

DOI: 10.5846/stxb201503290603

李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 西南地区水稻水分亏缺率时空变化特征及其影响因素. 生态学报, 2016, 36(18): - - .

Li S S, Yang S N, Liu X F. Spatiotemporal variability of rice water deficiency during 1960—2013 and its influencing factors in Southwestern China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): - - .

西南地区水稻水分亏缺率时空变化特征及其影响因素

李双双^{1,2}, 杨赛霓^{1,2,*}, 刘宪锋^{1,3}

1 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875

3 北京师范大学资源学院, 北京 100875

摘要: 基于西南及周边地区 1960—2013 年气象观测资料, 本文分析了近 54 年西南地区水稻生长季水分亏缺率时空变化特征, 探讨了环流异常、地理环境与水分亏缺率时空变化的关系。结果表明: 在空间格局上, 由于受气候条件和地理环境影响, 东部丘陵区水分亏缺相对较多, 云贵高原水分供给相对充足, 且水分亏缺区和盈余区分别呈现出“一带两中心”的分布特征; 在变化趋势上, 近 54 年西南地区水稻水分亏缺呈现“整体变干、局部变湿”的空间格局, “甘孜—钦州”一线以南地区水分亏缺率呈现增大趋势, “甘孜—钦州”一线以北地区水分亏缺率呈现“增大—减小相间”的分布格局; 在影响因素上, NAO、ENSO 与西南地区水稻水分亏缺率变化具有相关性。在 NAO 正相位时, 除广西丘陵区沿海地带部分站点水分亏缺率呈下降趋势外, 整个地区干旱化程度加剧; 在厄尔尼诺年, 西南地区水分亏缺率存在地域分异, 横断山区、四川盆地和云贵高原水分亏缺率呈上升趋势, 东部丘陵区水分亏缺率则呈下降趋势。全球变暖背景下, 西南地区水稻水分亏缺率逐年增加, 对灌溉蓄水依赖明显, 增大了区域农业脆弱性。

关键词: 气候变化; 水分亏缺率; 水稻; 时空变化; 西南地区

Spatiotemporal variability of rice water deficiency during 1960—2013 and its influencing factors in Southwestern China

LI Shuangshuang^{1,2}, YANG Saini^{1,2,*}, LIU Xianfeng^{1,3}

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 College of Resource Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Many parts of China have experienced frequent and severe droughts over the past century, particularly southwestern China. These severe droughts had substantial ecological and socioeconomic impacts. Cognition and awareness of water deficit is important to understand the supply-demand situation, ensure rational utilization of water resources, and minimize the adverse impacts of drought. This study analyzed the spatiotemporal variation of water deficit rates during the rice growing seasons in southwestern China over a period from 1960 to 2013. The Penman-Monteith model was used to estimate the reference evapotranspiration of rice during the growing seasons and a simple approximation following the method developed by the USDA Soil Conservation Service was used to compute the effective precipitation. Pearson's correlation coefficients were then used to evaluate the linear relationships between water deficits and oscillation factors, although the model data frequently underestimated non-linear information, and synthetic analyses were used to further reveal the characteristics of water deficit anomalies in response to fluctuations in the North Atlantic Oscillation (NAO) and El Niño

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB955402); 地表过程模型与模拟创新研究群体科学基金(41321001)

收稿日期: 2015-03-29; **网络出版日期:** 2016-03-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangsaini@bnu.edu.cn

Southern Oscillation. Furthermore, we analyzed the relationships between spatial patterns of rice water deficits and geographical environments and attempted to identify the most important explanatory drivers for the spatial distribution of water deficits in southwestern China. The results showed that the amount of rice water deficiency was negative for the growing seasons in the study area during 1960—2013, which means that water surpluses persisted in aggregates. The spatial distribution of rice water deficiency was affected by climatic and geographic factors. Rice water deficiency presented a clear pattern that was high in the eastern hilly region and low in the Yunnan-Guizhou Plateau. Water deficit and surplus in some regions displayed a “one stripe with two centers” pattern, e.g., eastern hilly region, east Sichuan, and eastern Guizhou Plateau comprised one saddle-shaped deficit region. Ganzi-Xiaojin, located northeast of the Hengduan Mountains, and Yuanjiang-Meizi, in the Red River Valley of the Yunnan Province, displayed two deficit regions. The southwestern margin of the Yunnan-Guizhou Plateau was one surplus region, whereas Laifeng-Youyang in the Wushan Mountains and Leshan-Ya’an in the low mountain-hill area around the western Sichuan basin comprised two surplus regions. Spatial trends of rice water deficiency showed “drying over the whole area and wetting in parts” patterns in southwestern China during 1960—2013. Water deficiency had an increasing trend in southern parts of the Ganzi-Qinzhou line, whereas data showed alternate increasing and decreasing trends in northern parts of the Ganzi-Qinzhou line. The synthetic analysis revealed that anomalies for rice water deficiencies were induced by remote forcing from the tropical Pacific and North Atlantic Oceans. During the positive phase of the NAO, other than a few hilly areas in the Guangxi Province, the land became much drier and rice water deficiency increased significantly during the growing season. During El Niño years, rice water deficiency showed obvious spatial differences whereby decreasing trends were detected in eastern hilly areas and increasing trends were detected in other regions. Together, these findings highlight that increases of rice water deficiency during growing seasons can aggravate the discrepancies between water supply and demand and increase agricultural fragmentation in southwestern China.

Key Words: climate change; water deficit rate; rice; spatiotemporal variation; southwestern China

西南地区作为中国重要的生态屏障区,是全球生物多样性保护热点区,也是重要的农业和经济作物生产区。独特的地理位置和复杂的地形地貌,加之不稳定的季风气候,使得西南地区成为中国干旱灾害最为频发的地区之一^[1]。进入 21 世纪后,中国持续性干旱中心逐渐由华北地区转向西南地区,如 2005 年云南异常春旱,2006 年川渝特大伏旱以及 2009—2011 年西南罕见持续性干旱均发生在西南地区^[2-3]。日益严峻的干旱灾害给对西南地区经济、社会和生态造成了巨大的影响,并引发了人和牲畜饮水困难、湖泊水库干涸等一系列不利事件,已引起政府和学界的高度关注与研究。

近年来,中国学者针对西南地区干旱监测预警指标选取、大气环流异常致灾机制和历史干旱时空变化等方面进行了大量研究,并取得了丰富成果^[4-16]。由于干旱事件的复杂性,在众多研究中,采取多种气象干旱指数分析西南地区干旱时空变化特征^[4-7];并从大气环流异常角度,分析了西南地区持续性干旱形成机制^[8-11],探讨了持续性干旱对农业、社会和生态系统的影响^[12-16]。综合分析已有研究发现:在研究区域上,以西南地区或分省干旱研究相对较多,对不同自然地理单元综合对比研究相对较少;在研究方法上,以降水为主的干旱指数研究相对较多,针对具体农作物生长季水分亏缺率研究相对较少;在机制分析上,以 2009—2010 年西南秋冬典型干旱事件形成机制研究相对较多,针对作物生长季水分亏缺率影响因素研究相对较少。

当前,气候变化对不同区域农作物灌溉需水量或水分亏缺率研究受到国内外学者关注^[17-20]。如黄志刚等利用作物系数法和 McCloud 模型,分析了气候变化对松嫩平原水稻灌溉需水量的影响^[21];许莹等分析了淮河流域冬小麦水分亏缺时空变化特征^[22];Elgaali 等分析了气候变化对美国阿肯色河流域灌溉需水量的影响^[23];Leng 等分析了气候变化对中国省域灌溉需水量的影响^[24];MacKirby 等分析了孟加拉国干季作物灌溉需水量时空变化特征^[25];Elliott 等分析了气候变化下未来灌溉用水对农业生产的限制和潜力因素^[26];胡玮等分析了气候变化对华北平原冬小麦生育期和灌溉需水量的影响^[27]。在区域尺度选取典型农作物,分析生长

季水分亏缺率时空变化特征,探讨生长季水分亏缺率的影响因素,对西南地区科学适应和应对气候变化具有重要现实意义。

西南地区是中国水稻主产区之一,2013 年,水稻种植面积 $656.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占西南地区种植面积的 20.6%。作为西南地区主要粮食作物,水稻对环境水分变化异常敏感,持续性干旱对水稻产量具有重要影响。基于此,选取西南及周边地区水稻作为研究对象,利用 FAO Penman-Monteith 模型,对水稻生长季参考作物蒸散量 (ET_0) 进行估算,本文分析了近 54 年西南地区水稻生长季水分亏缺率时空变化特征,探讨了环流异常、地理环境与水分亏缺率变化关系,以为构建区域干旱灾害综合风险防范体系提供理论依据。

1 研究区概况

西南地区是中国七大地理分区之一,主要包括四川盆地、秦巴山地、云贵高原等地貌单元。为了对比西南地区水稻生长季水分亏缺率变化特征,在西南地区自然区划基础上,保持行政单元和地理环境的完整性,本文将研究区分为 4 个子区域:云贵高原区、四川盆地、横断山脉区和东部丘陵区(图 1)。

(1) 云贵高原。云贵高原是我国第四大高原,西起横断山脉,北邻四川盆地,东至湖南雪峰山,包括云南东部、贵州全部、广西西北部和川、渝、湘、鄂边境,位于我国南北走向和东北—西南走向的两组山脉交汇处。地势西北高,东南低,南北之间高差悬殊,加剧了区域因纬度因素而造成的气候差异,常出现“北部炎热南部凉”的现象^[28]。在降水方面,受西南季风影响,夏季潮湿闷热,降水充沛,6—8 月降水占全年降水量 60.0%。

(2) 横断山区。横断山脉位于青藏高原东南缘,东起邛崃山,西至伯舒拉岭,北界位于甘孜—马尔康一线,南抵中缅边境山区,为典型的纵向岭谷区,是印度洋暖湿气流进入中国的主要通道^[29]。受西南季风和东南季风控制,降水具有明显季节差异,湿季为 5—10 月,降水占全年 85.0%以上。

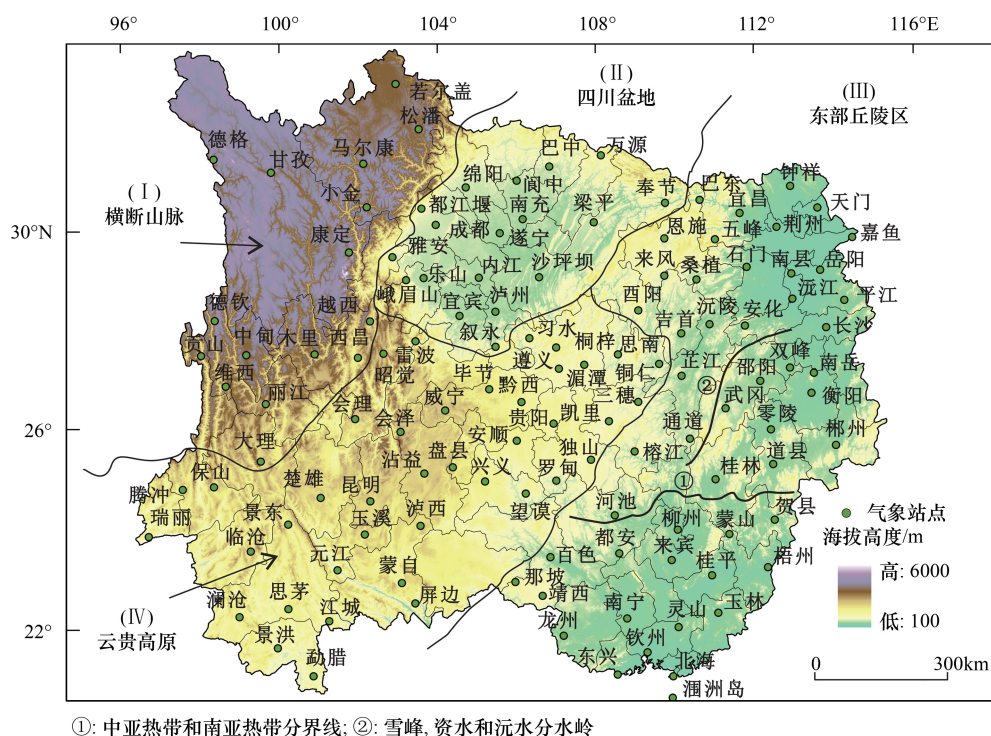


图 1 研究区域及气象站点分布图

Fig.1 Study area and distribution of meteorological stations

(3) 四川盆地。四川盆地是中国四大盆地之一,以“广元—雅安—叙永—奉节”构成菱形盆地格局。气候为亚热带季风性湿润气候,盆地闭塞,气温东南高西北低,盆地高边缘低,且高于同纬度地区。其中,重庆是长江流域“四大火炉”之一,盛夏高温常造成东南部严重的干旱;降水则边缘高于中间,盆地年降水量 1000。

0—1300.0 mm, 边缘山地降水充沛, 如乐山、雅安之间的西缘山地年降水在 1500.0—1800.0 mm, 有“华西雨屏”之称^[28]。

(4) 东部丘陵区。东部丘陵区位于云贵高原向江南丘陵、南岭地区向江汉平原的过渡地带, 以湖南为中心, 南为广西丘陵, 北为巫山山区、洞庭湖和江汉平原。以贺州—东兰为界, 北部为中亚热带, 南部为南亚热带。南部降水为 1500.0—2000.0 mm, 空间上东多西少, 丘陵山区多, 河谷平原少, 夏季迎风坡多, 背风坡少; 北部降水为 1400.0—1600.0 mm, 6 月中旬—7 月中旬为梅雨期, 加之地形东南西三面环山, 北面开阔, 南面暖湿气流难易进来, 北面冷高压可直达南岭, 极易受单一的暖气团控制, 晴热少雨, 形成区域性干旱灾害。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

1960—2013 年逐日降水、平均气温、相对湿度、日照时数和平均风速等气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.gov.cn>)。由于参考作物蒸散量 (ET_0) 计算需要气候参数较多, 对数据要求质量较高, 剔除气象数据中缺测时间较长的站点, 选取西南地区 125 个数据完整气象站点 (图 1)。印度洋偶极子 (IOD)、南方涛动 (SOI)、西太平洋副热带高压 (WPSH) 和青藏高原高空反气旋环流异常 (TPAI) 逐月指数来源于国家气候中心。青藏高原夏季反气旋环流异常由青藏高原 500 hPa 气压平均值变化衡量 (30—40° N, 75—105° E); 东亚夏季风指数 (EASMI) 来源于中国科学院大气物理研究所 (<http://lip.lasg.ac.cn>); 北极涛动 (AO) 和北大西洋涛动指数 (NAO) 来源于美国国家航空航天局 (<http://www.swpc.noaa.gov>); 太平洋十年涛动指数 (PDO) 来源于华盛顿环境学院 (<http://jisao.washington.edu>)。

2.2 研究方法

由于气候条件、地形、管理方式和水稻品种等因素的影响, 水稻生长季的年内分布存在差异性。在西南地区, 西部以中稻为主, 东部为早、中、晚稻交叉区^[30]。早稻生长期多分布在 4—7 月; 中稻生长期多分布在 5—9 月; 晚稻生长期多分布在 7—11 月。为了保持水稻生长季水分亏缺可比性, 选取中稻生长季 (5 月 25 日—9 月 12 日) 作为研究时段。

(1) 有效降水量

有效降水量是指满足作物蒸发—蒸腾所需的降水量。本文采用美国农业部土壤保持局推荐方法计算有效降水量^[31]。计算公式如下:

$$P_e = \begin{cases} (4.17 - 0.2P)/4.17P < 8.3mm \\ 4.17 + 0.1P & P \geq 8.3mm \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_e 为有效降水量 (mm), P 为逐日降水量 (mm)。

(2) 水稻需水量

水稻需水量是指满足水稻生长并发挥全部生产潜力而蒸发蒸散的水分总量, 包括作物生长需水量和农田水热需水量。本研究采用作物系数计算水稻生长季需水量, 计算公式如下:

$$ET_0 = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

式中, ET_c 为作物需水量, ET_0 为潜在作物蒸散量, K_c 为作物系数。参考已有研究, 确定西南地区水稻生长季为 5 月 25 日—9 月 12 日, 作物系数分别为 1.066、1.216、1.298、1.344 和 1.213^[32]。采用世界粮农组织 (FAO) 修订 Penman—Monteith 模型, 对参考作物蒸散量 (ET_0) 进行估算^[33], 计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

式中, ET_0 为潜在作物蒸散量 (mm/d), R_n 为净辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G 为土壤热通量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), γ 为干热常数 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), Δ 为饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), U_2 为 2m 高度风速 (m/s), e_s 为平均饱和水汽压 (kPa), e_a

为实际水汽压(kPa)。

(3) 水稻水分盈亏率

水稻水分亏缺率计算如下:

$$G = -(P_e - ET_0) / ET_0 \times 100\% \quad (4)$$

式中, G 为水稻生长季水盈亏率, ET_0 为水稻需水量(mm), P_e 为有效降水量(mm)。

3 结果与分析

3.1 西南地区水稻生长季水分亏缺率年际变化趋势

1960—2013 年西南地区水稻生长季水分整体处于相对盈余状态,水稻生长对灌溉依赖程度较低,但是 2000 年后水分呈现明显亏缺,区域干旱程度明显加剧。在空间分布上,不同区域水分亏缺率存在差异性:云贵高原(-22.0%)<横断山区(-3.9%)<四川盆地(-0.7%)<东部丘陵区(17.5%)。其中,东部丘陵区水稻生长季水分亏缺最多,云贵高原生长季水分供给相对充足。在变化趋势上,西南地区水稻生长季水分亏缺率整体呈现上升趋势(3.1%/10a),各分区变化趋势分别为:东部丘陵区(1.0%/10a)<四川盆地(2.2%/10a)<横断山区(3.1%/10a)<云贵高原(5.9%/10a),仅有云贵高原和西南地区变化趋势通过 0.05 显著水平检验,水稻生长季水分亏缺率呈明显的上升趋势。

在年代际变化上,横断山区 20 世纪 70—90 年代中期水分亏缺,1995—2005 年水分盈余,近 10 年呈现明显的水分亏缺现象;与横断山区不同,四川盆地在 20 世纪 70—90 年代中期先后经历了“水分亏缺—水分盈余—相对亏缺”交替波动变化过程;对于云贵高原和东部丘陵区水分亏缺状态与其他相差较大,云贵高原 20 世纪 60—80 年代呈波动上升趋势,90 年代呈波动下降趋势;东部丘陵区 20 世纪 60—80 年代初经历了“水分亏缺—水分盈余—水分亏缺—水分盈余—水分亏缺”小幅震荡变化,90 年代整体处于盈余期,但 1995 年后水分亏率呈线性增长趋势,区域干旱化程度加剧。21 世纪后,西南地区水稻生长季全区及各子区均表现出水分亏缺率上升态势(图 2)。

3.2 西南地区水稻生长季水分亏缺空间变化特征

(1) 水分亏缺空间分布格局。1960—2013 年西南地区水稻生长季水分亏缺分布格局受地理环境影响,水分亏缺区和盈余区分别呈现出“一带两中心”的空间分布特征。其中,水分亏缺区一带为:“东部丘陵—川东平行岭谷区—贵州高原东部”鞍型水分亏缺带,两中心为“甘孜—小金”水分亏缺中心和“元江—蒙自”分亏缺中心;水分盈余区一带为“云贵高原西南缘”水分盈余带,两中心为“来凤—酉阳”巫山山区水分盈余中心和“乐山—雅安”川西山缘水分盈余中心(图 3a,c)。

(2) 水分亏缺空间变化趋势。1960—2013 年中国西南地区水稻水分亏缺呈现“整体变干、局部变湿”的空间格局,“甘孜—钦州”一线以南地区水分亏缺率呈现增大趋势,并以云南西南部、昆明—玉溪和横断山区南部增加最为显著;而“甘孜—钦州”一线以北地区水分亏缺率则呈现“增大—减小相间”的分布格局,且增加区域(59.2%)多于下降区域(40.8%),增加高值区主要位于东部丘陵的冲积平原区,减小高值区主要分布在东部丘陵山地区和四川盆地西北部(图 3b,d)。

3.3 西南地区水稻生长季水分亏缺率影响因素

3.3.1 大气环流异常对水稻生长季水分亏缺影响

由于不同气候因子具有不同振荡周期,短时间尺度信号有时会成为长时间尺度分析的噪音。本文利用 3 a、5 a 和 10 a 低通滤波器依次剔除短期、中期信息干扰,分析不同时间尺度水稻生长季水分亏缺与主要气候因子相关关系(图 4)。结果表明:在趋势变化上,与西南地区水稻生长季水分亏缺率呈正相关环流因子有:南方涛动(SOI)、印度洋偶极子(IOD)、西太平洋副热带高压强度(WPSH-D)、西太平洋副热带高压北界(WPSH-N)和西太平洋副热带高压面积(WPSH-S);负相关环流因子有:青藏高原反气旋异常(TPAI)、北太平洋十年涛动(PDO)、东亚夏季风强度(EMSM)、北极涛动(AO)、北大西洋涛动(NAO)和西太平洋副热带高压

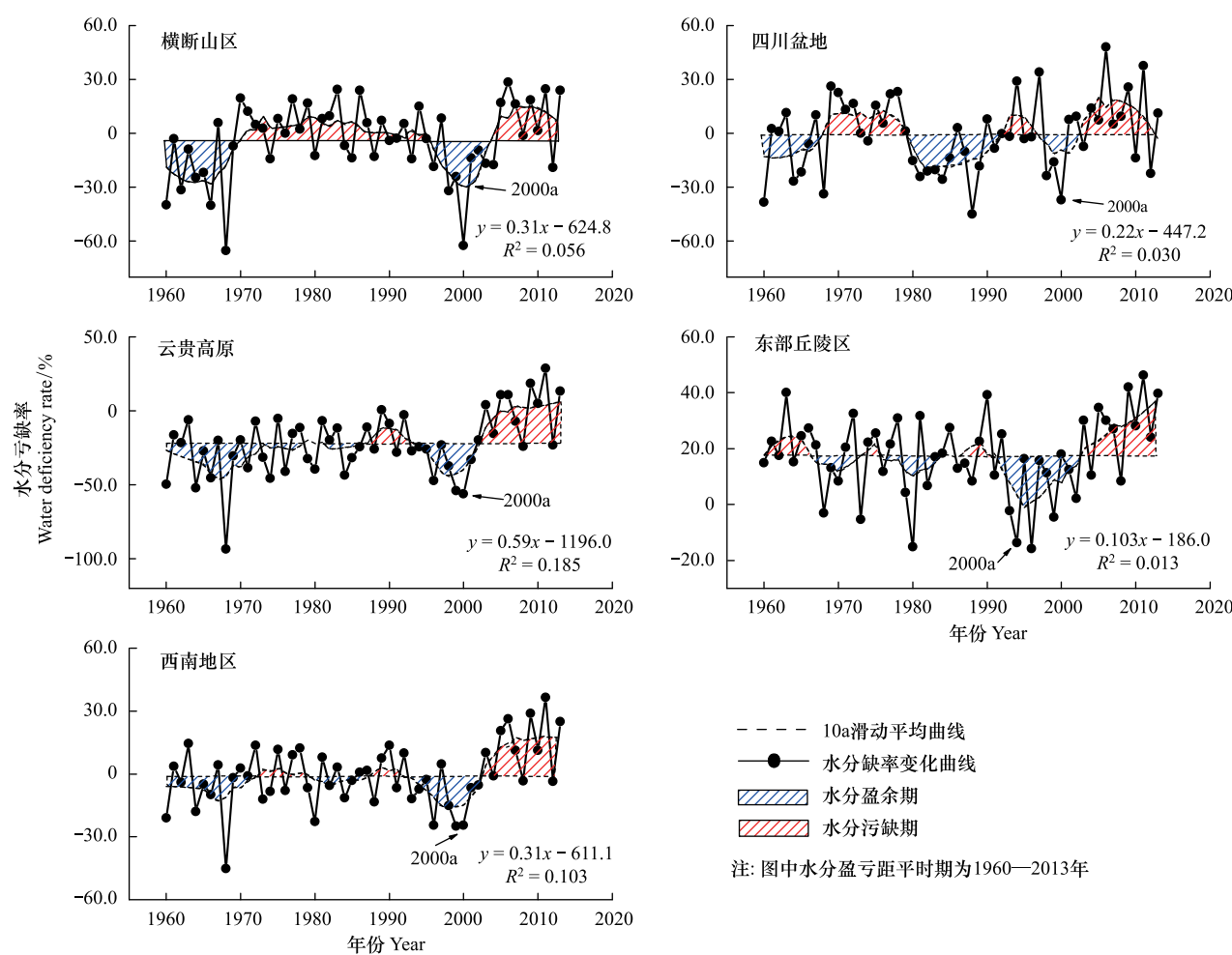


图 2 1960—2013 年西南地区水稻生长季水分亏缺率变化趋势

Fig.2 Variation of rice water deficiency on growing season in southwestern China during 1960—2013

西伸位置(WPSH-W);在不同时间尺度下,水分亏缺率变化对 IOD、TPAI、PDO、WPSA-D、AO、NAO、WPSA-N、WPSA-W 和 WPSA-S 的响应具有一致性。当西太平洋副热带高压明显偏北西伸,青藏高原高空反气旋环流异常偏弱,IOD 处于正相位异常,PDO、AO 和 NAO 处于负相位异常时,西南地区水稻生长季水分亏缺率往往呈增加趋势;无论原始序列,还是中长期时间序列,各环流因子与西南地区水稻生长季水分亏缺率变化相关性显著水平均较低($p<0.05$),说明各环流因子与西南地区水稻生长季水分亏缺关系存在不确定性,线性相关中噪音较多。

由于相关分析主要表达环流异常与降水线性关系,往往会低估其非线性信息,在此选取物理机理相对明确的 NAO、ENSO 作为典型环流因子,利用合成分析揭示环流异常和西南地区水稻生长季水分亏缺率变化的关系。参照国家气候中心 ENSO 事件特征量综合表对厄尔尼诺和拉尼娜峰值年进行界定,构建 1960—2013 年 5—9 月北大西洋涛动指数均值序列,以 ± 0.5 标准差界定正负异常年(表 1)。

表 1 1960—2013 年 NAO 和 ENSO 事件异常年份

Table 1 Anomaly years of NAO and ENSO during 1960—2013

指数 Index	正异常年 The positive-anomaly year	负异常年 The negative-anomaly year
NAO	1972, 1976, 1983, 1992, 1994, 2013	1968, 1980, 1983, 2008, 2010, 2012
ENSO	1963, 1965, 1969, 1972, 1982, 1983, 1987, 1992, 1994, 1997, 2002, 2006, 2009	1961, 1962, 1964, 1967, 1970, 1975, 1984, 1988, 1995, 2000, 2007, 2010, 2011

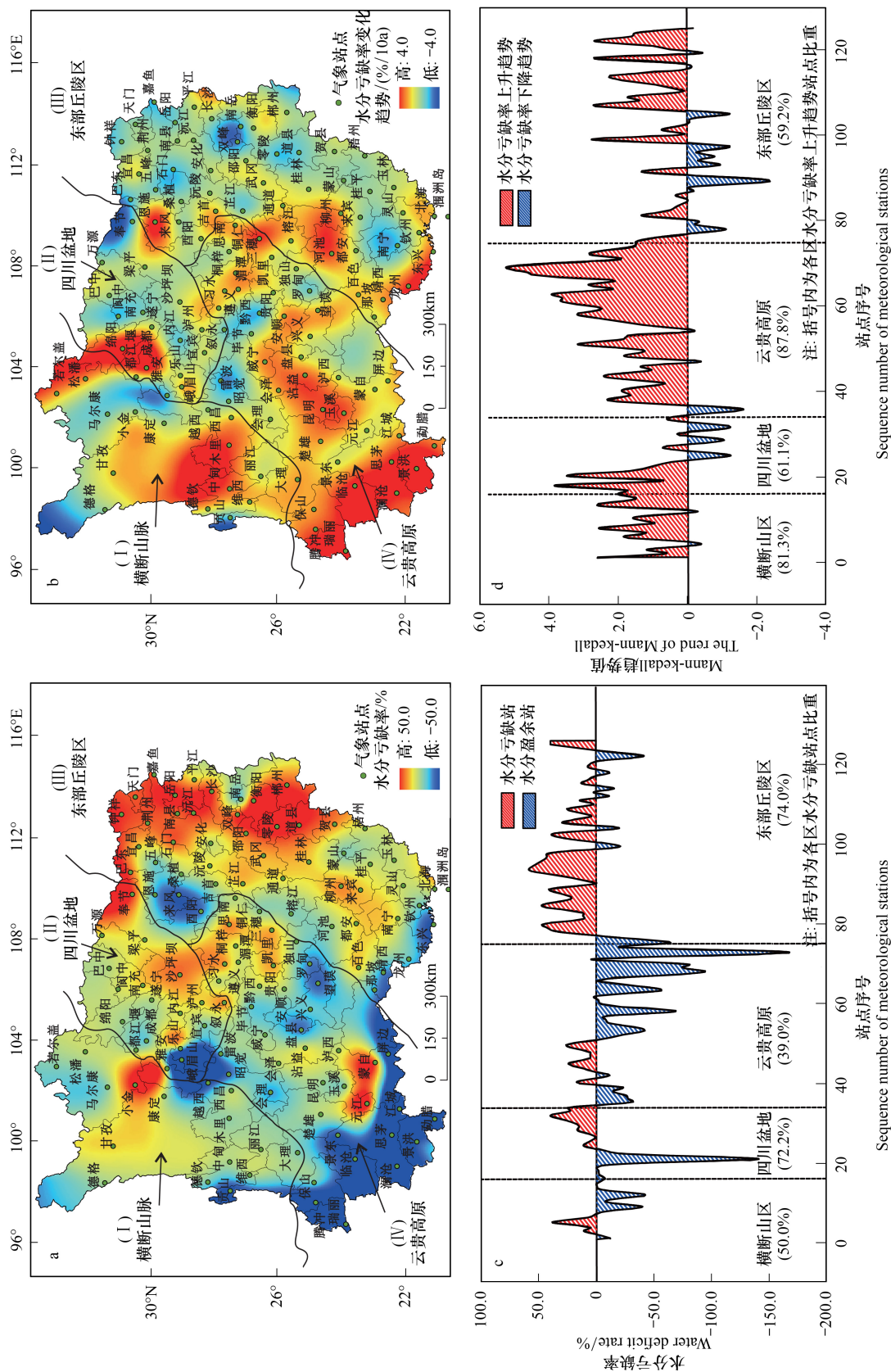


图3 1960—2013年西南地区水稻生长季水分亏缺率空间分布(a, c)和变化趋势(b, d)特征
Fig. 3 Spatial distribution (a, c) and tendency (b, d) of rice water deficiency during growing season in southwestern China during 1960—2013

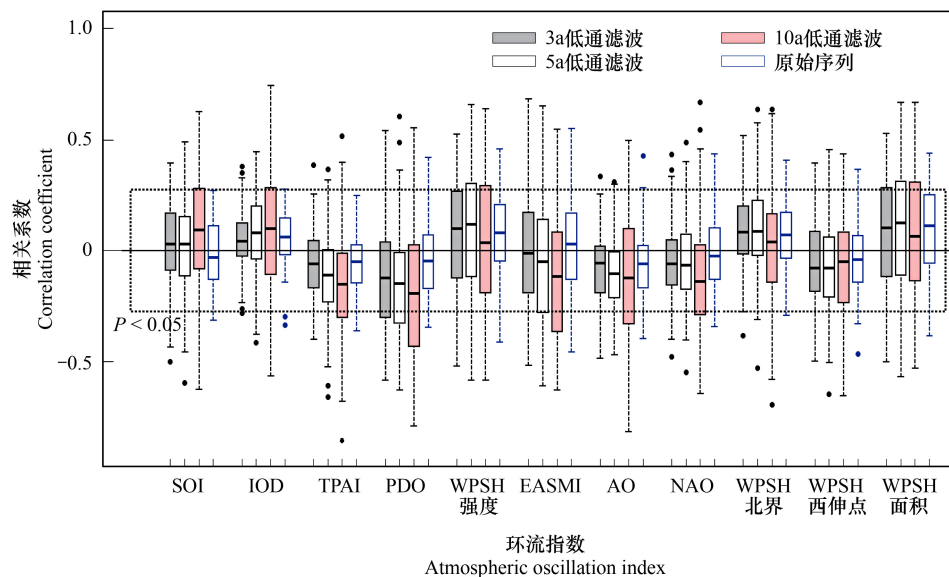


图4 不同时间尺度西南地区水稻生长季水分亏缺率与环流因子相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of atmospheric oscillation and rice water deficiency during growing season on different time scales in southwestern China

(1) NAO 对西南地区水稻生长季水分亏缺影响。NAO 作为北半球大西洋地区大气环流的主导变化模式,对北美、欧洲以及亚洲地区气候变化具有显著的影响^[34]。相关研究表明,在 NAO 正相位时,加拿大北极地区以及格林兰岛异常偏冷,北美和欧亚大陆高纬度地区则异常偏暖。与此同时,NAO 环流异常激发准定常 Rossby 波,通过亚—非副热带急流遥相关机制,影响我国冬季和夏季降水变化^[35]。图 5a—b 为 NAO 与西南地区水稻水分亏缺率变化关系。从图中可以看出:在 NAO 正相位时,西南地区水分亏缺率明显增加,横断山区、四川盆地、云贵高原和东部丘陵区水分亏缺率增加的站点比重分别为:100.0%、88.9%、85.4%和 78.0%。除广西丘陵区沿海地带部分站点水分亏缺率呈下降趋势外,整个区域干旱化程度加剧,水稻生长季水分明显亏缺;反之,在 NAO 负相位时,西南地区水稻生长季降水增加,作物水分亏缺率明显下降。

(2) ENSO 对西南地区水稻生长季水分亏缺影响。ENSO 是赤道太平洋地区大范围海气相互作用的强烈表现,其对全球天气及气候变化具有重要影响。厄尔尼诺和拉尼娜事件是 ENSO 循环处于冷暖相位在海温变化过程的异常反应^[36]。图 5c—d 为 ENSO 与西南地区水分亏缺率变化关系。从图中可以看出:在厄尔尼诺年,西南地区水分亏缺率具有明显地域分异特征,横断山区、四川盆地和云贵高原水分亏缺率呈上升趋势,上升站点比重分别为 87.5%、83.3%和 97.6%,区域水稻有效降水明显不足;而东部丘陵区水分亏缺率则呈下降趋势,仅有 36.0%站点干旱程度加剧;反之,在拉尼娜年,西南地区水稻生长季降水增加,作物水分亏缺率明显下降。

3.3.2 地理环境对水稻生长季水分亏缺影响

为了更好地理解水分亏缺分布格局,以“东部丘陵区”水分亏缺带,“元江—蒙自”分亏缺中心,“云贵高原西南缘”水分盈余带、“乐山—雅安”川西山缘水分盈余中心为例,进一步分析地理环境与水分亏缺空间分异的关系。其中,“云贵高原西南缘”水分盈余带主要是受西南季风和云贵高原地势高差悬殊影响,“乐山—雅安”川西山缘水分盈余中心主要是受四川盆地边缘地形影响,上述区域在研究区概况中已有说明。在此,本文主要对“东部丘陵区”水分亏缺带和“元江—蒙自”分亏缺中心形成地理环境进行分析。

(1) “东部丘陵区”水分亏缺带。东部丘陵区所处纬度偏南,日照时间长,区域蒸发量大,加之东、南、西三面环山,北面为地势低平的洞庭湖和江汉平原,特殊的地理位置和气候条件,使得区域水稻生长季水分亏缺严重。以湖南为例,在 7—9 月水稻需水高峰期,湖南年均降水量为 300.0 mm,蒸发量在 300.0 mm 以上,降水集

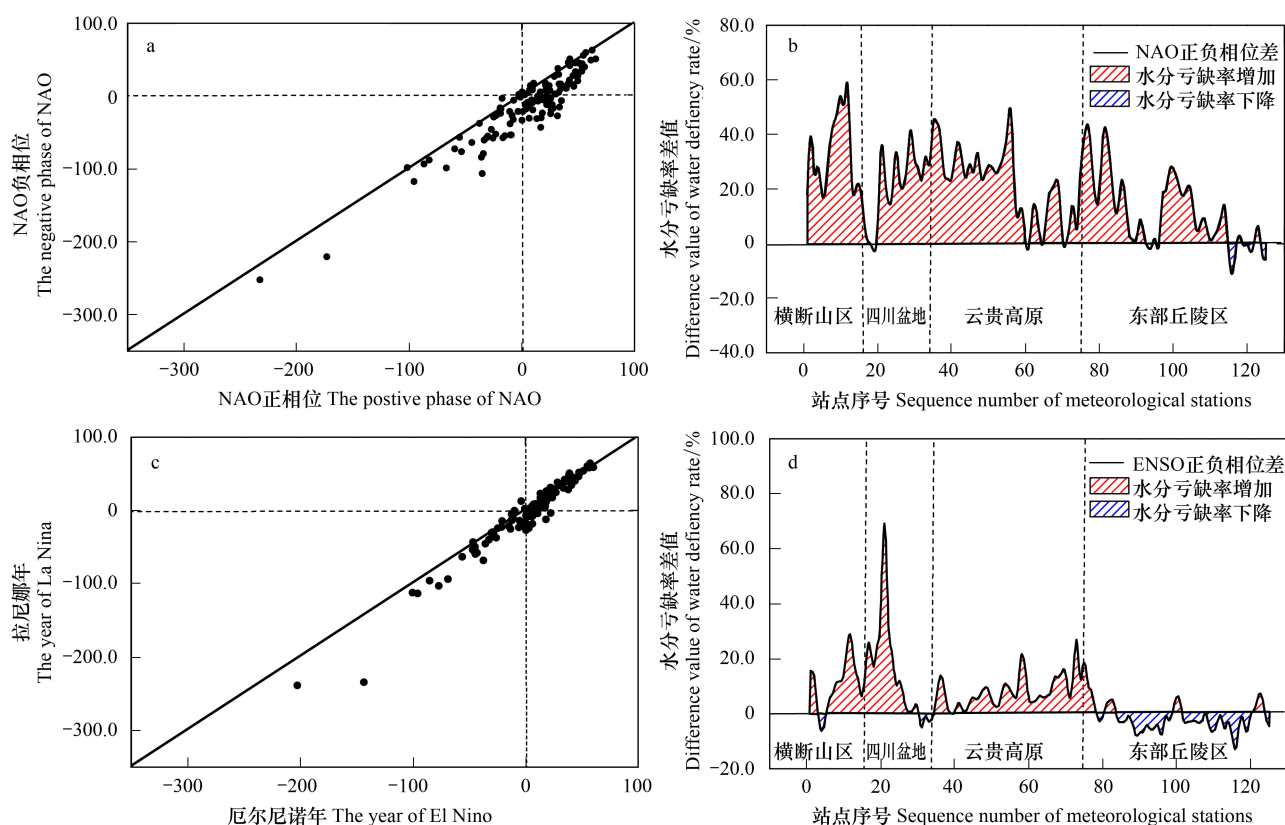


图5 NAO(a, b)、ENSO(c, d)和西南地区水稻生长季水分亏缺率变化关系

Fig.5 The relationship of NAO (a, b), ENSO (c, d) and rice water deficiency during growing season in southwestern China

中期和农作物生长关键期不一致,形成了湖南水分亏缺的季节性特征;由于地形限制,南面暖湿气流难以进来,北面冷高压可直达南岭,且长期滞留境内,极易受单一的暖气团控制,晴热少雨,而且区域土壤为紫色砂岩、泥岩、红砂岩、板页岩等发育而成,不利于蓄水保墒。因此,东部丘陵区出现降水充沛反而水分亏缺的现象。

(2)“元江—蒙自”水分亏缺中心。元江和蒙自均处于红河州,是滇南低纬度高原季风活动区。由于特殊地理环境,受山地焚风效应影响,使得红河州降水空间分布不均,形成2个多雨中心和2个少雨中心。多雨中心分布于东部和南部,年均降水量在1751.5 mm;少雨中心则为红河州中部干热坝子和红河流域干热河谷区,年均降水量仅有796.4 mm,而元江和蒙自就位于这个少雨中心。因此,就形成了水分相对盈余带云贵高原,嵌套“元江—蒙自”水分亏缺中心的现象。

4 结论

基于中国西南及周边地区125个气象站点数据,本文分析了1960—2013年西南地区水稻生长季水分亏缺率时空变化特征,探讨了环流异常及地理环境与水分亏缺率的变化关系,得到初步结论如下:

(1) 1960—2013年西南地区水稻生长季水分整体处于相对盈余状态。全球变暖背景下,西南地区水稻生长季水分亏缺率呈现上升趋势,变化速率分别为:东部丘陵区(1.02%/10a) < 四川盆地(2.24%/10a) < 西南地区(3.07%/10a) < 横断山区(3.12%/10a) < 云贵高原(5.91%/10a),云贵高原水分亏缺率上升趋势最为明显。

(2) 1960—2013年西南地区水稻生长季水分亏缺区和盈余区分别呈现出“一带两中心”的空间分布特征。在空间变化趋势上,1960—2013年中国西南地区水稻水分亏缺呈现“整体变干、局部变湿”的空间格局,其中“甘孜—钦州”一线以南地区水分亏缺率呈现增大趋势;而“甘孜—钦州”一线以北地区水分亏缺率则呈现“增大—减小相间”的分布格局。

(3) 在环流影响因素上,NAO、ENSO 与西南地区水稻水分亏缺率变化具有相关性。在 NAO 正相位时,除广西丘陵区沿海地带部分站点水分亏缺率呈下降趋势外,整个西南地区干旱化程度加剧。在厄尔尼诺年,西南地区水分亏缺率具有地域分异特征,横断山区、四川盆地和云贵高原水分亏缺率呈上升趋势,东部丘陵区水分亏缺率呈下降趋势。

(4) 在地理环境因素上,地形和气候因素对西南地区水稻水分亏缺率空间分布变化具有重要影响。其中,“云贵高原西南缘”水分盈余带主要受西南季风和云贵高原地势高差悬殊影响,“乐山—雅安”川西山缘水分盈余中心主要受四川盆地边缘地形影响;“东部丘陵区”水分亏缺带主要受区域地形和降水集中期和农作物生长关键期不一致影响;“元江—蒙自”水分亏缺中心主要受滇南低纬度高原季风和红河谷地地形影响。

5 讨论

已有西南地区冬季干旱机制研究发现,在 NAO 负相位时,北大西洋海表温度异常能激发南、北两支大气遥相关型,前者调节乌拉尔山和鄂霍次克海地区的阻塞高压,后者增强西太平洋副热带高压与 ENSO 的关系,这种遥相关机制在西南地区形成一个反气旋,引起西南地区严重的冬春连旱^[9,34]。本文分析 NAO 与西南地区水稻生长季(5—9 月)水分亏缺变化关系时发现,在 NAO 负相位时,西南地区生长季降水偏多,与春季干旱恰好相反,造成这种差异的环流机制还需进一步探索。与此同时,本文并未对 NAO 和 ENSO 事件的相互作用进行分析,NAO 或 ENSO 事件正负相位异常不同组合,对西南水分亏缺率的影响还需进一步关注。

西南地区水稻生长季水分亏缺量敏感性分析,是探讨气候变化对作物影响的重要方面。明晰水稻生长季水分亏缺量对气象因子的敏感性区域差异性,有利于定量研究气候变化对作物水分需求变化的影响,对水热组合的理解和农业灌溉管理具有重要的现实意义^[37]。与此同时,黄仲冬等指出降水分布型是影响灌溉需水量的主要因素,其对灌溉需水量年际波动影响仅次于年均降水量^[38]。因此,在未来西南地区水稻生长季水分亏缺量敏感性研究中,既要关注常规气象因子敏感性分析,还需关注气候因子分布型对水分亏缺量的影响。

作物不同生长期对水分需求存在差异,水稻生育期中的分蘖和抽穗期为水稻生长的关键期,而关键需水期缺水往往会导致作物减产或绝收^[22]。本研究以作物潜在蒸散量和有效降水量估算西南地区水稻生长季水分亏缺率时空变化,并未考虑不同区域不同水稻品种和生长季的差异性,这是水稻生长季理论需水量与实际需水量存在差异的主要原因之一。未来需要结合地理环境、土壤类型、水稻品种、发育期和产量等因素,利用机理性强的作物生长模型,细化水稻生长阶段,通过宏观格局和微观机理相结合,进一步分析对西南地区水稻生长季水分亏缺时空变化特征。

参考文献(References):

- [1] 姚玉璧, 张强, 王劲松, 尚军林, 王莺, 石界, 韩兰英. 中国西南干旱对气候变暖的响应特征. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1409-1417.
- [2] 段海霞, 王劲松, 刘芸芸, 李忆平, 王素萍. 2009/2010 年我国西南秋冬春连旱特征及其大气环流异常分析. 冰川冻土, 2013, 35(4): 1022-1035.
- [3] 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成因分析. 气候与环境研究, 2007, 12(3): 464-474.
- [4] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 王圣杰, 王兴梅. 近 50 年西南地区极端干旱气候变化特征. 地理学报, 2011, 66(9): 1179-1190.
- [5] 王允, 刘普幸, 曹立国, 高原, 雍国正. 基于湿润指数的 1960-2011 年中国西南地区地表干湿变化特征. 自然资源学报, 2014, 29(5): 830-838.
- [6] 熊光洁, 张博凯, 李崇银, 尚可政, 王式功. 基于 SPEI 的中国西南地区 1961-2012 年干旱变化特征分析. 气候变化研究进展, 2013, 9(3): 192-198.
- [7] 于文金, 黄亦露, 邵明阳. 澜沧江流域极端天气灾害特征及波动趋势. 生态学报, 2015, 35(5): 1378-1387.
- [8] 胡学平, 王式功, 许平平, 尚可政. 2009-2013 年中国西南地区连续干旱的成因分析. 气象, 2014, 40(10): 1216-1229.
- [9] Feng L, Li T, Yu W D. Cause of severe droughts in Southwest China during 1951-2010. Climate Dynamics, 2014, 43(7-8): 2033-2042.
- [10] 宋杰, 杨辉, 李崇银. 2009/2010 年冬季云南严重干旱原因的进一步分析. 大气科学, 2011, 35(6): 1009-1019.
- [11] Lu E, Luo Y L, Zhang R H, Wu Q X, Liu L P. Regional atmospheric anomalies responsible for the 2009-2010 severe drought in China. Journal of

- Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D21): D21114.
- [12] 赵志平, 吴晓蕾, 李果, 李俊生. 2009-2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力的影响. 生态学报, 2015, 35(2): 350-360.
- [13] 宋艳玲, 蔡雯悦, 柳艳菊, 张存杰. 我国西南地区干旱变化及对贵州水稻产量影响. 应用气象学报, 2014, 25(5): 550-558.
- [14] 纪金华, 章永江, 张一平, 刘玉洪, 鲁志云, 武传胜, 温韩东. 西南干旱对哀牢山常绿阔叶林凋落物及叶面积指数的影响. 生态学报, 2013, 33(9): 2877-2885.
- [15] 纪金华, 章永江, 张一平, 刘玉洪, 杨秋云, 宋亮, 巩合德, 鲁志云. 哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用. 生态学报, 2012, 32(6): 1692-1702.
- [16] Zhang L, Xiao J F, Li J, Wang K, Lei L P, Guo H D. The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China. Environmental Research Letters, 2012, 7(4): 045706.
- [17] Wada Y, Bierkens M F P. Sustainability of global water use: past reconstruction and future projections. Environmental Research Letters, 2014, 9(10): 104003.
- [18] Haddeland I, Heinke J, Biemans H, Eisner S, Flörke M, Hanasaki N, Konzmann M, Ludwig F, Masaki Y, Schewe J, Stacke T, Tessler Z D, Wada Y, Wisser D. Global water resources affected by human interventions and climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(9): 3251-3256.
- [19] Dalin C, Qiu H G, Hanasaki N, Mauzerall D L, Rodriguez-Iturbe I. Balancing water resource conservation and food security in China. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(15): 4588-4593.
- [20] 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. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1508-1519.
- [21] 黄志刚, 王小立, 肖烨, 杨飞, 王晨溪. 气候变化对松嫩平原水稻灌溉需水量的影响. 应用生态学报, 2015, 26(1): 260-267.
- [22] 许莹, 马晓群, 王晓东, 张浩. 淮河流域冬小麦水分亏缺时空变化特征分析. 地理科学, 2013, 33(9): 1138-1144.
- [23] Elgaali E, Garcia L A, Ojima D S. High resolution modeling of the regional impacts of climate change on irrigation water demand. Climatic Change, 2007, 84(3-4): 441-461.
- [24] Leng G Y, Tang Q H. Modeling the impacts of future climate change on irrigation over China: sensitivity to adjusted projections. Journal of Hydrometeorology, 2014, 15(5): 2085-2103.
- [25] Mainuddin M, Kirby M, Chowdhury R A R, Shah-Newaz S M. Spatial and temporal variations of, and the impact of climate change on, the dry season crop irrigation requirements in Bangladesh. Irrigation Science, 2015, 33(2): 107-120.
- [26] Elliott J, Deryng D, Müller C, Frieler K, Konzmann M, Gerten D, Glotter M, Flörke M, Wada Y, Best N, Eisner S, Fekete B M, Folberth C, Foster I, Gosling S N, Haddeland I, Khabarov N, Ludwig F, Masaki Y, Olin S, Rosenzweig C, Ruane A C, Satoh Y, Schmid E, Stacke T, Tang Q H, Wisser D. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(9): 3239-3244.
- [27] 胡玮, 严昌荣, 李迎春, 刘勤. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响. 生态学报, 2014, 34(9): 2367-2377.
- [28] 赵济, 陈传康. 中国地理. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [29] 张克新, 潘少明, 曹立国, 王允, 吴孟孟, 赵一飞. 横断山区季风期水分盈亏量时空变化特征及其与若干气候指数的相关性分析. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1869-1877.
- [30] 马欣, 吴绍洪, 李玉娥, 张雪艳, 高清竹, 伍洋. 未来气候变化对我国南方水稻主产区季节性干旱的影响评估. 地理学报, 2012, 67(11): 1451-1460.
- [31] Döll P, Siebert S. Global modeling of irrigation water requirements. Water Resources Research, 2002, 38(4): 8-1-8-10.
- [32] 符娜, 刘小刚, 张岩, 杨启良. 西南地区水稻灌溉需水量变化规律. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1895-1901.
- [33] 朱国锋, 何元庆, 蒲焘, 李宗省, 王旭峰, 贾文雄, 辛惠娟. 1960-2009 年横断山区潜在蒸发量时空变化. 地理学报, 2011, 66(7): 905-916.
- [34] 李建平, 任荣彩, 齐义泉, 王法明, 陆日宇, 张培群, 江志红, 段晚锁, 于非, 杨永增. 亚洲区域海—陆—气相互作用对全球和亚洲气候变化的作用研究进展. 大气科学, 2013, 37(2): 518-538.
- [35] Wu Z W, Li J P, Jiang Z H, He J H, Zhu X Y. Possible effects of the North Atlantic Oscillation on the strengthening relationship between the East Asian summer monsoon and ENSO. International Journal of Climatology, 2012, 32(5): 794-800.
- [36] Rasmusson E M, Wallace J M. Meteorological aspects of the El Niño/southern oscillation. Science, 1983, 222(4629): 1195-1202.
- [37] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析. 地理学报, 2011, 66(5): 579-588.
- [38] 黄仲冬, 齐学斌, 樊向阳, 乔冬梅, 李中阳, 梁志杰. 降雨和蒸散对夏玉米灌溉需水量模型估算的影响. 农业工程学报, 2015, 31(5): 85-92.