

# 新疆气候“湿干转折”的信号和影响探讨

姚俊强,毛炜峰,陈静,迪丽努尔·托列吾别克

(中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 新疆是对全球变化响应最敏感地区之一,分析全球变暖背景下新疆干湿气候变化及其影响,对应和适应未来气候变化带来的影响具有重要意义。基于气象水文观测资料,对新疆区域干湿气候变化及其影响评估进行了探讨。结果表明:① 20世纪80年代中后期以来新疆气温升高,降水量增加,呈“暖湿化”特征;但1997年之后,干旱变化趋势、干旱频率、干旱发生月份等均有明显增加,导致70%以上的区域变干,新疆气候出现了从“暖湿化”向“暖干化”转折的强烈信号,即发生了“湿干转折”;② 新疆气候转折对区域生态和水资源造成明显的影响,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)经历了先增后减的变化过程,1982—1997年植被趋于“变绿”,但1997年之后植被长势迟滞,土壤水分明显下降,生态逆转,生态负效应凸显;③ 新疆河流径流变化出现明显的区域差异,对干湿气候转折响应复杂,受冰雪融水对径流补给比例的影响,发源于天山的河流径流对区域干湿变化有正响应,但发源于昆仑山的河流径流响应不明显。研究结果表明气候“湿干转折”和极端气候事件加剧背景下新疆干旱化急剧增加,水循环系统和生态系统不稳定性加剧,相关成果可为区域干旱灾害防灾减灾和风险管理提供有价值的决策参考。

**关键词:** 湿干转折;水资源;生态逆转;影响评估;新疆

DOI: 10.11821/dlxb202101005

## 1 引言

干旱是气象灾害中最为严重的灾害之一,它具有出现频率高、持续时间长、波及范围大的特点,因此备受科学界和社会的关注<sup>[1-5]</sup>。随着全球气候变暖及其导致的水循环过程加剧,新疆气候有明显改变,引起了广泛关注<sup>[6-10]</sup>。21世纪初,施雅风院士等提出了西北干旱区气候“暖湿化”转型,其中干旱区西部(新疆)更加明显<sup>[11-12]</sup>。21世纪以来,新疆气候发生明显变化,表现为气温出现跃变式升高且维持高温波动,降水量呈微弱的减少趋势<sup>[8]</sup>,这势必对区域干湿气候变化产生重要影响,进而影响到新疆的水资源和生态安全。

目前,国际上已有100多种监测指数来定量表征干旱,干旱监测技术正在向信息综合和技术集成的方向发展<sup>[13]</sup>。区域干旱变化受水分状况和能量条件的共同影响,即受到降水量和潜在蒸散发量的共同影响。降水和潜在蒸散发的变化是影响干旱气候形成的两

收稿日期: 2019-08-19; 修订日期: 2020-11-31

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0606403); 中国沙漠气象科学基金项目(Sqj2017012); 国家自然科学基金项目(U1903208, U1903113); 新疆维吾尔自治区天山青年计划(2017Q092) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2018YFA0606403; China Desert Meteorological Science Research Foundation, No. Sqj2017012; National Natural Science Foundation of China, No.U1903208, No.U1903113; Tianshan Youth Talents (Xinjiang) Plan Project, No.2017Q092]

作者简介: 姚俊强(1987-), 男, 甘肃通渭人, 博士, 副研究员, 中国地理学会会员(S110010707M), 主要从事干旱区气候变化与水分循环研究。E-mail: yaojq1987@126.com; yaojq@idm.cn

个最主要驱动因子<sup>[8, 14]</sup>。标准化降水蒸散指数 (SPEI) 综合考虑了降水和蒸发作用, 且具有多尺度特征, 能够在不同时间尺度上合理地评估干旱变化<sup>[15-18]</sup>。利用 SPEI 指数不仅可以直观反映区域干湿分布与变化趋势, 而且能够反映不同尺度的干旱变化情况。

随着气候变暖及人类活动加剧, 干湿气候变化对区域水资源和生态安全及社会经济可持续发展的威胁日益突出<sup>[19-21]</sup>。新疆作为亚洲中部干旱区的重要组成部分, 水资源异常稀缺, 对全球气候变化响应异常敏感, 同时也是生态环境最脆弱的地区<sup>[8, 22]</sup>。植被是连接大气、水体和土壤的纽带, 分析植被覆盖的动态变化, 对研究干湿气候变化影响植被生态系统具有重要意义。新疆水资源形式多样, 山岳冰川广泛发育, 冰雪融水占各流域总径流量的比例差异较大<sup>[21]</sup>, 气候变化影响积雪冰川变化, 进而影响到流域径流和水资源。在全球变暖的影响下, 山区冰川急剧退缩, 冰川退缩已对该区域水资源、生态环境及社会经济发展等方面产生重大影响<sup>[23-25]</sup>。如何监测干旱变化情况, 如何客观、准确地评估干湿变化对水资源和生态环境的影响等问题至今仍然是摆在我们面前的重要科学课题。

因此, 本文系统分析了新疆区域干湿气候的时空变化特征, 综合评估了干湿气候变化对区域水资源和生态植被的影响, 并探讨干湿变化影响水循环系统和生态系统的可能途径, 研究结果可为区域干旱灾害防灾减灾和水资源管理提供有价值的决策参考。

## 2 数据和方法

### 2.1 研究区域

新疆地处欧亚大陆腹地, 中国西北干旱区西部, 是亚洲中部干旱区的重要组成部分。该区以大陆性干旱气候为主, 降水稀少, 干旱多发频发。地形呈“三山夹两盆”的格局 (图 1), 形成独具特色的山区—绿洲—荒漠三大生态系统, 水循环过程独特, 生态环境脆弱, 对气候变化极其敏感, 是全球变化研究的关键区, 在全球干旱区具有独特的代表性。

### 2.2 研究数据及方法

**2.2.1 研究数据** 本文所用数据为新疆区域 89 个气象站实测的 1961—2015 年逐日气温、降水量、相对湿度、风速和地表气压等数据, 数据来自新疆维吾尔自治区气象信息中心, 经过了严格的数据质量控制, 最终选取观测资料完整、代表性强且分布均匀的 55 个气象站资料进行气候要素和干湿变化分析。选取新疆区域 8 条典型河流来分析气候要素与径流量变化的相关关系, 分别为天山北坡的艾比湖、呼图壁河和玛纳斯河, 天山南坡的开都河和阿克苏河, 东天山的哈密河, 昆仑山北坡的和田河和叶尔羌河, 以流域径流形成区气象观测资料代表流域气候变化, 径流数据为 1961—2015 年的径流量监测数据, 由新疆维吾尔自治区水文局提供。

归一化植被指数 (NDVI) 是当前广泛用于表征植被覆盖的参数<sup>[26]</sup>。NDVI 数据来自美国国家航空航天局 (NASA) 发布的 1982—2015 年 GIMMS NDVI 数据集<sup>[27]</sup>, 空间分辨率为 8 km×8 km, 时

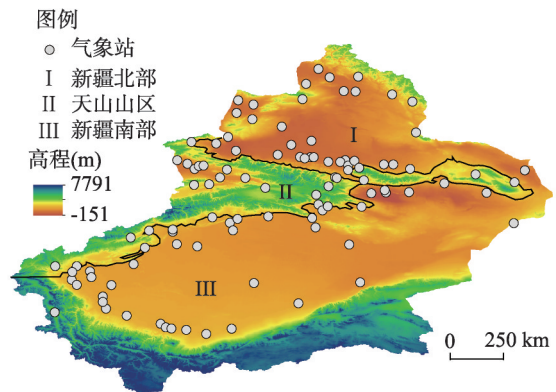


图 1 研究区概况及气象站点分布

Fig. 1 Study area and meteorological stations in Xinjiang

间分辨率为15 d。为真实反映地表植被覆盖特征, 选取植被生长季(4—10月)的NDVI数据, 采用最大值合成法得到逐月(4—10月)和植被生长季的GIMMS NDVI数据集。

重力反演与气候试验卫星(GRACE)时变地球重力场反演的陆地水储量数据(TWS), 可以用来监测区域干旱状况<sup>[28-29]</sup>。该数据空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ , 时间长度为2002年8月至2013年7月的逐月资料, 其中2003年6月、2011年1月、2011年6月、2012年5月、2012年10月和2013年3年数据缺失, 缺测值按空缺处理。

**2.2.2 SPEI干湿指数计算** 利用逐月气象数据, 建立1961—2015年1~24个月时间尺度的逐月干湿变化时间序列, 整理出干旱指数数据集<sup>[30]</sup>。使用的干旱指数是SPEI指数, 该指数可以反映区域干湿分布与变化趋势, 且具有多时间尺度和对气温变化敏感等优点, 在变暖背景下干湿分析中具有明显的优势<sup>[14, 16]</sup>。SPEI指数的计算过程包括以下4个步骤<sup>[14]</sup>:

(1) 计算气候水平衡量:

气候水平衡量 $D_i$ , 即降水量 $P_i$ 与潜在蒸散发量 $PET_i$ 之差,

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

式中:  $i$ 为月份; PET用Thomthwaite方法<sup>[31]</sup>计算得到, 其具体计算方法如下:

$$PET = \begin{cases} 0 & T < 0 \\ 16 \times \frac{N}{12} \times \frac{NDM}{30} \times \left(\frac{10T}{I}\right)^m & 0 \leq T < 26.5 \\ -415.85 + 32.24T - 0.43T^2 & T \geq 26.5 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $T$ 为逐月平均温度;  $N$ 为最大日照时数;  $NDM$ 为逐月的日数;  $I$ 为年热量指数, 是用每年12个月的月热量指数求和得到, 其计算公式为:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514} \quad T > 0 \quad (3)$$

$m$ 是与 $I$ 有关的系数, 可由下式得到:

$$m = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.492 \quad (4)$$

利用Thornthwaite方法计算PET, 所需的计算变量少, 方法简单易行, 且证实在新疆具有较好的适用性<sup>[31]</sup>, 因此应用广泛。

(2) 建立不同时间尺度的气候水平衡累积序列:

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-i} - PET_{n-i}) \quad n \geq k \quad (5)$$

式中:  $k$ 为时间尺度, 一般为月;  $n$ 为计算次数。

(3) 采用log-logistic概率密度函数拟合建立数据序列:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right]^{-2} \quad (6)$$

式中:  $\alpha$ 为尺度系数;  $\beta$ 为形状系数;  $\gamma$ 为origin参数, 可通过线性矩的方法求得。因此, 给定时间尺度的累积概率为:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^\beta\right]^{-1} \quad (7)$$

(4) 对累积概率密度进行标准正态分布转换, 获取相应的SPEI时间变化序列:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3}, \quad W = \sqrt{-2 \ln P} \quad (8)$$

式中:  $W$ 是原始数据序列的概率加权矩;  $P$ 是确定水分盈亏的概率, 当 $P \leq 0.5$ 时,  $P = 1$

$-F(x)$ ; 当 $P > 0.5$ 时,  $P = 1 - P$ , SPEI 的符号被逆转; 常数项  $C_0 = 2.515517$ ,  $C_1 = 0.802853$ ,  $C_2 = 0.010328$ ,  $d_1 = 1.432788$ ,  $d_2 = 0.189269$ ,  $d_3 = 0.001388$ 。SPEI 指数所反映的干湿等级划分标准见表1。

**2.2.3 SPEI 指数在新疆干旱监测中的适用性**

GRACE 数据在区域干旱监测中得到广泛的应用。曹艳萍<sup>[29]</sup>证实 GRACE 重力卫星能够有效监测干旱

区发生干旱灾害事件, 且监测的新疆区域干旱事件与记录一致。因此, 选取 GRACE 反演的相对水储量指数来验证 SPEI 和标准化降水指数 (SPI) 在新疆干旱监测中的适用性。

以  $\leq -1.0$  作为发生干旱的阈值, GRACE 监测到了 2007 年夏季和 2008—2009 年的干旱事件, 与灾害公报中记录一致; SPEI 指数也监测到了 2 次干旱事件, 且  $SPEI < -1.5$ , 达到了严重干旱的程度 (图 2); 而 SPI 指数没有监测到新疆区域的干旱事件, 严重低估了干旱。尽管存在些许偏差, 但整体上 GRACE 相对水储量指数和 SPEI 指数均能监测新疆的干旱灾害事件。与仅考虑降水量的 SPI 指数相比, 考虑降水和蒸发综合影响的 SPEI 指数更能合理监测新疆区域的干旱变化。此外, 不同时间尺度的 SPEI 指数还可以监测不同类型的干旱, 如 6 个月和 12 个月时间尺度分别代表农业干旱灾害和水文干旱灾害等。

表 1 SPEI 干湿等级划分表

Tab. 1 Drought and wetness classifications of SPEI

类型	SPEI 值
极端湿润	$SPEI \geq 2$
中等湿润	$1.5 \leq SPEI < 1.99$
轻度湿润	$1 \leq SPEI < 1.49$
正常	$-0.99 < SPEI < 0.99$
轻度干旱	$-1.49 < SPEI \leq -1$
中等干旱	$-1.99 < SPEI \leq -1.5$
极端干旱	$SPEI \leq -2$

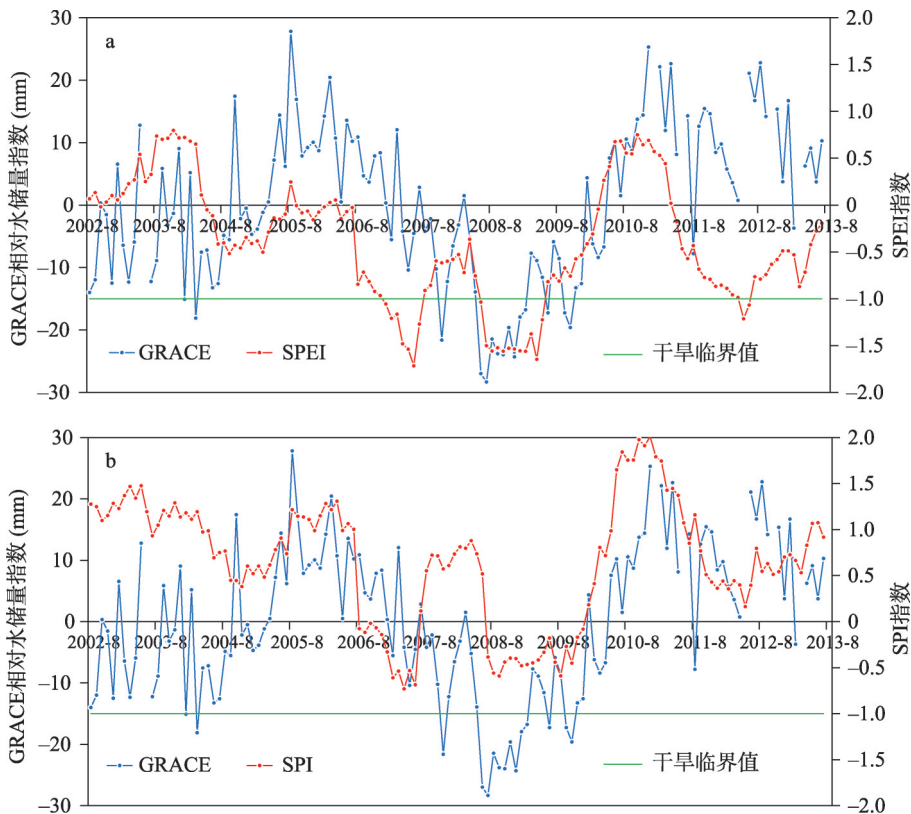


图 2 GRACE 相对水储量指数与 SPEI 指数(a)和 SPI 指数(b)的比较

Fig. 2 Comparison of the GRACE-TWS and 12-month SPEI (a) and SPI (b)

### 3 结果与分析

#### 3.1 新疆气温和降水量的变化

1961—2015年新疆地区气温上升趋势明显, 上升速率为 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $p < 0.01$ ), 明显高于全球平均水平。20世纪60年代至80年代初变化幅度较小, 80年代中后期开始急剧增温, 气温变化幅度增大。Mann-Kedall突变检验(以下简称M-K检验)结果表明新疆气温在1997年发生了突变, 自1997年开始气温跃升, 并保持在高位震荡, 多年平均气温比1997年之前增加了 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 从变化趋势来看, 1997年之后出现了增温停滞, 且有微弱的下降波动趋势, 速率为 $-0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $p > 0.05$ ) (图3)。

1961—2015年新疆地区的降水量也出现了同步的变化, 增加速率为 $8.37\text{ mm}/10\text{a}$  ( $p < 0.01$ )。M-K检验结果表明新疆降水量在1986年发生了突变, 1986年之前降水量相对稳定, 而之后开始明显增加, 但在1997年之后降水量出现不明显的减少趋势, 速率为 $-6.79\text{ mm}/10\text{a}$  ( $p > 0.05$ ), 且变化幅度较大(图3)。

根据新疆树木年轮气候代用资料重建计算得到的过去300年气候变化结果表明, 新疆北部及天山山区历史气候类型以冷干型和暖湿型为主, 分别占到32%和30%, 而暖干型和冷湿型分别占到12%和10%。20世纪80年代中期开始, 新疆气温明显增高, 降水量显著增加, 出现了向暖湿化转型的强烈信号。但在1997年之后, 尤其是21世纪以来, 气温维持高位震荡, 但降水量有微弱的波动下降趋势。

#### 3.2 新疆气候“湿干转折”事实与信号

**3.2.1 不同时间尺度干湿气候变化趋势** 1961—2015年1~24个月时间尺度SPEI指数的变化趋势为 $-0.0122 \pm 0.0043/a$  ( $p < 0.05$ ), 表明新疆气候有变干趋势, 但变化的幅度较为微弱, 并且有明显的年代际变化特征(图4a)。1997年发生了明显的暖湿化向干旱化的突变转型(图4b和图4c, 通过了M-K突变检验,  $p < 0.05$ ), 即从1961—1996年的暖湿

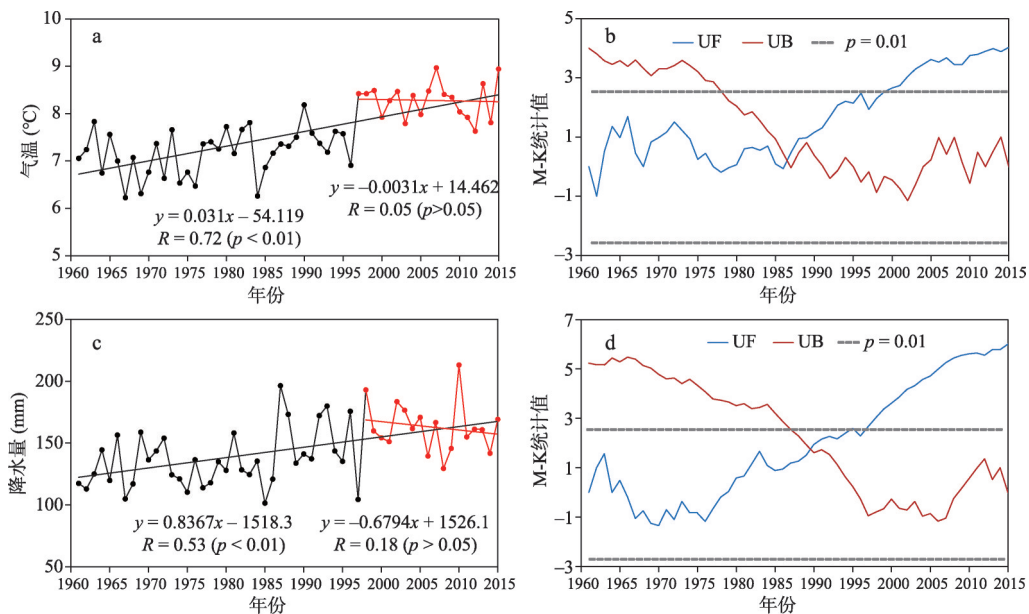


图3 气温和降水量的变化(a、c)<sup>[8]</sup>与突变检验(b、d)

Fig. 3 Temporal changes (a, c)<sup>[8]</sup> and abrupt test (b, d) of mean annual temperature and annual total precipitation

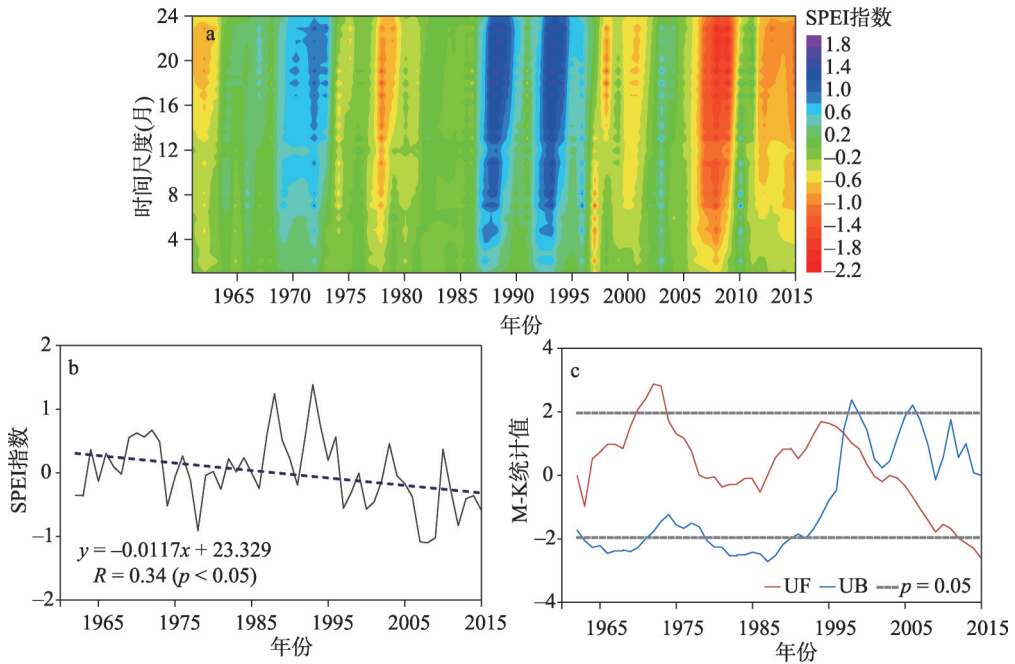


图4 不同时间尺度(1~24个月)SPEI指数变化(a)<sup>[8]</sup>、SPEI-12变化趋势(b)和突变检验(c)  
Fig. 4 Temporal variation of the SPEI at different timescales (1 to 24 months) (a), trends (SPEI-12) (b)  
and abrupt change (SPEI-12) (c)

化时期（变化趋势为 $0.0157 \pm 0.0066/a$ ）转折为1997—2015年的干旱化时期（变化趋势为 $-0.0287 \pm 0.0068/a$ ）。20世纪80年代中后期至90年代有明显的“暖湿化”特征，表现为气温明显增高，降水量显著增多，干旱指数增加。随着温度跃升，潜在蒸散发量加剧，而降水量增加趋势减缓甚至微弱减少，导致较明显的暖干化趋势，即发生了“湿干转折”现象。

空间分布上，以1997年为界，1961—1996年SPEI指数显示72.5%的站点有明显的增湿趋势，增湿区域主要分布在新疆西南部、天山山区和新疆北部地区，仅在塔城地区、新疆东南部等站点有微弱的变干趋势；而在1997—2015年SPEI指数监测到了70.5%的站点逐渐变干，主要分布在天山山区及南北坡、伊犁河谷、昆仑山北坡和新疆东部，但在新疆西北部的塔城、阿勒泰地区、南疆西部和帕米尔高原以增湿为主，反映出明显的区域差异性（图5）。马柱国等<sup>[5]</sup>利用降水数据、自矫正的帕尔默干旱指数（sc\_PDSI）及GRACE陆地水储量等多源资料，也得出新疆在21世纪以来有干旱化趋势的结论。

**3.2.2 不同时间尺度干湿月份变化** 1961—2015年逐年干旱月（ $SPEI \leq -1$ ）或湿润月（ $SPEI \geq 1$ ）个数的变化看出，偏干旱月份的变化呈现出明显的增加趋势（ $0.54$ 月/10a,  $p < 0.01$ ），而偏湿润月份明显减少（图6）。20世纪60年代初、70年代中后期、90年代末至21世纪初出现较长的相对于旱期，而80年代末至90年代中期出现了相对湿润期。在1997年以前，年均偏干旱月份不超过2个月，但之后偏干旱月份逐渐增加。21世纪以来，年均偏干旱月份数大于4个月，而在2007—2009年年均偏干旱月份数大于7个月。

图7给出了1961—2015年不同时间尺度下干旱月份数的逐年变化情况。在1个月、3个月和6个月的时间尺度上监测的干旱月次数略少于12个月时间尺度的干旱月份。干旱月份数在1997年之后增加明显，其中SPEI-12时间尺度干旱月数达到4个月，SPEI-3和

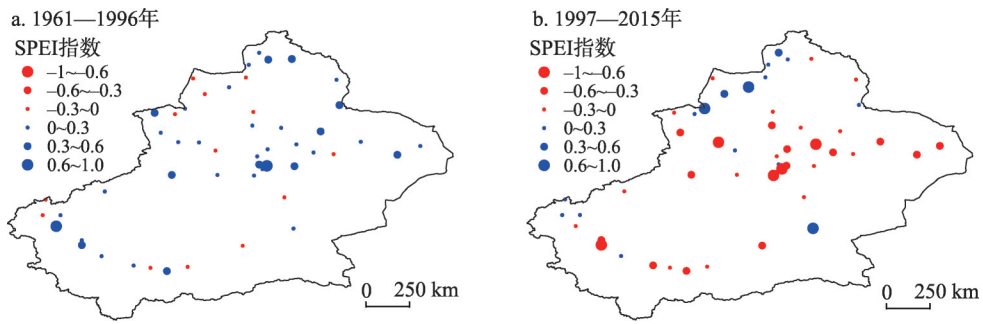
图5 1961—2015年SPEI指数变化趋势的空间分布<sup>[9]</sup>

Fig. 5 The spatial distribution of the temporal trends in 12-month SPEI from 1961 to 2015

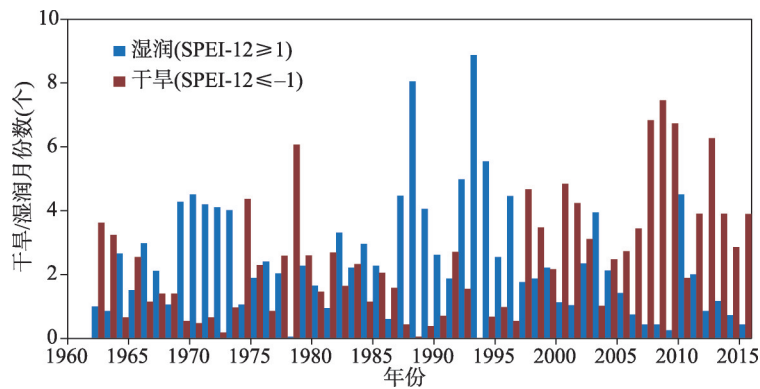
图6 1961—2015年干旱月份(SPEI ≤ -1)和湿润月份(SPEI ≥ 1)变化<sup>[9]</sup>

Fig. 6 The mean number of dry (SPEI ≤ -1) and wet months (SPEI ≥ 1) each year by the 12-month time scale from 1961 to 2015

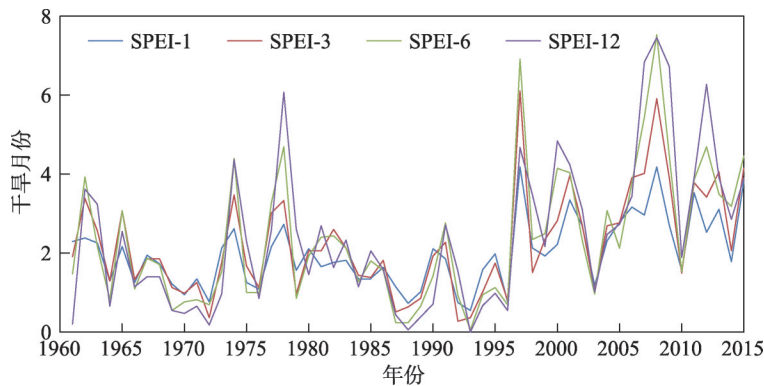
图7 1961—2015年不同时间尺度(SPEI-1, SPEI-3, SPEI-6和SPEI-12)干旱月份(SPEI ≤ -1)的变化<sup>[9]</sup>

Fig. 7 The mean number of dry months (SPEI ≤ -1) each year by the 1-month, 3-month, 6-month, and 12-month time scales from 1961 to 2015

SPEI-6为3.5个月, SPEI-1为2.7个月。2007—2009年严重干旱期间, SPEI-12时间尺度干旱月数达到了7.0个月, SPEI-3和SPEI-6为5.2个月, SPEI-1为3.3个月。

**3.2.3 干湿频率变化特征** 干湿频率是在研究区内发生干旱(或湿润)的月份数占总月份数的比例, 其值越大表明干旱(或湿润)发生越频繁。根据SPEI的干湿等级标准, 定义连续3个月发生轻度干旱以上为一次连续干旱过程。从干旱频次来看, 3个月尺度的干旱

频次平均值为18.7%，最小为16.7%，最大为22.6%；6个月尺度的干旱频次平均值为19.7%，最小为16.5%，最大为26.4%；12个月尺度的干旱频次平均值为20.5%，最小为15.4%，最大为29.3%。干旱发生频率由新疆西南部向东北部逐渐递减，干旱发生频率在西南部最大，如策勒站高达40%，而天山山区及北坡最小，在大西沟站低于20%。从季节来看，夏旱和秋旱的发生频率较高，分别为32.26%和32.50%，春冬季发生干旱频率相对较低。此外，春季干旱发生频率由西北向东南递减，伊犁河谷春季发生干旱频率较大。

从1961—1996年和1997—2015年两个阶段干旱频次差异可以看出，1997—2015年偏干旱频率增加明显，而偏湿频率明显减少（图8）。1961—1996年轻度干旱发生次数为9.65次/10a，1997年之后发生次数增加到18.02次/10a，增加了1.9倍。对于中度干旱，1961—1996年发生次数为4.60次/10a，1997—2015年发生次数显著增加至13.44次/10a，增加了2.9倍。极端干旱的频率在1997—2015年迅速上升到7.89次/10a，而1961—1996年只有1.69次/10a，增加了4.7倍。

从1961—1996年和1997—2015年两个阶段不同程度干旱频率差异（DFD）的空间分布发现，新疆南部和东部的干旱频次增加明显，但在新疆西北部和帕米尔高原地区，轻度和中度干旱频率有所下降。极端干旱频率在新疆大部分地区有增加趋势，仅在帕米尔高原、天山山区中部和阿尔泰山地区呈下降趋势（图8）。由此可见，1997年之后，新疆大部分地区发生中度和极端干旱的频率逐渐增加，气候干旱化加剧。

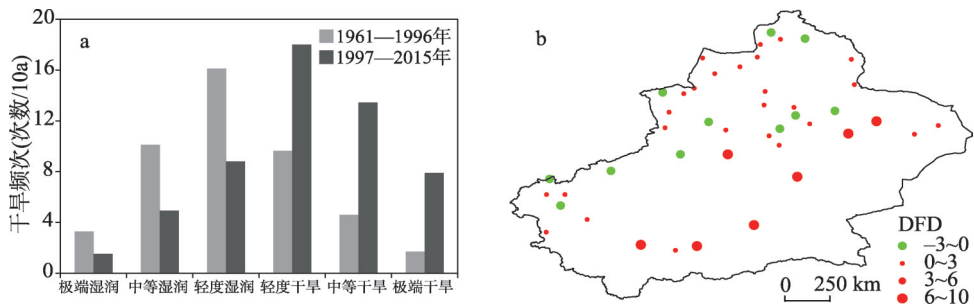


图8 1961—1996年和1997—2015年期间干旱频率变化(a)及两个阶段极端干旱频率差的空間分布(b)

Fig. 8 Frequency of drought and wetness variability before and after 1997 (a) and spatial distribution of extreme drought frequency difference (DFD) between 1961—1996 and 1997—2015 (b)

**3.2.4 干旱站次比变化特征** M-K 检验结果表明新疆干旱站次比也在1997年发生了突变，其中1961—1996年期间发生干旱的站次比呈现下降趋势，且以区域性干旱为主；而1997—2015年干旱站次比呈明显增加趋势（图9），说明新疆地区发生干旱的范围在1997年以后出现了明显的扩大趋势。

图9显示了1961—2015年SPEI-12超过3个月和6个月干旱月份的站点百分比的变化，其中发生3个月以上干旱的站点比呈显著上升趋势，增幅为5.80%/10a ( $p < 0.05$ )，1997年之后干旱发生次数逐年增加，约54.93%的站点发生了干旱，旱情有所加剧；干旱超过6个月的站点百分比也呈现明显上升趋势，增幅为4.91%/10a ( $p < 0.05$ )，特别是在2007—2008年期间，71%以上的气象站发生持续6个月以上干旱。

**3.2.5 新疆气候发生“湿干转折”** 综上分析，20世纪80年代中后期至世纪末新疆气候呈“暖湿化”特征，气温和降水量明显增加，SPEI指数呈增加趋势。在1997年之后，虽然温度增加趋势减缓，但依然维持高位波动变化，潜在蒸散发量加剧，而降水量有微弱的减小趋势，导致新疆70%以上的站点出现干旱化趋势，其中干旱变化趋势、不同强度干



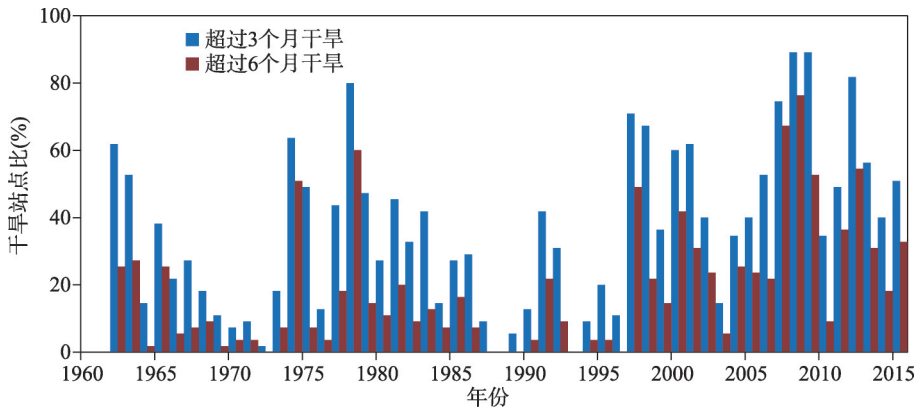


图9 1961—2015年超过3个月和6个月干旱站点比的变化<sup>[9]</sup>

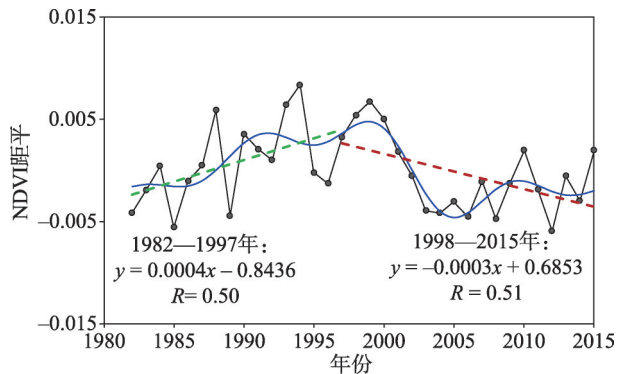
Fig. 9 Changes in percentage of stations with more than 3 dry months and more than 6 dry months in a year during 1961-2015

旱频率、干旱发生月份和干旱站次比等方面均有明显增加。可见,自1997年开始新疆气候出现了从“暖湿化”向“暖干化”转折的强烈信号,即发生了“湿干转折”。新疆气候转折势必会对区域生态和水资源造成一定影响。

### 3.3 新疆气候转折的影响评估

**3.3.1 气候转折对植被覆盖变化的影响** 1982—2015年新疆植被NDVI有明显的年际变化特征,其中在1982—1997年植被NDVI有明显的增加趋势,增加速率为0.004/10a ( $p < 0.05$ ),说明植被指数增速明显,植被趋于“变绿”;但在1997年之后,植被NDVI下降明显,减少速率为0.003/10a ( $p < 0.05$ ),且较前一阶段植被覆盖波动较大,说明在1997年之后植被长势迟滞,有较为明显退化,出现“生态逆转”现象(图10)。植被退化区域主要位于伊犁河谷、塔城和阿勒泰等植被覆盖较好的地区,占新疆总面积的25%以上;而在塔里木河沿线、天山北坡、昆仑山北坡和帕米尔高原等地区植被覆盖以增加为主,占新疆总面积的20%左右,这主要与绿洲扩张和生态输水工程影响有关。值得注意的是,在2008年之后植被指数有波动增加态势,但趋势不明显。

气候是新疆植被覆盖变化的主导因子。一般来说,植被覆盖与降水量变化呈正相关,与潜在蒸散发量呈负相关,即降水量是植被生长的关键因素,而潜在蒸散发量需要消耗植被水分和土壤水分,不利于植被生长。1982—2015年NDVI和降水量的相关系数为0.34 ( $p < 0.05$ ),和潜在蒸散发量的相关系数为-0.52 ( $p < 0.01$ ),与SPEI指数的相关系数为0.36 ( $p < 0.05$ );而在1997年之后,NDVI与气候要素之间的关系更加显著,与潜在蒸散发量显著负相关明显增大,相关系数为-0.58 ( $p < 0.01$ ),与降水量的相关系数增加到0.38 ( $p < 0.05$ )。因此,植被指数的下降主要受潜在蒸散发的控制,蒸发通过影响土壤水分和植物蒸腾作用影响植被生长。在干旱地区,潜在蒸散



注:图中虚线为阶段变化趋势,蓝色实线为低通滤波。

图10 1982—2015年植被NDVI变化

Fig. 10 Temporal variation of the average NDVI from 1982 to 2015

发量增加可以加剧土壤水分蒸发,诱导干旱发生,进而影响到植被退化。此外,人为因素对区域植被变化也有明显影响,如人工造林、绿洲扩张、生态输水工程和水资源利用加大等,需要在后续研究加以甄别,并分辨出气候变化和人为因素对植被变化的定量影响。

**3.3.2 气候转折对新疆土壤湿度的影响** 土壤湿度是衡量区域干湿程度的重要指标,可以反映气候的干旱程度<sup>[19]</sup>。土壤湿度对气候变化异常敏感,同时对气候变化亦有重要反馈作用<sup>[32-34]</sup>。降水对土壤湿度的变化有直接的影响,而温度通过蒸发量影响土壤水分的亏损。20世纪80年代以来,新疆土壤湿度有减小趋势,变化趋势为 $-3.8\%/10a$  ( $p < 0.01$ ),在浅层尤为明显(表2);M-K检验结果表明土壤湿度在1994年发生了突变型下降,减少趋势显著( $p < 0.01$ ),突变之后平均土壤湿度减少了42.2%,其中1994—1997年明显下降,1997年后趋于稳定(图11)。

表2 1981—2010年不同深度土壤湿度变化<sup>[35]</sup>

Tab. 2 Mean value and tendency of soil moisture at different depths (0-50 cm) from 1961 to 2010

土壤深度(cm)	0~50	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
平均值(%)	11.3	9.5	10.7	11.5	12.0	12.9
变化趋势(%/10a)	-3.8	-3.6	-4.0	-3.5	-3.0	-2.3

分析发现土壤湿度变化与降水量关系不显著,但与温度变化相关性较大,说明温度是影响新疆土壤湿度的主要限制性因子,温度主要通过潜在蒸散发量影响土壤湿度变化;而降水由于量级小、持续时间短等原因,对土壤湿度的影响较小。新疆的蒸发皿蒸发量变化趋势在1993年发生转折,由显著下降逆转为显著上升,其中1993年之后温度升高了 $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对蒸发量转折贡献大<sup>[21]</sup>。即随着温度的急剧增加,加大潜在蒸发需求和土壤蒸发,导致土壤湿度突变性下降。

**3.3.3 气候转折对新疆水文水资源的影** 1961—2015年新疆主要河流径流量均出现明显的增加趋势,与流域气温和降水量的变化特征基本一致;而21世纪以来,新疆河流径流量变化出现明显的区域差异。天山北坡的

艾比湖流域、玛纳斯河流域和呼图壁河流域的径流量变化相似,在20世纪80年代之前呈现出较为稳定的波动状态,20世纪80年代至90年代末发生了急剧的增加并达到峰值,但21世纪以来发生明显的下降趋势。天山南坡的开都河和阿克苏河也有类似一致变化,均表现出先增后减的变化趋势,其中阿克苏河21世纪以前径流变化速率为 $1.738 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,而之后变化速率为 $-1.567 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ;开都河在21世纪以前径流变化速率为 $3.007 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,而之后变化速率为 $-0.57 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。东天山的哈密河径流量的峰值提前到20世纪90年代初,有先增后减的变化趋势,但变化较为平缓。昆仑山北坡的河流径流量变化差异较

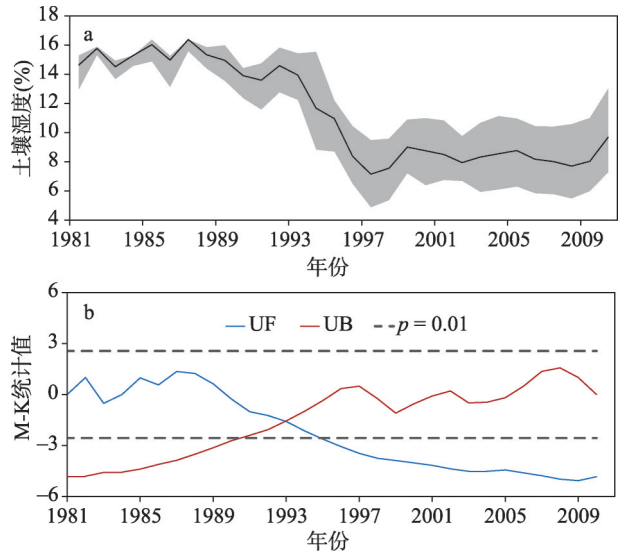


图11 1981—2010年土壤湿度时间变化<sup>[35]</sup>(a)和突变检验(b)

Fig. 11 Temporal changes (a) and M-K abrupt test (b) of mean soil moisture from 1981 to 2010

大,在过去50多年均有增加趋势,如和田河在20世纪90年代中期以来有明显的增加趋势,增加速率为 $0.659 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

通过分析1961—2015年新疆区域8条代表性河流径流量变化与对应流域的SPEI指数的关系,发现发源于天山的河流径流量变化与SPEI指数均呈正相关,相关系数在0.16~0.53之间,其中艾比湖流域、呼图壁河流域、开都河流域和哈密河流域的相关性通过了置信度为99%的显著性检验。发源于昆仑山的和田河和叶尔羌河流域径流量变化与SPEI指数呈负相关,相关系数分别为-0.35和-0.29。这表明SPEI指数对河流径流变化有一定的指示意义,与中国六大流域研究结论类似<sup>[36]</sup>。新疆各区域河流径流量变化出现明显差异的原因,除了受汇流区降水量和干湿变化的影响外,还受冰雪融水对径流补给比例的影响,在讨论部分有所提及。

## 4 讨论

### 4.1 新疆气候转型的可能机制

20世纪80年代中期以来,西北干旱区气候呈现“暖湿化”特征,新疆夏季降水量出现年代际增多趋势<sup>[11-12]</sup>。高中低纬环流系统和中亚低值系统共同使新疆降水的年代际增多,西亚西风急流联系高中低纬环流系统相互作用<sup>[37]</sup>。随着气候变暖加剧,来自北半球较高纬度的水汽输送增强<sup>[38]</sup>。热带印度洋和阿拉伯海也是年代际增湿的重要水汽补充源地之一,通过印度洋西部、阿拉伯半岛南部至中亚地区的“三段式水汽接力输送”把热带水汽输送至新疆<sup>[39-40]</sup>。印度洋增暖通过影响水汽的向北输送,促使中亚(新疆)夏季降水增加<sup>[41]</sup>。此外,东亚太平洋型相关波列(EAP)强度年代际增强和位置西移引起西北太平洋水汽向内陆输送加强,对20世纪80年代中后期夏季降水的增加有重要贡献<sup>[42]</sup>。

针对21世纪以来的新疆干旱化特征,相关机理研究较少。北大西洋年代际振荡(AMO)和新疆SPEI指数有明显的负相关关系,AMO正位相(AMO负位相)对应着新疆的相对干旱时期(相对湿润时期),特别是在1997年之后对应更加明显(图12)。AMO振荡发生在1996—1997年左右,60年的周期演化与新疆干湿变化时间非常吻合。当AMO正(负)位相时,印度夏季风加强(减弱),印度夏季降水更多(少)<sup>[43-44]</sup>,而新疆夏季降水更少(多)。南亚高压、西风急流和伊朗副高系统变化是链接AMO和新疆干湿变化的关键系统<sup>[37]</sup>。

1997—2015年新疆干湿变化与ENSO有明显的负相关关系,新疆北部干旱事件与ENSO密切相关,且比ENSO海温异常滞后12个月。其中,干旱(湿润)时期对应着海温负(正)异常,即拉尼娜事件(厄尔尼诺事件)会引起严重干旱(湿润)。但并非所有ENSO事件都会引起新疆北部发生干旱或湿润事件。因此,ENSO和新疆干湿的关系和机理还需深入研究。

### 4.2 气候转折和极端气候对新疆生态退化的影响

气候变暖增强了北半球的植被动态变化<sup>[45]</sup>。在气候变暖背景下,新疆植被覆盖有下降趋势。值得一提的是,在新疆暖湿化越明显且继续保持暖湿的地区,如伊犁河谷和塔城、阿勒泰等新疆西北部地区,植被退化越明显。这主要受极端气候和气候转型的共同影响,极端气候事件频发重发起到关键作用<sup>[26]</sup>。研究发现1997年之后极端气候指数与植被NDVI的关系更加显著,如极端暴雨日数(R24)和最长连续无降水日数(CDD)与NDVI有正的相关性,极端低温(Tnav)和暖夜日数(Rwn)也与NDVI关系密切,但与Rwn是负相关,相关性均通过了显著性检验(表3)。

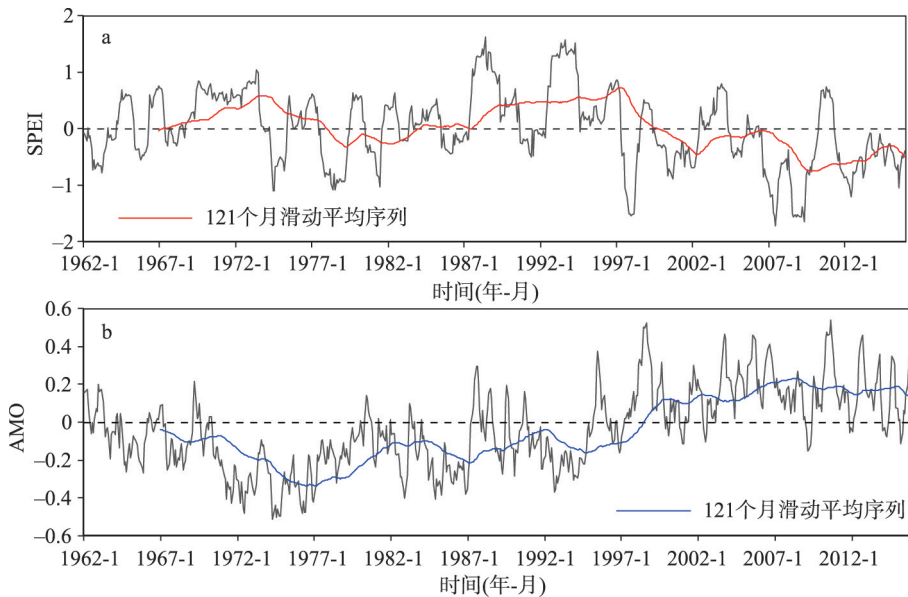


图 12 1962—2015年逐月 SPEI 和 AMO 指数变化

Fig. 12 Monthly change in 12-month SPEI and AMO indexes for 1962-2015

表 3 归一化植被指数与极端气候要素的关系<sup>[26]</sup>

Tab. 3 The correlation coefficient between NDVI and climate index

极端指数	变化趋势	GIMMS-NDVI3g	
		1982—2010年	1998—2010年
极端低温(Tnav)	0.75 °C/10a	0.07	0.42**
暖夜日数(Rwn)	6.74 Days/10a	-0.14	-0.53**
极端暴雨(TR)	1.78 mm/10a	0.20	0.36**
极端暴雨日数(R24)	0.05 Days/10a	0.24	0.45**
连续最长无降水日数(CDD)	-1.97 Days/10a	0.27*	0.48**

注: \*通过  $p < 0.05$  的显著性检验; \*\*通过  $p < 0.01$  的显著性检验。

极端温度事件通过影响植物呼吸作用和光合作用影响植被覆盖的变化<sup>[46]</sup>。夜间气温升高可能会增强自养呼吸作用而提高植被生产力, 这可通过 Rwn 增加与 NDVI 减小的负相关得到证实, 但 Tnav 升高与 NDVI 减小并不一致, 说明极端温度影响植被动态的机理还需要进一步证实。青藏高原西南部 NDVI 生长期的减少与植被更新时间的延迟有关<sup>[45]</sup>。

在干旱区, 降水对植被生长有促进作用。但是, 研究发现降水增加反而会抑制植被生长, 促使生态逆转。究其原因, 新疆降水增加主要是极端降水增加引起的, 极端降水量占到总降水量的 50% 左右。新疆生态环境极其脆弱, 极端降水极易冲垮良田, 破坏草场, 使得新疆水土流失加剧。据统计, 新疆水土流失面积已占全国近 1/3, 且有加剧之势; 在近  $7 \times 10^4 \text{ km}^2$  的绿洲面积中有  $2 \times 10^4 \text{ km}^2$  存在不同程度的水土流失。随着气温的骤然升高且维持高位震荡, 平原荒漠区的植被蒸腾和土壤水耗散量加大, 一些浅根系荒漠植物因干旱胁迫死亡, 从而减少物种多样性和植被覆盖度<sup>[19]</sup>。

上述分析表明, 新疆极端温度和极端降水对植被覆盖度变化有重要影响。气温升高提高了蒸发能力, 加速了区域水循环, 加剧极端降水和温度事件发生频率和强度, 导致了不同尺度上水资源的时空异质性, 进而影响到植被覆盖度变化。因此, 21 世纪以来新疆植被退化可能是由气候“湿干转折”和极端气候事件频发重发共同作用引起的。

不可忽略的是,植被动态还受人类活动引起的土地利用/覆盖变化、工程建设以及圈地放牧等影响。因此,需要开展人类活动影响的生态效应研究,如土地利用和土地覆盖变化,尤其是灌溉的影响。

#### 4.3 气候变化引起的冰川变化及对区域水资源的影响

气候变化会影响冰川消融,进而影响融水径流的产生,对水资源总量有重要贡献。中亚干旱区的径流严重依赖冰川融化<sup>[23]</sup>。在新疆的昆仑山北部和天山山区,分别有6472条和10778条冰川,总面积分别为10652.3 km<sup>2</sup>和13566.6 km<sup>2</sup><sup>[23, 47]</sup>。天山北坡、天山南坡和昆仑山北坡的冰川融水分别占河流径流总量的31.8%、33.7%和56.3%<sup>[47]</sup>。

过去50年,天山冰川出现全面退缩,冰川面积和物质平衡分别下降了18±6%和27±15%<sup>[48]</sup>。冰川退缩在20世纪90年代加速,但在21世纪以来略有减缓或保持稳定,尤其是在天山中西部地区<sup>[23]</sup>。这与发源于天山的河流径流量在20世纪90年代的上升趋势和21世纪以来的下降趋势一致。21世纪以来径流量的持续减少,与流域内冰川面积减少、厚度变薄及平衡线海拔升高的关系密切<sup>[25]</sup>。

冰川融水占总径流量的比例主要受山区降水和温度变化的影响。在帕米尔高原地区,降水持续增加但夏季温度异常减小,使得冰川稳定变化或略有增加,部分冰川物质呈正平衡<sup>[49-51]</sup>。在昆仑山北坡,径流量与气温有正相关关系,而与降水量呈负相关<sup>[47]</sup>。新疆径流量与SPEI指数相关性较好,反映了温度、降水和蒸发变化对冰川的共同影响。

水资源和生态问题是制约新疆社会经济可持续发展的最主要问题之一。气候变暖引起新疆水分循环结构发生明显改变,干旱化急剧增加。在极端气候频发重发的背景下,水循环系统和生态系统不稳定性加剧,给新疆水资源和生态安全带来了严峻的挑战。因此,需要开展新疆区域大气水分循环要素的观测和研究,以及加强区域干湿变化事实、机理和影响评估的研究。未雨绸缪,科学管理与规划,服务于国家“一带一路”核心区旱灾灾害防灾减灾体系建设。

## 5 结论

基于气象水文观测资料,对1961—2015年来新疆区域干湿气候变化及其影响进行了分析,主要结论如下:

(1) 20世纪80年代中后期至世纪末新疆呈“暖湿化”特征,但1997年之后,温度跃升,潜在蒸发加剧,降水量微弱减少,导致70%以上的区域变干,新疆干旱变化趋势、不同强度干旱频率、干旱发生月份和干旱站次比等方面均有明显增加。新疆气候出现了从“暖湿化”向“暖干化”转折的强烈信号,即发生了“湿干转折”。

(2) 新疆植被指数变化经历了先增后减的过程,1982—1997年植被指数增速明显,植被趋于“变绿”;但在1997年之后植被长势迟滞,土壤水明显下降,生态效应逆转。在极端气候频发重发的背景下,“湿干转折”和极端气候事件加剧致使新疆生态负效应凸显。

(3) 新疆河流径流变化出现明显的区域差异,对干湿气候转折响应复杂。受冰雪融水对径流补给比例的影响,发源于天山的河流径流对干湿变化有正响应,但发源于昆仑山的河流径流响应不明显。

### 参考文献(References)

- [1] Yang Qing, Li Mingxing, Zheng Ziyang, et al. Regional applicability of seven meteorological drought indices in China. *Scientia Sinica Terrae*, 2017, 47(3): 337-353. [杨庆, 李明星, 郑子彦, 等. 7种气象干旱指数的中国区域适应性. *中国*

- 科学: 地球科学, 2017, 47(3): 337-353.]
- [2] Zhang Jing, Shen Yanjun. Spatio-temporal variations in extreme drought in China during 1961-2015. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(1): 67-83.
- [3] Zhang Jie, Sun Fubao, Liu Wenbin, et al. Spatio-temporal patterns of drought evolution over the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(6): 863-876.
- [4] He Bin, Lü Aifeng, Wu Jianjun, et al. Drought hazard assessment and spatial characteristics analysis in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(2): 235-249.
- [5] Ma Zhuguo, Fu Congbin, Yang Qing, et al. Drying trend in northern China and its shift during 1951-2016. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(4): 951-961. [马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等. 关于我国北方干旱化及其转折性变化. *大气科学*, 2018, 42(4): 951-961.]
- [6] Jiang Fengqing, Zhu Cheng, Mu Guijin, et al. Recent magnification of flood and drought calamities in Xinjiang: An analysis of anthropogenetic effects. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(1): 57-66. [姜逢清, 朱诚, 穆桂金, 等. 当代新疆洪旱灾害扩大化: 人类活动的影响分析. *地理学报*, 2002, 57(1): 57-66.]
- [7] Sun Peng, Zhang Qiang, Bai Yungang, et al. Transitional behaviors of hydrometeorological droughts in Xinjiang using the Markov chain model. *Geographical Research*, 2014, 33(9): 1647-1657. [孙鹏, 张强, 白云岗, 等. 基于马尔科夫模型的新疆水文气象干旱研究. *地理研究*, 2014, 33(9): 1647-1657.]
- [8] Yao Junqiang, Zhao Yong, Chen Yaning, et al. Multi-scale assessments of droughts: A case study in Xinjiang, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 444-452.
- [9] Yao Junqiang, Yong Zhao, Yu Xiaojing. Spatial-temporal variation and impacts of drought in Xinjiang (Northwest China) during 1961-2015. *PeerJ*, 2018, 6: e4926. DOI: 10.7717/peerj.4926.
- [10] Zhang Qiang, Li Jianfeng, Singh V P, et al. SPI-based evaluation of drought events in Xinjiang, China. *Nature Hazards*, 2012, 64(1): 481-492.
- [11] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219-226.]
- [12] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152-164. [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 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*, 2003, 23(2): 152-164.]
- [13] Zhang Qiang, Zhang Liang, Cui Xiancheng, et al. Progresses and challenges in drought assessment and monitoring. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(7): 763-778. [张强, 张良, 崔显成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 763-778.]
- [14] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [15] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno 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.
- [16] Vicente-Serrano S M, Lopez-Moreno J I, Beguería S, et al. Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(4): 044001. DOI: 10.1088/1748-9326/9/4/044001.
- [17] Tao Hui, Borth H, Fraedrich K, et al. Drought and wetness variability in the Tarim River Basin and connection to large-scale atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(8): 2678-2684.
- [18] Beguería S, Vicente-Serrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, kernel weighting, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 2004, 34: 3001-3023.
- [19] Li Zhi, Chen Yaning, Fang Gonghuan, et al. Multivariate assessment and attribution of droughts in Central Asia. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1316. DOI: 10.1038/s41598-017-01473-1.
- [20] Chen Yaning, Yang Qing, Luo Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of northwest China. *Arid Land Geography*. 2012, 35(1): 1-9. [陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考. *干旱区地理*, 2012, 35(1): 1-9.]
- [21] Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Progress and prospects of climate change impacts on hydrology in the arid region of northwest China. *Environmental Research*, 2015, 139: 11-19.
- [22] Chen Yaning, Xu Changchun, Yang Yuhui, et al. Hydrology and water resources variation and its responses to regional climate change in Xinjiang. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1331-1341. [陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水

- 文水资源变化及对区域气候变化的响应. 地理学报, 2009, 64(11): 1331-1341.]
- [23] Chen Yaning, Li Weihong, Deng Haijun, et al. Changes in central Asia's water tower: Past, present and future. Scientific Reports, 2016, 6: 35458. DOI: 10.1038/srep35458.
- [24] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Glacier area variation and climate change in the Chinese Tianshan Mountains since 1960. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(2): 263-273.
- [25] Deng Haijun, Chen Yaning. The glacier and snow variations and their impact on water resources in mountain regions: A case study in Tianshan Mountains of Central Asia. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1309-1323. [邓海军, 陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响. 地理学报, 2018, 73(7): 1309-1323.]
- [26] Yao Junqiang, Chen Yaning, Zhao Yong, et al. Response of vegetation NDVI to climatic extremes in the arid region of Central Asia: A case study in Xinjiang, China. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 131: 1503-1515.
- [27] Zhu Zaicun, Bi Jian, Pan Yaozhong, et al. Global data sets of vegetation leaf area index (LAI) 3g and fraction of photosynthetically active radiation (FPAR) 3g derived from global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) normalized difference vegetation index (NDVI3g) for the period from 1981 to 2011. Remote Sensing, 2013, 5(2): 927-948.
- [28] Cao Yanping, Nan Zhuotong, Cheng Guodong. GRACE gravity satellite observations of terrestrial water storage changes for drought characterization in the arid land of northwestern China. Remote Sensing, 2015, 7(1): 1021-1047.
- [29] Cao Yanping. GRACE gravity satellite monitors hydrological changes and drought disasters in western China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. [曹艳萍. GRACE 重力卫星监测中国西部地区水文变化及干旱灾害[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.]
- [30] Yao Junqiang, Mao Weiyi, Hu Wenfeng, et al. A dataset of drought indices based on the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) over Xinjiang, China (1961-2015). Science Data Bank, 2019, 4(3). 2019-07-10. DOI: 10.11922/csdata.2018.0048.zh. [姚俊强, 毛炜峰, 胡文峰, 等. 1961—2015 年新疆区域 SPEI 干旱指数数据集. 中国科学数据, 2019, 4(3). 2019-07-10. DOI: 10.11922/csdata.2018.0048.zh.]
- [31] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 1948, 38: 55-94.
- [32] Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over east China. Acta Meteorologica Sinica, 2000, 58(3): 278-287. [马柱国, 魏和林, 符宗斌. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系. 气象学报, 2000, 58(3): 278-287.]
- [33] Yang Yonghui, Watanabe Masataka, Wang Zhiping, et al. Impacts of temperature and precipitation changes on soil moisture of Taihang Mountains. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(1): 56-63. [杨永辉, 渡边正孝, 王智平, 等. 气候变化对太行山土壤水分及植被的影响. 地理学报, 2004, 59(1): 56-63.]
- [34] Li Qiaoping, Ding Yihui, Dong Wenjie. A numerical study on effects of the soil moisture upon the regional short-term climate. Journal of Applied Meteorological Science, 2007, 18(1): 1-11. [李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 土壤湿度异常对区域短期气候影响的数值模拟试验. 应用气象学报, 2007, 18(1): 1-11.]
- [35] Zhang Lei, Lu Houquan, Wang Liangyu, et al. Spatial-temporal characteristics of soil moisture in China. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1494-1508. [张蕾, 吕厚荃, 王良宇, 等. 中国土壤湿度的时空变化特征. 地理学报, 2016, 71(9): 1494-1508.]
- [36] Zhai Jianqing, Su Buda, Krysan ova V. Spatial variation and trends in PDSI and SPI indices and their relation to streamflow in 10 large regions of China. Journal of Climate, 2010, 23: 649-663.
- [37] Yang Lianmei, Guan Xuefeng, Zhang Yingxing. Atmospheric circulation characteristics of precipitation anomalies in arid region of Central Asia. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 249-259. [杨莲梅, 关学锋, 张迎新. 亚洲中部干旱区降水异常的大气环流特征. 干旱区研究, 2018, 35(2): 249-259.]
- [38] Dai Xingang, Li Weijing, Ma Zhuguo. The characteristics of variation of Xinjiang water vapor sources in recent years. Progress in Natural Science, 2006, 16(12): 1651-1656. [戴新刚, 李维京, 马柱国. 近十几年新疆水汽源地变化特征. 自然科学进展, 2006, 16(12): 1651-1656.]
- [39] Zhao Bingke, Cai Chengxia, Yang Lianmei, et al. Atmospheric circulation anomalies during wetting summer over Xinjiang region. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(3): 434-442. [赵兵科, 蔡承侠, 杨莲梅, 等. 新疆夏季变湿的大气环流异常特征. 冰川冻土, 2006, 28(3): 434-442.]
- [40] Yang Lianmei, Zhang Qingyun. Circulation characteristics of interannual and interdecadal anomalies of summer rainfall in north Xinjiang. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(2): 412-419. [杨莲梅, 张庆云. 新疆北部汛期降水年际和年代际异常的环流特征. 地球物理学报, 2007, 50(2): 412-419.]
- [41] Zhao Yong, Zhang Huqiang. Impacts of SST warming in tropical Indian Ocean on CMIP5 model-projected summer rainfall changes over Central Asia. Climate Dynamics, 2016, 46(9/10): 3223-3238.
- [42] Chen Huopo, Sun Jianqi, Fan Ke. Possible mechanism for the interdecadal change of Xinjiang summer precipitation. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 1844-1851. [陈活泼, 孙建奇, 范可. 新疆夏季降水年代际转型的归因分

- 析. 地球物理学报, 2012, 55(6): 1844-1851.]
- [43] Feng Song, Hu Qi. How the North Atlantic multidecadal oscillation may have influenced the Indian summer monsoon during the past two millennia. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L01707. DOI: 10.1029/2007GL032484.
- [44] Goswami B N, Madhusoodanan M S, Neema C P, et al. A physical mechanism for North Atlantic SST influence on the Indian summer monsoon. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L02706. DOI: 10.1029/2005GL024803.
- [45] Shen Miaogen, Piao Sshilong, Jeong Sujong, et al. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth. *PNAS*, 2015, 112(30): 9299-9304.
- [46] Piao Shilong, Tan Jianguang, Chen Anping, et al. Leaf onset in the Northern Hemisphere triggered by daytime temperature. *Nature Communications*, 2015, 6: 6911.
- [47] Li Zhongqin, Wang Puyu, Sun Meiping. *Glacier Change and Its Impact on Water Resources*//Chen Yaning (ed.). *Water Resources Research in Northwest China*. Dordrecht: Springer International Publishing, 2014, 200-201.
- [48] Farinotti D, Longuevergne L, Moholdt G, et al. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. *Nature Geoscience*, 2015, 8(9): 716-722.
- [49] Hewitt K. The Karakoram anomaly? Glacier expansion and the "elevation effect", Karakoram Himalaya. *Mountain Research and Development*, 2005, 25: 332-340.
- [50] Kapnick S B, Delworth T L, Ashfaq M, et al. Snowfall less sensitive to warming in Karakoram than in Himalayas due to a unique seasonal cycle. *Nature Geoscience*, 2014, 7: 834-840.
- [51] Bolch T, Kulkarni A, Kääb A, et al. The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, 2012, 336(6079): 310-314.

## Signal and impact of wet-to-dry shift over Xinjiang, China

YAO Junqiang, MAO Weiyi, CHEN Jing, DILINUER Tuoliewubieke  
(Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** Xinjiang, a unique natural unit, is sensitive to the global warming. Studies on the spatial-temporal variation and impacts of drought and wetness in Xinjiang have a significant effect on the adaptability of future climate change. Based on observations of monthly mean temperature, monthly precipitation, and calculated standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), this paper analyzes the drying trend and impacts of climate change on the water resources and vegetation dynamics over Xinjiang, China. The results can be shown as follows: (1) The climate experienced a significant shift from warm-wet to warm-dry over Xinjiang in 1997 based on the SPEI data, after which the frequency, trend, dry months and percentage of stations of drought increased sharply. (2) The increased meteorological drought severity had a direct effect on the normalized difference vegetation index (NDVI) and river discharge. The NDVI exhibited a significant decrease during the period 1998-2015 compared with 1982-1997, which was found to be caused by increased soil moisture loss. (3) The hydrological drought was very complicated and not entirely comparable to the SPEI droughts. Hydrological records indicate that runoff in most rivers in the Tianshan Mountains has increased, while it remained stable or even decreased slightly in the Kunlun Mountains over the past 20 years. The runoff in Xinjiang is strongly influenced by glacial melt, and it is getting worse due to global warming. The climatic shift and intensified climate extremes over Xinjiang have resulted in SPEI-drought severity. These changes also have possibly intensified the instability of water cycle system and ecosystem. The results provide valuable decision-making reference for the regional drought disaster prevention, reduction and emergency management over Xinjiang, China.

**Keywords:** wet-to-dry shift; water resources; ecological degradation; impact assessment; Xinjiang