

共享社会经济路径下土地利用变化模拟

汤琦^{1,2}, 余珮珩³, 陈泽怡², 白少云⁴, 陈奕云^{2,5}

(1.广州市城市规划勘测设计研究院, 广州 510060; 2.武汉大学

资源与环境科学学院, 武汉 430079; 3.香港理工大学 建筑及房地产学系, 香港 999077;

4.云南省水利水电勘测设计研究院, 昆明 650021; 5.剑桥大学 发展研究中心, 英国 剑桥 CB39DT)

摘要:针对高原湖滨地区土地利用无序扩张等问题,构建共享社会经济路径(SSPs)与未来土地利用模拟模型相结合的研究框架,并选取云贵高原湖泊分布最为密集的通海县、华宁县及江川区为研究区,开展不同 SSPs 情景下的未来土地利用模拟。结果表明:(1) SSP1 情景下建设用地与农用地集约利用程度提升,且大量其他用地被转化为生态用地,是高原湖滨地区最为理想的未来发展模式;(2) SSP2 情景下研究区保持现有发展趋势,土地利用变化自然发展;(3) SSP3 情景下人类活动对自然环境的干扰随时间变化逐步加强,是未来高原湖滨地区发展需要避免的情景;(4) SSP4 情景下研究区发展不平衡情况严重,经济增长缓慢,难以与生态实现协同发展;(5) SSP5 情景下研究区以大量能源消耗为代价,土地利用变化强度先增大,后逐步减弱并达到稳定的状态。SSPs 为未来土地利用模拟模型的参数设置提供了内涵和依据,两者结合可为云贵高原湖滨地区的可持续发展提供决策依据。

关键词:土地利用变化; 情景分析; 共享社会经济路径; 未来土地利用模拟模型; 气候变化

中图分类号:F301; P901

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0301-10

Simulation of Land Use Change Based on the Shared Socioeconomic Pathways

TANG Qi^{1,2}, YU Peiheng³, CHEN Zeyi², BAI Shaoyun⁴, CHEN Yiyun^{2,5}

(1.Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060,

China; 2.School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3.Department of Building and Real Estate, The Hongkong Polytechnic University, Hongkong 999077,

China; 4.Yunnan Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Kunming 650021,

China; 5.Centre of Development Studies, University of Cambridge, Cambridge, CB39DT, England)

Abstract:To address the problem of land use sprawl in lakeside areas on the plateau, we proposed the research framework that combined the shared socioeconomic pathways (SSPs) and future land use simulation (FLUS) model. Then Tonghai County, Huanning County and Jiangchuan District where lakes most densely distribute on the Yunnan-Guizhou Plateau were selected as the study areas to carry out future land use simulations under different SSPs scenarios. The results show that: (1) the intensive uses of construction land and agricultural land increased under the SSP1 scenario, and a large amount of other land was converted into ecological land, which was the most ideal future development model for the lakeside areas on the plateau; (2) the study area maintained the existing development trend under the SSP2 scenario, and the land use changes developed naturally; (3) SSP3 scenario had a high degree of land use development and change dynamics, which was the scenario to be avoided in future social development; (4) under the SSP4 scenario, the unbalanced development of the study area was serious, the economic growth was slow, and it was difficult to achieve coordinated development with ecology; (5) under the SSP5 scenario, the intensity of land use change in the study area increased firstly, then weakened gradually and reached to a stable state at the cost of a large amount of energy. SSPs can provide the connotation and basis for the parameter setting of land

收稿日期:2020-12-23

修回日期:2021-01-29

资助项目:国家自然科学基金项目“面向精细土壤碳制图平原地区农田土壤有机碳空间分异机理研究”(41771440)

第一作者:汤琦(1994—),女,广东广州人,硕士,研究方向为土地利用变化与可持续发展研究。E-mail:tangqi@whu.edu.cn

通信作者:陈奕云(1983—),男,福建泉州人,博士,副教授,研究方向为地理信息科学与可持续发展研究。E-mail:chenyy@whu.edu.cn

use simulation model. The combination of SSPs and FLUS can provide a decision-making basis for sustainable development of the lakeside area in Yunnan-Guizhou Plateau. The SSPs can provide the parameters for the future land use simulation model. SSPs provide connotation and basis for parameter setting of the model, and the combination of the two can provide decision basis for sustainable development of the lakeshore area in the Yunnan-Guizhou Plateau.

Keywords: land use change; scenario analysis; shared socioeconomic pathways; future land use simulation; climate change

城市化进程和化石燃料的快速消耗加剧了人类与自然的相互作用,人类活动成为推动自然环境演化的主要力量,并将持续对地球系统产生不容忽视的影响。“人类世”的提出为人与自然关系的调整提供了新视角,呼吁用更长远的眼光和更高度的灵活性制定跨社会、经济和环境的高效干预措施,促进“星球城市化”的可持续性^[1]。

联合国政府间气候变化专门委员会第五次评估报告第二工作组专题会议综合考虑了人口增长、经济发展、技术进步、环境条件、公平原则、政府管理、全球化等发展特点,初步确定了一套由共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)与典型浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs)共同构成的情景框架。共享社会经济发展路径(SSPs)描绘了未来经济社会系统5种不同的发展模式,广泛应用于人类社会发展与生态系统相互影响的研究中。而土地利用/覆被变化(Land-use and land-cover change, LUCC)能揭示生态环境、人类社会经济活动的变化及其相互作用的复杂关系。因此,将 SSPs 引入土地利用变化模拟能够充分考虑人类社会经济活动与自然环境之间的相互影响。

关于 SSPs 的应用研究集中于未来在不同发展战略与气候政策下,土地利用、能源及农业系统的可能演变及由此产生的温室气体排放^[2],涉及总体框架^[3]、分场景^[4-6]及指标和预测模型^[7]研究等,包含定性描述和定量测度^[8]。国内研究主要为共享社会经济路径发展的进展概述^[9],大尺度背景下的城市化^[10-11]、人口^[12-13]及经济^[14]变化情况,以及预估全球温度控制在全球气候协议范围内的气候变化和社会经济变化^[15-16],其中如何通过基于 SSPs 的未来土地利用变化模拟来揭示人类活动对环境的影响是当前研究的热点问题^[17]。

关于 LUCC 的研究集中于土地利用变化过程及驱动机制^[18-19]。其中涉及的土地利用模拟侧重模型模拟与情景模拟,模型模拟使用的方法包括系统动力学^[20]、CLUE^[21]、Markov^[22-23]、Logistic^[24-25]、元胞自

动机^[26]及多智能体^[27-28]模型,涉及模型的构建、对比与优化及不同时空尺度下不同试验区的验证。其中,多模型的结合能够克服单一模型的局限,成为当前研究的趋势^[29]。情景模拟通过对未来社会经济或自然条件进行假设,计算不同情景模式下各类用地的分布概率,模拟出不同情景下的土地利用发展趋势和变化机理,为 LUCC 研究提供了新的思路^[30]。在多数已有的未来土地利用模拟中,通常采用基于历史轨迹的单一情景或各自设定的多情景,这些情景通常简单、随意,不利于进行不同研究的对比^[20]。此外,多数研究数据源分辨率较低(1 km),不足以提供详细的空间信息,难以对局部区域进行精细化的描述^[31]。

云贵高原“坝子”以其平缓的地形、肥沃的土壤、充足的水源和宜居的环境成为人类繁衍生息的聚居地。作为全球生态环境脆弱区,云贵高原湖滨生态系统对气候变化和人类活动的响应极为敏感^[32-33]。随着全球气候变化和区域土地利用强度增加,云贵高原湖滨热地生态系统脆弱性加剧^[34],人地关系可持续性面临挑战。因此,开展不同社会经济发展情景下的未来土地利用模拟可以为“人地关系调和与政策制定提供依据。研究选取湖泊分布最为密集的通海县、华宁县及江川区,通过未来土地利用模拟(Future Land Use Simulation, FLUS)模型对5种共享社会经济路径情景下的土地利用变化进行精细化模拟,以揭示研究区在气候变化和人类活动影响下土地利用变化生态效应,为土地利用规划与可持续发展提供参考。

1 基础 SSPs 情景框架

SSPs 是一种社会经济假设情景下的全球模拟情景,综合 SSPs 研究成果,定义了由5种不同的发展模式导致的未来社会经济情景,分别是 SSP1 (Sustainability, 可持续发展路径)、SSP2 (Middle of the Road, 中间发展路径)、SSP3 (Regional Rivalry, 区域竞争发展路径)、SSP4 (Inequality, 不均衡发展路径)和 SSP5 (Fossil-fueled Development, 化石燃料为主的发展路径)^[2]。

SSP1 情景强调绿色可持续技术的广泛使用,同时人类普遍生活方式向资源低密集程度过渡。基于全球合作背景的较高经济增长率以及人口总量的减少,各国开始向可持续发展转变,从强调经济的高速增长到强调人类整体的未来福祉。在技术进步的背景下,高度重视预防环境退化,大幅度降低资源强度和化石能源依赖度。

SSP2 情景描述“基线”世界,即社会、经济和技术趋势没有明显偏离历史模式。技术发展日新月异,技术进步持续发展;全球发展和收入增长不平衡,全球互联市场的运作不完美;大多数经济体在政治体系上是稳定的,全球人口增长温和并在 21 世纪下半叶趋于平稳;全球和各个国家均为实现可持续发展目标努力但进展缓慢,改善社会与环境脆弱性的挑战仍然存在^[35]。

SSP3 情景呈现了社会必须避免或准备应对的最坏发展方向^[4]。各国更加关注国际和国内地区问题,政策倾向于国家和地区安全问题。显著的土地利用变化为森林大面积减少,农田和牧场大面积扩张。狭隘的地区主义政策导致区域经济发展相差巨大,总体经济发展缓慢。发展中国家人口增长率高,耕地、畜牧业用地增加,森林及其他自然用地减少,气候问题空前严峻。

SSP4 情景涉及区域内、外部不平等,是高收入地区与低收入地区不平等发展的路线^[36]。低收入地区人口快速增长,高收入地区人口减少。随着社会的发展,高收入地区愈加繁荣,而低收入地区在增加收入方面进展甚微,人均收入差距拉大^[3]。区域间经济增长的差异导致区域对能源和粮食需求差异巨大,高、低收入地区土地利用方式也迥然不同。

SSP5 情景是一种以大量化石燃料为代价助推的高速发展模式^[37]。在健康、教育和基础设施方面有大量投资,科学技术和人力资本快速发展;全球化程度高,区域包容性强;全球人口在 21 世纪达到顶峰并逐步下降;社会成功地处理了空气污染等问题,并且相信人类拥有有效管理社会和生态系统的能力。

2 材料与方法

2.1 研究区域及数据来源

研究区域为云南省玉溪市杞麓湖周边环境保护和社会经济发展刻不容缓的 3 个县级单位(通海县、华宁县及江川区)。社会经济数据来源于统计局公布的年度统计公报与统计年鉴。现状人口与 GDP 每公里格网数据来源于中国科学院资源环境科学中心。30 m 分辨率的土地利用覆盖数据来源于国家地球系统科学数据共

享服务平台,经验证,其精度可达到 82% 以上,可用性强^[38]。有关 SSPs 情景下未来人口、GDP 以及各类土地利用类型需求量等数据来源于 SSP 数据库(<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>),根据研究区未来的区域定位,节选符合研究区域 SSPs 情景下的人口和 GDP 变化情况,计算未来每 10 a 的人口增长率与 GDP 增长率,结合研究区 2005 年、2010 年、2015 年的人口与 GDP 数据,进行 5 种共享社会经济路径下情景的未来人口及 GDP 变化数量模拟。

2.2 未来土地利用模拟模型(FLUS 模型)

FLUS 模型是拥有复杂机理的土地利用模拟模型,由刘小平教授团队开发构建,是一种元胞自动机与系统动力学的耦合模型,融合了自上而下与自下而上两种模型的特点,并能够有效地对未来不同情景下的土地利用变化进行精确地模拟^[39]。

2.2.1 土地用途需求预测 FLUS 模型采用 SD 模型模拟人类经济与生态环境的作用。涉及的要素为人口、社会经济、气候和土地利用,各要素的相互作用和反馈机制可以根据研究需要及研究区实际情况予以修改。

2.2.2 土地利用适宜性概率获取 FLUS 模型采用三层 BP 神经网络模型进行适宜性概率获取,根据选取的空间变量设置神经网络中各层的神经元个数,通过空间驱动因子与土地利用的历史分布进行随机采样,随后根据样本进行人工神经网络算法(ANN)训练得到元胞发展概率^[40]。ANN 是一种多层前馈神经网络,演算过程包括训练和预测阶段,即:

$$\begin{aligned} \text{sp}(p, k, t) &= \sum_j \omega_{j,k} \times \text{sigmoid}(\text{net}_j(p, t)) \\ &= \sum_j \omega_{j,k} \times \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_j(p, t)}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\text{sp}(p, k, t)$ 表示第 k 种用地类型在栅格 p 和时间 t 上的适宜性概率; $\omega_{j,k}$ 是隐藏层与输出层间的权值; sigmoid 是隐藏层到输出层的激励函数; $\text{net}_j(p, t)$ 表示在第 j 个隐藏层栅格 p 在时间 t 上所接收到的信号。对于 BP-ANN 输出的 $\text{sp}(p, k, t)$, 各类用地的适宜性概率的和恒为 1, 即:

$$\sum_k \text{sp}(p, k, t) = 1 \quad (2)$$

2.2.3 土地利用类型出现概率运算 为展现土地利用变化的科学性和随机性, FLUS 模型引入邻域关系分析和自适应惯性竞争机制模式进行土地利用类型出现概率的运算, 即:

$$\Omega_{p,k} = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times w_k \quad (3)$$

式中: $\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)$ 表示在 $N \times N$ 窗口内, 土地

利用类型 k 在最后一次迭代时刻 $t-1$ 所占网格单元的总数。

$$\text{Inertiat}_k = \begin{cases} \text{Inertia}_k^{t-1} | D_k^{t-2} | \leq | D_k^{t-1} | \\ \text{Inertia}_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} 0 > D_k^{t-2} > D_k^{t-1} \\ \text{Inertia}_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}} D_k^{t-1} > D_k^{t-2} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: Inertia_k^t 表示第 k 种地类在 t 时刻的土地利用自适应惯性系数; D_k^{t-1} , D_k^{t-2} 分别表示在 $t-1$ 与 $t-2$ 时刻第 k 种用地类型的栅格数量与需求数量间的差值。

2.3 土地利用动态变化模型

土地利用动态变化模型主要用于土地利用类型变化速度的测量。选取单一土地利用动态度、综合土地利用动态度及土地利用转移矩阵对土地利用类型动态变化进行研究。

2.3.1 单一土地利用动态度 单一土地利用动态度即单一土地利用面积的净变化,反映单一一种类型的土地利用在研究期间面积的变化程度,即:

$$N_c = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (5)$$

式中: N_c 为单一土地利用面积的净变化; U_a , U_b 为研究起始年份 a 及研究终止年份 b 某种土地利用类型的面积; T 为研究时段。

2.3.2 综合土地利用动态度 综合土地利用动态度反映土地利用类型间的转换速率及总体土地利用变化的剧烈程度,即:

$$S = \left[\sum_{ij} \left(\frac{dS_{i-j}}{S_i} \right) \right] \times 100 \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (6)$$

式中: S 表示 T 时间段的土地利用变化速率; dS_{i-j} 为研究开始到结束期间第 i 类土地利用类型转化为其他土地利用类型的面积总和; S_i 为研究开始时间第 i 类土地利用类型总面积。

2.4 土地利用程度指标

土地利用程度反映土地利用的广度和深度,其分级机制不仅反映土地利用中土地固有的自然属性,更突出人类社会与自然环境的作用。即:

$$D_j = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i \quad (7)$$

式中: A_i 为第 i 级土地利用的分级指数; C_i 为第 i 级土地利用程度分级面积百分比; n 为土地利用程度分级数。按照利用程度可分为四级:土地利用程度最低的荒地和草地为四级,林地及水域为三级,第二级是耕地及园地等人类开发利用痕迹明显的地类,最后一级为开发程度最强的城乡建设用地,交通用地等。

3 结果与分析

3.1 模拟精度验证与模型调整

结合当地情况,选取人口分布、GDP 分布、距离铁路、公路的欧式距离、距离市中心、区中心的欧式距离、坡度及坡向作为土地利用变化模拟的驱动因子。就研究区土地利用类型而言,建设用地的扩张能力是最大的,能够以较低的成本和时间快速侵占其他土地利用类型。扩张能力最差的为林地,树木被砍伐之后土地的恢复能力较差,森林的形成需要大量的时间。研究区位于我国的南方湿润地区,降水较多,水域的扩张能力较其他区域更强。在这样的前提假设下,草地的扩张能力明显不如前几类土地能力强,草地主要分布在土壤较为贫瘠,气温较低,降水较少的地区,其自然扩张受限制严重。而耕地的扩张受人类活动和政策变化的影响较大,其自然扩张力较差。所以,参考现有研究成果,针对云南省土地利用类型进行领域因子参数调整^[39],耕地、林地、草地、水域及建设用地的邻域权重因子为 0.20, 0.01, 0.30, 0.40, 1。

采用 2015 年数据模拟 2017 年的土地利用变化情况, Kappa 系数为 0.738, 表明模拟结果与真值之间具有高度的一致性,精度较高,后续的模拟都将采用该基期数据及参数设置进行计算。

3.2 基于 FLUS 模型的土地利用模拟

依据 5 种共享社会经济路径下研究区未来人口及 GDP 变化数量,参考 SSPs 数据库中符合研究区 SSPs 情景下人口和 GDP 变化的林地、草地、耕地土地利用需求量,建设用地采用人口乘以人均建设用地面积的方式进行计算。所有的土地利用类型变化情况均以 2015 年土地利用真值作为预期基年,根据其需求量变化情况计算各情景模式下的土地利用类型栅格像元变化。

选取 2020 年、2050 年、2080 年、2100 年为预测节点,结合 FLUS 模型进行多次迭代,直至满足预测节点各情景模式下土地利用类型栅格数量,据此对不同 SSPs 情景下的土地利用变化进行预测。模拟精度为 30 m,实现了小区域尺度上土地利用变化的精细化预测^[41]。

3.3 土地利用动态变化分析

选取单一土地利用动态度、综合土地利用动态度(表 1)对土地利用类型动态变化进行分析。结果表明 SSP2 情景的土地利用变化最稳定,除建设用地外其他土地利用面积净变化趋向 0,退耕还林的趋势在逐步扩大,是云贵高原湖滨区为缓解气候挑战进行植树造林措施的体现。

SSP5 情景土地利用变化最激烈,在 2050 年 SSP5 情景中各类型的土地利用发生了大量转换。最明显的转换发生在 2020 年,大量耕地转换为建设用地,符合 SSP5 情景下经济腾飞的假设。由于 SSP5 中面临的较少的适应挑战,林地总面积处于小幅上升趋势。随着经济快速增长,在 SSP5 情景下土地利用变化逐步减弱并达到稳定的状态,印证 SSP5 中的土地利用在 2100 年将回归为可持续的方式。SSP3 与 SSP5 情景类似,2100 年的土地利用综合动态度高于 2050 年土地利用综合动态度,印证了 SSP3 情景的盲目发展和混乱的土地管理假设。

由于将未来研究区划入了中等收入地区,影响了 SSP4 下的土地利用变化情况。耕地和牧场大量增加的土地利用变化趋势并不明显,出现了退耕还林等趋势。在 SSP1 情景中,土地利用变化趋势向最为可持续的方向发展。生态用地和建设用地处于有效管理中,土地利用变化和缓。SSP1 在 5 种情景模式中耕地转换为林地的数量最多,表明可持续政策如退耕还林和有效的土地监管计划,对土地利用变化动态度有重要影响。

3.4 土地利用程度变化分析

土地利用程度指标通过土地利用的开发程度与集约程度,反映出土地利用处于何种阶段(发展期、调整期和衰退期)^[42]。土地利用程度越高,人为影响越大,生态效应越低。在 5 种 SSPs 情景下(表 2),仅 SSP1 情景中的土地利用开发程度始终处于下降趋势,表明人为影响逐步减弱,生态效应逐步加强。而逐步上升的 SSP3 情景则表示人类活动正在加强对自然环境的干扰。其他 3 种情景模式变化方向均先增后减,体现了先增加人为影响到后回归自然效应的可持续化过程。

3.5 土地利用空间变化分析

为研究土地利用变化的空间分布,对模拟预测和原始结果进行对比,获得研究期末 2100 年的模拟土地利用空间变化分布(图 1)。

5 种 SSPs 情景下土地利用变化在种类、数量、复杂度和分布上有明显差异。SSP2 情景变化最不明显,变化方向集中于耕地、林地等用地转变为建设用地,多集中在现有建设用地的边缘,数量和种类都较少,土地利用变化复杂度不高。SSP5 情景变化与 SSP2 情景类似,该情景中社会已经回归一种理性、有序、可持续的土地利用方式,变化方向集中于林地和耕地的相互转换过程。

SSP1 和 SSP4 情景代表“绿色型”;SSP3 代表“红色型”土地利用变化方式。“绿色型”表现为其他

用地被转化为生态用地,尤其是退耕还林和退耕还湖的趋势明显,是绿色可持续型土地利用。SSP1 较 SSP4 的表现更明显,其生态用地的增速高于 SSP4 情景。“红色型”社会则采用一种人为用地野蛮扩张的土地利用变化方式,大量生态用地和生产用地被转化为建设用地,土地利用变化呈现混杂无序的局面。随着社会经济的进步和人口的增长,云贵高原湖滨区面临水资源大量消耗、农田面源污染突出及水生态环境脆弱性加剧等问题。为逐步修复湖泊水生态、改善水环境、提高水资源承载力,湖滨区未来应当极力避免“红色型”社会发展方向,选择“绿色型”社会发展方向,保障区域水生态安全。

表 1 SSPs 情景下单一土地利用动态度与综合土地利用动态度结果

情景模式	土地利用类型及综合 土地利用动态度	2020 年	2050 年	2080 年	2100 年
SSP1	林地	-0.52	0.25	0.18	0.16
	草地	-0.32	-0.81	0.00	0.01
	水域	0.02	0.02	0.01	0.01
	耕地	-0.75	-0.45	-0.26	-0.22
	建设用地	20.98	3.17	0.36	0.11
	综合土地利用动态度	-	1.56	-	0.35
SSP2	林地	-0.48	-0.10	-0.01	0.00
	草地	-1.18	-0.26	-0.13	0.00
	水域	0.05	0.01	0.00	0.00
	耕地	-0.55	-0.01	0.00	0.00
	建设用地	18.70	2.33	0.40	0.11
	综合土地利用动态度	-	1.23	-	0.13
SSP3	林地	-0.91	-0.21	-0.10	-0.11
	草地	-0.66	-0.46	-0.20	-0.15
	水域	0.04	0.01	0.00	0.00
	耕地	-0.14	0.07	0.08	0.12
	建设用地	19.97	3.62	0.97	0.63
	综合土地利用动态度	-	1.06	-	1.12
SSP4	林地	-0.46	0.01	0.10	0.13
	草地	-0.46	-0.01	0.00	0.01
	水域	0.05	0.01	0.00	0.00
	耕地	-0.71	-0.23	-0.15	-0.17
	建设用地	19.58	3.07	0.29	0.11
	综合土地利用动态度	-	1.32	-	0.32
SSP5	林地	-0.97	-0.29	-0.09	-0.03
	草地	-1.24	-0.62	-0.22	-0.14
	水域	0.05	0.02	0.01	0.00
	耕地	-0.02	0.23	0.11	0.05
	建设用地	20.43	3.06	0.44	0.11
	综合土地利用动态度	-	2.45	-	0.32

注:单一土地利用面积净变化率数值单位为%,基期数据均为 2015 年单一土地利用类型面积数据;综合土地利用动态度只计算了 2050 年及 2100 年的指标;以上数据均经过保留两位小数处理;为方便对比,将数值放大 100 倍进行计算。

表 2 SSPs 情景下研究区的土地利用开发程度

情景模式	土地利用类型	2050 年			2100 年		
		面积比/%	分类指数	综合指数	面积比/%	分类指数	综合指数
SSP1	建设用地	4.74	18.96	—	2.89	11.56	—
	耕地	33.82	101.46	—	30.97	92.91	—
	林地和水域	55.66	111.32	237.52	61.71	123.42	232.32
	草地	5.78	5.78	—	4.43	4.43	—
SSP2	建设用地	4.18	16.72	—	2.88	11.52	—
	耕地	38.00	114.00	—	37.92	113.76	—
	林地和水域	53.71	107.42	242.25	54.81	109.62	239.29
	草地	4.11	4.11	—	4.39	4.39	—
SSP3	建设用地	5.03	20.12	—	4.05	16.20	—
	耕地	38.78	116.34	—	41.82	125.46	—
	林地和水域	50.42	100.84	243.07	48.36	96.72	244.15
	草地	5.77	5.77	—	5.77	5.77	—
SSP4	建设用地	4.67	18.68	—	2.89	11.56	—
	耕地	35.90	107.70	—	32.46	97.38	—
	林地和水域	53.66	107.32	239.47	58.88	117.76	232.47
	草地	5.77	5.77	—	5.77	5.77	—
SSP5	建设用地	4.66	18.64	—	2.88	11.52	—
	耕地	40.25	120.75	—	39.70	119.10	—
	林地和水域	49.31	98.62	243.79	51.65	103.30	239.69
	草地	5.78	5.78	—	5.77	5.77	—

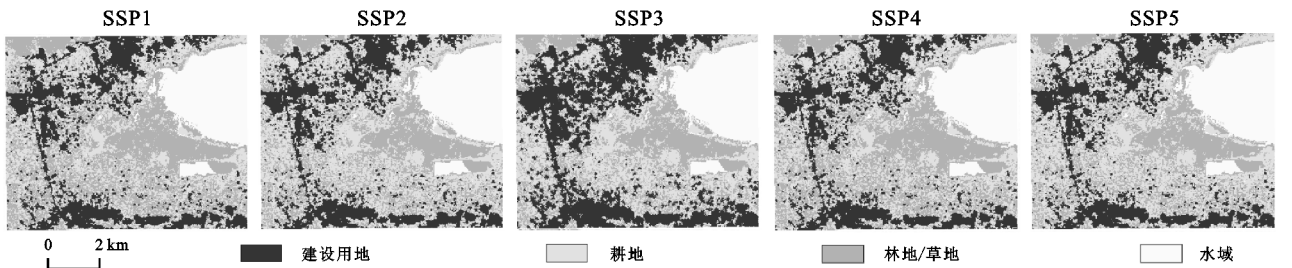


图 1 SSPs 情景下 2100 年土地利用变化空间分布示意图(局部)

3.6 景观格局变化分析

选取景观格局指数中 11 个评价指标:斑块数量(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、面积—周长分维数(PAFRAC)、散布与并列指数(IJI)、聚集度指数(COHESION)、景观形状指数(LSI)、蔓延度指数(CONTAG)、分离度指数(SPLIT)、香农多样性指数(SHDI)及香农均匀度指数(SHEI)对土地利用模拟的景观水平和类型水平进行分析^[39]。

景观水平上(表 3),对于数量、形态及变化趋势,除 SSP3 情景外,其他情景中的斑块数量均在增加,除 SSP3 外的情景模式中的景观破碎化情况趋于严重。各 SSPs 情景中的 LSI 变化不大且数值较高,斑块的形状处于较复杂的状态,SSPs 情景模式均没有改变这种状态。对于聚集与分离特征,CONTAG 在所有情景中均呈现先下降后上升趋势,SPLIT 在 SSP3,SSP4,SSP5 情景中呈现相同趋势,2015—2050

年经历了景观分散,优势斑块减弱过程。各情景下的 SHDI 与 SHEI 呈现先升后降趋势,表明景观格局经历了优势度“提高—下降”的情景,最终到研究期末时各情景下的斑块优势度表现趋同,优势度较为明显。

类型水平上(表 4),草地、耕地和林地的 NP 最多,破碎度最高,而水域和建设用地的集中性表现明显。对于林地,除 SSP2 与 SSP3 情景,其他情景中的林地斑块数量和密度均呈下降趋势,林地生态效应提高,土地利用变化趋向集中。草地的斑块数量仅在 SSP3 及 SSP4 中有下降趋势,表明在 SSP3 和 SSP4 中草地和建设用地经历着破碎化的过程。IJI 由高到低依次为水域、建设用地、草地、耕地、林地。林地和耕地的分散度较其他几种类型更高;水域和建设用地受地形及人为活动等因素影响分布较集中。2100 年的林地、耕地和水域的 COHESION 大于 94%,林地的 COHESION 达 99%,表明林地、耕地和水域斑块中的连通性最好。

表 3 SSPs 情景下研究区景观水平上的景观格局指数

情景模式	年份	斑块 数量(NP)	最大斑块 指数(LPI)	蔓延度指数 (CONTAG)	分离度指数 (SPLIT)	香农多样性 指数(SHDI)	香农均匀度 指数(SHEI)
历史真值	2015	16224	90.91	39.44	7.44	1.11	0.69
	2050	15180	87.17	39.39	7.04	1.13	0.70
SSP1	2100	16564	87.32	40.72	3.73	1.09	0.68
SSP2	2050	15543	90.48	38.17	6.98	1.15	0.71
	2100	16174	90.84	39.11	6.84	1.12	0.70
SSP3	2050	15147	88.36	37.98	10.04	1.16	0.72
	2100	15033	87.69	38.69	7.27	1.14	0.71
SSP4	2050	16252	90.66	37.54	7.82	1.16	0.72
	2100	16420	88.19	40.27	6.27	1.10	0.68
SSP5	2050	15123	87.92	38.36	9.38	1.15	0.72
	2100	15369	89.38	39.77	5.97	1.11	0.69

表 4 SSPs 情景下的研究区各斑块类型水平上的景观格局指数

情景 模式	年份	土地利用 类型	斑块数量 (NP)	斑块密度 (PD)	最大斑块 指数(LPI)	面积—周长 分维数(PAFRAC)	散布与并列 指数(IJI)	聚集度指数 (COHESION)
历史真值	2015	林地	3431	1384	31.66	1.64	35.51	99.64
		草地	6731	2714	0.02	1.63	60.34	32.50
		水域	632	255	3.18	1.37	68.42	94.94
		耕地	4404	1776	11.82	1.65	49.47	99.17
		建设用地	1026	414	0.27	1.52	58.19	86.34
SSP1	2050	林地	2934	1186	34.39	1.64	39.94	99.70
		草地	5639	2280	0.03	1.64	60.33	31.76
		水域	617	249	3.20	1.37	73.78	95.00
		耕地	5205	2104	8.88	1.65	45.74	98.26
		建设用地	785	317	0.82	1.48	65.12	95.16
	2100	林地	2396	969	51.01	1.64	42.50	99.85
		草地	6689	2704	0.03	1.64	60.05	35.00
		水域	618	250	3.20	1.36	71.50	95.00
		耕地	5894	2383	6.82	1.66	47.65	97.94
		建设用地	967	391	0.31	1.53	62.70	88.96
SSP2	2050	林地	3288	1329	30.80	1.63	36.41	99.62
		草地	6224	2516	0.03	1.63	54.89	35.20
		水域	614	248	3.19	1.37	72.28	95.01
		耕地	4423	1788	20.12	1.65	54.37	99.33
		建设用地	994	402	1.21	1.55	37.60	94.48
	2100	林地	3442	1391	31.29	1.63	36.31	99.62
		草地	6697	2707	0.03	1.63	60.33	34.34
		水域	619	250	3.20	1.37	70.36	94.99
		耕地	4443	1796	20.03	1.65	49.76	99.33
		建设用地	973	393	0.32	1.53	58.52	88.44
SSP3	2050	林地	3749	1516	17.99	1.64	36.71	99.35
		草地	5869	2373	0.03	1.64	58.31	36.28
		水域	616	249	3.19	1.37	72.59	95.01
		耕地	4161	1682	21.73	1.64	49.86	99.41
		建设用地	752	304	2.12	1.45	58.41	96.88
	2100	林地	4080	1649	17.66	1.63	35.64	99.27
		草地	5762	2329	0.03	1.64	58.26	36.00
		水域	615	249	3.20	1.37	68.82	95.01
		耕地	3750	1516	30.60	1.62	50.09	99.63
		建设用地	826	334	0.96	1.50	52.68	94.13

续表 4

情景模式	年份	土地利用类型	斑块数量(NP)	斑块密度(PD)	最大斑块指数(LPI)	面积—周长分维数(PAFRAC)	散布与并列指数(IJI)	聚集度指数(COHESION)
SSP4	2050	林地	3423	1384	31.56	1.64	40.12	99.63
		草地	6671	2697	0.03	1.64	63.79	34.59
		水域	613	248	3.19	1.37	74.72	95.01
		耕地	4721	1908	13.76	1.65	49.42	99.00
		建设用地	824	333	0.79	1.50	71.52	94.63
	2100	林地	2601	1051	36.96	1.64	41.03	99.73
		草地	6663	2694	0.03	1.63	60.16	35.86
		水域	612	247	3.19	1.37	71.06	95.08
		耕地	5577	2255	7.48	1.66	48.23	98.36
		建设用地	967	391	0.32	1.53	61.56	88.80
SSP5	2050	林地	3749	1516	17.99	1.64	36.71	99.35
		草地	5869	2373	0.03	1.64	58.31	36.28
		水域	616	249	3.19	1.37	72.59	95.01
		耕地	4161	1682	21.73	1.64	49.86	99.41
		建设用地	752	304	2.12	1.45	58.41	96.88
	2100	林地	3627	1466	30.04	1.64	34.16	99.59
		草地	6066	2452	0.03	1.64	60.20	32.97
		水域	614	248	3.19	1.37	68.35	95.01
		耕地	4089	1653	26.64	1.64	48.24	99.55
		建设用地	973	393	0.34	1.53	56.40	89.50

注:为方便进行数值比较,斑块密度数值统一取 10⁻⁷次方值。

4 讨论与结论

研究表明,不同社会经济情景路线下的土地利用变化机理和表现具有不同特征:(1)关于土地利用动态变化,SSP2 情景的土地利用变化稳定,SSP5 情景的土地利用变化最激烈。(2)关于土地利用程度变化,SSP1 情景中的土地利用开发程度呈下降趋势;SSP3 情景中土地利用开发程度处于逐步上升状态;其他 3 种情景模式变化方向先增后减,体现了先增加人为影响到后回归自然效应的可持续化过程。(3)关于土地利用空间变化,SSP2 情景变化方向集中于耕地、林地等用地转变为建设用地,土地利用变化复杂度不高;SSP5 情景主要的变化方向集中于林地和耕地的相互转换过程;SSP1 和 SSP4 情景主要表现为大量其他用地被转化为生态用地,尤其是退耕还林和退耕还湖的趋势明显,代表可持续的“绿色型”土地利用;SSP3 情景表现为大量生态用地和生产用地被转化为建设用地,代表人为用地野蛮扩张的“红色型”土地利用。(4)关于景观格局变化,景观水平上,除 SSP3 情景外,其他情景中的斑块数量均在增加,除 SSP3 外的情景模式中的景观破碎化情况趋于严重;类型水平上,对于林地类型,除 SSP2 与 SSP3 情景,其他情景中的林地斑块数量和密度均呈下降趋势,草地的斑块

数量仅在 SSP3 及 SSP4 中有下降趋势。

综合而言,SSP1 情景下的土地利用变化最为稳定,土地开发程度始终处于下降趋势且大量其他用地被转化为生态用地,是高原湖滨地区最为理想的未来发展模式;SSP2 情景下研究区保持现有发展情况,土地利用变化自然发展;SSP3 情景下的土地利用开发程度和变化动态度较高,大量生态用地和生产用地被转化为建设用地,人类活动对自然环境的干扰随时间变化逐步加强,是未来高原湖滨地区发展需要避免的情景;由于将未来研究区定位为中等收入地区,SSP4 情景下研究区发展不平衡情况严重,经济增长缓慢,生态进程也趋向缓慢;SSP5 情景下研究区以大量能源消耗为代价,经济与科技高速发展,前期土地利用变化强度先增大,后期利用高新技术解决生态问题,土地利用变化强度逐步减弱并达到稳定的状态,最终回归可持续的方式。

为确保高原湖滨地区的可持续发展,首先,建立有序政府管理,保证土地利用不出现盲目扩张和粗犷利用等极度破坏生态环境的行为;其次,稳固平与公平化的地区关系建设;最后,应提高人民教育水平和群众素质,通过对人民教育水平的投入及可持续发展价值观的建设,进一步推进地区经济的发展和生态保护进程,做到全社会建立一致的绿色土地利用发

展观念,有效促进区域可持续发展的政策落实,使社会向更为理想的社会发展情景发展。

共享社会经济路径是前沿的社会情景描述体系,可以支撑决策者的管理目标设定和短期决策评估,确定有效的可持续行动计划。研究所采用的 SSPs 数据库主要从国家层面设置情景参数,未能充分反映研究区的实际情况,预测结果可能产生一定的偏差,未来可借助更高精度的遥感影像和社会经济数据,不断完善模拟方法,进一步提高共享社会经济路径下的土地变化模拟精度。除 SSPs 框架的内容,可将 SSPs 与 RCPs 结合,探讨在同样社会经济情景下不同排放情景如何影响相关对象的变化。全球气候变化背景下,综合自然干扰和人类活动影响,进一步开展土地利用与森林景观、生物多样性及水文过程的模型耦合或是未来可持续发展的重要方向。

参考文献:

- [1] Lei G, Bryan, B. Finding pathways to national-scale land-sector sustainability[J]. *Nature*, 2017,544:217-222.
- [2] O'Neill B C, Kriegler E, Ebi K L, et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21 st century[J]. *Global Environmental Change*, 2017,42:169-180.
- [3] Riahi K, Van Vuuren D P, Kriegler E, et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview[J]. *Global Environmental Change*, 2017,42:153-168.
- [4] Fujimori S, Hasegawa T, Masui T, et al. SSP3: AIM implementation of shared socioeconomic pathways[J]. *Global Environmental Change*, 2017,42:268-283.
- [5] Jiang L W, O'Neill B C. Global urbanization projections for the shared socioeconomic pathways[J]. *Global Environmental Change*, 2017,42:193-199.
- [6] Alcamo J. Scenarios as tools for international environmental assessments[R]. Copenhagen: European Environment Agency,2001.
- [7] 张杰,曹丽格,李修仓,等. IPCC AR5 中社会经济新情景(SSPs)研究的最新进展[J]. *气候变化研究进展*, 2013,9(3):225-228.
- [8] 曹丽格,方玉,姜彤,等. IPCC 影响评估中的社会经济新情景(SSPs)进展[J]. *气候变化研究进展*,2012,8(1):74-78.
- [9] 丁小江,钟方雷,毛锦凰,等.共享社会经济路径下中国各省城市化水平预测[J]. *气候变化研究进展*,2018,14(4):392-401.
- [10] 姜彤,赵晶,景丞,等. IPCC 共享社会经济路径下中国和分省人口变化预估[J]. *气候变化研究进展*,2017,13(2):128-137.
- [11] 姜彤,王艳君,袁佳双,等.“一带一路”沿线国家 2020—2060 年人口经济发展情景预测[J]. *气候变化研究进展*,2018,14(2):155-164.
- [12] 潘金玉,苏布达,翟建青,等.基于共享社会经济路径的中国经济发展趋势及其影响要素分析[J]. *气候变化研究进展*,2019,15(6):607-616.
- [13] 姜彤,赵晶,曹丽格,等.共享社会经济路径下中国及分省经济变化预测[J]. *气候变化研究进展*,2018,14(1):50-58.
- [14] 王艳君,景丞,曹丽格,等.全球升温控制在 1.5℃ 和 2.0℃ 时中国分省人口格局[J]. *气候变化研究进展*, 2017,13(4):327-336.
- [15] 胡婷,孙颖,张学斌.全球 1.5,2℃ 温升时的气温和降水变化预估[J]. *科学通报*,2017,62(26):3098-3111.
- [16] 龚文峰,袁力,范文义.基于地形梯度的哈尔滨市土地利用格局变化分析[J]. *农业工程学报*,2013,29(2):250-259.
- [17] 张琪,罗格平,李龙辉,等.基于土地利用/覆被变化表征的现代绿洲演变过程:以天山北坡三工河流域为例[J]. *地理学报*,2016,71(7):1157-1171.
- [18] 韩会然,杨成凤,宋金平.北京市土地利用变化特征及驱动机制[J]. *经济地理*,2015,35(5):148-154.
- [19] 刘永强,龙花楼,黄淮海.平原农区土地利用转型及其动力机制[J]. *地理学报*,2016,71(4):666-679.
- [20] 李志,周生路,陆长林,等.基于系统动力学城市边缘区土地利用变化模拟与预测:以南京市江宁区为例[J]. *土壤*,2010,42(2):314-318.
- [21] 梁友嘉,徐中民,钟方雷.基于 SD 和 CLUE-S 模型的张掖市甘州区土地利用情景分析[J]. *地理研究*,2011,30(3):564-576.
- [22] 朱康文,李月臣,周梦甜.基于 CLUE-S 模型的重庆市主城区土地利用情景模拟[J]. *长江流域资源与环境*, 2015,24(5):789-797.
- [23] 陆文涛,代超,郭怀成.基于 Dyna-CLUE 模型的滇池流域土地利用情景设计与模拟[J]. *地理研究*,2015,34(9):1619-1629.
- [24] 赵冬玲,杜萌,杨建宇,等.基于 CA-Markov 模型的土地利用演化模拟预测研究[J]. *农业机械学报*,2016,47(3):278-285.
- [25] 汪佳莉,吴国平,范庆亚,等.基于 CA-Markov 模型的山东省临沂市土地利用格局变化研究及预测[J]. *水土保持研究*,2015,22(1):212-216.
- [26] 李强,任志远.基于 Logistic 回归分析的土地利用变化空间统计与模拟[J]. *统计与信息论坛*,2012,27(3):98-103.
- [27] 张云鹏,孙燕,陈振杰.基于多智能体的土地利用变化模拟[J]. *农业工程学报*,2013,29(4):255-265.

- [28] 王越,宋戈,吕冰.基于多智能体粒子群算法的松嫩平原土地利用格局优化[J].资源科学,2019,41(4):729-739.
- [29] Guan D J, Li H F, Inohae T, et al. Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model [J]. Ecological Modelling, 2011,222(20):3761-3772.
- [30] Meiyappan P, Dalton M, O'Neill B C, et al. Spatial modeling of agricultural land use change at global scale [J]. Ecological Modelling, 2014,291:152-174.
- [31] Letourneau A, Verburg P H, Stehfest E. A land-use systems approach to represent land-use dynamics at continental and global scales[J]. Environmental Modelling and Software, 2012,33:61-79.
- [32] 余珮珩,冯明雪,刘斌,等.顾及生态安全格局的流域生态保护红线划定及管控研究:以云南杞麓湖流域为例[J].湖泊科学,2020,32(1):89-99.
- [33] 刘斌,白少云,余珮珩,等.结合高分遥感和多源数据的高原湖泊流域土地利用分析[J].测绘通报,2019(12):77-82.
- [34] Yang C, Li Q Q, Chen J Y, et al. Spatiotemporal characteristics of land degradation in the Fuxian Lake Basin, China: Past and future[J]. Land Degradation & Development, 2020,32(16):2446-2460.
- [35] Chen Y M, Li X, Liu X P, et al. Modeling urban land-use dynamics in a fast developing city using the modified logistic cellular automaton with a patch-based simulation strategy[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2014,28(2):234-255.
- [36] Li X C, Le Y, Sohl T, et al. A cellular automata downscaling based 1 km global land use datasets (2010—2100) [J]. Science Bulletin, 2016, 61 (21): 1651-1661.
- [37] 张云鹏,孙燕,陈振杰.基于多智能体的土地利用变化模拟[J].农业工程学报,2013,29(4):255-265.
- [38] Li C C, Gong P, Wang J, et al. The first all-season sample set for mapping global land cover with Landsat-8 data[J]. Science Bulletin, 2017,62(7):508-515.
- [39] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017,168:94-116.
- [40] 吴欣昕,刘小平,梁迅,等. FLUS-UGB 多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J].地球信息科学学报,2018,20(4):532-542.
- [41] 白少云,刘斌,余珮珩,等.融合多尺度影像数据的杞麓湖流域景观格局分析[J].测绘通报,2020(2):90-95.
- [42] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].地理学报,2003,58(5):643-650.

~~~~~

(上接第 300 页)

- [15] 李建兴,何丙辉,湛芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.
- [16] 史敏华,王棣,李任敏.石灰岩区主要水保灌木根系分布特征与根抗拉力研究初报[J].山西林业科技,1994(1):17-19.
- [17] 赵倩,伍红燕,宋桂龙,等.胡枝子和荆条不同植物配置的根系垂直空间分布特征[J].草业科学,2019,36(9):2183-2192.
- [18] 潘天辉,杜峰,王月.陕北黄土区护坡植物根系分布和抗剪增强分析[J].水土保持研究,2020,27(3):357-363,371.
- [19] 周萍,文安邦,严冬春,等.三峡库区紫色土坡耕地草地本地埂植物根系分布及抗拉力学特征[J].水土保持通报,2017,37(3):1-6.
- [20] 薛杨,赵洋毅,王克勤,等.磨盘山典型灌草根系抗拉力学特性及其影响因素研究[J].西南林业大学学报:自然科学,2019,39(2):99-107.
- [21] 冯国建,沈凡,王世通.护坡植物根系分布特征及抗拉强度研究[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2013,30(2):115-118.
- [22] 徐洪雨,王英宇,宋桂龙,等.华北土石山区公路边坡常见植物根系地下分布特征[J].中国水土保持科学,2013,11(2):51-58.
- [23] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增2):3445-3452.
- [24] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰.林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J].北京林业大学学报,2006,28(5):67-72.
- [25] 周霞,魏杨,李东崃,等.黄土区紫花苜蓿根系对土体抗剪性能的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(2):53-59.
- [26] 赵岩,周文渊,孙保平,等.毛乌素沙地3种荒漠灌木根系分布特征与土壤水分研究[J].水土保持研究,2010,17(4):129-133.