

基于湿润指数的近 35 年青海省干湿状况变化分析

刘德坤^{1,2}, 王军邦², 齐述华¹

(1. 江西师范大学 地理与环境学院, 南昌 330022;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 利用青海省 1971—2004 年 1 km 分辨率空间插值气象资料, 计算了基于 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法的潜在蒸散及 Thornthwaite 湿润指数, 分析了近 35 a 来气温、降水量及湿润指数的时空变化格局及趋势。结果表明: 青海省总体上表现为较为显著的暖化和不显著的干旱化趋势; 增温趋势以西部较高, 而东南部较低; 降水在西部的唐古拉和中部的柴达木盆地表现为增加趋势, 而东南大部分地区表现为减少趋势; 综合考虑辐射、气温和降水等气候要素的湿润指数表明, 在西部唐古拉地区、柴达木盆地等干旱区表现为暖湿化趋势, 而东南部的澜沧江源、黄河源等地区表现为干旱化趋势, 但与降水变化趋势一样, 其变化趋势的统计学特征并不显著。

关键词: 青海省; 湿润指数; 变化趋势

中图分类号: S161.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)02-0246-05

Analysis on Dry Trend Based on Moisture Index in Qinghai Province in the Recent 35 Years

LIU De-kun^{1,2}, WANG Jun-bang², QI Shu-hua¹

(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022,

China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Observation and Modeling, Institute of Geographic

Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: This study analyzes the spatiotemporal trends of wetness of Qinghai Province in the recent 35 years (1971—2004) by using the potential evapotranspiration and Thornthwait moisture index (MI) derived from the Penman-Monteith methods recommended by FAO and 1 km spatially interpolated meteorological data. The results suggested a significant warming and indistinctive drying trend overall, while the degree of warming decreases from west to southeast in recent 35 years. Precipitation increases significantly in Tanggula and Chaidamu in the west and decreases in the southeast. However, the moisture index, which integrated the effect of solar radiance, temperature, precipitation, has almost the same spatial patterns of inter-annual variation as the precipitation. In the desert areas, such as Tanggula of western Qinghai and Chaidamu of central Qinghai, the MI increases with a warmer and wetter trend, while in well-vegetated regions near Lantsang, Yellow River, a dryer trend exits with insignificant statistics.

Key words: Qinghai Province; moisture index; change trend

无论器测数据还是模型计算都显示我国近年来的温度、降水、蒸散发及受其影响的干湿状况存在显著变化。我国西北地区从 19 世纪末冷湿的小冰期结束以来 100 a 左右时间都处于波动性变暖、变干气候环境^[1-2], 近 50 a 实测也显示我国西部以 0.2℃/10 a 的趋势升温而降水呈现不明显趋势, 特别是 20 世纪 80—90 年代^[1]。青藏高原自 20 世纪 50 年代中期以

来经历着极为显著地变暖^[3], 生长季气候规律在 20 世纪 80 年代中后期发生了以暖干为主向以暖湿为主的突变^[4]。青藏高原 20 世纪 60 年代初为暖期, 60 年代中期至 80 年代初气候转冷, 80 年代中后期以来高原各地先后进入一个气温持续升高的时期, 近代高原温度变化与北半球温度变化基本一致, 但变幅大于中国东部且比之提前发生^[5-6]。青藏高原及邻近地区

收稿日期: 2013-10-29

修回日期: 2013-11-12

资助项目: 中国科学院西部行动计划(三期)项目(KZCX2-XB3-08-01); 国家重点基础研究发展计划课题(2009CB421105)

作者简介: 刘德坤(1986—), 男, 江西上犹人, 硕士, 主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: kdl010163@163.com

通信作者: 王军邦(1974—), 男, 青海湟中人, 博士, 主要从事全球生态学、生态模型领域的研究。E-mail: jbwang@igsrr.ac.cn

的增温具有季节、海拔和区域差异,冬季增温显著,增温率随海拔高度上升而增大^[7],20 世纪增暖在高原西北部表现最强烈,其次是高原东北部,高原中南部是一个弱冷期^[8]。太阳辐射变化及地球自身运转规律与气候变化密切相关,冰芯研究发现温度和降水变化周期与太阳活动有密切联系^[9]。20 世纪 60 年代到 80 年代,高原北部降水呈增加趋势,南部降水呈减少趋势,80 年代后,情况刚好相反。若将 20 世纪与升温相伴的变干现象看作是水循环增强对应于温度上升的滞后效应,则 21 世纪将结束变干趋势转向变湿,降水量的增加将超越变暖导致的潜在蒸发增加,出现世纪性的径流增加与湖泊的扩张^[1,10]。处于全球气候变化敏感地区的青海省,从区域和全区对气候变化进行了大量基于站点观测资料的研究^[11-17],也通过模式分析了未来可能气候变化^[18],在全球变暖及水热综合作用下,气候干湿变化趋势到底如何,变化趋势在空间上的差异如何,均是人们关注的问题。

降水量是目前可直接观测到的影响水分状况的主要指标之一,降水量的多少是湿润度的直接指标,但由于植被的蒸腾速率是太阳辐射强度的线性函数,相同的降水量在不同的热量条件下,它的气候学和生物学效应大不相同,仅从降水量的增减无法判断区域的干湿状况变化,区域气候的干湿状况由水分收支不平衡造成^[19-20]。降水与热量的对比关系或降水的气候学和生物学效应,一般称为湿润度或干燥度。许多学科尤其是生物学和农学广泛使用这种相对的指标来说明一个地方的湿润状况,因为相对的湿润状况与土壤类型和植被类型的吻合程度远较绝对的降水量高^[21]。青海省地理环境复杂,平均状态掩盖了区域差异;此外,气象站点少,仅依据站点观测数据的分析结果无法准确反映区域的气候变化趋势。湿润度是一个受到普遍关注的重要问题,许多科学领域都对此进行了研究,并获得了相当的成功。有关湿润度的表达形式很多,其中以可能蒸散与降水之比构成的表征湿润度的指标,是定量解释地带性指标与环境关系的重要参数。了解区域干湿状况的时空格局变化,既为研究未来气候变化,探索环境变化的驱动机制提供科学基础,亦有助于生态建设的科学规划和有效评估,具有较大的理论和现实意义。

1 数据与方法

1.1 数据

本文采用的 1971—2004 年全国近 700 个地面气象台站气象数据由国家气象局提供,空间插值出气温、降水用于本研究。所使用的插值方法是由澳大利

亚国立大学基于光滑薄板样条法开发的插值软件 ANUSPLIN^[22-24]。空间插值出全国范围 1 km 空间分辨率、每 8 天数据后切取青海省部分用于湿润指数计算及分析。由于研究区以外站点参与插值计算,可较好地控制研究区边缘处气象要素变化,可降低突变点的出现。参与空间插值的青海省台站数为 35 个台站(部分年份为 34 个台站)。高程数据来自全球 30 弧度秒(约 1 km)数字高程模型栅格数据集^[25]。

1.2 潜在陆表蒸散

本文根据联合国粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 修正公式计算最大可能蒸散^[26],以 Thornthwaite 湿润指数表征干湿状况,计算青海省 1971—2004 年湿润指数并进行分析。1998 年 FAO 的 Penman-Monteith 修订公式计算潜在陆表蒸散的方法为^[26]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 ——作物参考蒸散量(mm/d); R_n ——冠层或地表净辐射[MJ/(m²·d)]; G ——土壤热通量[MJ/(m²·d)]; T ——气象台站标准 2 m 高处气温(°C); u_2 ——距地 2 m 高处风速(m/s); e_s, e_a ——空气饱和水汽压和实际水汽压(kPa); Δ ——饱和水汽压曲线斜率(kPa/°C); γ ——干湿表常数(kPa/°C)。

1.3 Thornthwaite 湿润指数及其计算

湿润指数可用于表征考虑水分收支的区域干湿状况。Thornthwait 于 1948 年首先提出了用气温计算潜在蒸散的方法,在潜在蒸散的基础上,认为可用湿润指数来确定水分的多少并据以划分气候的湿润程度^[27]。本文采用此方法,根据降水量和潜在蒸散计算湿润指数(I_m)^[27]:

$$I_m = 100 \times \left(\frac{P}{E_0} - 1 \right) \quad (2)$$

式中: P ——降水量; E_0 ——潜在蒸散。根据 I_m 值的大小,Thornthwait 确定了 9 种气候类型与相应的植被类型,其对应关系如表 1 所示^[27]。

表 1 气候类型与湿润指数(I_m)和植被类型的关系

气候类型	I_m 值	植被类型
A 过湿	>100	雨林
B4 潮湿	80~100	森林
B3 潮湿	60~80	森林
B2 潮湿	40~60	森林
B1 潮湿	20~40	森林
C2 湿润	0~20	高草草原
C1 半湿润	-33.3~0	低草草原
D 半干旱	-66.7~-33.3	干草原
E 干旱	-100~-66.7	荒漠

1.4 年际变化趋势分析方法

气候变化趋势的分析方法是利用气象要素的时间序列,以时间为自变量,要素为因变量,建立一元回归方程,计算其趋势变化率。设 Y 为某一气象变量, t 为时间,建立 Y 与 t 之间的一元线性回归方程:

$$y(t) = b_0 + b_1 t \quad (3)$$

其趋势变化率为:

$$\frac{dy(t)}{dt} = b_1 \quad (4)$$

b_1 即为要素每 10 a 的趋势倾向率,单位为 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ 或 $\text{mm}/10 \text{ a}$,计算式为:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (5)$$

并计算复相关系数 R^2 , 样本数为 34, 95% 和 99% 显著性水平的复相关系数分别为 0.402 0 和 0.487 9, 进行显著性判别。

2 结果与分析

2.1 近 35 a 青海省温度的变化趋势

1971—2004 年,利用空间插值的气温数据,计算得到青海省年平均气温变化范围为 $-2.29 \sim -0.18^{\circ}\text{C}$, 35 a 平均为 -1.44°C 。在空间上自东南向西北温度递减,青海东部的海东 (2.53°C) 及青海湖地区 (1.74°C)

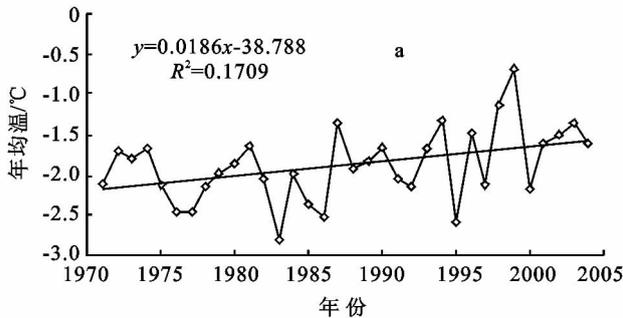
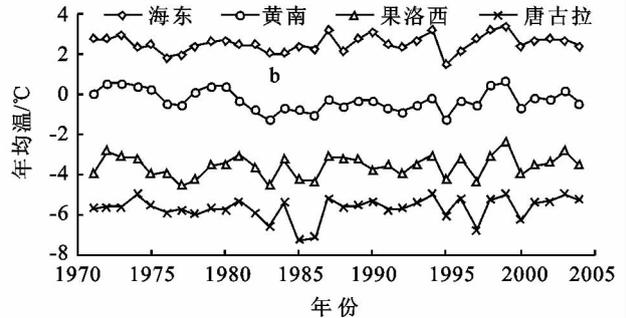


图 1 1971—2004 年青海省及主要地区年平均气温年际变化

2.2 近 35 a 青海省降水量的变化趋势

青海省近 35 a 多年平均降水量为 392.34 mm, 降水呈现微弱减少 ($-6.56 \text{ mm}/10 \text{ a}$), 具有较明显自东南向西北递减的趋势, 以东南部的果洛州东部降水量最高 (665.94 mm), 而西部地区的海西州和玉树州西部降水较少, 分别为 192.55 mm 和 347.86 mm (附图 6a)。整个青海省年平均降水量波动较大, 表现为丰水年少、枯水年多, 20 世纪 90 年代以前的降水量呈较为规律的周期性波动, 而 90 年代之后较多年份出现周期延长。从各年代平均降水量的空间格局来看, 20 世纪 70 年代和 80 年代降水格局较为接近, 90 年代和 2000 年以来降水偏少的区域增多; 分析各年

是年均温较高的地区, 最西端的格尔木唐古拉山乡 (-5.67°C) 及玉树州西部 (-5.12°C) 最低, 除东部的海东、海南州及海西的柴达木地区外, 其它地区年均温都低于零度。近 35 a 来, 年平均气温呈较为明显的升高趋势, 整个青海省年均温的变化倾向率为 $0.19^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ (复相关系数 $R^2 = 0.17$, 样本数 $n = 34$), 20 世纪 80 年代比 70 年代升高 0.02°C , 90 年代较 80 年代升高 0.34°C , 2000—2004 年较 90 年代升高 0.04°C , 对应各年代的变异系数分别为 16.56%, 24.05%, 45.53%, 29.20%, 可以看出 90 年代是青海省升温最明显、气温波动最大的时期 (图 1a)。各地区的气温年际变化存在较大差异 (图 1b), 除河南和海东外, 整个青海省呈普遍升温趋势, 以海西州升温最快 ($0.32^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$), 区域变暖趋势极为显著 ($R^2 = 0.17$, 显著性水平 $p < 0.001$), 这与全球和我国大部分地区气候变暖趋势一致; 而黄南州出现降温趋势 ($-0.10^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$), 可能与站址变迁有关。河南站自 1981 年迁站, 迁站前后年平均气温差异较大, 此前多年平均为 1.6°C , 而此后为 -0.3°C , 因此, 需在今后的研究中对数据时间序列的一致性进行分析与处理。区域变暖趋势在样本数为 34, 95% 和 99% 显著性水平的复相关系数分别为 0.402 0 和 0.487 9, 唐古拉山、海西北部一小部分、玉树西南部、海东、海南及果洛地区变暖趋势不明显, 其余大部分地区的变暖趋势统计特征显著。

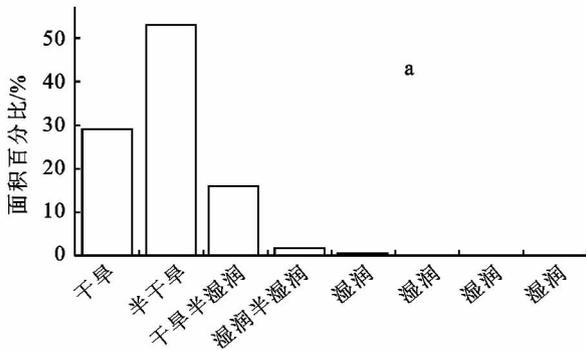


代平均降水的 500 mm 等值线空间变化, 以 70 年代的 500 mm 等值线为基础, 80 年代向北有所扩展, 即超过 500 mm 降水的区域较 70 年代大, 90 年代在某些区域出现向南偏移, 即超过 500 mm 降水的区域较 70 年代偏小, 2000—2004 年 500 mm 降水等值线南移更为明显。青海省表现为降水增加趋势的地区主要是西部地区的唐古拉 ($5.8 \text{ mm}/10 \text{ a}$) 和海西州东部 ($7.1 \text{ mm}/10 \text{ a}$), 降水减少的区域较广, 包括青海东南部的玉树东 ($-17.95 \text{ mm}/10 \text{ a}$)、果洛西 ($-20.53 \text{ mm}/10 \text{ a}$)、黄南 ($-31.48 \text{ mm}/10 \text{ a}$)、海南地区 ($-22.08 \text{ mm}/10 \text{ a}$) 及海西周边地区 (附图 6b)。这种变化趋势在统计上较为显著的地区为海东和黄南、海

南及果洛一带(R^2 在 0.7 以上),其次为唐古拉和柴达木盆地一带(R^2 为 0.4~0.5),其余地区统计不显著。

2.3 近 35 a 青海省湿润指数的变化趋势

青海省近 35 a 的湿润指数较低,多为-100~-33.3,平均-51.21。根据表 1,半干旱区域面积最



大,占总面积的 53.04%,其次为干旱区,占 28.96%,半湿润区占 15.77%,湿润区占 2.22%(图 2a)。湿润指数的年际变化范围为-50~-45,表现为趋干化趋势(图 2b),但统计特征不显著,相关系数为-0.06 ($p=0.73$)。

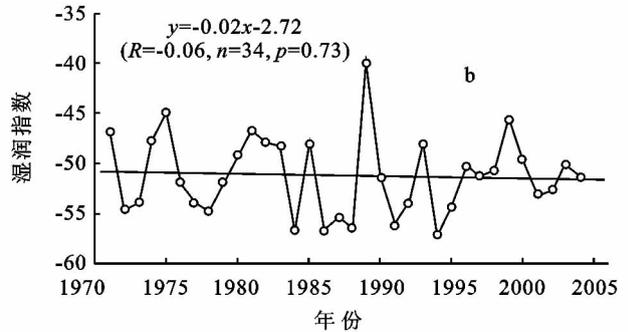


图 2 青海省 1971—2004 年平均湿润指数的频数分布和年际变化

青海省区域气候类型的分布格局是从东南部的果洛东和玉树东的湿润区向西北地区的柴达木盆地干旱区逐渐过渡(附图 7),半湿润和湿润区主要分布在长江、黄河源地区。与 1971—2004 年平均年降水等值线的叠加分析表明,湿润和半湿润区主要分布在 500 mm 降水等值线以南地区,400 mm 降水等值线以北为典型干旱区,干旱沙漠柴达木盆地处于 200 mm 降水以下区域。

近 35 a 青海省湿润指数的变化趋势(变化倾向率)为-0.4~1.5,平均-0.49/10 a(附图 8),但是趋势不显著,大部分区域的复相关系数都小于 0.2。整个青海省湿润指数呈减少趋势的区域较多,主要分布

在青海中东部地区的玉树州东部、果洛州、黄南州以及海西州,即这些区域表现为干旱化趋势;增加的区域主要分布在西部地区玉树州西部、唐古拉地区和柴达木盆地一带,说明这些地区呈湿润化趋势。

2.4 近 35 年青海省湿润指数指示的干湿状况变化

湿润指数的年际变化与年降水量非常一致(图 3a),与年均温的波动在 80 年代中期之前相对一致,之后温度波动较大且变暖趋势明显,而湿润指数尽管波动也较大,但是并没有表现出明显的升高趋势(图 3b)。说明青海省不显著的降水减少趋势和显著的升温过程使该地区趋于干旱化,但由于降水影响而导致这种变化不明显。

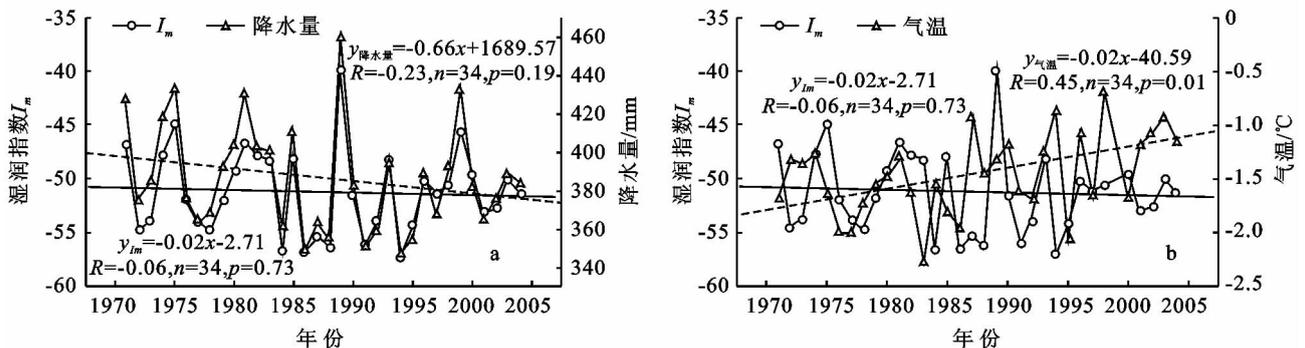


图 3 青海省湿润指数的年际变化趋势与降水和气温的对比

1971—2004 年青海省平均湿润指数为-51.21,与 70 年代的湿润指数-51.17 相比减少 0.09%,说明近 35 a 相对趋干旱。空间格局上,与 70 年代(附图 9a)相比,1971—2004 年平均湿润指数在玉树州、海西州中部及唐古拉地区减少 0~50%(附图 12c),由于该地区为干旱、半干旱区域,因此可解释为干旱化加剧;果洛州东部的黄河源区为半湿润区,湿润指数减少 1 倍以上,即向干旱化发展;其它大部分干旱、半

干旱区的湿润指数增加 0~50%,说明趋干化有所缓解。80 年代平均湿润指数为-50.49(附图 9b),与 70 年代相比增加 1.31%,整个青海除海西西部和海东东部外皆增加 0~50%,均表现为干旱化有所缓解,呈范围较广的趋湿趋势(附图 11);90 年代平均湿润指数为-51.88(附图 10a),与 70 年代相比降低 1.4%,玉树州南部及唐古拉东南、海西州东南部湿润指数减少即干旱化加剧(附图 12a);2000—2004 年青

海省湿润指数为-51.37(附图 10b),较 70 年代仅减少 0.41%,减少的区域主要是玉树州西部、唐古拉和海西州东部即干旱化加剧,而果洛州东部表现为湿润度增加(附图 12b)。

3 讨论

本文基于空间插值的 1971—2004 年气温和降水等气象参数,以 Penman-Monteith 模型计算了潜在蒸散,以 Thornthwaite 方法计算了 1 km 空间分辨率青海省年湿润指数。本研究结果显示青海省近 35 a 气温增加较全国增温幅度小,但增温速率与全国接近。近 50 a 中国增暖尤其明显,增温速率为 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,明显高于全球或北半球同期平均值,我国北方和青藏高原增温比其它地区更显著^[28]。近 100 a 和 50 a 中国年降水量变化趋势不显著,但年代际波动较大,区域差异明显,青海省近 35 a 的年降水量总体上呈微弱的减少趋势,但统计特征不显著。马柱国等^[29]对比分析认为 1951—2004 年,中国的西北东部、华北和东北地区以干旱化趋势为主,干旱化趋势的产生与降水的持续减少密切相关,而 20 世纪 80 年代前后温度开始持续上升是干旱化加剧且范围扩大的另一个重要原因,而西北西部当前正处在一个相对较湿的时段,但由于该地区主要处于干旱区,降水量的相对增加无法改变该地区干湿变化的时空格局。与此一致,本文得出的温度升高使得陆表蒸散加强,同时降水减少影响下,青海省湿润指数也呈降低趋势,区域气候主要表现为趋干化趋势。因此,青海省气候变化趋势与整个西北地区总体变化相一致,受区域气候变化控制。

综合本文湿润指数研究和该地区植被净初级生产力有关研究^[30],进一步论证了这样的结论,即气候变化显著影响该地区植被净初级生产力。这些结果表明,青海三江源西部地区暖湿化趋势,造成这些地区植被生产力较为明显地、大范围地增加趋势;在东、中部地区人类活动影响基础上,暖干化趋势加剧了这一地区的草地退化,使植被生产力出现下降趋势。

4 结论

在区域上干湿变化趋势不尽相同,存在较大空间差异。1971—2004 年青海省呈显著的普遍升温趋势,变化倾向率以西部地区较高,东部地区较低。近 35 a 降水变化趋势在空间上差异较大,西部唐古拉山地区、中部柴达木盆地地区表现为降水增加趋势,而东南大部,如玉树、果洛、黄南、海南州县地区表现为降水减少,但统计特征均不显著。根据 Thornthwaite 湿润指数,近 35 a 湿润指数的年际变化倾向率为

-0.049,即每 10 a 湿润指数减少 0.49 单位,总体上表现为干旱化趋势;但是西部唐古拉地区、柴达木盆地等干旱区表现为暖湿化趋势,而东南部的澜沧江源、黄河源等地区表现为干旱化趋势,与降水变化趋势一样,其变化趋势的统计学特征并不显著。

致谢:感谢中国气象局气象中心气象资料室提供本文所需的气象数据。感谢美国纽约城市大学 Wenge Ni-Meister 博士对本文英文摘要的修改及提出的宝贵意见,也感谢本文匿名评审对文章提出的建议。

参考文献:

- [1] 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[J].冰川冻土,2002,24(3):219-226.
- [2] 马柱国,黄刚,甘文强,等.近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征[J].大气科学,2005,29(5):671-681.
- [3] Liu X, Chen B. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades [J]. International Journal of Climatology, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [4] 牛涛,刘洪利,宋燕,等.青藏高原气候由暖干到暖湿时期的年代际变化特征研究[J].应用气象学报,2005,16(6):763-771.
- [5] 林振耀,赵昕奕.青藏高原气温降水变化的空间特征[J].中国科学:D辑,1996,26(4):354-358.
- [6] 李潮流,康世昌.青藏高原不同时段气候变化的研究综述[J].地理学报,2006,61(3):327-335.
- [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[J].高原气象,1998,17(3):245-249.
- [8] 杨保,康兴成,施雅风.近 2000 年都兰树轮 10 年尺度的气候变化及其与中国其它地区温度代用资料的比较[J].地理科学,2000,20(5):397-402.
- [9] 姚檀栋,刘晓东,王宁练.青藏高原地区的气候变化幅度问题[J].科学通报,2000,45(1):98-106.
- [10] 施雅风.山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望[J].地理学报,1990,45(1):1-13.
- [11] 李林,汪青春,张国胜,等.黄河上游气候变化对地表水的影响[J].地理学报,2004,59(5):716-722.
- [12] 时兴合,李凤霞,扎西才让,等.海西东部及环青海湖地区 40 多年的气候变化研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):215-222.
- [13] 孙建光,李保国,卢琦.青海共和盆地水分的时空变化及其荒漠化成因分析[J].资源科学,2004,26(6):55-61.
- [14] 孙建光,李保国,卢琦.青海共和盆地气温的时空动态及其效应分析[J].地理科学进展,2004,23(3):100-106.
- [15] 汪青春,秦宁生,张国胜,等.青海器测时期以来气温变化特征[J].气象科技,2005,33(5):419-423,432.
- [16] 燕华云,贾绍凤.近 50 a 来青海水文要素变化特征分析[J].冰川冻土,2003,25(2):193-198.

明,刺槐苗木抗氧化保护系统对 20 g/kg 以内的石油胁迫具有较强且长期的抗逆响应。

参考文献:

- [1] 夏会龙,吴良欢,陶勤南. 有机污染环境的植物修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 457-460.
- [2] 时腾飞,刘增文,田楠,等. 黄土区石油污染对土壤及豆科灌草植物的潜在影响[J]. 草地学报, 2013, 21(2): 295-301.
- [3] 陈嫣,李广贺,张旭,等. 石油污染土壤植物根际微生态环境与降解效应[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(6): 784-787.
- [4] Li X, Feng Y, Sawatsky N. Importance of soil-water relations in assessing the endpoint of bioremediated soils [J]. *Plant and Soil*, 1997, 192(2): 219-226.
- [5] Spriggs T, Banks M K, Schwab P. Phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in manufactured gas plant-impacted soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(5): 1755-1762.
- [6] 宋雪英,宋玉芳,孙铁珩,等. 石油污染土壤植物修复后对陆生高等植物的生态毒性[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1866-1871.
- [7] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 210-226.
- [8] 王生耀,王堃,赵永来,等. 干旱和 UV-B 对两种牧草生长和抗氧化系统的影响[J]. 草地学报, 2008, 16(4): 392-395, 402.
- [9] 赵丽英,邓西平,山仑. 活性氧清除系统对干旱胁迫的响应机制[J]. 西北植物学报, 2005, 25(2): 413-418.
- [10] 杨文权,寇建村,雷忠萍. 小冠花抗氧化保护系统对干旱胁迫及复水的动态响应[J]. 草地学报, 2013, 21(2): 316-321.
- [11] Zhang J, Kirkham M B. Antioxidant responses to drought in sunflower and sorghum seedlings[J]. *New Phytologist*, 1996, 132(3): 361-373.
- [12] 王娟,李德全. 水分胁迫下植物体内的抗氧化剂及其作用[J]. 生物学通报, 2002, 37(10): 22-23.
- [13] 韩刚,党青,赵忠. 干旱胁迫下沙生灌木花棒的抗氧化保护响应研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(5): 1007-1013.
- [14] 弓晓峰,荣亮,杨丽珍,等. 石油污染土壤对玉米生长的影响及其生态毒性研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(10): 71-75.
- [15] 李春荣,王文科,曹玉清,等. 石油污染土壤对黄豆生长的生态毒性效应[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(1): 116-120.
- [16] 王雪峰,陈桂珠,许夏玲. 白骨壤对石油污染的生理生态响应[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1095-1100.
- [17] 庄飞,范阳阳,魏瑞峰. 土壤水分和氮素有效性对刺槐幼苗叶片活性氧产生和清除的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(6): 1190-1196.
- [18] 岳冰冰,李鑫,任芳菲,等. 石油污染对紫花苜蓿部分生理指标的影响[J]. 草业科学, 2011, 28(2): 236-240.
- [17] 周陈超,贾绍凤,燕华云,等. 近 50 a 以来青海省水资源变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 432-437.
- [18] 许吟隆,张颖娟,林万涛,等. “三江源”地区未来气候变化的模拟分析[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(5): 667-675.
- [19] 尹云鹤,吴绍洪,郑度,等. 近 30 年我国干湿状况变化的区域差异[J]. 科学通报, 2005, 50(15): 1636-1642.
- [20] 张庆云,陈烈庭. 近 30 年来中国气候的干湿变化[J]. 大气科学, 1991, 15(5): 72-81.
- [21] 胡自治. 草原分类学概论[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [22] Hutchinson M F. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines. Part I: Two dimensional smoothing of data with short range correlation [J]. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2): 139-151.
- [23] Hutchinson M F. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines. Part II: Analysis of topographic dependence[J]. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2): 152-167.
- [24] Hutchinson M F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(4): 385-403.
- [25] U. S. Geological Survey's EROS Data Center. Global 30 Arc-Second Elevation Data Set. 1996. http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30 U. S. Geological Survey's EROS Data Center December 20, 2012 at 9:41 AM
- [26] Allen R G, Pereira L S, Raes D et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome, Italy: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [27] Thornthwaite C. An approach toward a rational classification of climate[J]. *Geographical Review*, 1948, 38(1): 55-94.
- [28] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告. I: 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [29] 马柱国,符淙斌. 1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实[J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439.
- [30] 王军邦,刘纪远,邵全琴,等. 基于遥感—过程耦合模型的 1988—2004 年青海三江源区净初级生产力模拟[J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 254-269.

(上接第 250 页)