

枸杞种植用地发展对永久基本农田影响的风险模拟 ——以宁夏回族自治区中宁县为例

张建海¹, 姜昕彤^{2,6}, 马国庆¹, 舒瑞¹, 梁哲玮^{2,3}, 马孝林⁴,
李兆英^{2,3}, 马玲¹, 宋天健^{2,3}, 童荣鑫^{2,5}, 丁天姿^{2,3}, 梁迅^{2,3,5}, 关庆锋^{2,3,5}

[1.宁夏自然资源勘测调查院土地利用国家重点实验室宁夏科研基地,宁夏银川 756000; 2.中国地质大学(武汉)自然资源部国土碳汇智能监测与空间调控工程技术创新中心,湖北武汉 430078; 3.中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北武汉 430078; 4.宁夏回族自治区农业勘查设计院,宁夏银川 756000; 5.中国地质大学(武汉),国家地理信息系统工程技术研究中心,湖北武汉 430078; 6.中国地质大学(武汉)未来技术学院,湖北武汉 430078]

摘要: [目的] 科学预测宁夏回族自治区中宁县枸杞种植用地扩张带来的影响,为该区未来农业空间布局及特色产业种植发展提供科学指导。[方法] 以中宁县为研究区,基于2005—2021年国土调查数据,结合耕地“进出平衡”政策,设置有无永久基本农田保护两个约束情景,并利用斑块生成土地利用模拟模型(PLUS)模拟了2025和2035年中宁县土地利用变化,探究了未来枸杞种植用地对永久基本农田的占用情况。[结果] 到2035年,在有永久基本农田约束两种情景下枸杞种植用地面积分别增长了59.81%和98.48%,且新增的枸杞大多在原来枸杞用地的周围,鸣沙镇和大战场镇的新增枸杞用地最多;另外,研究显示,在无永久基本农田约束情景下,2025和2035年永久基本农田面积分别被侵占1100.00和2386.67 hm²,其中中宁县中北部地区的永久基本农田被枸杞用地侵占的风险最高。[结论] 有必要加强对高风险镇区枸杞种植发展的监管,并合理地规划现有和未来的“非粮化”种植用地,以更好地协调研究区的经济发展和永久基本农田保护,促进区域可持续农业的发展。

关键词: 进出平衡; 永久基本农田; PLUS模型; 枸杞种植; 元胞自动机

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0162-11

中图分类号: K9, S5

文献参数: 张建海, 姜昕彤, 马国庆, 等. 枸杞种植用地发展对永久基本农田影响的风险模拟[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 162-172. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.018; Zhang Jianhai, Jiang Xintong, Ma Guoqing, et al. Risk simulation of impact of land development for *Lycium barbarum* cultivation on permanent basic farmland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 162-172.

Risk Simulation of Impact of Land Development for *Lycium Barbarum* Cultivation on Permanent Basic Farmland

—A Case Study of Zhongning County, Ningxia Hui Autonomous Region

Zhang Jianhai¹, Jiang Xintong^{2,6}, Ma Guoqing¹, Shu Rui¹, Liang Zhewei^{2,3}, Ma Xiaolin⁴,
Li Zhaoying^{2,3}, Ma Ling¹, Song Tianjian^{2,3}, Tong Rongxin^{2,5}, Ding Tianzi^{2,3}, Liang Xun^{2,3,5}, Guan Qingfeng^{2,3,5}

[1. Ningxia Institute of Natural Resources Survey and Investigation, Ningxia Research

Base of State Key Laboratory of Land Use, Yinchuan, Ningxia 756000, China; 2. China University of Geosciences (Wuhan), Technology Innovation Center for Intelligent Monitoring and Spatial Regulation of State Land Carbon Sinks, Ministry of Natural Resources, Wuhan, Hubei 430078, China; 3. China University of Geosciences (Wuhan), School of Geography and Information Engineering, Wuhan, Hubei 430078, China;

4. Ningxia Hui Autonomous Region Agricultural Survey and Design Institute, Yinchuan, Ningxia 756000, China;

5. China University of Geosciences (Wuhan), National GIS Engineering Technology Research Center, Wuhan, Hubei

收稿日期: 2024-03-11

修回日期: 2024-05-26

资助项目: 宁夏回族自治区自然资源勘测调查院项目“宁夏回族自治区自然资源勘测调查院宁夏自然资源调查监测数据分析评价项目”(NSC-NZC-2022012); 国家自然科学基金项目“基于残差分析的元胞自动机模型及土地利用变化机理挖掘研究”(42271437, 42171466)

第一作者: 张建海(1984—), 男(汉族), 甘肃省临泽县人, 硕士, 工程师。主要从事自然资源调查监测评价研究。Email: zjhs3264@qq.com。

通信作者: 梁迅(1990—), 男(汉族), 广西壮族自治区贵港市人, 博士, 教授。主要从事土地利用变化建模和地理时空动态模拟研究。Email: liangxun@cug.edu.cn。

430078, China; 6.China University of Geosciences (Wuhan), School of Future Technology, Wuhan, Hubei 430078, China]

Abstract: [Objective] The impact of the expansion of *Lycium barbarum* planting land was predicted scientifically in Zhongning County, Ningxia Hui Autonomous Region, in order to provide scientific and reliable suggestions for the future agricultural spatial layout and planting development of characteristic industries in the area. [Methods] Based on land survey data from 2005 to 2021 and considering the policy of “balancing in and out” of arable land, Zhongning County was taken as the research object and two constraint scenarios—one with and the other without the protection of permanent basic farmland—were set up. These were then used to simulate the future land use change of Zhongning County in 2025 and 2035 using the patch-generating land use simulation model (PLUS). Specifically, this model helped investigate the occupation of permanent basic farmland for *L. barbarum* cultivation in the future. [Results] According to the model, by 2035, under the with and without permanent basic farmland constraints scenarios, the area of land used for *L. barbarum* will grow by 59.81% and 98.48%, respectively. Most of the newly added *L. chinense* will be around the original *L. barbarum* land, and the main townships with increased area will be concentrated in Mingsha Town and Dazhanchang Town. Moreover, the study showed that, under the scenario without permanent basic farmland constraints, the areas of permanent basic farmland in 2025 and 2035 will be encroached by 1,100.00 hm² and 2,386.67 hm², respectively, in which the risk of permanent basic farmland in the north-central region being encroached by *L. barbarum* land will be the highest. [Conclusion] It is therefore necessary to strengthen the regulation of the development of *L. barbarum* cultivation in high-risk townships and rationally plan existing and future land for “non-food” cultivation in order to coordinate the economic development of the area better with the protection of permanent basic farmland and promote the development of sustainable agriculture in the region.

Keywords: in-out balance; permanent basic farmland; patch-generating land use simulation model (PLUS); *Lycium barbarum* cultivation; cellular automata

耕地,尤其是永久基本农田,是中国最珍贵的土地资源。而当前越来越多的耕地呈现出“非粮化”以及“非农化”特点,耕地转换为其他地类的需求依然旺盛。为了保护这些宝贵的资源,中国政府出台了一系列保护政策^[1]。1999年实施的《土地管理法实施条例》确立了耕地占补平衡政策^[2],以防止农田的“非农化”。该政策要求非农业建设占耕地时,需要通过开发未利用地或者土地综合整治等方式增加有效耕地面积。而永久基本农田保护是中国最为严格的耕地保护政策的体现^[3]。2007年中国首次提出永久基本农田的概念,并强调其重要性和执行性。2021年11月,中国首次提出耕地“进出平衡”政策,以控制耕地用途,防止农田“非粮化”。该政策要求在将耕地转为其他农用地及农业设施用地时,需补足同等数量、质量的耕地。耕地占补平衡政策和进出平衡政策的提出为植树造林、挖湖造景、农业结构调整等活动占用耕地提供了补救措施,是防止耕地减少的创新之举^[4]。

为确保耕地的可持续发展和维护国家粮食安全,政府应积极执行耕地保护政策,坚决实施耕地占补平衡和进出平衡政策,特别要重视保护永久基本农田,以确保耕地的数量和质量^[5-6]。学者们已经结合这两

种政策在耕地保护方面进行了大量的研究。吴丽叶等^[7]分析广西耕地占补平衡面临的形势与挑战,并提出了相关建议。袁承程等^[8]在耕地占补平衡政策下分析了2009—2018年湖南省湿地的变化情况以及政策对湿地变化产生的影响。梁健等^[4]以重庆市巴南区为例,结合耕地“进出平衡”政策分析了县域级别的耕地资源补充潜力。谭春婵等^[9]在耕地“进出平衡”背景下研究了广东省耕地恢复情况。现有研究通过多角度、多方法的形式,揭示了耕地保护政策在实施过程中对研究区域的影响,为未来政策的完善和实施提供了理论支持和实践指导。

模拟和预测土地利用变化是研究未来耕地发展情况的有力手段。对于保护耕地而言,平衡特色产业发展和农田保护至关重要^[10-11]。现有土地利用模拟研究主要分为数量预测和空间预测两方面。数量预测模型可分为灰色预测模型^[12-13]、马尔科夫链模型^[14-15]、神经网络模型^[16-17]等,而空间预测模型主要分为元胞自动机模型 (cellular automata, CA)^[18-19]、CLUE模型^[20-21]、多智能体模型 (multi-agent system, MAS)^[22-23]等。而随着研究的不断探索,数量和空间预测相耦合的模型也逐渐得到应用,并已成为当前土

地利用模拟研究的主流趋势。其中 PLUS 模型作为近年来土地利用模拟的热点模型,能够很好地应用于预测未来土地利用格局变化,为国土空间规划提供参考借鉴。该模型基于两个时期的土地利用数据,提出了一种新的土地利用转化规则挖掘框架,是基于多类型斑块生成策略的 CA 模型,更有利于模拟真实景观^[24-25]。近年来,PLUS 模型已被广泛用于模拟预测多情景下土地利用变化^[26],评估生态系统服务^[27]等。

已有研究为耕地保护政策实施和区域国土空间规划提供了有效的政策建议和科学依据,但在永久基本农田保护方面仍有待探究的空间。一是关于耕地“非粮化”的空间模拟研究不足,现有研究主要关注耕地保护政策下耕地现状的分析,然而,当前关于政策引导下未来耕地发展情况的研究相对不足,特别是未能充分考虑耕地“非粮化”对永久基本农田的潜在影响。二是特色产业用地预测与耕地保护结合不足,尽管区域特色产业的发展加速了耕地“非粮化”趋势,但目前的土地利用变化模拟研究很少针对特色产业用地的未来发展进行预测,并且未能有效结合耕地保护政策来布局未来特色产业用地。基于现有研究不足,本研究首次开展了枸杞种植用地模拟研究,旨在研究推进特色产业发展的同时确保永久基本农田得到有效保护的方法,以减轻耕地“非粮化”的趋势。中宁县作为宁夏回族自治区枸杞产业的核心地区,其枸杞种植对当地经济发展和农民增收起到了关键作用^[28-30]。因此本研究以宁夏回族自治区中宁县为研究对象,基于 2005—2021 年的国土调查数据,开展对枸杞用地的模拟研究。根据《中宁县现代枸杞产业高质量发展“十四五”规划》,结合中宁县实际情况和耕地进出平衡政策,本研究模拟中宁县枸杞发展达到“十四五”时期的未来分布图景,并分析中宁县枸杞种植用地对永久基本农田的占用情况,以期为中宁县未来农业空间布局及特色产业种植发展提供科学可靠的建议。

1 研究区概况

中宁县位于宁夏回族自治区中部西侧,腾格里沙漠以南,东临青铜峡市,西依沙坡头区,南接同心县,北靠内蒙古阿拉善左旗(图 1)。中心地理坐标约为东经 105°39′52″,北纬 37°29′109″。地形南高北低,平均海拔 1 184 m。县境东西宽约 50 km,南北长约 60 km,总面积约 33.45 hm²。中宁县位于宁夏中部干旱地带,是宁夏回族自治区较为干旱缺水的几个县(区)之一,降水稀少,蒸发强烈。中宁县是世界枸杞

的发源地和正宗原产地,该地区光照、温度、水文等各项条件均适合枸杞的种植,使其成为宁夏六大特色产业之一,并且是枸杞产业最大的集中连片区。

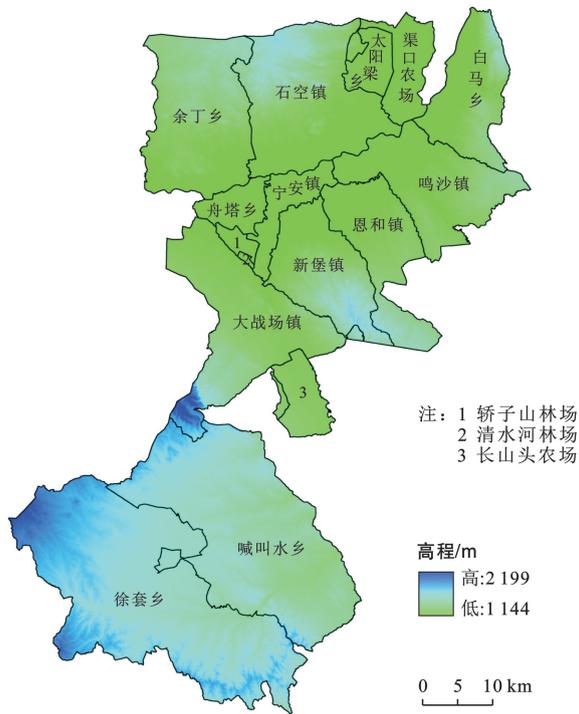


图 1 宁夏回族自治区中宁县地形图
Fig.1 Topographic map of Zhongning County, Ningxia Hui Autonomous Region

2 研究方法与数据来源

2.1 数据来源与预处理

本研究的数据源包括以下数据:中宁县第一次土地详查数据、第二次土地调查数据、第三次国土调查数据(以下简称“一调”“二调”“三调”)、中宁县枸杞种植遥感解译数据、永久基本农田数据与驱动力数据,空间分辨率统一为 30 m。研究使用了二调数据中的 2010 与 2015 年数据和三调数据中的 2020 和 2021 年数据。两次调查数据的发布,为中宁县土地资源管理与规划提供了重要的数据支撑。本研究基于第三次国土调查数据,并遵循三调土地利用分类系统以确保分类体系的统一,基于 PLUS 模型选取与研究区域土地利用变化密切相关的驱动因素,同时结合限制区域开展中宁县土地利用空间格局模拟,对未来枸杞种植用地可能占用永久基本农田的风险进行评价。

研究中以三调土地分类系统为基础,参照用地用海分类制定了所使用的土地分类系统。出于对农业设施保护的考虑以及对于城市、建制镇以及村庄的模拟需求,研究中将宁夏回族自治区的二级地类重分类为 12 个土地利用一级类(湿地、耕地、园地、林地、草

地、城市、建制镇、村庄、其他建设用地、水域及水利设施用地、农业设施用地和其他用地),同时通过 GIS 空间分析方法将枸杞数据镶嵌到土地利用数据中,具体的方法与说明见 2.2 研究方法。

考虑到土地利用变化是在不同时空范围内各种自然和人文因素共同作用的结果,同时枸杞的种植需要大量的灌溉用水,会受到水渠距离,公路运输以及劳动力种植等影响,研究中选取了 41 个空间变量作为土地利用变化相关的驱动因素(图 2)。其中自然因素主要影响土地资源的生产力,如地形、气候、土壤等影响因子;人文因素主要包括交通区位、经济增长、人口分布等。

另外,本研究将枸杞种植数据与土地利用数据相融合,在此过程中,首先保证两种数据坐标系和分辨率的完全一致,以实现数据的无缝整合。同时,按年份将枸杞数据镶嵌到土地利用数据中,以生成包含 13 个不同地类的土地利用数据集,其中包括枸杞种植地。为了验证这一镶嵌过程的准确性,本研究进行了视觉检查、边界对齐检查、统计信息对比以及像素值检查等验证步骤,主要包括检查枸杞种植地的空间位置等,以确保其与原始枸杞数据相匹配。此外,研究还对枸杞种植地的数量进行了验证,以确保镶嵌后的数据与原始数据一致,没有出现数量上的偏差。这些验证步骤有助于证明土地利用数据集在精度和准确性方面是可靠的,从而为后续研究和决策提供可信的数据基础。

2.2 研究方法

本研究运用 PLUS 模型模拟了 2025 年和 2035 年中宁县有无永久基本农田约束两种情景下的土地利用变化。首先,本研究使用 2005—2021 年的中宁县土地利用数据和 2020—2022 年的中宁县枸杞种植数据,通过分区统计的分析手段获得中宁县乡镇尺度的枸杞种植用地占用永久基本农田的相关数据。然后使用 2015 和 2020 年土地利用数据,结合多种驱动因子数据,挖掘得到每种土地利用类型的发展概率。其次,在执行耕地“进出平衡”的前提下,分别考虑了有永久基本农田约束和无永久基本农田约束的情况,以 2020 年中宁县永久基本农田为限制因素,利用 PLUS 模型模拟获得 2025 和 2035 年有无永久基本农田约束的土地利用结果。最后,通过 GIS 空间分析方法对中宁县乡镇尺度的枸杞占用永久基本农田的风险进行了评价(图 3)。

2.2.1 情景设定 本研究对中宁县未来情景的模拟原则是耕地不减少并尽量多种枸杞,设置有无永久基本农田约束两种情景,综合考虑土壤有机质、积温、区

域地形、社会经济情况、环境、气候、基础设施等方面的影响,利用 PLUS 模型模拟 2025,2035 年中宁县土地利用格局变化,预测未来中宁县枸杞种植格局分布,并分析未来其对永久基本农田的占用。本研究在《中宁县现代枸杞产业高质量发展“十四五”规划》发展目标基础上,结合中宁县实际情况,设定了无永久基本农田和农田保护目标约束(a)和有永久基本农田约束(b)两个情景进行模拟。具体未来目标设定如下:①林地在 2025 年增加 $1.89 \times 10^4 \text{ hm}^2$,2035 年增加 $5.28 \times 10^4 \text{ hm}^2$;②2025 和 2035 年,建设用地达到历史建设用地的约 1.2 和 1.3 倍,达到 3000 hm^2 ,接近城镇开发边界的总面积;③2025 和 2035 年,枸杞总量分别达到 $2.00 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 $2.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

2.2.2 PLUS 模型 在未来用地需求的驱动下,本研究利用 PLUS 模型,通过设置的两种不同情景来模拟预测土地利用变化情况开展模拟。PLUS 模型首先使用随机森林算法挖掘城市功能用地类型 k 的发展变化与驱动因子的映射关系 RFC_k ,以元胞内各类用地成分的发展变化为因变量,多种驱动因子为自变量,采用随机森林算法来挖掘因变量和自变量之间的映射关系:

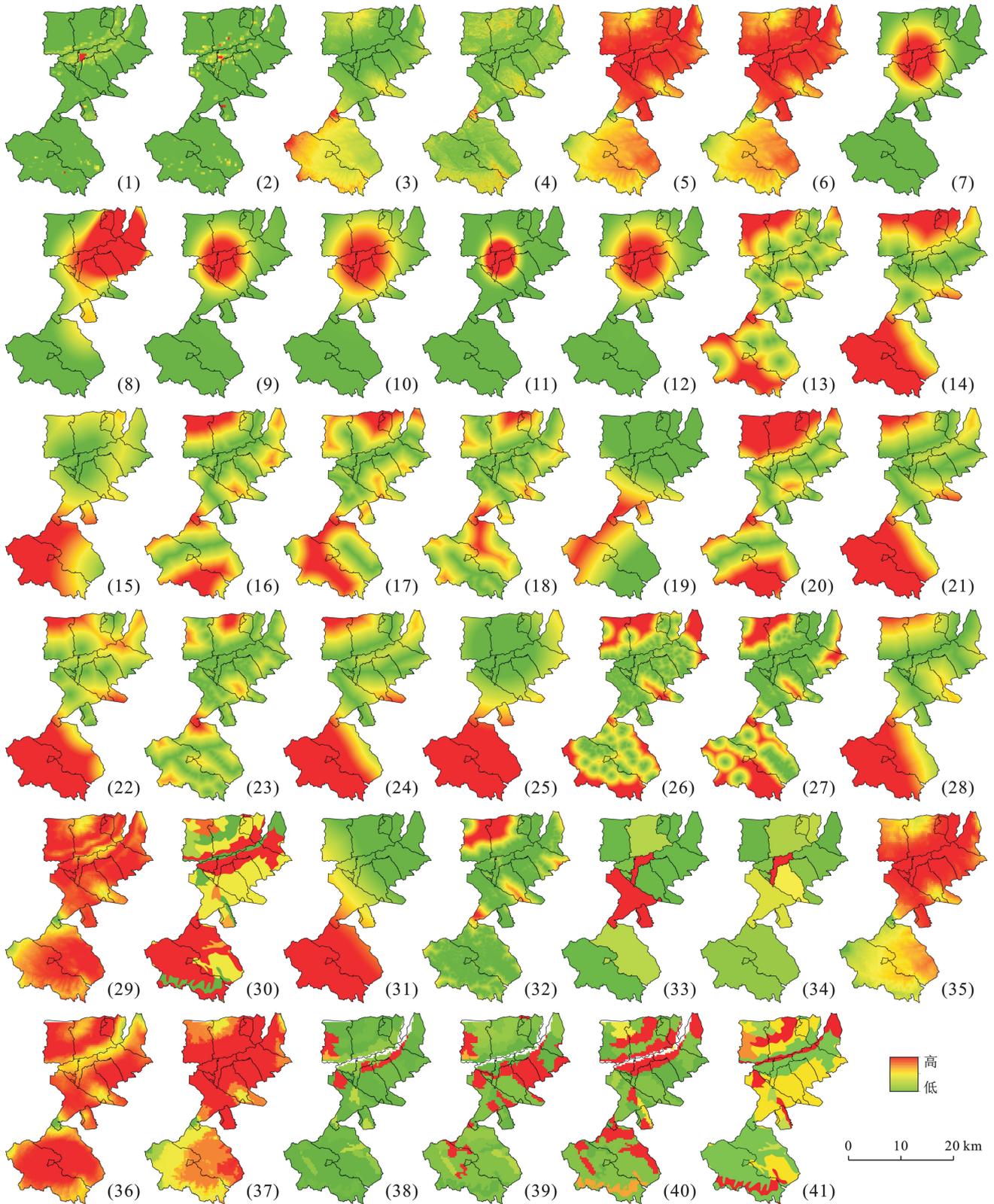
$$P_{i,k}^d(x) = \frac{\sum_{n=1}^M I[h_n(x)=d]}{M} \quad (1)$$

式中: RFC_k 是一个二分类器,所以 d 的值是 0 或 1。值为 1 表示在同一地点的历史时期由其他土地利用类型转变为土地利用类型 k ,而 0 代表其他转变; x 是由多个驱动因素组成的向量; $I(\cdot)$ 是决策树集的指示函数; $h_n(x)$ 是向量 x 的第 n 棵决策树的预测类型; M 是决策树的个数。获得各类用地的发展概率。

基于各类功能用地的发展概率,PLUS 模型可以对多类用地的相互竞争与转化开展模拟。首先组成各类用地的总发展概率:

$$\text{OP}_{i,k}^t = \begin{cases} P_{i,k}^1 \times (r \times \mu_k) \times D_k^t & (\text{if } \Omega_{i,k}^t = 0, r < P_{i,k}^1) \\ P_{i,k}^1 \times \Omega_{i,k}^t \times D_k^t & (\text{其他情况}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\text{OP}_{i,k}^t$ 是用地类型 k 在迭代时间 t 时,在元胞 i 上的总发展概率; $P_{i,k}$ 为随机森林输出的元胞 i 上用地类型 k 的发展概率; $\Omega_{i,k}^t$ 表示用地类型 k 在迭代时间 t ,元胞 i 上的邻域效应,即邻域内用地类型 k 的面积占邻域总面积的比值。 r 为 0—1 之间的随机数; μ_k 表示土地利用类型 k 斑块的生成阈值,由使用者设定。PLUS 模型设计了模拟中的多类随机种子机制,当 $\Omega_{i,k}^t = 0$ 且 $r < P_{i,k}$,模型生成用地 k 的随机种子; D_k^t 为 PLUS 的自适应系数,其自适应调整的公式为:



注:1 为人口; 2 为 GDP; 3 为高程; 4 为坡度; 5 为年平均气温; 6 为年平均降水; 7 为餐饮企业密度; 8 为风景名胜密度; 9 为公共设施密度; 10 为公司企业密度; 11 为体育休闲服务密度; 12 为政府机构及社会团体密度; 13 为到公路网障碍限制点距离; 14 为到铁路网障碍限制点距离; 15 为到一级公路距离; 16 为到二级公路距离; 17 为到三级公路距离; 18 为到四级公路距离; 19 为到等外公路距离; 20 为到高速公路距离; 21 为到铁路距离; 22 为到铁路连接点距离; 23 为到公路连接点距离; 24 为到铁路弧段层距离; 25 为到锰产业距离; 26 为到枸杞种植地距离; 27 为到沟渠和水库距离; 28 为到黄河及其支流距离; 29 为蒸散量; 30 为土壤有机质; 31 为到银川市距离; 32 为到永久基本农田距离; 33 为各镇 15—64 岁人口数; 34 为各镇人口数; 35 为年平均地温; 36 为昼夜温差; 37 为积温; 38 为土壤酸碱度; 39 为土壤含沙量; 40 为土壤有机质含碳量; 41 为土壤深度。

图 2 中宁县土地利用变化相关驱动因素分布

Fig.2 Distribution of driving factors related to land use change in Zhongning County

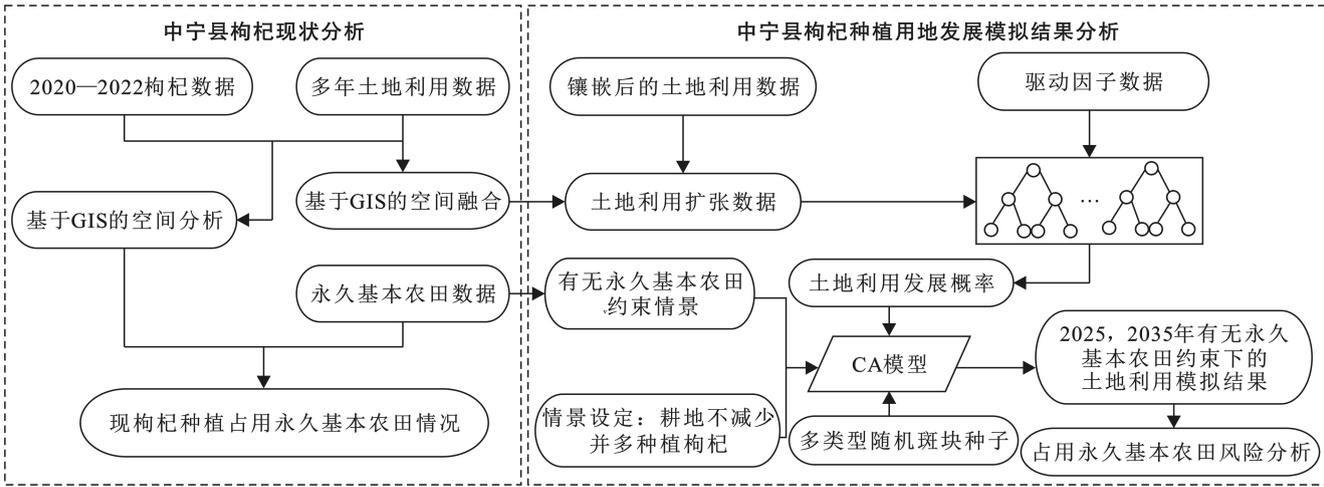


图 3 研究流程框架图

Fig.3 Flow chart of research process

$$D_k^t = \begin{cases} D_k^{t-1}if |G_k^{t-1}| \leq |G_k^{t-2}| \\ D_k^{t-1} \times \frac{G_k^{t-2}}{G_k^{t-1}} if 0 > G_k^{t-2} > G_k^{t-1} \\ D_k^{t-1} \times \frac{G_k^{t-1}}{G_k^{t-2}} if G_k^{t-1} > G_k^{t-2} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： G_k^{t-1} 和 G_k^{t-2} 是土地类型 k 在第 $t-1$ 和 $t-2$ 次迭代时离目标的距离。在 PLUS 的模拟过程中，各类功能用地通过轮盘进行竞争。如果类型 k 在轮盘选择中胜出，则模型判断在该元胞内，发生从其他用地到用地类型 k 的转化。为了更好地模拟多类斑块的生成，PLUS 模型提出了一种阈值递减机制：当一种新的土地利用类型在一轮竞争中胜出，则使用一个递减的阈值 τ 来判断转化是否发生，判断规则如下：

$$\sum_{k=1}^N |G_c^{t-1}| - \sum_{k=1}^N |G_c^t| < S \text{ 则, } d = d + 1$$

$$\begin{cases} \text{Change } P_{i,c}^1 > \tau \text{ 和 } TM_{k,c} = 1 \\ \text{Unchange } P_{i,c}^1 \leq \tau \text{ 或 } TM_{k,c} = 0 \end{cases} \quad (\tau = \delta^d \cdot r) \quad (4)$$

式中： δ 为递减阈值 τ 的衰减系数，范围为 $0 \sim 1$ ，根据专家的意见设定； r 为服从正态分布的随机值，均值为 1，方差设定为 0.0001（非常小），这使得递减阈值 τ 成为服从衰减规则的不确定值； d 为衰减次数；Step 为递减步长。 $TM_{k,c}$ 是定义土地利用类型 k 是否允许转换为类型 c 的转化矩阵。PLUS 模型经过模拟和迭代，输出最终的土地覆被变化的模式。

3 结果与分析

3.1 现有枸杞种植用地占用永久基本农田情况

根据空间分析结果显示，截止 2022 年，中宁县规模化枸杞种植用地共 8 326.67 hm^2 ，其中占用永久基本农田面积为 546.67 hm^2 ，占枸杞种植总面积的 6.57%。在各乡镇中，大战场镇占用永久基本农田面积最多，达到 186.67 hm^2 ，占永久基本农田被占用总面

积的 33.57%；其次为恩和镇（106.67 hm^2 ，19.04%），舟塔乡（52.03 hm^2 ，9.50%），新堡镇（41.33 hm^2 ，7.48%），其他乡镇占用永久基本农田面积较小，均不足全县被占用永久基本农田总面积的 5%，详见图 4。为了响应枸杞产业高质量发展相关政策，相关部门加大了枸杞种植适宜区域的用地规模，如舟塔乡、大战场镇、恩和镇等。从图 4 可以看出，枸杞种植对永久基本农田的占用主要分布在中宁县中北部地区，位于黄河南岸和清水河两岸，且该区域枸杞种植适宜性较强，因此加剧了该地区永久基本农田被占用的情况。



图 4 2022 年中宁县枸杞种植用地占用永久基本农田面积情况分布

Fig.4 Distribution of permanent basic farmland area occupied by *Lycium barbarum* planting land at Zhongning County in 2022

3.2 模拟结果分析

3.2.1 模拟精度验证 本文首先以2015年土地利用数据为基础,模拟了2021年中宁县土地利用变化,并将模拟结果与真实数据进行比对,以验证PLUS模型的模拟精度。模拟过程中,除了考虑水域对枸杞用地发展的限制,还考虑到:①坡度大于25的地方,不能发展成城市/建制镇,②城市内部的小绿地,不能发展成城市/建制镇。在进行土地覆盖模拟时,默认将邻域效应设置为3,模拟结果通过总体精度(OA)、kappa系数、FoM指数进行验证,验证阶段的这3个指标分别为0.62,0.76和0.16。综合而言,模型总体模拟效果较好,可以用于未来情景下的中宁县各类用地的模拟。

3.2.2 枸杞种植地发展变化模拟 基于2021年中宁

县土地利用数据,本研究模拟了在有永久基本农田约束两种情景下2025和2035年中宁县的土地利用格局变化。在模拟过程中,考虑了耕地的“进出平衡”原则,即耕地总面积保持不变。根据模拟结果(图5),在有永久基本农田约束两种情景下,2025年枸杞新增面积分别可达到3806.67和4876.67 hm²,2035年枸杞新增面积分别可达到4980.00和8200.00 hm²,且新增枸杞主要集中在原来枸杞用地的周围。其中在无永久基本农田约束情景下,枸杞新增面积更好地达到了情景目标。通过对比两种情景,研究结果发现永久基本农田的约束限制了枸杞种植面积的扩张速度。在无永久基本农田约束条件下,枸杞种植面积更容易达到情景目标。

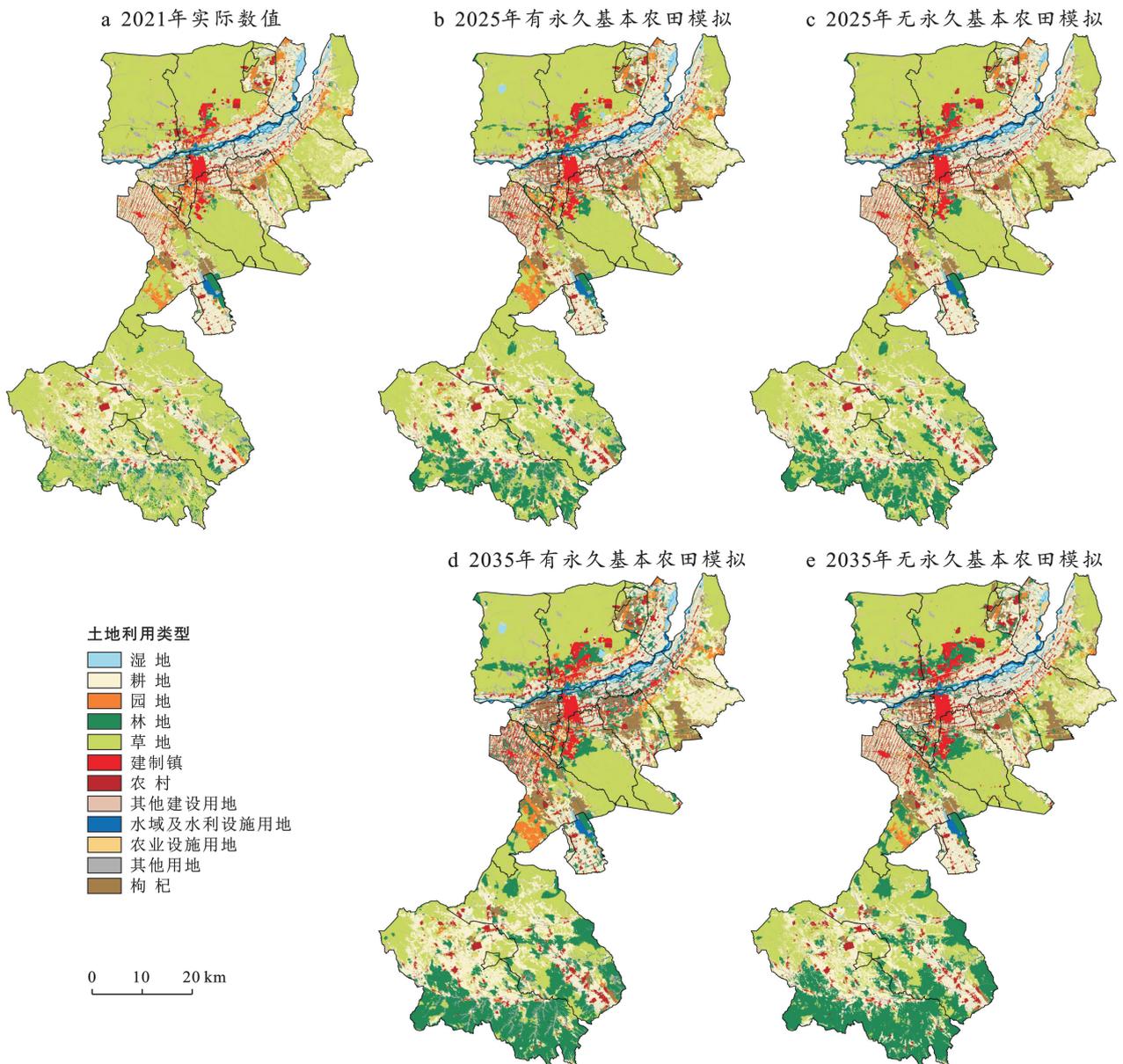


图5 两种情景(有永久基本农田和无永久基本农田)下2025和2035年中宁县土地利用格局模拟结果
Fig.5 Simulation of land use pattern at Zhongning County scenarios under two scenarios (with permanent basic farmland and without permanent basic farmland) in 2025 and 2035

如图 6 所示,在无永久基本农田约束情景下,新增枸杞面积来源于永久基本农田和非永久基本农田用地类型。2025 年新增枸杞面积中,1 100 hm² 来源于永久基本农田,3 786.67 hm² 则来源于非永久基本农田。其中新增最多的是鸣沙镇,可达到 1 180.00 hm²。其次是大战场镇,2025 年大战场镇预计可种植枸杞 2 846.67 hm²,新增枸杞面积可达到 1 006.67 hm²。清水河林场新增枸杞面积最少,仅为 4 hm²。同时研究发现渠口农场、石空镇、余丁乡 3 个乡镇枸杞种植面积增长超过了原来的 2 倍。例如渠口农场 2022 年枸杞种植面积仅为 26.68 hm²,而 2025 将新增 113.33 hm²,枸杞种植面积可能达到原来的 5.25 倍;石空镇在 2025 年新增 93.33 hm² 枸杞种植面积,可达到原来的 9.92 倍。2035 年枸杞模拟结果显示,2 386.67 hm² 的新增枸杞用地来源于永久基本农田,5 813.33 hm² 来源于非永久基本农田。其中鸣沙镇枸杞种植面积最多,其新增枸杞面积也是最高,可达到 1 493.33 hm²;清水河林场新增枸杞种植面积最

少,只有 13.33 hm²。同时在 2035 年,恩和镇、太阳梁乡、渠口农场等 10 个乡镇枸杞种植面积增长超过原来的 2 倍。其中渠口农场 2035 年枸杞种植面积为 266.67 hm²,增长为原来的 10.23 倍。

而在有永久基本农田约束情景下,新增枸杞面积仅来源于非永久基本农田。2025 和 2035 年枸杞种植面积分别有 3 806.67 和 4 980.00 hm² 来源于非永久基本农田。其中鸣沙镇新增枸杞面积最多,分别可达到 1 126.67 hm² 和 1 306.67 hm²。而清水河林场最少,均为 6.67 hm²。同时,2025 年渠口农场、石空镇、余丁乡 3 个乡镇枸杞种植面积增长超过原来的 2 倍,例如渠口农场枸杞种植面积可达到 166.67 hm²,是原来枸杞面积的 6.41 倍。到 2035 年,太阳梁乡、余丁乡、石空镇等 5 个乡镇枸杞种植面积可能达到原来的 2 倍以上。通过对比两种情景,研究发现渠口农场、石空镇、余丁乡和轿子山林场等多个乡镇枸杞种植面积可能增长为原来的 2 倍或 2 倍以上,说明枸杞种植用地在这些镇区发展潜力较大。

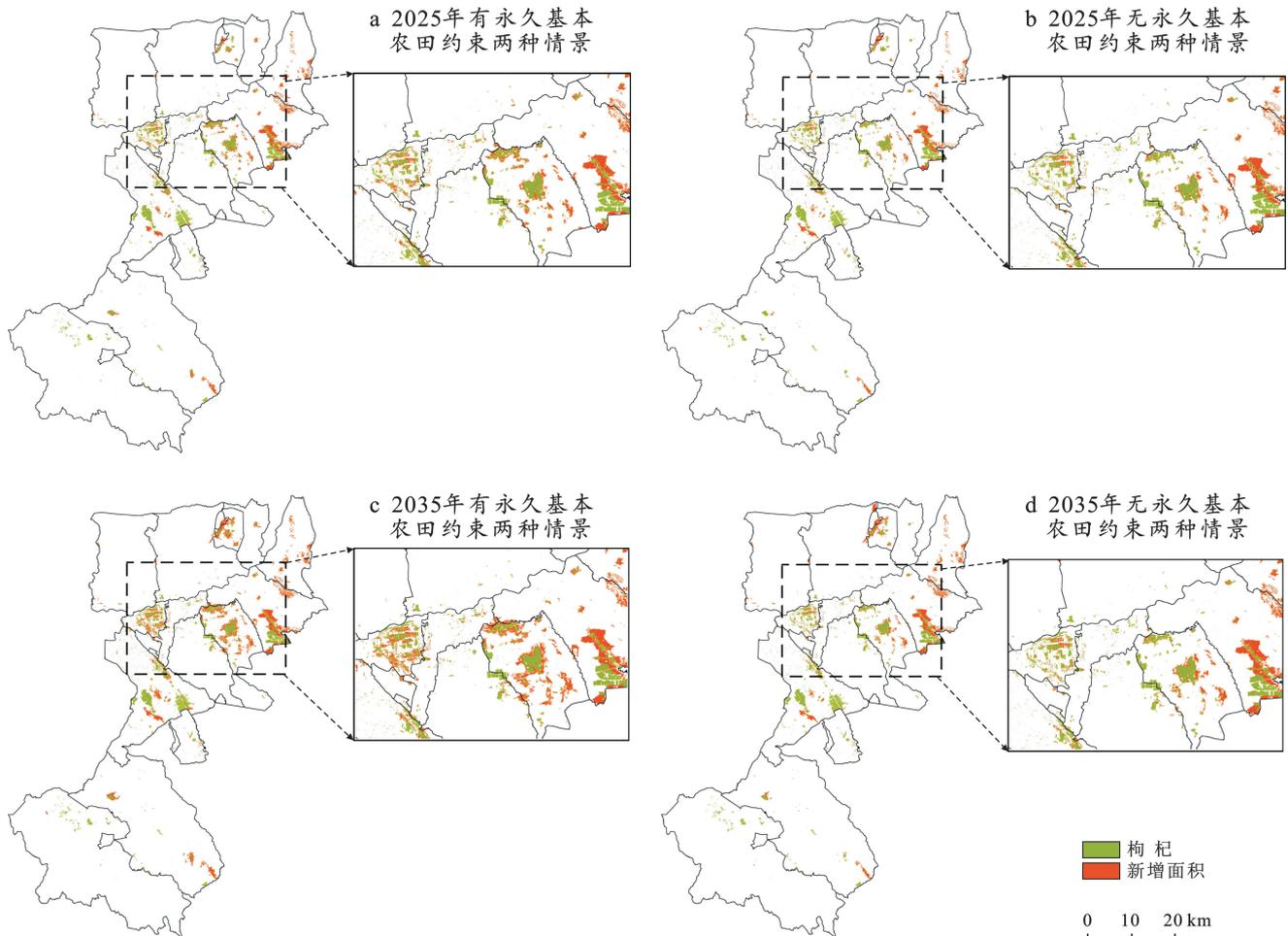


图 6 两种情景(有永久基本农田和无永久基本农田)下 2025 和 2035 年新增枸杞种植模拟结果

Fig.6 Simulation of new *Lycium barbarum* planting under two scenarios (with permanent basic farmland and without permanent basic farmland) in 2025 and 2035

3.3 未来枸杞种植用地占用永久基本农田风险分析

在有永久基本农田约束两种情景下,无永久基本农田约束下存在枸杞侵占永久基本农田的情况,如图 7 所示。在无永久基本农田约束情景下,2025 年中宁县枸杞发展共侵占永久基本农田面积可能达到 1 100.00 hm²,其中恩和镇永久基本农田面积被侵占最多,可达 513.59 hm²,其次是大战场镇,被侵占永久基本农田面积为 406.67 hm²,而徐套乡的永久基本农田面积被侵占最少,仅有 0.13 hm²。2035 年,模型预测中宁县枸杞发展共侵占永久基本农田 2 386.67 hm²,

其中恩和镇同样是被侵占永久基本农田面积最多的地区,可达到 826.67 hm²;而徐套乡被侵占永久基本农田面积最少,仅有 0.13 hm²。

通过对比两种情景下新增枸杞面积结果,研究发现在永久基本农田被侵占较为严重的区域,新增的枸杞面积也较多。换言之,面临永久基本农田被侵占风险较高的地区也是适合发展为新增枸杞用地的地区。对于这些地区,相关部门需要采取有效的管理措施,监测和控制枸杞种植的规模,以保护农田资源和维护生态平衡。

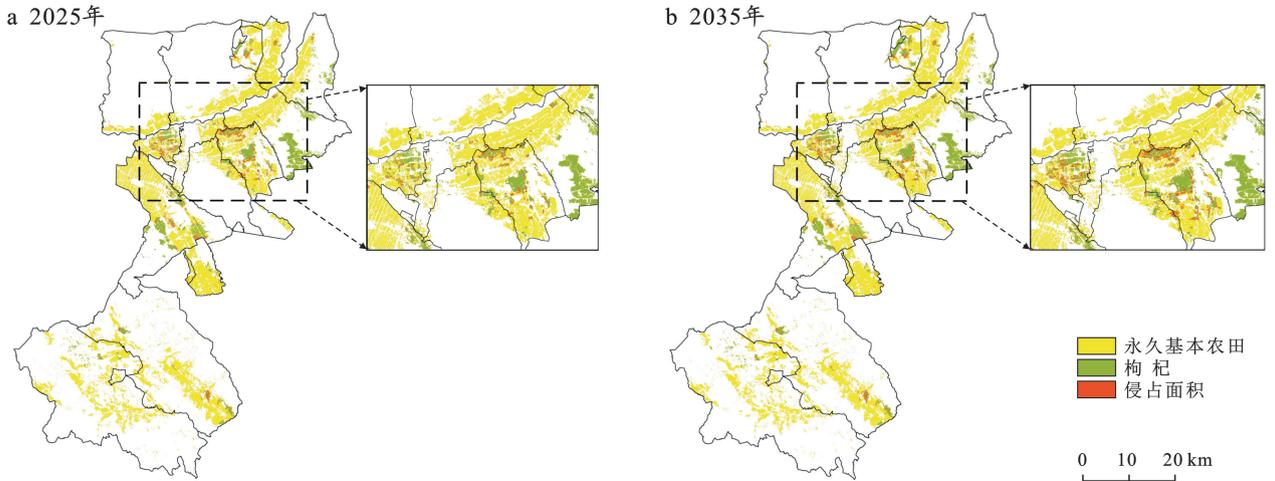


图 7 无永久基本农田约束下 2025 和 2035 年枸杞侵占永久基本农田模拟结果
Fig.7 Simulation of permanent basic farmland encroachment by *Lycium barbarum* in 2025 and 2035 under without permanent basic farmland constraint

4 讨论

枸杞产业作为中国农业的重要组成部分,在宁夏农业经济中扮演着重要的推动角色。然而,随着枸杞产业规模的不断扩大,土地资源的利用和保护正面临新的挑战,特别是耕地被侵占导致耕地“非粮化”问题日益突出。为了抑制耕地的“非粮化”趋势,管理者提出耕地“进出平衡”政策,用于严格控制耕地用途,保障耕地保有量,加强永久基本农田的保护。这有助于加强土地资源的可持续利用,保护农业生产和生态环境的可持续发展。

本研究利用 PLUS 模型,从耕地“进出平衡”政策的角度出发,设置有无永久基本农田两种情景,模拟未来中宁县土地利用格局变化及枸杞种植用地发展,同时分析了未来枸杞发展对永久基本农田的影响。研究结果发现:①在无永久基本农田约束下,各乡镇枸杞种植用地发展速率加快,永久基本农田被侵占严重,耕地“非粮化”现象加剧。因此在现行耕地保护政策下,要进一步优化调整枸杞产业发展规划布局,结

合国土空间规划编制,统筹考虑产业发展的规模、结构、布局和时序,促进形成规模适度、布局合理、配套完善的产业发展空间。②在永久基本农田被侵占严重的地区,枸杞适宜性发展概率也较高。未来在规划枸杞种植用地时,要尽量避免占用永久基本农田,如需占用部分耕地则保证从其他地区开辟耕地进行补充,切实保障耕地总量不减少;同时要加强对永久基本农田被占用高风险地区的监管。

此外本研究也存在一定的局限性,在未来的研究探索中还需要进一步深入改进。未来研究可以使用更长时间序列和更高准确度的历史枸杞数据,使模拟结果更加准确;其次是深层次量化耕地“进出平衡”政策,使其能够在模拟过程中更好地体现出来。后续研究可根据政策和枸杞用地发展的情况,考虑更多的枸杞用地的驱动因子,进一步增加模拟的准确性。

5 结论

(1) 在枸杞种植过程中,对永久基本农田的占用主要发生在中宁县中北部地区的枸杞适宜区域。

(2) 在模拟及风险评价中发现,中宁县永久基本农田政策对枸杞发展的约束很大。在无永久基本农田约束的情况下,到2035年,枸杞种植用地有望接近或突破 $1.65 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。但在有永久基本农田约束的情况下,枸杞种植用地在接近 $1.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 时已达极限,较难实现中宁县枸杞“十四五”规划中到2035年枸杞种植面积增至 $2.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的目标。

(3) 在无永久基本农田约束情景下,2025年枸杞发展可能侵占 $1\ 100.00 \text{ hm}^2$ 永久基本农田,而2035年永久基本农田的侵占可能达到 $2\ 386.67 \text{ hm}^2$;永久基本农田被侵占风险较高的地区同时也是枸杞用地发展适宜性较高的地区。

综上所述,相关部门应当加强对中宁县新增枸杞面积较多地区和未来被侵占风险较大地区永久基本农田的保护。同时,有关部门需优化枸杞种植布局,合理调整种植目标,确保农田保护与产业发展并重。未来研究应进一步探索研究区现有和未来的枸杞用地发展潜力,以更好地平衡经济发展和耕地保护,促进研究区的农业可持续发展。本研究可为合理的枸杞产业规划枸杞和永久基本农田保护提供科学的指导。

参考文献 (References)

- [1] 赵梦珠.耕地多功能视角下都市区永久基本农田综合评价及分级研究:以杭州市为例[D].浙江杭州:浙江大学,2019.
Zhao Mengzhu. Comprehensive evaluation and classification of permanent basic farmland in metropolitan area from the perspective of farmland multi-function: A case study of Hangzhou City [D]. Hangzhou Zhejiang: Zhejiang University, 2019.
- [2] 汤怀志,桑玲玲,郎文聚.我国耕地占补平衡政策实施困境及科技创新方向[J].中国科学院院刊,2020,35(5):637-644.
Tang Huaizhi, Sang Lingling, Yun Wenju. China's cultivated land balance policy implementation dilemma and direction of scientific and technological innovation [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(5): 637-644.
- [3] 牛善栋,方斌.中国耕地保护制度70年:历史嬗变、现实探源及路径优化[J].中国土地科学,2019,33(10):1-12.
Niu Shandong, Fang Bin. Cultivated land protection system in China from 1949 to 2019: Historical evolution, realistic origin exploration and path optimization [J]. China Land Science, 2019, 33(10): 1-12.
- [4] 梁健,梁婧祎.县域“进出平衡”耕地资源补充潜力分析:以重庆市巴南区为例[J/OL].自然资源情报,1-8.[2024-09-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1798.N.20230620.0910.002.html>.
- [5] Liang Jian, Liao Jingwei. Analysis of “In-out balance” cultivated land resources supplement potential: Taking Banan District of Chongqing as an example [J/OL]. Natural Resource Information, 1-8.[2024-09-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1798.N.20230620.0910.002.html>.
- [5] Wang Liye, Zheng Weiwei, Tang Lanping, et al. Spatial optimization of urban land and cropland based on land production capacity to balance cropland protection and ecological conservation [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 285: 112054.
- [6] Tian Yasi, Chen Junyi. Suburban sprawl measurement and landscape analysis of cropland and ecological land: A case study of Jiangsu Province, China [J]. Growth and Change, 2022, 53(3): 1282-1305.
- [7] 吴丽叶,张雁.大力垦造水田落实耕地占补平衡的广西模式[J].中国土地,2023(2):30-32.
Wu Liye, Zhang Yan. The Guangxi model of vigorously reclaiming paddy fields to implement the balance of cultivated land occupation and compensation [J]. China Land, 2023(2): 30-32.
- [8] 袁承程,魏雪,王林林,等.2009—2018年耕地占补平衡政策对湖南省湿地变化的影响机制与特征研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(12):2642-2652.
Yuan Chengcheng, Wei Xue, Wang Linlin, et al. Impacting mechanism and characteristics of cultivated land requisition-compensation balance policy on wetlands change in Hunan Province from 2009 to 2018 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(12): 2642-2652.
- [9] 谭春婵,熊侣英,朱君玉,等.“进出平衡”背景下广东省耕地恢复研究[J].中国国土资源经济,2023,36(9):63-69.
Tan Chunchan, Xiong Lvying, Zhu Junyu, et al. Research on arable land restoration in Guangdong Province under the background of “in-out balance” [J]. China Land and Resources Economy, 2023, 36(9): 63-69.
- [10] Ke Xinli, van Vliet J, Zhou Ting, et al. Direct and indirect loss of natural habitat due to built-up area expansion: A model-based analysis for the city of Wuhan, China [J]. Land Use Policy, 2018, 74: 231-239.
- [11] Li Xia, Chen Yimin. Projecting the future impacts of China's cropland balance policy on ecosystem services under the shared socioeconomic pathways [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 250: 119489.
- [12] Hou Yifeng, Chen Yaning, Li Zhi, et al. Land use dynamic changes in an arid inland river basin based on multi-scenario simulation [J]. Remote Sensing, 2022, 14(12): 2797.
- [13] Jiao Mengyu, Hu Mengmeng, Xia Beicheng. Spatio-

- temporal dynamic simulation of land-use and landscape-pattern in the Pearl River delta, China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019,49:101581.
- [14] Wu Hao, Li Zhen, Clarke K C, et al. Examining the sensitivity of spatial scale in cellular automata Markov chain simulation of land use change [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019,33(5):1040-1061.
- [15] Wang Qihao, Liu Dongya, Gao Feiyao, et al. A partitioned and heterogeneous land-use simulation model by integrating CA and Markov model [J]. *Land*, 2023,12(2):409.
- [16] Gharaibeh A, Shaamala A, Obeidat R, et al. Improving land-use change modeling by integrating ANN with Cellular Automata-Markov Chain model [J]. *Heliyon*, 2020,6(9):e05092.
- [17] Mozaffaree Pour N, Karasov O, Burdun I, et al. Simulation of land use/land cover changes and urban expansion in Estonia by a hybrid ANN-CA-MCA model and utilizing spectral-textural indices [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022,194(8):584.
- [18] Xie Hualin, Zhu Zhenhong, He Yafen. Regulation simulation of land-use ecological security, based on a CA model and GIS: A case-study in Xingguo County, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2022,33(10):1564-1578.
- [19] Molinero-Parejo R, Aguilera-Benavente F, Gómez-Delgado M, et al. Combining a land parcel cellular automata (LP-CA) model with participatory approaches in the simulation of disruptive future scenarios of urban land use change [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2023,99:101895.
- [20] Liao Guitang, He Peng, Gao Xuesong, et al. Land use optimization of rural production-living-ecological space at different scales based on the BP-ANN and CLUE-S models [J]. *Ecological Indicators*, 2022,137:108710.
- [21] Kucsicsa G, Popovici E A, Bălțeanu D, et al. Future land use/cover changes in Romania: Regional simulations based on CLUE-S model and CORINE land cover database [J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2019,15(1):75-90.
- [22] Huang Qiang, Song Wei. A land-use spatial optimum allocation model coupling a multi-agent system with the shuffled frog leaping algorithm [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019,77:101360.
- [23] Xia Min, Zhang Yanyuan, Zhang Zihong, et al. Modeling agricultural land use change in a rapid urbanizing town: Linking the decisions of government, peasant households and enterprises [J]. *Land Use Policy*, 2020,90:104266.
- [24] Gao Lina, Tao Fei, Liu Runrui, et al. Multi-scenario simulation and ecological risk analysis of land use based on the PLUS model: A case study of Nanjing [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022,85:104055.
- [25] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021,85:101569.
- [26] Xu Linfeng, Liu Xuan, Tong De, et al. Forecasting urban land use change based on cellular automata and the PLUS model [J]. *Land*, 2022,11(5):652.
- [27] 李安林,周艳,唐丽毅,等.怒江州土地利用模拟及生态系统服务价值评估:基于 PLUS 模型的多情景分析[J].*中国农业资源与区划*,2023,44(1):140-149.
- Li Anlin, Zhou Yan, Tang Liyi, et al. Land use simulation and ecosystem services values evaluation in Nujiang Prefecture: A multiple-scenario analysis based on plus model [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023,44(1):140-149.
- [28] 李香芳,李栋梁,段晓凤,等.宁夏枸杞生长季气候变化特征及其影响[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2019,27(12):1789-1798.
- Li Xiangfang, Li Dongliang, Duan Xiaofeng, et al. Variations and effects of climate in growth period of *Lycium barbarum* L. in Ningxia [J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2019,27(12):1789-1798.
- [29] 王朝良.宁夏中宁县枸杞产业发展创新与配套制度[J].*沈阳农业大学学报(社会科学版)*,2007,9(5):670-673.
- Wang Chaoliang. On development innovation and supporting system of agricultural industry in Zhongning County, Ningxia Autonomous Region [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2007,9(5):670-673.
- [30] 李强,梁勇,闵庆文,等.宁夏中宁枸杞产业发展现状及对策研究[J].*北方园艺*,2015(9):168-171.
- Li Qiang, Liang Yong, Min Qingwen, et al. Development status and countermeasures of *Lycium barbarum* L. Industry in Zhongning County [J]. *Northern Horticulture*, 2015(9):168-171.