

1981-2010年柴达木盆地气候要素变化特征及湖泊和植被响应

徐浩杰, 杨太保

(兰州大学资源环境学院冰川与生态地理研究所, 兰州 730000)

摘要:以1981-2010年柴达木盆地及其周边气象站点逐月气温和降水量资料为基础,通过气候趋势分析、气候突变分析等方法,研究了柴达木盆地气候要素的变化特征,并结合 Landsat TM/ETM+影像、NOAA/AVHRR-NDVI和EOS/MODIS-NDVI数据,研究了近30年来柴达木盆地湖泊面积和植被生长的动态变化及其对气候要素的响应。结果表明:① 1981-2010年,柴达木盆地气温整体升高,秋冬增幅最为明显,年平均气温在1997年发生暖突变,1998年以后升温趋势显著。② 1981-2010年,柴达木盆地年可利用降水量经历了“减少—增加—减少—增加”的变化,但整体呈增加趋势,1980-1985年、1990-2001年,年可利用降水量呈减少趋势;1985-1990年、2001-2010年,年可利用降水量呈增加趋势。③ 柴达木盆地湖泊面积受夏季可利用降水量影响显著,1985-2010年,托素和冬给措纳湖泊面积呈“扩张—萎缩—扩张”变化;1985-1990年,湖面轻微扩张;1990-2001年,湖面明显萎缩;2001年以后,湖面显著扩张。④ 柴达木盆地植被生长受生长季可利用降水量影响显著,1982-2010年柴达木盆地植被生长呈“退化—改善—退化—改善”变化,但整体呈改善趋势;1982-1985年植被轻微退化,1985-1990年植被轻微改善,1990-2001年植被显著退化,2001年以后植被显著改善。

关键词:气候要素;湖泊面积;植被生长;柴达木盆地

doi: 10.11820/dlkxjz.2013.06.003

1 引言

在全球气候变暖的背景下,近30年青藏高原升温显著,升温速率为 $0.40\sim 0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (王朋岭等, 2012; 尹云鹤等, 2012)。青藏高原边缘地区气候变暖较高原腹地显著(宋辞等, 2012)。伴随气温的显著升高,近30年来青藏高原降水量亦呈不显著增加趋势(韩国军等, 2011; 李林等, 2010; 尹云鹤等, 2012),高原上高海拔地区的降水在减少,而低海拔地区的降水在增加(李生辰等, 2007)。湖泊和植被是气候变化的敏感地表类型。受气候变化影响,青藏高原湖泊面积和植被生长发生了显著变化。国内外学者对青藏高原湖泊和植被动态变化开展了大量研究,结果表明,近30年来,青藏高原北部湖泊出现先萎缩后扩张的变化(李治国等, 2012),青藏高原腹地色林错及周边区域湖泊呈持续扩张状态(边多等, 2010),青藏高原南部喜马拉雅山脉地区湖

泊则呈退缩趋势(除多等, 2012)。青藏高原植被覆盖变化整体上趋于改善。高原东北部、东中部以及西南部湿润半湿润及部分半干旱地区植被趋于改善,植被覆盖较差的北部、西部半干旱和干旱地区呈现退化趋势(丁明军等, 2010; 张戈丽等, 2010)。

柴达木盆地位于青藏高原北部,南靠昆仑山,北依祁连山,西临阿尔金山,是中国著名的内陆干旱高原盆地(图1)。近30年来,柴达木盆地气温升高和降水量增加趋势明显强于青藏高原腹地,是青藏高原气候变化的敏感区(韩国军等, 2011; 李林等, 2010)。以往对柴达木盆地气候变化的研究多集中在气温、降水、蒸发量等气候要素的整体变化趋势上,由于所选时间和研究方法的不同,使得各研究结果存在一定的差异(傅小城等, 2011; 李远平等, 2007; 时兴合等, 2005)。随着气象资料时间序列的持续更新,有必要研究近几十年来柴达木盆地气候变化的新事实并验证其作为青藏高原气候变

收稿日期:2012-09;修订日期:2012-12.

基金项目:国家自然科学基金项目(41271024)。

作者简介:徐浩杰(1988-),男,江苏无锡人,硕士研究生,主要研究方向为全球植被生态学。E-mail: xuhj2011@lzu.edu.cn

通讯作者:杨太保(1962-),男,山西平陆人,教授,博士生导师,主要从事地理环境变化研究。E-mail: yangtb@lzu.edu.cn

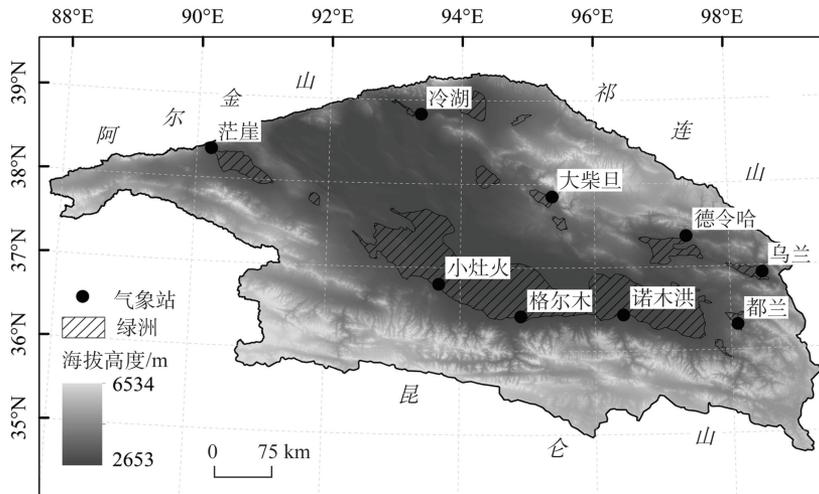


图1 柴达木盆地空间位置示意图

Fig. 1 Location of the Qaidam Basin

化敏感区的真实性。伴随着气候的显著变化,柴达木盆地湖泊和植被对气候变化的响应与青藏高原北部乃至青藏高原整体相比是否存在差异,仍需进一步验证和说明。此外,柴达木盆地自然资源丰富,素有“聚宝盆”之称,但长期以来该区严酷的自然环境和脆弱的生态系统严重地制约了当地的资源开发和经济建设。柴达木盆地气候及生态环境的演变不仅直接影响当地的经济建设和环境保护,而且对区域生态平衡乃至整个青藏高原的气候变化均有重要影响。

鉴于此,本文以柴达木盆地气象观测资料为基础,研究了柴达木盆地1981-2010年间气候要素的时空变化特征,同时结合遥感卫星资料研究了柴达木盆地湖泊面积和植被生长的动态变化,并进一步探讨了湖泊和植被对气候变化的响应,以期柴达木盆地资源开发和生态环境保护提供决策依据。

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

气象数据由中国气象科学数据共享服务网提供(<http://cdc.cma.gov.cn>),选取柴达木盆地及周边54个气象站点1981-2010年逐月气温和降水量资料,按3-5月为春季、6-8月为夏季、9-11月为秋季、12月-翌年2月为冬季,5-9月为植被生长季进行划分,研究柴达木盆地气候要素的季节变化。

多光谱影像数据由美国地质调查局提供([\[www.usgs.gov\]\(http://www.usgs.gov\)\),选取柴达木盆地1985-2010年秋季Landsat TM和Landsat ETM+影像,分析柴达木盆地湖泊面积的动态变化。归一化植被指数数据\(NOAA/AVHRR-NDVI和EOS/MODIS-NDVI数据\)分别由中国西部环境与生态科学数据中心\(<http://westdc.westgis.ac.cn>\)和美国Land Processes Distributed Active Archive Center提供\(<https://lpdaac.usgs.gov>\),选取柴达木盆地1982-2006年AVHRR-NDVI以及2000-2010年MODIS-NDVI数据研究植被生长的动态变化。为使2套数据有一致性和可比性,对数据进行重采样,使其时空分辨率分别为月和8 km。取2000-2006年AVHRR-NDVI与MODIS-NDVI数据进行对比,结果表明\(图2\):2套数据的相关系数高达0.97,能够较为一致地反映植被的时空变](http://</p>
</div>
<div data-bbox=)

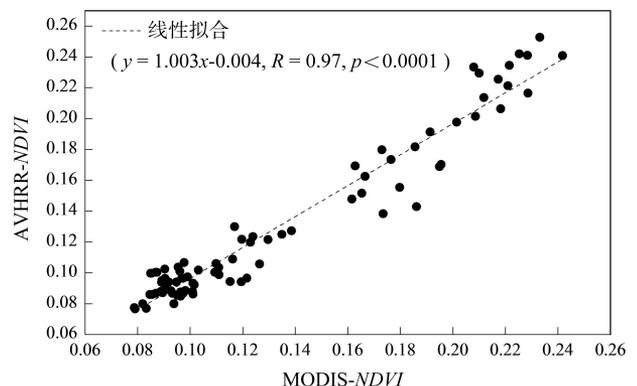


图2 2000-2006年EOS/MODIS-NDVI和NOAA/AVHRR-NDVI对比分析

Fig. 2 Inter-comparison between NDVI products of EOS/MODIS and NOAA/AVHRR during 2000-2006

化过程。利用2套数据的相关性插补得到柴达木盆地1982-2010年植被NDVI的时间序列。利用非对称高斯滤波法(徐浩杰等, 2012)对植被NDVI数据进行平滑滤波处理,尽可能消除气溶胶、冰雪、太阳光照角度及传感器观测视角等非植被因素对NDVI值的影响,使其能够更真实地反映植被的季节变化规律。

2.2 研究方法

2.2.1 气温和降水量的空间插值

根据各气象站点的经纬度、海拔和坡向信息,逐年逐月对各气象站点气温和经度、纬度、海拔以及降水量与经度、纬度、海拔、坡向指数进行多元线性拟合(范泽孟等, 2011),并对残差值(真实值与拟合值之差)进行样条插值,得到时空分辨率为月与8 km的气象栅格数据。

$$Y = aX_1 + bX_2 + cX_3 + dX_4 + e + \varepsilon \quad (1)$$

式中: Y 为气象要素; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别为经度、纬度、海拔和坡向指数; e 为截距; ε 为残差值。

2.2.2 实际蒸发量的估算

湖面面积变化受入湖水量的影响显著,植被生长主要受热量和水分的控制。可利用降水量(降水量与蒸发量的差值)与降水量相比,在不考虑植物蒸腾、地表汇流和土壤入渗等情况下能够更为准确地表征地表水资源的变化。由于蒸发量受气象条件、土壤类型、地表植被等多种下垫面条件的影响,难以准确计算实际蒸发量。目前实际蒸发量的估算方法较多,但多数方法观测和计算复杂,也存在许多物理参数的不确定性问题。高桥公式计算简便且普遍适用于各个气候区,考虑了降水量和温度2个影响蒸发的最主要物理因子,并以实际观测资料为依据,因此能够较好地反映实际蒸发量的变化(杨辉等, 1999; 付菁等, 2012),其公式如下:

$$E = \frac{3100P}{3100 + 1.8P^2 \exp(-\frac{34.4T}{235 + T})} \quad (2)$$

式中: E 为月实际蒸发量(mm); P 为月降水量(mm); T 为月平均气温($^{\circ}\text{C}$)。

2.2.3 气候要素变化趋势的显著性检验及突变检测

采用Mann-Kendall法研究气温和可利用降水量变化趋势的显著性及突变情况(易湘生等, 2011),其公式如下:

$$Z_c = \frac{\tau}{\sigma_r^2}; \tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1; \sigma_r^2 = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \quad (3)$$

式中: Z_c 为秩相关系数; τ 为检验统计变量; p 为数据序列所有对偶观测值($R_j, R_i, j < i$)中 $R_j < R_i$ 出现的次数; n 为序列长度; σ_r^2 为方差。

在Mann-Kendall秩次检验中,若统计量 $|Z_c| \leq Z_{(1-\alpha/2)}$,则认为序列没有显著趋势;当 $Z_c < -Z_{(1-\alpha/2)}$ 时,表明序列有显著下降趋势;当 $Z_c > Z_{(1-\alpha/2)}$ 时,表明序列有显著上升趋势。 α 表示显著性水平,当 $\alpha=0.05$ 时, $Z_{(1-\alpha/2)}=1.96$ 。Mann-Kendall突变检验中,在正序列和反序列2个统计量序列仅有一个明显的交叉点,且位于信度线之间,则表明该交叉点为突变点,且统计上显著;若交叉点位于信度线之外,或者是存在多个明显的交叉点,则不确定是否为突变点。

2.2.4 湖泊面积提取

水体反射从可见光到中红外波段逐渐减弱,在近红外和中红外波长范围内吸收性最强,这与陆面反射存在很大差异,因此可用可见光波段和近红外波段的反差构成的归一化水体指数(NDWI)提取陆地和水体的分界线(凌成星等, 2009),其公式如下:

$$NDWI = (R_{\text{Green}} - R_{\text{Nir}}) / (R_{\text{Green}} + R_{\text{Nir}}) \quad (4)$$

式中:在Landsat TM/ETM+影像中, R_{Green} 代表绿光波段(0.78~0.90 μm), R_{Nir} 代表近红外波段(1.2~2.5 μm)。通过1985-2010年Landsat TM和Landsat ETM+影像研究了柴达木盆地托素和冬给措纳湖泊面积变化。采用2010年高空间分辨率的Geo-Eye影像对解译结果进行精度验证,发现使用归一化水体指数法提取的湖泊面积其准确性达到98%以上。

2.2.5 植被生长的年际变化趋势

趋势线分析法是对一组随时间变化的变量进行线性回归的方法(侯光雷等, 2012)。本文通过计算每个像元植被生长季NDVI平均值(\overline{NDVI}),用趋势线分析法来拟合1982-2010年植被 \overline{NDVI} 的变化趋势,其公式如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{k=1}^n k \times \overline{NDVI} - \sum_{k=1}^n k \times \sum_{k=1}^n \overline{NDVI}}{n \times \sum_{k=1}^n k^2 - \left(\sum_{k=1}^n k \right)^2} \quad (5)$$

式中: n 为监测年数; k 为 n 年中的第 k 年; θ_{slope} 为趋势线的斜率,变化趋势的显著性检验采用 F 检验法。根据显著性检验结果将变化趋势分为如下5个等级:极显著退化($\theta_{\text{slope}} < 0, p \leq 0.01$),显著退化($\theta_{\text{slope}} < 0, 0.01 < p \leq 0.05$),变化不显著($p > 0.05$),显

著改善($\theta_{\text{slope}} > 0, 0.01 < p \leq 0.05$), 极显著改善($\theta_{\text{slope}} > 0, p \leq 0.01$)。

2.2.6 植被生长与气候因子的相关分析

相关分析是指多元回归分析中, 在消除其他变量影响的条件下所计算的某2个变量之间的相关性(徐建华, 2002)。本文利用基于像元的偏相关分析法分别研究了气温和可利用降水量对植被生长的影响, 首先计算植被 \overline{NDVI} 与气温和可利用降水量的线性相关系数, 并进一步计算得到偏相关系数。线性相关系数的计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{k=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中: R_{xy} 为 x, y 两变量的线性相关系数; x_i 与 y_i 分别表示 x, y 两变量第 i 年的值; \bar{x} 和 \bar{y} 分别表示 x, y 两变量 n 年的平均值; n 为样本数。

基于线性相关系数的计算结果, 偏相关系数计算公式如下:

$$R_{12(3)} = \frac{R_{12} - R_{13}R_{23}}{\sqrt{(1 - R_{13}^2)} \sqrt{(1 - R_{23}^2)}} \quad (7)$$

式中: $R_{12(3)}$ 为将变量3固定后变量1与变量2之间的偏相关系数; R_{12}, R_{23}, R_{13} 分别表示变量1与变量2、变量2与变量3、变量1与变量3的相关系数。

偏相关系数的显著性检验采用 T 检验法, 其公式如下:

$$T = \frac{R\sqrt{n-m-1}}{\sqrt{1-R^2}} \quad (8)$$

式中: R 表示偏相关系数; n 表示样本数; m 表示自变量个数。

根据偏相关系数的 T 检验结果将植被 \overline{NDVI} 与温度和可利用降水量的相关性分为如下6个等级: 极显著负相关($R < 0, p \leq 0.01$), 显著负相关($R < 0, 0.01 < p \leq 0.05$), 不显著负相关($R < 0, p > 0.05$), 不显著正相关($R > 0, p > 0.05$), 显著正相关($R > 0, 0.01 < p \leq 0.05$) 和极显著正相关($R > 0, p \leq 0.01$)。

3 结果与分析

3.1 气温和可利用降水量的年际变化特征

1981-2010年, 柴达木盆地气温整体呈波动上升趋势(图3), 年平均气温增速为 $0.68 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$, 植被

生长季平均气温增速为 $0.66 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。从各季节变化趋势看, 冬季增温幅度最大, 达 $0.83 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$, 其次是秋季 $0.65 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、夏季 $0.64 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、春季 $0.61 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。各时间段增温趋势均通过置信度为99%的统计检验。由5年趋势滑动分析结果可知, 年平均气温经过2次波动, 在1985、1994年达到波谷, 在1989、2000年达到波峰。春季平均气温经过3次波动, 在1984、1988、2002年达到波谷, 在1986、1997、2006年达到波峰。夏季平均气温经过3次波动, 在1985、1994、2009年达到波谷, 在1989、2000年达到波峰。秋季平均气温经过2次波动, 在1986、1995年达到波谷, 在1988、2000年达到波峰。冬季平均气温经过2次波动, 在1985、1995年达到波峰, 在1989、2004年达到波峰。生长季平均气温经过3次波动, 在1985、1991、2003年达到波谷, 在1990、1997、2000年达到波峰。

气温的 Mann-Kendall 突变检测显示(图4), 年平均气温、生长季平均气温、四季平均气温的正序列曲线在20世纪90年代中后期均超过95%置信度线, 并且正反序列曲线在信度区间内存在交叉点, 其中: 春季、夏季、秋季、生长季和全年仅有1个交叉点, 分别出现在1995-1996、1995-1996、1993-1994、1994和1997年。冬季平均气温正反序列曲线在信度区间内存在多个交叉点, 采用5年滑动 T 检验法检测突变点的显著性, 发现冬季平均气温在1998-1999年发生突变。综上所述, 柴达木盆地在1998年以后升温显著, 并于1997年发生暖突变。其他季节的平均气温在1995年左右也均出现了暖突变, 进入了一个相对偏暖的气候状态。

柴达木盆地近30年的增温速率明显高于青藏高原整体水平(王朋岭等, 2012; 尹云鹤等, 2012)。从气温的季节变化来看, 柴达木盆地与青藏高原基本一致, 以秋冬增暖为主(刘桂芳等, 2010)。柴达木盆地气温的突变时间与青海三江源地区一致, 但不同于整个青藏高原(李林等, 2010; 易湘生等, 2011)。

1981-2010年, 柴达木盆地可利用降水量整体变化不明显(图5), 除夏季和生长季有显著增加趋势、冬季有显著减少趋势外, 其余时段均无明显变化。由5年趋势滑动分析结果可知, 年可利用降水量经过2次波动, 在1986、1999年达到波谷, 在1987、2009年达到波峰。春季可利用降水量经过2次波动, 在1996、2005年达到波谷, 在1988、2003年

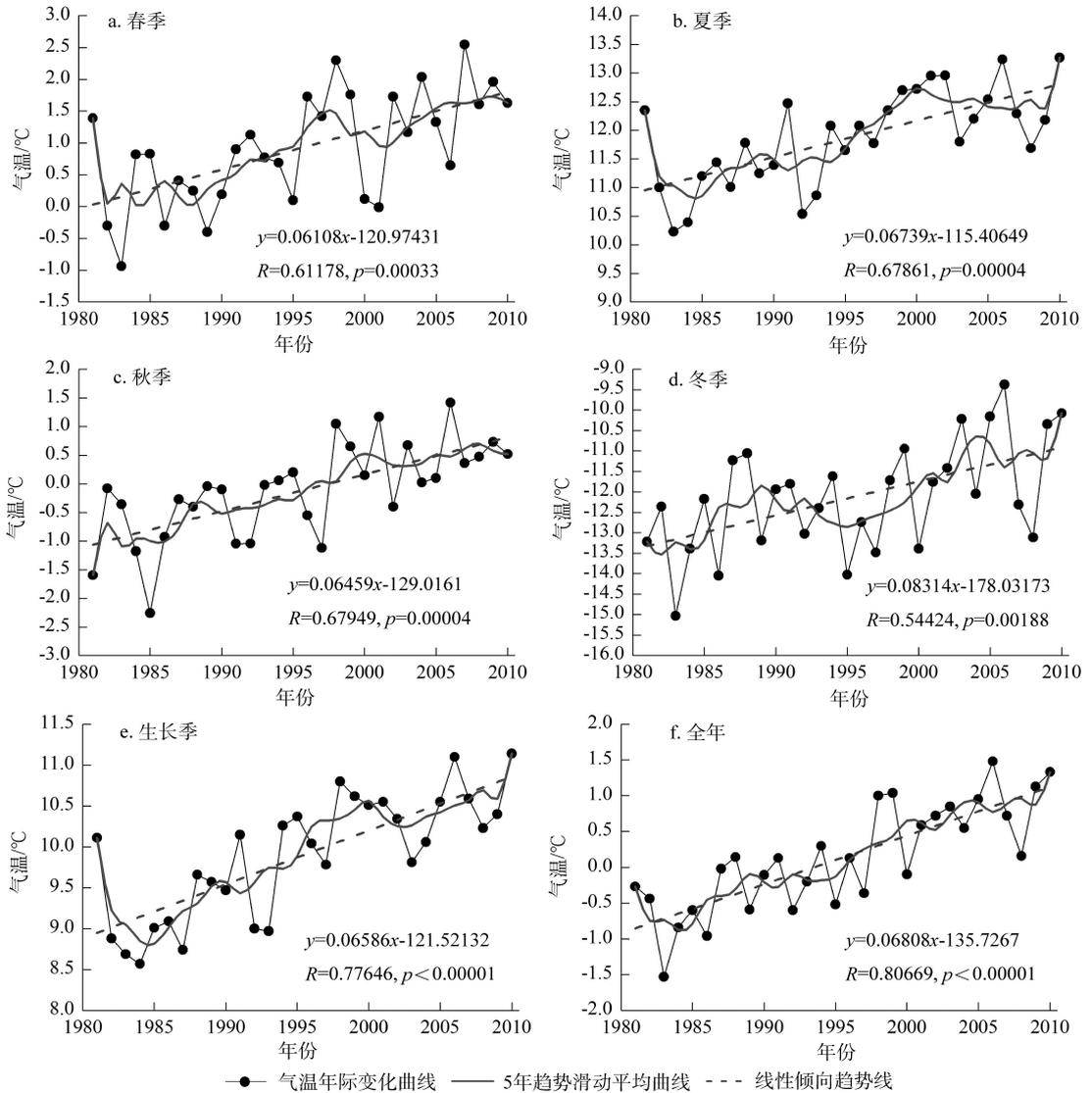


图3 1981-2010年柴达木盆地气温年际变化、线性趋势及5年滑动平均

Fig. 3 Inter-annual variation of temperature, linear tendency and 5 years running average in the Qaidam Basin during 1981-2010

达到波峰。夏季可利用降水量经过2次波动,在1986、1999年达到波谷,在1984、1991年达到波峰。秋季可利用降水量经过1次波动,在1992年达到波谷,在2009年达到波峰。冬季可利用降水量经过2次波动,在1986、1999年达到波峰,在1993、2006年达到波峰。生长季可利用降水量经过2次波动,在1986、1999年达到波谷,在1987、2009年达到波峰。

可利用降水量的Mann-Kendall突变检测显示(图6),除春季外,夏季、秋季、冬季、生长季和年可利用降水量的正序列曲线超过95%置信度线,并且正反序列曲线在信度区间内存在交叉点,其中夏

季、秋季、生长季和全年仅有1个交叉点,分别出现在2007-2008、2006-2007、2008和2008-2009年。冬季可利用降水量正反序列曲线在信度区间内存在多个交叉点,采用5年滑动T检验法检测突变点的显著性,发现冬季可利用降水量在1995-1996年发生突变。综上所述,柴达木盆地可利用降水量大致在2008年发生了显著突变。

青藏高原从20世纪80年代-90年代初期降水变化不大,90年代中后期开始明显增加,尤其是21世纪初的增加明显(韩国军等,2011)。柴达木盆地1981-2010年间可利用降水量变化趋势与青藏高原基本一致,总体经历了“减少—增加—减少—增加”

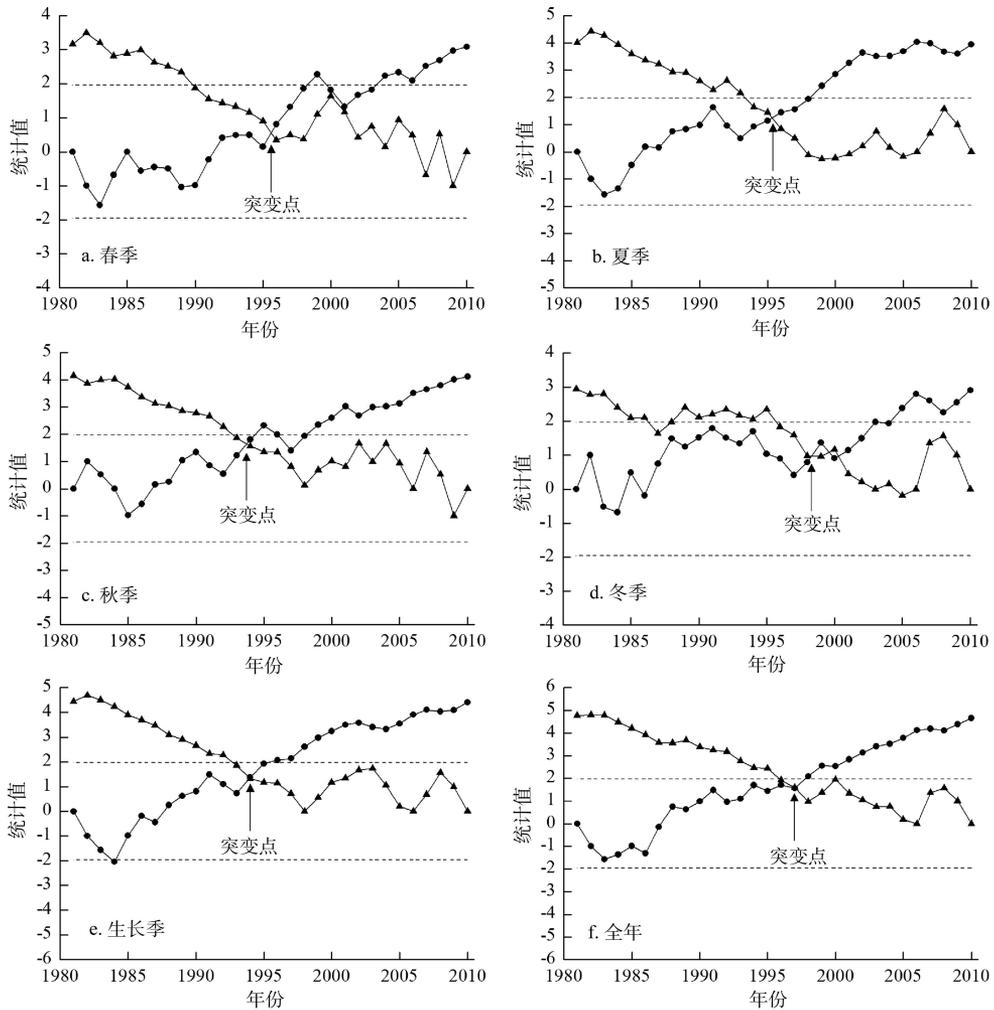


图4 1981-2010年柴达木盆地气温的Mann-Kendall 突变检测

(上下两虚直线为 $\alpha=0.05$ 显著性水平临界值信度线;带圆点的实线为正序列;带三角的实线为反序列)

Fig. 4 Mann-Kendall test for abrupt temperature changes in the Qaidam Basin during 1981-2010

的变化。1981-1985年可利用降水量偏少;1985-1990年可利用降水量偏多;1990-2001年可利用降水量再次偏少;2001年以后再次偏多。

由柴达木盆地生长季平均气温和可利用降水量的空间变化结果可知(图7),盆地整体升温明显,绝大部分地区气温上升趋势达到99%置信度以上。柴达木盆地尕斯库勒河流域、那棱格勒河流域、柴达木湖流域气温增加趋势强于柴达木河流域和格尔木河流域。柴达木盆地可利用降水量增加区域主要集中在宗务隆山东南部、鄂拉山和昆仑山中部,其余地区无明显变化。

施雅风等(2003)和李林等(2010)曾提出中国西北西中部地区和青藏高原气候在1987年由暖干向暖湿转型,其中柴达木盆地东部地区为显著转型区

之一。上述分析结果表明,柴达木盆地气温在1997年左右发生暖突变,可利用降水量在2008年左右发生突变,柴达木盆地气候突变时间与西北西中部以及青藏高原整体存在一定差异。此外,柴达木盆地气候存在阶段性波动,在1987年以后气候并没有出现持续的暖湿化趋势,反而在20世纪90年代中期至20世纪末出现了相对的暖干期,2001年以后,柴达木盆地暖湿化趋势逐渐明显,这种趋势在柴达木盆地东北部、西南部和西北部表现明显。

3.2 湖泊面积对气温和可利用降水量变化的响应

柴达木盆地受人类活动的影响较小,该区湖泊环境的变化基本反映了纯自然过程。相关研究表明,气候的干湿变化对青藏高原湖泊水量变化有显著影响(李治国等, 2012)。托素和冬给措纳为柴达

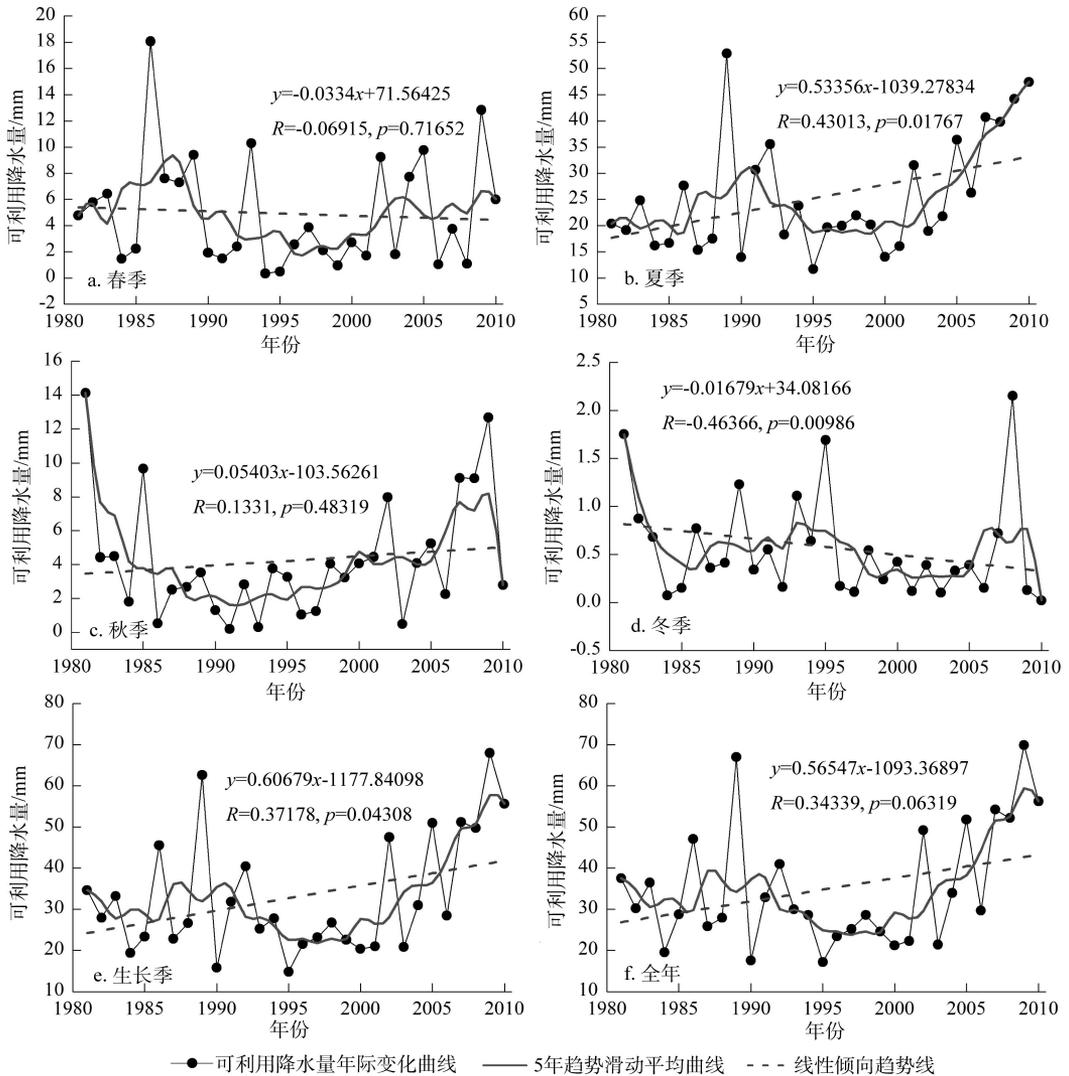


图5 1981-2010年柴达木盆地可利用降水量年际变化、线性趋势及5年滑动平均

Fig. 5 Inter-annual variation of available precipitation, linear tendency and 5 years running average in the Qaidam Basin during 1981-2010

木盆地东北部和东南部大型的平原尾间湖和高原吞吐湖。1985-2010年,托素和冬给措纳湖泊面积经历了“扩张—萎缩—扩张”的波动变化(图8)。1985-1990年湖面轻微扩张;1990-2001年湖面明显萎缩;2001-2010年湖面显著扩张。湖面面积变化与夏季可利用降水量的变化具有较好的一致性。1985-1990年柴达木盆地夏季可利用降水量增加,地表水资源量增加,入湖水量增加,托素和冬给措纳湖面扩张;1990-2001年,柴达木盆地夏季可利用降水量减少,地表水资源量减少,入湖水量减少,托素和冬给措纳湖泊面积明显萎缩;2001-2010年,柴达木盆地可利用降水量显著增加,地表水资源量显著增加,入湖水量明显增加,托素和冬给措纳湖泊

面积显著扩张。

3.3 植被生长对气温和可利用降水量变化的响应

1982-2010年,柴达木盆地植被 \overline{NDVI} 整体呈增加趋势,其年际变化率为0.0145/10a(图9)。由柴达木盆地植被 \overline{NDVI} 的年际变化可知,植被 \overline{NDVI} 变化具有阶段性特征,大致可分为4个阶段:降低阶段(1982-1985年)、增长阶段(1985-1990年)、降低阶段(1990-2001年)、增长阶段(2001-2010年),这与柴达木盆地生长季可利用降水量的变化具有较好的一致性。植被 \overline{NDVI} 变化趋势的空间显著性检验结果表明,植被极显著改善和显著改善区域分别占研究总区面积的12.25%和3.79%,植被极显著退化和显著退化区域占研究区总面积的0.3%和

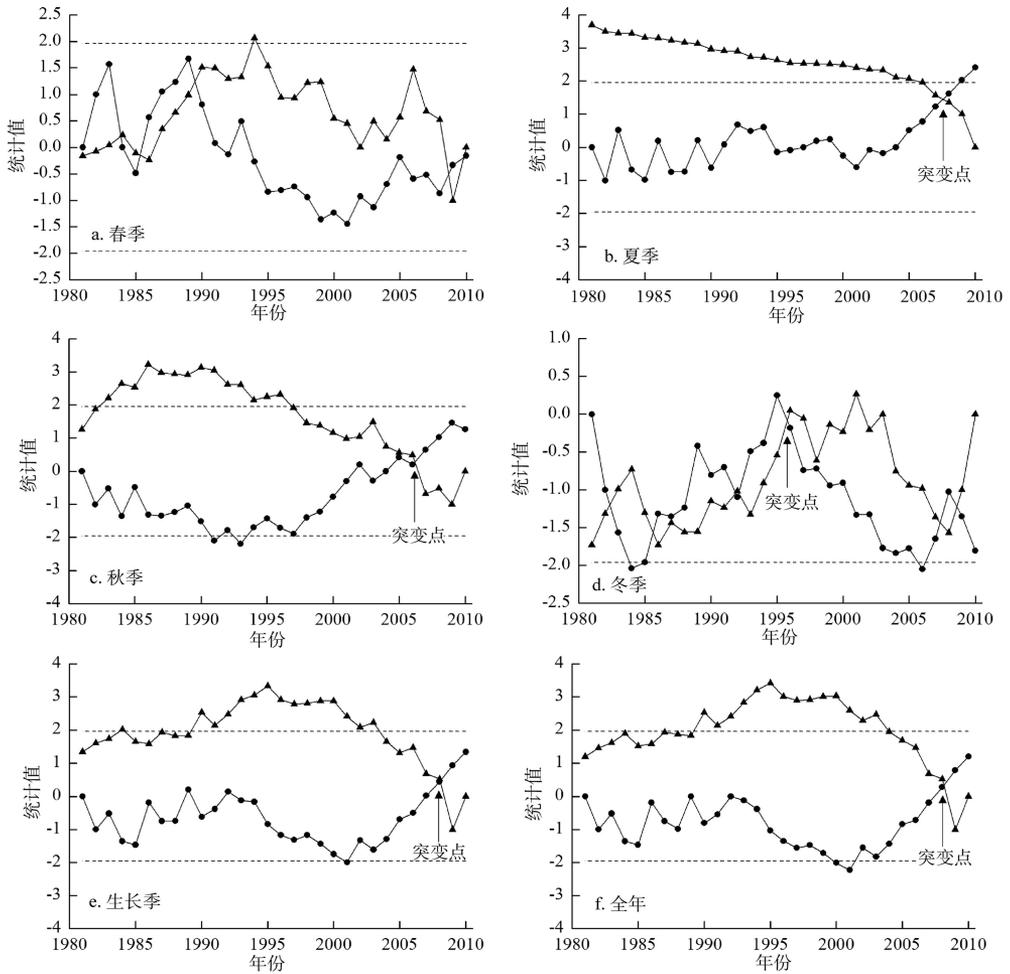
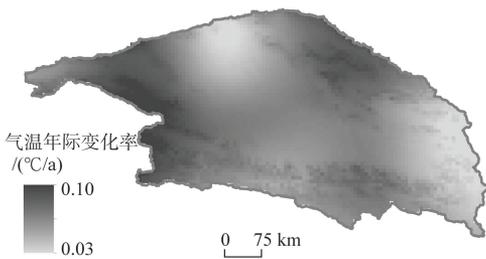


图6 1981-2010年柴达木盆地可利用降水量的Mann-Kendall突变检测

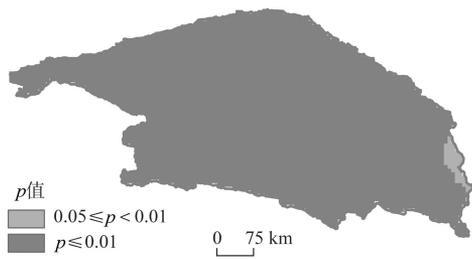
(上下两虚直线为 $\alpha=0.05$ 显著性水平临界值置信度线,带圆点的实线为正序列,带三角的实线为反序列)

Fig. 6 Mann-Kendall test for abrupt changes of available precipitation in the Qaidam Basin during 1981-2010

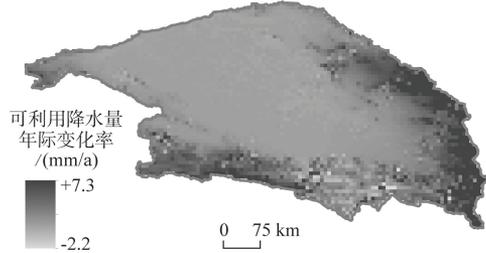
a. 生长季平均气温空间变化趋势



b. 生长季平均气温空间变化趋势显著性检验



c. 生长季可利用降水量空间变化趋势



d. 生长季可利用降水量空间变化趋势显著性检验

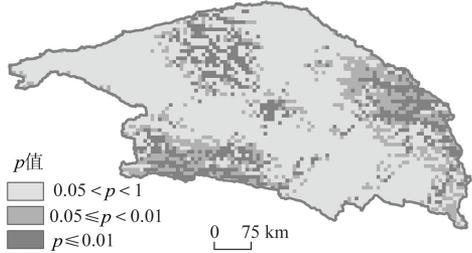


图7 1981-2010年柴达木盆地生长季平均气温和可利用降水量的空间变化

Fig. 7 Spatial variation of mean temperature and available precipitation of growing season in the Qaidam Basin during 1981-2010

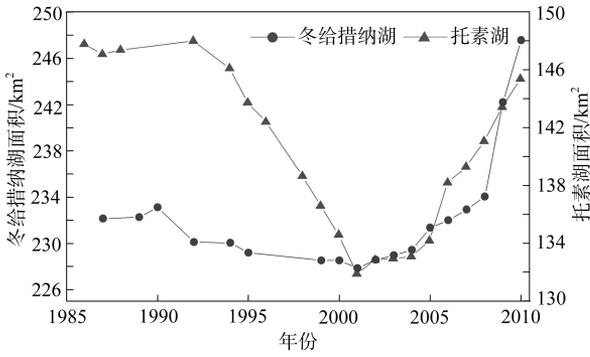


图8 1981-2010年柴达木盆地托素湖及冬给措纳湖湖泊面积变化

Fig. 8 Lake area variation of Tuosu and Donggi Cona in the Qaidam Basin during 1981-2010

0.37%, 植被不显著变化区域占研究区总面积的13.93%, 无植被区域占研究区总面积的69.36%。由此可见, 柴达木盆地山地植被改善趋势明显。

植被 *NDVI* 与生长季平均气温和可利用降水量的空间偏相关分析结果显示(图10), 温度与植被生长呈极显著和显著正相关区仅占植被覆盖区面

积的0.2%, 不显著负相关和不显著正相关分别占植被覆盖区面积的53.97%和45.83%。可利用降水量与植被生长呈极显著和显著负相关区仅占植被覆盖区面积的1.3%, 不显著负相关、不显著正相关、显著正相关、极显著正相关区分别占植被覆盖区面积的18.51%、42.56%、12.98%和24.65%。柴达木盆地植被生长季期间, 平均气温约为7℃, 热量充足, 植物生长不受热量限制, 此期间降水量的增加有利于提高土壤含水量, 水分条件的改善可促进植物生长发育, 因此表现为柴达木盆地植被生长对水分的敏感性高于温度。

4 结论

本文利用柴达木盆地及周边气象站1981-2010年月气温和降水量资料及线性趋势分析、Mann-Kendal 检验等方法对气候要素变化特征进行分析, 并结合遥感资料, 探讨了湖泊面积和植被生长对气候要素变化的响应。结果表明:

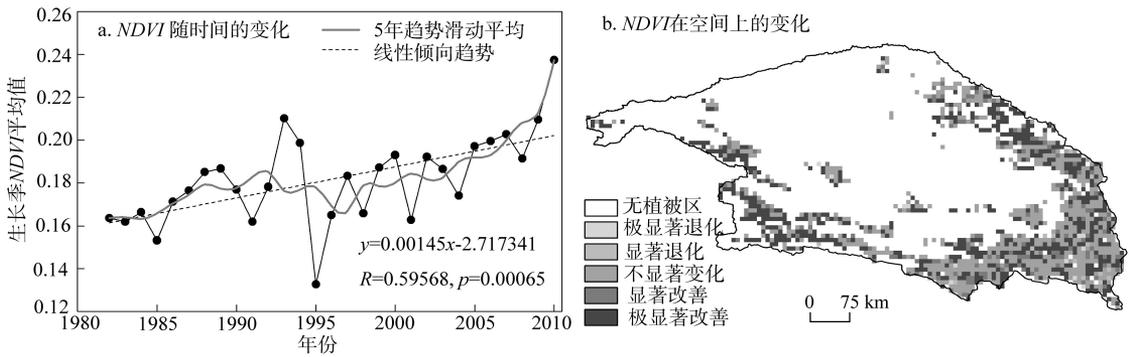
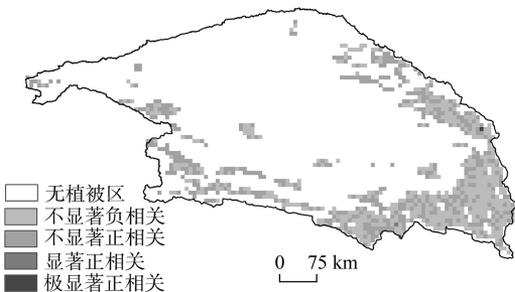


图9 1981-2010年柴达木盆地植被生长季NDVI的时空变化

Fig. 9 Spatial-temporal variation of vegetation *NDVI* of growing season in the Qaidam Basin during 1981-2010

a. 植被生长季NDVI与平均气温的偏相关关系



b. 植被生长季NDVI与可利用降水量的偏相关关系

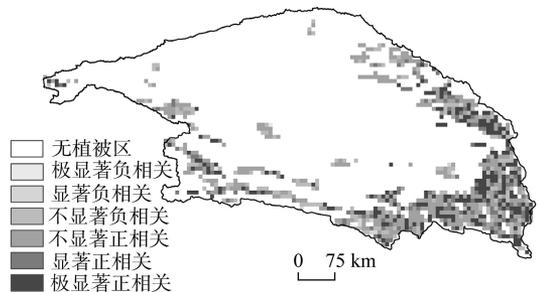


图10 柴达木盆地植被生长与气温(a)和可利用降水量(b)变化的关系

Fig. 10 Correlations between vegetation growth and temperature(a) and available precipitation(b) in the Qaidam Basin

(1) 1981-2010年,柴达木盆地气温整体呈显著上升趋势,年平均气温增速为 $0.68\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{年}$,明显高于青藏高原整体水平。柴达木盆地西部和北部升温趋势比东部和南部显著。从柴达木盆地气温的季节变化来看,以秋冬增暖最为显著,这与青藏高原基本一致。柴达木盆地气温突变时间与三江源地区一致,大致在1997年发生气温暖突变。

(2) 1981-2010年,柴达木盆地年可利用降水量整体呈增加趋势,变化率为 $5.65\text{ mm}/10\text{年}$,可利用降水量显著增加的区域主要集中在宗务隆山东南部、鄂拉山和昆仑山中部。从柴达木盆地可利用降水量的季节变化来看,可利用降水量增加主要集中在夏季。从柴达木盆地年可利用降水量的年际变化来看,可利用降水量经历了“减少—增加—减少—增加”的变化。1981-1985年可利用降水量偏少;1985-1990年可利用降水量偏多;1990-2001年可利用降水量再次偏少;2001年以后再次偏多。

(3) 柴达木盆地湖泊面积受夏季可利用降水量影响显著。1985-2010年,托素和冬给措纳湖面积呈“扩张—萎缩—扩张”变化。1985-1990年湖面轻微扩张;1990-2001年湖面明显萎缩;2001年以后湖面显著扩张。

(4) 柴达木盆地植被生长受生长季可利用降水量影响显著。1982-2010年,柴达木盆地植被生长经历了“退化—改善—退化—改善”的波动变化,但整体呈增加趋势。1982-1985年植被轻微退化;1985-1990年植被轻微改善;1990-2001年植被显著退化;2001年以后植被显著改善。

参考文献(References)

- Bian D, Bian B C R, La B, et al. 2010. The response of water level of Selin Co to climate change during 1975-2008. *Acta Geographica Sinica*, 65(3): 313-319. [边多, 边巴次仁, 拉巴, 等. 2010. 1975-2008年西藏色林错湖面变化对气候变化的响应. *地理学报*, 65(3): 313-319.]
- Chu D, Pu Q, Laba Z M, et al. 2012. Remote sensing analysis on lake area variations of Yamzho Yumco in Tibetan Plateau over the past 40a. *Journal of Lake Sciences*, 24(3): 494-502. [除多, 普穷, 拉巴卓玛. 2012. 近40a西藏羊卓雍错湖泊面积变化遥感分析. *湖泊科学*, 24(3): 494-502.]
- Ding M J, Zhang Y L, Liu L S, et al. 2010. Seasonal time lag responses of NDVI to temperature and precipitation changes and its spatial characteristics in Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 29(4): 507-512. [丁明军, 张懿锂, 刘林山, 等. 2010. 青藏高原植被覆盖对水热条件年内变化的响应及其空间特征. *地理科学进展*, 29(4): 507-512.]
- Fan Z M, Yue T X, Chen C F, et al. 2011. Spatial change trends of temperature and precipitation in China. *Journal of Geo-Information Science*, 13(4): 526-533. [范泽孟, 岳天祥, 陈传法, 等. 2011. 中国气温和降水的时空变化趋势分析. *地球信息科学学报*, 13(4): 526-533.]
- Fu J, Fan G Z, Zhou D W. 2012. The applicability and modification of Takahashi formula for evaporation estimation in Lhasa. *Journal of Applied Meteorological Science*, 23(2): 231-237. [付菁, 范广洲, 周定文. 2012. 高桥公式在拉萨地区的适用性及其修正. *应用气象学报*, 23(2): 231-237.]
- Fu X C, Wang F, Wang H, et al. 2011. Analysis of long-term changes in temperature and precipitation and their relationships with water resources in the Qaidam Basin in China. *Resources Science*, 33(3): 408-415. [傅小城, 王芳, 王浩, 等. 2011. 柴达木盆地气温降水的长序列变化及与水资源关系. *资源科学*, 33(3): 408-415.]
- Han G J, Wang Y L, Fang S B. 2011. Climate change over the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts on local agriculture and animal husbandry in the Last 50 Years. *Resources Science*, 33(10): 1969-1975. [韩国军, 王玉兰, 房世波. 2011. 近50年青藏高原气候变化及其对农牧业的影响. *资源科学*, 33(10): 1969-1975.]
- Hou G L, Zhang H Y, Guo D, et al. 2012. Spatial-temporal variation of NDVI in the growing season and its sensitivity to climatic factors in Changbai Mountains. *Progress in Geography*, 31(3): 285-292. [侯光雷, 张洪岩, 郭聃, 等. 2012. 长白山区植被生长季NDVI时空变化及其对气候因子敏感性. *地理科学进展*, 31(3): 285-292.]
- Li L, Chen X G, Wang Z Y, et al. 2010. Climate change and its regional differences over the Tibetan Plateau. *Advances in Climate Change Research*, 6(3): 181-186. [李林, 陈晓光, 王振宇, 等. 2010. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究. *气候变化研究进展*, 6(3): 181-186.]
- Li S C, Xu L, Guo Y X, et al. 2007. Change of annual precipitation over Qinghai-Xizang Plateau and sub-regions in recent 34 Years. *Journal of Desert Research*, 27(2): 307-314. [李生辰, 徐亮, 郭英香, 等. 2007. 近34a青藏高原年降水变化及其分区. *中国沙漠*, 27(2): 307-314.]
- Li Y P, Yang T B. 2007. Study on abrupt and periodic changes of temperature and precipitation in the Qaidam Basin. *Geography and Geo-Information*, 23(3): 105-108. [李远平,

- 杨太保. 2007. 柴达木盆地气温、降水突变与周期特征分析. *地理与地理信息科学*, 23(3): 105-108.]
- Li Z G. 2012. Glacier and lakes changes on the Qinghai-Tibet Plateau under climate change in the past 50 years. *Journal of Natural Resources*, 27(8): 1431-1443. [李治国. 近50a气候变化背景下青藏高原冰川与湖泊变化. 2012. *自然资源学报*, 27(8): 1431-1443.]
- Ling C X, Lin H, Xue X P, et al. 2009. Research on extracting rock-desertification information based on vegetation indexes and spatial analysis. *Research of Soil and Water Conservation*, 16(1): 167-171. [凌成星, 林辉, 薛晓坡, 等. 2009. 基于植被指数特征和空间分析的石漠化信息提取. *水土保持学报*, 16(1): 167-171.]
- Liu G F, Lu H L. 2010. Basic characteristics of major climatic factors on Qinghai-Tibet Plateau in recent 45 years. *Geographical Research*, 29(12): 2281-2288. [刘桂芳, 卢鹤立. 2010. 1961-2005年来青藏高原主要气候因子的基本特征. *地理研究*, 29(12): 2281-2288.]
- Shi X H, Zhao Y N, Dai S, et al. 2005. Research on climatic change of Qaidam Basin since 1961. *Journal of Desert Research*, 25(1): 123-128. [时兴合, 赵燕宁, 戴升, 等. 柴达木盆地40多年来的气候变化研究. 2005. *中国沙漠*, 25(1): 123-128.]
- Shi Y F, Shen Y P, Li D L, et al. 2003. Discussion on the present climate change from wet-dry to warm wet in Northwest China. *Quaternary Sciences*, 23(2):152-164. [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. *第四纪研究*, 23(2): 152-164.]
- Song C, Pei T, Zhou C H. 2012. Research progresses of surface temperature characteristic change over Tibetan Plateau since 1960. *Progress in Geography*, 31(11): 1503-1509. [宋辞, 裴韬, 周成虎. 2012. 1960年以来青藏高原气温变化研究进展. *地理科学进展*, 31(11): 1503-1509.]
- Wang P L, Tang G L, Cao L J, et al. 2012. Surface air temperature variability and its relationship with altitude & latitude over the Tibetan Plateau in 1981-2010. *Advances in Climate Change Research*, 8(5): 313-319. [王朋岭, 唐国利, 曹丽娟, 等. 2012. 1981-2010年青藏高原地区气温变化与高程及纬度的关系. *气候变化研究进展*, 8(5): 313-319.]
- Xu H J, Yang T B, Zeng B. 2012. Spatial-temporal variation of growing-season NDVI and its responses to climate change over the source region of the Yellow River. *Ecology and Environmental Sciences*, 21(7): 1205-1210. [徐浩杰, 杨太保, 曾彪. 2012. 黄河源区植被生长季NDVI时空特征及其对气候变化的响应. *生态环境学报*, 21(7): 1205-1210.]
- Xu J H. 2002. *Mathematical methods in contemporary geography*. Beijing, China: High Education Press. [徐建华. 2002. *现代地理学中的数学方法*. 北京: 高等教育出版社.]
- Yang H, Song Z S. 1999. Multiple time scales analysis of water resources in North China. *Plateau Meteorology*, 18(4): 496-508. [杨辉, 宋正山. 1999. 华北地区水资源各分量的时空变化特征. *高原气象*, 18(4): 496-508.]
- Yi X S, Yin Y Y, Li G S, et al. 2011. Temperature variation in recent 50 years in the three-river headwaters region of Qinghai Province. *Acta Geographica Sinica*, 66(11): 1451-1465. [易湘生, 尹衍雨, 李国胜, 等. 2011. 青海三江源地区近50年来的气温变化. *地理学报*, 66(11): 1451-1465.]
- Yin Y H, Wu S H, Zhao D S, et al. 2012. Impact of climate change on actual evapotranspiration on the Tibetan Plateau during 1981-2010. *Acta Geographica Sinica*, 67(11): 1471-1481. [尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 2012. 1981-2010年气候变化对青藏高原实际蒸散的影响. *地理学报*, 67(11): 1471-1481.]
- Zhang G L, Ouyang H, Zhang X Z, et al. 2010. Vegetation change and its responses to climatic variation based on eco-geographical regions of Tibetan Plateau. *Geographical Research*, 29(11): 2004-2016. [张戈丽, 欧阳华, 张宪洲, 等. 2010. 基于生态地理分区的青藏高原植被覆被变化及其对气候变化的响应. *地理研究*, 29(11): 2004-2016.]

Climate factors change and its impact on lake area and vegetation growth in the Qaidam Basin during 1981–2010

XU Haojie, YANG Taibao

(Institute of Glaciology and Ecogeography, College of Earth and Environmental Sciences,
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Changes of climate factors in the Qaidam Basin during 1981-2010 were analyzed based on the monthly temperature and precipitation data from meteorological stations. Rate of linear tendency and Mann-Kendall test were used to illustrate the change trends and detect abrupt changes of meteorological elements respectively. In addition, lake area changes and vegetation activity changes in the Qaidam Basin in response to climate changes were discussed using Landsat TM/ETM+ images, NOAA/AVHRR-*NDVI* and EOS/MODIS-*NDVI* products. The results showed that (1) The Qaidam Basin experienced an overall rise in temperature, especially in autumn and winter during 1981-2010. Temperature changed abruptly from low to high in 1987 and the increase has become more rapid since 1998. (2) The annual available precipitation showed a "decrease-increase-decrease-increase" change in recent 30 years, but the inter-annual trend of annual available precipitation was similar to annual mean temperature at a rate of 5.65 mm/10a. Available precipitations were low in 1981-1985, 1990-2001, but high in 1985-1990, 2001-2010. An abrupt change to warm-wet happened in the mid-late 1980s. However, an overall trend of warm-dry was detected from the mid-1990s to the end of the 20th century. A significant warm-wet trend of climate has arrived once again since the early 21th century. (3) Variations of lake area and vegetation growth were significantly affected by the change of wet and dry climate. The "expansion-atrophy-expansion" pattern in lake areas correlated with summer available precipitations which happened in 1985-1990, 1990-2001, 2001-2010 respectively. (4) The "degradation-amelioration-degradation-amelioration" pattern in vegetation growth was closely related with growing season available precipitation which happened in 1981-1985, 1985-1990, 1990-2001, 2001-2010.

Key words: climatic factors; lake area; vegetation growth; the Qaidam Basin