

中国西南—东南季风交汇区降水时空格局变化 及其对食物产量的影响

刘志林, 丁银平, 角媛梅

(云南师范大学地理学部, 昆明 650500)

摘要: 全球气候变化背景下, 降水格局改变食物供给将是人类当前和未来所面临的重大挑战, 但很少有研究揭示食物供给随降水格局变化的关系。研究中国西南、东南季风共同作用区的降水与食物供给变化, 对厘清该区降水与食物供给的动态关系、实现区域粮食安全、保障西南边疆稳定、落实区域民族政策、建成全面小康社会等具有重要意义。文章以中国西南地区的云南省为例, 刻画了1988—2018年降水变化格局, 并探讨了其对食物产量的影响。结果表明: ①云南省降水时间格局分为: I降水丰沛期(1988—2004年)、II降水偏少期(2005—2015年)、III降水恢复期(2016—2018年)等3个降水时段; ②第I~II时段, 全省降水发生显著变化区域为15.07%, 第II~III时段为13.87%, 第I~III时段为16.53%; ③全省水平上, 降水与食物产量具有显著正相关关系($p < 0.01$), 且粮食产量与各时间段降水相关系数高于肉奶产量; ④当降水 ≥ 1500 mm时降水量快速下降, 粮食产量保持稳定、700~1500 mm时降水量与粮食产量同为小幅下降、 ≤ 700 mm时降水量小幅下降, 粮食产量大幅波动下降。总体而言, 1988—2018年云南省降水格局发生了明显的变化, 且在不同区域对食物供给产生了显著影响, 故亟待划分全省范围的食物产量对降水响应的空间区划, 以此来应对日益加剧的降水格局变化。

关键词: 降水格局; 时空; 食物产量; 变化; 响应; 区划

DOI: 10.11821/dlxb202109018

1 引言

食物供给、水资源短缺、气候变化是人类未来所面临的重大挑战^[1]。这些挑战又表现为食物供给与气候变化、气候变化与水资源短缺、水资源短缺与食物供给之间的关系^[2-4]。降水格局变化是全球气候变化的主要内容与研究热点^[5], 深刻影响着区域干旱^[6-7]、地表径流^[8-10]、河流量^[10-11]等问题、同时也间接作用于生态系统和食物供给系统的弹性与安全^[2, 12-13]。气候变化带来全球、局地降水格局变化, 降水格局变化又导致区域水资源问题, 进而影响食物供给, 因而上述3组关系的核心问题是降水格局变化与食物供给的关系, 但很少有研究揭示其动态关系^[9]。

降水格局变化是气候变化研究的主要内容, 以往成果主要集中于对降水趋势的阐

收稿日期: 2020-08-11; 修订日期: 2021-04-20

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0184300); 国家自然科学基金项目(41761115, 41271203); 云南师范大学研究生科研创新项目(ysdyjs2019166) [Foundation: National Key Research and Development Program of China, No.2018YFE0184300; National Natural Science Foundation of China, No.41761115, No.41271203; Key Research Projects of Graduate Students in Yunnan Normal University, No.ysdyjs2019166]

作者简介: 刘志林(1990-), 男, 宁夏吴忠人, 博士生, 主要从事自然环境要素、耕地、聚落景观演变及效应研究。

E-mail: zhilin2015@foxmail.com

通讯作者: 角媛梅(1972-), 女, 云南马龙人, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事景观生态学研究。

E-mail: ymjiao@sina.com

述,包括了年均^[14-15]和季节变化^[16-17]、极端降水分布^[18-19]等内容。研究发现,降水格局在气候变化背景下具有明显的区域响应特征。过去30年中国北方降水量呈下降趋势,南方呈显著增加^[20-21],但在西北地区具有干湿转型的特征^[22],在百年尺度上,全球气候变暖造成中国干旱与半干旱区降水格局发生了明显变化^[23]。云南省位于中国西南地区,降水受东南季风与西南季风共同作用,近年来相继发生了2011年雨季干旱、2012年旱季干旱、2013年冬春干旱、2016年曲靖、丘北等地暴雨洪灾、2018年昆明、曲靖等地洪涝灾害^[24]。一系列极端降水事件表明云南省降水格局发生了明显变化。但在全球变化背景下,东南季风与西南季风双重影响下的云南,其降水变化趋势、时空格局仍不十分清楚。

食物产量是由自然、社会经济、科技、文化、政策、人口结构等因子共同作用的巨系统,但学界普遍认为降水对食物产量具有决定性作用^[25-27],相对其他因子降水格局也最易变化,因此降水是一个关键且易改变的要素。虽然目前一些研究揭示了不同水分胁迫下小麦、玉米、水稻等农作物发育、产量的问题^[28-31],阐明了水分胁迫对农作物生长的影响机理^[32]。但多为大田与控制试验,其目的是揭示微观尺度下作物生长与水分的关系。在大范围、长时间、多变化降水格局下,对作物产量与水分时空变化关系的研究还不足^[9],尤其是栅格尺度上的研究。

截至2018年,云南省90%耕地为雨养农业^[33]。降水格局变化将会对全省食物供给与粮食安全产生重要影响,进而关系到全省25个民族4800余万人的吃饭问题,也是长期保障西南边境稳定、扎实贯彻民族团结,民族繁荣政策、全面建成小康社会的关键问题。因此在东南与西南季风共同作用的云南省,对降水变化时空格局及其与食物供给关系进行研究,具有十分重要的科学与现实意义。基于此,本文主要解决以下3个问题:①厘清云南省1988—2018年降水变化的时空格局;②揭示全省多年降水与食物供给的动态关系;③识别关键降水阈值对食物供给的影响,阐释其影响机制,讨论全省食物供给对降水响应的特征及区划。

2 研究区与方法

2.1 研究区概况

云南省位于中国西南部(21°08'32"N~29°15'08"N, 97°31'39"E~106°11'47"E),南北跨8个纬度,东西跨9个经度。面积39.4万km²,为中国陆地面积的4.1%。全省16个地级行政单位,129个县级行政单位。境内最高海拔为6630 m,最低为-219 m,地形以山地、高原为主,二者占全省总面积的94%。云南省位于亚欧大陆东南部内陆,中南半岛北缘,受东南季风与西南季风双重影响,及地势从南到北依次升高和降水水汽来源的作用,降水量空间分布特征呈:从南到北依次减少。在时间上,云南省降水具有年际变化小,年内变化大的特点。2019年云南省播种面积为18.61万km²,灌溉面积为1.90万km²,灌溉比为10.2%,农业总产值4935.75亿元,全年粮食产量1870.03万t,猪牛羊肉总产量404.43万t,牛奶59.87万t。

2.2 数据来源及预处理

降水数据来源于中国科学院青藏高原研究所(表1)。该数据集是以国际上现有的Princeton再分析资料、GLDAS资料、GEWEX-SRB辐射资料,以及TRMM降水资料为背景场,融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成。其时间分辨率为3 h,水平空间分辨率0.1°^[34-35]。使用Geodata软件提取1988—2018年,年、月尺度降水量栅格数据;NDVI数据来自SPOT与Landsat影像,下载各年份的月影像,在ENVI中进行辐射定标、

表1 数据来源

Tab. 1 Data source

数据	类型	精度	来源
降水	NetCDF	0.1°	中国科学院青藏高原研究所
NDVI	Raster	1000 m	SPOT 和 Landsat
土地利用数据	Raster	1000 m	中国科学院资源环境数据中心
食物产量	Excel	省域	云南省统计局
云南省行政边界	Polygon	1:10000	云南省地理国情普查数据库

大气校正等处理后, 计算NDVI值, 再将逐月数据融合为年数据, 最后重采样为1000 m分辨率; 食物供给数据来自云南省统计局, 包括各年粮食产量、肉类、奶类产量; 土地利用数据来自中国科学院资源环境数据中心, 使用AcrGIS提取云南省耕地与草地栅格后转为矢量。

2.3 主要研究方法

2.3.1 突变点检测 Mann-Kendall突变检验法是世界气象组织推荐用于提取序列变化趋势的有效工具, 目前已经被广泛用于众多学科研究中, 其优点是不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 更适用于类型变量和顺序变量, 计算也较为方便。计算公式如下:

对于具有 n 个样本量的时间序列 x , 构造秩序列:

$$S_k = \sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \quad k=2, 3, \dots, n \quad (1)$$

其中:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad j=1, 2, 3, \dots, i \quad (2)$$

秩序列 S_k 是 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的和, 可知 $k=1$ 时, $S_1=0$ 。

在时间序列随机独立的假定下, 定义统计变量:

$$UF = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}}, \quad k=2, 3, \dots, n \quad (3)$$

式中: UF_k 为定义的统计量, $UF_1=0$; $E(S_k)$ 、 $\text{Var}(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差, 在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立且有相同连续分布时, 可通过以下公式进行计算:

$$\begin{cases} E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \\ \text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \quad (4)$$

UF 通过时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 的顺序计算其统计量, UB 通过时间序列 x 的逆序计算。给定显著水平 $\alpha=0.05$, 其临界值为1.96。| UF |>1.96表明序列存在显著的变化趋势; $UF>0$ 表明序列呈现上升趋势, $UF<0$ 表明呈下降趋势, 若 $UF>1.96$ 则序列有显著上升趋势; $UF<-1.96$, 则序列有显著下降趋势。若 UF 与 UB 在临界值之间出现交点则交点对应的时刻为突变开始时间。

2.3.2 食物供给与产量估算

研究表明农作物、畜产品产量与NDVI之间具有显著的线性关系^[36]。因而, 食物供给在栅格尺度上反演, 可以遵循以下思路: 基于土地利用分类, 将粮食按照农田面积, 肉类和奶类按照草地面积分别计算其单位面积上的食物产量^[37-38]。计算公式如下:

$$Y_i = \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \times Y_{sum} \quad (5)$$

式中： Y_i 为第*i*个栅格所分配的粮食产量、肉类与奶类产量； Y_{sum} 为食物总产量、肉类与奶类总产量； $NDVI_i$ 表示第*i*个栅格的 $NDVI$ ； $NDVI_{sum}$ 为研究区耕地或草地的 $NDVI$ 之和。

3 结果与分析

3.1 1988—2018年云南省降水变化的时空格局

通过绘制云南省 1988—2018 年降水量的 Mann-Kendall 突变检验曲线、降水历时曲线及降水月密度图，定量刻画降水时间变化格局，结果如图 1 所示。由 M-K 突变检验曲线可知，1988—2018 年云南省降水具有 2 个突变点，分别为 2005 年和 2016 年，由此可将云南省过去 30 a 降水划分为 3 个阶段，第Ⅰ阶段为 1988—2004 年、第Ⅱ阶段为 2005—2015 年、第Ⅲ阶段为 2016—2018 年。第Ⅰ阶段年平均降水量为 1129.88 mm，各年 UF 值均大于 0，表明此阶段内降水量为上升趋势，其中 1990 年、2001 年、2002 年，3 个年份 UF 值大于 1.96，表明其上升趋势具有显著性。第Ⅱ阶段，其年平均降水量为 1055.51 mm，整个区间内 UF 呈下降趋势，说明在 2005—2015 年内云南降水为减少趋势，其中 2011—2015 年间 UF 值小于 0，表明此时间段内，降水下降趋势最明显，与云南“三年连旱”时间吻合。第Ⅲ阶段，其年平均降水量为 1164.57 mm，从 M-K 曲线趋势来看，其 UF 值由小于 0，开始趋近 0，表明第Ⅲ阶段为降水回升阶段，降水量较多且平稳。总体而言，第Ⅰ阶段，云南省降水较多，呈稳步增加的趋势。第Ⅱ阶段，云南省降水减少，且连年下降。第Ⅲ阶段，云南省降水开始稳步回升，趋于正常年份降水，为大旱后（“三年连旱”）恢复期。

云南降水干湿季区分明显，5—10 月为湿季，降水量大且分散，11 月至次年 4 月为干季，降水量小且集中。从云南省过去 30 年的降水来看，3—4 月易出现降水极值，即突发极端降水。干季，降水高密度值集中，降水较为稳定，年际变化较小；湿季，高密度值较为分散，表明其降水具有很大的不确定性，年际差异大。

在空间上，取云南省 1988—2004 年的降水平均值，作为第Ⅰ时段的降水空间值，依次获得第Ⅱ与第Ⅲ时段的降水空间值。对 3 个时段两两进行差值与变化率计算，结果如图 2。

第Ⅰ~Ⅱ时段内，云南省降水发生显著变化区域面积为 57938.69 km²，占全省的 15.07%，从空间来看，滇西北（保山市、怒江和德宏州）降水呈显著下降，滇西南（普洱市和西双版纳州）、滇东北（昭通市）的降水呈显著增加。以Ⅱ时段降水为 y ，Ⅰ时段降水为 x ，拟合两时段数量关系为 $y = 0.95x - 35$ ，由 $x \geq 0$ 、 $y \geq 0$ ，可知Ⅱ时段降水远高于Ⅰ时段降水，从变化率来看，95%置信椭圆内主要以负变化率为主，即以降水减少为显著变化特征；第Ⅱ~Ⅲ时段内，云南省降水发生显著变化区域面积为 53190.84 km²，占全省的 13.87%，在空间上，降水显著减少区较Ⅰ~Ⅱ时段内大幅下降，主要出现在滇西北的大理州及迪庆州的小部，降水显著增加区较Ⅰ~Ⅱ时段内有所上升，除滇西南（普洱市和西双版纳州）、滇东北（昭通市）等地外，在滇中滇池、抚仙湖流域出现大面积增长区域，以Ⅲ时段降水为 y ，Ⅱ时段为 x ，拟合两时段数量关系为 $y = 1.1x + 36$ ，由 $x \geq 0$ 、 $y \geq 0$ 可知Ⅱ时段降水量远低于Ⅲ时段内的降水，在变化率上，95%置信椭圆内主要以正变化率为主，即以降水显著增加为变化特征；第Ⅰ~Ⅲ时段内，云南省降水显著变化区域为 63401.72 km²，占比为 16.53%，从空间来看，显著增加区主要集中在滇西北（怒江州、保山市和德宏州）、滇西南（临沧市、普洱市和西双版纳州）、滇中（昆明与玉溪市）等

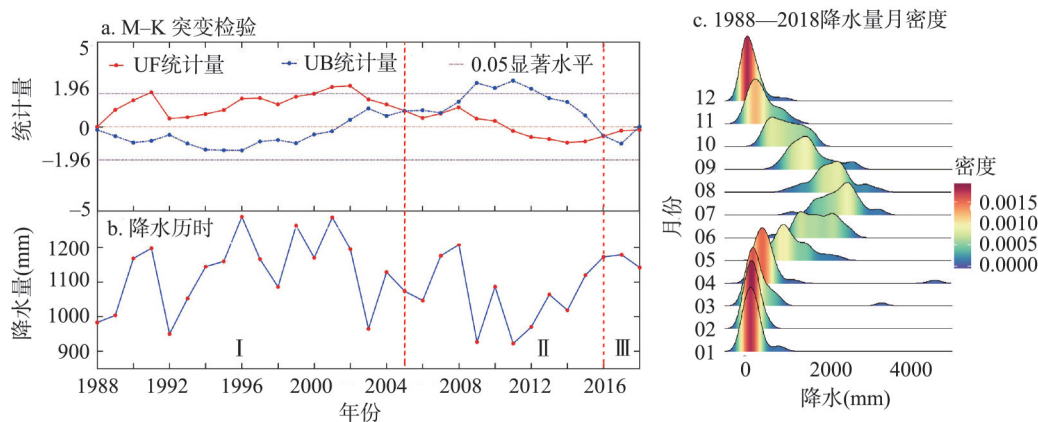


图1 1988—2018年云南省降水突变检验及降水月密度统计

Fig. 1 The precipitation mutation test and monthly precipitation statistics in Yunnan Province from 1988 to 2018

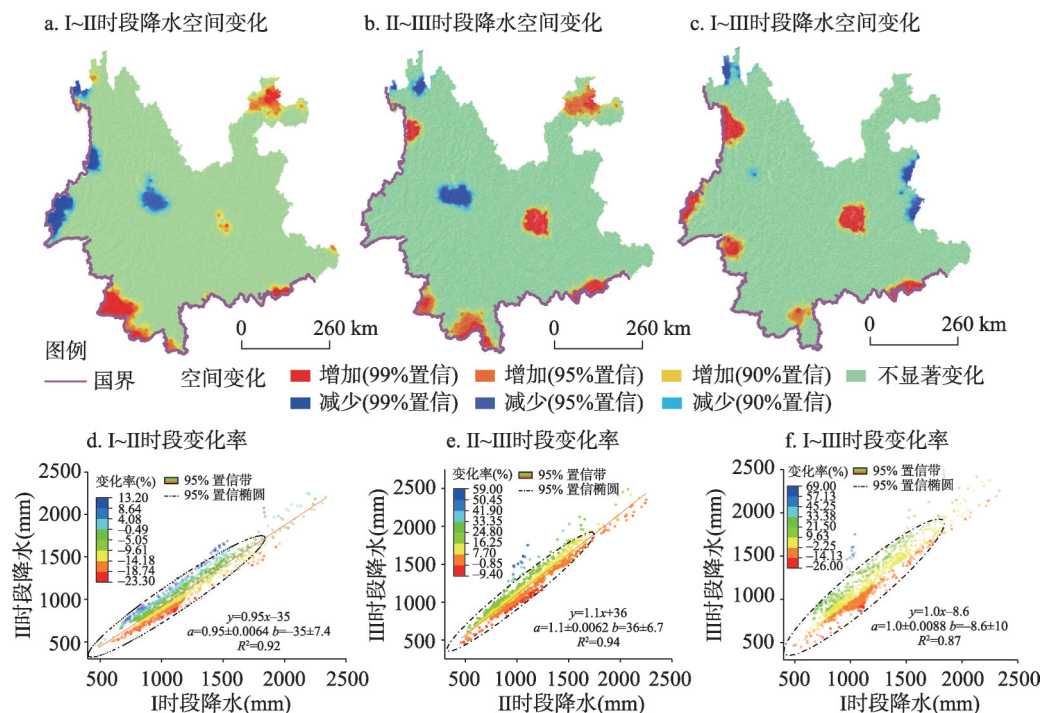


图2 1988—2018年云南省降水变化的时空格局

Fig. 2 Spatial and temporal patterns of precipitation changes in Yunnan Province from 1988 to 2018

地,显著下降区域出现在滇西北的迪庆州与滇东的曲靖市。以III时段为 y ,I时段为 x ,拟合二者数量关系为 $y = 1.0x - 8.6$,由 $x \geq 0$ 、 $y \geq 0$ 可知III时段内的降水量略低于I时段,在变化率上,95%置信椭圆内正负变化率均衡分布。3个时段两两拟合关系均呈线性,由线性函数图像特征可知, a 愈接近1, b 愈接近0, x 与 y 的一致性越高,即降水量差异越小,3组函数中 a 距1的绝对值呈现II~III > I~II > I~III, b 距0的绝对值呈现II~III > I~II > I~III,因此I和III时段的降水量一致性最高,即降水量差异最小,II和III时段的差异最大。当 $x \geq 0$ 、 $y \geq 0$ 时,截距 $b > 0$,与 y 轴相交于正半轴, $b < 0$,与 y 轴相交于负半轴,即 $b > 0$

时, y 时段降水大于 x 时段降水, $b < 0$ 时, y 时段降水小于 x 时段降水。3组函数中I~II和II~III的 $b < 0$, 即I时段的降水量高于II、III时段, II~III的 $b > 0$, 即III时段降水大于II时段。

3.2 降水格局变化对食物产量的影响及空间响应特征

通过食物供给与产量估算公式, 计算得到云南省I、II、III时段内的平均粮食与肉奶产量, 并提取对应时间段内的降水量。计算二者相关关系, 结果如图3。

降水与肉奶产量的相关系数为0.189, $p < 0.01$ 为显著正相关, 与粮食产量的相关系数为0.535, $p < 0.01$ 为显著正相关。表明, 降水对食物供给具有显著的影响, 即总体上, 呈降水增加食物产量增加, 降水减少食物产量下降的趋势。但粮食产量的相关系数高于肉奶产量, 表明粮食产量更易受降水影响。主要原因是, 中国20世纪90年代推行“退耕还林还草”“封山育木”政策, 云南作为一个山地大省, 是中国退耕还林还草、封山育木的关键区域, 多年退耕量居全国前列, 2019年云南省人工造林面积达到2637.08 km², 新封山育林531.92 km², 畜牧业由散养向圈养转变, 同时随着云南省各地区“创文”“创卫”工作的推进, 城市绿地等人造景观快速增加, 逐渐使肉奶产量与草地脱钩。从相关性来看, 肉奶产量总体与降水为显著正相关关系, 但各时段上与降水相关性均较低, 且均不显著, 表明肉奶产量在各时间段内受降水的影响较小, 主要为其他因子主导。粮食产量在各时段内均与降水具有良好的正相关关系, 在第I时段内相关系数为0.494、第II时段为0.671、第III时段为0.652, 表明云南省粮食产量在各时段内均显著受降水影响, 即降水是制约粮食生产的主要因子。

由降水极大值到极小值取一条南北向样带, 由南向北涵盖全省主要降水量及梯度变化(图4a)。等间距采集样带内耕地斑块的降水与粮食产量两组数据(肉奶产量与降水相

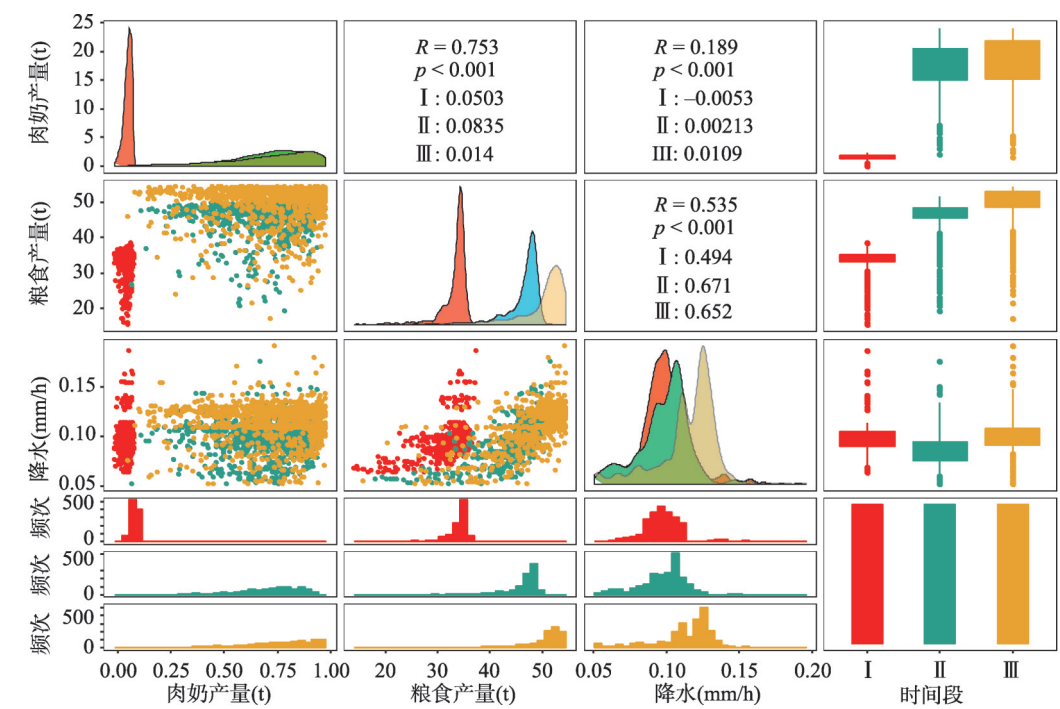


图3 降水量与食物供给的相关关系

Fig. 3 Correlation between precipitation and food supply

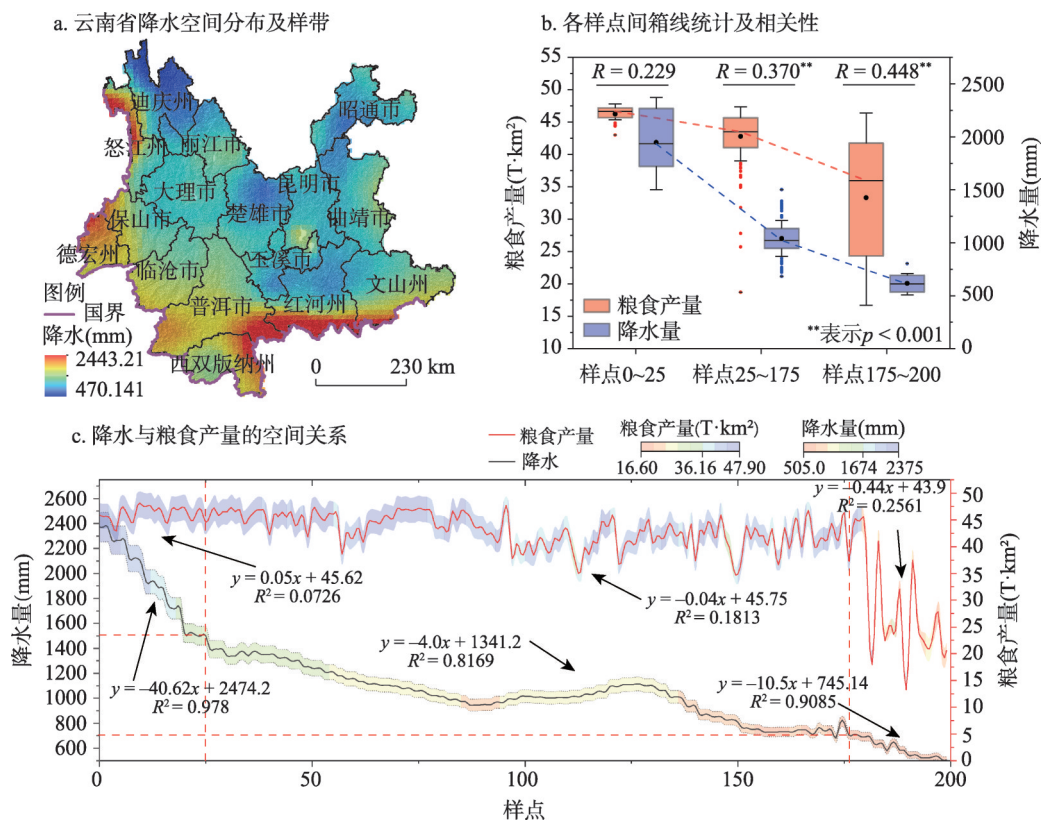


图4 降水量与粮食产量的空间变化关系

Fig. 4 The spatial relationship between precipitation and grain production

相关性较弱), 绘制趋势图, 如图4c所示。从降水的趋势来看, 在样点0~25处降水量迅速下降、25~175处缓慢下降、175后迅速下降。根据上述降水趋势将整个过程划分为样点0~25、样点25~175、样点175~200这3个阶段, 对每个阶段内降水与粮食产量分别进行箱线统计和相关性分析, 结果如图4b。

样点0~25, 降水量拟合方程为 $y = -40.62x + 2474.2$, b 小于0, 为线性递减函数, 粮食产量拟合方程为 $y = 0.05x + 45.62$, $b > 0$, 为线性递增函数; 样点25~175, 降水量拟合方程为 $y = -4.0x + 1341.2$, $b < 0$, 为线性递减函数, 粮食产量为 $y = -0.04x + 45.75$, $b < 0$, 为线性递减函数; 样点175~200, 降水量拟合方程为 $y = -10x + 745.14$, $b < 0$, 呈线性递减, 粮食产量为 $y = -0.44x + 43.9$, $b < 0$, 呈线性递减。在降水量上, 斜率 b 呈样点25~175 > 样点175~200 > 样点0~25, 表明降水量在0~25下降速度最快, 其次为样点175~200。在粮食产量上, 样点175~200下降速度最快。在相关性上, 样点25~175的粮食产量与降水量为负相关关系 ($R = -0.229$), 即随降水量的迅速减少, 其粮食产量增加, 样点175~200的降水量与粮食产量为显著的正相关关系 ($R = 0.370$), 表明随降水量减少, 其对应的粮食产量也呈下降趋势, 样点175~200的粮食产量与降水量为显著正相关关系 ($R = 0.448$), 即随降水量下降, 粮食产量减少。从相关系数的大小来看, 样点175~200的相关系数最大, 即在此阶段内, 降水量与粮食产量的对应关系最好。从样点的波动来看, 在降水量上样点175~200波动最小, 样点0~25波动最大, 在粮食产量上样点0~25最稳定, 样点175~200波动最大。

从粮食产量对降水的响应特征来说:当降水量 ≥ 1500 mm时,降水与粮食产量相关关系变弱,降水量快速下降,粮食产量保持平稳,水分为非限制因子,说明降水量高于作物生长需水量,降水量在一定范围内减少,对粮食产量影响较小,为降水盈余带;当降水量为700~1500 mm时,降水量与粮食产量为显著正相关关系,二者变化趋势一致,水分为限制因子,说明降水量基本满足或略高于作物需水量,为降水持平带;当降水量 < 700 mm时,降水量与粮食产量为显著正相关关系,二者变化趋势高度一致,水分为决定性因子,说明降水量无法稳定保障作物生长的基本需水量,为降水亏缺带;从粮食产量对降水量的响应来看,盈余带粮食产量对降水响应最弱,降水量快速下降,其粮食产量保持相对平稳的增长;降水持平带内,粮食产量对降水的响应程度开始增加,二者变化趋势保持一致,降水量下降,粮食产量也呈下降趋势,但其波动幅度大于降水量;降水亏缺带内,粮食产量对降水量高度响应,降水减少,粮食产量快速下降,降水量的小幅波动,引起粮食产量的大幅响应振动。

4 讨论

4.1 降水与粮食产量的关系及作用机制

云南省的粮食作物主要以水稻、小麦与玉米为主。一般认为,正常降水条件下,适度的降水增加有助于食物产量提升。茹晓雅的研究表明在平水年小麦产量达到最优,降水需要增加45.26%^[39];在水分亏缺的条件下,作物气孔等呼吸器官闭合,光合作用效率减弱,使作物减产。晁漫宁的研究表明干旱会降低小麦光合能力,增强抗氧化能力,抑制籽粒淀粉合成和积累,影响植株结实、籽粒发育和品质形成,导致产量显著下降^[29],李红伟^[30]、杨喆等^[31]分别在玉米与水稻中揭示了干旱胁迫对其产量的影响;在水分盈余条件下,作物根系与叶片被水分浸泡,水中二氧化碳浓度降低、水体透光性变差,从而使作物光合速率下降,进而使作物减产。韩芳玉的研究揭示了降水量与水稻产量呈倒“U”型关系,随着降水量的增加,水稻产量先增加,达到一定值后开始下降^[40],姬静华等^[41]、李彩霞^[42]等在玉米和小麦中证明了降水盈余会造成减产。相关研究^[32]揭示了ROS(活性氧)对作物产量具有显著影响,通过相关成果,总结了水分对作物产量的作用机制,如图5所示。

本文研究结论显示,在云南省降水与粮食产量分为3个响应阶段:降水在1500 mm以上,降水与粮食产量为不显著相关关系,降水过多导致粮食轻微减产,与朱海霞等^[43]、王吉等^[44]在试验田中的结论相似;在700~1500 mm降水段,降水与粮食产量为显著正相关关系,与茹晓雅等^[39]、张金艳等^[45]的研究结论一致;在700 mm降水以下,粮食产量大幅波动,且快速下降,降水过少导致粮食减产,与齐伟^[46]、李红伟的研究结果相似^[30]。目前的研究,主要通过大田实验和控制实验,揭示了单一作物在单一水分条件下产量的变化特征。对大尺度、大范围内粮食作物与多梯度降水之间关系,研究还不足。本文揭示了云南省省域尺度上降水变化与粮食产量之间的关系,阐述了降水盈余、降水持平、降水亏缺多个降水梯度下粮食产量的变化,既是目前研究的补充也是其拓展。

降水是决定粮食产量的基础性因子,同时在全球气候变化背景下,也是众多影响粮食产量因子中最不稳定的因子之一。本文阐述了降水盈余、降水持平、降水亏缺多个降水梯度下粮食产量的变化,但在3个梯度下,其他影响粮食产量的因子是如何变化的?如土壤肥力、劳动力、耕作技术、地形地貌、气温、农业政策等,是本文有待解决的问题之一。

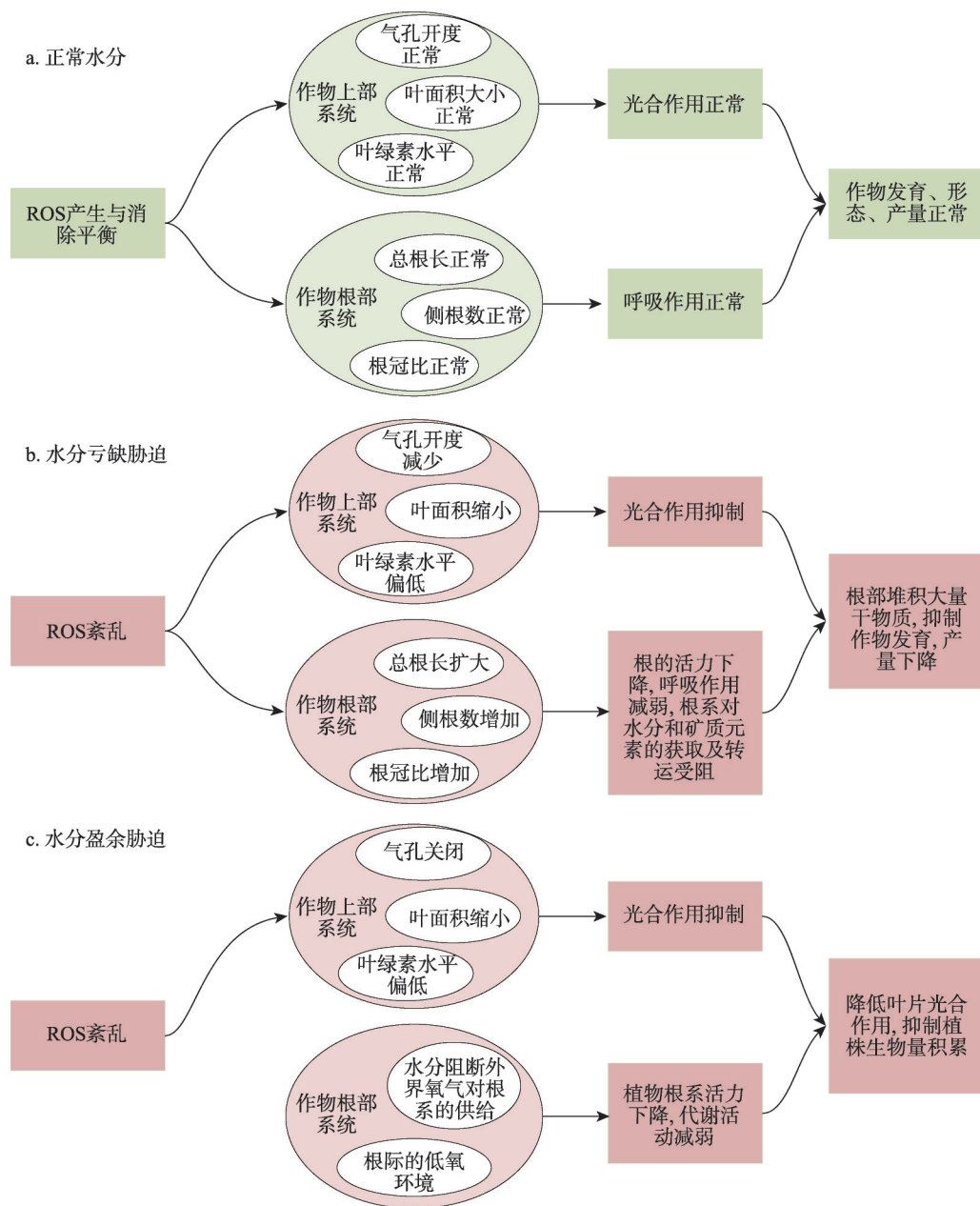


图5 水分对作物产量的作用机制

Fig. 5 The mechanism of precipitation on crop yield

全球气候变化背景下, 降水愈发的不稳定, 如何科学有效地预测、模拟未来降水趋势, 是一个亟待学界解决的关键科学问题。本文目前只对1988—2018年云南省的降水特征进行了表征, 通过降水历时曲线与变化特征划分了I (1988—2004年) 降水丰沛期、II (2005—2015年) 降水偏少期、III (2016—2018年) 降水恢复期, I、II阶段时间在10 a以上, 而III阶段为3 a。第II阶段年平均降水量1055.51 mm, 第III阶段为1164.57 mm, 显著高于第II阶段, 因此将其划分为降水恢复期, 从降水量上来看, 第III阶段表征出了此阶段的降水特征, 但3年的时间是否足够表征降水的特征与规律还待讨论。进一步而

言, 识别降水特征与规律的最小时间尺度、空间尺度是多少? 科学依据与机理问题还需学界深入探讨。

4.2 云南省粮食产量对降水的响应特征及空间区划

地理区划是地理学研究的传统和核心内容^[47], 自 1929 年竺可桢先生发表《中国气候区域论》之始, 后黄秉维与李旭旦两位先生于 1940 年和 1947 年开展了中国植被区划与中国地理区域划分等工作^[48], 使中国地理区划进入正轨。目前全国性区划方案、部门区划方案、区域区划方案已较完备, 成果显著, 在促进地理学科发展, 服务国家社会经济建设做出了重要贡献^[49]。全球气候变化背景下, 降水格局发生了剧烈变化。识别粮食产量对降水响应的区域特征, 是保障区域粮食安全的关键科学问题, 但关于降水与粮食产量相关区划的报道, 目前还较为少见^[47-49]。故本文在样带研究的基础上, 尺度上推, 进行云南省粮食产量对降水响应的空间区划, 以便为今后粮食供给安全、农业发展、粮食主产、稳产区划定、以及抗旱救灾等工作提供支持。

根据样带上粮食产量对降水量的响应特征, 将全省区划为降水亏缺 ($< 700 \text{ mm}$)、降水持平 ($700 \sim 1500 \text{ mm}$)、降水盈余 ($\geq 1500 \text{ mm}$), 结果如图 6a。为了论证尺度上推的可靠性, 提取各分区内耕地斑块的粮食产量及其对应的降水量 (图 6c), 绘制箱线图及对每个区间内的降水与粮食产量进行相关分析, 结果如图 6b。由图 6b 可知从降水亏缺—降水持平—降水盈余, 粮食产量和降水量均为增加趋势, 从亏缺到持平, 降水量增加趋势弱于粮食产量, 表明粮食产量响应强度高于降水增加幅度; 从持平到亏缺, 降水增加幅度达到最大, 但粮食产量增幅较为平缓, 表明粮食对降水量的响应较弱; 在相关关系上, 降水亏缺与降水持平阶段内粮食产量与降水量均为显著正相关关系 (相关系数分别为 0.169、0.436, $p < 0.001$), 在降水盈余内为非显著弱相关, 表明在降水亏缺与盈余区内, 降水是制约粮食产量的限制因子, 而在降水盈余区为非制约因子; 从数据的形态来看, 在降水亏缺区, 降水波动最小, 而粮食产量波动达到最大, 表明降水微小波动便会引起粮食产量的大幅波动, 在降水盈余区则相反, 降水量大幅波动, 但粮食产量较为平稳, 表明降水量剧烈变化不会引起粮食产量的显著变化。综上, 各区划内粮食产量与降水量的响应关系及数据形态, 与样带内相似, 表明从样带尺度上推至全省尺度, 符合样带内得出的相关结论。

降水亏缺区面积为 10834.83 km^2 , 占比为 2.8%, 区内水分是作物生产的绝对限制因子, 水分下降导致作物产量快速、大幅波动下降, 对干旱最为敏感, 是干旱灾害爆发的主要区域。故本区降水格局变化将对粮食产量产生显著影响, 建议在区内修建蓄水与灌溉设施, 削弱降水敏感性, 保障粮食生产, 同时加强降水监测, 预警干旱, 提前调配粮食, 保证区内食物供给; 降水持平区为 323191.68 km^2 , 占比为 84.3%, 区内水分是作物生产的限制因子, 水分与作物产量变化速度基本一致, 且幅度较小, 其作物产量与降水量相对稳定, 在降水偏多年份产量增加, 偏少年份产量下降, 但其变化幅度较小。本区是云南省的粮食主产区, 建议一方面培育耐旱粮食品种, 减少降水对粮食产量的限制, 另一方面修建水利设施保证干旱年作物灌溉; 降水盈余区为 49469.57 km^2 , 占比为 12.9%, 区内水分是作物产量的非限制因子, 水分与粮食产量不具有相关关系, 降水量大幅波动, 粮食产量变化较小, 但本区降水量 $\geq 1500 \text{ mm}$, 易爆发洪涝灾害, 故应警惕洪涝灾害对粮食产量的影响。从面积来看, 降水持平区占全省面积的绝大部, 其降水量与粮食产量为正相关关系, 但粮食产量对降水的响应强度低于降水亏缺区, 即降水量的波动不会引起粮食产量的剧烈波动, 因此降水持平区是保障云南省粮食产量稳定的主要区域。

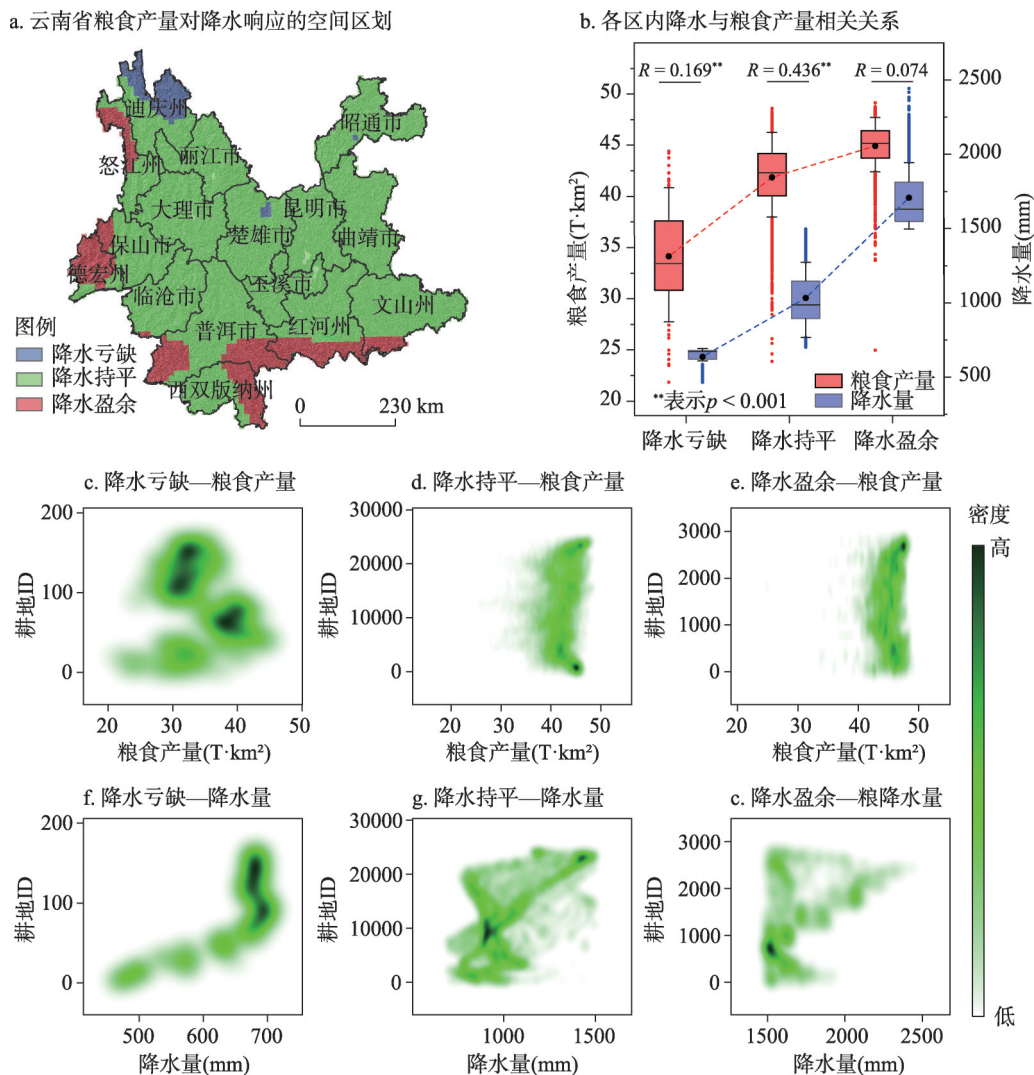


图6 云南省食物产量对降水响应的空间区划

Fig. 6 Spatial division of grain output in Yunnan Province in response to precipitation

作物生长具有明显的时间段，但本文并未使用作物生长季对应的降水来进行区划。主要原因是在山地立体气候下识别作物生长季是十分困难的，如哈尼梯田河谷区作物为一年两季，而在水平距离60 km的半山地区为一年一季，河谷区作物生长季是半山区的2倍。再如西双版纳、德宏、红河、临沧、文山及昆明、玉溪、曲靖等部分区域，作物可达一年2~3季。换言之，在云南部分区域，水热条件可以满足作物全年生长，也是云南被称为“植物王国”的原因之一。因此在云南使用年平均降水较生长季降水更合适，但由于生长季难以识别，使本文难以讨论二者的差异。

5 结论

(1) 在时间格局上，过去30年云南省降水在2005年和2016年2个时间点上发生了突

变,划分为3个降水时段,分别为I(1988—2004年)降水丰沛期、II(2005—2015年)降水偏少期、III(2016—2018年)降水恢复期。

(2)在空间格局上,第I~II时段内,云南省降水发生显著变化区域面积为57938.69 km²,占全省的15.07%,滇西北降水呈显著下降,滇西南、滇东北显著增加;第II~III时段内,云南省降水发生显著变化区域面积为53190.84 km²,占全省的13.87%,滇西北的大理及迪庆州的小部显著下降,滇西南、东北和滇中抚仙湖流域显著增加;第I~III时段内,云南省降水显著变化区域为63401.72 km²,占比为16.53%,显著增加区主要集中在滇西北、滇西南、滇中等地,显著下降区域出现在滇西北的迪庆州与滇东的曲靖市。

(3)在降水与食物产量关系上,降水与肉奶产量的相关系数为0.189,且 $p < 0.01$,降水与粮食产量的相关系数为0.535,且 $p < 0.01$ 。表明降水对食物产量具有显著的影响。

(4)在食物产量对降水格局变化的空间响应特征上,分为3个响应带:当降水量 ≥ 1500 mm,降水量与粮食产量为不显著弱相关关系,降水量快速下降,粮食产量保持稳定,为降水盈余带;当降水量700~1500 mm,降水量与粮食产量为显著正相关关系,降水量与粮食产量为缓慢、小幅下降趋势,为降水持平带;当降水 < 700 mm,降水量与粮食产量为显著正相关关系,降水量小幅下降,粮食产量大幅波动下降,为降水亏缺带。

(5)云南省粮食产量对降水响应的空间区划:降水亏缺区面积为10834.83 km²,占比为2.8%,区内水分是作物生产的绝对限制因子;降水持平区为323191.68 km²,占比为84.3%,区内水分是作物生产的限制因子;降水盈余区为49469.57 km²,占比为12.9%,区内水分是作物产量的非限制因子。

参考文献(References)

- [1] Barros V R, Field C B, Dokken D J, et al. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Zampieri M, Ceglar A, Dentener F, et al. When will current climate extremes affecting maize production become the norm? *Earth's Future*, 2019, 7(2): 113-122.
- [3] Miralles D G, Gentile P, Seneviratne S I, et al. Land-atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: State of the science and current challenges. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2019, 1436(1): 19-35.
- [4] Kahiluoto H, Kaseva J, Balek J, et al. Decline in climate resilience of European wheat. *PNAS*, 2019, 116(1): 123-128.
- [5] Pendergrass A G. What precipitation is extreme? *Science*, 2018, 360(6393): 1072-1073.
- [6] Ault T R. On the essentials of drought in a changing climate. *Science*, 2020, 368(6488): 256-260.
- [7] Hu T, van Dijk A I J M, Renzullo L J, et al. On agricultural drought monitoring in Australia using Himawari-8 geostationary thermal infrared observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 91: 102153. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102153.
- [8] Chen S A, Michaelides K, Grieve S W D, et al. Aridity is expressed in river topography globally. *Nature*, 2019, 573(7775): 573-577.
- [9] Konapala G, Mishra A K, Wada Y, et al. Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3044. DOI: 10.1038/s41467-020-16757-w.
- [10] Valmassoi A, Dudhia J, Di Sabatino S, et al. Irrigation impact on precipitation during a heatwave event using WRF-ARW: The summer 2015 Po Valley case. *Atmospheric Research*, 2020, 241: 104951. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.104951.
- [11] Blöschl G, Hall J, Viglione A, et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 2019, 573(7772): 108-111.
- [12] Nyström M, Jouffray J B, Norström A V, et al. Anatomy and resilience of the global production ecosystem. *Nature*, 2019, 575(7781): 98-108.
- [13] Sadri S, Pan M, de Wada Y, et al. A global near-real-time soil moisture index monitor for food security using integrated

- SMOS and SMAP. Remote Sensing of Environment, 2020, 246: 111864. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111864.
- [14] Knutti R, Sedláček J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 369-373.
- [15] Chadwick R, Boutle I, Martin G. Spatial patterns of precipitation change in CMIP5: Why the rich do not get richer in the tropics. *Journal of Climate*, 2013, 26(11): 3803-3822.
- [16] Polade S D, Pierce D W, Cayan D R, et al. The key role of dry days in changing regional climate and precipitation regimes. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 4364. DOI: 10.1038/srep04364.
- [17] Kumar S, Lawrence D M, Dirmeyer P A, et al. Less reliable water availability in the 21st century climate projections. *Earth's Future*, 2014, 2(3): 152-160.
- [18] Sillmann J, Kharin V V, Zwiers F W, et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(6): 2473-2493.
- [19] Kharin V V, Zwiers F W, Zhang X, et al. Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, 2013, 119(2): 345-357.
- [20] Li Qifen, Wu Zhehong, Wang Xingju, et al. The characteristics of summer precipitation in China since 1981 and its relationship with SST and pre-circulation. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(1): 58-67. [李启芬, 吴哲红, 王兴菊, 等. 1981年以来中国夏季降水变化特征及其与SST和前期环流的关系. *高原气象*, 2020, 39(1): 58-67.]
- [21] Zhang Zhao, Chen Baorui, Xin Xiaoping. Variations of temperature and precipitation pattern in Hulunber grassland from 1960 to 2015. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(12): 121-128. [张钊, 陈宝瑞, 辛晓平. 1960—2015年呼伦贝尔草原气温和降水格局变化特征. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(12): 121-128.]
- [22] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm wet in northwest China. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152-164. [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152-164.]
- [23] Hulme M. Recent climatic change in the world's drylands. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(1): 61-64.
- [24] Cao Yan, Wang Jie, Huang Ying, et al. Research on spatial and temporal variation characteristics of climate dry-wet status in Yunnan province. *Water Resources and Power*, 2017, 35(8): 6-9, 22. [曹言, 王杰, 黄英, 等. 云南省气候干湿状况时空变化特征研究. *水电能源科学*, 2017, 35(8): 6-9, 22.]
- [25] Gornall J, Betts R, Burke E, et al. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1554): 2973-2989.
- [26] Challinor A J, Watson J, Lobell D B, et al. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 2014, 4(4): 287-291.
- [27] Knapp A K, Fay P A, Blair J M, et al. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland. *Science*, 2002, 298(5601): 2202-2205.
- [28] Lv Guangde, Wang Chao, Jin Xuemei, et al. Effects of water-nitrogen interaction on dry matter, nitrogen accumulation and yield of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2593-2603. [吕广德, 王超, 靳雪梅, 等. 水氮组合对冬小麦干物质及氮素积累和产量的影响. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2593-2603.]
- [29] Chao Manning, Shi Xinyue, Zhang Jianlong, et al. Effects of persistent drought at grain filling stage on flag leaf photosynthesis, antioxidant enzyme activity, grain yield and quality of wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(4): 494-502. [晁漫宁, 史新月, 张健龙, 等. 灌浆期持续干旱对小麦光合、抗氧化酶活性、籽粒产量和品质的影响. *麦类作物学报*, 2020, 40(4): 494-502.]
- [30] Li Hongwei, Jiang Yanping, Jia Shuangjie, et al. Research progress on drought stress affecting ear and tassel development of maize. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(2): 90-95. [李红伟, 江艳平, 贾双杰, 等. 干旱胁迫影响玉米穗发育的研究进展. *玉米科学*, 2020, 28(2): 90-95.]
- [31] Yang Zhe, Tang Caibao, Qian Jingya, et al. Effects of exogenous 6-BA and BR on photosynthetic pigment content and antioxidant system of rice in tillering stage under drought stress. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(8): 2733-2739. [杨喆, 唐才宝, 钱婧雅, 等. 外源6-BA和BR对干旱胁迫下水稻分蘖期光合色素含量及抗氧化系统的影响. *分子植物育种*, 2021, 19(8): 2733-2739.]
- [32] Wang Fuxiang, Xiao Kaizhuang, Jiang Shenfei, et al. Mechanisms of reactive oxygen species in plants under drought stress. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(17): 1765-1779. [王福祥, 肖开转, 姜身飞, 等. 干旱胁迫下植物体内活性氧的作用机制. *科学通报*, 2019, 64(17): 1765-1779.]
- [33] Yunnan Provincial Bureau of Statistics. *Yunan Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2019: 122-134. [云南省统计局. *云南统计年鉴*. 北京: 中国统计出版社, 2019: 122-134.]

- [34] He J, Yang K, Tang W, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. *Scientific Data*, 2020, 25(7). DOI: 10.1038/s41597-020-0369-y.
- [35] Yang Kun, He Jie. China meteorological forcing dataset (1979-2018). National Tibetan Plateau Data Center, 2019. DOI: 10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file. CSTR: 18406.11.AtmosphericPhysics.tpe.249369.file. [阳坤, 何杰. 中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集(1979—2018). 国家青藏高原科学数据中心, 2019. DOI: 10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file. CSTR: 18406.11.AtmosphericPhysics.tpe.249369.file.]
- [36] Zhao Wenliang, He Zhen, He Junping, et al. Remote sensing estimation for winter wheat yield in Henan based on the MODIS-NDVI data. *Geographical Research*, 2012, 31(12): 2310-2320. [赵文亮, 贺振, 贺俊平, 等. 基于MODIS-NDVI的河南省冬小麦产量遥感估测. *地理研究*, 2012, 31(12): 2310-2320.]
- [37] Peng J, Hu X, Wang X, et al. Simulating the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services trade-offs in Northwestern Yunnan, China. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 1-9. DOI: 10.1016/j.ecoser.2019.100998.
- [38] Wu Wenhuan, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos City. *Progress in Geography*, 2017, 36(12): 1571-1581. [武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析. *地理科学进展*, 2017, 36(12): 1571-1581.]
- [39] Ru Xiaoya, Li Guang, Chen Guopeng, et al. Regulation effects of water and nitrogen on wheat yield and biomass in different precipitation years. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(11): 1725-1734. [茹晓雅, 李广, 陈国鹏, 等. 不同降水年型下水氮调控对小麦产量及生物量的影响. *作物学报*, 2019, 45(11): 1725-1734.]
- [40] Han Fangyu, Zhang Junbiao, Cheng Linlin, et al. Impact of climate change on rice yield and its regional heterogeneity in China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(3): 283-289. [韩芳玉, 张俊彪, 程琳琳, 等. 气候变化对中国水稻产量及其区域差异性的影响. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(3): 283-289.]
- [41] Ji Jinghua, Huo Zhiguo, Tang Lisheng, et al. Waterlogging effects on the morphological, physiological characteristics and yield of fresh eating maize. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(3): 85-91. [姬静华, 霍治国, 唐力生, 等. 鲜食玉米形态特征、生理特性及产量对淹水的响应. *玉米科学*, 2016, 24(3): 85-91.]
- [42] Li Caixia, Zhou Xinguo, Wang Hezhou, et al. Root zone soil temperature and grain filling progress of winter wheat under water flooding at grain filling stage. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(6): 1232-1236. [李彩霞, 周新国, 王和州, 等. 小麦花后淹水胁迫对根区土温及籽粒灌浆的影响. *麦类作物学报*, 2013, 33(6): 1232-1236.]
- [43] Zhu Haixia, Jiang Lixia, Lv Jiajia, et al. Effect of waterlogging stress on yield components for rice of frigid region. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(5): 198-206. [朱海霞, 姜丽霞, 吕佳佳, 等. 淹水胁迫对寒地水稻产量构成因子的作用. *自然灾害学报*, 2019, 28(5): 198-206.]
- [44] Wang Ji, Li Fenghai, Lv Xiangling, et al. Physiological response of waxy corn near-isogenic lines to waterlogging. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(5): 65-70. [王吉, 李凤海, 吕香玲, 等. 淹水对糯玉米耐涝性差异近等基因系生理指标的影响. *玉米科学*, 2018, 26(5): 65-70.]
- [45] Zhang Jinyan, Li Xiaoquan, Zhang Tan. The characteristics of weather yield for global crop and its relationship with precipitation. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1999, 10(3): 327-332. [张金艳, 李小泉, 张谭. 全球粮食气象产量及其与降水量变化的关系. *应用气象学报*, 1999, 10(3): 327-332.]
- [46] Qi Wei, Zhang Jiawang, Wang Kongjun, et al. Effects of drought stress on the grain yield and root physiological traits of maize varieties with different drought tolerance. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 48-52. [齐伟, 张吉旺, 王空军, 等. 干旱胁迫对不同耐旱性玉米杂交种产量和根系生理特性的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 48-52.]
- [47] Fang Chuanglin, Liu Haimeng, Luo Kui, et al. Comprehensive regionalization of human geography in China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(2): 179-196. [方创琳, 刘海猛, 罗奎, 等. 中国人文地理综合区划. *地理学报*, 2017, 72(2): 179-196.]
- [48] Shen Yuancun, Wang Xiuhong, Cheng Weiming, et al. Integrated physical regionalization of stony deserts in China. *Progress in Geography*, 2016, 35(1): 57-66. [申元村, 王秀红, 程维明, 等. 中国戈壁综合自然区划研究. *地理科学进展*, 2016, 35(1): 57-66.]
- [49] Zheng Du, Ge Quansheng, Zhang Xueqin, et al. Regionalization in China: Retrospect and prospect. *Geographical Research*, 2005, 24(3): 330-344. [郑度, 葛全胜, 张雪芹, 等. 中国区划工作的回顾与展望. *地理研究*, 2005, 24(3): 330-344.]

Spatiotemporal patterns of precipitation changes and their impacts on food supply in Southwest China from 1988 to 2018: A case study in Yunnan Province

LIU Zhilin, DING Yinping, JIAO Yuanmei

(Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: As the effects of climate change become more devastating, the changes of precipitation patterns and food supply are and will be major challenges facing mankind nowadays and in the future. But the interannual relationship between the precipitation patterns and the food yields is still unclear. Studying changes in food yields and precipitation in those areas where the southwest and southeast monsoons interact is significant to revealing the dynamic correlation of food and precipitation, achieving regional food security, ensuring the stability of the southwestern frontier, implementing regional ethnic policies, and building a harmonious well-off society. The paper takes Yunnan Province in Southwest China as an example to describe the pattern of precipitation changes from 1988 to 2018 and discusses its impact on food production. The results suggested that: (1) The precipitation patterns of Yunnan are classified into three periods: I abundance period (1988-2004), II shortage period (2005-2015), and III recovery period (2016-2018). (2) Areas with significant changes account for 15.07% of the whole province in periods I-II to 13.87% in periods II-III and to 16.53% in periods I-III. (3) There is a significant positive relationship between precipitation and food supply ($p < 0.01$) across the province. The correlation index between crops yields and precipitation of the three periods is higher than that between precipitation and meat-and-dairy products. (4) In three precipitation value (d) zones, food yields had different responses to changes in precipitation. When $d \geq 1500$ mm, the precipitation plummets while the food yield remains stable. When $1500 > d > 700$ mm, the two values will decrease simultaneously. When $d < 700$ mm, a small decrease in precipitation will cause a large decrease in food yields. All in all, the precipitation pattern in Yunnan has undergone significant changes in the past 30 years, which has an essential impact on the food yields in different regions. Therefore, sorting out the grain-precipitation spatial region of the province can help us combat the increasing precipitation pattern changes.

Keywords: precipitation pattern; spatial and temporal patterns; food supply; change; response; division into districts; Yunnan