中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

西南区域单季稻生长季干湿演变及影响因素分析

陈超，庞艳梅，徐富贤，郭晓艺

引用本文:
陈超, 庞艳梅, 徐富贤, 等. 西南区域单季稻生长季干湿演变及影响因素分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 492–502.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190727

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西南区域水稻关键生育期界限温度起始期的预测研究

Prediction of threshold temperature start date for rice at critical development stages in Southwest China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(8): 1172–1182 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180686

基于热害累计指数的四川单季稻高温热害综合风险评价

Risk assessment of hot damages for single–cropping rice based on accumulation index of heat stress in Sichuan

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(9): 1440–1452 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190019

四川稻作区优质稻生产气候生态条件适宜性评价及空间分布

Suitability evaluation of eco–climatic conditions for high quality rice production in Sichuan Province

中国生态农业学报. 2015(4): 506–513 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141208

基于扩散理论的华北春玉米生理成熟后籽粒脱水过程分析

Analysis of kernel dry down process after physiological maturity of spring maize based on diffusion theory in the North China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 545–557 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190906

宁夏枸杞生长季气候变化特征及其影响

Variations and effects of climate in growth period of Lycium barbarum L. in Ningxia

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(12): 1789–1798 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190477

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 4 月 第 28 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2020, 28(4): 492−502

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190727

陈超, 庞艳梅, 徐富贤, 郭晓艺. 西南区域单季稻生长季干湿演变及影响因素分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 492−502
CHEN C, PANG Y M, XU F X, GUO X Y. Dry-wet evolution and its influencing factors in single cropping rice growing season in Southwest China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4): 492−502

西南区域单季稻生长季干湿演变及影响因素分析*

陈 超[1,2], 庞艳梅[1**], 徐富贤[3], 郭晓艺[3]

(1. 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室 成都 610072; 2. 南方丘区节水农业研究四川省重点实验室 成都 610066; 3. 四川省农业科学院水稻高粱研究所 德阳 618000)

摘 要: 结合作物生产开展区域干湿演变及其影响因素研究, 对农业可持续发展和粮食安全具有重要的科学意义。本文基于西南水稻种植区 316 个气象站点 1961—2015 年的观测资料, 利用降水量与参考作物蒸散量(ET_0)的比值计算湿润指数, 分析近 55 年西南区域单季稻生长季干湿演变特征; 探讨 ET_0 对主要气候要素的敏感性及主要气候要素对 ET_0 的贡献率, 对西南区域单季稻生长季干湿演变的影响因素展开研究。结果表明: 西南区域单季稻生长季的半湿润区主要分布在四川攀西地区南部、云南中部和东北部, 其余地区属湿润区。与 1961—1990 年相比, 1991—2015 年研究区域内的半湿润区面积增加、湿润区面积减小。近 55 年来, 单季稻生长季内西南区域有 40.8%的站点气候变湿, 其余地区气候变干。四川盆地东北部、云南东北部由于降水量的增加和 ET_0 的减少, 气候变湿; 四川攀西地区由于降水量增加对湿润指数的正效应大于 ET_0 增加对湿润指数的负效应, 气候变湿; 重庆南部、贵州北部和西部由于降水量减少对湿润指数的负效应小于 ET_0 减少对湿润指数的正效应, 气候变湿; 云南大部由于降水量的减少和 ET_0 的增加, 气候变干; 西南其他区域由于降水量减少对湿润指数的负效应大于 ET_0 减少对湿润指数的正效应, 气候变干。西南区域单季稻生长季 ET_0 随平均气温和相对湿度的增加而减小, 而随日照时数和风速的增加而增加, 日照时数和风速的显著下降是 ET_0 减小的主要原因。研究为气候变化背景下降低西南区域单季稻生长季可能的气候风险提供了科学依据。

关键词: 西南区域; 单季稻; 湿润指数; 干湿演变; 降水量; 参考作物蒸散量; 气候要素

中图分类号: S161 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Dry-wet evolution and its influencing factors in single cropping rice growing season in Southwest China*

CHEN Chao[1,2], PANG Yanmei[1**], XU Fuxian[3], GUO Xiaoyi[3]

(1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu / Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Provincial Key Laboratory of Water-Saving Agriculture in Hill Areas of Southern China, Chengdu 610066, China; 3. Institute of Rice and Sorghum, Sichuan Academy of Agricultural Science, Deyang 618000, China)

* 国家重点研发计划重点专项(2017YFD0300400)、高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(省重实验室 2018-重点-05-01)和中国气象局成都高原气象研究所基本科研费业务项目(BROP201817)资助

** 通信作者: 庞艳梅, 主要从事气候变化对农业的影响评估研究。E-mail: pangyanm@126.com
陈超, 主要从事气候变化影响评价、生物气候模型与信息系统的研究。E-mail: chenchao16306@sina.com

收稿日期: 2019-10-15 接受日期: 2020-01-03

* This study was supported by the Key Special Project of National Key Research and Development Program of China (2017YFD0300400), the Science and Technology Development Foundation of Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province (Key Laboratory of Sichuan Province-2018-Key-05-01), and the Basic Business Project of Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration (BROP201817).

** Corresponding author, E-mail: pangyanm@126.com

Received Oct. 15, 2019; accepted Jan. 3, 2020

Abstract: Research on regional dry-wet evolution and its influencing factors during the crop growing season is critical for sustainable agricultural development and food security. In this study, which is based on the daily meteorological data from 316 meteorological stations in the rice-growing area of Southwest China from 1961 to 2015, and on calculation of the ratio of precipitation to reference crop evapotranspiration (ET_0) in a single cropping rice growing season in Southwest China, the characteristics of dry-wet evolution from 1961 to 2015 were analyzed. The sensitivity of ET_0 to the main climatic factors and attribution rates to ET_0 of the main climatic factors were studied, and the factors influencing dry-wet evolution were also discussed. The results showed that the semi-humid climatic regions with a single cropping rice growing season in Southwest China were mainly distributed in the south of Panxi area of Sichuan and the center and northeast of Yunnan, but that the rest of Southwest China comprised humid climatic regions. Compared with 1961–1990, the area of the semi-humid climatic region in Southwest China increased during 1991–2015, while the area of the humid climatic region decreased. During the single cropping rice growing season, 40.8% of the sites in Southwest China became wet from 1961 to 2015, and the rest of the region became dry. The climate became wet in the northeast of Sichuan basin and the northeast of Yunnan because of increasing precipitation and decreasing ET_0. The positive effect caused by the increasing precipitation on the humidity index exceeded the negative effect caused by the increasing ET_0, which resulted in the climate becoming wet in the Panxi area of Sichuan. The positive effect caused by the decreasing ET_0 on the humidity index exceeded the negative effect caused by the decreasing precipitation, which resulted in the climate becoming wet in the south of Chongqing, and in the north and west of Guizhou Province. In contrast, most of Yunnan showed a dry trend with decreasing precipitation and increasing ET_0. The climate became drier in other areas of Southwest China because the negative effect caused by the decreasing precipitation on the humidity index exceeded the positive effect of the decreasing ET_0. During the single cropping rice growing season, the ET_0 decreased with increasing average temperature and relative humidity in Southwest China, but the ET_0 increased with increasing sunshine hours and wind speed. The significant decline in sunshine hours and wind speed in Southwest China was the main reason for the decrease in ET_0. The study provided a scientific basis for reduction of the possible climate risks of the single cropping rice growing season in Southwest China under global climate change.

Keywords: Southwest China; Single cropping rice; Humid index; Dry-wet evolution; Precipitation; Reference crop evapotranspiration; Climate factor

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第5次评估报告指出[1]，与1850—1990年相比，1880—2012年全球海陆面平均温度上升了0.85 ℃。气候变暖改变了海陆热力差异与大尺度的环流结构，使得全球降水、蒸散的强度与分布发生改变，并且这种改变在时空分布上表现出非均匀性的特征[2]，将对气候的干湿情况产生显著影响[3-4]，进一步对农业生产、乃至粮食安全产生重要影响[5]。研究指出气候变化对不同地区干湿气候的影响程度存在差异[6]，影响的机制同样存在诸多的不确定性。因而，结合农业生产开展区域干湿演变特征及其影响因素研究，具有重要的科学意义和应用价值。

我国西南区域位于21°~36°N，78.5°~109.5°E，包括四川、云南、贵州、重庆和西藏，具有地形复杂、气候类型多样的特点[7-9]。水稻(*Oryza sativa*)是我国西南最重要的粮食作物，主要分布于除西藏和川西高原外的其他区域。据统计，2017年西南水稻种植面积和总产量分别为4.1×10^2万hm^2与2.9×10^6万t，分别占西南粮食作物种植总面积与总产量的26.4%和38.4%，并以一季中稻为主[10]。气候变暖导致干湿状况的空间分布发生变化，进而对区域农业生产需水、作物种植面积与品种布局等产生重要影响[11-13]，而在气候变化背景下人类采取哪些有效措施积极应对，已受到众多学者的关注[14-15]。近年来，参考作物蒸散量(ET_0)作为评价气候干旱与水资源供需平衡的指标之一，在气候资源与区划研究中起到了至关重要的作用[16-18]。一些学者通过定量分析ET_0和气候因子的关系探讨其变化机制，对区域干湿变化特征的研究有参考价值[19-23]。然而，前人很少结合降水量与蒸散量系统分析作物生长季内的水分盈亏状况，尤其缺乏作物生长季干湿变化的影响因素分析。鉴于此，本文基于西南水稻种植区(川、渝、云、黔)316个气象站点的观测资料，采用降水量与Penman-Monteith法计算的ET_0，分析1961—2015年西南区域单季稻生长季干湿气候的时空变化特征，并探讨影响ET_0的主要气候要素的敏感性与贡献率，对干湿变化的影响因素展开研究，拟在明确气候变暖背景下西南区域单季稻生长季的干湿分布特征及变化趋势，为降低作物生长季可能的气候风险提供科学基础。

1 材料与方法

1.1 数据来源和研究区域

气象资料来源于国家气象信息中心，包括1961—2015年西南区域四川省(84个)、云南省(119个)、贵州省(80个)、重庆市(33个)共316个气象台站的日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、相对湿度及风速资料。研究区域气象站点分布如图1所示。

单季稻生长季选择张建平等[24]对西南稻区的划分标准，将西南区域分为6个稻区，并给出了各分区内水稻的生长季(表1)。

1.2 研究方法

1.2.1 湿润指数

湿润指数是自然条件下表征地区干湿程度的指标，采用水分收支比表示:

$$M=\frac{P}{\mathrm{ET}_0} \tag{1}$$

式中: M是湿润指数, P是降水量(mm·d^{-1}), ET_0是参考作物蒸散量(mm·d^{-1})。本研究以湿润指数作为干湿气候的划分标准[4,25]，干湿分区见表2。

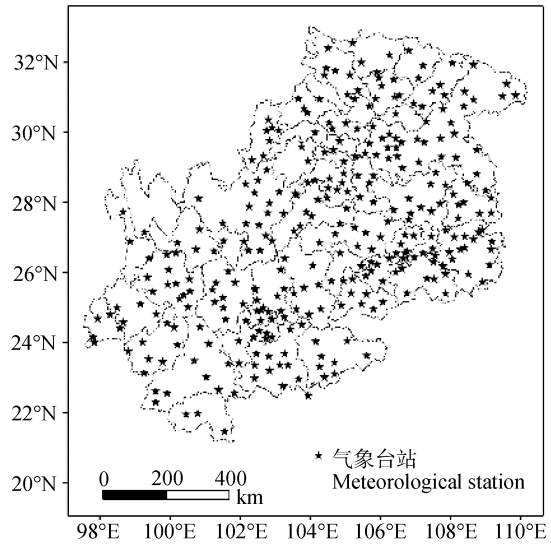

图 1 研究区域气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the study region

表 1 西南稻区单季稻区域划分及其生长期

Table 1 Division of zones of single cropping rice and their growing seasons in Southwest China

区域编号 Zone No.	区域 Zone	播种至成熟(月-日) From sowing to maturity (month-day)
I	重庆的中部、东北部和西部 Central, northeast and west of Chongqing	03-01—08-30
II	四川盆地东北部万源、达州一带及贵州北部 Areas around Wanyuan and Dazhou in the northeastern Sichuan Basin, northern Guizhou	03-01—08-30
III	贵州大部、四川盆地西部阆中遂宁一带 Most of Guizhou, areas around Langzhong and Suining in the western Sichuan Basin	04-01—09-30
IV	四川盆地边缘、云南西北部 Edge of the Sichuan Basin and northwestern Yunnan	03-01—08-20
V	云南中部和东北部、四川南部、贵州省西部边缘 Central and northeast Yunnan, southern Sichuan and western edge of Guizhou	03-11—09-20
VI	云南南部、西南部和东南部 South, southwest and southeast Yunnan	02-21—08-20

表 2 干湿气候的划分标准

Table 2 Standard for the division of dry and wet climate zones

气候区 Climate zone	划分标准 Standard
极端干旱区 Extreme drought area	M<0.03
干旱区 Drought area	0.03≤M<0.2
半干旱区 Semi-arid area	0.2≤M<0.5
半湿润区 Semi-wet area	0.5≤M<1.0
湿润区 Wet area	M≥1.0

M 是湿润指数。M is the humid index.

ET_0的计算利用FAO推荐的Penman-Monteith公式[26]:

$$\mathrm{ET}_0=\frac{0.408\Delta\left(R_\mathrm{n}-G\right)+\gamma\frac{900}{T+273}U_2\left(e_\mathrm{s}-e_\mathrm{a}\right)}{\Delta+\gamma\left(1+0.34U_2\right)} \tag{2}$$

式中: ET_0为参考作物蒸散量(mm·d^{-1}), Δ为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率(kPa·℃$^{-1}$), R_n为作物表面的净辐射量(MJ·m^{-2}), G为土壤热通量(MJ·m^{-2}), γ为湿度计常数(kPa·℃$^{-1}$), T为平均气温(℃), U_2为地面之上2 m的风速(m·s^{-1}), e_a和e_s分别为空气实际水汽压和饱和水汽压(kPa)。

1.2.2 气候倾向率

气候倾向率[27]指气候要素的趋势变化，建立气候因子和时间的线性回归方程:

$$X_i=a+bt_i\quad(i=1,2,\cdots,n) \tag{3}$$

式中: X_i是气候因子, t_i是时间变化, n是样本数量, a和b是线性回归系数。b的10倍表示气候因子的倾向率。

1.2.3 敏感性分析

ET_0对各气候要素的敏感系数是判别气候因子对ET_0扰动的方法，已获得广泛应用[21,25,28]。本研究利用Beven提出的基于偏导数的敏感性法分析ET_0对气象要素(平均温度、相对湿度、日照时数和风速)

的敏感系数[29]。由于Penman-Monteith模型中输入参数量纲与变化范围的差异，采用ET_0的变化率和气象要素变化率的比值将偏导数转为无量纲形式:

$$S_{X_i} = \lim_{\Delta X_i \to 0} \frac{\Delta ET_0 / ET_0}{\Delta X_0 / X_i} = \frac{\partial ET_0}{\partial X} \times \frac{X_i}{ET_0} \tag{4}$$

式中: S_{X_i} 是ET_0对气象要素X_i的敏感系数; ΔET_0 是ET_0的日变化; X_i和 ΔX_i 分别是日气候要素值及气候要素的日变化。作物生育期气候因子的敏感系数是该阶段内日敏感系数的平均值。当敏感系数 S_{X_i} 是正值时指ET_0随气象要素值的增加而增加，当 S_{X_i} 是负值时指ET_0随气象要素值的增加而减小，S_{X_i} 的绝对值越大指ET_0对此气象要素变化具有越高的敏感性。

1.2.4　气候要素贡献率

气候要素的变化对ET_0的贡献率采用气候要素的多年相对变化率和敏感系数的乘积来表示[30]:

$$G_{X_i} = S_{X_i} \times R_{X_i} \tag{5}$$

式中: G_{X_i} 是气候要素的贡献率; S_{X_i} 是气候要素X_i的敏感系数; R_{X_i} 是研究时段期间气候要素多年的相对变化率，计算公式为:

$$R_{X_i} = \frac{\Delta X_i}{\bar{X}_i} = \frac{n \times \mathrm{Trend}_{X_i}}{\bar{X}_i} \tag{6}$$

式中: Trend_{X_i} 是气候要素X_i的气候倾向率，$\bar{X}_i$ 是气候要素的多年平均值，n是总的年数。当贡献率为正值时，气候要素的变化导致ET_0增加，表示正贡献；当贡献率为负值时，气候要素的变化导致ET_0减少，表示负贡献。

2　结果与分析

2.1　单季稻生长季干湿状况及变化特征

1961—2015年，西南区域单季稻生长季平均湿润指数的范围为0.5~3.0，平均值为1.27。依据干湿气候的划分标准，西南稻区分为半湿润区和湿润区。研究区域内的半湿润区主要分布在四川攀西地区南部、云南的中部和东北部；其余大部地区均属于湿润区，其中四川的雅安、贵州的南部和东北部、云南的边缘地区湿润指数最大，范围为1.5~3.0(图2)。

我国大部分区域气温变化的转折点出现在20世纪80年代[31]，但西南区域的转折点相对滞后，出现在20世纪90年代[32]。因而，本文以1990年作为分界线，比较前后2个时段内西南区域单季稻生长季的平均湿润指数。由图2b和2c可知，1961—1990年和1991—2015年平均湿润指数分别为0.5~3.4和0.5~2.9。西南稻区包括半湿润区和湿润区，2个时段的分布特征与1961—2015年基本一致。和1961—1990年相比，1991—2015年研究区域内的半湿润区面积增加4 278 km^2(2.4%)，增加的区域主要分布在四川攀西地区南部和盆地西部，而湿润区面积呈减小的趋势。

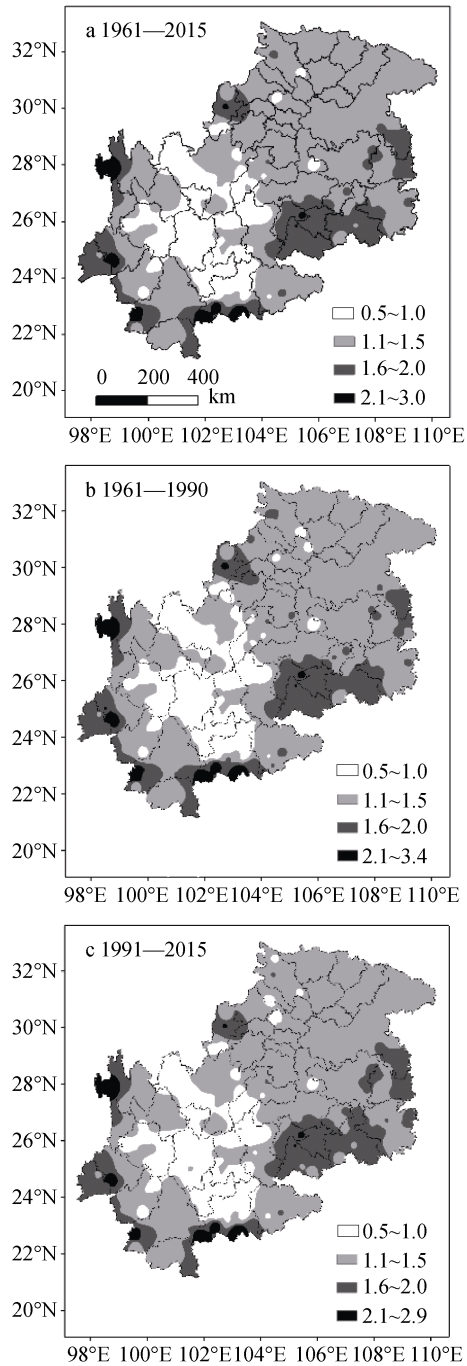

图 2　1961—2015 年不同时间段西南区域单季稻生长季湿润指数的空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of humid index in single cropping rice growing season at different time periods from 1961 to 2015 in Southwest China

进一步分析西南区域单季稻生长季湿润指数、降水量与ET_0的变化。由图3和表3可知，1961—2015年西南区域湿润指数总体变化很小；降水量和ET_0均呈减少趋势，气候倾向率分别为−7.6 $mm\cdot(10a)^{-1}$

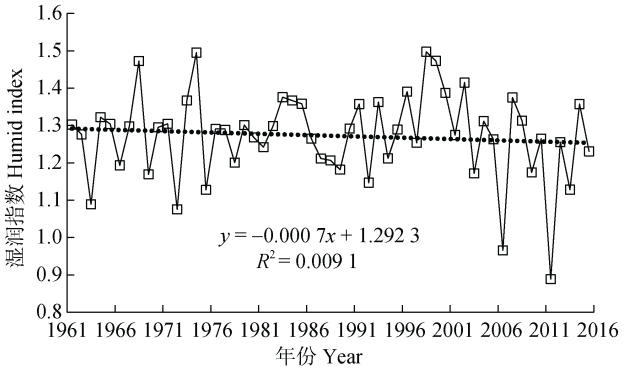

图 3 1961—2015 年西南区域单季稻生长季湿润指数变化曲线图

Fig. 3 Curve of change in humid index of single cropping rice growing season in Southwest China from 1961 to 2015

和−2.6 mm·(10a)$^{-1}$，但均未通过α=0.05的显著性检验。分省来看，四川和贵州湿润指数、降水量和ET_0的变化特征与西南区域一致，湿润指数变化很小，而降水量和ET_0均呈不显著的减少趋势。重庆湿润指数的气候倾向率为每10年增加0.01，而降水量和ET_0均呈减少趋势，其中ET_0的减少显著。云南湿润指数的气候倾向率为每10年减少0.02，降水量和ET_0的气候倾向率分别为−10.8 mm·(10a)$^{-1}$和0.2 mm·(10a)$^{-1}$，但均未通过显著性检验。

图4为1961—2015年西南区域单季稻生长季湿润指数、降水量与ET_0气候倾向率的空间分布。由图4a可知，西南区域40.8%(n=129)的站点湿润指数的气候倾向率为正值(气候变湿)，主要分布于四川盆地东北部和攀西地区、重庆南部、贵州北部和西部及云南东北部，但变化率通过α=0.05显著性检验的站点仅占总站点的2.5%；西南其他大部地区湿润指数的气候倾向率为负值(气候变干)，变化率为−0.30~0 ·(10a)$^{-1}$，但通过显著性检验的站点仅占2.2%。由图4b可知，西南区域有26.6%(n=84)的站点上降水量呈增加趋势，主要分布于四川盆地东北部和攀西地区、重庆西南部，而变化率通过显著性检验的站点仅占总站点的0.9%；其他大部地区的降水量呈减少趋势，变化率为−86.6~0 mm·(10a)$^{-1}$，但通过显著性检验的站点仅占3.8%。由图4c可知，西南区域有34.8%(n=110)的站点ET_0呈增加趋势，主要分布于云南大部和四川攀西地区，变化率为0.1~38.7 mm·(10a)$^{-1}$，而通过显著性检验的站点占总站点的12.0%；其他地区的ET_0呈减少趋势，变化率为−43.6~0 mm·(10a)$^{-1}$，通过显著性检验的站点占25.3%。

表 3 1961—2015 年西南区域单季稻生长季湿润指数、降水量与参考作物蒸散量(ET_0)的变化

Table 3 Variation of humid index, precipitation and ET_0 in single cropping rice growing season in Southwest China from 1961 to 2015

区域 Region	气候倾向率 Climatic trend rate		
	湿润指数 Humid index [·(10a)$^{-1}$]	降水量 Precipitation [mm·(10a)$^{-1}$]	ET_0 [mm·(10a)$^{-1}$]
西南区域 Southwest China area	—	−7.6	−2.6
重庆市 Chongqing City	0.01	−2.0	−6.8*
四川省 Sichuan Province	—	−3.0	−2.3
云南省 Yunnan Province	−0.02	−10.8	0.2
贵州省 Guizhou Province	—	−10.1	−5.3

表示气候倾向率在 95%的置信水平上显著。 denotes the significant trend at 95% confidence level.

降水量和ET_0的变化影响湿润指数的变化，从而导致当地气候干湿状况的变化。综上所述，导致不同地区单季稻生长季内气候干湿变化的影响因素不同，四川盆地东北部、云南东北部降水量的增加和ET_0的减少导致气候变湿；四川攀西地区降水量的增加幅度大于ET_0的增加幅度，导致气候变湿；重庆南部、贵州北部和西部降水量的减少幅度小于ET_0的减少幅度，导致气候变湿；云南大部降水量的减少和ET_0的增加导致气候变干；而西南其他区域则是降水量的减少幅度大于ET_0的减少幅度，导致气候变干。

2.2 单季稻生长季 ET_0 对主要气候要素的敏感系数

图5是1961—2015年西南区域单季稻生长季ET_0对主要气候要素敏感系数的空间分布。ET_0对平均气温的敏感系数为−0.045~−0.02；敏感性较高(敏感系数的绝对值较大)的区域主要分布在四川盆地和贵州大部、重庆中部，敏感系数为−0.045~−0.04。ET_0对相对湿度的敏感系数为−0.89~−0.08；敏感性较高的区域主要分布在贵州中部和云南东部，敏感系数为−0.89~−0.50。ET_0对日照时数的敏感系数为0.15~0.39；敏感性较高的区域主要分布在云南南部，敏感系数为0.34~0.39。ET_0对风速的敏感系数为0.02~0.24；敏感性较高的区域主要分布在四川攀西地区、云南的中部和东部，敏感系数为0.11~0.24。综上所述，西南区域单季稻生长季ET_0对平均气温

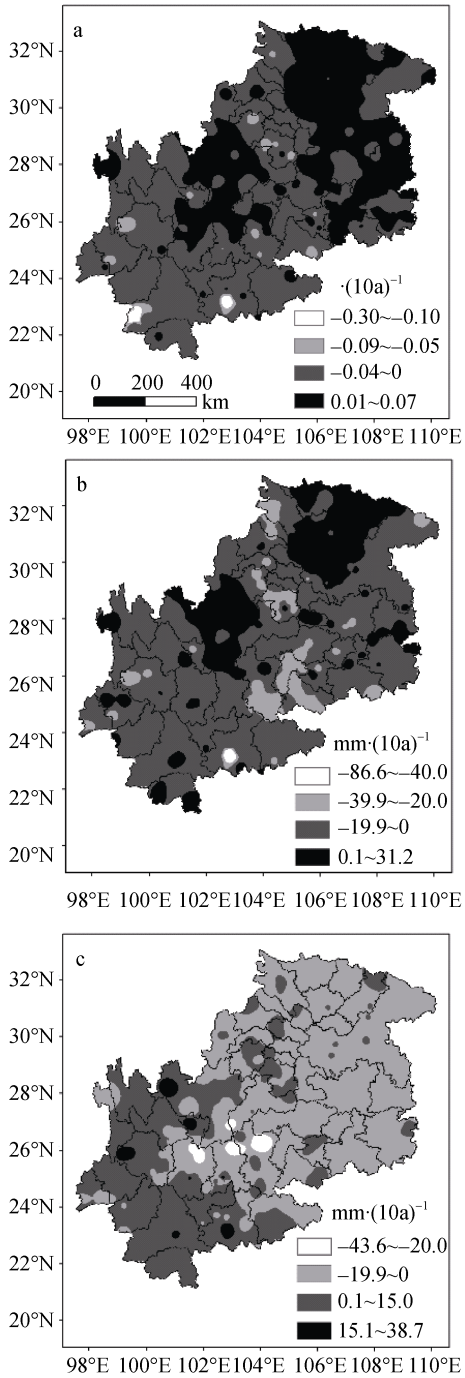

图 4　1961—2015 年西南区域单季稻生长季湿润指数(a)、降水量(b)与参考作物蒸散量(c)气候倾向率的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of the climatic trend rates of humid index (a), precipitation (b) and ET_0 (c) in single cropping rice growing season in Southwest China from 1961 to 2015

和相对湿度的敏感系数为负，说明ET_0随平均气温和相对湿度的增加而减小；ET_0对日照时数和风速的敏感系数为正，说明ET_0随日照时数和风速的增加而增加(图5)。总体来看，1961—2015年西南区域水稻ET_0对主要气候要素的敏感性大小为(括号内为敏感系数值)：相对湿度(−0.368)>日照时数(0.290)>风速(0.075)>平均气温(−0.038)(表4)。

由表4可知，与整个西南区域的结果一致，各省市ET_0对平均气温和相对湿度的敏感系数均为负，说明ET_0随平均气温和相对湿度的增加而减小；而ET_0对日照时数和风速的敏感系数为正，说明ET_0随日照时数和风速的增加而增加。四川、云南和贵州ET_0对主要气候要素的敏感性大小为：相对湿度>日照时数>风速>平均气温，重庆的敏感性为：日照时数>相对湿度>风速>平均气温。其中贵州ET_0对相对湿度的敏感性最高，敏感系数为−0.420；而云南ET_0对平均气温的敏感性最小，敏感系数为−0.035。

2.3　单季稻生长季主要气候要素对参考作物蒸散量的贡献率

图6是1961—2015年西南区域单季稻生长季主要气候要素对ET_0贡献率的空间分布。由图6可知，平均气温对ET_0的贡献率为−2.0%~0.2%，贡献率为负值的站点占总站点的87.3%，其中四川盆地南部、云南西部和东部为负贡献率高值区。相对湿度对ET_0的贡献率为−2.9%~5.5%，贡献率为正值的站点占82.6%，其中四川盆地西部、云南中东部为正贡献率高值区。日照时数对ET_0的贡献率为−15.8%~9.3%，贡献率为负值的站点占76.9%，其中四川盆地东北部、重庆和贵州的部分地区为负贡献率高值区。风速对ET_0的贡献率为−14.6%~11.1%，贡献率为负值的站点占总站点的76.9%，其中四川盆地西部和北部、云南的中东部为负贡献率高值区。

进一步分析单季稻生长季主要气候要素对ET_0贡献率的平均值。由表5可知，西南区域相对湿度对ET_0贡献率的平均值为正，说明1961—2015年相对湿度的变化导致ET_0增加。结合表5和表6分析原因，西南区域ET_0对相对湿度的敏感系数为负，因此近55年来相对湿度的显著下降[变化率为−0.51% ·(10a)$^{-1}$，$P<0.01$]导致ET_0的增加。而西南区域平均气温、日照时数和风速对ET_0贡献率的平均值为负，说明1961—2015年平均气温、日照时数和风速的变化引起ET_0的减小。从原因来看，ET_0对平均气温的敏感系数为负，因此平均气温的显著上升[变化率为0.12℃·(10a)$^{-1}$，$P<0.01$]导致ET_0的减小；ET_0对日照时数和风速的敏感系数为正，因此日照时数和风速的显著下降[变化率分别为−17.0 h·(10a)$^{-1}$和−0.07 m·s^{-1}·(10a)$^{-1}$，$P<0.01$]导致ET_0的减小。比较各气候要素对ET_0贡献率的权重来看：日照时数>风速>相对湿度>平均气温，贡献率的平均值分别是−3.142%、−1.727%、1.350%和−0.124%。由此可知，西南区域单季稻生长季日照时数和风速的显著下降是ET_0减小的主要原因。

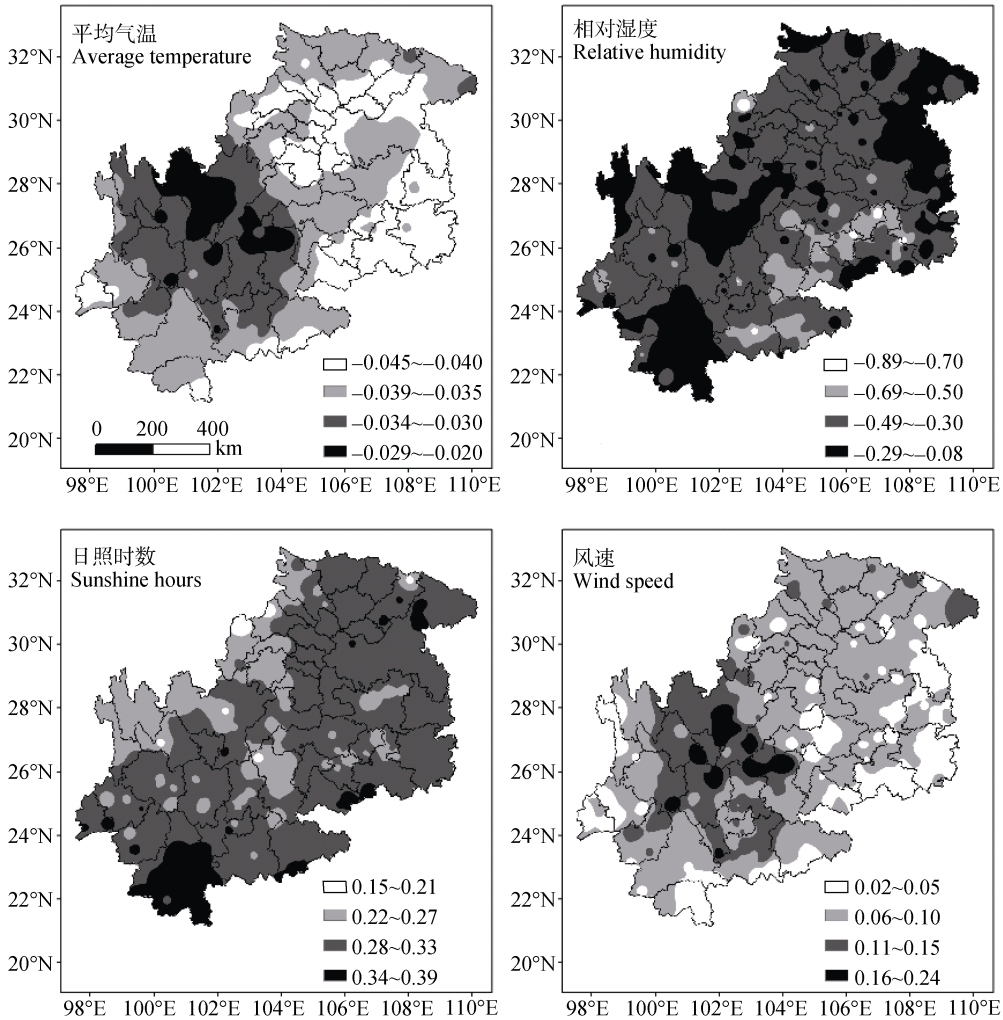

图 5 1961—2015 年西南区域单季稻生长季参考作物蒸散量对主要气候要素敏感系数的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of the mean annual sensitivity coefficients of ET_0 to the main climatic factors in single cropping rice growing season in Southwest China from 1961 to 2015

表 4 1961—2015 年西南区域单季稻生长季参考作物蒸散量对主要气候要素敏感系数的平均值

Table 4 Averages of the mean annual sensitivity coefficients of ET_0 to the main climatic factors in single cropping rice growing season in Southwest China from 1961 to 2015

区域 Region	敏感系数 Sensitivity coefficient			
	平均气温 Average temperature	相对湿度 Relative humidity	日照时数 Sunshine hours	风速 Wind speed
西南区域 Southwest China area	−0.038	−0.368	0.290	0.075
重庆市 Chongqing City	−0.040	−0.290	0.305	0.066
四川省 Sichuan Province	−0.038	−0.347	0.283	0.083
云南省 Yunnan Province	−0.035	−0.369	0.292	0.088
贵州省 Guizhou Province	−0.040	−0.420	0.289	0.052

各省市单季稻生长季主要气候要素对ET_0贡献率及影响因素与整个西南区域一致。由表5和表6可知，相对湿度对ET_0贡献率的平均值为正，近55年来相对湿度的下降导致ET_0的增加。平均气温、日照时数和风速对ET_0贡献率的平均值为负，平均气温的上升、日照时数和风速的下降导致ET_0的减小。由贡献率的权重来看，重庆和四川日照时数和风速的显著下降是ET_0减小的主要原因，贵州日照时数的显著下降是ET_0减小的主要原因，而云南相对湿度的显著下降是ET_0增加的主要原因。

3 讨论

全球气候变暖使大气中的水汽含量增加，进而导致全球降水强度在时空尺度上发生非均匀变化[2]，

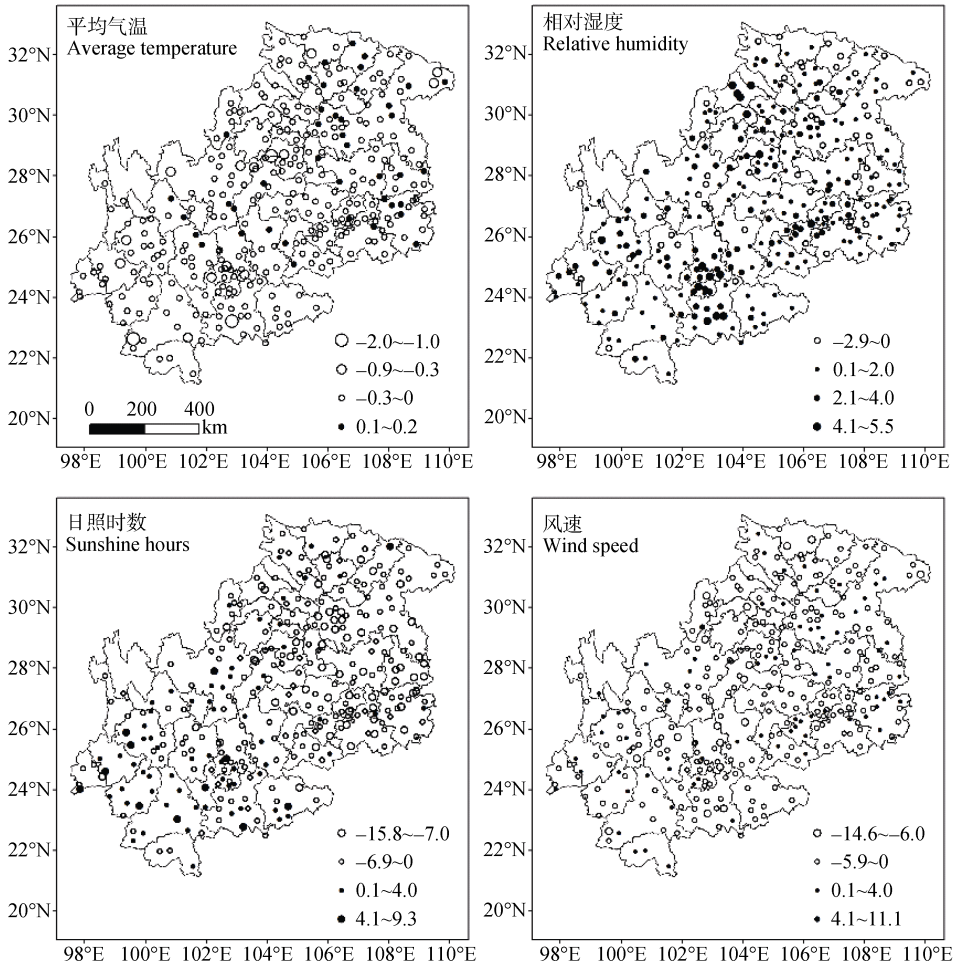

图 6　1961—2015 年西南区域单季稻生长季主要气候要素对参考作物蒸散量贡献率(%)的空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of contribution rates (%) to ET_0 of the main climatic factors in single cropping rice growing season in Southwest China from 1961 to 2015

表 5　1961—2015 年西南区域单季稻生长季主要气候要素对参考作物蒸散量贡献率的平均值

Table 5　Average of contribution rates to ET_0 of the main climatic factors in single cropping rice growing season in Southwest China from 1961 to 2015

区域 Region	贡献率 Contribution rate (%)			
	平均气温 Average temperature	相对湿度 Relative humidity	日照时数 Sunshine hours	风速 Wind speed
西南区域 Southwest China area	−0.124	1.350	−3.142	−1.727
重庆市 Chongqing City	−0.035	0.647	−5.923	−1.427
四川省 Sichuan Province	−0.129	1.383	−2.929	−1.902
云南省 Yunnan Province	−0.182	1.690	−0.820	−2.377
贵州省 Guizhou Province	−0.068	1.094	−5.697	−0.694

表 6　1961—2015 年西南区域单季稻生长季主要气候要素的变化

Table 6　Variations of the main climatic factors in single cropping rice growing season in Southwest China from 1961 to 2015

区域 Region	气候倾向率 Climatic trend rate			
	平均气温 Average temperature [℃·(10a)$^{-1}$]	相对湿度 Relative humidity [%·(10a)$^{-1}$]	日照时数 Sunshine hours [h·(10a)$^{-1}$]	风速 Wind speed [m·s^{-1}·(10a)$^{-1}$]
西南区域 Southwest China area	0.12**	−0.51**	−17.0**	−0.07**
重庆市 Chongqing	0.04	−0.32	−29.2**	−0.05**
四川省 Sichuan	0.11*	−0.55**	−16.5*	−0.08**
云南省 Yunnan	0.18**	−0.63**	−6.1	−0.10**
贵州省 Guizhou	0.06	−0.39*	−28.7**	−0.05**

*和**分别表示气候倾向率在 95%和 99%的置信水平显著。* and ** denote significant trends at 95% and 99% confidence levels, respectively.

从而影响气候的干湿状况。西南区域是我国水稻主产区之一，然而由于复杂的地形特点使得气候类型多样，该地区成为中国气候变化研究高度重视的敏感区和脆弱区[9]，加之水资源时空分布不均，部分地区水资源短缺，气象灾害频发等问题制约了西南区域农业发展并影响了农业生态环境[11]。

本研究发现，西南区域单季稻生长季的半湿润区和湿润区的划分与胡琦等[25]的研究类似，这说明西南区域单季稻生长季干湿状况的空间分布特征与全年基本一致。研究还指出，单季稻生长季内，四川盆地东北部和攀西地区、重庆南部、贵州北部和西部及云南东北部气候变湿，其余大部地区气候变干，这与张建平等[24]基于湿润指数距平率对西南水稻干旱时空分布特征的研究结论类似。而西南区域水利设施有限，几乎每一年都可能出现池塘干涸、河流水位下降和部分河流断流的现象，加上区域内降水量的时空分布和水稻生长的季节性不匹配，常造成水稻发生季节性干旱[24]。因此，对于气候变干地区来说，在水稻生产中应更注重灌溉、提高水分利用效率[33]、选育高产优质抗逆性强的品种并调整种植面积与品种布局，以充分利用农业气候资源优势，科学应对暖干化的影响[12]。另外，本研究发现，导致西南不同地区单季稻生长季内干湿演变的影响因素不同。降水量增加和ET_0减少导致四川盆地东北部、云南东北部气候变湿；降水量增加对湿润指数的正效应大于ET_0增加对湿润指数的负效应，导致四川攀西地区气候变湿；降水量减少对湿润指数的负效应小于ET_0减少对湿润指数的正效应，导致重庆南部、贵州北部和西部气候变湿；降水量减少和ET_0增加导致云南大部气候变干；降水量减少对湿润指数的负效应大于ET_0减少对湿润指数的正效应，导致西南其他区域气候变干。该结论可为针对不同区域采取不同措施以减小气候变化对水稻生产的不利影响提供理论基础。

在影响气候干湿变化的降水量和ET_0的2个要素中，ET_0主要受平均温度、相对湿度、日照时数和风速等气象要素的综合影响[34-36]。鉴于此，本文定量分析了西南区域单季稻生长季ET_0对4个气候要素的敏感性，以及4个气候要素对ET_0的贡献率。研究表明：西南区域和各省市单季稻生长季ET_0对平均气温和相对湿度的敏感系数为负，而对日照时数和风速的敏感系数为正。同时，在有些区域的研究结论中还发现了“蒸发悖论”现象[25,30]，即平均气温的显著升高引起ET_0的减小。通过贡献率的分析结果来看，重庆和四川单季稻生长季日照时数和风速的显著下降导致ET_0减小，贵州日照时数的显著下降导致ET_0减小，但云南相对湿度的显著下降导致ET_0增加。由此可见，不同区域影响ET_0量变化的关键因子不同，这与其他一些学者的结论类似[25,30]。

本研究利用Penman-Monteith公式计算ET_0，考虑了气温、相对湿度、水气压、日照时数和风速等要素的影响，物理意义明确[37]。然而，此方法的参数估计在不同区域间存在误差，可能导致计算得到的湿润指数和当地实际的干湿情况存在偏差。并且不同气候条件、地形、经纬度和土壤状况等都会导致不同区域的实际蒸发量有所差异[38-39]。因而，为了提供计算的准确性，还需根据不同区域实际蒸发量数据对ET_0进行验证与校正。

4 结论

本文基于西南稻区316个气象站点1961—2015年的观测资料，分析了近55年西南区域单季稻生长季干湿演变特征及影响因素，本研究结果对评估作物需水量、采取有效的节水灌溉措施以保证作物安全生产具有指导意义[25]。结果表明：

西南区域单季稻生长季的半湿润区主要分布在四川攀西地区南部、云南中部和东北部，其余大部均属湿润区。和1961—1990年相比，1991—2015年研究区域内的半湿润区面积增加4 278 km^2，而湿润区面积呈减小的趋势。近55年来，西南区域有40.8%的站点气候变湿，其余地区气候变干，不同地区降水量和ET_0变化的不同组合导致气候干湿演变特征存在空间差异。

西南区域单季稻生长季ET_0对平均气温、相对湿度、日照时数和风速的敏感系数分别为–0.045~–0.02、–0.89~–0.08、0.15~0.39和0.02~0.24。总体来看，西南区域ET_0随平均气温和相对湿度的增加而减小，而随日照时数和风速的增加而增加，敏感性大小为：相对湿度>日照时数>风速>平均气温。

西南区域单季稻生长季平均气温、相对湿度、日照时数和风速对ET_0的贡献率分别为–2.0%~0.2%、–2.9%~5.5%、15.8%~9.3%和–14.6%~11.1%，贡献率为负值的站点分别占总站点的87.3%、17.4%、76.9%和76.9%。西南区域日照时数和风速的显著下降是ET_0减小的主要原因。

参考文献 References

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group Ⅰ to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013

[2] OVERLAND J E, WANG M. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice[J]. Tellus A, 2010, 62(1): 1–9

[3] 王菱, 谢贤群, 李运生, 等. 中国北方地区 40 年来湿润指数和气候干湿带界线的变化[J]. 地理研究, 2004, 23(1): 45–54
WANG L, XIE X Q, LI Y S, et al. Changes of humid index and borderline of wet and dry climate zone in northern China over the past 40 years[J]. Geographycal Reasearch, 2004, 23(1): 45–54

[4] 刘波, 马柱国. 过去 45 年中国干湿气候区域变化特征[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 7–15
LIU B, MA Z G. Area change of dry and wet regions in China in the past 45 years[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1): 7–15

[5] GRANDERSON A A. Making sense of climate change risks and responses at the community level: A cultural political lens[J]. Climate Risk Mangement, 2014, 3(C): 55–64

[6] 普宗朝, 张山清, 王胜兰, 等. 近 48a 新疆干湿气候时空变化特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1563–1572
PU Z C, ZHANG S Q, WANG S L, et al. The spatial-temporal variation characteristic of dry-wet climate in recent 48 years in Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1563–1572

[7] 石兴琼, 肖天贵, 房玉, 等. 西南地区不同地质灾害影响区的降水阈值研究[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(1): 63–67
SHI X Q, XIAO T G, FANG Y, et al. Study of precipitation concentration threshold at the different geological disaster affected zone in Southwest China[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016, 36(1): 63–67

[8] 李瀚, 韩琳, 贾志军, 等. 中国西南地区地面平均相对湿度变化分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(4): 42–47
LI H, HAN L, JIA Z J, et al. The changes of the average relative humidity in Southwest China[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016, 36(4): 42–47

[9] 齐冬梅, 周长艳, 李跃清, 等. 西南区域气候变化原因分析[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(1): 35–42
QI D M, ZHOU C Y, LI Y Q, et al. Cause analysis of climate changes in Southwest China[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2012, 32(1): 35–42

[10] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018

[11] 《西南区域气候变化评估报告》编写委员会. 西南区域气候变化评估报告[M]. 北京: 气象出版社, 2013
Compilation Committee of the Assessment Report on Climate Change in Southwest China. Assessment Report on Climate Change in Southwest China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013

[12] 矫梅燕, 周广胜, 陈振林. 气候变化对中国农业影响评估报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2014
JIAO M Y, ZHOU G S, CHEN Z L. Assessment Report of Climatic Change Impacts on Agriculture in China[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2014

[13] 蔡元刚, 王明田, 周志君, 等. 帕默尔旱度模式在绵阳干旱研究中的应用[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(2): 55–59
CAI Y G, WANG M T, ZHOU Z J, et al. Palmer drought severity model and its application in Mianyang[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2010, 30(2): 55–59

[14] 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(1): 80–94
ZHOU G S. Research prospect on impact of climate change on agricultural production in China[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2015, 38(1): 80–94

[15] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1–11
GUO J P. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(1): 1–11

[16] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 378–387
GAO G, CHEN D L, REN G Y, et al. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000[J]. Geography Research, 2006, 25(3): 378–387

[17] 倪广恒, 李新红, 丛振涛, 等. 中国参考作物蒸发量时空变化特性分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 1–4
NI G H, LI X H, CONG Z T, et al. Temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in China[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 1–4

[18] 吴丽萍, 陈洪松, 连晋姣, 等. 喀斯特与非喀斯特地区参考作物蒸散量时空变化分析——以广西壮族自治区为例[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1508–1517
WU L P, CHEN H S, LIAN J J, et al. Spatio-temporal variation in reference evapotranspiration in recent 50 years in karst and non-karst areas in Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(10): 1508–1517

[19] GONG L B, CHONG Y X, CHEN D L, et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climate variables in the Changjiang (Yangtze River) Basin[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329: 620–629

[20] 刘小莽, 郑红星, 刘昌明, 等. 海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1470–1476
LIU X M, ZHENG H X, LIU C M, et al. Sensitivity of the potential evapotranspiration to key climatic variables in the Haihe River Basin[J]. Resources Science, 2009, 31(9): 1470–1476

[21] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 东北地区参考作物蒸散量对主要气象要素的敏感性分析[J]. 中国农业气象, 2010, 31(1): 11–18
ZENG L H, SONG K S, ZHANG B, et al. Sensitive analysis on reference evapotranspiration to key meteorological factors in Northeast China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(1): 11–18

[22] 曹雯, 申双和, 段春锋. 西北地区近 49 年生长季参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(3): 375–381
CAO W, SHEN S H, DUAN C F. Sensitivity analysis of the

reference crop evapotranspiration during growing season in the Northwest China in recent 49 years[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(3): 375–381

[23] 刘丽芳, 刘昌明, 王中根, 等. HIMS 模型蒸散发模块的改进及在海河流域的应用[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1339–1347
LIU L F, LIU C M, WANG Z G, et al. Improvement of HIMS evapotranspiration module and its application in Haihe River Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(10): 1339–1347

[24] 张建平, 刘宗元, 何永坤, 等. 西南地区水稻干旱时空分布特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3103–3110
ZHANG J P, LIU Z Y, HE Y K, et al. Temporal and spatial distribution of rice drought in Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3103–3110

[25] 胡琦, 董蓓, 潘学标, 等. 1961—2014 年中国干湿气候时空变化特征及成因分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 124–132
HU Q, DONG B, PAN X B, et al. Spatiotemporal variation and causes analysis of dry-wet climate over period of 1961–2014 in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(6): 124–132

[26] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements — FAO Irrigation and Drainage Paper 56[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 37–58

[27] 魏凤英. 现代气候统计与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 37–38
WEI F Y. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 37–38

[28] 王鹏涛, 延军平, 蒋冲, 等. 华北平原参考作物蒸散量时空变化及其影响因素分析[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5589–5599
WANG P T, YAN J P, JIANG C, et al. Spatial and temporal variations of reference crop evapotranspiration and its influencing factors in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5589–5599

[29] BEVEN K A. Sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates[J]. Journal of Hydrology, 1979, 44(3): 169–190

[30] 胡琦, 董蓓, 潘学标, 等. 不同时间尺度下华北平原干湿气候时空变化及成因分析[J]. 中国农业气象, 2017, 38(5): 267–277
HU Q, DONG B, PAN X B, et al. Spatiotemporal variation and causes analysis of dry-wet climate at different time scales in North China Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(5): 267–277

[31] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942–956
REN G Y, GUO J, XU M Z, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(6): 942–956

[32] MA Z F, LIU J, ZHANG S Q, et al. Observed climate changes in Southwest China during 1961–2010[J]. Advances in Climate Change Research, 2013,4(1):30–40

[33] 陈超, 庞艳梅, 潘学标. 气候变化背景下四川省单季稻水分盈亏的变化特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1508–1519
CHEN C, PANG Y M, PAN X B. Characteristics of single cropping rice water surplus deficit under the background of climate change in Sichuan Province[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(9): 1508–1519

[34] ANNANDALE J G, STOCKLE C O. Fluctuation of crop evapotranspiration coefficients with weather: A sensitivity analysis[J]. Irrigation Science, 1994, 15(1): 1–7

[35] SHARIFI A, DINPASHOH Y. Sensitivity analysis of the Penman-Monteith reference crop evapotranspiration to climatic variables in Iran[J]. Water Resources Management, 2014, 28(15): 5465–5476

[36] KHEIRKHAH F. Sensitivity of reference crop evapotranspiration to global warming: A case study of Caspian forests of northern Iran (*Qaem shahr*)[J]. Advances in Environmental Biology, 2014, 8(5): 1472–1479

[37] BERENGENA J, GAVILÁN P. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2005, 131(2): 147–163

[38] RAZZAGHI F, SEPASKHAH A R. Calibration and validation of four common ET_0 estimation equations by lysimeter data in a semi-arid environment[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2012, 58(3): 303–319

[39] 赵俊芳, 郭建平, 徐精文, 等. 基于湿润指数的中国干湿状况变化趋势[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 18–24
ZHAO J F, GUO J P, XU J W, et al. Trends of Chinese dry-wet condition based on wetness index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 18–24