

农业用地和社会生态系统的可持续性

迭戈·洛罗·帕兹, 克尔斯滕·本戈切亚, 米歇尔·亨德森
农业科学研究所, 穆利斯, 法国

摘要: 在人类消费农产品的推动下, 农业用地扩张和集约化是环境退化和生物多样性保护的主要威胁之一。土地退化最终会通过减少生态系统服务来阻碍农业生产。因此, 设计可行的土地使用政策是一项关键的可持续性挑战。我们开发了一个模型来描述人类人口学和景观构成的耦合动态, 同时在农业扩张和集约化之间进行权衡。我们对土地利用策略进行建模, 从低强度农业和高人均土地转化率到高强度农业和低人均土地转化率; 并探索它们对耦合的人地系统的长期动态的影响。从长远来看, 我们寻求描述策略的可行性; 并了解由于资源稀缺而可能导致大规模土地退化和人口崩溃的机制。我们表明, 土地利用策略的可行性很大程度上取决于土地的内在恢复率。我们还发现, 当农业集约化没有伴随土地转换的充分减少时, 就会发生社会生态崩溃。基于这些发现, 我们强调了不知情的土地利用规划的危险以及预防行为对土地利用管理和土地利用政策设计的重要性。

关键词: 社会生态模型; 土地利用规划; 农业集约化; 农业扩张; 社会生态崩溃; 可持续性政策

Agricultural land use and the sustainability of social-ecological systems

Diego Loreau Paz, Kirsten Bengochea, and Michel Henderson
Institute of Agricultural Sciences, Moulis, France

Abstract: Agricultural land expansion and intensification, driven by human consumption of agricultural goods, are among the major threats to environmental degradation and biodiversity conservation. Land degradation can ultimately hamper agricultural production through a decrease in ecosystem services. Thus, designing viable land use policies is a key sustainability challenge. We develop a model describing the coupled dynamics of human demography and landscape composition, while imposing a trade-off between agricultural expansion and in-tensification. We model land use strategies spanning from low-intensity agriculture and high land conversion rates per person to high-intensity agriculture and low land conversion rates per person; and explore their consequences on the long-term dynamics of the coupled human-land system. We seek to characterise the strategies' viability in the long run; and understand the mechanisms that potentially lead to large-scale land degradation and population collapse due to resource scarcity. We show that the viability of land use strategies strongly depends on the land's intrinsic recovery rate. We also find that socio-ecological collapses occur when agricultural intensification is not accompanied by a sufficient decrease in land conversion. Based on these findings we stress the dangers of uninformed land use planning and the importance of precautionary behaviour for land use management and land use policy design.

Keywords: Socio-ecological modelling, Land use planning, Agricultural intensification, Agricultural expansion, Socio-ecological collapse, Policies for sustainability

引言:

农业社区依靠他们对季节的固有知识来做出关于土地利用、作物选择、种植日期和季节性降雨模式的决策。气候变化风险对环境、生态圈和自然秩序具有威胁性影响, 对农民及其农业活动产生负面影响。气候变化风险

有可能破坏全人类的传统习俗和生计, 尤其是农村社区和以土地为生的人们。特别是对于作物生产而言, 气候变化风险通过加速土壤侵蚀和由于气候变化引起的强烈和频繁的洪水而导致土壤退化而构成威胁。这将导致产量下降并危及粮食安全。气候变化风险带来的其他威胁

包括干旱和疾病、害虫和杂草暴露增加。本文将气候变化定义为“由自然过程或人类活动引起的持续较长时间的气候变化”。气候变化对农业生产的影响要求农民采取适应战略以减少损失。Kropp 和 Scholze 将气候变化背景下的适应定义为对自然和人类系统的调整, 作为对气候条件的实际和预期变化的反应, 以试图限制损害或利用机会。同样, 减少灾害风险 (DRR) 被认为是一个有条不紊的过程, 旨在设计和实施适当的政策、战略和实践的综合组合, 旨在预防危险情况并从战略上降低社会系统中的脆弱性, 以实现可持续发展。DRR 和气候变化适应 (CCA) 都旨在降低风险和冲击的影响, 并旨在建立复原力。2005–2015 年兵库行动框架 (HFA) 被认为是 DRR 的主要国际政策, 明确指出需要将气候变化缓解和适应纳入 DRR 进程。

对可持续农业土地利用的研究引发了关于土地共享-节约的辩论。是否更好地保护更大面积的自然土地, 在剩余土地上耕种高强度田地; 或在实践对野生动物友好的低强度农业的同时保护更小面积的自然土地, 这是一个尚未完全回答的问题。不同的作者经常得出不同的结论, 一些人捍卫节约/集约化范式, 另一些人捍卫共享或农业生态学范式。节约分享辩论被批评为忽略了土地利用与人口统计之间的耦合。此外, 讨论通常考察离散的、对立的策略, 但在这两个极端之间存在整个范围。目前, 农业集约化对可持续性的影响是一个重要问题, 因为在发展中国家, 外来需求正在推动大面积自然土地向集约化耕作的单一栽培转变。结果是一个统一的景观, 极易受到环境波动、自然栖息地破坏、碎片化、地下水污染和养分流失的影响。这些做法对环境有害, 但农业是养活人口所必需的。显然, 需要在粮食生产和自然土地保护之间取得平衡, 因为从长远来看, 今天采取的行动可能会危及人口的生存能力。

在这里, 我们建立了一个模型来探索不同农业土地利用策略对长期人类环境动态的影响。通过一个简单易懂的模型来解释人类人口学和土地动态之间的相互作用, 我们研究了农业社会生态系统在不同土地利用策略下沿集约-扩张范围的可行性。我们在集约化和土地转换努力之间进行权衡, 并调查由于土地退化而导致人口崩溃的土地使用策略。我们的中心前提是增加农业生产可以促进人口进一步增长。因此, 通过提高农业产量, 农业集约化可以对人类人口产生积极的反馈, 从而引发对更大生产的需求, 从而导致进一步的自然土地转化为农业, 最终导致景观更加退化。我们测试了不断增加的农业集约化无法腾出足够的自然土地并促进不可持续的人口增长、将环境推向临界点并最终导致社会生态系统崩溃的条件。

一、型号说明

人口与土地动态的双向耦合

我们的模型考虑了与人口需求相关的自然土地向农业用地的转变。由于人口动态是由人类可以访问和消费的资源驱动的, 因此它们最终取决于景观的构成。资源生产取决于景观构成, 也取决于农业强度。我们从两个维度构想农业土地利用: 控制农业用地空间扩展的转换努力和农业强度。在该模型中, 人类采用了从低强度和高土地转化率到高强度和低土地转化率的土地利用策略。农业强度与土地转换努力之间的这种负相关关系是基于土地节约共享辩论。高度扩张和密集的农业用地被认为是不可持续的。因此, 争论的焦点是实现可持续性的重点是否应该放在增加集约化以减少转换区域或扩大以拥有对野生动物友好的农业景观。我们的目标是通过在农业强度和土地转换努力之间进行权衡来重现这两个战略极点, 从而将两个战略维度减少为一个参数。在本研究中, 我们不考虑策略随时间的演变, 并假设它保持不变。

农业用地枯竭和退化, 速度因周围景观而异, 最终变得无法生产。自然土地有助于周围土地的恢复, 例如, 作为本地物种重新定居所必需的物种库。因此, 自然区域的破碎和退化土地周围自然斑块的退化会阻碍其自发恢复。另一方面, 自然土地也可能退化。事实上, 土地退化状态可以传播到自然状态, 就像沙漠化前沿在干旱景观中传播的情况一样。恢复和退化过程之间的平衡不仅取决于自然土地和退化土地的延伸, 还取决于两种土地的边界和退化程度。

人口统计

许多研究讨论了人类承载能力的概念, 并指出食物供应是人类人口增长的主要制约因素之一。在这项研究中, 我们遵循相同的推理并假设人口规模 p 遵循物流增长, 其承载能力随着时间的推移而变化, 受食物供应变化的影响。

使用逻辑方程来描述人口动态的方法以前曾受到批评, 其他研究已选择通过与消费水平相关的各种函数来明确地模拟生育率和死亡率过程。此外, 科恩强调了估计人类承载能力的困难, 因为可能限制人口增长的几种生物物理和社会机制正在动态演变并且可能无法识别。然而, 使用依赖食物的承载能力的逻辑模型已经很好地恢复了历史人口趋势。此外, 还使用逻辑模型对 1960 年代至 2000 年代前前所未有的人口增长进行了建模, 其中 Hopfenberg 使用粮食生产量化了人类承载能力, 与经验数据非常吻合。最近, Suweis 等人。使用 1970 年至 2011 年的人口数据, 利用水资源可用性和粮食生产之间的联系来计算基于水资源获取的人类承载能力。

农业生产

生产的资源数量 (Y) 取决于农业用地面积 (a), 但也取决于自然 (n) 和退化 (d) 土地的面积, 以及农业强度 β 。非耕地, 无论是自然的还是退化的, 都提供了对农业生产至关重要的生态系统服务, 例如授粉、养分循环、病虫害防治和水质调节。然而, 更大的土地退化会导致生态系统服务的减少和质量下降。因此, 我们不认为自然土地和退化土地对农业生产的贡献相同。相反, 我们引入了一个有效的土地函数 $\epsilon_l(n, d, \beta)$, 它代表了为农业用地提供生态系统服务的非耕地的有效面积:

$$\epsilon_l = n + (1 - \beta)d.$$

退化土地对有效土地的贡献随着退化程度而降低, 而退化程度又取决于农业集约化水平 (β)。我们假设更集约化的农业会导致更程度的土地退化, 因此集约化农业会转变为高度退化的土地。为简单起见, 退化土地对有效土地的贡献随着农业强度线性下降。

我们将农业资源生产 Y 建模为总耕地面积 (面积贡献) 和农业用地与非耕地边界的贡献之和, 包括自然和退化, 由有效土地 ϵ_l (边界贡献) 表示。因此, “面积贡献”与农用地面积成正比, “边际贡献”与农用地面积的平方根成正比。此外, 我们假设面积的相对权重, 生产中的边界贡献取决于农业强度 (β)。随着农业集约化程度的提高, 生产 Y 对周围非农业用地提供的生态系统服务的依赖程度降低, 而对人类投入的依赖程度更高。因此, 增加集约化会减少边界贡献并增加区域对生产的贡献。因此, 我们假设面积贡献随着农业强度 β 线性增加, 而边界贡献随着 β 线性减少。

区域和边界贡献的幅度由函数 $Y_A(\beta)$ 和 $Y_B(\beta)$ 调制。这两个函数可以分别解释为区域和边界贡献的特征生产力。对于给定的农业强度 (β), $Y_A(\beta)$ 是每单位农业用地面积的产量, 而 $Y_B(\beta)$ 是每单位农业用地边界长度的有效土地面积的产量。

$$Y = \underbrace{Y_A(\beta)\beta a}_{\text{Area contribution}} + \underbrace{Y_B(\beta)(1-\beta)\epsilon_l\sqrt{a}}_{\text{Border contribution}} \\ = y_A\beta(\beta a + Q\epsilon_l(1-\beta)\sqrt{a})$$

农业强度 (β) 范围为 0 到 1, 0 为极低强度农业, 1 为极高强度。随着集约化增加农业产量, 我们将区域 (Y_A) 和边界 (Y_B) 贡献的特征生产力建模为农业集约化的递增函数。为简单起见, 我们假设线性相关, 即 $Y_A(\beta) = Y_A\beta$ 和 $Y_B(\beta) = Y_B\beta$ 。参数 y_A 和 y_B 是每单位集约化的生产力。我们引入参数 $Q = y_B/y_A$, 表示边界和区域对资源生产贡献的相对重要性。

土地动态: 农业用地方程

土地转化是由人口对农产品的需求驱动的, 这导致

自然土地向农业转化。我们假设需求等于总期望食物消费 (C_p)。由于我们的目标是调查集约化-扩展范围内不同土地利用策略对人地动态的影响, 因此我们在农业强度和土地转化率之间进行了权衡。我们将土地转化率建模为农业强度 (β) 的递减仿射函数。养分径流和土壤侵蚀导致农业用地退化, 并且随着强度的增加而加剧。因此, 我们将农业用地的退化率建模为 β 的线性函数, 捕捉到高强度农业比低强度农业更快地退化土地的事实。农业用地面积的动力学方程由下式给出。

$$\frac{da}{d\tau} = \underbrace{[K_0 + (K - K_0)(1 - \beta)]C_p n}_{\text{Conversion}} - \underbrace{E\beta a}_{\text{Degradation}}.$$

参数 K_0 和 K 分别是每单位需求资源 C_p 的最小和最大转换率。由于对资源的需求与人口密度成正比, K_0 和 K 也是人均转化率。因此, 以下我们将它们称为人均转化率。在极端高强度场景 ($\beta = 1$) 中, 人均转化率处于其最小值 K_0 。在极端低强度情景 ($\beta = 0$) 中, 人均转化率处于其最大值 K 。

土地动力学: 自然土地方程

除了转为农业外, 自然土地面积可以通过退化土地的自发恢复而增加, 也可以通过土地退化状态的扩大而减少。退化土地边缘的自然土地通过生物和非生物过程促进其自发恢复。它充当物种库, 促进本地物种重新定居, 或作为优质水或化合物的来源, 以恢复土壤化学。天然斑块的大小也很重要, 因为较大的斑块培育了更多的物种, 并且对非生物波动更具弹性。因此, 恢复过程既取决于自然斑块的面积, 也取决于它们与退化土地边界的大小。我们提出了一个自发恢复项, 它与自然土地面积 n 和退化土地的边界 $\propto \sqrt{d}$ 成比例。退化土地的传播通过对称机制发生, 其中退化的潜力随着退化土地面积和自然土地边界而增长。因此, 自然土地变化的方程为:

$$\frac{dn}{d\tau} = \underbrace{Rn\sqrt{d}}_{\text{Recovery}} - \underbrace{D\beta d\sqrt{n}}_{\text{Degradation}} - \underbrace{[K_0 + (K - K_0)(1 - \beta)]C_p n}_{\text{Conversion}}.$$

参数 R 和 $D\beta$ 分别是回收率和降解率。退化率与农业集约化成线性比例, 因此更集约化的农业用地退化得更严重。此外, 严重退化的土地在更大程度上加剧了自然土地的退化。

二、结果

开发原始景观: 可持续与不可持续的土地利用策略

我们首先看看在原始景观中引入少量人口之后的动态。无论土地利用策略如何, 早期的瞬态动态都是相同的。人口将自然土地转化为农田, 从而增加资源生产, 对人口产生积极的回馈。人口的增加反过来又加速了土地转换。这种正反馈循环导致人口爆炸, 伴随着景观的

转变。农业用地扩张助长了退化土地的增加。土地转化和退化土地数量的增加都导致了自然土地的减少。自然土地面积的减少最终导致农业扩张减速,直到没有更多的土地被转化。人口以农业区为高峰。

退化的土地不能转回农业用地。这引入了时间延迟的反馈,因为自然土地的存量不会立即再生。时间延迟的反馈导致人口超过其承载能力。超调后,社会生态系统可以根据土地利用策略 β 达到两种不同的平衡。我们称可行平衡为人类长期存在的平衡,而崩溃平衡则为人口灭绝的平衡。在可行的平衡中,人口存在于一个复杂的景观中,由自然、农业和退化的土地马赛克组成。相比之下,崩溃平衡中的景观已完全退化。没有农业,就没有资源生产,就无法维持人口。

土地利用策略谱可以根据系统的渐近行为划分为三个区域,作为策略 β 的函数。第一个区域对应于 0 与临界点 $\beta = \beta_c, 1$ 处的坍塌平衡过渡之间的 β 值。我们将此区域称为频谱的共享方面,因为该范围内的土地利用策略模仿了土地共享类型的策略(例如,大面积的低强度农业)。崩溃范围(下文中称为 $\Delta\beta$)是指策略导致崩溃平衡的频谱区域。当土地利用策略处于崩溃范围内时,退化的土地会蔓延到整个景观,导致人口崩溃。崩溃范围和可行平衡之间的区域被指定为频谱的备用侧,因为该区域的策略模仿了节约土地的策略(例如小面积的高强度农业)。

在通往社会生态崩溃的道路上

崩溃范围的存在是由于可行平衡的稳定性随农业土地利用策略 β 的变化而变化。在频谱的共享方面,可行的平衡是一个稳定的焦点节点。因此,在相空间中,轨迹在到达固定点之前遵循螺旋,这会随着时间的推移转化为阻尼振荡。随着土地利用策略接近崩溃范围(β 增加),振荡幅度增加,这会延迟系统收敛到可行的平衡。当土地利用策略进入崩溃区间时,可行的均衡成为鞍点焦点并失去稳定性。稳定性损失是由亚临界 Hopf 分岔引起的,该分岔使坍塌平衡成为社会生态系统的唯一稳定吸引子。

在光谱的备用方面,向崩溃的过渡有不同的起源。至于频谱的共享侧,系统通过阻尼振荡收敛到可行的平衡,阻尼振荡随着接近崩溃范围而增加幅度。然而,在这种情况下,当达到临界点时,系统会经历超临界 Hopf 跃迁。因此,可行平衡的稳定性丧失伴随着稳定极限环的诞生,这使得社会生态系统有可能摆脱崩溃平衡并围绕可行平衡振荡。然而,随着土地利用策略向共享方向移动(β 减小),振荡的幅度会增加。最终,振荡变得足够大,足以推动系统通过引发社会生态崩溃的临界点。

通过分析,我们可以确定一个阈值景观构成,之后

社会生态崩溃是不可避免的。对自然土地动力方程的分析给出以下条件:

$$\frac{N}{D} \leq \left(\frac{d\beta}{r} \right)^2,$$

其中 $D = 1 - A - N$ 是退化土地的比例。阈值取决于土地恢复潜力 r 以及退化潜力 $d\beta$ 。阈值表示景观严重恶化以致剩余部分自然土地不足以恢复退化土地或维持其自然状态的点。因此,退化的土地开始蔓延到自然土地,导致景观完全退化和人口灭绝。接近第二次崩溃过渡,振荡接近前一个阈值。土地利用策略的微小变化会增加振荡幅度并推动系统通过临界点,使其崩溃。

土地恢复潜力对塌陷范围大小的作用

崩塌范围 $\Delta\beta = \beta_c, 2 - \beta_c, 1$ 的大小高度依赖于退化土地的恢复潜力(r)。随着土地恢复潜力的增加,塌陷范围的大小逐渐减小直至消失。有趣的是,在频谱的共享方面,当 $\beta < \beta_c, 1$ 时, β 的增加会导致更高的农业产量和更多的人口。然而,土地转换努力的减少不足以阻止自然土地比例的减少。事实上,农业集约化增加了自然土地的退化率 βd ,增加了退化土地传播到景观其他部分的潜力。当农业集约化没有伴随着转化努力的充分减少时,系统就会进入崩溃的道路。在临界点,退化程度高到足以导致社会生态崩溃。

幼稚农业用地规划的危险

正如它所制定的那样,我们的模型不允许我们知道对于给定的农业集约化增加,土地转换工作应该减少多少,以避免社会生态崩溃。这是因为我们固定了转换工作量和强度之间的线性权衡。实际上,它们之间的关系可能是高度非线性的。为了解决这个问题,我们发布了线性权衡假设,让土地转换努力与农业强度无关。然后,我们沿着集约化和扩展化两个维度探索土地利用策略。在实践中,这意味着我们现在有两个参数 K (土地转换努力)和 β (农业强度)来描述土地利用策略,而不是单个参数。因此,土地方程变为:

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = KPN - e\beta A \\ \frac{dN}{dt} = rN\sqrt{1-A-N} - d\beta(1-A-N)\sqrt{N} - KPN \end{cases}$$

三、讨论

我们调查了不同土地利用策略对以农业为基础的人类社会的长期可持续性的影响。我们从两个战略维度考虑农业土地利用规划:扩张和集约化。受土地节约共享辩论的启发,我们在模型中引入了土地利用战略参数(β),该参数控制农业强度和土地转换努力之间的权衡,从而将战略的两个维度减少为单个参数。然后,我们研究了从低农业强度和高转化努力($\beta = 0$)到高农业强度和低转化努力($\beta = 1$)的一系列策略中耦合的社会

生态系统的行为。我们发现, 如果不伴随土地转换努力的大幅减少, 农业集约化会导致不可逆转的土地退化和人口崩溃。此外, 农业集约化和转化努力之间的关系并不简单。不知情的土地使用规划可能会推动社会生态系统进入破坏可持续性并导致不可逆转的崩溃的关键转变。

我们的模型预测, 与大量人口和自然保护结盟的最合适策略是实行极其密集的农业, 并尽量减少自然土地向农业的转化。或者, 低农业集约化和高转化努力(即粗放农业)导致景观得到保护, 但人口规模显着降低。因此, 对于我们目前的人群, 该模型似乎支持节约假设的拥护者。然而, 在策略谱的中间存在崩溃区域表明这不仅仅是一个备用问题。

集约化的逐渐增加最终导致在我们模型的崩溃区域内采用土地利用策略。因此, 如果农业部门的技术发展停滞不前, 则陷入崩溃区域的风险更大。此外, 技术并不是解决所有社会生态问题的灵丹妙药, 因为技术会通过所谓的“杰文斯悖论”导致更大的环境退化。关于这个悖论, 提高农业生产效率有可能增加需求, 最终导致更多土地退化并导致系统崩溃。通过快速改变土地利用策略, 可以避免模型中的社会生态崩溃。克服塌陷区域所需的强度水平是否可以达到, 或者如何准确测量强度以了解我们在光谱上的位置尚不清楚。

很明显, 从长远来看, 农业扩张和集约化的同时增长是不可行的。然而, 目前的做法有利于集约化和扩张。上个世纪的绿色革命是农业集约化如何提高产量和粮食安全的最近的一个引人注目的例子。然而, 这也是历史上人口增长最快的时期, 进一步增加了需求, 推动了农业集约化和扩张。确保粮食安全的农业集约化的社会和经济效益是不可否认的。然而, 农业集约化和扩张已经引起了一些环境问题, 例如水土流失、养分流失、水污染或栖息地破坏和破碎化。它还引起了深刻的社会变革, 特别是小型农业生产者的消失, 从而推动了城市化并改变了消费模式。

农业集约化被认为是对过去社会崩溃的合理解释, 例如在罗马或玛雅的例子中。我们的模型中出现人口崩溃是大规模土地退化的结果, 这在两个方面损害了农业生产: 首先, 景观的恶化严重耗尽了自然土地的存量, 而自然土地是转变为农业的主要来源; 其次, 自然土地枯竭减少了对现有农业区的生态系统服务提供。由于土地退化会严重降低农业产量, 具有讽刺意味的是, 如今农业用地被认为是土地退化的主要原因之一。这种危险的反馈循环对可持续性构成严重威胁, 因为农业扩张和/或集约化以应对减产可能会加剧土地退化, 从而在长期内进一步减产。因此, 我们强调农业用地规划对社会生态系统可持续性的重要性。

此外, 我们的研究结果还强调了具有社会生态信息的农业土地使用政策对实现可持续性的重要性。通过在我们的模型中消除土地转换和农业强度之间的权衡, 我们表明可以为我们考虑的整个集约化范围获得可持续的土地利用策略。然而, 不可持续和可持续土地利用之间的界限远非微不足道。不可持续的土地利用战略的存在源于对给定集约化增加所需减少的土地转换的错误评估。由于我们的模型是对真实人口动态和土地利用规划的简化, 我们并不声称可持续路径和崩溃路径之间的边界正如我们所描述的那样。然而, 我们表明, 这个边界很可能远非微不足道, 因此很容易使不知情的土地利用规划失败。与以科学为基础的政策被认为对减缓气候变化或人口可持续性至关重要的方式非常相似, 我们的工作强调需要将知情的农业土地利用规划纳入政策议程以实现可持续性。

在全球范围内, 在总体范围内, 可以说我们还没有达到临界点或行星边界, 但在局部范围内, 这可能不是真的。农业用地在空间上不是均质的, 农业生产往往高度本地化: 南美洲的潘帕斯草原和美国的大平原就是两个例子。此外, 这些主要农业区大多是扩张和集约化的单一栽培。因此, 在区域尺度上, 既没有节约也没有共享, 而是广泛的开发, 这使得景观极易受到不可逆转的生态退化的影响。在南美草原和森林中, 这些做法除了造成社会问题外, 还造成了严重的环境退化。农业扩张已经摧毁了巴西的大部分大西洋森林, 现在它正在向世界生物多样性热点之一的亚马逊森林推进。土地管理实践的变化突出了在建模研究中考虑农业扩张和集约化的连续范围而不是离散的强度水平的兴趣。局部崩溃的可能性对全球可持续性构成威胁, 因为尚不清楚这些局部崩溃如何通过环境退化以及贸易或移民网络的变化在世界范围内传播。

我们的模型是农业实践、人口统计和社会结构的简化表示, 它允许我们探索一系列场景并理解模型中的行为, 但它也省略了我们复杂社会的细节。例如, 它没有考虑社会和经济不平等, 而社会和经济不平等已被认为是社会生态动态的重要驱动力。社会和经济不平等使系统远离可持续的人与自然平衡, 因此可能会对结果产生放大效应。此外, 我们用来描述人口动态的逻辑模型是启发式的, 并不反映导致人类生育率和死亡率变化的实际机制。最后, 我们假设人类无法通过随着时间的推移改变土地使用策略或生育和消费行为来适应环境退化。这是一个主要限制, 因为适应性策略可能会阻止预测的人口崩溃。然而, 这些简化并不会降低我们结果的相关性, 因为如果习惯不变, 当前的趋势有可能导致崩溃。此外, 如果人类通过文化模式的变化成功避免人口急剧

减少,那么这些变化很可能是巨大的,并涉及例如全面的社会经济重组。因此,我们的研究结果强调,我们当前的社会生态系统可能正在走向巨大的变化,尽管很难预测它们将采取的形式。

结论

通过探索土地利用战略的连续统一体,我们的工作有别于之前的人地动态耦合模型,并显示了量化农业扩张和集约化水平以评估可持续土地利用战略的重要性。我们从两个维度对农业土地利用规划进行建模:人口转换努力的扩张和集约化。扩张和集约化可以协同作用,加剧景观退化,但它们之间也存在权衡取舍。农业扩张增加了潜在退化土地的存量,而农业集约化既可以加速也可以加深农业土地的退化。

我们的研究结果表明,当土地转换努力减少不足时,农业集约化程度的提高如何导致社会生态崩溃。如果消费水平保持不变,农业集约化会增加农业产量,从而增加人口规模。人口增长通过进一步加速土地转换来反馈景观的构成。最终,土地退化会减少资源生产并导致人口超过其承载能力并最终下降。

可以说技术发展有可能避免崩溃,但是新技术对环境的影响是模棱两可的。技术具有提高生产效率的潜力,但也可以通过用合成投入代替生态系统服务,进一步将粮食生产与自然脱钩。万灵药的技术论点忽略了技术与人类行为之间的反馈,以及它对环境的潜在依赖。未来的工作将更加关注技术和行为变化之间的联系及其对社会生态动态的影响。

我们的模型说明了一种潜在的机制,可以解释过去社会的衰落,但也可以解释未来可能的崩溃。随着全球人口预计在未来几十年继续增长,适应农业管理将变得更加重要,并降低未来社会生态崩溃的潜在风险。我们的模型指出农业集约化是一种可能的解决方案,但是这不能与扩张相结合。然而,我们也强调,确定实现可持续性所必需的农业扩张限制并非易事。因此,预防性土地使用规划应伴随着社会规范的变化,例如减少消费以增加可持续未来的可能性。

通过对人口统计和土地利用之间的双向反馈进行建模,我们展示了误导或不知情的农业土地利用规划如何导致社会生态系统崩溃。这强调了知情的土地使用规划对实现可持续性的重要性。通过基于证据的政策设计,人类拥有改变不稳定的土地利用模式和减少农业对环境的影响的工具,使我们的社会生态系统走上更可持续的道路。

参考文献:

[1]Alcott B, Giampietro M, Mayumi K, Polimeni J. The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency

Improvements. Routledge; 2012.

[2]Baeten L, Velghe D, Vanhellefont M, Frenne PD, Hermy M, Verheyen K. Early trajectories of spontaneous vegetation recovery after intensive agricultural land use. *Restor Ecol.* 2010;18:379 – 386. doi: 10.1111/j.1526-100X.2009.00627.x.

[3]Balmford B, Green RE, Onial M, Phalan B, Balmford A. How imperfect can land sparing be before land sharing is more favourable for wild species? *J Appl Ecol.* 2019;56(1):73 – 84. doi: 10.1111/1365-2664.13282.

[4]Barrett S, Dasgupta A, Dasgupta P, Adger WN, Anderies J, van den Bergh J, Bledsoe C, Bongaarts J, Carpenter S, Chapin FS, Crépain A-S, et al. Social dimensions of fertility behavior and consumption patterns in the anthropocene. *Proc Natl Acad Sci.* 2020;117(12):6300 – 6307. doi: 10.1073/pnas.1909857117.

[5]Board on Environmental Change and Society, Committee on Population, Division of Behavioral and Social Sciences and Education, Board on Life Sciences, Division on Earth and Life Studies, National Research Council. *Can Earth's and Society's Systems Meet the Needs of 10 Billion People? Summary of a Workshop.* National Academies Press (US); Washington (DC): 2014.

[6]Food and Agricultural Organisation (FAO), 2009, *FAO and traditional knowledge: The linkages with sustainability, food security and climate change impacts*, United Nations, Rome.

[7]Bachtar P., Haleegoah J., Khudaverdyan S., Kunzheng C., Perez M.R. & Serapelwane T.V., 2003, To be or not to be: cropping in the Ditsobotla and Mafikeng districts, Working Document Series 111, International Centre for Development Oriented Research in Agriculture (ICRA) and Department of Agriculture Conservation and Environment, NWP, South Africa.

[8]Benhin J.K.A., 2008, 'South African crop farming and climate change: An economic assessment of impact', *Global Environmental Change* 18(4), 666 – 678. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.06.003>

[9]Botlhoko G.J. & Oladele O.I., 2013, 'Factors affecting farmers' participation in agricultural projects in Ngaka Modiri Molema district North West province, South Africa', *Journal of Human Ecology* 41(3), 201 – 206.

[10]Creswell J.W., 2009, 'Research design: Qualitative, quantitative and mixed methods approaches', 3rd edn., Sage, Thousand Oaks, CA.