

气候变化背景下中国农业气候资源变化 II. 西南地区农业气候资源时空变化特征*

代姝玮¹ 杨晓光^{1**} 赵孟² 李勇^{1,3} 王文峰^{1,4} 刘志娟¹

(¹ 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; ² 贵州省桐梓县气象局, 贵州桐梓 563200; ³ 贵州省气象局科技减灾处, 贵阳 550002; ⁴ 国家气象中心, 北京 100081)

摘要 基于1961—2007年中国西南地区88个气象站的地面观测资料, 结合统计方法和GIS软件, 分析了全年及温度生长期内农业气候资源的时空变化特征. 结果表明: 1961—2007年, 西南地区年平均气温呈上升趋势, 平均增速为 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$; 温度生长期内 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温均呈增加趋势, 平均增速分别为 $55.3\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 和 $37\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$. 全区年日照时数呈现由西向东逐渐减少的特征, 且东部的减少趋势较西部更显著; 温度生长期内日照时数整体呈增加趋势, 但空间差异较大. 全区降水资源总体减少, 年降水量和温度生长期内降水量的平均下降速率分别为 $10\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 和 $8\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$. 全区年参考作物蒸散量普遍降低, 其减幅小于年降水量的变化趋势, 约53%的站点温度生长期内参考作物蒸散量减少.

关键词 西南地区 农业气候资源 气候倾向率

文章编号 1001-9332(2011)02-0442-11 **中图分类号** S162.3 **文献标识码** A

Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change. II. Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in Southwest China. DAI Shu-wei¹, YANG Xiao-guang¹, ZHAO Meng², LI Yong^{1,3}, WANG Wen-feng^{1,4}, LIU Zhi-juan¹ (¹College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; ²Tongzi County Meteorological Bureau in Guizhou Province, Tongzi 563200, Guizhou, China; ³Division of Technology and Disaster Reduction, Guizhou Meteorological Bureau, Guiyang 550002, China; ⁴National Meteorological Center, Beijing 100081, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(2): 442-452.

Abstract: Based on the 1961-2007 ground observation data from 88 meteorological stations in Southwest China, and by using statistical methods and GIS software, this paper analyzed the spatio-temporal change characteristics of agricultural climate resources in this region in the whole year and during temperature-defined growth period. In 1961-2007, the annual mean temperature in the region showed an increasing trend, with the increment averaged $0.18\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$. The $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature during temperature-defined growth period also showed an increasing trend, with the increment averaged $55.3\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ and $37\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$, respectively. The annual sunshine hours decreased gradually from west to east, and the decreasing trend was more significant in eastern than in western region. The sunshine hours during temperature-defined growth period showed an overall increasing trend, and the spatial difference was great. The precipitation resource had an overall decrease, with the decrement in whole year and during temperature-defined growth period averaged $10\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ and $8\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$, respectively. The annual reference crop evapotranspiration generally decreased, but the decrement was less than that of annual precipitation. The reference crop evapotranspiration during temperature-defined growth period within about 53% meteorological stations decreased.

Key words: Southwest China; agricultural climate resource; climatic trend rate.

* 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951502)、国家科技基础性工作专项(2007FY120100)和公益性行业(农业)科研专项(200903003)资助.

** 通讯作者. E-mail: yangxg@cau.edu.cn

2010-09-13 收稿, 2010-11-19 接受.

全球气候变化对陆地生态系统、粮食生产和社会经济发展等产生了重大影响,已成为国际社会普遍关注的重大问题之一^[1-2]. IPCC 第四次评估报告指出,1906—2005 年全球平均气温升高了 $0.56\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.92\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1956—2005 年全球气温增速为 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ^[3]. 我国是全球气候变暖最显著的国家之一,近 50 a 的增温尤其明显,且温度升高主要发生在 20 世纪 80 年代中期^[4-5]. 在全球气候变暖背景下,各国科学家及政府部门对气候变化可能引起的环境和生态问题给予了极大关注^[6-7].

农业气候资源是农业自然资源的重要组成部分,是农业生产的基本环境条件和物质能源,直接影响农业生产过程,并在一定程度上决定了一个地区农业生产结构和布局、作物种类和品种、种植方式、栽培管理措施和耕作制度等,最终影响农业产量的高低和农产品质量的优劣^[8-9]. 赵汝植^[10] 研究认为,西南地区热量丰富,雨热同期,农业气候资源复杂多样,地域差异大;马振锋等^[11] 研究表明,20 世纪后 40 a,川西高原、云贵高原气温上升、降水增加、湿度增大的趋势明显,而在四川盆地东北部和西南部则存在明显的降温趋势;刘晓冉等^[12] 分析 1961—2000 年西南地区年均气温变化趋势的空间分布特征发现,除四川盆地东部、大凉山地区有下降趋势外,其他地区年均气温均呈上升趋势,其中,西部高原地区气温上升较快,中心地区的气温倾向率达 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$;董谢琼和段旭^[13] 分析 1951—1995 年西南地区降水量的气候特征及变化趋势认为,该区降水量分布受地形影响较大,空间分布不均,局地差异大,年降水量分布由东南向西北减少,变率多在 10%~20%,年降水量的减少趋势强于增加趋势. 迄今,针对中国西南地区农业气候资源的研究并不多,且多集中于气候资源分布特征的分析,关于气候变化背景下西南地区农业气候资源时空变化特征的研究尚鲜有报道. 因此,本研究基于我国西南地区 88 个气象台站 1961—2007 年的地面观测资料,结合全球气候变化特征将 1961—2007 年划分为 1961—1980 年(时段 I)和 1981—2007 年(时段 II)两个时段^[14],比较分析了研究区域内热量、日照、降水和参考作物蒸散量等农业气候资源的空间分布特征及时间变化趋势,以期制定农业生产应对气候变化的策略提供科学参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

我国西南地区 ($21^{\circ}08' \sim 34^{\circ}19' \text{ N}$, $97^{\circ}31' \sim$

$110^{\circ}12' \text{ E}$) 包括云南、贵州、四川和重庆四省(市),云贵高原、横断山区和四川盆地等构成了其大陆地貌的主要特征,是世界上地形最复杂的区域之一,其西北依青藏高原、北接黄土高原、东邻我国东部低山丘陵平原、西南毗邻缅甸^[15-16]. 该区跨越 13 个纬度,生态系统丰富;地势特征为北高南低,西高东低(图 1);山地立体气候显著,山麓河谷为热带或亚热带气候,山腰为温带气候,山顶为寒带气候^[16-17]. 全区年均气温在 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$,热量丰富,冬暖突出,年降水量 $600 \sim 1800\text{ mm}$,降水集中于夏半年,雨热同季的特点对水稻和玉米等作物的生长极为有利. 该区光能资源较少,且时空分布差异大,太阳总辐射量以四川盆地、贵州高原最少,川西及云南高原最多. 西南地区粮食作物以水稻和玉米为主,其次是小麦和薯类^[18].

1.2 数据来源

本文所用数据来自本研究组已建立的气候资料库,包括云南、贵州、四川和重庆四省(市)88 个气象台站(图 1) 1961—2007 年地面观测的逐日气象资料,气候要素包括平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、平均风速和平均相对湿度.

1.3 研究方法

1.3.1 稳定通过界限温度起止日期的确定 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是喜温作物生长的起始温度,也是喜凉作物迅速生长、多年生作物开始以较快速度积累干物质的温度. 日均气温稳定通过 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时期是越冬作物生长活跃期和喜温作物生长活动期,因此,本文以 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数作为喜温作物的温度生长期(文中简称为温度生长期)^[19]. 热带喜温作物分布区域的气候条件通常采用 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温^[20]. 本文采用 5 日滑动平均法计算稳定通过界限温度的起止日期.

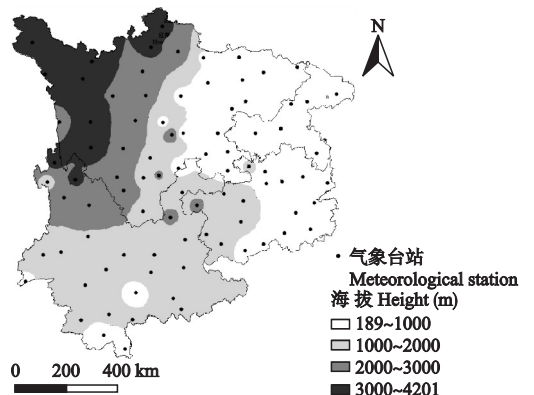


图 1 西南地区气象台站及其海拔分布

Fig. 1 Meteorological stations and height distribution in Southwest China.

1.3.2 参考作物蒸散量 参考作物蒸散量(ET_0)指假设平坦地面被特定低矮绿色植物(高0.12 m,地面反射率为0.23)全部覆盖、土壤水分充分情况下的蒸散量.本文采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的Penman-Monteith公式计算 ET_0 ^[21].

1.3.3 气候倾向率 采用最小二乘法计算气候要素的变化趋势,用 x_i 表示样本量为 n 的某一气候变量,用 t_i 表示 x_i 所对应的时间,建立 x_i 与 t_i 之间的一元线性回归方程:

$$x_i = at_i + b \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: a 为线性回归系数; b 为线性回归常数.以 a 的10倍作为气候要素倾向率^[22],表示气候要素每10 a的变化速率.

1.3.4 气温垂直递减法 研究表明,气温的空间分布主要受经度、纬度、地形条件、海拔高度和下垫面等因素影响^[23].由于西南地区海拔高度差异大,对该区温度要素进行空间插值时需做海拔高度的订正.本文采用气温垂直递减法进行订正,即在对流层范围内,气温随海拔的升高而降低,海拔每升高100 m,气温平均降低0.65℃.根据气温的垂直变化规律,首先将不同经纬度和海拔高度的气温值根据海拔高程和气温垂直递减率投影到虚拟海平面上^[24],即:

$$T_0 = T_h + 0.0065h \quad (2)$$

式中: T_h 为某点的实测气温(℃); T_0 为某点对应(相同的经纬度)在虚拟海平面上的气温(℃); h 为气象站的海拔高度(m).

对虚拟海平面上的气温值按要求的格网大小进行内插和栅格化,因为在同一水准面上气温的变化被认为是连续的.最后,用虚拟海平面上的栅格气温

减去因海拔升高而降低的气温差得到实际地面的气温值.

1.4 数据处理

采用反距离权重插值方法(inverse distance weighted interpolation, IDW)对88个气象台站的上述气象数据进行插值,设定的cell size参数均为0.002,生成空间栅格数据,然后根据指标要求,使用GIS软件中的Spatial Analyst工具计算各农业气候要素特定值的区域面积,相应区域界限的地理位移使用软件中的测量工具来度量,取其平均值,最后输出各要素空间分布及其气候倾向率的地理图.

2 结果与分析

2.1 西南地区热量资源的变化特征

2.1.1 年平均气温的变化特征 由图2可以看出,西南地区年平均气温具有明显的区域性特征,西部高原(云南省西部和四川省西部)主要受纬度影响,表现为由南向北递减的纬向分布特征,北部地区(包括四川省北部和重庆市)主要受地形影响,表现为由东向西递减的经向带状分布特征.时段I和II内全区年平均气温分别为-1.6℃~23.7℃和-1.0℃~23.8℃;时段II的多年平均气温较时段I升高了0.3℃,其中最低值升高了0.6℃.1961—2007年,全区年平均气温气候倾向率在-0.06℃·(10 a)⁻¹~0.83℃·(10 a)⁻¹,平均增速0.18℃·(10 a)⁻¹,约94%的站点呈升温趋势,增温速率与1958—1999年华南沿海的增温速率接近^[25],且略高于1960—2002年长江中下游地区的增温速率^[26],比1961—2005年华东地区的增温速率[0.21℃·

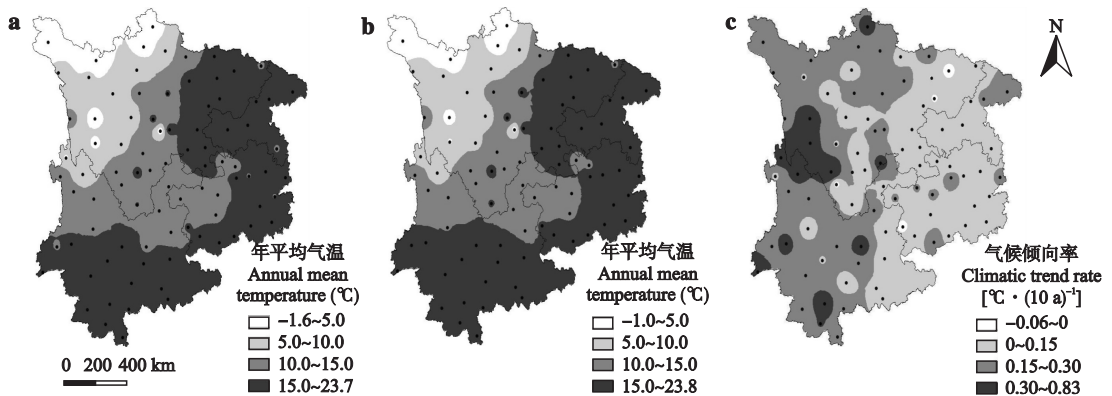


图2 西南地区年平均气温及其气候倾向率的分布

Fig. 2 Distribution of annual mean temperature and its climatic trend rate in Southwest China.

a) 1961—1980; b) 1981—2007; c) 1961—2007. 下同 The same below.

(10 a^{-1}) 略低^[27]. 班军梅等^[28]认为, 西南地区存在降温趋势, 与本研究结果不一致, 原因在于所用资料的年代存在差异, 且所选取的研究区域和站点不同. 西南地区年平均气温的气候倾向率总体呈明显的经向带状分布, 西部高于东部, 南北差异不大, 这与我国其他区域气温北高南低的分布特征^[29]不同, 主要与该区西高东低的地形分布有关. 有研究认为, 四川盆地东部和云贵高原北部为降温区^[30-31], 但 1961—2007 年间该区的降温趋势有所减弱, 仅巴中、盐源、越西、盘县和屏边 5 个站点的年平均气温呈降低趋势. 年平均气温气候倾向率低值区 [$<0.15\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$] 主要分布在贵州和重庆两省(市)的大部地区以及四川和云南两省的东部地区, 最低值出现在四川省巴中; 高值区 [$\geq 0.30\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$] 主要分布在四川省西南部和云南省部分地区, 最高值出现在四川省木里.

2.1.2 温度生长期内 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的变化特征

1961—2007 年, 西南地区稳定通过 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 期间, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温与年平均气温的空间分布特征相同, 均表现为由东南向西北递减的趋势(图 3 I), 这与我国整个南方地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的空间分布特征类似^[32]. 西南地区温度生长期内 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温在时段 I 和时

段 II 分别为 $69\sim 8665\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 和 $83\sim 8704\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 其中最低值均出现在四川省石渠, 最高值均出现在云南省元江. 与时段 I 相比, 时段 II $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的最低值升高了 $14\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 最高值升高了 $39\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 平均值升高了 $98\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$. 研究期间, 西南地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的气候倾向率在 $-61\sim 289\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的平均增速为 $55.3\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$, 比 20 世纪 50 年代至 2007 年我国整个南方地区的增速 [$52.7\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$] 略高^[32], 但比华东地区 1961—2005 年的增速 [$70.1\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$] 低^[27]. 研究期间, 除云南省的屏边、沾益、昭通和贵州省的盘县、桐梓以及四川省的盐源、巴中和红原站点外, 研究区约 85% 的站点温度生长期内 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温呈增加趋势. $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温气候倾向率的低值区 [$<40\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$] 主要分布在贵州省北部、云南省东部、重庆市的西部和南部以及四川省的东部和西北部地区, 最低值出现在四川省盐源; 高值区 [$\geq 90\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$] 主要分布在云南省的大部地区(德钦、思茅、昆明、保山、楚雄、江城、腾冲和瑞丽等)和四川省的少数地区(木里、雷波和广元等), 最高值出现在四川省木里. 云贵高原稻区对 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的热量需求为 $3500\sim 4500\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ^[20]. 1961—

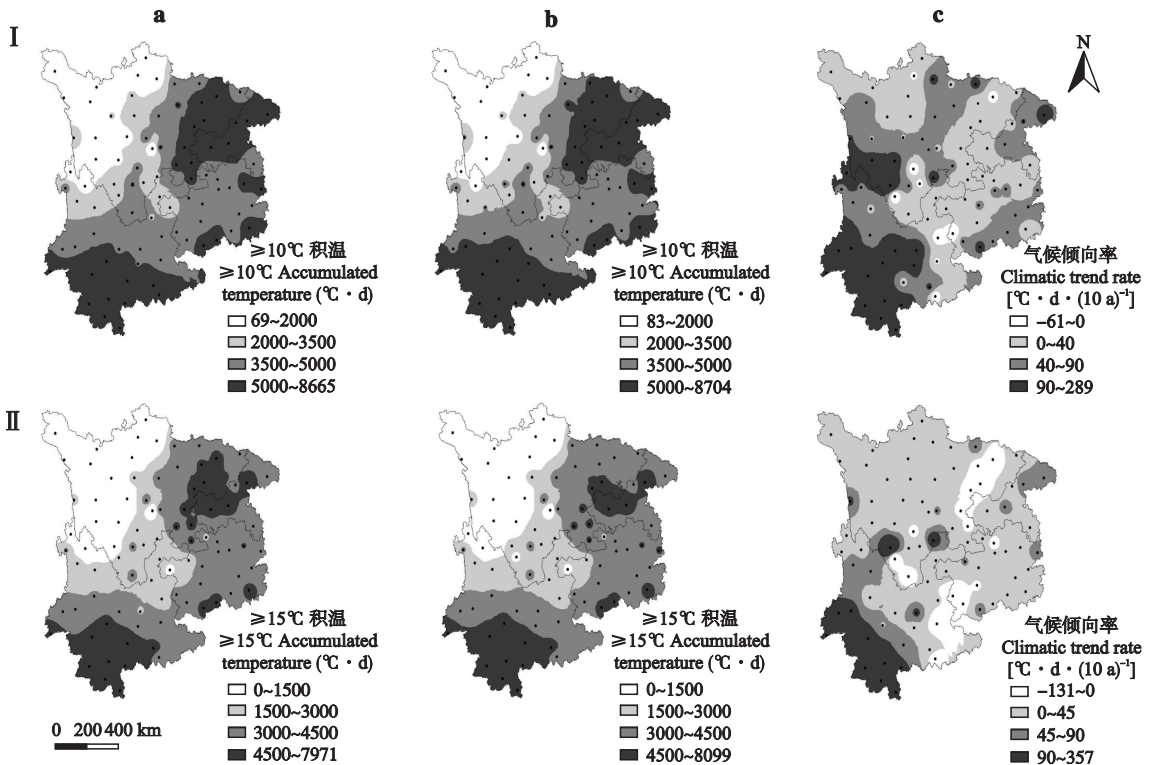


图 3 西南地区温度生长期内 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (I) 和 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (II) 积温及其气候倾向率的分布

Fig. 3 Distribution of $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (I) and $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (II) accumulated temperature and their climatic trend rates during temperature-defined growth period in Southwest China.

2007年,西南地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 $< 3500\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的区域向西推移约 0.04° ,面积减少约 $1.3\times 10^4\text{ km}^2$; $3500\sim 4500\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温带的区域面积减少约 $0.3\times 10^4\text{ km}^2$. $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的增加为种植对热量要求较高的作物品种提供了有利条件,并使晚熟作物品种的种植界限北移,在相同栽培管理条件下可提高作物产量^[29].

2.1.3 温度生长期 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的变化特征

1961—2007年,西南地区稳定通过 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 期间, $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的空间分布特征明显,由西北向东南逐渐升高(图3 II). 研究区时段 I 和时段 II 内 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温分别为 $0\sim 7971\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 和 $0\sim 8099\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,平均值分别为 $3211\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 和 $3269\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$. 研究期间,该区稳定通过 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的年持续日数均未超过 100 d 的地区主要分布在四川省西部以及云南、贵州两省的局部地区,所覆盖站点数占研究区总站点数的 21% . 时段 I 和时段 II 内稳定通过 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续日数为 0 的站点分别有 7 个(四川省的石渠、若尔盖、色达、红原、理塘和峨眉山及云南省的德钦)和 3 个(四川省的石渠、色达和峨眉山).

时段 I 和时段 II 内,研究区域 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温为 $3000\sim 4200\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ (该积温范围为研究区域春夏大豆气候区的热量要求^[20])的区域面积分别约 32.9×10^4 和 $33.2\times 10^4\text{ km}^2$. 甘薯的生育期要求 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 $\geq 1800\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,达到较高产量则需 $\geq 2400\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ^[20]. 1961—2007年间, $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 $\geq 1800\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的区域面积由时段 I 的 $82.6\times 10^4\text{ km}^2$ 增至时段 II 的 $83.7\times 10^4\text{ km}^2$, $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 $\geq 2400\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的区域面积由时段 I 的 $74.3\times 10^4\text{ km}^2$ 增至时段 II 的 $74.9\times 10^4\text{ km}^2$.

研究期间,西南地区 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的气候倾向率在 $-131\sim 357\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,平均 $37\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$. 积温呈减少趋势的站点主要有四川省的盐源、巴中、会理、南充、越西、内江、泸州、阆中、遂宁、昭觉和云南省的泸西、屏边以及贵州省的盘县、

桐梓、安顺、兴义. 积温增速高于区域平均水平的地区主要分布在云南省的瑞丽、临沧、思茅、勐腊一带以及四川省的木里、雷波附近,最大增速出现在四川省木里. 云南省西南部 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的增加,有利于甘蔗、烟草等热带经济作物的发展.

西南地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温均呈增加趋势,与年平均气温升高的趋势基本一致,且与 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续日数的变化有关(表1). 时段 II 内 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的起始日序较时段 I 提前了 1 d ,终止日序推迟了 2.6 d ,研究期间 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续日数的增速为 $2.2\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,其中持续日数增加最多的站点为云南省德钦. 时段 II 内 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的起始日序较时段 I 推迟了 2.7 d ,终止日序推迟了 4.1 d ,研究期间 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续日数的增速为 $1.2\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,其中持续日数增加最多的站点为四川省木里.

2.2 西南地区日照资源的变化特征

2.2.1 年日照时数的变化特征

研究期间,西南地区年日照时数呈明显的经向带状分布,且由西向东逐渐减少(图4 I). 年日照时数丰富的地区主要集中在四川省西部和云南省西北部,贵州省和重庆市的日照时数相对较少. 时段 I 和时段 II 内,西南地区的年日照时数分别在 $1051\sim 2691\text{ h}$ 和 $858\sim 2608\text{ h}$,平均值分别为 1789 和 1679 h . 研究期间,西南地区年日照时数的减速为 $36\text{ h}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,除云南省的会泽、勐腊、澜沧、保山、瑞丽、思茅、屏边以及四川省的理塘、若尔盖、会理、昭觉、道孚、峨眉山、盐源、九龙和贵州省的盘县、重庆市的梁平站点的年日照时数有所增加外,研究区域内 81% 的站点年日照时数呈减少趋势. 年日照时数的最大上升幅度为 $63\text{ h}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,最大的下降幅度为 $161\text{ h}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,降幅比升幅大得多. 年日照时数减幅超过 $60\text{ h}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 的地区主要分布在四川省东部(阆中、遂宁和宜宾附近)、云南省中部的部分地区(楚雄、沾益和昆明附近)和贵州省部分地区(黔西和罗

表1 1961—2007年西南地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 起止日序及持续日数的变化

Table 1 Changes of $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ beginning and ending date order as well as sustained days during 1961–2007 in Southwest China

时段 Periods of time	起始日序 Beginning date order		终止日序 Ending date order		持续日数 Sustained days	
	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$
	1961—1980年的多年平均值 Perennial average value during 1961–1980(d)	86	105	309	256	224
1981—2007年的多年平均值 Perennial average value during 1981–2007(d)	85	107	312	260	228	153
1961—2007年的气候倾向率 Climatic trend rate during 1961–2007[$\text{d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$]	-0.9	0.9	1.3	2.1	2.2	1.2

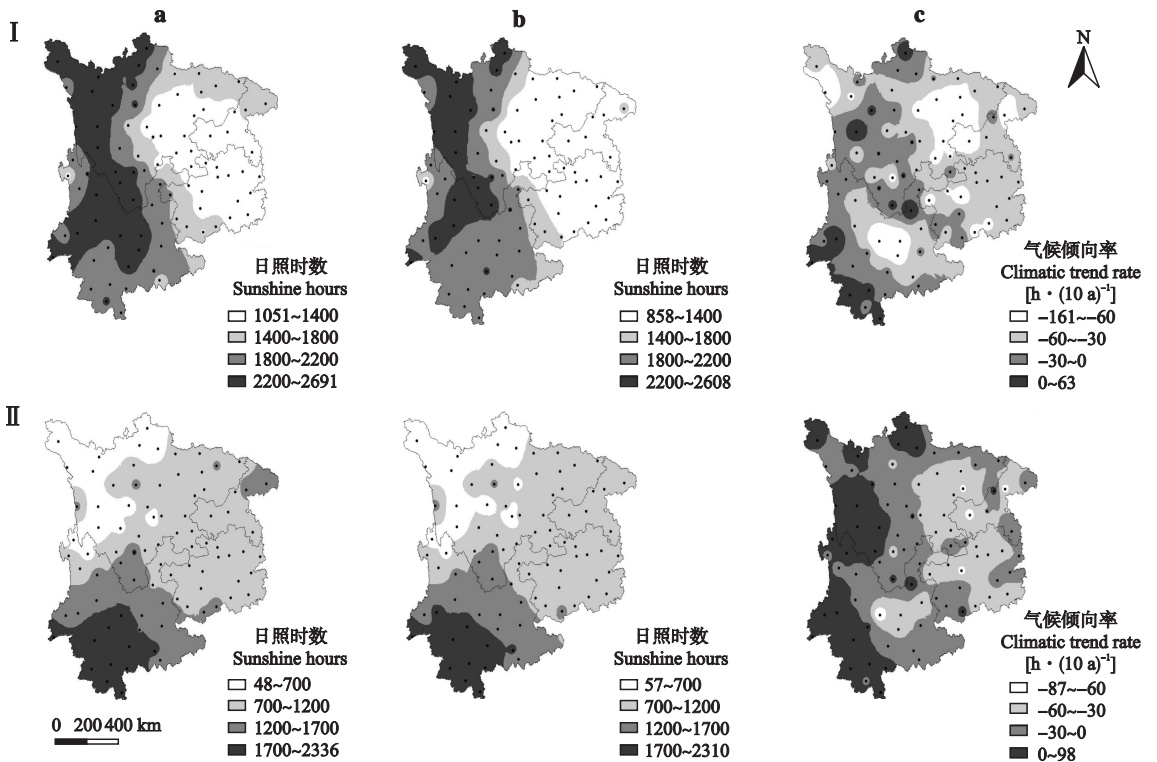


图 4 西南地区全年 (I) 及温度生长期 (II) 日照时数及其气候倾向率的分布

Fig. 4 Distribution of sunshine hours and their climatic trend rate in the whole year (I) and during temperature-defined growth period (II) in Southwest China.

甸附近), 减幅最大值出现在云南省楚雄. 四川省的泸州、内江、宜宾、都江堰、绵阳、遂宁、南充和贵州省的榕江、毕节、独山、黔西以及重庆市沙坪坝站点既是年日照时数的低值区 (<1400 h), 又是减幅的高值区 [$>60 h \cdot (10 a)^{-1}$], 日照资源尤其缺乏. 年日照时数增加的地区主要集中在云南省的会泽、勐腊、澜沧、保山和瑞丽以及四川省的理塘、若尔盖和会理站点附近, 增幅最大值出现在云南省会泽. 四川省的理塘、若尔盖、会理和盐源站点既是年日照时数的高值区 (≥ 2200 h), 也是日照时数增加的区域, 其日照资源尤其丰富. 与时段 I 相比, 西南地区时段 II 内年日照时数 ≥ 2200 h 的区域面积减少最明显, 由 $34.9 \times 10^4 km^2$ 缩小到 $22.3 \times 10^4 km^2$; 年日照时数 $1800 \sim 2200$ h 的区域向北推进了 1 个纬度, 面积增加了 $9.3 \times 10^4 km^2$; 年日照时数 <1800 h 的区域向西推进了 0.3 个经度, 面积增加了 $3.3 \times 10^4 km^2$.

2.2.2 温度生长期日照时数的变化特征 在时段 I 和时段 II, 西南地区温度生长期日照时数分别为 $48 \sim 2336$ h 和 $57 \sim 2310$ h, 平均值分别为 1124 和 1066 h (图 4 II). 温度生长期日照时数的高值区 (≥ 1700 h) 主要集中于云南省西南部, 低值区 (<700 h) 主要分布在四川省西部, 两个时段的最低

值均出现在四川省石渠. 与时段 I 相比, 时段 II 温度生长期日照时数 ≥ 1700 h 的区域向西推移了 0.1 个经度, 面积减少了 $1.5 \times 10^4 km^2$; $1200 \sim 1700$ h 的区域面积减少了 $2.6 \times 10^4 km^2$; <1200 h 的区域向南伸展, 面积增加了 $4.1 \times 10^4 km^2$.

1961—2007 年间, 西南地区温度生长期日照时数的气候倾向率在 $-87 \sim 98 h \cdot (10 a)^{-1}$, 平均值为 $14 h \cdot (10 a)^{-1}$. 除云南省西南部和四川省西部的部分站点温度生长期日照时数呈增加趋势外, 研究区域 68% 的站点呈减少趋势. 温度生长期日照时数倾向率最低值出现在云南省楚雄, 为 $-87 h \cdot (10 a)^{-1}$, 最高值出现在云南省保山, 为 $98 h \cdot (10 a)^{-1}$, 两者相差 $185 h \cdot (10 a)^{-1}$, 说明研究区域温度生长期日照时数变化的空间差异较大. 研究区东部和中部日照时数的减少, 可能导致作物光合速率降低、作物吸收的光合能量减少、光合产物减少, 并最终影响作物生产潜力和产量. 四川省西部温度生长期日照时数的增加使原来缺乏日照资源的情况有所改善, 在不考虑其他因素的前提下将有利于提高作物产量.

2.3 西南地区降水资源的变化特征

2.3.1 年降水量的变化特征 1961—2007 年, 西南

地区年降水量空间分布特征明显,由东南向西北逐渐减少(图5 I),与全国降水量的空间分布特征相似^[33].时段 I 和时段 II,研究区年降水量分别在 445~2244 mm 和 501~2269 mm,平均值分别为 1067 和 1049 mm.与时段 I 相比,时段 II 年降水量的最低值增加了 56 mm,最高值增加了 25 mm,平均值减少了 18 mm.西南地区年降水量变化具有明显的空间差异性,时段 II 内年降水量高值区(≥ 1100 mm)和低值区(< 700 mm)的区域面积较时段 I 分别减少了 6.8×10^4 和 2.1×10^4 km².1961—2007 年,西南地区年降水量的气候倾向率为 $-76 \sim 43$ mm \cdot (10 a)⁻¹,平均为 -10 mm \cdot (10 a)⁻¹,整体呈减少趋势,但减幅小于华北平原同期的变化趋势^[34],与华南沿海 1958—1999 年降水量增加以及长江中下游地区 1951—2001 年降水量微弱增加的趋势相反^[25,35].西南地区年降水量气候倾向率的空间分布特征明显,以马尔康、小金、越西、雷波、西昌、会理、楚雄和元江一带为分界,界限以西的地区(包括四川省西部和云南省西北部)年降水量呈增加趋势,最大增幅出现在四川省理塘,界限以东的大部分地区年降水量呈减少趋势,以研究区中部的减幅最大,

东部次之,最大减幅出现在四川省峨眉山.研究区 51% 的站点年降水量减幅在 $0 \sim 40$ mm \cdot (10 a)⁻¹,减幅 ≥ 40 mm \cdot (10 a)⁻¹ 的站点主要有四川省的峨眉山、宜宾、乐山、都江堰、广元、绵阳、雅安、泸州和贵州省的威宁以及云南省的沾益.研究期间,四川盆地的年降水量呈减少趋势,这与王英等^[36]的研究结果一致.云南省西北部和四川省西部为年降水量的低值区,同时也是气候倾向率的正值区,年降水量呈增加趋势,这与杨建平等^[37]的研究结果相同,至于该趋势是否有利于当地的农业生产,还需要考虑降水的有效性及其年内分布特征.四川省的理塘、稻城和雷波以及云南省的德钦、维西、保山、楚雄和瑞丽站点的年降水量呈增加趋势,且年平均气温增幅均超过 0.30 °C \cdot (10 a)⁻¹,说明该区气候变化呈暖湿化趋势.

2.3.2 温度生长期降水量的变化特征 研究期间,西南地区温度生长期降水量的分布特征为西北部少、东南部多(图5 II).时段 I 和时段 II 内,研究区温度生长期降水量分别在 26~2218 和 27~2258 mm,平均值分别为 919 和 901 mm,其空间变化特征与年降水量类似,时段 II 内高值区(≥ 1000 mm)和低值区(< 600 mm)的区域面积较时段 I 分

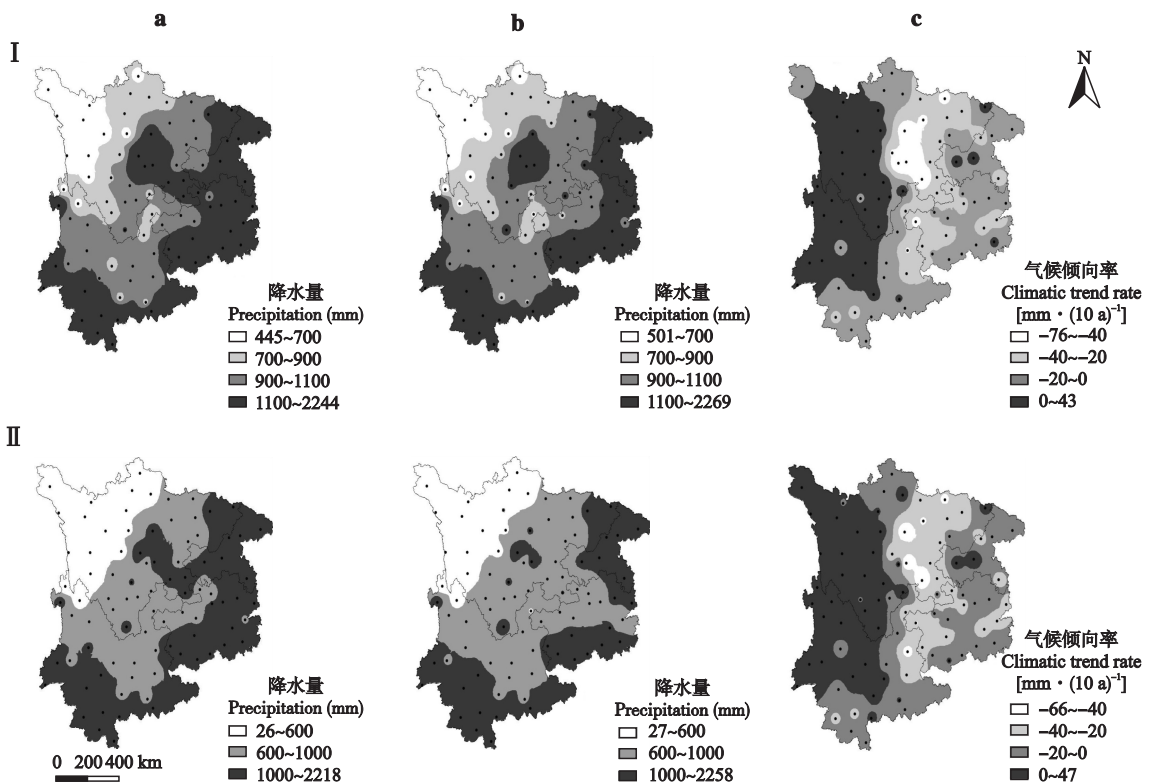


图5 西南地区全年(I)及温度生长期内(II)降水量及其气候倾向率的分布

Fig.5 Distribution of precipitation and its climatic trend rate in the whole year (I) and during temperature-defined growth period (II) in Southwest China.

别减少了 10.3×10^4 和 $0.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中值区 ($600 \sim 1000 \text{ mm}$) 面积较时段 I 增加了 $10.9 \times 10^4 \text{ km}^2$. 在西南玉米适宜种植地区, 生长季需水量为 $600 \text{ mm}^{[20]}$, 满足该降水量区域面积的增加, 可为玉米的扩种提供有利条件. 1961—2007 年, 西南地区温度生长期内降水量气候倾向率在 $-66 \sim 47 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 平均值为 $-8 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 总体呈减少趋势, 减幅略小于年降水量的变化趋势. 研究区温度生长期内降水量丰富的东半部的降水量呈现出减少趋势, 而温度生长期内降水量相对较少的西北部则呈现出增加趋势, 这在一定程度上使全区温度生长期内降水量的空间分布更加均匀, 有利于作物种植面积的扩大和农业生产管理.

2.4 西南地区参考作物蒸散量的变化特征

2.4.1 年参考作物蒸散量的变化特征

1961—2007 年, 西南地区年参考作物蒸散量的空间分布特征明显, 由西南向东北逐渐减少, 高值区 ($\geq 1100 \text{ mm}$) 主要集中在云南省的大部地区, 低值区 ($< 900 \text{ mm}$) 主要集中在四川省东部、重庆市大部以及贵州省北部 (图 6 I). 时段 I 和时段 II 内, 研究区域年参考作物蒸散量分别在 $668 \sim 1521 \text{ mm}$ 和 $677 \sim 1467 \text{ mm}$, 平均值分别为 993 和 968 mm . 与时段 I 相比, 时段 II

的年参考作物蒸散量最低值增加了 9 mm , 最高值减少了 54 mm , 平均值减少了 25 mm , 表明研究区域年参考作物蒸散量整体减少. 时段 II 内年参考作物蒸散量为 $900 \sim 1000 \text{ mm}$ 、 $1000 \sim 1100 \text{ mm}$ 和 $\geq 1100 \text{ mm}$ 的区域面积较时段 I 分别减少了 15.2×10^4 、 4.2×10^4 和 $1.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, $< 900 \text{ mm}$ 的区域面积较时段 I 增加了 $21.3 \times 10^4 \text{ km}^2$. 1961—2007 年, 西南地区年参考作物蒸散量气候倾向率在 $-149 \sim 25 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 平均值为 $-6 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 减幅小于年降水量的变化趋势. 除云南省西部的澜沧、会泽、勐腊和保山以及四川省西南部的木里、若尔盖、九龙和峨眉山站点的年参考作物蒸散量呈增加趋势外, 研究区 69% 的站点呈减少趋势. 重庆市大部、四川省东部以及西北部高海拔地区、云南省中部和贵州省中部部分地区年参考作物蒸散量的减幅较大, 均在 $10 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以上, 减幅小于 $10 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的区域占研究区总面积的 56%.

2.4.2 温度生长期内参考作物蒸散量的变化特征

1961—2007 年, 西南地区温度生长期内参考作物蒸散量的空间分布特征为南部多、东北次之、西北最少 (图 6 II). 时段 I 和时段 II 内, 研究区温度生长期内参考作物蒸散量分别在 $27 \sim 1522 \text{ mm}$ 和 $32 \sim$

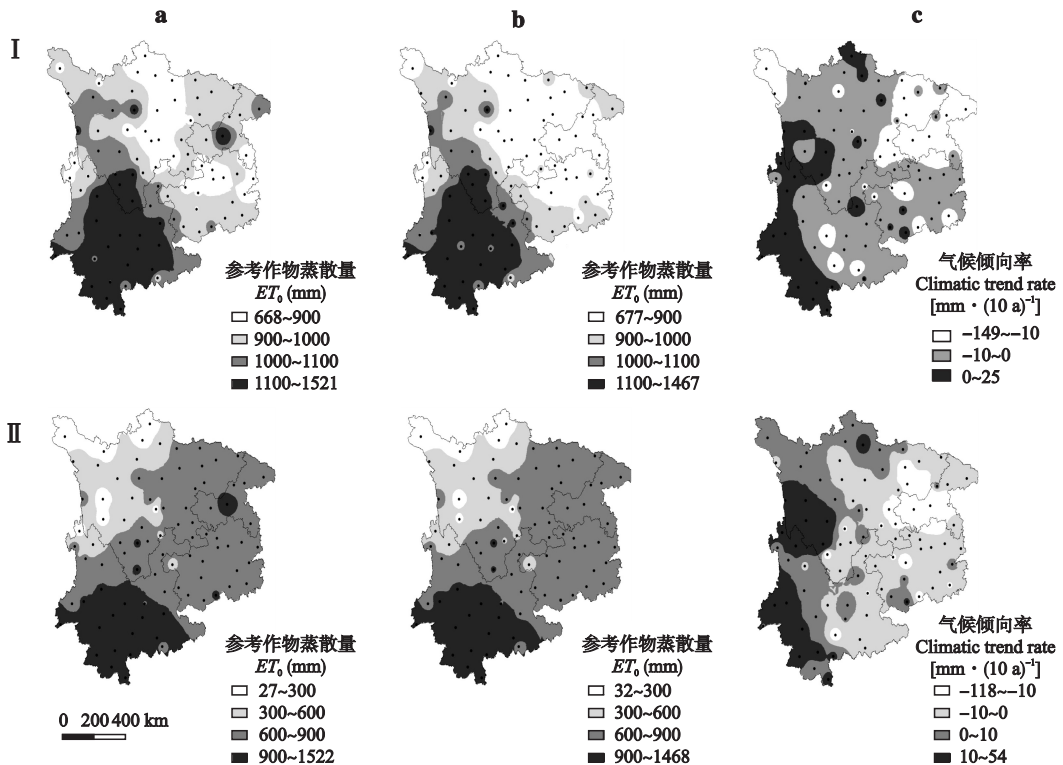


图 6 西南地区全年 (I) 及温度生长期内 (II) 参考作物蒸散量及其气候倾向率的分布

Fig. 6 Distribution of reference crop evapotranspiration and its climatic trend rate in the whole year (I) and during temperature-defined growth period (II) in Southwest China.

1468 mm. 温度生长期内参考作物蒸散量高值区 (≥ 900 mm) 主要集中在云南省的中部和南部, 该区亦为年参考作物蒸散量的高值区; 低值区 (< 300 mm) 主要分布在四川省西北部, 即石渠、色达、理塘、若尔盖和红原等, 与年参考作物蒸散量的低值区不重合, 表明该区参考作物蒸散量年内分布不均匀. 1961—2007年, 西南地区温度生长期内参考作物蒸散量气候倾向率在 $-118 \sim 54 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 最低值出现在重庆市涪陵, 最高值出现在四川省木里. 除四川省的北部和西部以及云南省西部呈增加趋势外, 研究区 53% 的站点呈减少趋势, 减幅为 $0 \sim 10 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的区域约占 49%, 且主要分布在云南省东部、四川省东部、贵州省大部和重庆市东北部. 就整个西南地区而言, 贵州、重庆和四川三省(市)的东部年参考作物蒸散量最少, 但温度生长期内参考作物蒸散量处于中上等水平; 四川省西北部年参考作物蒸散量处于中等水平, 但温度生长期内参考作物蒸散量最少.

3 讨 论

西南地区热量资源的增加有利于水稻及玉米中熟和晚熟品种种植界限北移, 特别利于高原地区中稻的种植面积迅速扩大以及大豆和甘薯的适种面积增加, 在保证产量的前提下可以追求更好的品质^[20]. 但温度升高对生育期短的作物来说则是不利的, 因为发育速度加快会导致生育期缩短, 在相同的栽培管理措施下, 生育期缩短将导致产量下降, 有研究表明, 气温每升高 $1 \text{ }^\circ\text{C}$, 水稻产量将减少 $10\% \sim 17\%$ ^[38]. 此外, 气候变暖将使病虫害发生期提前、害虫死亡率降低、繁殖代数增加, 从而使农作物病虫害危害加重. 根据热量资源的变化特征可适当调整作物品种的熟性和推广抗高温、抗病虫害品种, 以求得产量的最大化^[39]. 1961—2007年, 西南地区日照时数整体下降, 主要原因在于近些年大气污染严重、云量和气溶胶增多, 从而增强了大气对太阳光的反射和吸收作用, 使太阳辐射减小^[40]. 若不考虑其他因素的影响, 在日照资源缺乏的四川省西部地区, 温度生长期延长及温度生长季内总的日照时数增加将有利于长日照作物产量的提升. 西南地区西部降水资源增加, 有利于提高作物的品质和产量, 但过分集中的降水会使农田受淹、肥料流失、农业成本增加, 在作物收获季节, 还会使果实浸水后发芽霉烂, 造成损失^[41]. 西南地区东部呈暖干化趋势, 干旱频率增加, 可能会抵消热量资源增加所发挥的作用.

研究区降水资源整体呈减少趋势, 季节性干旱频繁发生, 尤其是秋旱的增加趋势明显, 可推广旱作节水技术、增强农业防旱减灾的综合能力, 同时加大优良抗旱品种推广力度, 提高良种覆盖度, 以减轻降水资源减少的不利影响^[39, 42]. 根据 Penman-Monteith 方程和能量平衡原理, 影响参考作物蒸散变化的因素包括两部分, 即辐射能量部分和空气动力学部分. 其中, 辐射能量部分主要为太阳辐射, 空气动力学部分主要与风速、温度和水汽压差有关^[43]. Thomas^[44]认为, 西南地区潜在蒸发主要受辐射影响. 因此, 该区域参考作物蒸散量降低可能与日照时数减少有关, 而温度升高对参考作物蒸散量变化的作用不明显.

此外, 气温的垂直递减率随地点、季节和昼夜的不同而变化, 夏季和白天的气温垂直递减率高, 冬季和夜晚的气温垂直递减率低^[25]. 本文采用的气温垂直递减法尽管是目前比较公认的方法, 但进一步提高栅格化结果的精度, 还必须考虑气温垂直递减率在不同季节和不同下垫面上的差异.

参考文献

- [1] Gao Y (高云), Mao L-X (毛留喜), Cheng L (程磊). Issues on the scientific research of climate change. *China Soft Science* (中国软科学), 2003 (12): 90-94 (in Chinese)
- [2] Guo M-S (郭明顺), Xie L-Y (谢立勇), Cao M-J (曹敏建), et al. Effects and countermeasures of climate change on agricultural production and rural development. *Agricultural Economy* (农业经济), 2008 (10): 8-10 (in Chinese)
- [3] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Oslo: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007
- [4] Ding Y-H (丁一汇), Ren G-Y (任国玉), Shi G-Y (石广玉), et al. National assessment report of climate change. I. Climate change in China and its future trend. *Advances in Climate Change Research* (气候变化研究进展), 2006, 2(1): 3-8 (in Chinese)
- [5] Zhao Z-C (赵宗慈), Wang S-W (王绍武), Luo Y (罗勇). Assessments and projections of temperature rising since the establishment of IPCC. *Advances in Climate Change Research* (气候变化研究进展), 2007, 3(3): 183-184 (in Chinese)
- [6] Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259: 660-684
- [7] Chakraborty S, Tiedemann AV, Teng PS. Climate change: Potential impact on plant diseases. *Environmen-*

- tal Pollution*, 2000, **108**: 317–326
- [8] Lin X-S (林孝松). Research progress in the agroclimatic resources. *Journal of Hainan Normal University* (海南师范学院学报), 2003, **16**(4): 87–91 (in Chinese)
- [9] Yu H-N (于沪宁), Li W-G (李伟光). Analysis and Utilization of Agro-climatic Resources. Beijing: China Meteorological Press, 1985 (in Chinese)
- [10] Zhao R-Z (赵汝植). Evaluation of agro-climatic resources in Southwest China. *Natural Resources* (自然资源), 1991, **13**(2): 1–5 (in Chinese)
- [11] Ma Z-F (马振锋), Peng J (彭 骏), Gao W-L (高文良), *et al.* Climate variation of Southwest China in recent 40 years. *Plateau Meteorology* (高原气象), 2006, **25**(4): 633–642 (in Chinese)
- [12] Liu X-R (刘晓冉), Li G-P (李国平), Fan G-Z (范广洲), *et al.* Spatial and temporal characteristics of temperature changes in Southwest China during 1961–2000. *Scientia Meteorologica Sinica* (气象科学), 2008, **28**(1): 30–36 (in Chinese)
- [13] Dong X-Q (董谢琼), Duan X (段 旭). Climatic characteristics and variation tendency of precipitation in the southwest region of China. *Scientia Meteorologica Sinica* (气象科学), 1998, **18**(3): 239–247 (in Chinese)
- [14] Ren G-Y (任国玉), Guo J (郭 军), Xu M-Z (徐铭志), *et al.* Climate changes of China's mainland over the past half century. *Acta Meteorologica Sinica* (气象学报), 2005, **63**(6): 942–956 (in Chinese)
- [15] Xu Y-H (徐裕华). Climate in Southwest. Beijing: China Meteorological Press, 1991 (in Chinese)
- [16] Zhao R-Z (赵汝植). A study of the physico-geographical regionalization in Southwest region. *Journal of Southwest China Normal University* (Natural Science) (西南师范大学学报·自然科学版), 1997, **22**(2): 193–198 (in Chinese)
- [17] Ren J-J (任九江). Climatic changes in Southwest China and the possible countermeasures to be taken in agriculture. *Journal of Southwest Agricultural University* (西南农业大学学报), 1992, **14**(4): 369–373 (in Chinese)
- [18] Liu X-H (刘巽浩), Chen F (陈 阜). Farming Systems in China. Beijing: China Agriculture Press, 2005 (in Chinese)
- [19] Han X-L (韩湘玲). Agricultural Climatology. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 1999 (in Chinese)
- [20] Cheng C-S (程纯枢). Climate and Agriculture in China. Beijing: China Meteorological Press, 1991 (in Chinese)
- [21] Allen RG, Pereira LS, Raes D, *et al.* Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations, 1998
- [22] Wei F-Y (魏凤英). Technology of Modern Climate Statistics Diagnosis and Forecast. Beijing: China Meteorological Press, 2007 (in Chinese)
- [23] Nalder IA, Wei RW. Spatial interpolation of climatic normals: Test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, **92**: 211–225
- [24] Liao S-B (廖顺宝), Li Z-H (李泽辉), You S-C (游松财). Comparison on methods for rasterization of air temperature data. *Resources Science* (资源科学), 2003, **25**(6): 83–88 (in Chinese)
- [25] Ren C (任 崇). Climatic change in the coastland of South China from 1958 to 1999. *Meteorological Monthly* (气象), 2002, **28**(6): 21–24 (in Chinese)
- [26] Chen Y (陈 莹), Xu Y-P (许有鹏), Yin Y-X (尹义星). Scaling behavior of atmospheric temperature change since the 1960s in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Nanjing University* (Natural Science) (南京大学学报·自然科学版), 2008, **44**(6): 683–690 (in Chinese)
- [27] Zhou W-D (周伟东), Zhu J-H (朱洁华), Li J (李 军), *et al.* Characteristics of climate change for heat resources in East China. *Resources Science* (资源科学), 2009, **31**(3): 472–478 (in Chinese)
- [28] Ban J-M (班军梅), Miao Q-L (缪启龙), Li X (李 雄). Analysis of characteristics of temperature variations in Southwest China in recent 50 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2006, **15**(3): 346–351 (in Chinese)
- [29] Liu Z-J (刘志娟), Yang X-G (杨晓光), Wang W-F (王文峰), *et al.* Characteristics of agricultural climate resources in three provinces of Northeast China under global climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(9): 2199–2206 (in Chinese)
- [30] Song L-C (宋连春). Characteristics of temperature in spatial and temporal variation in China during recent 40 years. *Applied Meteorology* (应用气象学报), 1994, **5**(1): 119–124 (in Chinese)
- [31] Ren G-Y (任国玉), Xu M-Z (徐铭志), Chu Z-Y (初子莹), *et al.* Changes of surface air temperature in China during 1951–2004. *Climatic and Environmental Research* (气候与环境研究), 2005, **10**(4): 717–727 (in Chinese)
- [32] Zhao J (赵 锦), Yang X-G (杨晓光), Liu Z-J (刘志娟), *et al.* The possible effect of global climate on

- cropping systems boundary in China. II. The characteristics of climatic variables and the possible effect on northern limits of cropping systems in South China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2010, **43** (9): 1860–1867 (in Chinese)
- [33] Ye B-S (叶柏生), Li C (李 翀), Yang D-Q (杨大庆), *et al.* Variation trend of precipitation and its impact on water resources in China during last 50 years. I. Annual variation. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2004, **26**(5): 587–594 (in Chinese)
- [34] Ma J-H (马洁华), Liu Y (刘 园), Yang X-G (杨晓光), *et al.* Characteristics of climate resources under global climate change in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(14): 3818–3827 (in Chinese)
- [35] Mei W (梅 伟), Yang X-Q (杨修群). Trends of precipitation variations in the Mid-Lower Yangtze River Valley of China. *Journal of Nanjing University* (Natural Science) (南京大学学报·自然科学版), 2005, **41** (6): 577–589 (in Chinese)
- [36] Wang Y (王 英), Cao M-Q (曹明荃), Tao B (陶波), *et al.* The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change. *Geographical Research* (地理研究), 2006, **25**(6): 1031–1040 (in Chinese)
- [37] Yang J-P (杨建平), Ding Y-J (丁永建), Chen R-S (陈仁升), *et al.* Variations of precipitation and evaporation in North China in recent 40 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2003, **17**(2): 6–11 (in Chinese)
- [38] Li Y-J (李祎君), Wang C-Y (王春乙). Impact of climate change on crop planting structure in China. *Advances in Climate Change Research* (气候变化研究进展), 2010, **6**(2): 123–129 (in Chinese)
- [39] Sun Z-H (孙智辉), Wang C-Y (王春乙). Impact of changing climate on agriculture in China. *Science & Technology* (科技导报), 2010, **28**(4): 110–117 (in Chinese)
- [40] Shen Z (沈 瑱), Zeng Y (曾 燕), Xiao H (肖卉), *et al.* Changes of sunshine hours in the recent 40 years over Jiangsu Province. *Scientia Meteorologica Sinica* (气象科学), 2007, **27**(4): 425–429 (in Chinese)
- [41] Zhou W-D (周伟东), Zhu J-H (朱洁华), Wang Y-Q (王艳琴), *et al.* Change characteristics of Shanghai's agroclimatic resources in the last hundred years. *Resources Science* (资源科学), 2008, **30**(5): 642–645 (in Chinese)
- [42] Huang W-H (黄晚华), Yang X-G (杨晓光), Li M-S (李茂松), *et al.* Evaluation characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(7): 50–58 (in Chinese)
- [43] Li C-Q (李春强), Hong K-Q (洪克勤), Li B-G (李保国). Analysis of temporal-spatial variations of reference evapotranspiration during 1965 and 1999 in Hebei Province. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2008, **29**(4): 414–419 (in Chinese)
- [44] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends in China. *International Journal of Climatology*, 2000, **20**: 381–396

作者简介 代姝玮,女,1987年生,硕士研究生.主要从事气候变化与种植制度适应研究,发表论文3篇. E-mail: daishuwei7@163.com

责任编辑 杨 弘
