

青藏高原东北部气候变化的异质性及其成因

李林^{1,2}, 李晓东^{2,3,4}, 校瑞香^{2,3}, 申红艳^{2,5,6}

(1. 青海省人工影响天气办公室, 西宁 810001; 2. 青海省防灾减灾重点实验室, 西宁 810001;
3. 青海省气象科学研究所, 西宁 810001; 4. 兰州大学地球环境学院, 兰州 730000; 5. 兰州大学大气科学学
院, 兰州 730000; 6. 青海省气候中心, 西宁 810001)

摘要: 利用 1961-2016 年西宁等青藏高原东北部 13 个气象台站气温、降水等气象资料以及国家气候中心发布的南海季风指数、西伯利亚高压指数等大气环流特征量数据, 分析近 56 年来气候变化与高原主体的差异性及其可能的气候成因。研究表明: 近 56 年来青藏高原东北部气候变暖趋势十分显著, 年平均气温气候倾向率高达 0.39 °C/10 a, 呈现出三次明显的阶梯性增高态势, 并于 1994 年前后发生了由冷到暖的突变, 同时具有明显的空间差异性; 年降水量及四季降水量均没有明显变化趋势, 虽然经历了 2002 年左右由少到多的变化, 但并未出现明显突变, 年降水量具有 3 年、5 年的准周期, 而年降水日数微弱减少, 降水强度呈增加趋势; 该区域气候变化的年际波动主要受到东亚季风、高原季风和南海季风的年际振荡及其相互作用的影响, 而西风环流的作用并不明显, 植被覆盖的恢复既是对 2002 年以来降水量增加的具体反应, 同时也对于气候变暖趋势起到了一定的缓和作用。

关键词: 气候变化; 南海季风; 西伯利亚高压; 高原季风; NDVI; 青藏高原

青藏高原东北部通常称为河湟地区, 即黄河、湟水谷地, 地处青藏高原和黄土高原过渡地带。境内山脉绵亘, 沟壑纵横, 气候温和, 农牧业开发历史悠久, 是青藏高原特别是青海省物质文明的发祥地和经济社会发展的摇篮, 也是黄河流域人类活动最早的地区之一。其不仅以青海省 7.5% 的国土面积, 积聚了 75% 的人口, 创造了近 2/3 的生产总值, 成为整个青藏高原人口密度和经济总量最大的区域, 对于青藏高原经济发展和社会稳定有着举足轻重的作用^[1]。同时也正是由于地处中国两大高原交汇地带, 其气候及其变化具有一定的异质性, 既兼备东亚季风气候的某些特点, 又不同于完全高原大陆性气候。鉴于气候变化的复杂性及其对经济社会产生影响的显著性, 该地区气候变化问题受到了学术界的广泛关注。侯光良等^[2-4]利用地质遗址、代用资料等通过恢复和重建气候序列, 研究了青藏高原东北部地质时期特别是全新世以来气候变化及其对人类活动的影响, 得到了史前人类向青藏高原东北缘扩张的历程均与气候演变有密切关系的重要认识; 王建兵等^[5-6]通过研究 1961 年以来青藏高原东北部气温、降水量的变化及其对草场植被的影响, 认为该地区 20 世纪 80 年代以来气候暖干化趋势明显, 并在人类活动的共同影响下导致了植被退化; 姚瑶等^[7-9]应用 SPI、Z 指数等不同气象干旱指标研究了 1961 年以来

收稿日期: 2018-10-15; 修订日期: 2019-02-17

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项重大项目(GYHY201506001)

作者简介: 李林(1971-), 男, 甘肃永登人, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要从事气候变化及其对水资源、生态系统的影响评估与适应对策研究。E-mail: qhxnll@sohu.com

通讯作者: 李晓东(1985-), 男, 青海贵德人, 硕士, 高级工程师, 主要从事高寒生态与气候变化研究。

E-mail: 5503811xd@163.com

青海东部农业区干旱时空变化规律, 得出了该地区春旱范围呈增大趋势且强度也略有加重, 夏旱变化范围略减小而强度加剧的结论; 廖清飞等^[10]利用MODIS植被指数产品定量估算认为2000-2009年青海东部农业区生长季(4-9月)植被覆盖度呈不显著增加趋势, 降水量的变化及退耕还林措施是植被覆盖度变化的重要影响因素。总体来看, 以往有关青藏高原东北部气候变化的研究, 主要涵盖了古气候演变、器测时期以来气候及干旱等极端天气气候事件变化以及气候变化与生态演变之间相互作用的关系等, 侧重于气候变化的事实及其影响研究, 而涉及到青藏高原气候变化的区域差异性分析及其归因解释需要进一步研究。为此, 本文在分析1961-2016年青藏高原东北部气候变化的事实及其在整个青藏高原气候变化中的异质性的基础上, 从大气环流演变、植被覆盖变化方面对其气候变化的成因进行探讨。

1 研究方法与数据来源

1.1 数据来源

采用1961-2016年西宁等青藏高原东北部共13个气象台站(图1)月平均气温、平均最高气温、平均最低气温、降水量和降水日数, 分析该地区近56年来的气候变化事实, 在揭示其年际振荡成因时, 应用高原季风、南海季风、西伯利亚高压指数等气候系统监测资料。在进行植被覆盖变化分析时, 利用2010-2016年6-8月Spot VEGETATION逐月NDVI数据, 该数据空间分辨率为1 km×1 km, 像元值采用国际通用的最大合成法(Maximum Value Composite Syntheses, MVC)获得, 由每个像元NDVI的最大值确定, 确保受云影响的程度最低。

1.2 研究方法

在进行资料处理时, 利用13个气象台站气象资料序列的空间算术平均值代表整个青藏高原东北部进行分析, 其中降水日数统计了各台站≥0.1 mm以上的降水日数, 然后进行空间算术平均; 在具体统计分析时, 采用了线性趋势法、相关分析、波谱分析^[11]、M-K法^[12]等统计方法。

2 结果分析

2.1 青藏高原东北部气候变化的异质性分析

2.1.1 气候变暖的阶梯性

图2给出了1961-2016年青藏高原东北部平均气温、平均最低气温及平均最高气温变化趋势, 由此可见: (1) 近56年来青藏高原东北部气候变暖趋势十分显著, 其年平均气温、平

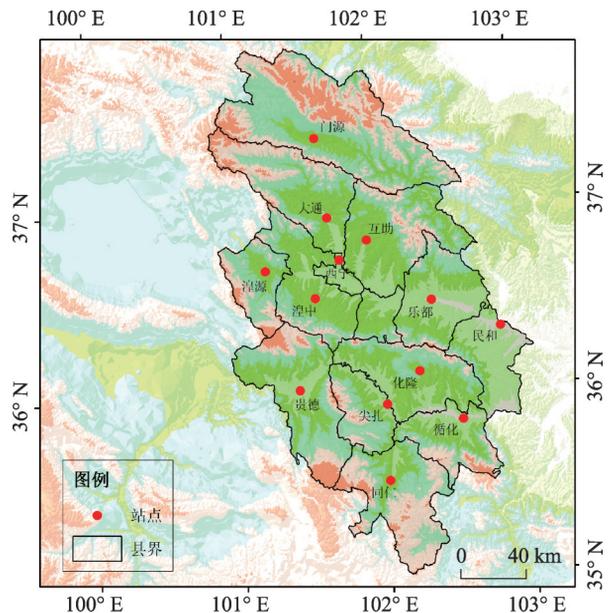


图1 青藏高原东北部地理分布
Fig. 1 Geographical distribution of the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau

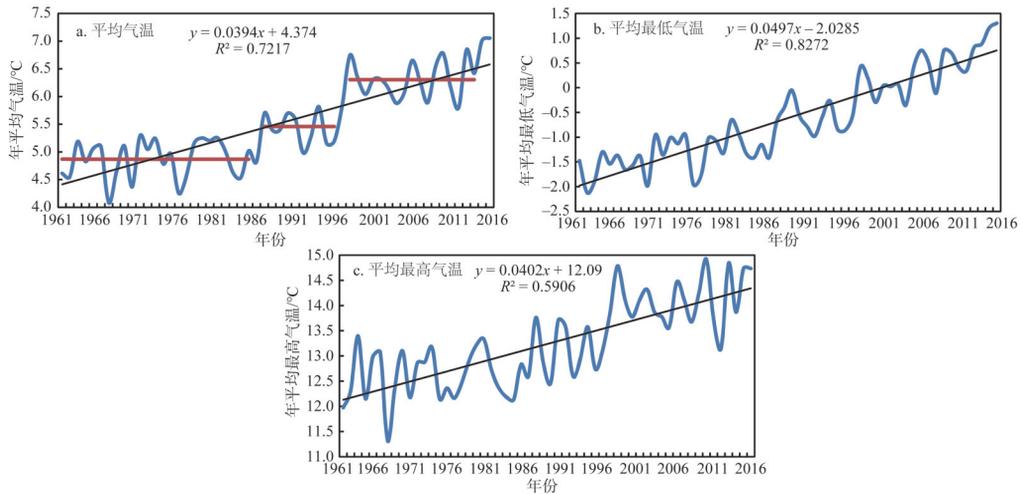


图2 1961-2016年青藏高原东北部平均气温、平均最低气温及平均最高气温变化曲线

Fig. 2 The average temperature, the mean minimum temperature and the mean maximum temperature in the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2016

均最低和平均最高气温气候倾向率分别为 $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，达到99.9%的置信水平，且年平均气温增幅要高于整个青藏高原及西北地区年平均气温每10年升高 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的增温速率^[13]；(2) 不仅年平均最低气温升幅高于年平均气温和平均最高气温升幅，而且就四季平均气温升幅而言，冬季气候增暖尤为显著，气候倾向率高达 $0.51\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，表明作为庞大的青藏高原“裸露”于大气层中的一部分，温室效应在夜间及冬季地表净辐射以长波辐射为主时的显著性；(3) 除年平均最低气温持续上升外，年平均气温、平均最高气温的上升呈现出明显的阶梯性增高态势，即出现了1961-1986年、1987-1997年、1998-2014年三次阶段性增暖，这在年平均气温的升高趋势中表现得尤为明显，三次阶梯性增暖累积增暖高达 $1.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；(4) M-K法突变检验表明，青藏高原东北部平均气温、平均最低气温及平均最高气温均在1994年前后发生了由冷到暖的突变，表明了该地区气候增暖变化趋势的一致性，同时较整个青藏高原年平均气温于1987年出现突变^[14]明显滞后；(5) 从各气象台站平均气温、平均最低气温及平均最高气温气候倾向率的空间变化来看，总体上呈北高南低的空间分布特征，表明青藏高原东北部气候变暖趋势北部要明显于南部。

2.1.2 降水变化的不显著性

由图3给出的1961-2016年青藏高原东北部年降水量变化趋势来看，近56年来该地区降水量变化具有如下特征：(1) 年降水量及四季降水量均没有明显变化趋势，这与青藏高原年降水量增加显著的事实并不一致，但颇接近于西北地区降水量变化相对稳定、没有明显趋势的特征^[13]；(2) 从年降水量累计距平变化来看，近56年来青藏高原东部经历了1961-2001年的减少阶段和2002-2016年的增加阶段两个时期，但增加趋势并未明显超过减少趋势，从而使得降水量总体变化趋势并不明显，同时M-K法检验表明年降水量并未出现突变；(3) 波谱分析表明，青藏高原东北部年降水量具有3年、5年的准周期，从小波系数变化来看，3年周期总体表现强势，而5年周期在20世纪80年代中期至90年代中期表现得不甚明显，且两者在进入2010s以来波动均趋于缓和，表明年降水量的周期

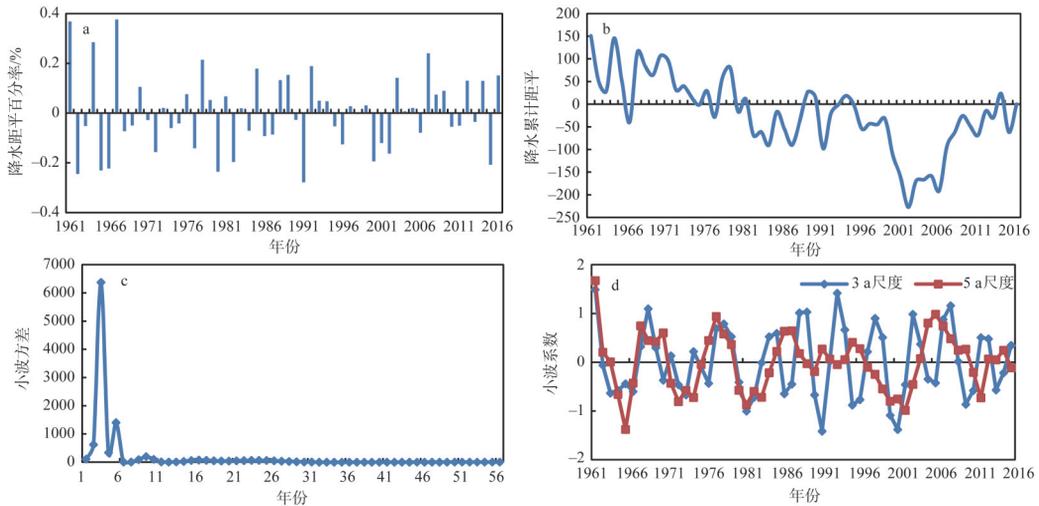


图3 1961-2016年青藏高原东北部年降水量距平百分率变化、累计距平、小波方差及小波系数
 Fig. 3 The change of precipitation anomaly percentage, cumulative anomaly, wavelet variance and wavelet coefficients in the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2016

性变化区域不显著, 同时3年周期呈上升态势而5年周期呈下降趋势, 两者反向波动也因此导致年降水量变化趋势的不明显性; (4) 降水强度呈增加趋势, 气候倾向率达1.23 (mm/d)/10 a, 达到90%的置信水平, 进而使得该地区干旱、暴雨等极端降水事件增多。

2.2 青藏高原东北部气候变化的成因探讨

如上所述青藏高原东北部地处青藏高原与黄土高原交汇地带, 气候兼具两者的共性, 主要因为受到高原季风和东亚季风的共同影响, 两者在不同季节此消彼长的作用及其年代际的振荡, 决定了该地区在全球变化背景下的区域气候变化总体态势。

2.2.1 南海季风

青藏高原东北部位于东亚季风区边缘地带, 气候变化受季风进退和强度异常的年际变化影响较为显著, 尤其是夏季, 降水和雨带位置的变化与夏季风活动密切相关。东亚季风系统既包含南海—西太平洋的热带季风, 又包括大陆—日本的副热带季风, 而影响水汽输送的主要是南海季风。何敏等^[15]将南海季风指数定义为100~130°E、0~10°N范围内, 850 hPa和200 hPa平均纬向风距平差。该指数表示了南海南部高低层的纬向风切变, 当夏季南海季风指数大于零时, 表示在南海地区低层西南气流较常年偏强, 影响中国的热带夏季风偏强; 反之, 当指数小于零时, 夏季风偏弱。同时, 南海季风爆发时间与其强度密切相关, 通常情况下季风爆发时间早, 则其强度强; 爆发时间晚, 则强度弱。由图4a给出的南海季风爆发时间变化来看, 1961-2016年南海季风爆发时间没有明显变化趋势, 但年际波动显著, 这一变化特点与青藏高原东北部降水量变化相似。进一步的相关分析得出, 南海季风爆发时间与青藏高原东北部夏季降水量相关系数为-0.316, 达到95%的置信水平, 表明南海季风爆发时间偏早, 强度偏强, 则对应于青藏高原东北部夏季降水量偏多; 反之亦然。近56年中两者反位相对应年份为34年, 拟合率达61%。显然, 这一结论与周长艳等^[16]有关夏季青藏高原东侧水汽主要来源于南海和孟加拉湾的认识是基本一致的。

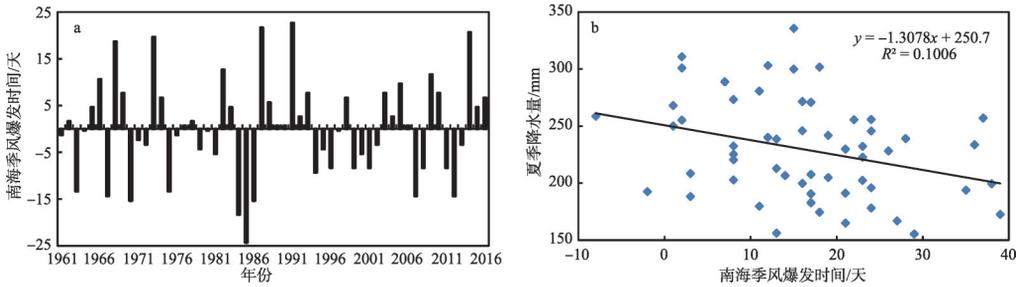


图4 1961-2016年南海季风爆发时间变化及其与青藏高原东北部夏季降水量的相关图

Fig. 4 The South China Sea monsoon eruption time changes and its correlation with the summer precipitation in the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2016

2.2.2 西伯利亚高压

西伯利亚高压又称蒙古高压或亚洲高压，是东亚季风的主要成员之一，对全球大气环流特别是东亚季风有重要影响，西伯利亚高压与辐射冷却及中上层大气的辐合都有密切联系，同时作为东亚冬季风的主要表征，其强弱对东亚夏季风的爆发时间及其强度作用显著。利用美国NCEP/NCAR数据资料集的月平均海平面气压场再分析资料计算得到西伯利亚高压强度，并统计了冬季西伯利亚高压强度与青藏高原东北部冬季气温的相关关系（图5）。可以看出，两者呈显著负相关关系，相关系数为-0.37，置信水平为99%，表明冬季西伯利亚高压强度越强，有利于冷空气经偏西路径影响青藏高原东北部，从而在平流冷却和辐射冷却的共同作用下，导致该地区冬季气温偏低。这显然与侯亚红等^[17]有关冬季西伯利亚高压强度与中国冬季气温有很好的相关性，表现在年际时间尺度上，当冬季西伯利亚高压面积、强度异常增大时，中国冬季气温异常主要表现为西南地区温度偏高，其他地区温度偏低的认识是相吻合的。不仅如此，相关分析还表明4月西伯利亚高压与青藏高原东北部年降水量、降水日数的关系十分密切，相关系数分别为-0.41、-0.37，均达到了99%的置信水平，说明在1-3月降水量仅仅占全年降水量10%的背景下，若4月西伯利亚高压依然保持强劲态势，则冷空气南下频繁，不利于南海季风的提前爆发，水汽不易向青藏高原东北部输送，进而可造成降水日数、降水量均偏少。

2.2.3 高原季风

青藏高原独特的气候特征无异与高原季风气候的形成和演变有着更为密切的相关关

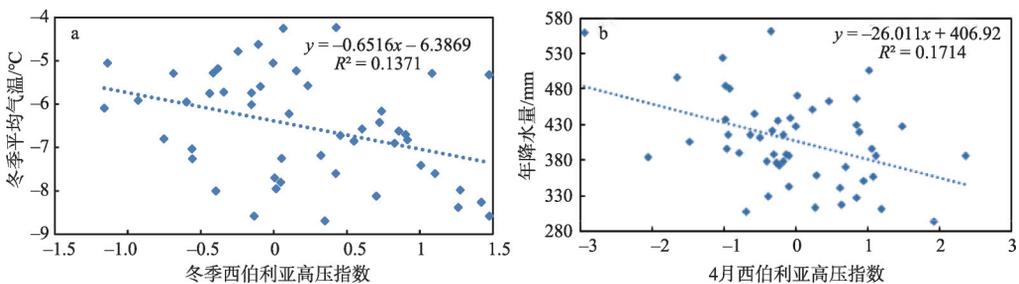


图5 冬季西伯利亚高压指数与青藏高原东北部平均气温及4月西伯利亚高压指数与年降水量相关图

Fig. 5 Correlations between winter Siberian High index and average temperature, and between April Siberian High index and annual precipitation in the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau

系, 不仅高原的气温变化与季风强弱变化一致, 季风强期气温偏高, 季风弱期气温偏低, 而且高原夏季风爆发早晚、强度强弱对于高原夏季降水量有着显著影响。本文采用文献 [18] 中确定的青藏高原季风指数进行统计分析, 即:

$$PMI = (\Delta Z_1 + \Delta Z_2 + \Delta Z_3 + \Delta Z_4) - \Delta Z_5 \quad (1)$$

式中: PMI 为高原季风指数; ΔZ_1 、 ΔZ_2 、 ΔZ_3 、 ΔZ_4 和 ΔZ_5 分别为噶尔、茫崖、班玛、江孜和那曲 600 hPa 高度距平。由此可计算出 1961 年以来逐年逐日 PMI 指数, 进而可得出高原夏季风强度、爆发时间以及持续时间。相关分析得出, 青藏高原东北部气温与高原季风之间并不存在显著相关关系, 这一事实有别于整个高原气温明显受到高原季风影响的总体状况, 表明作为青藏高原的边缘地带, 温度变化除受温室效应影响外, 更多地受到了东亚季风特别是西伯利亚高压的控制。然而, 高原夏季风结束时间和持续时间与青藏高原东北部秋、冬季降水量关系密切, 相关系数分别为 0.42、0.30, 分别达到 99%、95% 的置信水平 (图 6)。表明高原夏季风结束的偏晚、持续时间偏长, 有利于将孟加拉湾及印度洋水汽源源不断地输送到高原东北部, 有效弥补南海季风南撤后带来的水汽空缺, 进而造成该地区秋、冬季降水量偏多。周长艳等^[16]通过分析青藏高原东侧及其周边地区 9 月的水汽输送形势发现, 来自副高南侧的水汽输送, 在高原东南侧转向成为西南风水汽输送, 汇合孟加拉湾北部的偏南风水汽输送一起从南边界向北进入高原东侧及邻近地区的结论, 也基本支持本文这一认识。

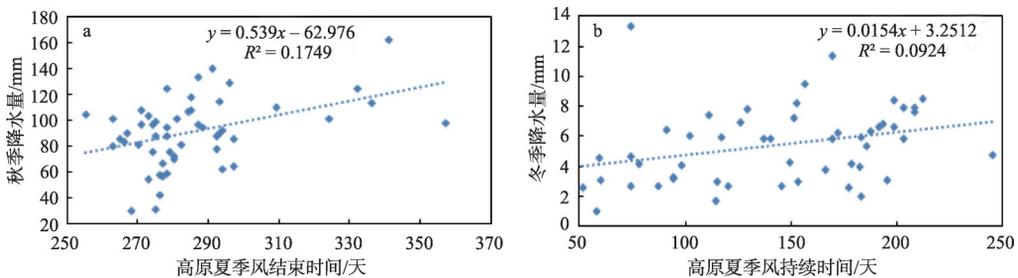


图 6 青藏高原东北部秋、冬季降水量与高原夏季风结束时间、持续时间相关图

Fig. 6 Correlations between autumn precipitation and the end of the summer monsoon (a), and between winter precipitation and the duration of the summer monsoon (b) in the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau

2.2.4 植被覆盖

植被覆盖及其变化的空间异质性是中国区域陆表热力作用时空分布及异常变化的重要原因^[19], 自然植被覆盖的变化不仅是气候变化特别是降水量变化所带来的生态效应, 同时植被覆盖的增加 (减少) 可以减少 (增加) 地表对太阳短波辐射的反射率, 使得近地层增温效应趋于缓和 (加剧)。由图 7a 给出的 2000-2016 年青藏高原东北部 $NDVI$ 值变化曲线来看, 近 17 年来该地区植被覆盖呈明显恢复态势, $NDVI$ 值气候倾向率达 0.02/10 a。这一变化态势与上文分析得出该地区 2002-2016 年降水量表现出明显增加的趋势是一致的, 相关分析表明两者相关系数为 0.47, 达到 95% 的置信水平, 表明该地区在气候变暖背景下有利于植被覆盖趋于恢复。这一结论, 可由文献 [19] 认为在西北干旱区过去 20 年草原生态系统的植被覆盖、物种多样性和初级生产量等均有不同程度的增加,

在很大程度上受到同期降水量增加影响的结论,以及引言所述廖清飞等^[10]的相关研究成果得到进一步证实。不仅如此,通过分析得出青藏高原东北部13个气象台站年平均最高气温气候倾向率与各站点所代表的县域NDVI值气候倾向率相关系数为-0.45,达到90%信度的置信水平(图7b),同时与增暖趋势北部高而南部相对较低的气候变暖空间差异恰好相反的是,NDVI值空间变化趋势表现为南部增大明显而北部增大相对不显著,表明该地区植被覆盖的恢复,增加了对太阳短波辐射的有效吸收,减少了反射辐射,对于近地层大气的加热起到了缓和作用,并具有一定的空间差异性。

另外,根据王可丽等^[20]、李林等^[21-22]有关西风带与季风对中国西北地区的水汽输送研究,就多年平均状况而言,高原切变线以北地区主要受西风带影响,以南地区主要受西南季风影响。统计分析也证实地处最北端的门源冬季降水量对秋季西风环流的确有较为显著的滞后负相关关系,而其余地区却不明显。因此综合起来看,在全球变化大背景下,青藏高原东北部作为青藏高原和黄土高原的交汇地带,其气候变化的异质性实质上主要表现为对上述两大区域气候变化的兼容性,其气候变化的年际波动则主要受到东亚冬季风、南海夏季风和高原季风的进退及其相互作用的影响,同时作为气候系统重要组成的生态系统植被覆盖与该区域气候变化同样存在十分密切的反馈机制。

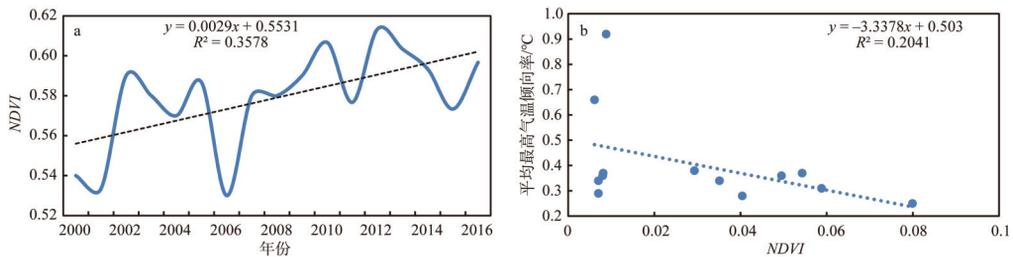


图7 2000-2016年青藏高原东北部NDVI变化及其各台站气候倾向率与平均最高气温倾向率相关图

Fig. 7 Change trend of NDVI and the trend of the climatic tendency of the average maximum temperature in the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2016

3 结论

(1) 近56年来青藏高原东北部气候变暖趋势十分显著,其年平均气温气候倾向率为 $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,不仅明显高于整个青藏高原及西北地区年平均气温增温速率,而且呈现出三次明显的阶梯性增高态势,累积增暖高达 $1.43\text{ }^{\circ}\text{C}$;年平均气温1994年前后发生了由冷到暖的突变,较整个青藏高原年平均气温于1987年出现突变明显滞后;同时气候变化具有明显的空间差异,总体上北部气候变暖趋势要明显于南部。

(2) 近56年青藏高原东北部年降水量及四季降水量均没有明显变化趋势,虽然经历了1961-2001年的减少阶段和2002-2016年的增加阶段两个时期,但并未出现突变;年降水量具有3年、5年的准周期,进入2010s这种周期性变化趋于不明显性;年降水日数微弱减少和降水强度增加的趋势,导致该地区干旱、暴雨等极端降水事件增多。

(3) 作为地处青藏高原与黄土高原交汇地带的青藏高原东北部,在全球变化背景下其气候变化的异质性,主要表现在对两大高原气候变化的兼容性上;该区域气候变化的年际波动主要受到东亚冬季风、高原季风和南海季风的年际振荡及其相互作用的影响,

而西风环流的作用并不明显;该地区植被覆盖的恢复既是2002年以来降水量增加产生的生态效应,同时也通过吸收太阳短波辐射对于气候变暖趋势起到一定的缓和作用。

参考文献(References):

- [1] 《河湟地区生态环境保护与可持续发展》编辑委员会. 河湟地区生态环境保护与可持续发展. 西宁: 青海人民出版社, 2012. [The Editorial Board of the Protection of Ecological Environment and Sustainable Development in Hehuang. Protection the Ecological Environment and Sustainable Development in Hehuang. Xining: Qinghai People's Press, 2012.]
- [2] 侯光良, 刘峰贵, 萧凌波, 等. 青海东部高庙盆地史前文化聚落演变与气候变化. 地理学报, 2008, 63(1): 34-40. [HOU G L, LIU F G, XIAO L B, et al. The transmutation of settlements of prehistoric cultures in Eastern Qinghai caused by climate change. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 34-40.]
- [3] 侯光良, 刘峰贵, 刘翠华, 等. 中全新世甘青地区古文化变迁的环境驱动. 地理学报, 2010, 65(1): 53-58. [HOU G L, LIU F G, LIU C H, et al. Prehistorical cultural transition forced by environmental change in mid-holocene in Gansu-Qinghai region. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 53-58.]
- [4] 侯光良, 许长军, 樊启顺. 史前人类向青藏高原东北缘的三次扩张与环境演变. 地理学报, 2010, 65(1): 65-70. [HOU G L, XU C J, FAN Q S. Three expansions of prehistoric humans towards northeast margin of Qinghai-Tibet Plateau and environmental change. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 65-70.]
- [5] 王建兵, 汪治桂. 青藏高原东北部边坡地带气温变化特征研究. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 176-180. [WANG J B, WANG Z G. Variation characteristics of temperature in northeastern border region of Qinghai-Xizang Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(1): 176-180.]
- [6] 王建兵, 李晓媛, 王振国. 青藏高原东北部农牧交错区气候变化及其对草场植被的影响. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6): 216-219. [WANG J B, LI X Y, WANG Z G. The climate varieties of agro-pastoral zone in the Northeastern Qinghai-Xizang Plateau and their impact on grassland vegetation. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(6): 216-219.]
- [7] 姚瑶, 张鑫, 马全, 等. 青海省东部农业区区域干旱指标及干旱变化规律. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(12): 208-213. [YAO Y, ZHANG X, MA Q, et al. Regional drought indexes and its variation in east agricultural region of Qinghai province. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2014, 42(12): 208-213.]
- [8] 姚瑶, 张鑫, 马全, 等. 青海省东部农业区作物生长期不同气象干旱指标应用研究. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 177-184. [YAO Y, ZHANG X, MA Q, et al. Application research on different drought indices in crop growing period at east agricultural region of Qinghai province. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(4): 177-184.]
- [9] 姚瑶, 张鑫, 马全, 等. 基于SPI青海省东部农业区季节干旱变化分析. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 96-100. [YAO Y, ZHANG X, MA Q, et al. Analysis on evolution of seasonal drought in eastern agriculture region Qinghai province based on SPI. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(6): 96-100.]
- [10] 廖清飞, 张鑫, 马全, 等. 青海省东部农业区植被覆盖时空演变遥感监测与分析. 生态学报, 2014, 34(20): 5936-5943. [LIAO Q F, ZHANG X, MA Q, et al. Spatiotemporal variation of fractional vegetation cover and remote sensing monitoring in the eastern agricultural region of Qinghai province. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(20): 5936-5943.]
- [11] 李春晖, 郑小康, 杨志峰, 等. 黄河天然径流量变化趋势及其影响分析. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(1): 80-85. [LI C H, ZHENG X K, YANG Z F, et al. Trends of annual natural runoff in the Yellow River Basin. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science Edition*, 2009, 45(1): 80-85.]
- [12] 李江风, 袁玉江, 由希尧, 等. 树木年轮水文学研究与应用. 北京: 科学出版社, 2000. [LI J F, YUAN Y J, YOU X Y, et al. *Research and Application of Tree Ring Hydrology*. Beijing: Science Press, 2000.]
- [13] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化监测公报. 北京: 科学出版社, 2017. [Climate Change Center of China Meteorological Administration. *China Climate Change Monitoring Bulletin*. Beijing: Science Press, 2017.]
- [14] LI L, YANG S, WANG Z Y, et al. Evidence of warming and wetting climate over the Qinghai-Tibet Plateau. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2010, 42(4): 449-457.

- [15] 何敏, 许力, 宋文玲. 南海夏季风爆发日期和强度的短期气候预测方法研究. 气象, 2002, 28(10): 9-14. [HE M, XU L, SONG W L. Short range climate prediction of the onset and intensity of South China Sea summer monsoon. Meteorological Monthly, 2002, 28(10): 9-14.]
- [16] 周长艳, 李跃清, 李薇, 等. 青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特征. 高原气象, 2005, 24(6): 880-888. [ZHOU C Y, LI Y Q, LI W, et al. Climatological characteristics of water vapor transport over eastern part of Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings. Plateau Meteorology, 2005, 24(6): 880-888.]
- [17] 侯亚红, 杨修群, 李刚. 冬季西伯利亚高压变化特征及其与中国气温的关系. 气象科技, 2007, 35(5): 646-650. [HOU Y H, YANG X Q, LI G. Variation features of Siberian High and relation with winter temperature in China. Meteorological Science and Technology, 2007, 35(5): 646-650.]
- [18] 李栋梁, 何金海, 汤绪, 等. 青藏高原地面加热场强度与 ENSO 循环的关系. 高原气象, 2007, 26(1): 39-46. [LI D L, HE J H, TANG X, et al. The relationship between the intensity of surface heating fields over the Qinghai-Xizang Plateau and ENSO cycle. Plateau Meteorology, 2007, 26(1): 39-46.]
- [19] 《第三次气候变化国家评估报告》编辑委员会. 第三次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015. [Editorial Committee of National Assessment Report on Climate Change. Third National Assessment Report on Climate Change. Beijing: Science Press, 2015.]
- [20] 王可丽, 江灏, 赵红岩, 等. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送. 水科学进展, 2005, 16(3): 432-438. [WANG K L, JIANG H, ZHAO H Y, et al. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 432-438.]
- [21] 李林, 申红艳, 李红梅, 等. 柴达木盆地气候变化的区域显著性及其成因研究. 自然资源学报, 2015, 30(4): 641-650. [LI L, SHEN H Y, LI H M, et al. Regional differences of climate change in qaidam basin and its contributing factors. Journal of Natural Resources, 2005, 16(3): 432-438.]
- [22] 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. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1566-1574. [LI L, SHI X H, SHEN H Y, et al. Cause of water level fluctuation in Qinghai Lake from 1960 to 2009 and its future trend forecasting. Journal of Natural Resources, 2011, 26(9): 1566-1574.]

The heterogeneity of climate change and its genesis in the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau

LI Lin^{1,2}, LI Xiao-dong^{2,3,4}, XIAO Rui-xiang^{2,3}, SHEN Hong-yan^{2,5,6}

(1. Qinghai Weather Modification Office, Xining 810001, China; 2. Qinghai Key Laboratory of Disaster Preventing and Reducing, Xining 810001, China; 3. Meteorological Institute of Qinghai Province, Xining 810001, China; 4. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 5. Department of Atmospheric and Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 6. Qinghai Climate Centre, Xining 810001, China)

Abstract: The northeastern part of Qinghai-Tibet Plateau is situated in the transitional zone of the Qinghai-Tibet Plateau and Loess Plateau. Known as Qinghai's Hehuang areas, it is the valleys of Yellow River and Huangshui River. And it is the birthplace of civilization and cradle of economic and social development of the Qinghai-Tibet Plateau, especially Qinghai province. It is also one of the areas of earliest human activities in the Yellow River Basin. Because it is located in the intersection of China's two high plateaus, its climate and its changes have a

certain heterogeneity. The northeastern part of Qinghai-Tibet Plateau has some characteristics of the East Asian monsoon climate, which is different from complete plateau continental climate. Therefore, due to complexity of its climate change and significance of its impact on economy and society, the issue of climate change in the region has received wide attention from academic community. Based on analysis of climate change in the northeastern part of Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2016 and its heterogeneity in climate change over the Qinghai-Tibet Plateau, this paper discusses the causes of climate change from evolution of atmospheric circulation and changes in vegetation cover. The meteorological data such as temperature, precipitation and other meteorological data of 13 meteorological stations in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2016, the data of atmospheric circulation characteristics such as the South China Sea summer monsoon index and Siberian High Index released by the National Climate Center were analyzed in this paper. And, the heterogeneity between climate change and plateau main body and their possible climate genesis were also analyzed in the past 56 years. The results are shown as follows: (1) Climate warming trend in the northeastern part of Qinghai-Tibet Plateau is very significant in the past 56 years. The climatic tendency rate of annual average temperature is as high as $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, showing three obvious stepwise increases and it has mutations from cold to warm around 1994 with significant spatial variability. (2) There is no obvious change in annual and seasonal precipitation. Although it has experienced less to more changes around 2002, there is no significant mutation. The annual precipitation has a quasi-periodic variations of 3 years and 5 years, while the number of annual precipitation days is slightly reduced and precipitation intensity is increasing. (3) The interannual variability of climate change in this region is mainly affected by interannual oscillations of East Asian monsoon, plateau monsoon and South China Sea monsoon and their interactions, while effect of westerly circulation is not obvious. The restoration of vegetation cover has not only responded to precipitation increase since 2002 but also played a certain role of mitigative effect in climate warming trend.

Keywords: climate change; South China seasummer monsoon; Siberia High index; plateau monsoon; NDVI; Qinghai-Tibet Plateau