

刘翔卿, 王雷, 刘阳, 等. 2018. 1951~2010 年云贵高原大理和丽江气温、降水的气候特征分析 [J]. 气候与环境研究, 23 (5): 513–523. Liu Xiangqing, Wang Lei, Liu Yang, et al. 2018. Climatological characteristics of air temperature and precipitation at Dali and Lijiang in the Yunnan–Guizhou Plateau from 1951 to 2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (5): 513–523, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17040.

1951~2010 年云贵高原大理和丽江气温、降水的气候特征分析

刘翔卿¹ 王雷² 刘阳^{2,3} 孙绩华⁴

1 云南省腾冲机场气象台, 云南腾冲 679100

2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

4 云南省气象科学研究所, 昆明 650034

摘 要 利用大理和丽江气象站 1951~2010 年的逐日气象资料, 分析了横断山脉东部气温、降水的气候特征。结果表明, 1991 年以后, 大理和丽江地区均存在显著增温的趋势 (0.58 和 0.55 °C /10 a), 明显高于同时期中国平均气温的增加幅度; 而在 1991 年之前, 大理和丽江的年平均气温呈现下降或微弱上升的趋势 (−0.14 和 0.07 °C /10 a)。与夏季平均气温的增温幅度相比, 冬季平均气温的增温更显著, 且其变化趋势与年均气温的气候特征是一致的。大理和丽江年总降水及各季节降水量在 1951~2010 年并没有明显增加或减少的趋势。大理和丽江雨季开始的时间分别为第 28 候和第 30 候, 持续时间分别约为 5.5 和 4.5 个月。20 世纪 80 年代以后, 丽江年平均风速的减小强度明显大于大理, 这是因为丽江站地处城区, 城市化剧烈, 地表粗糙度增加显著。日照时数与云量呈反相的季节变化, 降水量的多年平均的逐候变化与日照时数、总云量、尤其是低云云量相关, 随风速增大而减小。

关键词 气温 降水 大理 丽江 云贵高原

文章编号 1006-9585 (2018) 05-0513-11

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17040

Climatological Characteristics of Air Temperature and Precipitation at Dali and Lijiang in the Yunnan–Guizhou Plateau from 1951 to 2010

LIU Xiangqing¹, WANG Lei², LIU Yang^{2,3}, and SUN Jihua⁴

1 Meteorological office of Tengchong Airport of Yunnan Province, Tengchong, Yunnan Province 679100

2 State key laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

4 Yunnan Research Institute of Meteorology, Kunming 650034

Abstract Using daily meteorological observations collected at Dali and Lijiang stations from 1951 to 2010, we analyze the climatological characteristics in the eastern part of Hengduan Mountains. The results show that the annual mean surface air temperature obviously has been increasing after 1991 (0.58 and 0.55 °C/10 a at Dali and Lijiang, respectively), and the increase is significantly larger than that for the entire China. However, the annual mean surface air temperature

收稿日期 2017-03-14; **网络预出版日期** 2017-06-19

作者简介 刘翔卿, 男, 1987 年出生, 助理工程师, 主要从事高原大气综合观测分析研究。E-mail: 155014609@qq.com

通讯作者 王雷, E-mail: wangl@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 91537212、41675013、41661144018、41461144001

Funded by the National Natural Science Foundation of China (Grants 91537212, 41675013, 41661144018, and 41461144001)

decreased at Dali and increased slightly at Lijiang (-0.14 and 0.07 $^{\circ}\text{C}/10$ a at Dali and Lijiang, respectively) before 1991. Compared with the range of mean temperature increase in the summer, the mean temperature increase in the winter is more significantly, and the trend of mean temperature change in the winter is consistent with that of annual mean temperature. There are no obvious changing trends of annual total precipitation and seasonal precipitation at Dali and Lijiang from 1951 to 2010. The rainy season for Dali and Lijiang starts from Pentad 28 and 30, respectively. The rainy season lasts for 5.5 and 4.5 months at Dali and Lijiang, respectively. Since the 1980s, the increase in annual mean wind speed at Lijiang is larger than that at Dali. This is because the Lijiang meteorological station is located at the urban area of Lijiang and the urbanization has led to large increase in the surface roughness. The seasonal variations of sunshine duration and cloud cover (including total cloud and low cloud) are opposite. The pentad-mean precipitation is correlated with sunshine duration and total cloud, especially low cloud, and decreases with increasing wind speed.

Keywords Air temperature, Precipitation, Dali, Lijiang, Yunnan-Guizhou Plateau

1 引言

横断山脉位于青藏高原东南缘,是四川、云南两省西部和西藏自治区东部的南北向山脉的总称。大理和丽江位于云南省西北部,横断山脉东侧和云贵高原的交接处,均属于高海拔地区。根据全球地表温度资料,1906~2005年的100年间,全球地表温度平均增加 0.074 $^{\circ}\text{C}/10$ a,并且增温正在加剧,近50年的增温幅度几乎是近100年的两倍(0.13 $^{\circ}\text{C}/10$ a)(IPCC, 2007)。过去20年间,中国平均气温的增加幅度(0.3 $^{\circ}\text{C}/10$ a)明显高于同时期全球增温的幅度(0.19 $^{\circ}\text{C}/10$ a)(Wang et al., 2004; Hansen et al., 2006)。有研究表明,与平原地区相比,高海拔地区(高原、山地等)的气温升高更为显著(Fan et al., 2011),例如瑞士阿尔卑斯山(Beniston and Rebetez, 1996)和青藏高原(Liu et al., 2006)。Saito et al. (2009)指出,温度是高寒草甸生态系统净 CO_2 交换的主要控制因子,气温升高可能对高寒草甸生态系统的碳收支造成很大的影响。事实上,在这样的增温背景下,高海拔地区的气候变暖已有明显的反应。例如,作为对气候变化响应最敏感的季风温冰川类型,丽江玉龙雪山的冰川变化具体表现为冰舌位置后退、冰川面积减小、雪线上升等特征(何元庆和章典, 2004)。另一方面,东亚大气环流,包括季风环流的演变中,高原作用十分重要;青藏高原构成了长江流域季风水汽输送源地或转运站,影响着中国干旱、洪涝异常气候的季风水汽输送(徐祥德等, 2002)。作为青藏高原东南缘的横断山脉,其西部是海拔较低的平原地区,受西南风影响多地形雨,在春季,会形成全年第一个降水峰值,当地称之为“桃花汛”(鲁亚斌等, 2008),当地有的台站甚至观测到春

季降水量超过了夏季降水量(比如贡山站)。该地区雨季从第10候左右开始,到第60候结束,持续时间长达8个月(肖潺等, 2013)。而横断山脉东部,云南省中北部在春季存在一个季节性的干旱(Li et al., 2011)。横断山脉地区,降水的季节特征存在东西方向上显著的差异,但东部地区降水的季节演变特征并不完全明确。同样位于山脉东部,大理和丽江雨季的开始、持续时间以及降水的频率分布也有待进行量化的比较。

本文拟利用横断山脉东部大理和丽江站的逐日气象资料,分析大理、丽江1951~2010年气温、土壤温度、降水、风速、日照时数、云量的季节及年际变化特征,确定降水量和日照时数、云量、风速的关系以及其对水汽压、相对湿度的影响。

2 资料介绍

本文所用数据来自于大理观象台($25^{\circ}42'\text{N}$, $100^{\circ}10'\text{E}$; 海拔高度1982 m)和丽江市气象局气象观测站($26^{\circ}52'\text{N}$, $100^{\circ}13'\text{E}$; 海拔高度2400 m)1951~2010年逐日的气象资料。分析变量包括平均气温、最大气温、最小气温、地表土壤温度、降水量、平均风速、日照时数、总云量、低云量、平均水汽压、平均相对湿度。其中,地表土壤温度的完整观测由1959年开始。

3 结果与讨论

3.1 气温与土壤温度

1951~1990年,大理年平均气温有逐年减少的趋势,平均降低 0.14 $^{\circ}\text{C}/10$ a,而1991~2010年,大理增温趋势明显,平均增加 0.58 $^{\circ}\text{C}/10$ a。大理夏季(6~9月)在1951~2010年逐年增加,但增温

不明显, 仅平均增加 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$; 而冬季平均气温的变化趋势与年平均气温一致, 而且其变化更为剧烈, 尤其在 1991 年后, 增加值为 $0.95\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (图 1)。

丽江年平均气温在 1951~2010 年呈现增加的趋势, 但与 1951~1990 年比, 1991 年后的增加幅度更大, 为 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。大理夏季平均气温的变化趋势在 1951~2010 年没有明显变化, 均为缓慢增温。冬季平均气温与年平均气温的变化趋势一致。大理与丽江年平均气温的变化趋势有所差异, 前者先减少后增加, 后者始终逐年增加, 但是二者在 1991 年后均增温剧烈, 均在 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 以上 (图 2), 这一数值明显高于同时期中国平均升温幅度 (Wang et al., 2004)。

大理各月平均气温、最高气温和最低气温的变化趋势如图 3 所示。除了 1 月和 6 月有所增加之外, 其余各月在 1951~1990 年间均呈下降趋势, 其中 4 月的降温最为剧烈。1991 年后, 各月的平均气温、最高和最低气温均有所下降, 其中 12 月至 4 月的增温趋势更为显著, 且最低气温的增温幅度高于最高气温的, 而 5~9 月则正好相反。

丽江各月的平均气温、最高和最低气温在 1951~1990 年间增加或减少的趋势较小, 这与同期年平均气温增温幅度很小是一致的。1991 年以后, 月平均气温的增加可达到 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 冬季的增温幅度显著高于夏季的。另外, 最低气温的增加较少, 主要以最高气温的增加为主, 这种和大理的差异, 可能与丽江的气温较低有关 (图 4)。

图 5 和图 6 显示的是大理和丽江月最高、最低气温和月平均日较差的变化。大理月最高气温和最低气温的变化趋势与年平均气温相同, 都是先下降, 后以更大的幅度升温。丽江月最高气温的变化趋势与年平均气温相同, 1951~1991 年的增温幅度与 1991 年后的有明显差异, 而月最低气温则没有, 在 60 年间均以相对较小的幅度升温。另外, 大理和丽江月平均日较差没有明显的变化趋势。

大理和丽江年地表土壤温度的变化趋势与年平均气温的变化是一致的, 1991 年后大理、丽江土壤温度与年平均气温的增温幅度相近 (图 1、2、7)。大理和丽江气温和土壤温度多年平均的逐候变化如图 8 所示。两个站均为全年土壤温度高于气温。

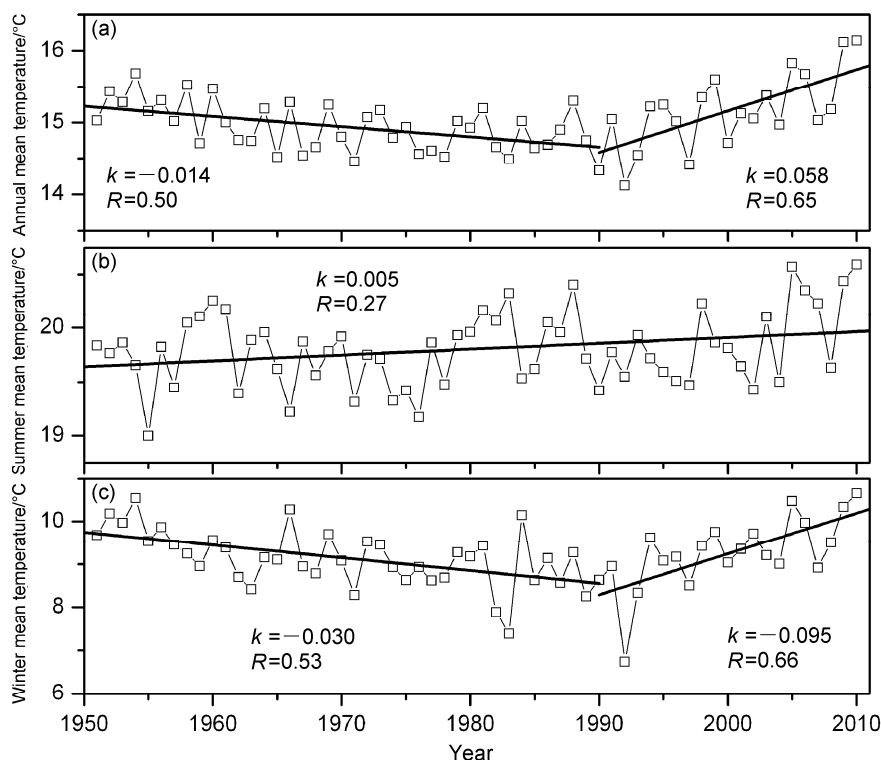


图 1 1951~2010 年大理 (a) 年平均气温、(b) 夏季平均气温和 (c) 冬季平均气温的变化趋势, 图中 k 为温度变化率 (单位: $^{\circ}\text{C}/\text{a}$), R 为拟合的相关系数

Fig. 1 (a) Annual mean temperature, (b) summertime mean temperature, and (c) wintertime mean temperature at Dali from 1951 to 2010, where k ($^{\circ}\text{C}/\text{a}$) is the increase rate of air temperature, and R is the correlation coefficient

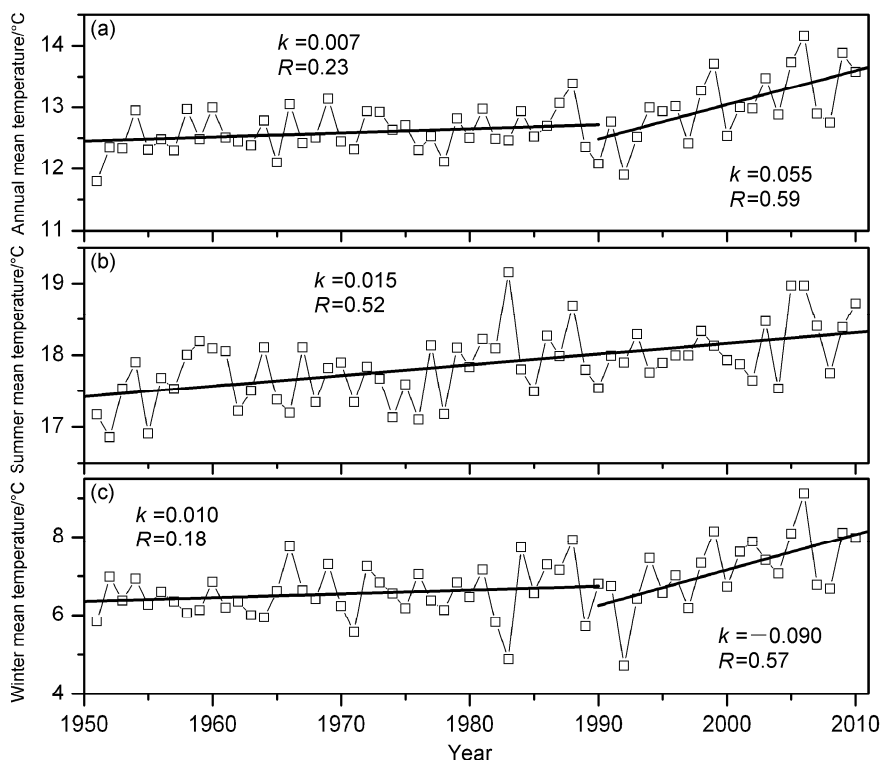
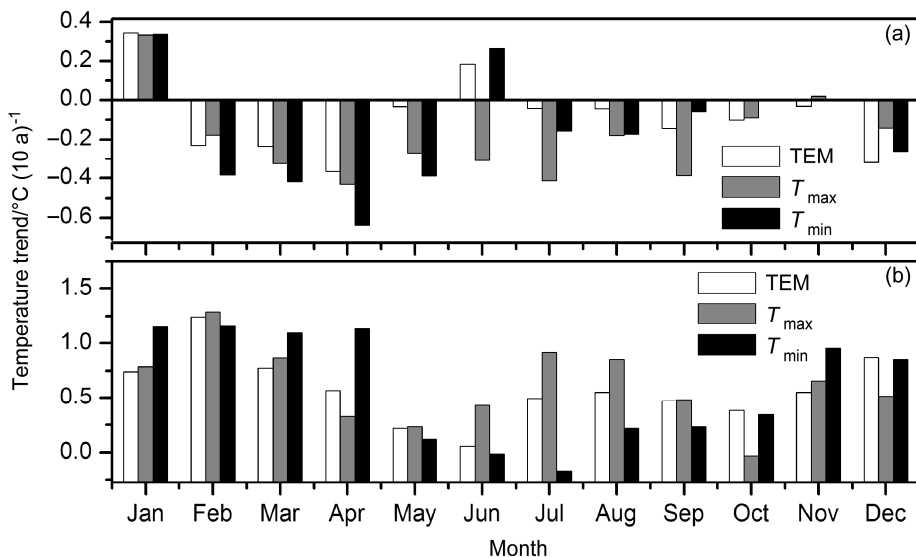


图2 同图1, 但为丽江情况

Fig. 2 Same as Fig. 1, but at Lijiang

图3 (a) 1951~1990 年和 (b) 1991~2010 年大理月平均气温 (TEM)、月最高温度 (T_{\max}) 和月最低温度 (T_{\min}) 逐月的历史变化趋势Fig. 3 Trends of monthly mean air temperature (TEM), monthly maximum air temperature (T_{\max}), and monthly minimum air temperature (T_{\min}) at Dali during (a) 1951~1990 and (b) 1991~2010

气温和土壤温度的差异在夏季较大, 冬季较小, 其中大理站冬季气温和土壤温度的差异很小。

3.2 降水量

大理和丽江的多年平均年降水量 (1951~2010 年) 分别为 1066.1 mm 和 964.8 mm。两个站的年降

水量在 1951~2010 年并无明显增加或减小的趋势 (图 9)。通常, 将降水大于多年平均降水量的时段定义为雨季 (肖滂等, 2013)。大理和丽江地区分别第 28 候和第 30 候进入雨季, 即 5 月中旬和 5 月底。这说明横断山脉东部春季存在季节性的干旱

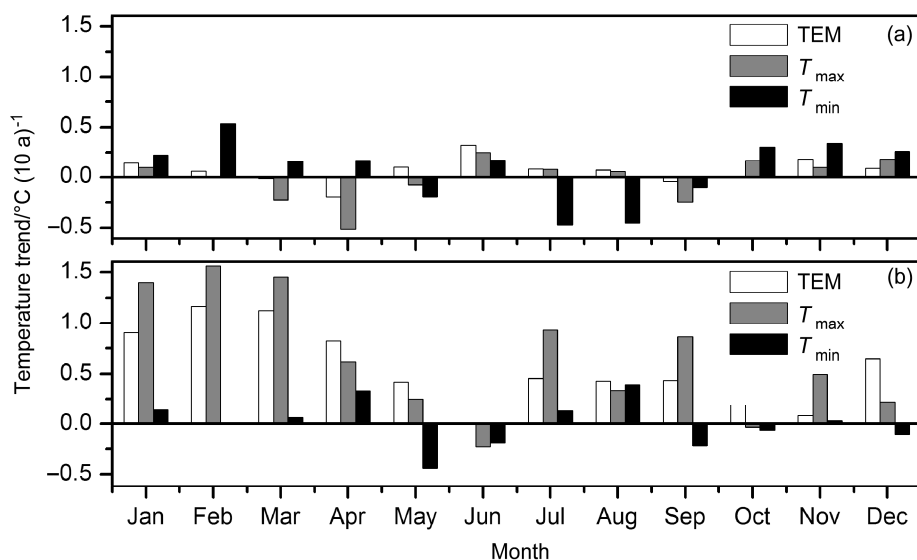


图 4 同图 3, 但为丽江情况
 Fig. 4 Same as Fig. 3, but at Lijiang

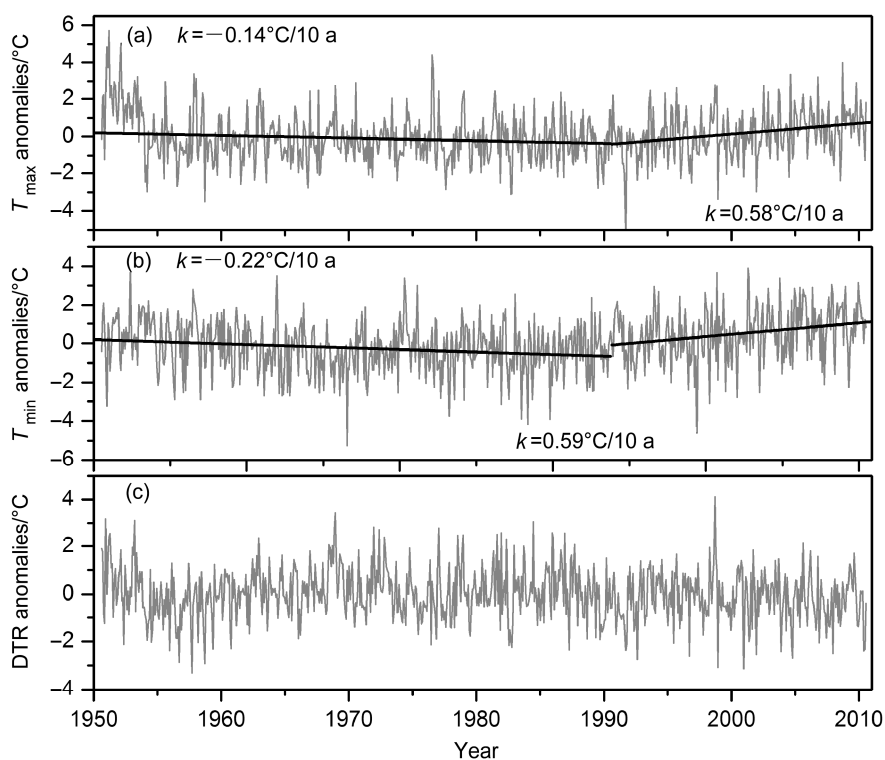


图 5 1951~2010 年大理 (a) 月平均最高气温、(b) 月平均最低气温和 (c) 月平均的气温日较差 (DTR) 的逐月变化
 Fig. 5 (a) Monthly maximum air temperature, (b) monthly minimum air temperature, and (c) diurnal temperature range (DTR) at Dali from 1951 to 2010

(Li et al., 2011)。两地雨季分别在第 61 和 57 候结束。大理和丽江的雨季分别持续约 5.5 月和 4.5 月。大理有两个降水峰值时期, 进入雨季迅速增加, 在第 33 候即 6 月中旬达到第一个峰值, 之后降水量减少, 直至第 45 候迎来第二个降水峰值时

期。丽江全年只有一个降水峰值, 出现在第 42 候左右, 即 7 月底。与横断山脉西部地区相比, 地处横断山脉东部地区的大理、丽江降水量的季节分布明显不同, 雨季开始的时间较晚, 持续时间更短(肖潺等, 2013)。

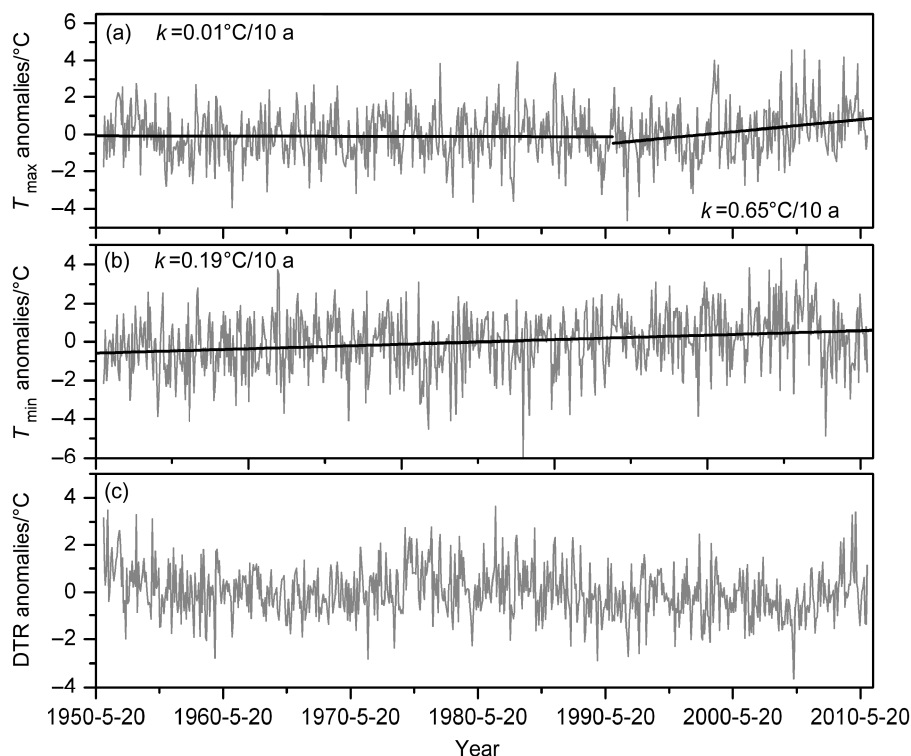
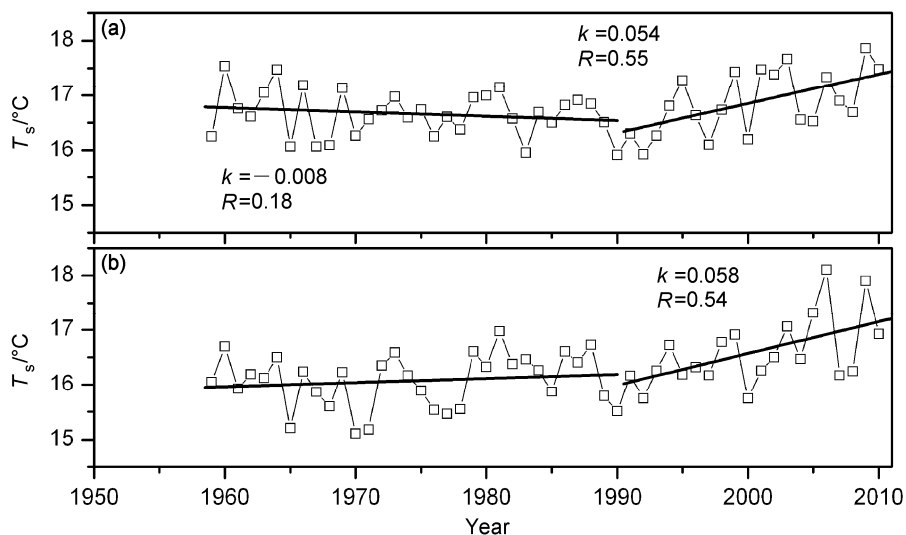


图6 同图5, 但为丽江情况

Fig. 6 Same as Fig. 5, but at Lijiang

图7 1959~2010年(a)大理和(b)丽江年平均土壤温度(T_s , 0 cm)的变化Fig. 7 Annual mean soil temperature (T_s , 0 cm) at (a) Dali and (b) Lijiang from 1959 to 2010

大理和丽江全年有接近 40% 的天数出现降水, 在 5~10 月, 大理的这一比例达到了 50% 以上, 而丽江则达到了接近 60%。另外, 丽江日降水量超过 30 mm 的天数的比例少于大理的, 这说明与大理相比, 丽江的降水分布更为均匀。

3.3 风速、日照时数和云量

大理和丽江年平均风速在 20 世纪 80 年代以后均存在明显减小的趋势, 减小速率分别为 $0.16 \text{ m s}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $0.46 \text{ m s}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$ (图 13)。丽江站年平均风速减小的更多, 原因是丽江站地处城区,

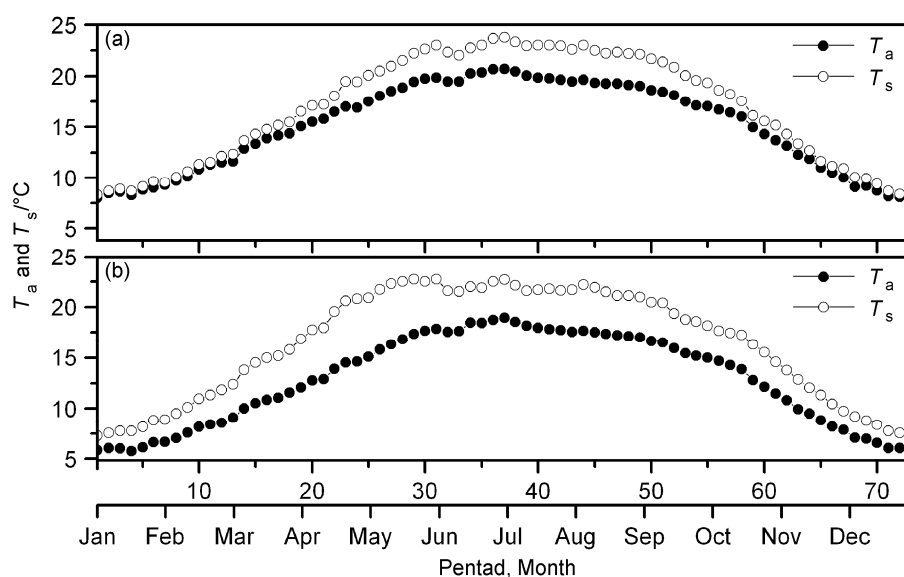


图 8 1951~2010 年 (a) 大理和 (b) 丽江气温 (T_a) 和土壤温度 (T_s) 平均的逐候季节变化

Fig. 8 Seasonal variations of pentadic mean air temperature (T_a) and soil temperature (T_s) from 1951 to 2010 at (a) Dali and (b) Lijiang

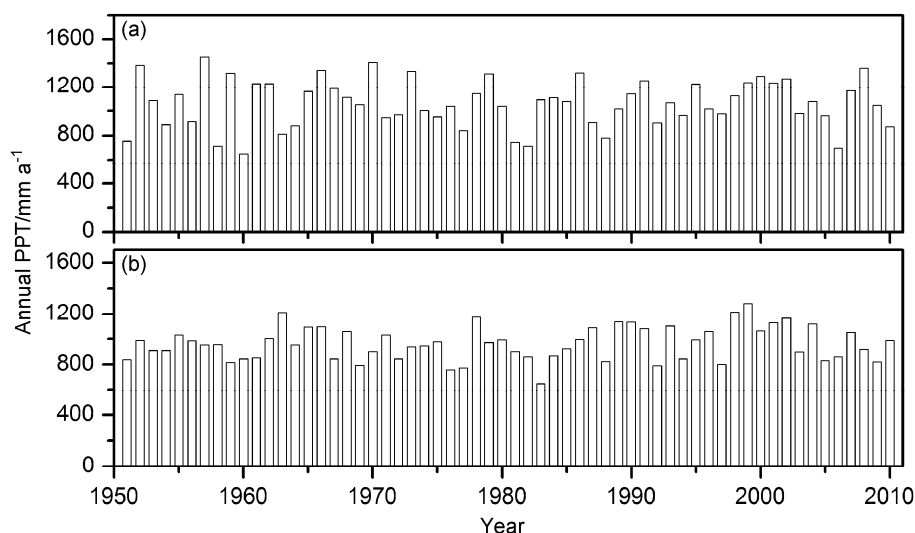


图 9 1951~2010 年 (a) 大理和 (b) 丽江年总降水量 (PPT) 的变化

Fig. 9 Changes in annual total precipitation (PPT) at (a) Dali and (b) Lijiang from 1951 to 2010

当地旅游热带来的城市化建设造成丽江城区面积急剧扩大, 城市冠层的地表粗糙度增大, 而大理站为农田和少量建筑物所围绕, 其周围环境改变相对较小。

大理和丽江站的日照时数在雨季较少, 最低在 $20 \sim 25 \text{ h (5 d)}^{-1}$, 干季日照时数, 最高在 40 h (5 d)^{-1} 左右。与此对应, 总云量和低云量在雨季较大, 干季较少。大致上, 丽江的日照时数、总云量和低云量均大于大理的 (图 14)。

3.4 降水量的控制因子

基于多年平均的逐候数据, 降水量随着日照时数的增加而减少, 随着云量的增加而增加, 并且主

要受到低云量的控制 (图 15a、15b、15c)。降水量随着风速的增加而减少 (15d), 这与横断山脉西部迎风坡的降水随着西南风的增强而迎来降水峰值时期正好相反 (肖潺等, 2013), 这说明横断山脉西部的降水受到地形的作用较少。另外, 水汽压和相对湿度均随着降水量的增加而增加 (图 16)。

4 结论

1951~2010 年, 以 1990 年为界, 大理的年均气温呈现先下降后升高的趋势 (-0.14 和 $0.58 \text{ }^{\circ}\text{C/10 a}$),

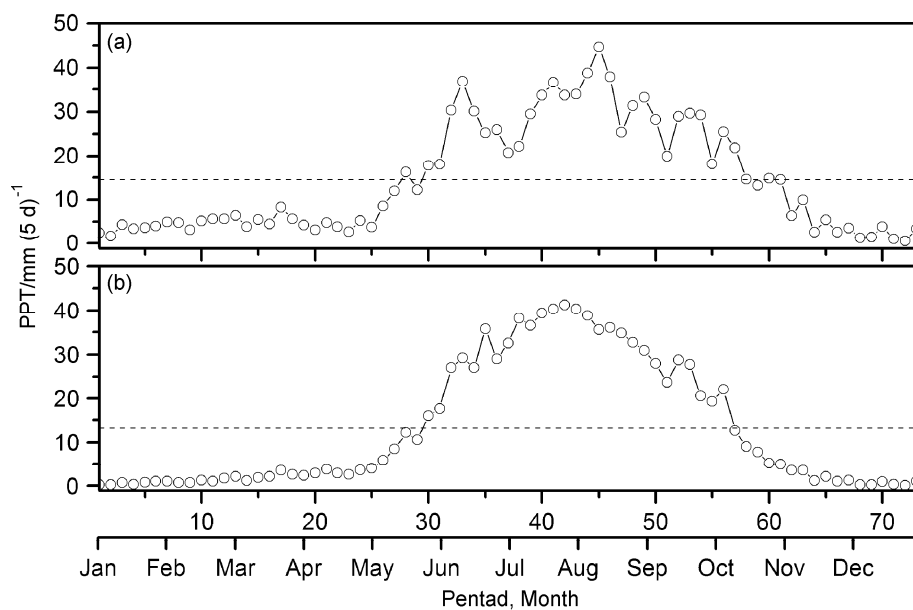


图 10 1951~2010 年 (a) 大理和 (b) 丽江降水量平均的逐候季节变化, 图中虚线位置是多年平均降水量

Fig. 10 Seasonal variations of pentadic total precipitation from 1951 to 2010 at (a) Dali and (b) Lijiang. The dashed line represents multi-year mean precipitation

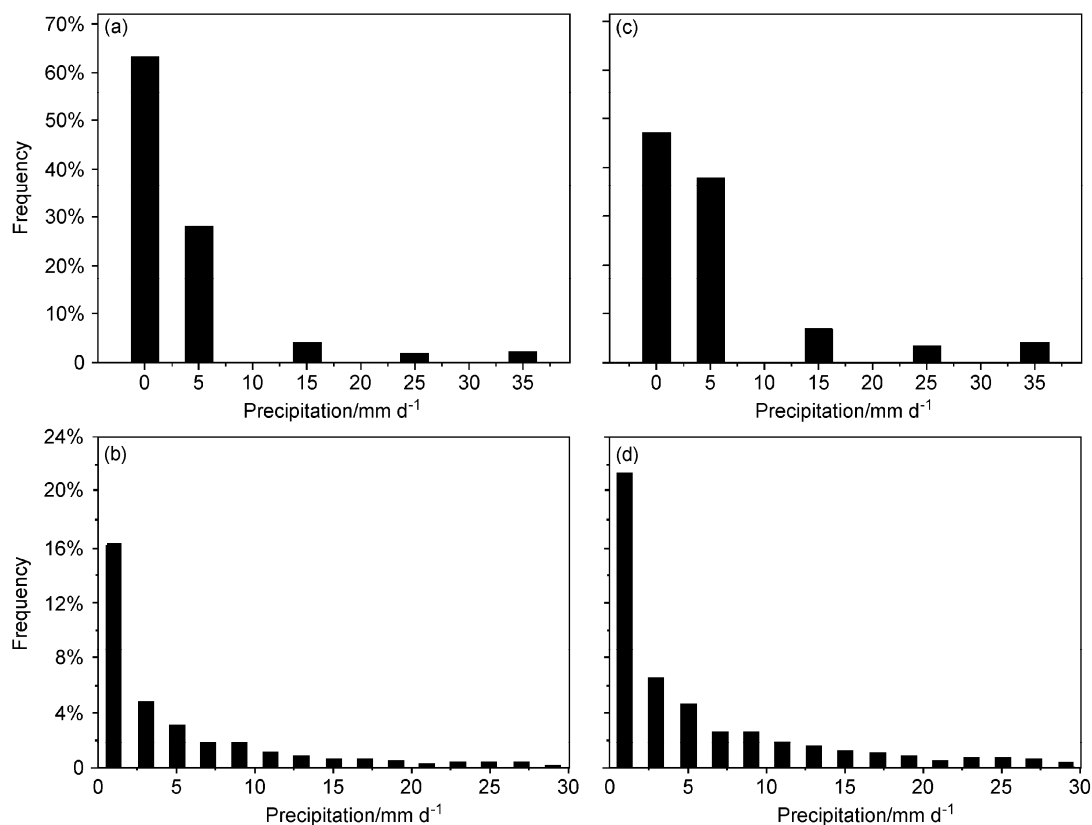


图 11 1951~2010 年大理 (a, b) 全年日降水量和 (c, d) 5~10 月日降水量的频率分布: (a, c) 日降水以 10 mm 为一格点; (b, d) 日降水以 2 mm 为一格点

Fig. 11 Frequency distribution of daily precipitation (a, b) for the whole year and (c, d) from May to October at Dali from 1951 to 2010: (a, c) With a precipitation bins of 10 mm; (b, d) with a precipitation bins of 2 mm

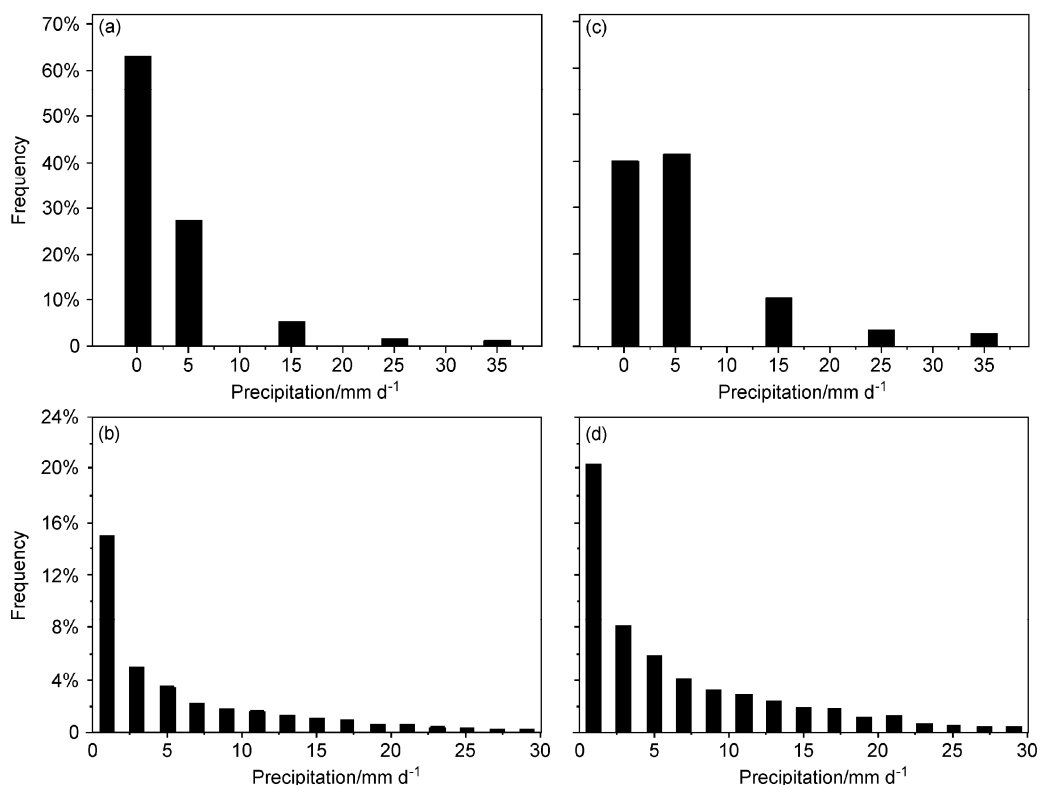


图 12 同图 11，但为丽江
 Fig. 12 Same as Fig. 11, but at Lijiang

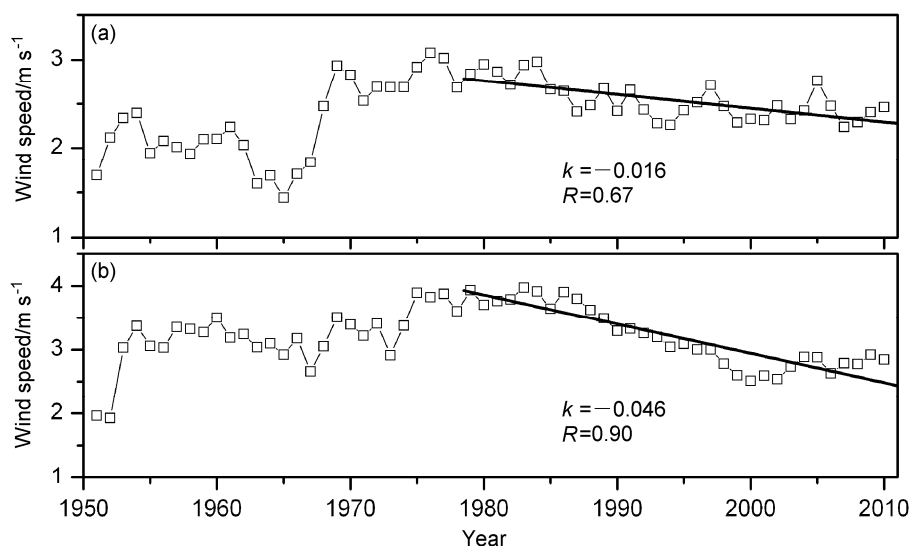


图 13 1951~2010 年 (a) 大理和 (b) 丽江年平均风速的逐年变化
 Fig. 13 Annual mean wind speeds from 1951 to 2010 at (a) Dali and (b) Lijiang, where slope is the increase rate of wind speed ($\text{m s}^{-1} \text{a}^{-1}$), and R is the correlation coefficient

丽江在 1990 年以后有加速增温的趋势 (0.07 和 $0.55 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$)。年均气温的气候变化特征与冬季平均气温的变化趋势是一致的，且冬季的增温强度更强，而夏季的增温强度较小。1991~2010 年月尺度

上，丽江 T_{max} 的升温强度明显高于 T_{min} 升温强度；而大理并无此差异。大理丽江年及各季节降水量没有明显增加或减少的趋势。大理雨季为 5 月 16 日至 10 月 27 日，丽江雨季为 5 月 26 日至 10 月 7 日，

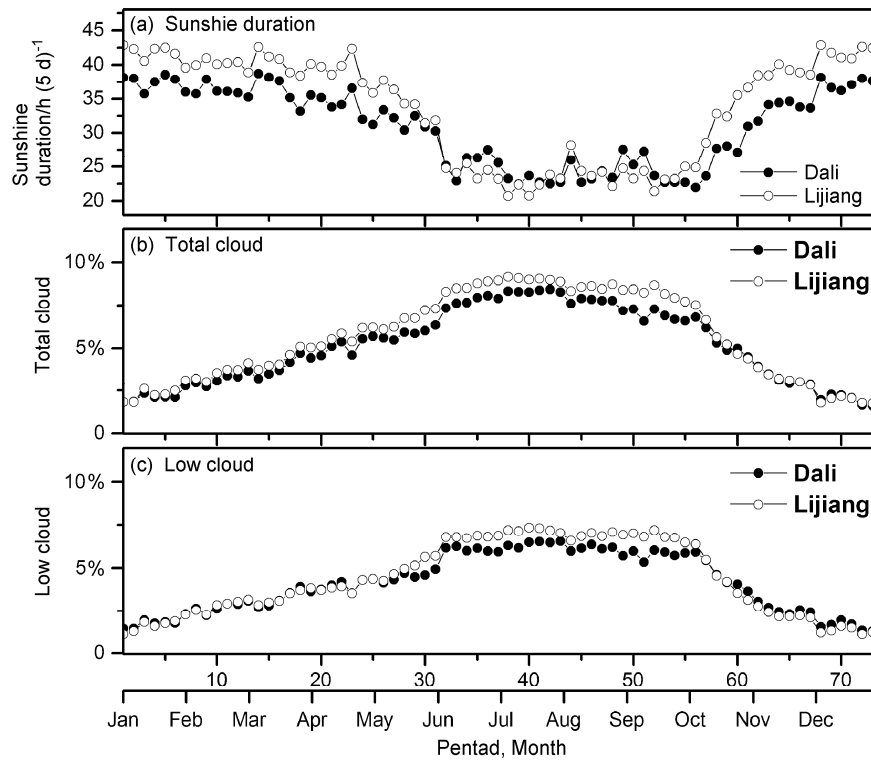


图 14 1951~2010 年大理和丽江 (a) 日照时数、(b) 总云量和 (c) 低云量平均的逐候季节变化

Fig. 14 Seasonal variations of pentadic (a) sunshine duration, (b) total cloud, and (c) low cloud averaged from 1951 to 2010 at Dali and Lijiang

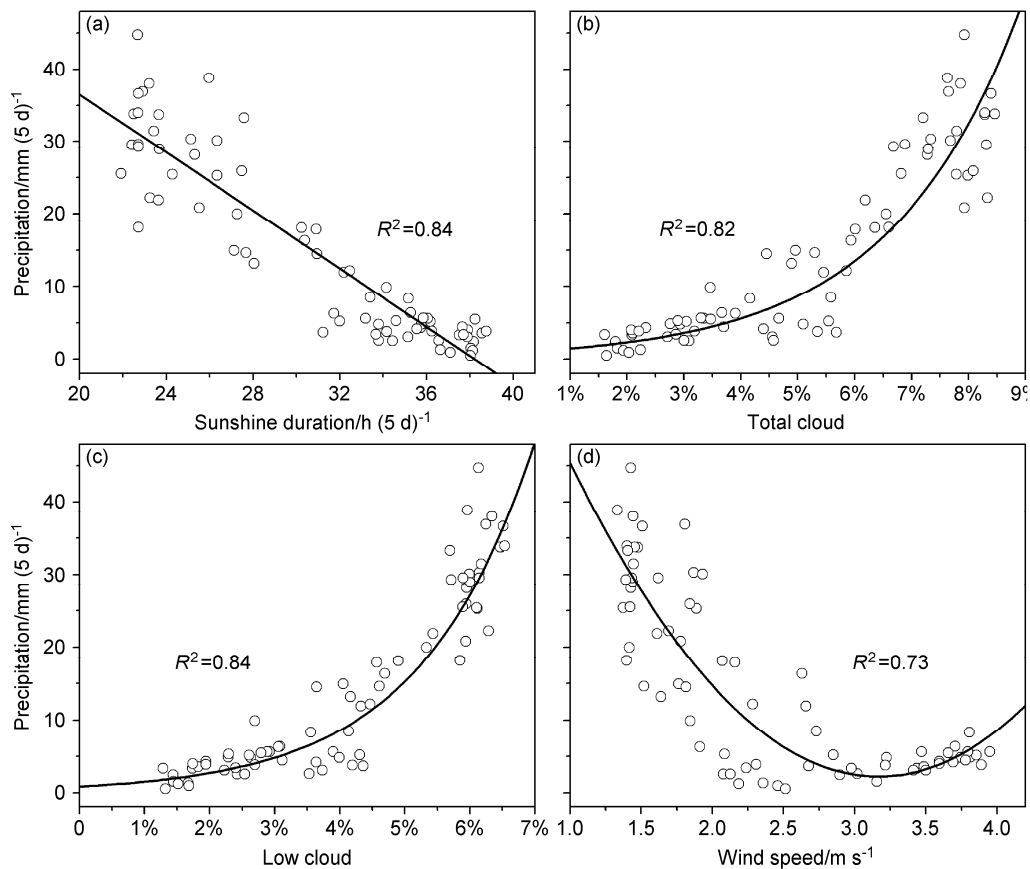


图 15 1951~2010 年平均的逐候降水量和 (a) 日照时数、(b) 总云量、(c) 低云量和 (d) 风速的关系。 R^2 为物理量之间的决定系数

Fig. 15 Relationship between pentadic precipitation and (a) sunshine duration, (b) total cloud, (c) low cloud, and (d) wind speed averaged from 1951 to 2010.

R^2 is the determination coefficient between variables

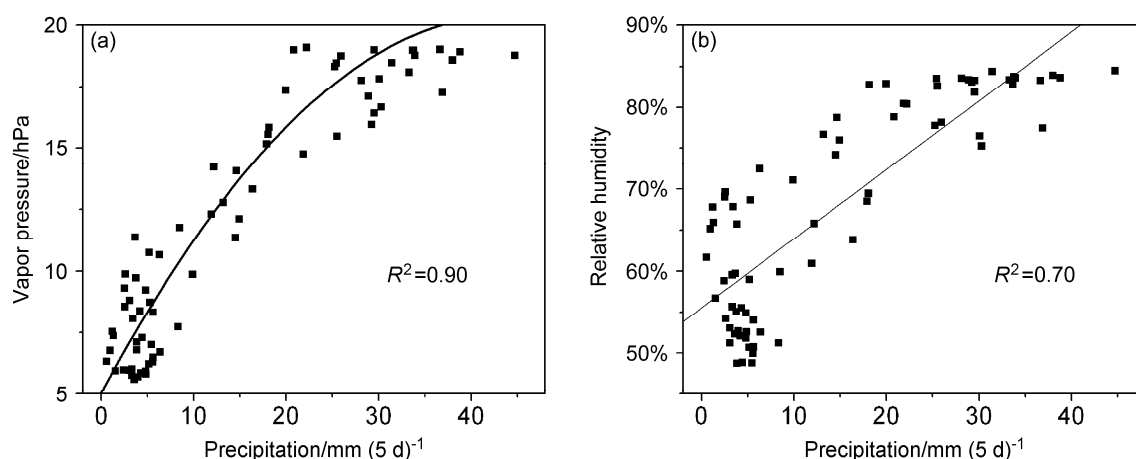


图 16 1951~2010 年平均的逐候 (a) 水汽压、(b) 相对湿度和降水量的关系。 R^2 为物理量之间的决定系数

Fig. 16 Relationship of pentadic (a) vapor pressure and (b) relative humidity with precipitation averaged from 1951 to 2010. R^2 is the determination coefficient between variables

大理雨季比丽江的约长 30 d。20 世纪 80 年代以后, 丽江年平均风速的减小强度明显大于大理, 这与丽江站地处城区, 城市化剧烈, 而大理站周围是农田有关。日照时数与云量呈反相的季节变化, 降水量的多年平均的逐候变化与日照时数、总云量、尤其是低云云量相关, 随风速增大而减小。

参考文献 (References)

- Beniston M, Rebetez M. 1996. Regional behavior of minimum temperatures in Switzerland for the period 1979–1993 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 53: 231–243, doi:10.1007/BF00871739.
- Fan Z X, Bräuning A, Thomas A, et al. 2011. Spatial and temporal temperature trends on the Yunnan Plateau (Southwest China) during 1961–2004 [J]. *International Journal of Climatology*, 31: 2078–2090, doi:10.1002/joc.2214.
- Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. 2006. Global temperature change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103 (39): 14288–14293, doi:10.1073/pnas.0606291103.
- 何元庆, 章典. 2004. 气候变暖是玉龙雪山冰川退缩的主要原因[J]. *冰川冻土*, 26: 230–231. He Yuanqing, Zhang Dian. 2004. Climatic warming is the major reason for glacier retreat on Mt. Yulong, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 26: 230–231, doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2004.02.020.
- IPCC. 2007. Summary for policymakers [C]// Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1–18.
- Li J, Yu R C, Yuan W H, et al. 2011. Early spring dry spell in the southeastern margin of the Tibetan plateau [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 89 (1): 1–13.
- Liu X D, Yin Z Y, Shao X M, et al. 2006. Temporal trends and variability of daily maximum and minimum, extreme temperature events, and growing season length over the eastern and central Tibetan Plateau during 1961–2003 [J]. *J. Geophys. Res.*, 111: D19109, doi:10.1029/2005JD006915.
- 鲁亚斌, 解明恩, 范波, 等. 2008. 春季高原东南角多雨中心的气候特征及水汽输送分析 [J]. *高原气象*, 27 (6): 1189–1194. Lu Yabin, Xie Ming'en, Fan Bo, et al. 2008. Analyses on climatic features and water vapour transportation of rainy center in southeast corner of Qinghai–Tibetan Plateau in Spring [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (6): 1189–1194.
- Saito M, Kato T, Tang Y H. 2009. Temperature controls ecosystem CO_2 exchange of an alpine meadow on the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Global Change Biology*, 15: 221–228, doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01713.x.
- Wang S W, Zhu J H, Cai J N. 2004. Interdecadal variability of temperature and precipitation in China since 1880 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21 (3): 307–313, doi:10.1007/BF02915560.
- 肖潺, 宇如聪, 原韦华, 等. 2013. 横断山脉中西部降水的季节演变特征 [J]. *气象学报*, 71 (4): 643–651. Xiao Chan, Yu Rucong, Yuan Weihua, et al. 2013. Characteristics of the seasonal evolution of precipitation over the central western part of the Hengduan Mountain [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 71 (4): 643–651, doi:10.11676/qxxb2013.054.
- 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 2002. 青藏高原-季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系 [J]. *气象学报*, 60: 257–267. Xu Xiangde, Tao Shiyan, Wang Jizhi, et al. 2002. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau-Monsoon “Large Triangle” affecting region and drought-flood abnormality of China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 60: 257–267, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2002.03.001.