

青藏高原近 30 年气候变化趋势

吴绍洪^{1,2}, 尹云鹤^{1,3}, 郑 度¹, 杨勤业¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 以 1971~2000 年青藏高原 77 个气象台站的观测数据 (最低、最高气温, 日照时数, 相对湿度, 风速和降水量) 为基础, 应用 1998 年 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型, 并根据我国实际状况对其辐射项进行修正, 模拟了青藏高原 1971~2000 年的最大可能蒸散, 并由 Vyshotskii 模型转换为干燥度, 力求说明近 30 年青藏高原的气候变化趋势, 以及干湿状况的空间分布。应用线性回归法计算变化趋势, 并用 Mann-Kendall 方法进行趋势检验。结果表明: 青藏高原近 30 年气候变化的总体特征是气温呈上升趋势, 降水呈增加趋势, 最大可能蒸散呈降低趋势, 大多数地区的干湿状况有由干向湿发展的趋势。气候因子与地表干湿状况间并不是线性关系, 存在很大的不确定性。

关键词: 青藏高原; 最大可能蒸散; 气候变化; 干燥度; 变化率

1 引言

全球气候变化是当今各国政府和科学界乃至普通民众广泛关注的热点问题, 众多的科学家一直关注气温和降水的变化, 力求从过去和现在的变化中展望未来的趋势。已经观测到的证据表明, 区域气候变化已经影响了世界上许多地方的各种自然和生物系统, 如冰川退缩、永冻土融化、中高纬度地区生长季延长等, 20 年以上的长期研究揭示了生物和自然系统变化与区域气温变化相关^[1], 因此气温变化是首要的焦点问题。另一方面, 越来越多的科学家正在关注水分状况又会产生怎样的变化^[2-4], 即区域的干湿状况又成为另一个焦点问题, 许多科学家转而研究降水的变化, 以及与降水有关的影响, 他们中不少人认为降水增加的同时区域的湿润程度应该随之上升。但实际上区域的干湿状况不仅仅受降水的影响^[5], 而且与其他一系列因子密切相关, 如气温、下垫面、太阳辐射、风速等。上述气候因子间的关系有很大的不确定性, 最大可能蒸散是这些因子相互作用的结果, 其与降水的比值能指示区域的干湿状况^[6]。干湿状况的研究有助于对未来全球变化进行研究。

青藏高原是全球海拔最高的一个巨型构造地貌单元, 具有独特的自然环境和空间分异规律, 受大气环流和高原地势格局的制约, 它形成了独特的水热状况地域组合, 呈现出从东南温暖湿润向西北寒冷干旱的变化。高原的隆起对高原及其毗邻地区自然环境的演化影响深刻, 其气候变化与全球环境变化密切相关^[7,8]。被认为是“全球气候变化的驱动力与放大器”^[9], 并且是“全球变化与地球系统科学统一研究的最佳天然实验室”^[10]。近年来在青藏高原开展了一系列的全球变化的研究, 集中研究历史时期气候变化的自然过程^[3,11,12]、现代气候变化及其环境效应^[13-17], 以及未来气候变化趋势与对策等^[4,5,18]。分析

收稿日期: 2004-08-09; 修订日期: 2004-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40171040); 国家自然科学基金重点项目 (40331006) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40171040; Key Project of National Natural Science Foundation of China, No.40331006]

作者简介: 吴绍洪 (1961-), 男, 研究员, 中国地理学会副秘书长。E-mail: wush@igsnrr.ac.cn

研究表明,最近几十年内青藏高原地区气温变化的总趋势是上升的,降水的变化趋势还存在争议^[17,19-24],如1959~1998年青藏高原的年降水量的变化趋势由偏少到偏多^[21];20世纪50年代至90年代初青藏高原平均降水量呈减少趋势,主要分布在雅鲁藏布江一带,而藏东南、藏南、藏北地势较高地区及青海北部降水增加^[23];1971~2000年西藏大部分地区降水变化为正趋势,速率为19.9 mm/10a,而阿里地区呈减少趋势^[24]。高海拔地区比低海拔地区对全球气候变化反应更敏感,青藏高原气候变化的位相比我国东部位相提前^[11,25],所以青藏高原的气候变化,对全国的气候变化具有指示性的意义。青藏高原近几十年来降水和气温的变化趋势受到广泛关注,但是较少涉及最大可能蒸散和陆地表层干湿状况的变化趋势。本研究的目的是,通过气候观测数据和最大可能蒸散、地表干燥度的计算,分析青藏高原区域近30年的气候变化趋势和干湿状况,为全球变化的研究提供科学例证。

2 数据和模型

研究区采用中国生态地理区域系统所确定的范围^[26]。研究采用青藏高原77个气象台站1971~2000年的气候观测数据,包括最低、最高气温,风速,相对湿度,日照时数和降水量,以此为基础计算最大可能蒸散和干燥度。

国际上最大可能蒸散(ET_0)的测算方法众多^[27,28],在我国常被应用的有彭曼(Perman)模型、桑斯威特(Thornthwaite)模型和谢良尼诺夫(Seljaninov)模型。这些模型是在特定的实验环境条件下建立的,而我国的自然环境的区域差异显著,因此在应用到我国时应该根据区域实际情况进行修正。Perman模型综合空气动力学的涡动传导与能量平衡,考虑因子最多,包括气温,日照时数,相对湿度和风速,被广泛修正和应用^[29-32];Monteith的修正模型(Perman-Monteith模型)考虑了植被生理特征,引入表面阻力的概念^[33],从而模型的理论基础更为合理。1998年联合国粮农组织(FAO)对Perman-Monteith模型进行了进一步的修订,定义了一个高0.12 m,表面阻力为70 s/m,反射率为0.23的假想参考作物面来计算参考作物蒸发,假想面类似于同一高度,生长旺盛,完全覆盖地面,水分充足的广阔绿色植被。使用这样假想的统一下垫面,不但与陆面蒸发的机理相同,而且避免了各种与气候要素无关的因素,如植被类型,高度,生长状况等影响 ET_0 ,保证了 ET_0 仅为气候要素的函数,增加了地区和季节年份间的可比性,可适应于不同的自然环境条件,在国际上已得到充分肯定和广泛应用^[34]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: R_n 为净辐射, G 为土壤热通量, γ 为干湿常数, Δ 为饱和水汽压曲线斜率, U_2 为2米高处的风速, e_a 为实际水汽压, e_s 为平均饱和水汽压。该模型所需数据为:最低和最高气温,风速,相对湿度和日照时数。在应用时,变量基本上采用原模型的方法计算,但净辐射需要地区校正。根据左大康等依据我国实测资料得到计算净辐射 R_n 的经验系数^[35],得出 R_n 的计算公式:

$$R_n = 0.77 \times (0.248 + 0.752 \frac{n}{N}) R_{\infty} - \sigma \left[\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] (0.56 - 0.08\sqrt{e_a}) (0.1 + 0.9n/N) \quad (2)$$

式中: σ 为Stefan-Boltzmann常数 $[4.903 \times 10^{-9} \text{ M J K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}]$, $T_{\max,k}$, $T_{\min,k}$ 分别为绝对温标的最高和最低气温, n 为实际日照时数, N 为可照时数, R_{∞} 为晴天辐射。

Vyshotskii模型采用 P 与 ET_0 之比确定湿润指数,本文将干燥度(I_a)定义为Vyshotskii

表 1 青藏高原部分站点近 30 年气候变化趋势

Tab. 1 Climate change over parts of the Tibetan Plateau during the period 1971~2000

站名	经度	纬度	海拔 高度/m	$T/^{\circ}\text{C}$	P/mm	ET_0/mm	$I_a^{(a)}$	T 趋势 $/^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$	P 趋势 $/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	ET_0 趋势 $/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	I_a 趋势
贡山	98.7	27.8	1591	14.66	1787.87	632.80	0.35	-0.003	5.075	-1.768**	-0.002*
巴塘	99.1	30.0	2589	12.73	469.70	884.84	1.88	-0.006	6.577**	-2.242**	-0.032**
木里	100.8	28.1	2666	12.41	833.47	900.29	1.08	0.111**	2.639	2.849**	-0.001
门源	101.6	37.4	2850	0.80	521.79	588.30	1.13	0.032**	-0.138	-0.521	0.000
松潘	103.6	32.7	2850	5.89	728.54	627.91	0.86	0.028**	-1.857	-0.761*	0.001
合作	102.9	35.0	2910	2.44	531.63	591.51	1.11	0.038**	-0.253	0.283	0.000
林芝	94.5	29.6	3000	8.75	688.03	758.61	1.10	0.02**	6.016**	0.042	-0.01**
新龙	100.3	30.9	3000	7.53	612.67	825.73	1.35	0.001	3.937	-6.47**	-0.020**
茶卡	99.1	36.8	3087	1.93	208.30	842.48	4.04	0.027**	0.698	-0.095	-0.020
茫崖	90.2	38.4	3138	2.53	51.68	1004.06	19.43	0.114**	-0.213	-8.742**	-0.205
大柴旦	95.4	37.9	3173	1.93	82.71	808.25	9.77	0.035**	-0.464	-1.208*	0.034
野牛沟	99.6	38.4	3180	-2.98	412.53	585.96	1.42	0.026*	-0.849	-0.275	0.005
都兰	98.1	36.3	3191	3.20	193.92	813.17	4.19	0.032**	1.159	-4.272**	-0.055**
河南	101.6	34.7	3500	0.07	579.81	607.11	1.05	-0.069**	-5.849**	-2.695**	0.007*
久治	101.5	33.4	3628	0.62	748.43	606.28	0.81	0.032**	-3.738*	-0.626	0.004
拉萨	91.0	29.7	3658	8.01	426.47	935.56	2.19	0.038**	2.950	-1.45**	-0.016
慕拉木	86.0	28.2	3810	3.61	665.57	766.28	1.15	0.016	-3.149	-1.21**	0.005
日喀则	88.9	29.3	3836	6.49	430.46	916.44	2.13	0.018*	3.932	-2.112**	-0.019
色达	100.3	32.3	3893	0.29	664.69	642.38	0.97	0.03**	2.877*	-1.44**	-0.007**
理塘	100.3	30.0	3948	3.27	722.09	736.58	1.02	0.022*	8.451**	-2.053**	-0.015**
达日	99.7	33.8	3967	-0.90	544.64	618.04	1.13	0.019	0.605	0.132	-0.001
杂多	95.3	32.9	4066	0.51	538.72	677.10	1.26	0.025**	-0.014	-2.104**	-0.005
玛多	98.2	34.9	4272	-3.80	321.59	625.59	1.95	0.034**	0.331	0.888	-0.002
狮泉河	80.1	32.5	4278	0.50	74.78	915.25	12.24	0.052**	-0.540	-1.707**	0.091
定日	87.1	28.6	4300	2.87	295.81	940.08	3.18	0.024**	0.543	-1.384*	-0.021

(a) I_a 为 Vysotskii 湿润指数的倒数: ≤ 0.99 为湿润区, 1.00~1.49 为半湿润区, 1.50~3.99 为半干旱区, ≥ 4.00 为干旱区。

**表示变化趋势的置信度为 95%, *表示变化趋势的置信度为 90%。

湿润指数的倒数, 用于表示干湿程度 (表 1)。

青藏高原 77 个气象站的 30 年年平均气温、降水量的观测数据, 以及最大可能蒸散、干燥度计算结果的气候变化趋势采用线性趋势分析方法, 用线性回归方程的斜率表示变化趋势, 斜率大于 0 为增加趋势, 小于 0 为降低趋势, 零表示无变化。由于年降水量和年最大可能蒸散量在站与站之间相差很大, 仅讨论它们变化趋势的绝对值并不能完全说明情况, 还应计算其相对值。本文采用线性拟合直线的最高、最低值之差与最低值的绝对值的百分比表示。最后还应对计算结果进行信度检验, Mann-Kendall 方法广泛应用于时间序列趋势的非参数检验, 当 P 值小于 0.10 时表示变化趋势通过了置信度为 90% 的显著性, P 值小于 0.05 时表示变化趋势通过了置信度为 95% 的显著性。

3 分析结果

3.1 降水、气温、最大可能蒸散和干燥度的变化趋势及其信度检验

青藏高原 1971~2000 年的年平均气温为 3.39°C , 整体的变化趋势是平均每年升高 0.024°C , 各站点变幅在 $-0.069 \sim 0.114^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 之间。年降水量为 482.8 mm , 变化趋势为平均每年增加 1.196 mm , 各站点变幅在 $-5.849 \sim 8.451 \text{ mm}/\text{a}$ 之间; 30 年来青藏高原地区年降水量增加了 6.9%。年最大可能蒸散量为 756.8 mm , 平均每年减少 1.914 mm , 各站点变幅在 $-8.742 \sim 2.849 \text{ mm}/\text{a}$ 之间; 30 年来青藏高原地区年最大可能蒸散减少了 6.5%。随

着气候的变化,近 30 年来青藏高原的干燥度以下降的趋势为主,平均每年降低 0.001,变幅在 -0.263 ~1.467 之间(表 1)。表 1 按海拔高度的顺序列出,其中的站点均匀分布在研究地区,西部的站点基本都列出,东部站点较多,因而选择部分有代表性的站点,给出了气温、降水、最大可能蒸散和干燥度的各种变化趋势的组合。

近 30 年青藏高原地区的气候变化趋势:气温呈明显上升的趋势,74 个站点的气温呈增加趋势,仅有 3 个站点(河南,巴塘,贡山)的气温为降低趋势;有 56% 的站点置信度为 95%,有 68% 的站点置信度为 90%。降水大体上以增加的趋势为主,占气象台站总数的 69%;但总体的显著性水平不高。最大可能蒸散有 65 个气象台站呈减少趋势,占气象台站总数的 84%;有 62% 的站点置信度为 95%,有 68% 的站点置信度为 90%。大部分站点(77%)的干燥度呈减少变化趋势,其信度检验表明,干燥度的变化趋势总体上并不显著,仅有 23% 的站点置信度为 95%,38% 的站点置信度为 90%(表 2)。根据干燥度的干湿分级,青藏高原 1971~2000 年干湿状况的总体分布趋势是由东南向西北干旱程度增加(图 1)。

不同气温、降水、最大可能蒸散和干燥度变化趋势类型的气象站点变化(图 2, 3, 4)显示,近 30 年日喀则站呈暖湿趋势,降水呈增加趋势;河南站呈冷干趋势,降水有减少趋势;茫崖站呈暖湿趋势,降水为减少趋势。这表明不同气象站点气候变化趋势的最大特点是,气温上升趋势并不一定带来最大可能蒸散的上升趋势,而且与降水也不是线性关系。

3.2 气温、降水、最大可能蒸散和干燥度变化趋势的空间分布

1971~2000 年气温、降水、最大可能蒸散和干燥度变化趋势的空间分布(图 5)表明,

青藏高原南部降水量基本增加,北部一些站点减少;而最大可能蒸散增加,干燥度增加的站点多数分布在北部。从图上也可以看出,干湿状况的变化并不仅仅取决于降水的增减,例如茫崖,降水呈降低趋势,其干燥度却呈减少趋势,因为该地的最大可能蒸散是增加趋势。必需指出的是,青藏高原西部站点分布稀少,需要更多更新的观测数据进行深入研究,才能准确判断青藏高原整体的气候变化。

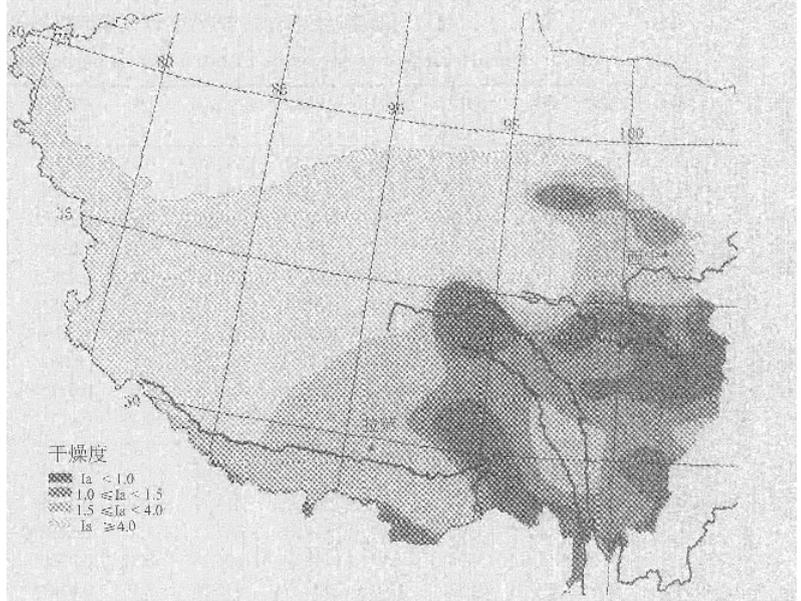


图 1 1971~2000 年青藏高原的干湿状况分布图

Fig. 1 Aridity/humidity status over the Tibetan Plateau during the period 1971-2000

表 2 1971~2000 年青藏高原气候变化趋势及其显著性的站点统计

Tab. 2 Statistics of stations' trends over the Tibetan Plateau during 1971-2000

站点数(百分比)	气温	降水	最大可能蒸散	干燥度
增加趋势	74 (96%)	53 (69%)	12 (16%)	18 (23%)
减少趋势	3 (4%)	24 (31%)	65 (84%)	59 (77%)
95%置信度	43 (56%)	10 (13%)	48 (62%)	18 (23%)
90%置信度	52 (68%)	14 (18%)	52 (68%)	29 (38%)

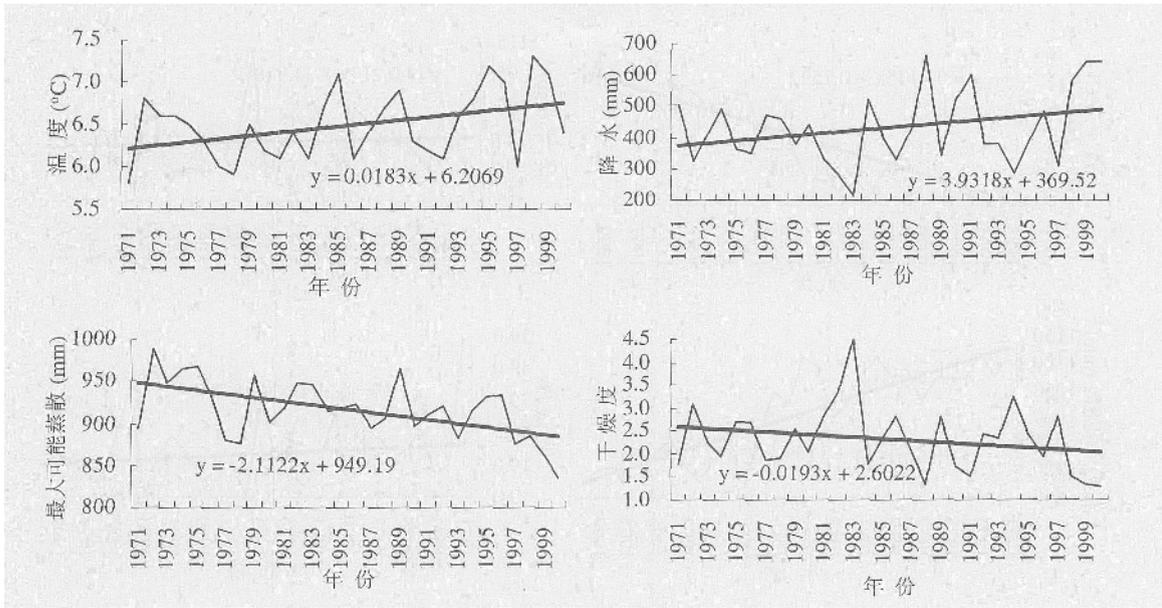


图2 1971~2000年日喀则站气候变化趋势

Fig. 2 Trends of climate change in Xigaze during the period 1971-2000

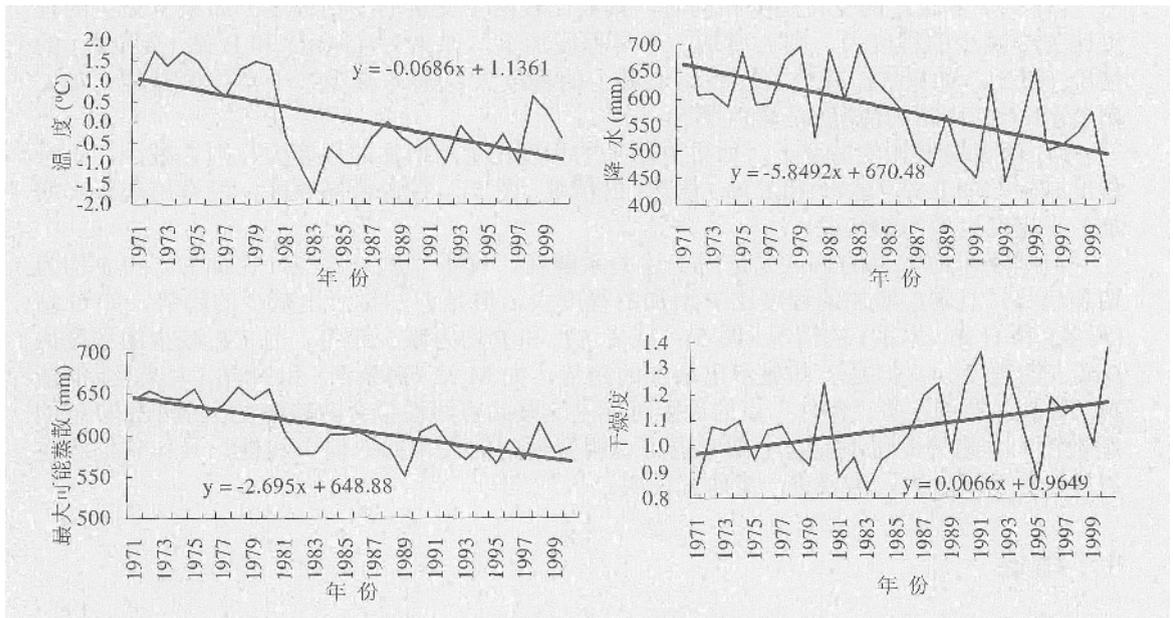


图3 1971~2000年河南站气候变化趋势

Fig. 3 Trends of climate change in Henan during the period 1971-2000

3.3 “例外”的站点

一般来说，最大可能蒸散 ET_0 ，降水 P 和干燥度 I_a 3个变量的变化趋势存在4种主要的关系：

- (1) ET_0 增加、 P 减少，这样应导致 I_a 的增加，即干旱程度加重。
- (2) ET_0 减少、 P 增加，使 I_a 减少，即干旱程度减轻。

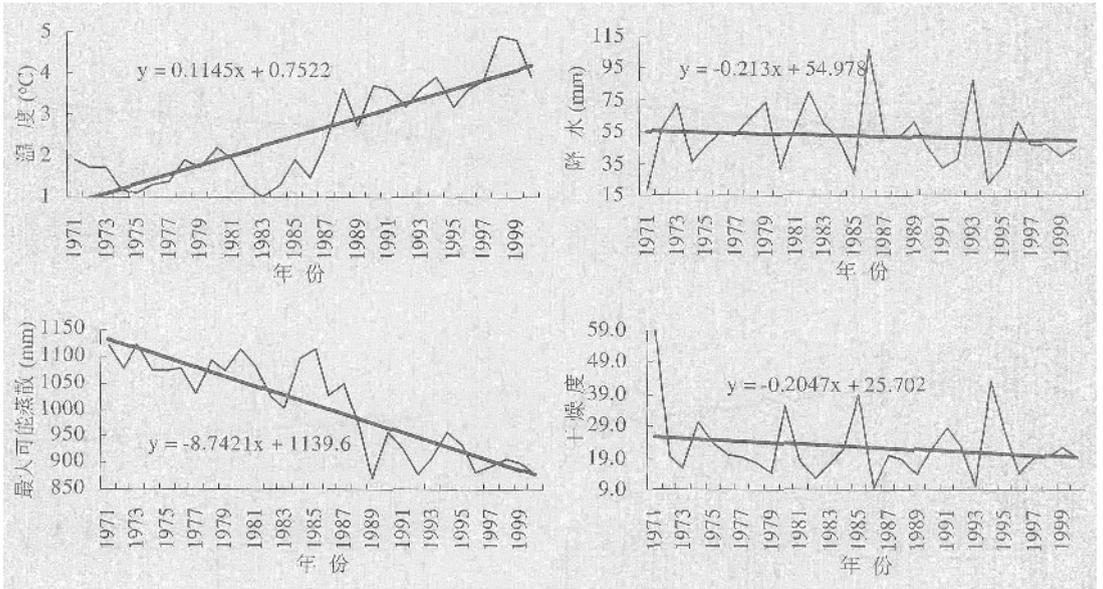


图 4 1971~2000 年茫崖站气候变化趋势

Fig. 4 Trends of climate change in Mangnai during the period 1971-2000

(3) 当 P 和 ET_0 的变化趋势相同时, 则要比两个变量的变化程度。如果 P 减少的程度比 ET_0 减少的程度大, 则 I_a 增加, 干旱程度加重, 如 A 站 (河南) 和 B 站 (聂拉木) 的情况 (图 5)。如果 ET_0 减少的程度比 P 减少的程度大, 则 I_a 减少, 干旱程度减轻, 如 C 站 (杂多) 和 D 站的情况 (茫崖) (图 5)。

(4) 两者均增加的情况下, 如果 P 增加的程度比 ET_0 增加的程度大, 则 I_a 减少, 干旱程度减轻, 如 E 站 (达日) 和 F 站 (林芝) 的情况 (图 5)。在青藏高原区, 没有出现降水增加, 干燥度也增加的情况。

但是还有约 12% 的站点无法用上述关系解释, 属于“例外”点, 比如 ET_0 和 P 均为增加趋势, 且 ET_0 增加的程度比 P 增加的程度大, 但是 I_a 却显示出减少的趋势, 如 G 站 (玛多) 和 H 站 (木里) 的情况 (图 5); 或者 ET_0 和 P 均为减少趋势, 且 ET_0 减少的程度比 P 减少的程度大, 但是 I_a 却显示出增加的趋势, 如 M 站 (狮泉河) 和 N 站 (大柴旦) 的情况 (图 5)。导致这些“例外”点的原因可能是这些站点线性拟合的趋势受个别年份极值的影响较大, 趋势变化不显著, 同时也可说明变量间的关系并非简单线性, 具体它们存在何种联系及其原因, 需要进一步研究证明。

4 结论

(1) 气候观测数据表明, 青藏高原近 30 年来气候变化总体趋势是: 气温呈上升趋势 (96% 的站点), Mann-Kendall 法检验结果显示显著性水平较高, 置信度在 90% 的站点占总体的 68%。降水以增加趋势为主 (69% 的站点), Mann-Kendall 法检验结果显示显著性水平较低, 置信度在 90% 的站点仅占总体的 18%。

(2) Penman-Monteith 模型和 Vysotskii 模型计算结果显示: 最大可能蒸散以减少趋势为主 (84% 的站点), Mann-Kendall 法检验结果显示显著性水平较高, 置信度在 90% 的站点占总体的 68%。

(3) 干燥度以降低趋势为主 (77% 的站点), Mann-Kendall 法检验结果显示显著性水平

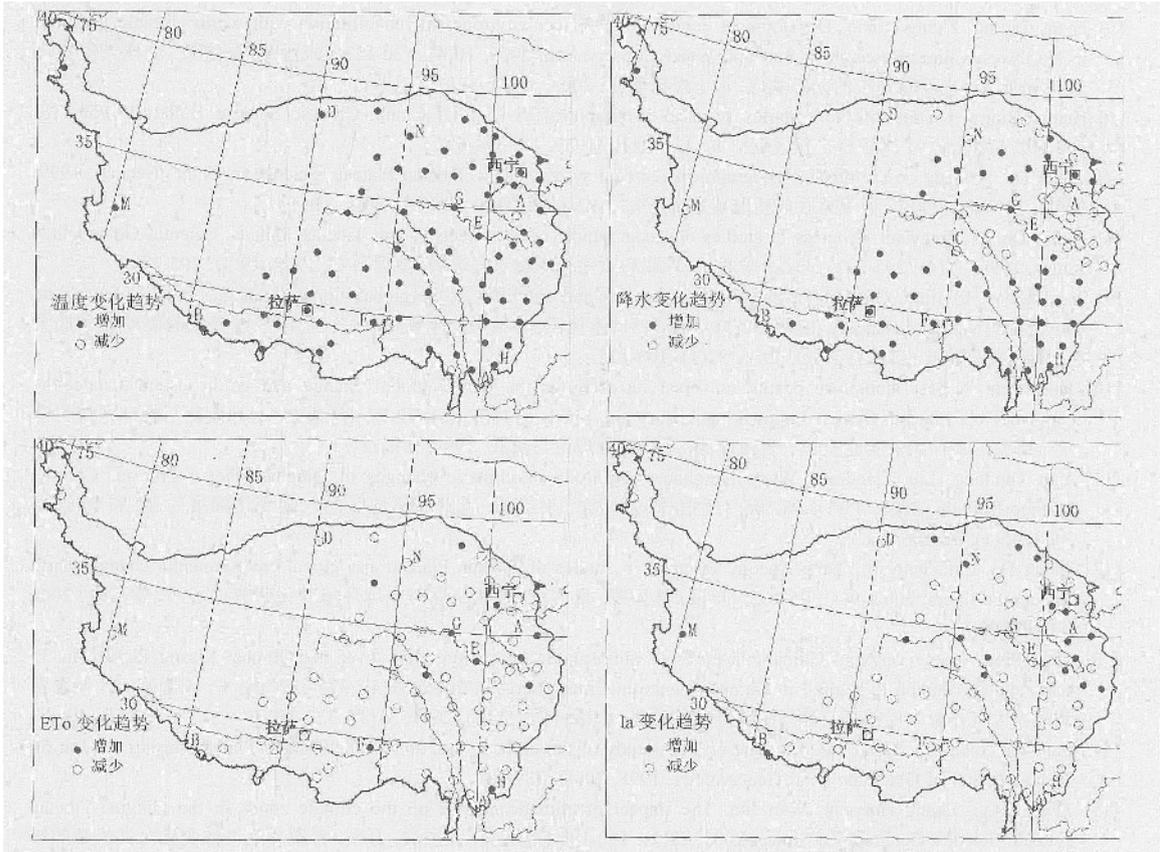


图 5 青藏高原近 30 年气候变化的分布图

Fig. 5 Trends of T, P, ETo and Ia in the Tibetan Plateau during the period 1971-2000

较低，置信度在 90% 的站点占总体的 38%。

(4) 观测和计算结果分析显示了气候因子和干湿状况之间不是线性的关系，而且区域的干湿状况和气候变化之间还存在很大的不确定性。目前青藏高原陆地表面的干湿状况趋势总体是由干向湿方向发展，但是否属于暖湿型有待进一步研究。

需要指出的是，青藏高原西部的气候观测站点稀少，气候数据缺乏，因此对研究结果的准确性有影响。进一步的研究需要更多的气候数据以提高研究结果的准确性。

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。

参考文献 (References)

[1] IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 1-18.

[2] Shi Yafeng. An Assessment of the Issues of Climatic Shift from W arm-dry to W arm-wet in Northwest China. Beijing: China Meteorological Press, 2003. 17-25. [施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估. 北京: 气象出版社, 2003. 17-25.]

[3] Li Gelin, Xu Yuan, Qian Weihong. Dry and wet climate changes of Western China in recent 300 years. Plateau Meteorology, 2003, 22(4): 371-377. [李弋林, 徐袁, 钱维宏. 近 300 年来中国西部气候的干湿变化. 高原气象, 2003, 22(4): 371-377.]

[4] Ci Longjin, Yang Xiaohui, Chen Zhongxin. The potential impacts of climate change scenarios on desertification in China. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 287-294. [慈龙骏, 杨晓晖, 陈仲新. 未来气候变化对中国荒漠化的潜在影响. 地学前缘, 2002, 9(2): 287-294.]

- [5] Zhang Liping, Zhang Ruibo. Development coordination for eco-environment rehabilitation with world climatic variation in Northwest China. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(4): 120-123. [张丽萍, 张锐波. 全球气候变化趋势下西北生态环境建设的动态响应. *水土保持研究*, 2003, 10(4): 120-123.]
- [6] Huang Bingwei. Draft of the complex physical geographical division of China. *Chinese Science Bulletin*, 1959, 18: 594-602. [黄秉维. 中国综合自然区划草案. *科学通报*, 1959, 18: 594-602.]
- [7] Zheng Du. A study on the physico-geographical regional system of the Tibetan Plateau. *Science in China (Ser. D)*, 1999, 26(4): 336-341. [郑度. 青藏高原自然地域系统研究. *中国科学 (D 辑)*, 1999, 26(4): 336-341.]
- [8] Zheng Du, Li Bingyuan. Progress in studies on geographical environments of the Tibetan Plateau. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(4): 295-302. [郑度, 李炳元. 青藏高原地理环境研究进展. *地理科学*, 1999, 19(4): 295-302.]
- [9] Pan Baotian, Li Jijun. Qinghai-Tibetan Plateau: a driver and amplifier of the global climatic change. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1996, 32(1): 108-115. [潘保田, 李吉均. 青藏高原——全球气候变化的驱动力与放大器. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 1996, 32(1): 108-115.]
- [10] Bi Siwen. A best laboratory of the universal research for the earth's global change and earth system science—the Qinghai-Tibet Plateau. *System Engineering Theory and Practice*, 1997, (5): 72-77. [毕思文. 全球变化与地球系统科学统一研究的最佳天然实验室——青藏高原. *系统工程理论与实践*, 1997, (5): 72-77.]
- [11] Yao Tandong, Liu Xiaodong, Wang Ninglian. Amplitude of climatic changes in Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(1): 98-106. [姚檀栋, 刘晓东, 王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题. *科学通报*, 2000, 45(1): 98-106.]
- [12] Zheng Du, Lin Zhenyao, Zhang Xueqin. Progress in studies of Tibetan Plateau and global environmental change. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 95-102. [郑度, 林振耀, 张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展. *地学前缘*, 2002(1): 95-102.]
- [13] Zhao Ping, Chen Longxun. Climatic features of atmospheric heat source/sink over the Qinghai-Xizang Plateau in 35 years and its relation to rainfall in China. *Science in China (Ser. D)*, 2001, 31(4): 327-332. [赵平, 陈隆勋. 35年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系. *中国科学 (D 辑)*, 2001, 31(4): 327-332.]
- [14] Kang Shichang, Li Jijun, Yao Tandong et al. A study of the climate variation in the Tibetan Plateau during the last 50 Years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(4): 381-387.
- [15] Zhao Xinyi, Zhang Huiyuan, Wan Jun. The impact of climatic change on the climate zones in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(2): 190-195. [赵昕奕, 张惠远, 万军. 青藏高原气候变化对气候带的影响. *地理科学*, 2002, 22(2): 190-195.]
- [16] Cai Ying, Li Dongliang, Tang M aocang et al. Decadal temperature changes over Qinghai-Xizang Plateau in recent 50 years. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(5): 464-470. [蔡英, 李栋梁, 汤懋苍等. 青藏高原近 50 年来气温的年代际变化. *高原气象*, 2003, 22(5): 464-470.]
- [17] Wei Zhigang, Huang Ronghui, Dong Wenjie. Interannual and interdecadal variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(2): 157-170. [韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原青藏高原气温和降水的年际和年代际变化. *大气科学*, 2003, 27(2): 157-170.]
- [18] Xu Y ing, Ding Y ihui, Li Dongliang. Climatic change over Qinghai and Xizang in 21st Century. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(5): 451-457. [徐影, 丁一汇, 李栋梁. 青藏地区未来百年气候变化. *高原气象*, 2003, 22(5): 451-457.]
- [19] Wang Yan, Li Xiong, Miao Q ilong. Analyses on variety characteristics of temperature in Qinghai-Tibet Plateau in recent 50 years. *Arid Land Geography*, 2004, 27(1): 41-46. [王堰, 李雄, 缪启龙. 青藏高原近 50 年来气温变化特征的研究. *干旱区地理*, 2004, 27(1): 41-46.]
- [20] Liu Xiaodong, Zhang Minfeng, Hui Xiaoying et al. Contemporary climatic change of the Qinghai-Xizang Plateau and its response to greenhouse effect. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(2): 113-121. [刘晓东, 张敏锋, 惠晓英等. 青藏高原当代气候变化特征及其对温室效应的响应. *地理科学*, 1998, 18(2): 113-121.]
- [21] Yao Li, Wu Q ingmei. Climate change character in the Tibetan Plateau. *Meteorological Science and Technology*, 2002, 30(3): 162-164. [姚莉, 吴庆梅. 青藏高原气候变化特征. *气象科技*, 2002, 30(3): 162-164.]
- [22] Li Lin, Zhu Xide, Qin Ningsheng. Study on temperature variations and its anomaly pattern over Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(5): 524-530. [李林, 朱西德, 秦宁生. 青藏高原气温变化及其异常类型的研究. *高原气象*, 2003, 22(5): 524-530.]
- [23] Lin Zhenyao, Zhao Xinyi. Spatial characters of temperature and precipitation in the Tibetan Plateau. *Science in China (Ser. D)*, 1996, 26(4): 354-358. [林振耀, 赵昕奕. 青藏高原气温降水变化的空间特征. *中国科学 (D 辑)*, 1996, 26(4): 354-358.]
- [24] Du Jun, Ma Yucai. Climatic trend of rainfall over Tibetan Plateau from 1971-2000. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 375-382. [杜军, 马玉才. 西藏高原降水变化趋势的气候分析. *地理学报*, 2004, 59(3): 375-382.]
- [25] Feng Song, Tang M aocang, Wang Dongmei. New evidence for the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau as a pilot region of

- climatic fluctuation in China. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(6): 633-636. [冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. 科学通报, 1998, 43(6): 633-636.]
- [26] Zheng Du. The system of physico-geographical regions of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. Science in China (Series D), 1996, 39(4): 410-417.
- [27] Jesen M E, Brum an R D, Allen R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE manuals and reports on engineering practice No.70. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 87-108.
- [28] Allen R G, Pereira L S, Raes D et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm>
- [29] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings, Royal Society, Series A, 1948, 193: 454-465.
- [30] Allen R G, Smith M. An update for the definition of reference evapotranspiration, ICID Bulletin, 1994, 43(2): 1-34.
- [31] Min Qian. Two questions in application of Penman formula. Meteorological Monthly, 1992, 18(11): 17-21. [闵騫. 彭曼公式应用中的两个问题的探讨. 气象, 1992, 18(11): 17-21.]
- [32] Ni Zhenguo. A distributed model of reference evapotranspiration based on the DEM. Advances in Water Science, 2002, 13(3): 303-307. [倪振国. 参考作物蒸散量的分布式模型. 水科学进展, 2002, 13(3): 303-307.]
- [33] Monteith J L. Evaporation and temperature. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1981, 107: 1-27.
- [34] Walter I A, Allen R G, Elliott R et al. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. In: Evans R L (ed.). Proceedings of the 4th Decennial Symposium, National Irrigation Symposium. Michigan: American Society of Civil Engineers, 2000. 1-6.
- [35] Zuo Dakang, Wang Yixian, Chen Jiansui. Spatial distribution characteristics of solar radiation in China. In: Zheng Du (ed.). Zuo Dakang's Geographical Research Papers. Beijing: Science Press, 1993. 168-185. [左大康, 王懿贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征. 见: 郑度 主编, 左大康地理研究论文选. 北京: 科学出版社, 1993. 168-185.]

Climate Changes in the Tibetan Plateau during the Last Three Decades

W U Shaohong^{1,2}, Y IN Yunhe^{1,3}, ZHENG Du¹, YANG Qinye¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100085, China;

3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The Tibetan Plateau is one of the best places to study global climate change. Aridity or humidity status of land surface is an important outcome that has close relations with a set of climatic factors such as precipitation, temperature, solar radiation, relative humidity and wind, but the relationship between them is complicated. This paper calculated potential evapotranspiration by applying Penman-Monteith model which was recommended by FAO in 1998, and aridity index by Vyshotskii model to indicate aridity or humidity status of the Tibetan Plateau during the period 1971-2000. Then it analyzed the changing trends of observed climatic factors (temperature and precipitation) and calculated factors (potential evapotranspiration and aridity index), and showed the spatial distribution of aridity/humidity status over the Tibetan Plateau during the period 1971-2000. Trends calculated by linear regression were tested through Mann-Kendall test. Results of 77 meteorological stations on the Tibetan Plateau showed that the main trends of climate change are temperature rise and precipitation increase; potential evapotranspiration decrease and most of the areas was ascending to more humid status. Results suggested that aridity or humidity status cannot be presented only with precipitation.

Key words: Tibetan Plateau; climate change; potential evapotranspiration; aridity index