

气候变暖背景下青藏高原植被覆盖特征的时空变化及其成因分析

徐兴奎, 陈红, LEVY Jason K

中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029;

Western Washington University, Huxley College of the Environment, Department of Environmental Studies, 516 High Street, Bellingham, WA, 98225, USA

E-mail: xkxu@mail.iap.ac.cn

2007-08-23 收稿, 2007-12-13 接受

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB403607)、国家自然科学基金(批准号: 40675047, 40605023)、中国科学院创新项目(批准号: KZCX2-YW-219)和 A Western Washington University Summer Research Grant 联合资助

摘要 正交分解反演于 NOAA-AVHRR 数据的叶面积指数、空间特征场分布和时间系数变化显示, 自 20 世纪 80 年代初至 2000 年, 在全球变暖气候大背景下, 青藏高原地区植被覆盖率总体上呈增加趋势. 降水量与主特征场时间系数相关性分析表明, 降水量是决定高原地区植被整体覆盖年际变化和波动的主要气候驱动因素. 植被覆盖总体增加的同时, 高原地区植被覆盖率也存在显著的南北反相位区域变化特征, 气候变暖是造成植被覆盖南北反相位变化的主要原因. 气温持续增高导致活动积温增加, 有利于高原南缘湿润地区植被的生长, 相反却使高原北部地区干旱加剧, 不利于植被覆盖状况的改善.

关键词
青藏高原
叶面积指数
正交分解
气候驱动因子

青藏高原是受人为影响相对较弱且面积广大的半自然区域. 在全球变暖气候大背景下, 高原春冬两季气温和地表温度都明显升高^[1~3]. 20 世纪 70 年代始, 青藏高原冻土面积和深度随温度增高出现一致减少现象^[4], 气候带范围也发生相应调整^[5]. 20 世纪 80 年代之后, 高原表面热力作用持续增强, 对中国区域气候影响越发明显^[6]. 尤其是高原地区地表覆盖属性异常变化引发地面反照率大幅波动, 导致地表辐射平衡和热力分布空间不均性差异增加, 高原及其附近地区温度场、气压场、风场、散度场以及降水量分布出现一系列调整, 对东亚季风、长江流域夏季降水和一些旱涝等灾害性天气产生显著影响^[7~12].

植被生态系统是与区域气候长期相互作用和相互适应过程中形成的脆弱型地表覆盖类型. 气候系统内任何物理量的变化, 都会导致地表植被生态系统相应地发生适应性调整. 因此模式化植被动力学过程需涵盖植被自身生理过程和气候响应两个方面^[13~19]. 近年来随着气温逐年上升, 高原地区植被覆盖

状况呈现两极变化趋势, 部分区域地表常年冻土溶化加速、沙漠面积增加、植被覆盖呈退化趋势^[20~24]; 相反, 气温增高也使高原地区植被生长所需活动积温增加, 在部分地区植被生长空间拓展, 地表生态环境出现好的发展趋势^[25,26]. 植被覆盖率两极变化现象, 将加大高原地区地表覆盖特征、地表物理属性和热分布等空间不均性. 持续发展不仅影响高原大气环流分布形式, 对中国东部地区气温和降水气候也会产生重要影响^[27,28].

青藏高原地区气候类型复杂, 适应性过程使该区域形成了复杂的地表覆盖类型和植被生态系统分布. 地理信息观测数据的匮乏, 使得对高原地区植被覆盖空间分布和年际变化过程了解很少. 尤其随着近年来高原地区气温的显著上升, 有关高原地区植被覆盖的时空变化和成因目前也还没有明确的结论. 针对这一问题, 本文首先利用反演于 NOAA-AVHRR 的叶面积指数, 研究青藏高原地区植被覆盖特征时空变化, 其次分析影响植被覆盖特征时空变化的气

候驱动因子,以揭示高原植被覆盖变化的成因。

1 高原地表覆盖特征空间分布及数据源

青藏高原地处高原气候大区,国家气象局依据积温和降水量分布,将高原地区划分为4个子气候区[29]:高原南缘湿润大区(H₁)、高原亚湿润大区(H₂)、高原亚干旱大区(H₃)和高原干旱大区(H₄)。气温和降水量差异使高原地表积雪冻土(图1(a))分布存在明显区域性分布,地表覆盖类型(图1(b))也因气候差异存在空间适应性分布。利用1982~2000年反演于NOAA气象卫星的8 km×8 km植被归一化指数(NDVI),经各象元点逐一相关分析后显示,由于气候的长期适应过程,高原植被生态系统存在4个主要的植被物候变化显著相似区域(图1(c)),即地表植被生态系统的物候变化存在区域性特征。同时由于降雪周期长(图1(d))以及积雪分布和覆盖周期空间差异很大[32],高原地区地表物理属性在时空上也存在非同步变化。

青藏高原地区气候和地表覆盖特征空间分布的不均一性、植被物候变化不同步等因素,造成分析高原地区植被覆盖年际间变化过程存在很大困难,问题主要集中于2个方面:()植被物候变化的非同步

性,使得表述区域植被年覆盖状况的时间尺度极为复杂;()高原地区地表覆盖特征和物理属性时空变化剧烈,尤其是降雪和积雪融化过程使地物波谱月变化十分强烈,如直接使用NDVI数据,很难鉴别出植被覆盖年际变化信息。少数利用NDVI针对该地区植被覆盖的研究,并没有考虑上述两点因素影响,研究结果有待进一步证实[33,34]。鉴于上述存在的问题,本文采用叶面积指数(LAI)来分析研究高原地表植被覆盖率时空变化过程。由于叶面积指数具有清晰的物理含义,因此可以消除积雪等非植被信息扰动对遥感反演结果的影响。反演方法采用Sellers等人[35]提出的基于全球植被波谱统计结果的反演模型,这种方法非常适合于气候研究。而且对于相同的象元点,这种反演方法结果比较稳定,适合于植被覆盖年际变化分析。遥感数据来源于1982~2000年NOAA-AVHRR数据,反演结果为8 km×8 km旬最大叶面积指数。另外,由于植被物候空间分布非同步变化和极端天气事件对地表植被覆盖的影响,造成无法通过固定月份区间的叶面积指数描述地表植被年覆盖状况,使空间对比十分困难。为了消除此类影响,本文选用每年之中最大月平均叶面积指数作为植被年覆

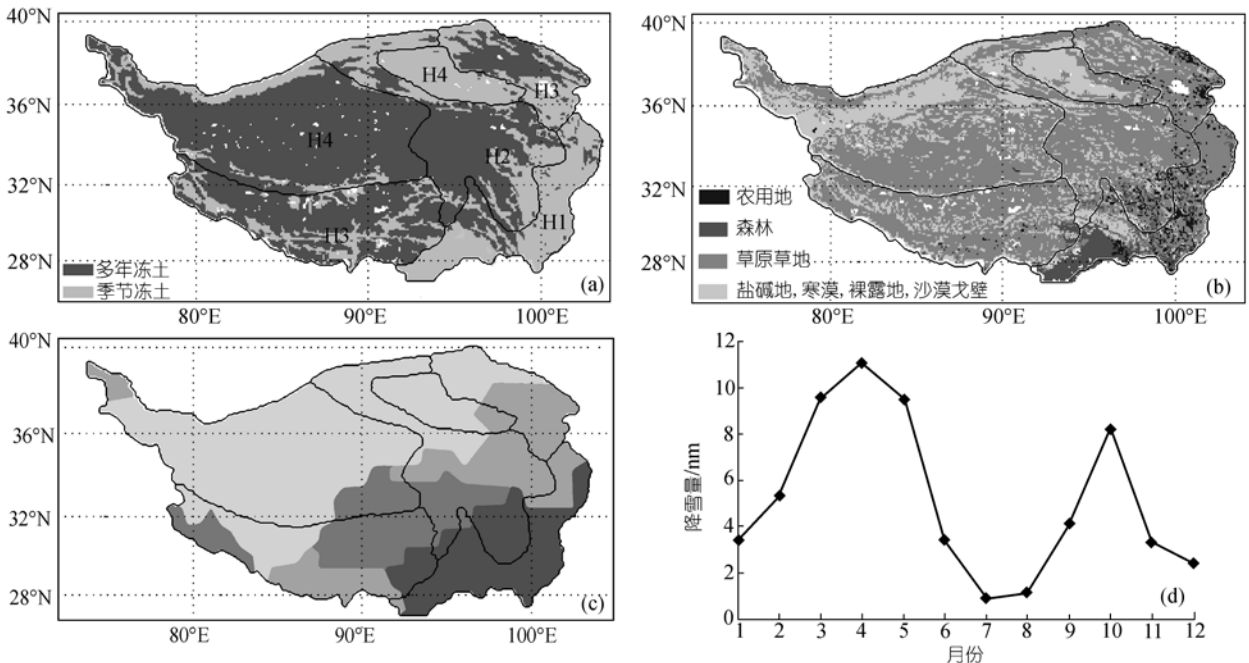


图1

(a) 青藏高原冻土分布 [30]; (b) 青藏高原地表覆盖类型分布 [31]; (c) 青藏高原地区植被物候变化相似区域分布;
(d) 1970~2000年气象台站观测资料统计的高原地区降雪量月变化

盖指标. 最大月平均叶面积指数反映了地表植被最佳覆盖状况, 既可以消除植被生长过程中极端天气事件造成的植被覆盖波动, 又可以消除植被物候不同步对时空变化结果的影响, 而且最大叶面积指数也是区域气候最佳适应性结果.

2 青藏高原地表植被覆盖状况的时空变化

本文数据分析使用自然正交分解(EOF)方法, 从时间和空间两个角度研究青藏高原地表植被覆盖状况的变化. EOF 是用来分析空间场随时间变化的统计学方法. 基本原理是将时间尺度为 t 的 n 个空间场 $F(t, n)$ 分解成为由时间权重矩阵 T 和空间特征向量 X 的乘积:

$$F_{ij} = \sum_{k=1}^n T_{ik} X_{kj}, \tag{1}$$

即, 时间序列场 $F(t, n)$ 可以由几个特征值权重较大的典型空间特征场和对应的时间系数来近似描述. 通过分析主要空间特征场和对应的时间系数, 可以清楚 $F(t, n)$ 的时空变化特征. 对于稳定变化的时间序列场 $F(t, n)$, 第一特征值能够反映出 $F(t, n)$ 的时间变化趋势以及时间变化趋势的空间分布强度, 其他特征值则可以反映出时间序列的局地波动特征.

叶面积指数正交分解结果显示, 青藏高原地区植被覆盖状况信息主要由 2 个特征场决定(表 1). 第一特征场占总特征场权重的 50.4%, 即代表高原地区植被覆盖总体平均变化趋势. 整个高原地区第一特征空间场全部呈正值分布, 高值部分主要集中在高

原南缘湿润大区附近(图 2(a)). 这种分布说明, 高原地区地表植被总体覆盖状况以及年际变化趋势主要由高原南缘地区植被覆盖状况决定, 其他地区由于植被覆盖率过低或没有植被, 对高原地区植被总体变化趋势影响甚微.

真实的叶面积指数变化是由代表总体平均变化的第一特征场叠加其他特征场组成, 因此其他特征场反映的是植被覆盖变化的区域性差异. 第二特征值权重占总权重 11.9%, 能够反映大部分植被变化的区域性差异. 其空间分布显示, 青藏高原地区主要存在两种相反的空间场分布(图 2(b)), 高原南、北部植被覆盖率的年变化基本是反位相的, 特别是高原中东部区域. 当反位相的 2 个区域中的一个区域植被增加时, 另一个区域植被覆盖率则相对趋向于减少趋势发展.

第一特征和第二特征场时间系数代表各自空间特征场的年变化过程. 虽然时间系数显示的植被覆盖年际之间波动很大, 但第一和第二特征场时间系数都呈现不同程度的线性增加趋势(图 3). 这首先说明高原植被覆盖总体上是增加的, 其中在高原南缘地区植被增加的最显著; 其次植被覆盖南北之间的区域性差距也逐年增加.

3 青藏高原地表植被覆盖状况气候影响因素分析

遥感数据体现的是地表综合信息, 包含了自然和人为作用对地表覆盖的影响. 青藏高原人口密度

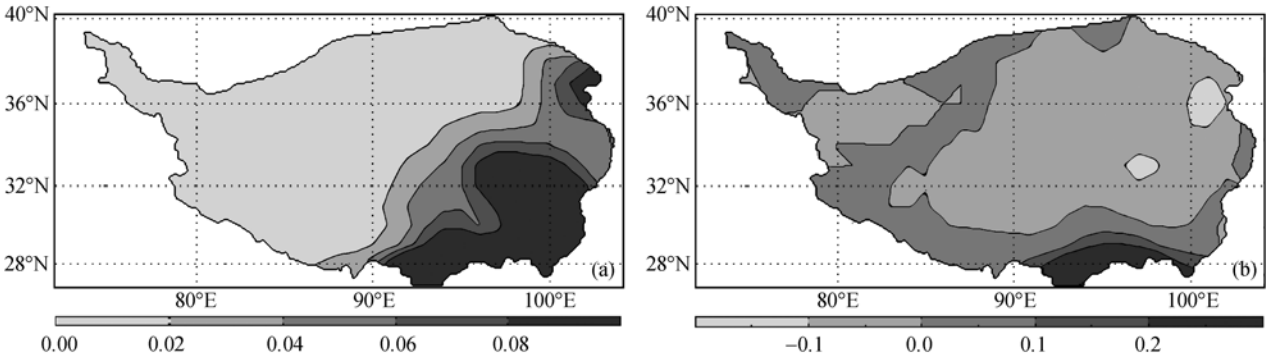


图 2 高原地区叶面积指数正交分解第一特征空间场(a)和第二特征空间场(b)分布

表 1 特征向量占总方差的百分比

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
特征值	7.54	1.78	1.29	0.93	0.72	0.52	0.43	0.36	0.28	0.23
特征值权重/%	50.4	11.9	8.6	6.2	4.8	3.5	2.9	2.4	1.9	1.5

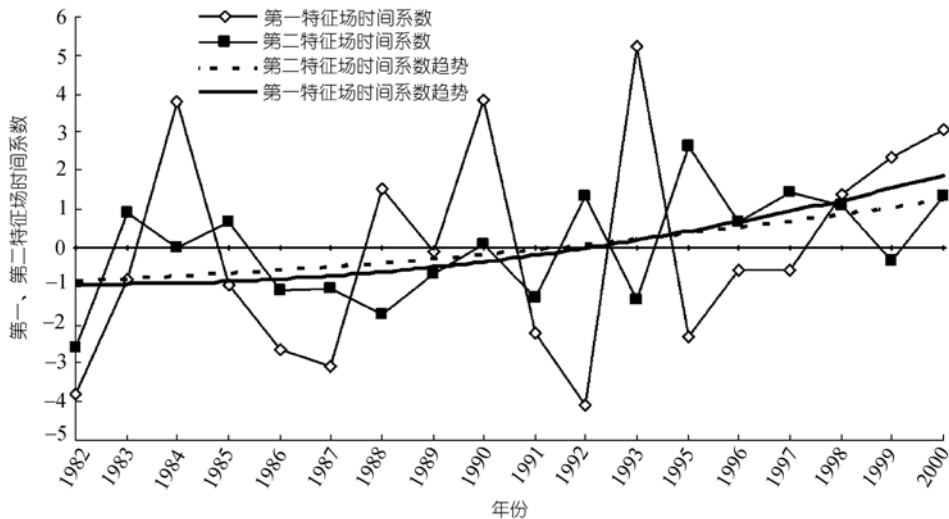


图3 第一特征场和第二特征场时间系数年变化

低,处于相对的半自然状态,人为影响因素相对较少,地表环境变化主要受气候系统控制,其中降水量和气温是2个主要影响地表覆盖特征变化、且相互制约的气候要素。在气温没有出现异常变化的年份,降水为植被的生长提供水分,植被生长覆盖状况与降水量呈正相关特征;气温代表了植被生长所需的能量强度,在降水充分的条件下,气温与植被覆盖也呈现正相关特征。正是由于降水和气温的这种相互制约和互补关系,植被生长对降水和气温的响应具有季节性和空间性差异。在干旱区域,植被对降水非常敏感,与气温呈现反相关;对于那些降水非常充足的地区,降水对植被的生长影响就会减弱,而这时气温会成为影响植被生长的主要因子^[36]。

降水与气温相互制约的过程导致地表植被形成了相对稳定的生态群落。当其中一个因素改变时,地表植被生态系统会发生适应性调整。1970~2000年高原地区观测降水和年平均气温变化显示,高原4个子气候区内,除高原亚干旱大区(H_3)年降水量在90年代中期前后出现少量减少外,其他区域降水量变化相对平稳,并没有出现显著性变化趋势。但期间4个气候区域内年平均气温却呈现明显升高趋势,尤其是20世纪80年代之后,气温增高趋势十分显著(图4)。因此高原地区LAI正交分解空间场分布及时间变化特征,与高原地区近年来气温显著上升存在密切关系。

相关分析结果显示,高原地区年平均LAI与高原地区年降水变化趋势比较一致(图5(a)),相关系数为0.512,通过95%信度检验(即相关系数大于相关临

界值0.468)。同时由于LAI正交分解第一特征场时间系数代表高原总体LAI变化趋势,所以其与降水量相关系数达到0.518,也超过显著临界值(图5(b))。但LAI其他特征场时间系数却与降水量无显著相关性。植被LAI与年降水量的这种显著关系说明,高原地区植被总体平均变化以及年际间波动主要由高原地区降水量变化决定;但植被LAI变化的区域性差异与降水没有显著关系,即植被LAI区域性变化差异是由其它气象因素引发。

年平均气温与植被LAI的关系印证了上述结论。首先年平均气温与高原地区LAI正交分解第一、第二特征场时间系数并不存在显著的相关性。其次 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率年平均气温观测资料和LAI相关性空间分布证实,气温对植被的影响存在相反的两种结果是造成青藏高原地区气温与LAI总体相关不显著的原因(图6)。高原北部地区地处高原干旱和亚干旱气候区,两区域平均年降水量在240.8 mm左右,气温的增高使得地表蒸散发增加,导致干旱进一步加剧,不利于植被的增长,因此相关系数呈负值分布;相反在高原南部湿润和亚湿润部分降水量充沛地区,两区域平均年降水量约为535.4 mm,气温增高使活动积温增加,更加有利降水充足区域植被的生长,因此相关系数呈现正值分布。

将LAI第二特征场分布(图2(b))与气温和LAI的相关性空间分布(图6)对比发现,第二特征场负值区域与负相关区域空间分布基本一致,第二特征场正值区域与正相关区域空间分布也基本一致,个别

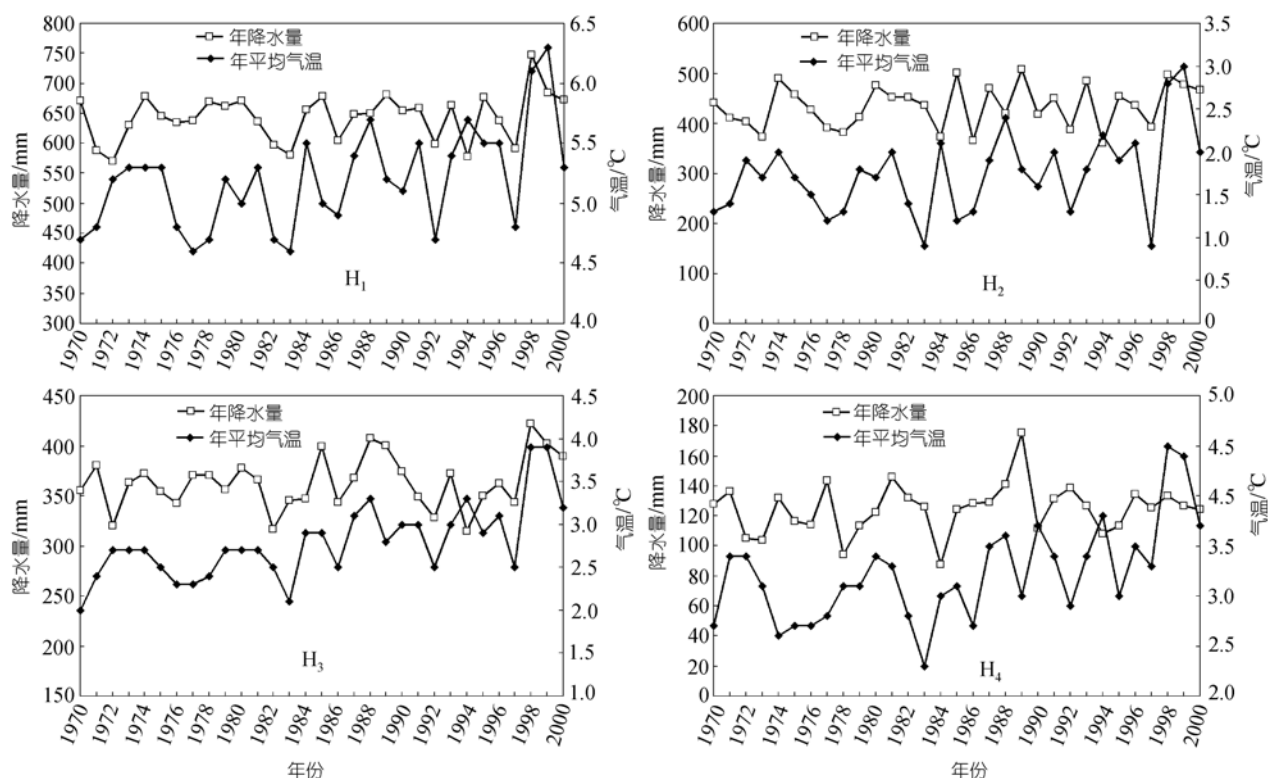


图 4 青藏高原南缘湿润大区(H₁)、亚湿润大区(H₂)、亚干旱大区(H₃)和干旱大区(H₄)年降水总量和年平均气温变化

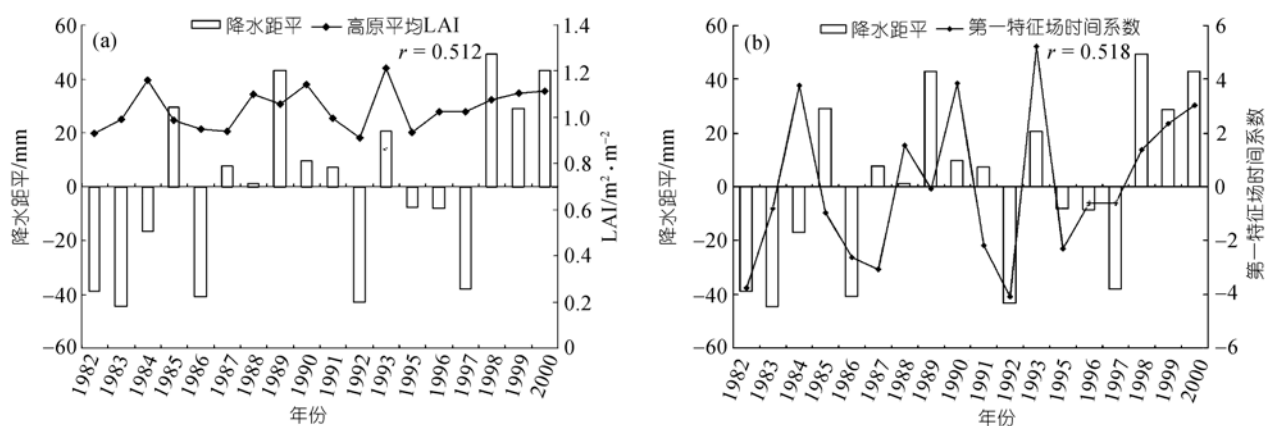


图 5 青藏高原年降水距平与高原平均 LAI(a)、正交分解 LAI 第一特征场时间系数(b)变化关系

地区差异与两种数据源空间分辨率不同有关. 两场均总体呈现南正北负, 从气候尺度上对比, 空间分布相关性明显. 两者的空间一致性暗示, 气温的波动是造成高原南北地区植被覆盖特征反相位变化的主要原因. 在高原北部地区, 由于降水量相对较少, 气温的增高导致干旱加剧, 植被生长受到抑制; 而在降水量充分的南部地区, 温度增高使植被生长所需的活功积温增加, 有利于植被覆盖率增加. 由于年降水量

在高原 4 个气候区域内基本保持平稳变化, 可以排除降水与植被覆盖南北反相位变化有关, 高原地区气温的升高是引发地表植被覆盖率呈现南北反相位变化的直接原因.

4 结论及讨论

气候等自然因素对植被生长过程的影响强度是植被动力学一个重要的组成部分. 高原地区气候复

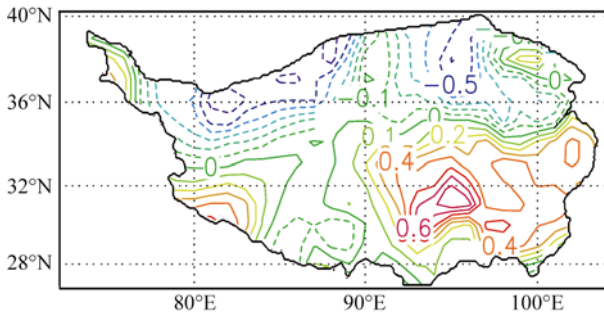


图6 LAI与气象观测年平均气温相关性分布

杂且人为影响因素相对较弱,是理想的研究区域.本文通过分析代表植被生命过程中必需的降水和气温两大气象要素发现,高原地区各子气候区之间悬殊的温湿差异,造成高原地区地表覆盖类型时空分布和变化具有突出的区域性特征.突出的是在各子气候区年降水量变化相对平稳的状态下,气候逐年变暖导致自20世纪80年代初至2000年,青藏高原地区地表植被生态环境发生显著适应性调整过程.在高原南缘湿润大区,这里植被覆盖权重在整个高原地区起决定性作用,并主导高原地区植被整体年平均变化趋势.气温的升高,一方面使该区域植被生长期增加,植被生长空间得到拓展,另一方面也会加剧植被对水的需求.如果此种状况下该区域降水量出现减少趋势,则在气温升高的同时,亦将出现植被覆盖退化的现象.

植被生态系统的适应性调整是多种气候要素共同作用的结果,气候各要素的平衡也最有利于植被生长.但当这种平衡被打破时,单一的气候因素要对植被覆盖产生显著作用,该气象要素必须超过某一

临界值,而其他气候要素必须低于各自临界值.高原地区植被覆盖时空变化、气候驱动因子分布在总体上遵循上述自然规则.本文主要结论如下:

() 20世纪80年代初至2000年,整个青藏高原地区植被覆盖率总体上呈增加趋势.在高原南缘湿润大区,植被覆盖权重在整个高原地区起决定性作用,并主导高原地区植被整体年平均变化趋势,高原南缘湿润区域植被的增加是造成高原植被覆盖总体增加的原因.

() 高原地区植被覆盖呈南北反相位年变化特征.气候变暖是造成高原地区植被覆盖南北反相位变化的主要原因.气温的升高增加了活动积温,有利于高原南缘湿润地区植被生长和生长空间拓展.相反高原北部地区植被覆盖有减少趋势,其中以高原亚干旱大区(H_3)为主体的北部植被覆盖相对密集区域,植被覆盖的减少与20世纪90年代中期前后降水量略有减少有关,但气温显著升高对整个北部区域植被生长的影响更加突出,气温的升高将加剧植被对水的需求,因此这些区域显现出气温增高的同时,植被覆盖出现退化的现象.

() 气温的差异决定高原地区植被覆盖的区域差异,而降水量是决定高原地区植被整体覆盖年际变化和波动的主要气候驱动因素.气温的升高一方面加剧高原北部地区干旱,植被生长更加依赖于降水;同时也造成南部湿润地区植被生长周期和覆盖率增加,地表植被生态系统对水分需求量随之增多.所以气温增高的同时,高原地区植被覆盖整体平均状况变化与降水量呈显著的正相关性.

参考文献

- 1 韦志刚,黄荣辉,董文杰.青藏高原气温和降水的年际和年代际变化.大气科学,2003,27(12):157—170
- 2 周宁芳,秦宁生,屠其璞,等.近50年青藏高原地面气温变化的区域特征分析.高原气象,2005,24(3):344—349
- 3 李栋梁,钟海玲,吴青柏,等.青藏高原地表温度的变化分析.高原气象,2005,24(3):291—298
- 4 王绍令.青藏高原冻土退化的研究.地球科学进展,1997,12(2):164—167
- 5 赵昕奕,张惠远,万军.青藏高原气候变化对气候带的影响.地理科学,2002,22(2):190—195
- 6 冯松,汤懋苍,王冬梅.青藏高原是我国气候变化启动区的新证据.科学通报,1998,43(6):633—636
- 7 刘晓东,侯萍.青藏高原及其邻近地区近30年气候变暖与海拔高度的关系.高原气象,1998,17(3):245—249
- 8 罗勇.青藏高原冬春季雪盖对东亚夏季大气环流影响的研究.高原气象,1995,14(4):505—512
- 9 范广洲,罗四维,吕世华.青藏高原冬季积雪异常对东、南亚夏季风影响的初步数值模拟研究.高原气象,1997,16(2):140—152
- 10 陈乾金,高波,李维京,等.青藏高原冬季积雪异常和长江中下游主汛期旱涝及其与环流关系的研究.气象学报,2000,58(5):582—595

- 11 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 青藏高原积雪对中国夏季风气候的影响. 大气科学, 2000, 24(6): 761—774
- 12 钱永甫, 张艳, 郑益群. 青藏高原冬春季积雪异常对中国春夏季降水的影响. 干旱气象, 2003, 21(3): 1—7
- 13 Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ Dynamic Vegetation Model. Glob Change Biol, 2003, 9: 161—185[doi]
- 14 Gritti E S, Smith B, Sykes M T. Vulnerability of Mediterranean basin ecosystems to climate change and invasion by exotic plant species. J Biogeogr, 2006, 33: 145—157[doi]
- 15 Hély C, Bremond L, Alleaume S, et al. Sensitivity of African biomes to changes in the precipitation regime. Global Ecol Biogeogr, 2006, 15: 258—270
- 16 Zeng X D, Zeng X, Shen S S P, et al. Vegetation-soil water interaction within a dynamical ecosystem model of grassland in semi-arid areas. Tellus B, 2005, 57: 189—202
- 17 Hickler T, Prentice I C, Smith B, et al. Implementing plant hydraulic architecture within the LPJ Dynamic Global Vegetation Model. Global Ecol Biogeogr, 2006, 15: 567—577[doi]
- 18 Dan L, Ji J J, Zhang P Q. The soil moisture of china in a high resolution climate-vegetation model. Adv Atm Sci, 2005, 22: 720—729
- 19 Zeng X D, Shen S S P, Zeng X, et al. Multiple equilibrium states and the abrupt transitions in a dynamical system of soil water interacting with vegetation. Geophys Res Lett, 2004, 31, L05501, doi: 10. 1029/2003GL018910.
- 20 张伟民, 董光荣, 屈建军. 西藏“一江两河”流域中部地区沙漠化土地类型及其分布规律. 干旱区域资源与环境, 1994, 8(3): 80—87
- 21 牛亚菲. 青藏高原生态环境问题研究. 地理科学进展, 1999, 18(2): 163—171
- 22 蔡英, 李栋梁, 汤懋苍, 等. 青藏高原近 50 年来气温的年代际变化. 高原气象, 2003, 22(5): 464—470
- 23 王绍令, 赵林, 李述训. 青藏高原沙漠化与冻土相互作用的研究. 中国沙漠, 2002, 22(1): 33—39
- 24 王一博, 王根绪, 常娟. 人类活动对青藏高原冻土环境的影响. 冰川冻土, 2004, 26(5): 523—527
- 25 朴世龙, 方精云. 1982~1999 年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化. 自然资源学报, 2002, 17(3): 373—380
- 26 樊启顺, 沙占江, 曹广超, 等. 气候变化对青藏高原生态环境的影响评价. 盐湖研究, 2005, 13(1): 12—18
- 27 周锁铨, 陈万隆. 青藏高原植被下垫面对东亚大气环流影响的数值试验. 南京气象学院学报, 1995, 18(4): 536—542
- 28 刘晓东, 田良, 韦志刚. 青藏高原地表反射率变化对东亚夏季风影响的数值试验. 高原气象, 1994, 13(4): 468—472
- 29 西北师范学院地理系, 中国自然地理图集. 北京: 地图出版社, 1984
- 30 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰雪冻土图. 北京: 地质出版社, 1988
- 31 中国科学院, 国家计划委员会地理研究所. 中国土地利用图. 北京: 测绘出版社, 1991
- 32 韦志刚, 黄荣辉, 陈文, 等. 高原地面积雪的空间分布和年代际变化特征. 大气科学, 2002, 26(4): 496—508
- 33 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 2006, 30(1): 1—8
- 34 梁四海, 陈江, 金晓媚, 等. 近 21 年青藏高原植被覆盖变化规律. 地球科学进展, 2007, 22(1): 33—40
- 35 Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. J Atmo Sci, 1986, 43: 505—531[doi]
- 36 徐兴奎, 林朝晖, 薛峰, 等. 气象因子与地表植被生长相关性分析. 生态学报, 2003, 23(2): 221—230