

# 气候变化、经济集聚对农业生产适宜性的影响

——以云南省为例

薛 领 孙欣彤 赵 威

**摘 要** “双评价”是国土空间规划编制的前提和基础。然而，现有的“双评价”忽略了人类社会经济活动的空间动态和气候变化等未来不确定性因素的影响，使得评价的科学性和前瞻性有待提高。本文以云南省为例，结合全球和区域气候变化预估结果，对云南省2030年、2040年和2050年的农业生产适宜性进行综合研判。在此基础上，以2020年土地利用数据为基期，通过人工神经网络(ANN)和元胞自动机(CA)整合实现机器学习和演化模拟，模拟分析在未来气候变化和集聚经济的双重作用下，2030—2050年云南省农业空间格局乃至国土空间格局的演变趋势和特征，试图修正“双评价”的结论。研究发现：(1)气候变化主要通过气温、降水和气象灾害影响农业生产适宜性，2030—2050年，评价结果为“较适宜”和“适宜”地区所占比例有所上升，全省绝大多数州市将得益于气候变化，云南省农业生产适宜性整体呈现上升趋势；(2)2030—2050年，纳入集聚经济作用后，云南省总体趋势是土地蔓延和扩张的趋势减弱、变缓，空间分异的现象更加明显，尤其是滇中地区城镇面积扩张而耕地面积减少是土地利用格局演变的主要趋势，即使在未来气候变化的影响下，该演化趋势仍然不会改变；(3)尽管气候变化会使云南省农业生产适宜性整体提高，但在集聚经济和气候变化的双重作用下，耕地面积减少的趋势不会改变。本文在纳入集聚经济和未来气候变化的情景下，为完善“双评价”提供了参考办法，为国土空间优化和调控提供了一个更加科学的分析框架。

**关键词** 双评价 气候变化 农业生产适宜性 情景分析 云南省

[中图分类号] F129.9 [文献标识码] A [文章编号] 2095-851X (2023) 03-0098-21

【基金项目】国家社会科学基金重点项目“新时代实施区域协调发展战略研究”(批准号:22AZD043)。

【作者简介】薛领，北京大学政府管理学院教授、博士生导师；孙欣彤，北京大学政府管理学院博士生；赵威，北京大学政府管理学院博士生。邮政编码：100871。广州市城市规划勘测设计研究院助理规划刘丽娜为本文做出了重要贡献。感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

## 一、引言

资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价（简称“双评价”）被视为国土空间规划编制的科学基础和约束条件（郝庆等，2021）。自然资源部在2019年发布《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南（2019年3月征求意见稿）》以及2020年发布《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南（2020年1月试行）》（简称“双评价”技术指南），这两部“双评价”技术指南的发布标志着“双评价”已经形成科学、完整的指标体系，并开始在国土空间规划编制中应用推广（刘超等，2023）。“双评价”是对国土空间开发保护利用的摸底和利用方式的空间预判，贯穿国土空间规划全程，是各级国土空间规划编制的重要基础（白娟等，2020）。“双评价”对短期的国土空间规划有较强的指导性，但面向中长期规划时，其时空预判作用和导向作用明显不足，尤其在面对未来气候变化等深度不确定性时，科学性不足的问题更加突出。

目前，全球气候变暖正在加速演进，气候系统更加不稳定。气候系统的不稳定性除体现在气温增加外，还体现在年降水量变化波动较大、日照时数和近地表平均风速显著减少、极端天气增加等问题，直接或间接地影响人类可持续发展。国土空间规划作为适应气候变化的重要政策工具之一，将适应气候变化融入新时期国土空间规划体系被认为是提升国土空间气候适应能力的重要路径，这对于科学有序地统筹布局农业、生态、城镇等功能空间，保障国土空间安全、粮食安全有着重要意义（蔡云楠和温钊鹏，2017；王凯等，2023）。其中，农业功能空间与自然界的联系最为紧密，对气候变化也具有特殊的敏感性，几乎所有的气候变化因素的变化，都会给农业生产及其相关过程带来潜在的或显著的变化，严重影响粮食安全。

根据2020年“双评价”技术指南，评价农业生产适宜性的指标主要分为六类，分别是气候、水资源、环境、土地资源、生态和灾害评价指标，而这六类指标均有可能受到气候变化直接或间接的影响，进而影响对农业生产适宜性的评价。其中，气温、降水量以及灾害风险这三个指标最为关键。它们本身既是气候变化的一部分，也是农业生产系统的重要组成部分，是使其他指标如土壤肥力、盐渍化程度等发生变化的诱因，很大程度上共同决定了地区农业生产适宜性变化的方向和幅度（陈帅等，2016；潘根兴等，2011）。已有研究表明，气候变化将对我国农业经济产生一定的冲击（丑洁明等，2022；丁宇刚和孙祁祥，2022），将深刻影响农业生产适宜性（何亮和毛留喜，2023；刘泽瑾等，2022），进一步影响农业空间格局（Pan等，2023；陈彦希等，2022；甘小玲等，2023）。

空间经济学表明，人类社会经济活动的空间规律不仅受要素禀赋和自然资源本底（First Nature，第一本源）的作用，而且更受到集聚经济（Second Nature，第二本源）的支配（Krugman，1980）。现有的“双评价”过多强调了第一本源（First Nature），

忽略了经济集聚这类第二本源 (Second Nature) 的累积因果过程,也忽略了对未来气候变化的研判。与此同时,现有的气候变化对农业生产适宜性的评估也缺乏“双评价”自然资源本底数据的有力支撑。针对上述问题,本文以云南省为例,结合全球和区域气候变化预估结果和2020年“双评价”技术指南,分析至2030年、2040年和2050年,气候变化将如何影响与农业生产资源环境承载能力相关的各个指标,综合研判对云南省农业生产适宜性产生的影响。在此基础上,以2020年土地利用数据为基期,模拟分析在未来气候变化和集聚经济的双重作用下,2030—2050年云南省农业空间格局的演变趋势和特征。研究以期通过纳入气候变化和集聚经济的作用修正“双评价”的结果、改进“双评价”的科学性、保障云南省粮食安全、维持经济社会的可持续发展。

## 二、研究区域和影响机理分析

### (一) 研究区域

云南省是我国的农业大省,粮食播种面积占比大,经济作物品种多样,农业发展具有粮食自求平衡和外向型双重特点。2022年,云南省粮食总产量1957.96万吨,排名全国第14位<sup>①</sup>,随着工业化、城镇化进程加快以及旅游业发展和人民生活水平不断提高,云南省的粮食消费需求呈刚性增加,每年要从省外调入600万吨左右,对外依存度较高,尤其以稻谷、小麦为主的口粮品种结构性缺口较大。因此研究云南省农业有助于确保粮食产销平衡和区域粮食安全,满足人民的基本生活保障需求。

云南省地域广阔、地形复杂多样、低纬高原季风气候特征明显、不同地区的土地和水资源等条件各异、具有极其丰富的生物多样性和生态多样性,导致云南省农业系统本身具有自然脆弱性和空间差异性,尤其是经济欠发达、农业投入不足的地区,抗御不利气候条件的能力差,对气候变化更加敏感。根据全球和区域气候模式的预估,在全球变暖背景下,云南省气候将出现以气温升高、降水减少、极端天气气候事件增多增强为主要特征的变化趋势,对农业生产适宜性产生一定影响,进而对农业空间格局产生影响。基于此,云南省具有极其复杂的农业系统,具有案例研究的典型性。

云南省城镇化进程仍在持续,建设用地、生态用地和农业用地的土地利用格局仍处于不断动态变化的过程中。在坚持把保障粮食安全放在经济社会发展的突出位置来探讨云南省未来土地利用演化情况下,把握未来气候变化和集聚经济对农业空间格局的影响,将有助于优化云南省国土空间配置,保障粮食安全。

### (二) 集聚经济对国土空间格局的影响机理

1990年代以来,空间经济学聚焦人类社会经济活动的空间规律,强调集聚经济

<sup>①</sup> 数据来源:云南省粮食和物资储备局网站, <http://lswz.yn.gov.cn/gzdt/82536> [2023-08-24]。

是国土空间格局演化最重要的内生动力 (Krugman, 1991; Tabuchi 等, 2018)。因此, 在国土空间规划中强调集聚经济的作用, 是修正“双评价”指标体系、提高其科学性的第一步。国土空间演化的主要形式是农业土地向城镇建设用地的转化, 而在此过程中, 集聚经济是国土空间格局演化的根本力量。在空间经济学中, 集聚力和分散力是空间活动自组织的两种根本力量。一方面, 集聚可以推动人口和产业活动在某一地区集中, 它是前向关联的价格指数效应和后向关联的本地市场效应循环累积的结果, 这表现为人口和产业对土地的高度需求, 这种需求受后天因素的影响。另一方面, 分散力促使经济活动向其他地区转移, 是阻碍集聚进一步强化的根本力量, 它来自先天因素的供给侧约束, 例如地区的空间承载力和开发适宜程度, 同时也来自集聚的负外部性, 例如污染、拥堵、地价上涨等带来的拥挤效应 (赵威、薛领, 2022)。在土地需求所形成的集聚力和土地供给约束形成的分散力的博弈下, 会形成稳定的“核心-边缘空间结构”城镇空间结构 (见图 1)。

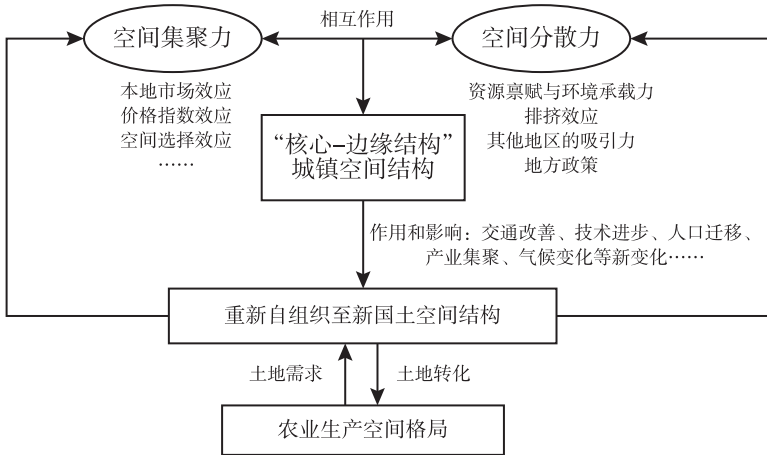


图 1 基于空间经济学的土地利用演化机理框架

资料来源：作者自行整理。

### (三) 气候变化对农业生产适宜性的影响机理

气候变化所带来的深度不确定性将通过改变农业生产适宜性, 改变原本的农业空间格局, 进而改变云南省全国土空间格局。根据 2020 年“双评价”技术指南, 以水、土、光、热组合条件为基础, 结合土壤环境容量、气象灾害等因素, 评价农业生产适宜性程度。一般地, 水资源丰度越高、地势越平坦、土壤肥力越好、光热越充足、土壤环境容量越大、气象灾害风险越低、盐渍化程度越低、地块规模和连片程度越高越适宜农业生产。总之, 以下 6 类指标将会对农业生产适宜性产生直接或间接的影响 (见表 1)。

表1 农业生产适宜性评价指标

评价指标	具体内容		
气候评价指标	光热条件		
水资源评价指标	降水量	水资源可利用量	
环境评价指标	土壤环境含量		
土地资源评价指标	土壤肥力	地势	地块规模和连片程度
生态评价指标	盐渍化程度		
灾害评价指标	干旱	洪涝	低温寒潮

资料来源：根据2020年1月的“双评价”技术指南自行整理。

在未来气候变化情景下，尽管以上测量云南省农业生产适宜性的指标都将发生一定的变化，但是它们受到影响的程度和方式都有所区别。根据文献梳理结果，气温、降水量以及灾害风险这3个指标最为关键，很大程度上共同决定了地区农业生产适宜性变化的方向和幅度。因此本文重点将气温、降水量以及灾害风险这三类指标作为分析核心，对云南省各市州的农业生产适宜性变化进行评估。总的来说，未来云南省气候变化对于测度农业生产适宜性的多个指标都将产生一定的影响，影响包括：（1）气温升高改善光热条件，但并非对所有农作物都有利；（2）气候变化减少总降水量，尤其是冬季降水；（3）气候变化进一步加重水资源供需不平衡问题；（4）气候变暖和CO<sub>2</sub>浓度提高将增加土壤污染风险；（5）气候变化加快削弱土壤肥力；（6）极端降水事件导致的水土流失将使坡度增加；（7）气候变暖使种植带北移，但旱涝的加剧可能引发土地退化；（8）气候变暖导致土壤盐渍化加剧；（9）气候变化减少低温寒潮，但加剧旱涝灾害和病虫害。这些指标之间又相互作用，使得气候变化对农业生产适宜性的影响利弊共存（见图2），从而影响中长期农业空间格局，乃至全域国土空间规划（何亮和毛留喜，2023；刘泽瑾等，2022）。上述因素都将导致农产品品质的改变，为云南省农业发展带来不确定性，但总体影响究竟是正向还是负向，需要进一步结合气温、降水量以及灾害风险综合评估。

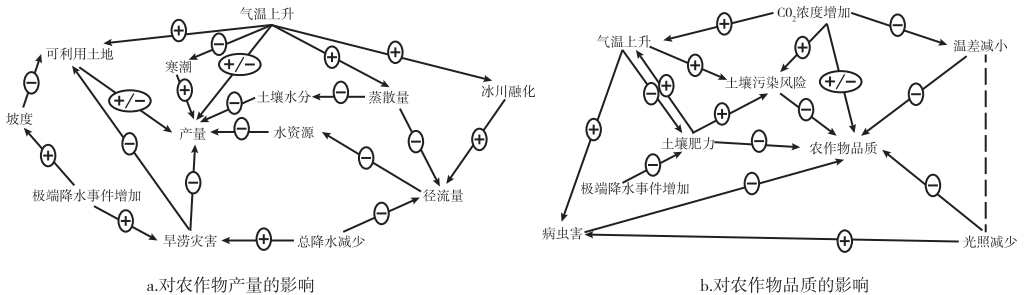


图2 未来气候变化对云南省农业生产适宜性的影响

资料来源：作者自行整理。

首先，气候变化影响气温。根据 IPCC 第五次评估报告数据搜集小组提供的典型浓度排放情景 (RCPs) 下的多个全球气候模式的模拟结果，未来随着温室气体浓度的升高，与全球和中国一样，云南省的平均气温将继续呈上升趋势，大于等于 0℃ 积温和持续天数也将增加。到 21 世纪中叶，与 1986—2005 年多年平均气温相比，三种排放情景<sup>①</sup>下云南省增温幅度为 1—2℃。2050 年后，在 RCP8.5 排放情景下云南省增温幅度将达到 2℃ 以上 (程建刚等, 2014)。从春夏秋冬四个季节的季气温变化来看，增温幅度和变暖趋势基本一致。气候变化导致的气温升高、日照时长的变化等对农业生产产生影响，然而由于地区条件和作物品种的不同，气温升高也可能对农业生产适宜性产生正面或负面影响，需要综合研判 (刘德祥等, 2005; Ortiz 等, 2008)。

其次，气候变化对水资源产生影响。与 1986—2005 年气候平均态相比，RCP4.5 情景下，云南省 2016—2055 年年平均降水在 2016—2025 年减少 3.2%，2026—2035 年减少 1.5%，2036—2045 年增加 0.3%，2046—2055 年减少 0.8%。RCP8.5 情景下，云南省 2016—2055 年平均降水都将比 1986—2005 年气候平均态减少，其中 2036—2045 年减少幅度最大为 -4.5%。总体来说，两种情景下，云南省 2016—2055 年年平均降水，尤其是冬季降水均呈现减少趋势 (程建刚等, 2014)。气候变化将减少总降水量或是导致干旱水平上升，从而影响水资源供给平衡，进而影响农业生产适宜性 (Mishra 和 Cherkauer, 2010; Wang, 2005; Backlund 等, 2008)。

最后，气候变化对灾害评价产生影响。云南省是我国自然灾害最为严重的省份之一，且具有多灾并发、交替叠加的特点。分析表明，未来气候变化有促使旱涝灾害增多并加剧农作物病虫害的趋势，农业生产的稳定发展受到严重制约。根据 IPCC AR5 报告，在全球持续变暖的趋势下，到 21 世纪末，中纬度大部分陆地区域与热带区域的湿区极端降水事件将很可能更剧烈、更频繁。影响云南省的西南季风和东南季风强度可能会减弱，但是季风降水可能更加剧烈。根据云南省与降水相关的极端天气气候事件指数预测，区域平均连续无降水日数在 RCP8.5 情景下略有增加，大于 20mm 的降水日数无明显变化，连续 5 日最大降水量略有增多，但简单日降水强度指数在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下都持续上升。这表明虽然降水次数会减少或者无变化，但单次的降水强度会增加。同时，由于石漠化地区缺乏森林植被来调节缓冲地表径流，导致这类地区一旦遇到强降水，地表径流量便快速汇聚于低洼处，容易造成暂时局地性涝灾 (程建刚等, 2014)。

总之，气候变化将减少低温寒潮，减少降水，但加剧旱涝灾害以及对杂草、昆虫和疾病的生物胁迫等，进而影响农业生产适宜性，进一步影响农业空间格局 (Toreti 等, 2013; 张强等, 2015)。

<sup>①</sup> 三种排放情景分别是：RCP4.5 情景是指辐射强迫稳定在 4.5 W/m<sup>2</sup>，2100 年后二氧化碳当量浓度稳定在约 650 × 10<sup>-6</sup>；RCP6 情景是指辐射强迫上升至 6.0 W/m<sup>2</sup>，2100 年二氧化碳当量浓度达到约 850 × 10<sup>-6</sup>；RCP8.5 情景是指辐射强迫上升至 8.5 W/m<sup>2</sup>，2100 年二氧化碳当量浓度达到约 1370 × 10<sup>-6</sup>。

### 三、技术路线、研究方法和数据来源

#### (一) 技术路线

首先，重点选取气温、降水和气象灾害 3 个评价指标，分别评估 2030 年、2040 年和 2050 年气候变化对云南省农业生产适宜性的具体影响，并将 3 个维度作为综合评估的依据，修正农业生产适宜性评价结果。

其次，第一本源（First Nature）指的是区域的自然属性，例如高程、坡度、区位条件等，而第二本源（Second Nature）指的是能够表示集聚的社会经济因素，如交通、经济、人口等。现有的“双评价”指标体系缺乏对集聚经济机制的表达。因此，以“双评价”指标体系为基础，强调集聚经济的作用机制，丰富和完善“双评价”指标，将驱动因素和 2020 年土地利用数据输入 FLUS 模型（Liu 等，2017），预测云南省 2030 年、2040 年和 2050 年的农业空间格局演化，进而观察云南省国土空间格局变化。

最后，将修正后的农业生产适宜性评价结果输入纳入集聚经济的模型，模拟气候变化和集聚经济双重作用下，2030 年、2040 年和 2050 年的农业空间格局演化方向以及国土空间格局演化趋势（技术路线见图 3）。

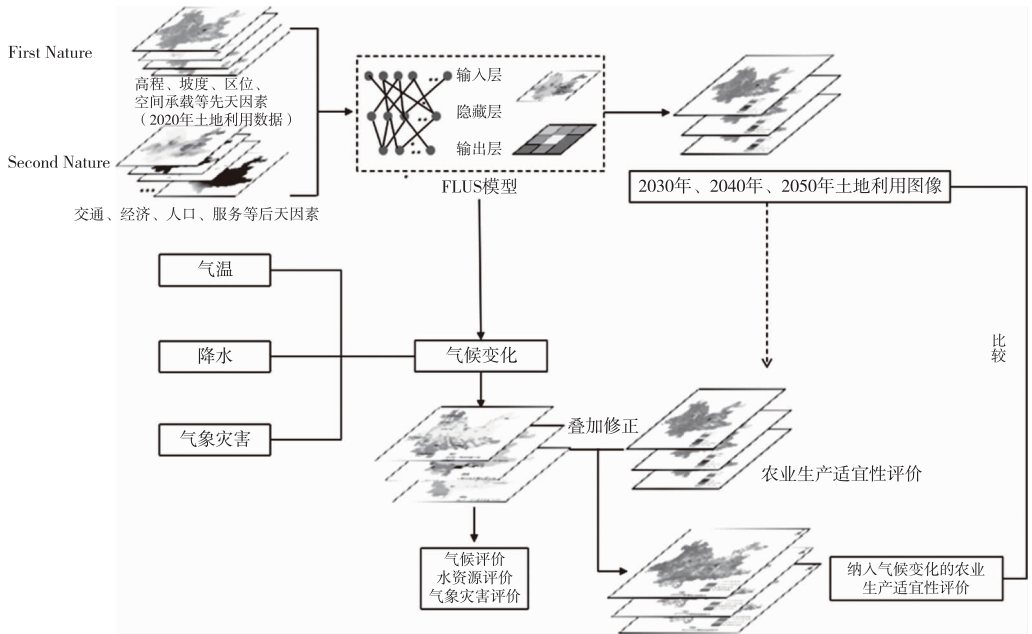


图 3 动态演化模拟整体技术路线

资料来源：作者自行整理。

## （二）研究方法

FLUS 模型是用于模拟人类活动与自然影响下的土地利用变化以及未来土地利用情景的模型。在耦合人工神经网络和元胞自动机的 FLUS 模型中，土地转换的概率取决于神经网络输出的分布概率，以及邻域密度、惯性系数、转换成本及地类竞争等因素的影响。栅格  $p$  在  $t$  时刻转化为  $k$  用地类型的概率  $TP'_{p,k}$  可表示为：

$$TP'_{p,k} = p(p, k, t) \times \Omega'_{p,k} \times inertia_{k,t} \times (1 - sc_{c \rightarrow k}) \quad (1)$$

式中， $p(p, k, t)$  为神经网络算法测算出的适宜性概率； $\Omega'_{p,k}$  表示栅格  $p$  在  $t$  时刻的邻域为用地类型  $k$  的密度，计算公式为  $\Omega'_{p,k} = \frac{\sum_{N \times N} con(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times w_k$ ，数值越大表明邻域受到第  $k$  种地类的影响越强； $inertia_{k,t}$ （自适应惯性系数）表示以前土地利用类型的继承性。当前土地栅格数量与目标土地需求的差距会在迭代过程中自适应调整，决定了不同类型用地的惯性系数。如果未来规划需要更多的某种类型的土地，而在最近一次迭代中该种用地类型的分配数量减少，惯性系数将增加，以保留更多的该种类型用地，促进其他土地利用类型向该种用地转化。 $sc_{c \rightarrow k}$  为土地类型之间的转换成本，表示土地类型  $c$  转变为类型  $k$  的困难程度，该值越接近 1，越不容易转换。

基于以往的研究基础，确定不同地类之间的转换成本（赵威和薛领，2022）。同时，考虑到已经确定的永久基本农田，在模拟中将永久基本农田设定为限制开发区域，即该区域无法进行农业土地向城镇等其他用地类型的转变。此外，根据所有土地利用类型的组合概率构造轮盘赌算法，通过这种轮盘赌选择机制，组合概率较高的土地利用类型更有可能被选择转换，但组合概率较低的土地利用类型仍有机会被分配，避免了陷入局部最优的问题。该机制的随机特性使该模型能够反映真实世界土地利用变化的不确定性。

## （三）参数设置

首先，对不同用地类型之间的转换成本参数和邻域扩张强度的参数进行设定。根据 2000—2018 年云南省土地利用转换矩阵，结合多次训练的模拟精度，最终将用地类型间的转换难易程度确定为表 2。

表 2 用地类型之间转换难易程度

土地类型	雨养旱作	灌溉田	混合农用地	林地和草地	水域	城镇
雨养旱作	1	0.1	0.1	0.5	0.01	0.9
灌溉田	0.1	1	0.1	0.5	0.03	0.6
混合农用地	0.1	0.3	1	0.6	0.01	0.9
林地和草地	0.5	0.2	0.2	1	0.01	0.3
水域	0	0.01	0	0	1	0
城镇	0	0	0	0	0	1

资料来源：作者自行计算。

注：数值越接近 1，表示两种土地类型之间越容易转换。



其次,本着相同的原则,参考 Liu 等为中国南方湿润地带(包含云南)设定的邻域权重表(Liu 等,2017),确定云南省各栅格邻域内不同土地类型的扩张强度(见表3)。

表3 6种土地类型的邻域权重(扩张强度)

土地类型	雨养旱作	灌溉田	混合农用地	林地和草地	水域	城镇
权重	0.4	0.3	0.3	0.4	0.05	1

资料来源:根据 Liu 等(2017)自行整理。

#### (四) 主要数据来源

研究使用的气象资料主要来源于国家气候中心制作的“中国地区气候变化预估数据集(3.0版)”(利用 IPCC 第五次评估报告数据搜集小组提供的典型浓度排放情景(RCPs)下的多个全球气候模式和区域气候模式的模拟结果制作而成)。研究中主要涉及两个排放情景为 RCP4.5 情景和 RCP8.5 情景,其中 RCP8.5 情景是人们最常用的场景,也是最高的温室气体排放情景,指的是假定到 2100 年时,空气中的 CO<sub>2</sub> 浓度要比工业革命前的浓度高 3—4 倍,辐射强迫稳定在 8.5W/m<sup>2</sup>。RCP4.5 情景介于 RCP2.6 和 RCP8.5 之间,也是研究中相对常用的场景,这一场景假定 2100 年辐射强迫稳定在 4.5W/m<sup>2</sup>。农业、国土资源以及水文等数据来自云南省各个政府部门、研究文献和部分双评价结果。土地利用类型数据来源于全球陆地覆盖数据(ESA GlobCover),数据为 2020 年。其他数据来源(见表4)。

表4 数据名称及来源

数据类型	数据名称	数据来源
土地利用数据	2000—2018年云南省土地覆盖数据	欧空局全球陆地覆盖数据(ESA GlobCover)
自然因素	高程、坡度	地理空间数据云
集聚经济因素	2020年云南省人口密度(人/km <sup>2</sup> )	NASA 全球公里网格数据
	2018年12月夜间灯光	NPP-VIIRS 夜间灯光数据
	2018年公共服务密度 2018年商业服务密度	Open Street Map 官网 pois 数据
区位因素	交通可达性 2018年栅格到主要公路距离 到现有及规划高速距离 2018年到行政中心距离	Open Street Map 官网道路数据、 云南省“十四五”及中长期公路规划 高德地图定位
限制因素	生态保护极重要地区	“双评价”生态保护重要性

资料来源:作者自行整理。

## 四、气候变化情景下云南省农业生产适宜性研判

### （一）气温变化对农业生产适宜性的影响

由于缺乏未来积温预测数据，这里使用年平均温度作为衡量热量资源的依据。针对云南省实际情况，按照年均温 $\geq 24^{\circ}$ 、 $18-24^{\circ}$ 、 $12-18^{\circ}$ 、 $6-12^{\circ}$ 、 $<6^{\circ}$ （下含不上含）划分为好、较好、一般、较差和差共5级，生成年均温分级图。

首先，依据云南省108个气象台站1981—2010年平均气温数据<sup>①</sup>进行逆距离权重（IDW）空间插值，并结合DEM数据进行海拔校正后（以海拔高度每上升100m气温降低 $0.6^{\circ}$ 的温度递减率为依据）得到云南省年均温多年平均值空间分布栅格图层；其次利用ArcGIS的转化工具将RCP8.5情景下RegCM4.0区域气候模式单向嵌入国家气候中心BCC\_CSM1.1全球模式输出的云南省2030年、2040年、2050年的年均温变化模拟结果转化成栅格图层（程建刚等，2014），并转化成以不同气温变化值为像元值的栅格图层并进行地理配准；最后，利用ArcGIS的栅格计算器将云南省年均温多年平均值空间分布图层（基准图层）和3个以10年为尺度的气温变化分布图层相加，生成未来30年云南省年均温分布结果，根据上述等级划分标准进行分类，生成农业导向下的气候评价分级图并据此计算各部分面积占比<sup>②</sup>。结果如下（见表5）：

表5 云南省农业生产功能指向下气温评价等级情况

（单位：%）

多年平均值(1981—2010)					
气温评价等级	差	较差	一般	较好	好
面积占比	5.70	15.78	57.29	21.08	0.16
2030年					
气温评价等级	差	较差	一般	较好	好
面积占比	4.60	12.29	54.21	28.52	0.38
2040年					
气温评价等级	差	较差	一般	较好	好
面积占比	4.23	12.08	53.00	30.16	0.53
2050年					
气温评价等级	差	较差	一般	较好	好
面积占比	4.13	10.83	51.37	32.93	0.75

资料来源：作者根据模拟结果计算得出。

结果表明，在全球气候变化的影响下，与基准期多年平均值相比，未来30年云南省气温资源被评价为“好”（年均温 $\geq 24^{\circ}\text{C}$ ）和“较好”（年均温 $18-24^{\circ}$ ）的地

① 数据来源：中国气象数据网，<http://data.cma.cn/data/weatherBk.html> [2023-08-28]。

② 如需要气候评价分级图以及各地级市详细图表请联系作者（下同）。

区所占比例逐渐增加,被评价为“一般”(年均温 $12\text{—}18^{\circ}$ )、“较差”(年均温 $6\text{—}12^{\circ}$ )和“差”(年均温 $<6^{\circ}$ )区域所占比例呈现逐渐减少的趋势。到2050年,云南省年均温超过 $18^{\circ}\text{C}$ 的地区将从原来的20%上升到超过30%,整体光热条件显著改善。其中,以普洱为代表的滇西南、以文山为代表的滇东南、以昭通为代表的滇东北以及以迪庆为代表的滇西北变化最为显著(到2050年评价等级发生变化的区域占该州市总面积比例超过20%)。昆明、曲靖变化相对较小(到2050年所有等级占比的变化幅度均不超过10%),玉溪、保山、临沧、楚雄、红河、西双版纳、大理、德宏、怒江、迪庆变化幅度为中等,表现为到2050年评价等级发生变化的区域占这些州市总面积的比例介于10%—20%之间。

## (二) 降水变化对农业生产适宜性的影响

针对云南省实际情况,对比自然资源部发布的双评价指南,对降水量等级划分进行适当调整,按照降水量按照 $\geq 1800\text{mm}$ 、 $1400\text{—}1800\text{mm}$ 、 $1000\text{—}1400\text{mm}$ 、 $600\text{—}1000\text{mm}$ 、 $<600\text{mm}$ (下含不上含)分为很湿润、湿润、半湿润、半干旱和干旱共5个等级。

首先,利用云南省125个气象站点1981—2010年平均降水量数据进行IDW反距离插值得到云南省年降水量多年平均值空间分布栅格图层,作为基期数据;其次,利用ArcGIS的转化工具将RCP8.5情景下RegCM4.0区域气候模式单向嵌入国家气候中心BCC\_CSM1.1全球模式输出的云南省2030年、2040年、2050年的降水变化模拟结果转化成栅格图层(程建刚等,2014),并利用ArcGIS的栅格计算器将1981—2010年云南省年降水量平均值空间分布图层(基准图层)和3个以10年为尺度的降水变化分布图层进行综合运算,获得未来30年云南省降水量分布结果;最后根据上述降水量等级划分标准进行分类,生成农业导向下的水资源评价分级图并据此计算出各部分面积占比。结果如下(见表6):

表6 云南省农业生产功能指向下水资源评价等级情况

(单位:%)

多年平均值(1981—2010)					
降水量评价等级	干旱	半干旱	半湿润	湿润	很湿润
面积占比	0.04	48.71	33.24	16.70	1.31
2030年					
降水量评价等级	干旱	半干旱	半湿润	湿润	很湿润
面积占比	0.02	48.41	34.96	15.13	1.49
2040年					
降水量评价等级	干旱	半干旱	半湿润	湿润	很湿润
面积占比	0.05	52.45	33.57	12.81	1.12
2050年					
降水量评价等级	干旱	半干旱	半湿润	湿润	很湿润
面积占比	0.04	50.72	31.32	16.51	1.42

资料来源:作者根据模拟结果计算得出。

结果表明，在全球气候变化的影响下，与基准期多年平均值相比，未来 30 年云南省水资源评价结果整体呈现干旱地区和半干旱地区所占比例总和增加，半湿润地区、湿润地区和很湿润地区所占比例总和减少的趋势。其中干旱地区和半干旱地区所占比例总和将由 49% 上升到 51%，尽管不同地区间存在变化方向和幅度上的差异，但云南省水资源评价整体呈干旱化趋势，其中在 2040 年水资源减少幅度最大。

从空间来看，以楚雄彝族自治州为代表的滇中和以迪庆藏族自治州为代表的滇西北分级结果相对稳定，滇中以半干旱和半湿润地区为主，滇西北随着纬度的增加呈现湿润—半湿润—半干旱地区的分布格局。滇南在 2030 年之前均以湿润地区为主，也有一定比例的半湿润地区及很湿润地区。2040 年，滇南相当比例的湿润地区将转化为半湿润地区，部分很湿润地区也将转化为湿润地区。2050 年降水减少趋势有所扭转，湿润地区和很湿润地区比例回升，半湿润地区和湿润地区所占比例基本恢复到基准期水平。滇东北始终以半湿润和半干旱地区为主，2030 年半湿润地区比例有所上升，但在 2040 年后回落，半干旱地区比例上升。

### （三）气象灾害对农业生产适宜性的影响

利用 IPCC AR5 的 CMIP5 数据库中 22 个全球气候模拟模式的集合平均结果对未来云南省低温、洪涝、干旱 3 种气象灾害的风险变化进行评估（程建刚等，2014）。计算方法是各个指标首先进行归一化处理，再进行等权重相加，将相加后的结果再进行标准化到 0—1，即为各灾害风险。具体评估指标如下（见表 7）：

表 7 各气象灾害风险评估指标

气象灾害类型	风险评估指标
低温灾害	霜冻日数(FD)和最低气温的最低值(TNN)
洪涝灾害	连续 5d 最大降水量(Rx5day)、大于 20mm 降水日数(R20mm)和地形高度
干旱灾害	连续干旱日数(降水小于 1mm)(CDD)和降水距平百分率(Pa)

资料来源：作者自行整理。

首先，根据洪涝灾害风险度的数值范围按  $< 0.2$ ， $0.2—0.4$ ， $0.4—0.6$ ， $0.6—0.8$ ， $\geq 0.8$ （下含不上含）将云南省洪涝灾害危险性划分为低、较低、中等、较高和高 5 个等级；其次，根据洪涝灾害风险度的数值范围按  $< 0.2$ ， $0.2—0.3$ ， $0.3—0.4$ ， $0.4—0.5$ ， $\geq 0.5$ （下含不上含）将云南省洪涝灾害危险性划分为低、较低、中等、较高和高 5 个等级；再次，根据干旱灾害风险度的数值范围按  $< 0.05$ ， $0.05—0.1$ ， $0.1—0.15$ ， $0.15—0.2$ ， $\geq 0.2$ （下含不上含）将云南省干旱灾害危险性划分为低、较低、中等、较高和高 5 个等级；最后，将各灾害的风险评价等级从低到高分别赋值 1—5 分，利用栅格计算器将 3 种灾害得分进行加总，并按照 1—3 分，4—6 分，7—9 分，10—12 分，13—15 分将云南省气象灾害评价分为低、较低、中等、较高和高 5 级。评级结果如下（见表 8）：

表8 云南省农业生产功能指向下气象灾害风险评价等级情况

(单位: %)

2030年					
风险评价等级	低	较低	中等	较高	高
面积占比	0.00	16.37	67.74	14.13	1.75
2040年					
风险评价等级	低	较低	中等	较高	高
面积占比	0.00	12.52	55.21	28.52	3.74
2050年					
风险评价等级	低	较低	中等	较高	高
面积占比	0.00	11.21	58.94	28.16	1.68

资料来源:作者根据模拟结果计算得出。

未来30年云南省只有“较低”“中等”“较高”和“高”4个风险等级,即缺乏三种气象灾害风险评级均为“低”的地区。其中,气象灾害发生风险为“较低”的区域占比从2030年的16.37%下降到2050年的11.21%,主要分布在以昭通、曲靖、玉溪、楚雄、红河、文山、昆明等地区。气象灾害发生风险为“中等”的区域占比从2030年的67.74%下降到2050年的58.94%,广泛分布在滇西、滇西北、滇东南以外的云南省大部分地区。2030年,普洱、文山、大理、临沧、楚雄分别为“中等”气象灾害风险区域面积排名前五的州市。2050年,排名前五的州市则变为普洱、文山、楚雄、红河、昆明。气象灾害发生风险为“较高”的区域占比整体呈上升趋势,从2030年的14.13%上升到超过28%。2030年主要分布在保山、丽江、德宏、大理、怒江、迪庆等六个州市,2040年后延伸到滇西南的临沧、普洱、西双版纳等地区。气象灾害发生风险为“高”的区域占比呈现先升高后降低的趋势,从2030年的1.75%提高到2040年的3.74%,又在2050年回落到1.68%,主要分布在滇西北的迪庆藏族自治州。

从各等级面积占比变化看,除了昆明、曲靖、丽江、文山、迪庆等级结构相对稳定以外,其他11个州市气象灾害风险的等级分布均有较大范围的变化。表现为到2050年评价等级发生变化的区域占这些州市总面积的比例均超过了10%,而它们调整的方向也有所区别,其中曲靖、昭通、丽江、文山主要是从更高风险级别转化为更低风险级别,意味着它们的气象灾害风险因为气候变化将有所减轻,而昆明、玉溪、保山、普洱、临沧、楚雄、红河、西双版纳、大理、德宏、怒江则是从更低风险级别转化为更高风险级别,意味着它们未来的农业生产适宜性在气象灾害指标上将面临更大的威胁。

#### (四) 气温、降水和气象灾害对农业生产适宜性的综合影响

根据自然资源部2020年发布的“双评价”技术指南,农业生产适宜性的集成评价结果划分为适宜、较适宜、一般适宜、较不适宜和不适宜5级。农业生产适宜性等

级初判结果由农业耕作条件、农业供水条件、土壤环境容量和光热条件共同决定，其中与全球气候变化相关的主要为农业供水条件及光热条件，评估指标分别为上一节涉及的年降水量和年均温。基于盐渍化敏感性、土壤污染和气象灾害风险指标对初步评价结果进行调整。其中与全球气候变化相关的主要是气象灾害风险指标，对于气象灾害风险性高的区域，将初步评价结果为适宜的调整为较适宜等级。因此，本文将延续“双评价”技术指南中的基本思路，首先将气候评价和水资源评价等级从低到高分别赋值1—5分，利用栅格计算器得分进行加总，并按照1—2分，3—4分，5—6分，7—8分，9—10分将云南省未来30年农业生产适宜性初步评价结果分为不适宜、较不适宜、一般适宜、较适宜和适宜5个级别。其次，结合上一部分的气象灾害风险评价结果，对于气象灾害风险性为“高”的区域，将初步评价结果为“适宜”的调整为“较适宜”等级。结果如下（见表9）：

表9 云南省农业生产适宜性评价等级情况

（单位：%）

多年平均值(1981—2010)				
评价等级	较不适宜	一般适宜	较适宜	适宜
面积占比	17.59	57.26	24.29	0.85
2030年				
评价等级	较不适宜	一般适宜	较适宜	适宜
面积占比	13.20	58.39	27.24	1.17
2040年				
评价等级	较不适宜	一般适宜	较适宜	适宜
面积占比	13.84	57.40	27.78	0.98
2050年				
评价等级	较不适宜	一般适宜	较适宜	适宜
面积占比	12.77	56.08	29.72	1.43

资料来源：作者根据模拟结果计算得出。

注：仅考虑气温、降水和气象灾害。

结果表明，如果仅考虑年均温、年降水及气象灾害因素，云南省未来30年农业生产适宜性评价结果仅分为4级，其中评价结果为“较不适宜”和“一般适宜”所占的比例将有所下降，评价结果为“较适宜”和“适宜”地区所占比例将有所上升。云南省农业生产适宜性整体呈现上升的趋势，但通过分析16个州市各评价等级占比和面积的变化趋势可发现，气候变化对云南省不同地区农业生产适宜性的影响存在空间差异。

从各等级占比上看，根据变化幅度的大小可将16个州市分为三大类。其中保山、楚雄、红河、德宏、怒江、迪庆为第一类，它们受气候变化的影响程度相对较小，直

到2050年4个等级占比相对于多年平均值的变化幅度均不超过5%，也就是说，土地在各个评价等级之间转化的比率均不超过5%。昆明、曲靖、玉溪、西双版纳是第二类，它们受气候变化的影响程度为中等，体现为直到2050年4个等级占比相对于多年平均值的变化幅度均不超过10%，但是这些州市都至少有一个等级的变化幅度超过了5%。昭通、丽江、普洱、临沧和文山则是第三类，它们的农业生产适宜性受气候变化影响的程度最高，体现为至少有一个等级的变化幅度超过10%，且方向均为从较低等级转化为较高等级，更多生产潜能将得到开发。

从等级变化的方向上看，绝大多数州市农业生产适宜性都将受益于气候变化，呈现较低适宜性等级土地所占比例减少，较高适宜性等级土地所占比例提高的趋势。其中，怒江是全省唯一一个2050年“较不适宜”等级所占比例和多年平均值相比有所增加，而“较适宜”和“一般适宜”等级所占比例有所减少的州市。和基准期相比，怒江到2050年将有0.9%的土地从“较适宜”和“一般适宜”转化为“较不适宜”，说明气候变化对其未来农业生产适宜性将产生一定的负面影响。

从各等级面积分布上看，评价等级为“较不适宜”的区域主要集中在迪庆、怒江、昭通、丽江、大理5个州市；评价等级为“一般适宜”的区域广泛分布在16个州市，其中昆明、曲靖、玉溪、保山、昭通、丽江、临沧、楚雄、红河、文山、大理等州市所占比例较高；评价等级为“较适宜”的区域主要集中在普洱、临沧、红河、文山、西双版纳、德宏6个州市；评价等级为“适宜”的区域则由最初的普洱和红河逐渐扩展到保山、普洱、临沧、红河、文山、西双版纳、德宏等6个州市。

## 五、气候变化和集聚经济作用下云南省农业空间格局动态演化

### （一）情景1：纳入集聚经济作用

在2020年土地利用数据的基础上，基于现有文献（赵威和薛领，2022），纳入交通、经济、人口、服务等后天的社会经济因素，并确定模拟参数，对2030—2050年的土地利用格局进行预测，结果如表10所示。总体来看，2020—2050年，城镇土地不断扩张，占比从0.72%逐年上升至0.83%。而耕地面积占比逐年下降，从2020年的17.3%下降到2050年的16.79%。

从空间格局上看，总体表现为城镇建设用地挤占农业用地，且在现有建设用地上向周围耕地扩张。农业土地利用中，灌溉田面积保持稳定，基本不向其他土地利用类型转换，而雨养旱作土地利用向建设用地转化最多。具体到地州来看，昆明市、曲靖市、昭通市、丽江市、楚雄和大理的耕地面积减少较多，主要集中在滇东北和滇中地区。建设用地的面积除怒江和西双版纳外，都有不同程度的增加。

表 10 纳入集聚力量的土地利用类型占比

(单位:%)

2020 年							
土地类型	雨养旱作	灌溉田	混合农用地	林地和草地	水域	城镇	耕地
面积占比	9.84	1.81	5.65	81.55	0.43	0.72	17.3
2030 年							
土地类型	雨养旱作	灌溉田	混合农用地	林地和草地	水域	城镇	耕地
面积占比	9.59	1.80	5.48	81.90	0.43	0.80	16.87
2040 年							
土地类型	雨养旱作	灌溉田	混合农用地	林地和草地	水域	城镇	耕地
面积占比	9.55	1.80	5.46	81.95	0.43	0.82	16.80
2050 年							
土地类型	雨养旱作	灌溉田	混合农用地	林地和草地	水域	城镇	耕地
面积占比	9.54	1.80	5.45	81.95	0.43	0.83	16.79

资料来源：作者根据模拟结果计算得出。

## (二) 情景 2：纳入气候变化因素

为了进一步了解未来气候变化对云南省农业土地利用格局的影响，分别将修正后的 2030 年、2040 年和 2050 年气候变化下的农业生产适宜性评价数据纳入情景一模型继续进行模拟，得到 2030 年、2040 年和 2050 年气候变化和集聚经济下的农业空间格局图像（见表 11）。

表 11 未来气候变化下土地利用类型占比

(单位:%)

2020 年							
土地类型	雨养旱作	灌溉田	混合农用地	林地和草地	水域	城镇	耕地
面积占比	9.84	1.81	5.65	81.55	0.43	0.72	17.3
2030 年							
土地类型	雨养旱作	灌溉田	混合农用地	林地和草地	水域	城镇	耕地
面积占比	9.59	1.80	5.48	81.90	0.43	0.80	16.87
2040 年							
土地类型	雨养旱作	灌溉田	混合农用地	林地和草地	水域	城镇	耕地
面积占比	9.55	1.80	5.46	81.95	0.43	0.82	16.81
2050 年							
土地类型	雨养旱作	灌溉田	混合农用地	林地和草地	水域	城镇	耕地
面积占比	9.52	1.82	5.22	82.19	0.42	0.83	16.56

资料来源：作者根据模拟结果计算得出。



结果表明,考虑气候变化的情景下,2020—2050年城镇用地总量仍然保持增加的趋势,而耕地面积总量将减少,林地和草地面积将增加,水域面积则基本保持不变。与未加入气候变化的模拟结果相比,气候变化并没有阻碍城镇土地进一步扩张的趋势,说明气候变化对城镇土地利用格局的影响微乎其微。从耕地面积上看,2030年,纳入气候变化的耕地面积和情景一下的耕地面积相比,并没有显著变化,说明气候变化在2020—2030年这10年间,对土地利用格局起到的影响作用几乎可以忽略不计。但未纳入气候变化时,2040年和2050年耕地面积占比分别为16.8%和16.79%,考虑气候变化后,2040年和2050年耕地面积占比分别为16.81%和16.56%。从长期看,到21世纪中叶,气候变化加速了云南省耕地面积向林地和草地的转换。从整体趋势上看,气候变化的确会加速云南省农业土地利用面积的损失,不利于粮食安全(见表11)。

### (三) 情景对比与综合评估

云南省“双评价”中农业生产适宜性分为适宜、较适宜、一般适宜、较不适宜和不适宜5级。农业生产适宜区是以土地资源、水资源、气候评价结果为基础,环境评价及灾害评价结果为修正,结合地块集中度最终确定适宜开展农业生产的地区。加入气候变化后,农业生产适宜区的面积占比由0.85%上升到1.43%,较适宜区面积占比由24.29%上升到29.72%。总体来看,未来气候变化下,云南省农业生产适宜性有所提升,农业生产较适宜和适宜区分布在云南省西部和南部。

尽管考虑到气候变化后,云南省农业生产适宜性有所提升,但这仅仅是某一种温度情景。为了评估未来气候变化下,云南省土地利用格局的改变,将气候变化下的农业生产适宜性评价结果输入模型进行模拟。根据模拟结果可知,2030—2050年,仅在考虑空间集聚等社会经济活动影响下,建设用地面积有所扩张,而耕地面积在逐年减少,其中以雨养旱作和混合农用地的面积减少为主。考虑气候变化和集聚经济后,城镇面积扩张的趋势仍在持续,加剧了耕地面积的减少程度。到2050年,气候变化将促使云南省农业土地面积多减少882km<sup>2</sup>,对粮食安全造成了一定威胁。

综上所述,无论是考虑人类社会经济活动还是考虑气候变化的影响下,云南省城市建设用地的扩张趋势并没有改变,说明未来云南省国土空间演化趋势仍然以城镇用地扩张为主要特征,尤其集中在滇中地区。然而,在未来气候变化情景下,虽然农业生产适宜性总体来看有所提高,但是在人类经济活动和气候变化的共同作用下,耕地面积将继续减少。因此,云南省的粮食安全仍然会受到气候变化的挑战,未来云南省如何在气候变化下扩大适宜性提高的农业耕地面积,提升城镇土地利用效率,是国土空间优化的重点考虑方向。

## 六、研究结论

为提高“双评价”的科学性和前瞻性,本文提供了一个可供参考的分析框架和

实现途径。我们基于空间经济学理论，考虑集聚经济，预测出纳入集聚经济的土地利用变化基础情景，并结合全球和区域气候变化预估结果和“双评价”技术指南，选取气温、降水和气象灾害作为综合评估的依据，分析了2030年、2040年和2050年，气候变化和集聚经济将如何影响与农业生产适宜性相关的各个指标，从而对云南省农业生产适宜性进行修正，进一步预测出纳入气候变化和集聚经济下的2030—2050年农业空间格局和国土空间格局，得出以下结论。

第一，总体来看，气候变化会提高2030—2050年云南省农业生产适宜性。气温、降水和气象灾害这三个变量中气温的显著提升使得云南省整体评价结果有所提高；降水量虽然在大部分地区呈减少趋势，但和中国其他地区相比减少幅度相对有限，因此并未对评价结果产生太大的负面影响；气象灾害只是作为调节变量，且仅有气象灾害风险性为“高”的区域，才会将初步评价结果从“适宜”调整为“较适宜”等级，基本不存在初步评价结果为“适宜”（主要在滇南部）而气象灾害风险性为“高”的区域（主要在滇北部），因此灾害这一要素并未对集成评价结果产生实际影响。

第二，2030—2050年云南省城镇空间扩张的动力不足，主要表现在未来土地利用变化的总体趋势是土地蔓延和扩张的趋势减弱、变缓。具体而言，纳入集聚经济的作用后，云南省各市州城镇面积扩张而耕地面积减少仍然是土地利用格局演变的大趋势，总体上趋势减弱，但空间分异和集聚的累积因果更突出，具体体现在原本集聚的滇中地区更加集聚，而原本分散的云南边疆地区，如西双版纳和怒江等地集聚的内生动力不足。

第三，尽管纳入对未来气候变化的考虑，仍然不会改变2030—2050年城镇土地扩张的大趋势，但是扩张的趋势十分缓慢。说明在未来气候变化问题下，尽管气候变化会使云南省农业生产适宜性整体提高，但在集聚经济和气候变化的双重作用下，气候变化仍然会加剧耕地面积减少的趋势。但是在未来，城镇化扩张的内生动力不足，耕地面积的减少主要是向林地和草地的转化，而非向建设用地转化。2030—2050年，云南省如何借助农业生产适宜性提高而增加耕地面积，进而保障粮食安全是国土空间优化重点问题。

鉴于全球气候系统的复杂性，应对气候变化还面临着诸多复杂难题。未来，气候、农业生产适宜性、土地利用等均处于不断变化中，现阶段人类对其的认识和理解仍然相对有限。国际上现有的各种不同复杂程度的全球和区域气候模型本身亦存在着较大的不确定性。本文尽管采用了多个全球气候模式集合平均模拟值以及降尺度后的区域气候模式模拟结果，但结果依然存在一定程度的不确定性，只能代表一种几率较大的、可能的变化趋势及方向。未来还需结合实际情况和更先进的评估方法进行修正，才能更有效地服务于资源环境承载能力及国土空间开发适宜性评估和政策制定。气候变化是极其复杂的抗解性问题，具有深度不确定性，本文的结论还需要进一步深化研究，研究方法还需要进一步创新，包括嵌入动态适应性规划以及情景发现等。

## 参考文献

- 白娟、黄凯、李滨(2020):《“双评价”成果在县(区)级国土空间规划中的应用思路与实践》,《规划师》第5期,第30—38页。
- 蔡云楠、温钊鹏(2017):《提升城市韧性的气候适应性规划技术探索》,《规划师》第8期,第18—24页。
- 陈帅、徐晋涛、张海鹏(2016):《气候变化对中国粮食生产的影响——基于县级面板数据的实证分析》,《中国农村经济》第5期,第2—15页。
- 陈彦希、娄运生、任丽轩(2022):《未来气候变化情景下海南岛绿橙种植气候适宜性分析》,《中国农业气象》第10期,第786—797页。
- 程建刚、宋连春、黄玮等(2014):《云南省未来10—30年气候变化预估及其影响评估报告》,北京:气象出版社。
- 丑洁明、董文杰、徐洪等(2022):《气候变化影响中国粮食安全研究的新思路》,《气候与环境研究》第1期,第206—216页。
- 丁宇刚、孙祁祥(2022):《气候风险对中国农业经济发展的影响——异质性及机制分析》,《金融研究》第9期,第111—131页。
- 甘小玲、常亚鹏、江原等(2023):《气候变化对祁连山蒙古扁桃潜在适生区的影响》,《生态学报》第2期,第768—776页。
- 郝庆、邓玲、封志明(2021):《面向国土空间规划的“双评价”:抗解问题与有限理性》,《自然资源学报》第3期,第541—551页。
- 何亮、毛留喜(2023):《气候变化背景下东北地区大豆种植区气候适宜性变化》,《中国生态农业学报(中英文)》第5期,第1—10页。
- 刘超、霍逸馨、李思颖等(2023):《“双评价”中面向城镇开发的方法与技术优化——以浙江省嘉兴市域为例》,《自然资源学报》第3期,第618—630页。
- 刘德祥、董安祥、邓振镛(2005):《中国西北地区气候变暖对农业的影响》,《自然资源学报》第1期,第119—125页。
- 刘泽瑾、焦利民、连喜红(2022):《1995—2020年气候变化和耕地利用变化对中国耕地气候生产潜力的影响分析》,《中国土地科学》第3期,第62—73页。
- 潘根兴、高民、胡国华等(2011):《气候变化对中国农业生产的影响》,《农业环境科学学报》第9期,第1698—1706页。
- 王凯、蒋国翔、罗彦等(2023):《适应气候变化的国土空间规划应对总体思路研究》,《规划师》第2期,第5—10页。
- 张强、韩兰英、郝小翠等(2015):《气候变化对中国农业旱灾损失率的影响及其南北区域差异性》,《气象学报》第6期,第1092—1103页。
- 赵威、薛领(2022):《区域发展战略对国土空间格局演化的影响——以云南省为例》,《资源科学》第6期,第1252—1266页。
- Backlund, P., A. Janetos and D. Schimel (2008), *The Effects of Climate Change on Agriculture, Land Resources, Water Resources, and Biodiversity in the United States*, Washington D. C.: U. S. Climate Change Science Program.
- Krugman, P. R. (1980), “Scale Economies, Product Differentiation, and the Pattern of Trade”,

*American Economic Review*, 70 (5), pp. 950 – 959.

Krugman, P. R. (1991), “Increasing Returns and Economic Geography”, *Journal of Political Economics*, 99, pp. 483 – 499.

Liu, X., X. Liang and X. Li, et al. (2017), “A Future Land Use Simulation Model (FLUS) for Simulating Multiple Land Use Scenarios by Coupling Human and Natural Effects”, *Landscape and Urban Planning*, 168, pp. 94 – 116.

Mishra, V. and K. A. Cherkauer (2010), “Retrospective Droughts in the Crop Growing Season: Implications to Corn and Soybean Yield in the Midwestern United States”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, pp. 1030 – 1045.

Ortiz, R., K. D. Sayre and B. Govaerts, et al. (2008), “Climate Change: Can Wheat Beat the Heat?”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 126, pp. 46 – 58.

Pan, Y., R. Yang and J. Qiu, et al. (2023), “Forty-year Spatio-temporal Dynamics of Agricultural Climate Suitability in China Reveal Shifted Major Crop Production Areas”, *Catena*, 226, 107073.

Tabuchi, T., J. F. Thisse and X. Zhu (2018), “Does Technological Progress Magnify Regional Disparities?”, *International Economic Review*, 59 (2), pp. 647 – 663.

Toreti, A., P. Naveau and M. Zampieri, et al. (2013), “Projections of Global Changes in Precipitation Extremes from Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 Models”, *Geophysical Research Letters*, 40 (18), pp. 4887 – 4892.

Wang G (2005), “Agricultural Drought in a Future Climate: Results From 15 Global Climate Models Participating in the IPCC 4th Assessment”, *Climate Dynamics*, 25, pp. 739 – 753.

## The Impact of Climate Change and Economic Agglomeration on Agricultural Sustainability: A Case Study of Yunnan Province

XUE Ling, SUN Xin-tong, ZHAO Wei

(School of Government, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** “Dual Evaluation” serves as a foundational premise in land spatial planning. However, the present “Dual Evaluation” disregards the dynamic nature of human socio-economic activities and the implications of future uncertainties like climate change. This oversight underscores the necessity for enhancing the scientific and forward-looking dimensions of evaluation. Taking Yunnan Province as a case study and integrating global and regional climate change projection outcomes, this paper conducts a comprehensive assessment of agricultural production suitability for the years 2030, 2040, and 2050. Employing 2020 land use data as a base, we amalgamate artificial neural networks (ANN) and cellular automata (CA) to synthesize machine learning and evolutionary simulation. This approach models and examines evolving trends in both agricultural and land spatial patterns

in Yunnan Province between 2030 and 2050. The analysis considers the joint effects of climate change and economic agglomeration. The objective is to rectify the outcomes derived from the original “Dual Evaluation.” Key findings encompass: (1) Climate change predominantly influences agricultural suitability through temperature, precipitation, and meteorological events. From 2030 to 2050, regions categorized as “moderately suitable” and “suitable” witness heightened proportions, with the majority of prefectures and cities benefiting from climate change, fostering an overall uptrend in agricultural suitability. (2) Between 2030 and 2050, incorporating the impact of economic agglomeration, the overall trend in Yunnan Province is characterized by a reduced and decelerated expansion of land sprawl. However, spatial differentiation becomes more pronounced. Particularly in the central Yunnan region, there is a prevailing pattern where urban areas expand while arable land diminishes, reflecting the principal trajectory of land use evolution. This evolution trend remains unaltered even in light of the anticipated influences of future climate change. (3) Despite the projected augmentation of agricultural suitability due to climate change, the downward trend in arable land area persists, impacted by the dual forces of economic agglomeration and climate change. This study serves as a reference for perfecting the “Dual Evaluation” framework, integrating economic agglomeration and future climate change factors. It offers a more scientific analysis framework for optimizing and regulating land spatial planning.

**Key Words:** dual evaluation; climate change; agricultural production suitability; scenario analysis; Yunnan province

责任编辑：黄承梁 董亚宁