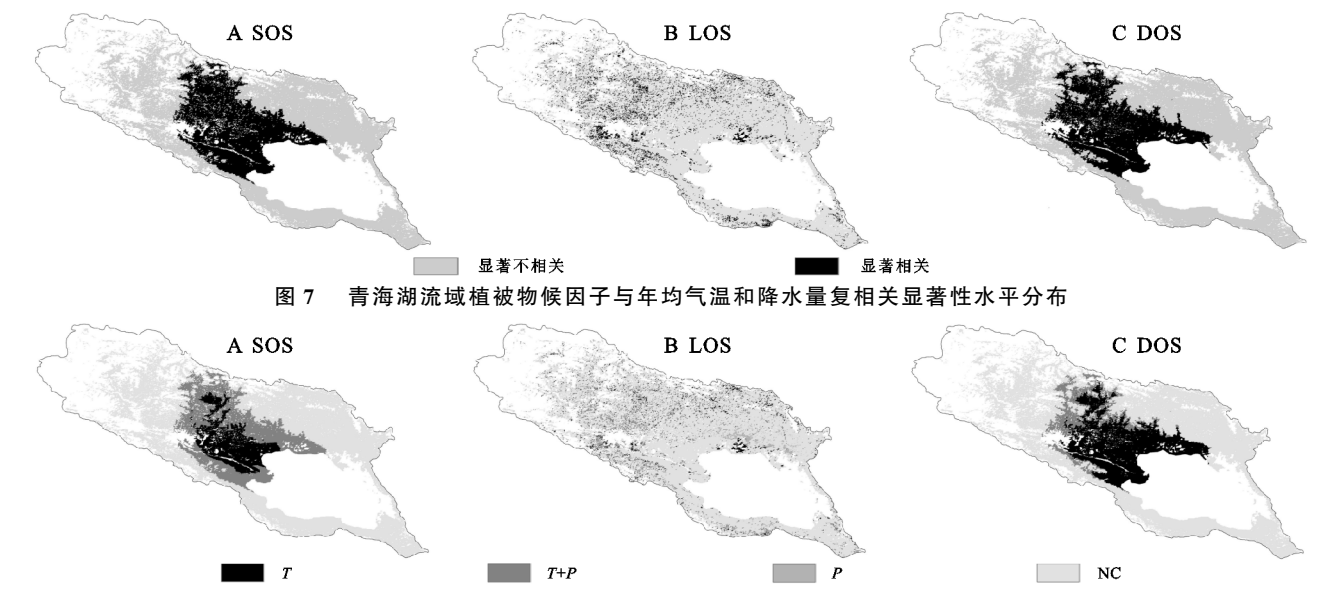
2001—2015 年植被 SOS、LOS 和 DOS 以气温

为主要驱动分别占比 10.68%, 2.31% 和 13.22%(图 8);在 SOS 中主要分布在布哈河下游北部地区;LOS

中主要分布在青海湖北部湖滨及刚察县北部高海拔地区;DOS 中主要分布在布哈河下游北部地区和刚察县的西部地区。

植被 SOS,LOS 和 DOS 受气温、降水驱动区域分别占比 23.02%,9.89%和 23.45%;在 SOS 中主要分布在天峻县北部和东部地区;LOS 中主要分布在青海湖流域的西北部和刚察县的北部;DOS 中主要

分布在天峻县的北部地区。植被 SOS,LOS 和 DOS 受非气温—降水驱动区域分别占比 66.3%,77.5%和 63.33%。此外,LOS 中以降水为主要驱动因素的区域占比10.30%,其主要分布在在青海湖北部湖滨及布哈河的中游地区,而 SOS 和 DOS 中均无降水驱动。综上,植被 SOS、LOS 和 DOS 主要受非气温—降水驱动影响。



注: T 表示气温驱动; NC 表示非气温—降水驱动; (T+P) 表示气温、降水驱动区; P 表示降水驱动。

图 8 青海湖流域气候因子对植被 SOS、LOS 和 DOS 驱动分布

4 讨论

本研究结果显示,2001—2015 年青海湖流域尺度上植被 SOS 和 LOS 受气温和降水的共同影响,这与青海湖流域已有研究结果一致^[15-16]。本研究认为植被 DOS 主要受气温影响与李广泳^[15]和苏芬等^[16]人认为其主要受降水影响的研究结论截然不同,原因可能是他们的研究是基于气象站数据,存在一定局限性。植被 SOS 与年均气温的负相关关系和与年均降水量负相关关系特征明显,表明流域内 SOS 主要受年均气温和降水影响,气温上升会导致地温升高,会加速植物内部的化学反应过程,为植物生长提供条件^[26],水热条件的良好配合促进植被 SOS 提前。气温和降水是植被生长关键因子,流域年均气温和降水量在西北中部地区均呈高值分布,使得此区域的 LOS 与年均气温和降水量的呈显著复相关关系,受气温和降水共同影响。另外,显著不相关区域的面积占比高,其可能受非气温—降水因素影响较大。气温是限制植被活动的关键因子^[29],植被在 DOS 期间,秋季气温降低且在流域高海拔地区年均气温为-9℃左右,不适宜植被生长。因此,气温升高则会造成 DOS 推迟,其与年均气温和降水量偏相关结果表明,DOS 与年均降水量相关性

较弱,受年均气温影响显著。

青海湖流域植被物候与气温、降水量相关关系的空间差异性主要与海拔梯度效应有关。青海湖流域沿海拔梯度(海拔每上升 100 m 年均气温和年均降水量对植被物候的影响)植被物候与年均气温和降水量的线性关系表明(图 9),植被 SOS 与年均降水量呈显著正相关($R^2 = 0.93, p < 0.01$),与年均气温呈显著负相关($R^2 = 0.94, p < 0.01$),即年均气温上升 1℃,植被 SOS 提前 0.35 d,年均降水量增加 1 mm, SOS 推迟 4 d;相反,年均降水量与 LOS($R^2 = 0.96, p < 0.01$)、DOS($R^2 = 0.96, p < 0.01$)分别呈显著负相关,年均气温与 LOS($R^2 = 0.98, p < 0.01$)、DOS($R^2 = 0.98, p < 0.01$)分别呈显著正相关,即年均气温上升 1℃,植被 LOS 延长 0.15 d,DOS 推迟 0.25 d;年均降水量增加 1 mm,植被 LOS 缩短 1.69 d,DOS 提前 2.85 d。此研究结果与黄文洁等^[30]在青藏高原 3 500~5 000 m 海拔范围内植被物候变化趋势基本一致。综上,在海拔梯度上年均气温对植被物候的影响大于年均降水量的影响,年均气温的上升会使青海湖流域植被 SOS 提前,LOS 延长,DOS 推迟;相反,年均降水量的增加会使得植被 SOS 推迟,LOS 缩短,DOS 提前。可见,海拔因素是重要的非气温—降水的驱动因素,深

刻影响着海拔梯度上的植被物候变化。

青海湖流域植被物候变化的驱动因素不仅与气温、降水及二者共同作用有关,还与海拔高度及其他非气温—降水因素有关。植被 SOS 受气温驱动主要分布在布哈河下游部分地区,此类块状分布特征与其河谷地形及年均气温高值区的分布特征有着相似之处,此区域海拔低,气温高,降水少,植被对气温的敏感性高于其他地区;在此驱动之外,由于海拔梯度的上升,降水量增加,草甸和高山植被对气温降水的敏感度上升,此时拥有了良好的水热条件导致受气温降水驱动影响;受非气温—降水驱动因素产生的原因可

能与植被类型、养分密切相关^[26]。另外,植被生长与土壤环境和坡度坡向有关^[31-32],且与自然灾害性事件存在一定关联性^[26],造成 LOS 主要受非气温—降水因素驱动的地区占比 77.5% 比 SOS 和 DOS 受其驱动所占比例高。植被的休眠与气温降水密切相关,崔耀平等^[33]认为青藏高原东北部植被生长的最适温度为 10℃ 左右,此时植被 DOS 期间的平均气温均低于此气温,再加上 DOS 期间降水会抑制植被生长^[26],使其受气温驱动面积大于 SOS 受气温驱动面积。通过上述分析,植被物候驱动因子不仅受其植被类型影响,还与其生长的环境因子有着密切的联系。

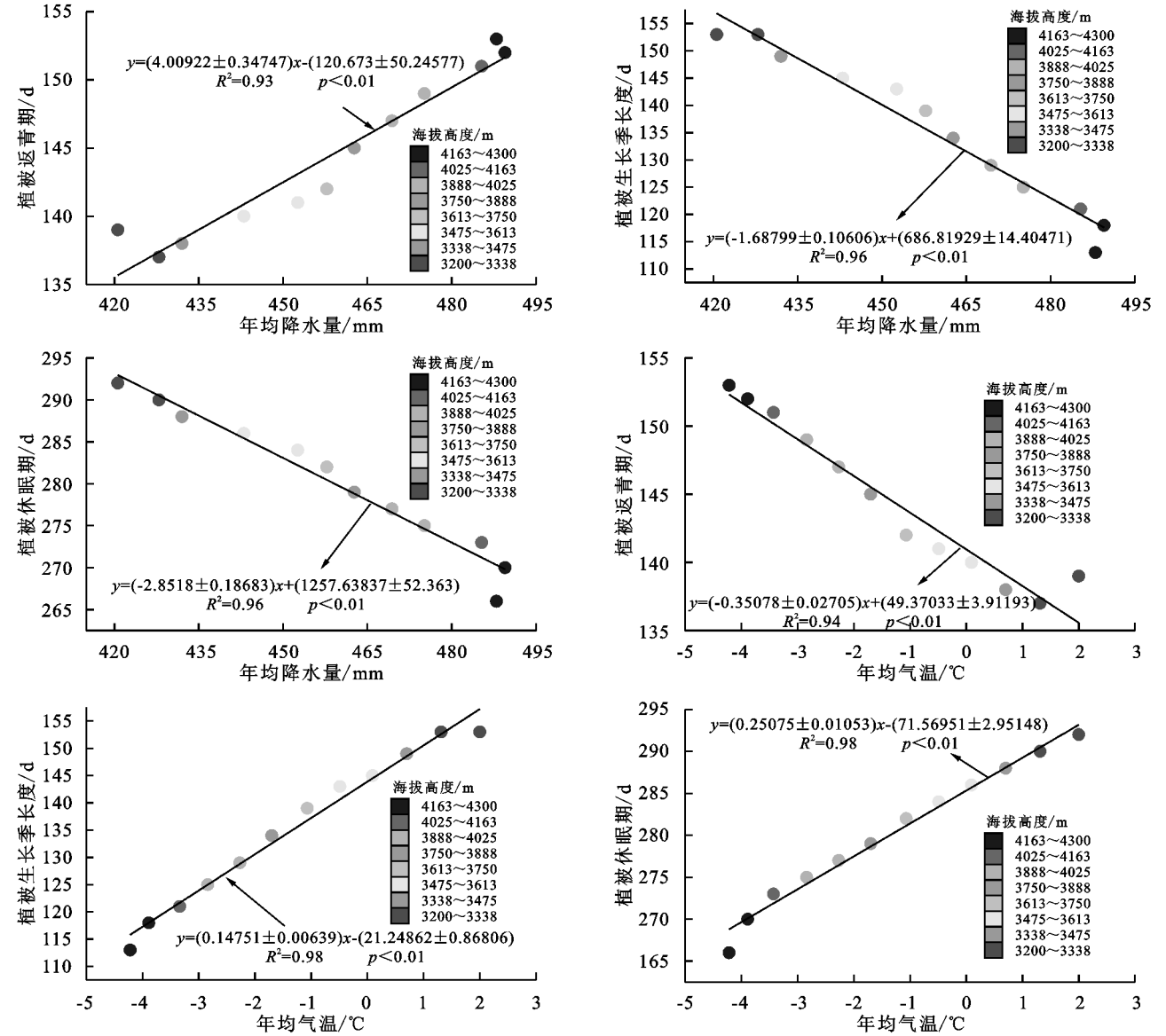


图 9 青海湖流域沿海拔梯度植被物候与年均气温和降水量的线性关系

5 结论

(1) 近 15 a 青海湖流域植被 SOS 和 LOS 变化主要受年均气温和年均降水量共同影响;DOS 变化主要受年均气温影响。

(2) 植被 SOS,DOS 同 LOS 受气温、降水驱动区域存在明显差异性。SOS 和 DOS 受气温、降水驱动区域主要集中在青海湖流域中部地区;LOS 受气温、降水驱动区域主要分布于青海湖北部湖滨及布哈河的中游地区。

(3) 青海湖流域植被物候空间变化驱动因素大小依次为:非气温—降水因素>气温降水综合作用>气温>降水;海拔梯度方向上,其影响因素大小依次为:气温>降水。

参考文献:

- [1] 秦大河.进入 21 世纪的气候变化科学:气候变化的事实、影响与对策[J].科技导报,2004(7):4-7.
- [2] 李林,时兴合,申红艳,等.1960—2009 年青海湖水位波动的气候成因探讨及其未来趋势预测[C].湖北宜昌:第七届全国优秀青年气象科技工作者学术研讨会,2010.
- [3] 李林,陈晓光,王振宇,等.青藏高原区域气候变化及其差异性研究[J].气候变化研究进展,2010,6(3):181-186.
- [4] 朴世龙,张宪洲,汪涛,等.青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈[J].科学通报,2019,64(27):2842-2855.
- [5] 王力,张强.近 20 年青藏高原典型高寒草甸化草原植物物候变化特征[J].高原气象,2018,37(6):1528-1534.
- [6] 李广泳,李小雁,赵国琴,等.青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征[J].生态学报,2014,34(11):3038-3047.
- [7] 韩炳宏,孔祥萍,周秉荣,等.气候变化情景下青藏高原物候研究的若干进展[J].草业科学,2019,36(11):2786-2795.
- [8] 丁明军,张懿铨,孙晓敏,等.近 10 年青藏高原高寒草地物候时空变化特征分析[J].科学通报,2012,57(33):3185-3194.
- [9] 孔冬冬,张强,黄文琳,等.1982—2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响[J].地理学报,2017,72(1):39-52.
- [10] 周玉科,刘建文.基于 MODIS NDVI 和多方法的青藏高原植被物候时空特征分析[J].遥感技术与应用,2018,33(3):486-498.
- [11] 陆晴,吴绍洪,东升.1982—2013 年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系[J].地理科学,2017,37(2):292-300.
- [12] Wang X, Gao Q, Wang C, et al. Spatiotemporal patterns of vegetation phenology change and relationships with climate in the two transects of East China[J]. Global Ecology and Conservation, 2017,10:206-219.
- [13] 杨柏娟,王思远,常清,等.青藏高原植被净初级生产力对物候变化的响应[J].地理与地理信息科学,2015,31(5):115-120.
- [14] 刘宝康.气候变化背景下青海湖流域草地与湖泊时空变化特征研究[D].兰州:兰州大学,2016.
- [15] 李广泳,姜翠红,程滔,等.青海湖流域植被物候格局时空动态变化及其与植被退化的关系[J].草业学报,2016,25(1):22-32.
- [16] 苏芬,刘宝康,张翠花,等.青海湖流域牧草物候期对气候变化的响应[J].青海草业,2018,27(4):12-18.
- [17] 宋春桥,游松财,柯灵红,等.藏北高原植被物候时空动态变化的遥感监测研究[J].植物生态学,2011,35(8):853-863.
- [18] 汪青春.牧草生长发育与气象条件的关系及气候年景研究[J].中国农业气象,1998,19(3):3-5.
- [19] Cui B L, Li X Y. Stable isotopes reveal sources of precipitation in the Qinghai Lake Basin of the northeastern Tibetan Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2015,527:26-37.
- [20] 潘虹,顾海敏,史建桥,等.基于 RS 和 GIS 的青海湖流域植被覆盖度变化与驱动因子研究[J].资源开发与市场,2016,32(7):827-831,768.
- [21] 孙永亮,李小雁,汤佳,等.青海湖流域气候变化及其水文效应[J].资源科学,2008,30(3):354-362.
- [22] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2003,84(3):471-475.
- [23] Peng D, Zhang X, Wu C, et al. Intercomparison and evaluation of spring phenology products using National Phenology Network and AmeriFlux observations in the contiguous United States[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2017,242:33-46.
- [24] 王聪,李静,柳钦火,等.黑河流域遥感物候产品验证与分析[J].遥感学报,2017,21(3):442-457.
- [25] 张仁平,郭靖,冯琦胜,等.新疆地区草地植被物候时空变化[J].草业学报,2018,27(10):66-75.
- [26] 玛地尼亚提·地里夏提,玉素甫江·如素力,姜红.2001—2014 年博斯腾湖流域植被物候时空变化及其驱动因子[J].生态学报,2018,38(19):6921-6931.
- [27] 徐建华.计量地理学[M].北京:高等教育出版社,2006:95-98.
- [28] 陈云浩,李晓兵,史培军.1983—1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析[J].植物生态学报,2001,25(6):716-720.
- [29] 邓晨晖.气候变化背景下秦岭南坡山地物候时空变化及其响应[D].西安:西北大学,2018.
- [30] 黄文洁,曾桐瑶,黄晓东.青藏高原高寒草地植被物候时空变化特征[J].草业科学,2019,36(4):1032-1043,919.
- [31] 贾文雄,陈京华,张禹舜,等.祁连山北坡草地植物群落特征与土壤水热因子的关系[J].生态学杂志,2016,35(3):661-667.
- [32] 付建新,曹广超,郭文炯.1998—2017 年祁连山南坡不同海拔、坡度和坡向生长季 NDVI 变化及其与气象因子的关系[J].应用生态学报,2020,31(4):1203-1212.
- [33] 崔耀平,刘纪远,胡云锋,等.中国植被生长的最适温度估算与分析[J].自然资源学报,2012,27(2):281-292.