

西南地区耕地复种指数的时空格局 演变及影响因素

张闯娟^{1,2}, 何洪鸣^{1,3,4}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 黄河水土保持天水治理监督局(天水水土保持科学试验站), 甘肃 天水 741000;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 华东师范大学地理科学学院, 上海 210062)

摘要:基于复种指数和“热量-降水”定量关系模型, 分析了西南三省(四川省、贵州省、云南省)从1990—2015年间耕地复种指数的变化趋势、格局演变及其影响因素。结果表明:从1990—2015年云南、贵州和四川复种指数比分别降低27.04%、1.67%和25.83%, 复种指数均值分别为147.37%、239.69%和206.05%。2006—2015年为三省粮食作物复种指数波动变化最大的时期, 该期粮食作物复种指数年际变动率为四川>贵州>云南, 其值分别为-41.01%、-33.55%和-29.60%。西南地区耕地复种指数总体上呈东高西低的空间分布格局, 其中东部地区耕地复种指数明显高于西部地区, 中部地区高于北部和南部地区。2010—2015年, 中国西南地区潜力复种指数均为东部和南部地区高于中部和西北部地区, 其中四川东部地区潜力复种指数最大; 云南省耕地复种可提升潜力值, 明显高于贵州和四川, 贵州省可提升潜力地区最少。耕地复种指数年际变化受自然因素和人类活动的影响较大, 其中复种指数与年均温度、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、人口数量和农业生产总值呈显著的正相关关系; 一般而言, 丘陵地区耕地复种指数低于平原地区; 气候因子中的温度变化与西南地区复种指数之间的变化呈显著的正相关关系($P < 0.01$), 但温度变化是其变化的关键因子。

关键词:耕地复种指数; 时空格局演变; 影响因素; 土地利用集约度; 西南三省

中图分类号:S157.4 **文献标志码:**A

The evolution of spatiotemporal patterns and the influencing factors of the multiple cropping index of cultivated land in Southwest China

ZHANG Chuangjuan^{1,2}, HE Hongming^{1,3,4}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Tianshui Managment Supervision of Soil and Water Conservation in the Yellow River/Tianshui Experiment Station on Soil and Water Conservation, Tianshui, Gansu 741000, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

4. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 210062, China)

Abstract: Based on the multiple cropping index (MCI) and “heat-precipitation” quantitative relation model, this paper analysed the changing trends and pattern evolution of the MCI from the 1990 to 2015 and its influencing factors. The results indicated that from 1990 to 2015, the MCI values of Yunnan, Guizhou, and Sichuan decreased by 27.04%, 1.67%, and 25.83%, respectively. The average values of MCI values were 147.37%, 239.69%, and 206.05%, respectively. The greatest change in the three provinces occurred from 2006 to 2015. The inter-annual variations in the grain crop MCIs were ranked as follows: Sichuan > Guizhou > Yunnan, with values of -41.01%, -33.55% and -29.60%, respectively. The MCI in the Southwest China as a whole, the spatial pattern was significantly higher in the Eastern Region than that in the Western Region and higher in the Central Region than in the

收稿日期:2019-07-21

修回日期:2019-11-15

基金项目:国家重点研发计划“生物多样性变化及保育体系综合评价”; 国家重点专项“西南高山峡谷地区生物多样性保护与恢复技术”(2017YFC0505205))

作者简介:张闯娟(1993-), 女, 甘肃静宁人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与农业可持续发展。E-mail: 1529699175@qq.com

通信作者:何洪鸣(1975-), 男, 广东兴宁人, 研究员, 博士生导师, 主要从事自然地理及水土保持研究。E-mail: hongming.he@yahoo.com

Northern and Southern Regions. In 2010–2015, in Southwest China, the PMCIs in the Eastern and Southern Regions were higher than those in the Central and Northwestern Regions; among them, the PMCI in Eastern Sichuan was the largest. The PIMCI was significantly higher in Yunnan Province than in Guizhou and Sichuan. Guizhou Province had the least potential area for promotion. The interannual variation of the MCI was greatly affected by natural factors and human activities, among which the MCI had a significant positive correlation with the year average temperature, accumulated temperature $\geq 0^{\circ}\text{C}$, population, and gross farm production. The spatial variation in the MCI was closely related to the terrain. Generally, the MCI in the hilly area is lower than that in the plain area; There was a significant positive correlation between the temperature change in the climatic factors and the change in the MCI in the Southwest China ($P < 0.01$), but the temperature change was the key factor affecting the MCI changes.

Keywords: multiple cropping index; spatiotemporal pattern evolution; influence factors; degree of land intensive use; Southwest China

城市化的发展使得现有的耕地资源在不断减少,而复种是在耕地资源总量不变的情况下通过增加一年内作物播种面积,在时空尺度上有效利用现有耕地资源,从而提高作物产量的一种作物种植模式^[1],研究表明,全球范围内有 37.55% 的耕地面积可以实行复种^[2],复种是增加区域粮食产量最直接且有效的方式^[3]。

实际复种指数是对真实耕地复种情况的观测^[4–5],从研究方法看,其通常是以统计数据为基础的耕地复种指数计算和以遥感 SPOT–NDVI 数据为基础的植物净初级生产力监测^[6–7]。现有的研究内容主要集中于评估复种指数对粮食增产的贡献大小、复种指数的时间变化特征和时空差异动因分析及最大复种潜力的计算等方面的研究。如刘巽浩^[8]研究发现,1952—1995 年中国的实际复种指数由 131% 上升到 158%^[9],且以复种为中心的多熟制耕地上所生产的粮食约占全国的 75%^[10]。随后,一些研究者利用统计资料分析较长时间内复种指数的变化特征,得出中国的耕地实际复种指数从北到南逐渐增加,中国各省级行政区的情况在空间上差异明显^[11]。而潜在复种指数是通过多熟种植模式充分利用水、土、光和热等自然资源所能达到的最大复种指数,是对耕地潜在复种能力的预测^[12–13]。Ray 等^[14]利用温度阈值法估算了全球 10 km 空间尺度网格下的最大复种潜力。随后,一些研究者根据地区的热量和降水与相应的复种指数的相关关系,建立了“热量–降水”复种潜力经验估算模型^[9,15],之后利用农业生态区模型和随机前沿法,综合考虑了温度、降水、土壤、地形和社会经济等因素^[9,16],估算了中国复种潜力最大值。

从研究区域和尺度来看,目前已有的研究主要集中在粮食主产区华北、华中和长江中下游地区,但是这些地区的复种指数一般比较高,然而,西南

地区耕地复种指数面临的现状和问题是旱地复种指数普遍较低,地区间发展不协调,冬闲田大量存在。随着耕地质量和产能的逐步降低,加之气候变暖造成该区生态环境进一步退化,使高原山地水田多熟种植界限向北、向西推进^[17]。同时,农业生产强调发展高效经济作物,从而在一定程度上忽视粮食生产、压缩双季稻种植面积的倾向,致使近年来西南地区耕地复种指数有下降趋势^[18–19],因此针对该区复种指数的时空变化研究已经成为该区土地利用覆被研究的重要内容,而以往针对西南地区耕地复种指数的时空变化特征研究并不多见,因此本文通过研究西南三省(四川省、贵州省、云南省)实际复种指数整体年际变化特征及空间格局变化,估算各区的增产潜力,评估各区域耕地实际复种指数可提升的不同潜力区域分布,探讨对其影响的关键因子,为合理调控气候变化下作物种植模式及制定该区农业发展政策提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西南 3 省包括四川、贵州和云南,海拔分布在 500~2 000 m 之间,区内山川河流密布,降雨较多但各地分布不均,多年来生态严重退化,是中国典型的粮油产区,其生产的粮食作物水稻、经济作物油菜籽产量分别占全国总产量的 15.8% 和 24.2%^[20]。气候从热带、亚热带至寒带均有分布,形成垂直的立体景观,水热条件优越,年降水量在 1 000 mm 以上,时空分布均衡,雨热同季^[18,21],集南方的热量和北方的光照为一体^[22],可实行一年两到三熟,但西南地区受季风气候和地形(图 1)综合因素的影响,农作物种植主要集中在海拔较高的高山地区,抵抗自然灾害的能力较弱,产量不稳定。70% 的玉米种植在山区和高海拔地区,自然灾害多^[23],年际间差

异较大。该区是中国为数不多的多熟制地区,分布有一年一熟、一年两熟、一年三熟农业资源独厚,具有提高复种潜力和提高耕地利用率的优越条件,在面临复杂的“人-地”矛盾,即粮食需求大,生产力水平低、耕地资源有限的情况下,充分利用优越的水热条件,挖掘耕地复种潜力,成为缓解该地区人增地减矛盾和保障区域粮食安全的重要途径^[18,24]。

1.2 数据来源及处理

本文耕地数据主要来源于西南 3 个省(四川省、贵州省、云南省)的统计年鉴和国土资源部等部门土地调查修正后的数据,粮食作物产量、粮食作物播种面积、农作物播种面积等粮食生产数据来源于农业部历年《中国农业统计资料》;2012 年后的耕地面积数据为第二次全国土地调查数据及其变更调查数据;气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)的地面气候日值数据集;DEM 数据来源于中国科学院计算机网络中心的地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。

农业调查数据为 1978 年之后筛选完耕地面积与播种面积数据中的异常数据后的有效年份数据,然后计算实际复种指数,其理论值在 0%~300%之间^[25]。针对西南三省各个气象站点的日值数据转换成年值数据,计算出各个站点每年的年降水量及≥0℃年活动积温,然后在 ArcGIS 软件 ArcView 支持下对气象数据进行克里金插值处理,利用空间分辨率为 1 km 的图像得到西南三省积温和降水量栅格图,将插值后生成的空间栅格数据通过 Geospatial Modelling Environment 工具在市、县级行政单元边界内平均得到市、县域单元每年的平均年降水量及≥0℃年活动积温^[15, 25]。

1.3 计算方法

(1) 实际复种指数 (multiple cropping index, MCI),是在原有的农作物种植基础上再增加作物的种植次数,充分利用闲田提高土地利用率的一种作法,其计算的方法为^[26]:

$$MCI = \frac{A_s}{A_c} \times 100\%$$

(1)

式中,MCI 为耕地实际复种指数(%); A_s 为全年农作物总播种面积(hm^2); A_c 为总耕地面积(hm^2)。

(2) 粮食作物复种指数 (grain crop multiple cropping index, MCI_c),是在原有的粮食作物种植基础上再增加该粮食作物的种植次数,充分利用闲田提高粮食作物土地利用率的一种作法,其计算方法为:

$$MCI_c = \frac{A_{sc}}{A_c} \times 100\%$$

(2)

式中, MCI_c 为粮食作物实际复种指数(%); A_{sc} 为全年粮食作物总播种面积(hm^2)。

(3) 经济作物复种指数 (cash crop multiple cropping index, MCI_c),是在原有的经济作物种植基础上再增加该经济作物的种植次数,充分利用闲田提高经济作物土地利用率的一种作法,其计算的方法为:

$$MCI_c = \frac{A_{sc}}{A_c} \times 100\%$$

(3)

式中, MCI_c 为经济作物实际复种指数(%); A_{sc} 为全年经济作物总播种面积(hm^2)。

(4) 潜力复种指数 (potential multiple cropping index, PMCI)。任何作物完成生长、发育整个生命过程都需要一定的水、热条件,因此,水热条件是影响复种指数高低的基本因素。现实中的最大复种指数是充分利用光、热、水资源的结果。但是四川盆地作为中国日照时数最低的地区,部分地区已在实行一年三熟耕作制,实践证明日照并不是限制复种指数提高的气象因子,因此本文参照“热量-降水”模型^[15]计算耕地潜力复种指数,不考虑日照时数。利用式(4)和式(5)分别计算出积温复种指数潜力和降水复种指数潜力,最后取每一个像元的降水复种指数潜力与积温复种指数潜力二者中的最小值,通过式(6)计算潜力复种指数^[25]。

$$M_T = \begin{cases} 100 & T < 3400 \\ (T - 3400) \times 0.125 + 100 & 3400 \leq T < 4200 \\ 200 & 4200 \leq T < 5200 \\ (T - 5200) \times 0.1 + 200 & 5200 \leq T < 6200 \\ 300 & T > 6200 \end{cases}$$

(4)

$$M_R = \begin{cases} 100 & R < 500 \\ (R - 500) \times 0.14 + 200 & 500 \leq R < 1200 \\ 300 & R > 1200 \end{cases}$$

(5)

$$PMCI = \text{Min}(M_T, M_R)$$

(6)

式中,PMCI代表潜力复种指数(%), M_T 代表积温复种指数潜力(%), M_R 代表降水复种指数潜力(%), T 代表≥0℃的积温(℃), R 代表多年平均降水量(mm)。

(5) 耕地可提升复种指数 (potential increment of multiple cropping index, PIMCI) 是用于量化提升的复种潜力,其计算方法是用潜力复种指数与实际复种指数的差值^[15],计算公式为:

$$PIMCI = PMCI - MCI$$

(7)

2 结果与讨论

2.1 复种指数随时间变化特征

如图 1 所示为 1990—2015 年间西南 3 省不同类型作物复种指数变化情况。由图 1A 可知,云南省的耕地复种指数呈波动下降趋势,其中 1998 年复种指数达最大值 178%,最小值出现在 2010 年为 100.67%;贵州省耕地复种指数除 2004—2006 年和 2012—2014 年突然减少外,其他年份均呈缓慢增加趋势,2010 年达到最大,为 277.55%;25 年里,四川省的耕地复种指数呈先增后减的变化趋势,耕地复种指数多年平均值为 206.05%,2010 年达到最大,2012 年最小,主要是由于 2011 年后该省耕地面积减少导致。从图 1B 可以看出,粮食作物复种指数与耕地复种指数变化大致相同,主要分 2 个阶段:1990—1998 年云南粮食作物复种指数缓慢上升,2000 年粮食作物复种指数急剧下降,之后到 2006 年间粮食作物复种指数变化较为平稳,表明该阶段云南省粮食作物的播种次数较为稳定。1990—2005 年贵州粮食作物复种指数保持稳定的增长趋势,2005 年达到最大值 175.29%,2006 年粮食作物复种指数有所降低。而四川省粮食作物复种指数在该

时期增长缓慢,年平均增长率为 0.65%。2006—2015 年是三省粮食作物复种指数波动变化最大的时期,该期粮食作物复种指数年际变动率最大的为四川,其次为贵州,变动最小的是云南省。由图 1C 可知,经济作物近年来一直保持稳步增长的态势,云南省 1994—1995 年经济作物复种指数下降了 5.63%,但整体上经济作物复种指数呈双峰稳定增长型,最大值出现在 2012 年,其值为 48.39%,贵州省经济作物复种指数呈波动增长型,年均增长 3.00%,四川省经济作物复种指数呈单峰增长型,年均增长 1.88%。三省区经济作物复种指数的增长说明了农民种植经济类作物的积极性更高。

2.2 复种指数空间分布特征

2.2.1 实际耕地复种指数(MCI)的空间格局变化分析 图 2 为不同阶段西南三省各市级行政区实际耕地复种指数空间分布情况,从图 2 可以看出,东部地区耕地复种指数明显高于西部地区,而中部地区高于北部和南部地区,总体上呈东高西低的空间格局。从 1990 年到 2015 年间,贵州省耕地复种指数近几十年来增长最为显著,其中以贵阳、毕节、黔东南州和黔东南地区变化最为明显,25 a 来耕地复种指数增加 41.19%~80.96%,其余各市级行政区耕地复

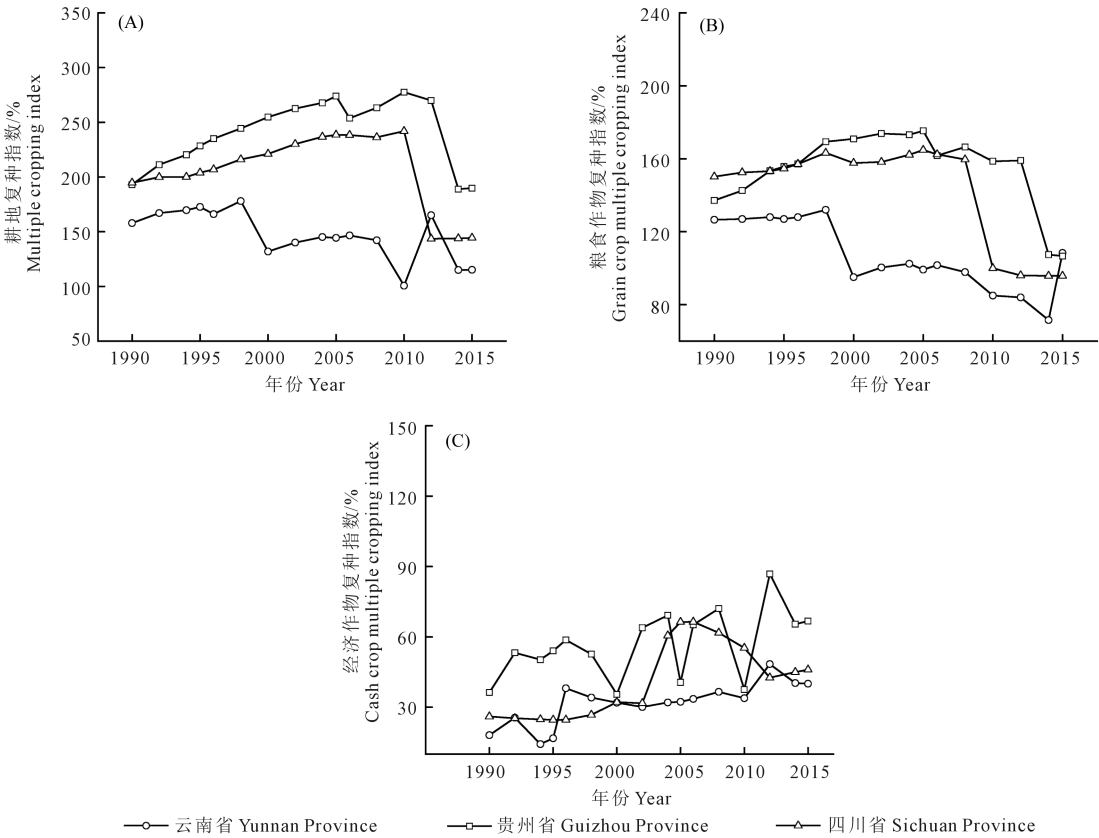


图 1 西南三省实际耕地复种指数和不同作物类型复种指数年际变化

Fig.1 Interannual variation of the MCI and the MCI for different crop types in three provinces of Southwest China

种指数分别增加 12.95%~40.56%。1990—1995 年到 2000—2005 年,贵州省的耕地复种指数增加明显,以遵义和铜仁两市耕地复种指数值最大,分别为 11.89%和 12.07%,而增加最为明显的为黔南州,耕地复种指数上升约 13.84%;2010—2015 年,铜仁市耕地复种指数相对于 2000—2005 年有所下降,降幅为 17.88%,而毕节、贵阳、黔东南和黔南州均在 2010—2015 年耕地复种指数达最大,表明近年来该区对耕地的集约化利用程度也越来越高。

相对于贵州,四川省耕地复种指数最大区域主要分布在四川东部地区,如巴中、达州、南充、广安一带,由于海拔较高,气候条件恶劣,西部和北部的甘孜和阿坝州作物生长周期较长而导致该区复种指数相对较低,且多年来均无明显变化。从时间序列来看,1990—1995 年、2000—2005 年、2010—2015 年 3 个时期四川省耕地复种指数大小依次为 188.34%、212.32%和 221.39%。从图 2 可以看出,在进入 21 世纪后,与贵州省耕地复种指数变化相似,四川省各地区耕地复种指数明显增大。相对于 1990—1995 年,2000—2005 年除甘孜藏族自治州外,其余各市耕地复种指数均有所增长,平均增加 7.99%,其中以广元、巴中和南充增长最为明显,增加 15.42%~21.39%。而在 2000—2015 年,四川省大部分地区复种指数均有所下降,整体上降低的区域主要分布在成都及周边地区,以达州、攀枝花和雅安下降最为明显,降幅为 11.09%~64.34%。

与东部和北部的贵州和四川不同,南部的云南省 25 年来耕地复种指数变化相对较小(图 2)。但耕地复种水平低于贵州省和四川省,1990—1995 年、2000—2005 年、2010—2015 年 3 个时期耕地复种指数分别为 155.89%、174.67%和 163.72%,同样,四川省的复种指数在 2000—2005 年达最大值,2010—2015 年复种指数有所降低,其中以楚雄和临沧减少最为明显,分别减少 37.15%和 35.65%,其中各个市耕地复种指数变化最大的为云南省东南部的红河州,由 1990—1995 年的 147.94%上升至 2010—2015 年的 287.25%,增加 1.94 倍,表明该区耕地的利用程度远远高于其他市级行政区。从 1990—1995 年及 2010—2015 年总的来看,云南省内部各州市复种指数总体上为增大的趋势,但土地集约化利用程度相对较低,云南中部地区复种指数较高,以西双版纳州、普洱市为代表的南部地区耕地复种指数最低,主要是由于该区域耕地弃耕撂荒现象较为严重^[27]。

2.2.2 潜力复种指数(PMCI)的空间格局变化分析 耕地和气候资源是决定一个区域作物复种的基础条件,西南三省主要以山地丘陵为主,从热带、亚热带至寒带均有分布,水热资源形成垂直的立体景观,因此气候资源是制约该区域耕地复种潜力提升的主要制约因素,同时也取决于土地质量和种植的农作物类型。气候变化对耕地复种潜力的影响是通过改变作物生长过程中光、热和水的匹配^[28]来实现。以 1990—1995 年和近几年西南地区温度和降水数据为基础,通过“热量-降水”模型计算出 1990—1995 年和 2010—2015 年两个时期耕地复种潜力并进行对比分析。西南 3 省耕地平均潜力复种指数时空格局变化情况如图 3 所示,1990—1995 年和 2010—2015 年这两个时期西南地区潜力复种指数均为东部和南部地区显著高于中部和西北部地区,整体上西南地区潜力复种指数空间差异较明显而时间差异不显著。各省情况如下:(1) 1990—1995 年四川省甘孜和阿坝州潜力复种指数较低,而四川东部地区如巴中、达州、广安 3 个市级行政区潜力复种指数均较大,潜力值分别高达 288.58%、290.00%和 286.25%,远高于西部地区,其余中部各市区潜力复种指数则在 200.00%~277.47%之间波动;随着气温的持续变暖,1990—1995 年及 2010—2015 年近 25 a 间,西部地区的甘孜、阿坝州和雅安潜力复种指数均无明显变化,而东部的巴中地区平均潜力复种指数呈下降趋势,潜力值降低 11.06%,其余四川各地区潜力复种指数均为上升趋势,分别上升 1.05%~12.65%。(2) 1990—1995 年云南省各地区潜力复种指数均较大,其中以西部的德宏、临沧和普洱 3 市潜力复种指数最大,均高达 300%,可见该地区对光、热、水资源充分利用的空间很大,相反迪庆市的潜力复种指数最低,是全省唯一的一熟制地区^[27],其次昭通为 211.25%,而其他地区则介于 238.83%~288.63%之间;在 2010—2015 年间,除德宏、临沧、普洱依然保持较高潜力复种指数外,保山、西双版纳两市潜力复种指数也达最大值 300%。云南东部地区潜力复种指数表现为下降趋势,其中红河州下降最为明显,与 1990—1995 年相比降低 30.76%。(3) 在 1990—2015 年近 25 a 年间,西南东部地区的贵州省除黔南州和遵义潜力复种指数变化较大外,其余各市变化不显著。两个时期均以黔东南潜力复种指数最大。

2.2.3 耕地复种可提升潜力时空变化特征 图 4 为 1990—1995 年和 2010—2015 年西南地区耕地复种可提升潜力变化情况。如图 4 所示,西南 3 省中云南省耕地复种可提升潜力值明显高于贵州和四川

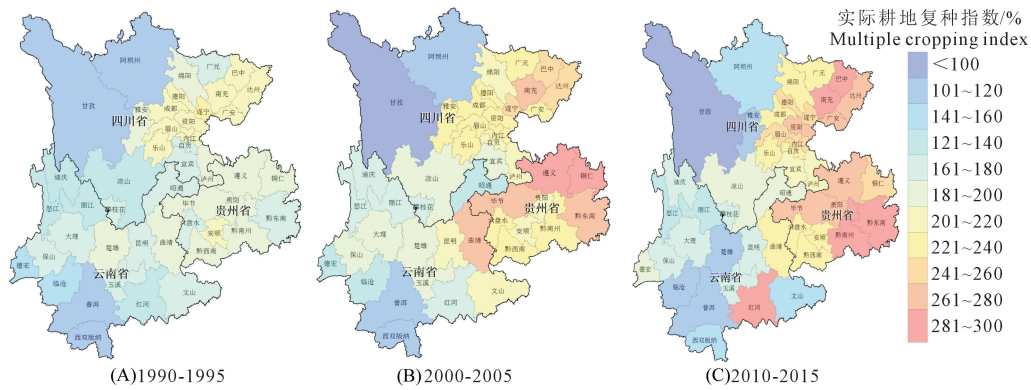


图 2 实际耕地复种指数分布特征
Fig.2 Distribution characteristics of the MCI

两省,各省潜力变化如下:(1)由图 4A 可知,1990—1995 年四川省的阿坝州和雅安两地为无提升潜力地区,而甘孜、德阳、成都、眉山和乐山地区为低提升潜力区,可提升潜力值介于 0~25%。同潜力复种指数相同,可提升潜力复种指数同样以四川东部的广元、巴中、达州和广安等地区较大,其中广元市可提升复种潜力最大,为 70.4%,表明广元市的耕地在未来有更大的利用空间。从图 4B 可知,与 1990—1995 年相比,在 2010—2015 年阿坝州由无提升潜力区变为低提升潜力区,但可提升潜力值仅为 0.77%。巴中市由高提升潜力区骤降为无潜力区,达州、广安、内江和资阳可提升潜力值均呈下降趋势。(2)1990—1995 年,云南省中除迪庆和曲靖市仅为中潜力区外,其余地区耕地复种可提升潜力均为高潜力区,其中以普洱市可提升潜力复种指数最大,为 173.45%。而在 2010—2015 年间,曲靖市降为低潜力区,红河市则由 10 a 前的高潜力变为无潜

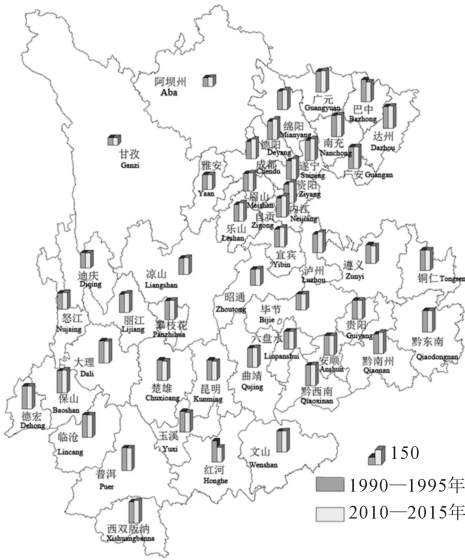
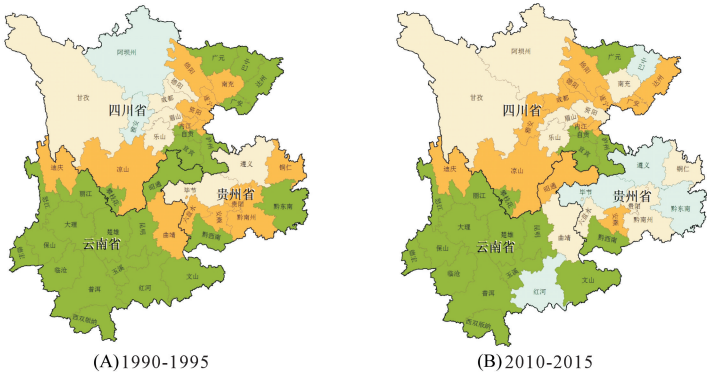


图 3 耕地潜力复种指数分布特征
Fig.3 Distribution characteristics of PMCI

耕地可提升复种指数/%
Potential increment of multiple cropping index

- 无潜力区
No potential area
- 低潜力区
Low potential area
- 中潜力区
Medium potential area
- 高潜力区
High potential area



注:无潜力区代表可提升潜力值 $\leq 0\%$,低潜力区代表可提升潜力值为 $0\% \sim 25\%$,中潜力区代表可提升潜力值为 $25\% \sim 50\%$,高潜力区代表可提升潜力值为 $\geq 50\%$ 。

Note: The potential value of the non-potential area is less than 0% , the potential value of the low-potential area is between 0 and 25% , the potential value of the mid-potential area is $25\% \sim 50\%$, and the potential value of the high-potential area is greater than 50% .

图 4 西南三省耕地可提升复种指数变化特征
Fig.4 The characteristics of the PIMCI in three Southwestern provinces

力区,其余各市无明显变化,同样以普洱市较大。
(3) 1990—1995 年贵州省的黔东南和黔西南为高提升潜力区,毕节市为无提升潜力区,其余各市为中低提升潜力区。相比于 1990—1995 年,2010—2015 年除毕节市、安顺和黔西南三市可提升潜力无明显变化外,其余各市可提升潜力均变为低提升潜力区和无提升潜力区。

3 西南地区复种指数的影响因素

3.1 气候变化与人类活动对耕地复种指数的影响

表 1 为 1990—2015 年西南 3 省区耕地复种指数与气候因子和人类活动之间的关系。可知,该区年降雨量对耕地复种指数影响较小,年平均温度和 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温与耕地复种指数之间呈极显著的正相关关系($P<0.01$)^[29]。资料表明,该区年平均温度空间格局变化为东部和南部地区明显高于中部和西北部地区,而实际耕地复种指数空间分布总体上也呈东高西低的空间格局,与温度变化趋势保持一致,25 a 来气候持续变暖,导致该区潜力复种指数空间格局变化为东部和南部地区显著高于中部和西北部地区,整体上潜力复种指数空间差异较明显而时间差异不显著。由于潜力复种指数格局主要受气候资源的影响,迪庆州处于青藏高原的东南边缘,是横断山脉的腹地^[30],属温带和寒温带气候,水资源丰富,雨季频繁,降水复种指数潜力较高,但气候寒冷,热量不足,使得积温复种指数潜力低,导致最终复种潜力最低,是云南省唯一一个一年一熟制作物种植地区,这与陶文星^[27]研究的云南复种潜力特征结果一致,出现这种现象的原因是该地区海拔和纬度较高,水分和热量条件较差,耕地复种潜力受到限制^[31-32]。

而针对人类活动对复种指数的影响关系可知,人口数量和农业生产总值均与复种指数之间呈显著正相关关系($P<0.05$),即随着人口数量和农业生产总值的提高,复种指数呈增大趋势。随着人口数量的增大,城镇化速度也会随之增加,从而不可避免地需要占用现有的土地资源^[33],针对人多地少的矛盾,只有通过增大复种才是最有效的解决办法,所以,人类活动因子在一定程度上促进了复种指数的变化^[32]。在 2006—2010 年云南红河州进行种植业结构的调整,充分利用秋冬光热条件,发展冬季农业,在低海拔热河谷区,北部的种植业坝区大力推广再生稻,间作套种及复种,实现一年三熟^[34-35],是云南省东南部的红河州及周边区域实际复种指数变化最大的原因。

表 1 西南三省复种指数与各因子相关性		
Table 1 Correlation between MCI and factors in three Southwestern provinces		
影响因素 Influencing factor	相关系数 Correlation coefficient	显著性 Statistical significance
年降雨量 Annual precipitation	0.113	$P>0.05$
年平均温度 Year average temperature	0.558 **	$P<0.01$
$\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 Accumulated temperature $\geq 0^{\circ}\text{C}$	0.614 **	$P<0.01$
人口数量 Population number	0.417 *	$P<0.05$
农业生产总值 Gross farm production	0.360 *	$P<0.05$

注: * 表示 0.05 水平上显著相关, ** 表示 0.01 水平上极显著相关

Note: * correlation is significant at the 0.05 level. ** correlation is extremely significant at the 0.01 level.

3.2 地形对复种指数的影响

就地形和土壤类型而言,四川东部地区主要为平原地形,土壤多为集中且成片分布的紫色土,该土壤养分高,具有优良的生产性能,因此四川省最大耕地复种指数主要分布在四川东部地区,而西北部的高原地区地形起伏较大,土壤类型多为寒冻土和草毡土,造成西部和北部的复种指数相对较低,且多年来均无明显提升。除了云南省中部地区地形起伏度小、土壤类型为紫色土、复种指数较高外,云南其他地区和贵州省大部分地区多以台地丘陵为主,土壤类型多为红、黄壤,农作物主要分布在山间盆地和数千块河谷平原,复种指数较低。

将图 2B 与图 2C 做对比,四川省复种指数整体上降低的区域主要分布在成都及周边地区,经研究发现,2000—2015 年四川省坡耕地面积减少了 3 263 km²。平缓坡耕地面积(坡度 $<10^{\circ}$)减少 1 467 km²,尤其是在成都及其周边地区,陡坡耕地面积(坡度 $>25^{\circ}$)减少 302 km²,但占全区耕地面积的比重仍是最大^[36],地形变化是造成复种指数降低的主要原因。进一步通过相关性分析可知(图 5),西南三省地形起伏度与耕地复种指数之间呈显著的负相关关系($P<0.01$),进一步证明了地形起伏度(海拔)越高其耕地复种指数越低。

4 结 论

为了全面评价西南地区耕地资源的集约化利用程度,本文从区域和省级层面上分析了 1990—2015 年间实际耕地复种指数的变化趋势和格局演

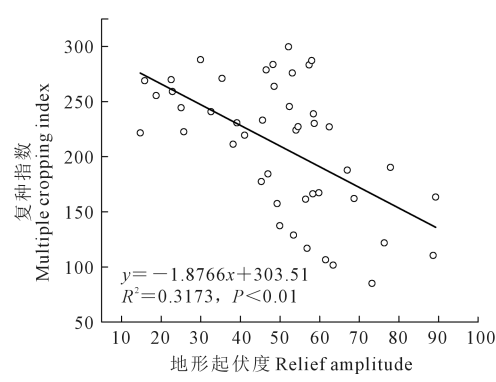


图 5 西南三省地形起伏度与复种指数的关系

Fig.5 Relationship between relief amplitude and multiple species index in three Southwest provinces

变,并基于复种指数和“热量-降水”定量化关系模型分析了该地区复种指数的理论潜力,进而研究复种可提升潜力空间格局变化,从气候、地形变化和人类经济活动角度探讨了耕地复种指数变化的原因。主要结论如下:

(1)三省耕地复种指数年际变化特征为:云南省的耕地复种指数呈波动下降趋势;贵州耕地复种指数除 2004—2006 年和 2012—2014 年突然减少外,其余均呈缓慢增加趋势;四川省的耕地复种指数为逐年增加趋势。粮食作物复种指数变化大致分两个阶段,1990—2006 年,云南粮食作物复种指数仅 2000 年为下降趋势,其他均为缓慢上升,而贵州和四川两省均为增长趋势,其中四川增速相对较缓。2006—2015 年是 3 省粮食作物复种指数波动变化最大的时期,该期粮食作物复种指数年际变动率四川>贵州>云南。经济作物复种指数近年来一直保持稳步增长的态势。

(2)从内部分布情况看,1990—2015 年间西南地区、东部地区实际耕地复种指数明显高于西部地区,中部地区高于北部和南部地区,总体上呈东高西低的空间格局。1990—2015 年西南地区潜力复种指数均为东部和南部地区显著高于中部和西北部地区,整体上西南地区潜力复种指数空间差异较明显而时间差异不显著。四川东部地区潜力复种指数最大,远高于西部地区。云南各地区除了迪庆市外潜力复种指数均较大,其对光、热、水资源充分利用的空间很大。云南省耕地复种可提升潜力值明显高于贵州和四川两省,以贵州省高提升潜力地区最少。云南省水热资源丰富,但耕地利用情况较为低效,南部地区是复种指数可提升潜力空间最大的地区。

(3)耕地复种指数与气象因子的关系中,主要

受年均温度和 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温的影响较大,而与人类活动的关系主要受到人口数量和农业生产总值的影响较大。对于受地形的影响而言,丘陵地区耕地复种指数表现为下降,平原地区耕地复种指数呈现上升趋势。气候变化对西南地区复种指数有一定的贡献,但温度变化是耕地复种指数变化的关键因子。

本文采用统计方法可能受到人为因素干扰,在后续的研究中应利用遥感数据和统计数据相结合,尝试加入作物种类、农业设施等因素,提高耕地复种指数可提升潜力的量化精确度,为各区域耕地资源有效利用和农业优化配置提供更科学的理论依据。

参 考 文 献:

[1] 吴文斌,余强毅,陆苗,等. 耕地复种指数研究的关键科学问题[J]. 中国农业科学, 2018, 51(9):1681-1694.

[2] Wu W B, Yu Q Y, You L Z, et al. Global cropping intensity gaps: Increasing food production without cropland expansion [J]. Land Use Policy, 2018, 76:515-525.

[3] Turner B L, Doolittle W E. The concept and measure of agricultural intensity [J]. Professional Geographer, 1978, 30(3):297-301.

[4] 仇恒佳,卞新民,张卫建,等. 环太湖耕地利用变化与驱动机制研究——以苏州市吴中区为例[J]. 土壤, 2006, 38(4):390-395.

[5] 左丽君,董婷婷,汪潇,等. 基于 MODIS/EVI 的中国北方地区耕地复种指数提取[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8):141-146.

[6] 何坚坚,庞博,张鹏岩,等. 区域耕地复种指数时空差异测算及可挖掘潜力分析——以中原经济区为例[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(16):249-255.

[7] 唐鹏钦,姚艳敏,吴文斌,等. 基于遥感技术的耕地复种指数研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2010, 31(2):21-27.

[8] 刘巽浩.论我国耕地种植指数(复种)的潜力[J]. 作物杂志, 1997, (3): 1-3.

[9] 余强毅,项铭涛,谢安坤,等. 耕地复种差研究进展[J]. 中国农业信息, 2018, 30(5):5-16.

[10] 高明杰,基于农业综合生产能力需求的耕地资源安全阈值研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2008.

[11] 丁明军,陈倩,辛良杰,等.1999—2013 年中国耕地复种指数的时空演变格局[J]. 地理学报, 2015,70(7): 1080-1090.

[12] 左丽君.耕地复种指数研究的国内外进展. 自然资源学报[J], 2009, 24(3): 553-560.

[13] 郭帅君.吉林省小城镇发展模式研究[D].长春:吉林农业大学,2015.

[14] Ray D K, Foley J A. Increasing global crop harvest frequency: recent trends and future directions [J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(4):044041.

[15] 范锦龙,吴炳方.基于 GIS 的复种指数潜力研究. 遥感学报[J], 2004, 8(6): 637-644.

[16] Luo L, Xu X L, Zhuang D F, et al. Changes in the potential multiple cropping system in response to climate change in china from 1960-2010[J]. Plos One, 2013, 8(12):e80990.

[17] Chen M X, Liu W D, Tao X L. Evolution and assessment on China's

urbanization 1960 - 2010: Under-urbanization or over-urbanization? [C] Habitat International 2013, 38:25-33.

[18] 赵永敢. 西南地区耕地复种指数变化特征和发展潜力分析. 农业现代化研究[J], 2010, 31(1): 100-104.

[19] 黄国勤. 论提高我国南方耕地复种指数[J]. 自然资源, 1995, 17(1):44-50.

[20] 韩兰英, 张强, 马鹏里, 等. 西南地区农业干旱灾害综合风险空间特征[C]//中国气象学会第 31 届中国气象学会年会干旱灾害风险评估与防控. 北京:气象出版社,2014:1-9.

[21] Liu M X, Xu X L, Sun A. Decreasing spatial variability in precipitation extremes in southwestern China and the local/large-scale influencing factors [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2015, 120(3):6480-6488.

[22] 戴红燕, 蔡光泽, 华劲松. 四川省凉山州陆稻引种试验[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(5):1942-1944.

[23] Liu M X, Xu X L, Sun A, et al. Is southwestern China experiencing more frequent precipitation extremes? [J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(3):479-489.

[24] 李淑琼, 余绍伟, 段正培, 等. 云南腾冲“烟-玉-油”一年三熟生产技术及其应用[J]. 作物研究, 2014,28(4):419-421.

[25] 何文斯, 吴文斌, 胡亚楠, 等. 1980—2010 年中国耕地复种可提升潜力空间格局变化[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(11): 7-14.

[26] Dalrymple D G. Survey of multiple cropping in less developed nations [R]. Economic Research Service; Washington, Dalrymple, DC, USA, 1971.

[27] 陶文星.云南省耕地复种指数特征及其潜力研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(32): 288-294.

[28] 何毓蓉, 周红艺, 张保华, 等.四川省耕地地力生产潜力及承载力研究[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 20-25.

[29] 史俊通, 刘孟君, 李军. 论复种与我国粮食生产的可持续发展[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1):51-57.

[30] 杨学军. 迪庆州农业生态环境现状与前景展望[J]. 云南农业科技, 2012, (S1):25-27.

[31] 龙玉琴, 王成, 杨庆媛, 等. 基于粮食安全与生态安全的省域耕地休耕规模测算[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019,41(1): 51-59.

[32] 杨万江, 王绎. 我国双季稻区复种变化及影响因素分析——基于 10 个水稻主产省的实证研究[J]. 农村经济, 2013,(11): 24-28.

[33] 宋凌珂. 基于三阶段 DEA 模型的城市土地供应效率研究[D].广州:暨南大学,2016.

[34] 李勇成, 胡云. 红河州种植业现状及发展多熟种植的建议[J]. 现代农业科技, 2012, (5): 125-126.

[35] 陆永生, 张翠云, 马文金. 红河州冬季农业的地位及发展模式[J]. 云南农业, 1998, (12): 8.

[36] Xiao M J, Zhang Q W, Qu L Q, et al. Spatiotemporal changes and the driving forces of sloping farmland areas in the Sichuan Region [J]. Sustainability, 2019, 11(3):906.



(上接第 212 页)

[20] 何松榆, 刘建生, 张明聪, 等. 表土处理对大豆田土壤团聚体特征及产量的影响[J]. 大豆科学, 2018, 37(2): 251-257.

[21] 王会, 何伟, 段福建. 秸秆还田对盐渍土团聚体稳定性及碳氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 124-131.

[22] 张梅, 王宇, 赵兰坡, 等. 苏打盐碱土种稻改良的水资源高效利用田间试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1): 132-134.

[23] 杜国强, 陈秀琴, 牟守国, 等. 模拟降雨条件下氮素在土壤中的迁移转化对比研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 12(44): 436-439.

[24] 徐子棋, 许晓鸿. 松嫩平原苏打盐碱地成因、特点及治理措施研究进展[J]. 中国水土保持, 2018, 2(431):54-60.

[25] Zhang Z H, Wang Q, Wang H, et al. Effects of soil salinity on the content, composition, and ion binding capacity of glomalin related soil protein [J]. Science of the Total Environment, 2017, (581-582):657-665.

[26] 董伟, 杜学军, 王栋, 等. 新型改良剂对苏打碱土理化性质及水稻产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018. 36(1): 61-65.

[27] 王金满, 杨培岭, 张建国, 等. 脱硫石膏改良碱化土壤过程中的向日葵苗期盐响应研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 33-37.

[28] 李杰, 姬景红, 李玉影, 等. 施用改良剂对大庆盐碱土的改良效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (2): 50-54.

[29] 龙显助, 戴春胜, 孙飏, 等. 松嫩平原分散性粘土分布与形成机理研究[J]. 水利规划与设计, 2013, (9): 24-27, 42.

[30] 田野, 刘善江, 冯浩杰. 脱硫废弃物对碱化土壤改良效果的评价方法研究[J]. 北方园艺, 2015, (7): 157-160.

[31] Long X Z, Dai C S, Sun B, et al. Study on distribution and formation mechanism of dispersive clay in Songnen Plain[J]. Water Resources Planning and Design, 2013, (9):24-27, 42.

[32] 刘莉萍, 刘兆普, 隆小华. 2 种盐土改良剂对苏北滨海盐碱土壤盐分及植物生长的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 2(28): 127-153.

[33] 李旭霖, 刘庆花, 柳新伟. 不同改良剂对滨海盐碱地的改良效果[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 219-224.

[34] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979.

[35] 侯贤清, 贾志宽, 韩清芳, 等. 不同轮耕模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 5(28): 85-94.